

Anhang zu:

**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

Anhang

- A1. Risikobasierte Untersuchungen zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln
- A2. Einfluss von Tunnelmerkmalen auf die Fahrzeugunfallrate
- A3. Auswertungen nach der Unfallschwere

A1. Risikobasierte Untersuchungen zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Einleitung

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden als Basis für mögliche Weiterentwicklungen der Methodik zur Sicherheitsbewertung von Straßentunneln zahlreiche Studien und Untersuchungen gesammelt und analysiert. Ziel der Untersuchungen war es, das Vorgehen gemäß Heft B66 aus heutiger Sicht einzuordnen und gleichzeitig Ansätze und Grundlagen zu identifizieren, die hinsichtlich Weiterentwicklung des Verfahrens von Interesse sein könnten. Zu diesem Zweck wurden sowohl regulatorische Grundlagen wie Normen und Richtlinien als auch Studien und anderweitige Untersuchungen im Kontext von risikobasierten Sicherheitsbewertungen für Straßentunnel analysiert.

Nachfolgend sind die wichtigsten Ergebnisse ausgewählter Grundlagen in Form von Factsheets zusammengefasst. Aus dem Blickwinkel der Weiterentwicklung der Methodik werden im Zuge des weiteren Bearbeitungsverlaufs gegebenenfalls weitere Analysen vorgenommen.

Anwendung im Kontext regulatorischer Vorgaben im Ausland

Österreich: Tunnel-Risikoanalysemodell / RVS 09.03.11

Methode / Verfahren	Österreich / 2015
<p>Tunnel-Risikoanalysemodell / RVS 09.03.11 Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, "RVS 09.03.11 - Tunnel risk modell (Tu-RisMo)", 09.03.2015</p>	
Beschreibung	
<p>Die RVS 09.03.11 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 Erfahrungen und Erfordernisse in 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.</p> <p>Mit Hilfe des Tunnel-Risikoanalysemodells 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. Dies geschieht in zwei Schritten, der Häufigkeitsanalyse und der Schadensausmaßanalyse. Im Zuge der Risikoermittlung werden die Risikoanteile infolge mechanischer Schadenswirkungen, Brandwirkungen und Gefahrgutwirkungen getrennt dargestellt und können auch getrennt bewertet werden.</p> <p>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 wie bei der deutschen Methode – im Anwendungsfall detaillierte Simulationen für Schadensausmaßermittlung der Brandszenarien durchgeführt werden.</p>	
Anwendungszweck	
<p>Das Tunnel-Risikomodell dient der gesamthaften sicherheitstechnischen Bewertung von Straßentunneln als zusätzliches Werkzeug, in Ergänzung zu gesetzlichen Vorgaben und Richtlinien. Es kann für verschiedene Zwecke eingesetzt werden, z.B. zum Nachweis der Einhaltung des Mindestsicherheitsniveaus bei geringfügigen Abweichungen von Mindestanforderungen, zur Bewertung von besonderen Charakteristiken, von besonderen Betriebszuständen (z.B. Sanierungsphase) oder Sicherheitsmaßnahmen aller Art. Des Weiteren findet es Anwendung in Fragen der Zuordnung eines Tunnels zu einer Gefährdungsklasse als Grundlage für die Ausstattungsfestlegung.</p>	
Risikobewertung	
<p>Risikoanalyse</p>	<p>Die Methodik des Risikoanalysemodells besteht aus zwei Kernelementen, nämlich der quantitativen Häufigkeitsanalyse in Form eines Ereignisbaumes und der quantitativen Schadensausmaßanalyse.</p> <p>In der Ereignisbaumanalyse werden die Häufigkeiten eines Sets bestimmter Schadenszenarien berechnet. Es wird von einem Initialereignis, mit bekannter Häufigkeit, ausgegangen und mittels relativer Häufigkeiten mögliche unterschiedliche Ereigniswege entwickelt.</p> <p>Folgende Szenarien werden dabei berücksichtigt:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 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 mit Hilfe eines komplexen, aus mehreren Modulen bestehenden Modells berechnet. Hierbei werden ein instationäres ein-dimensionales 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.

Die Schadenswirkungen von Unfällen mit Beteiligung von Gefahrgut werden in der Schadensausmaßanalyse nur grob vereinfacht berücksichtigt (auf Basis von Schadensausmaßwerten sehr großer Brände). Es gibt aber auch eine Modelladaptierung, die eine vollwertige Gefahrgutrisikoanalyse ermöglicht (Erweiterung der Szenarien um Explosionen, Gasbrände und Giftgasfreisetzungen) einschließlich Darstellung der Ergebnisse als FN-Diagramm.

Durch Multiplikation der Häufigkeit der einzelnen Ereigniswege mit den jeweils zugehörigen Schadensausmaßwerten werden Teilrisiken berechnet. Durch Summenbildung über alle Teilrisiken wird der Risikoerwartungswert (statistisch erwartbare Todesopfer/Jahr) für den untersuchten Tunnel ermittelt.

Erfüllt ein Tunnel bestimmte Anwendungsvoraussetzungen, kann das Standardrisikoanalysemodell verwendet werden (dabei wird auf vorgegebene Schadensausmaßwerte bezüglich Brand zurückgegriffen). Das detaillierte Risikoanalysemodell (Schadensausmaßwerte werden individuell berechnet) kommt dann zur Anwendung, wenn auch jene Parameter, die den Ablauf eines Brandszenarios nach Brandausbruch beeinflussen (u.a. Brandentwicklung, Längsströmung mit Abbildung aller Einflussfaktoren, wie Initialströmung, Längsneigung, Brandrauchentlüftung, Detektion, Gegebenheiten für die Selbstrettung der Brandbekämpfungsmaßnahmen ...) im Risikomodell explizit abgebildet werden müssen, um valide Aussagen für die betreffende Fragestellung zu erhalten.

Risikobeurteilung

Die Risikobewertung erfolgt gemäß RVS 09.03.11 in Form eines Relativvergleichs mit einem Referenzunnel. Hierbei wird ein Referenzunnel definiert, der den Mindestsicherheitsanforderungen gemäß STSG vollständig entspricht und der daher ein akzeptables Risikoniveau aufweist. Es werden die resultierenden Risikowerte, einerseits des betrachteten Tunnels und andererseits des Referenztunnels einander gegenübergestellt. Dieses Prinzip kann auch angewendet werden, um die risikobezogene Gleichwertigkeit einer alternativen Lösung mit einer Standardlösung nachzuweisen.

Ergänzend wird auch ein absoluter Bewertungsansatz angewendet. Dabei wird der untersuchte Tunnel anhand des Absolutwertes des Gesamtrisikos in eine von vier Gefährdungsklassen eingestuft. Diese determinieren den für einen Tunnel anzuwendenden Ausrüstungsstandard.

Bezugsgröße für die Risikobewertung ist der gesamte Tunnel (beide Fahrtrichtungen eines Einflussbereichs, Portale im Freien beidseits der Portale von 50m): Bewertungsgröße ist der Risikoerwartungswert des Gesamtrisikos, wobei mechanische Anteile, Brandanteile und Gefahrgutanteile gesondert dargestellt werden. Dies eröffnet

weitreichende Kompensationsmöglichkeiten.	
Maßnahmen	Wenn das Mindestsicherheitsniveau gemäß STSG nicht eingehalten werden kann sind Risikominimierende Maßnahmen (verkehrlich, betrieblich, baulich oder ausrüstungstechnisch) erforderlich. Die risikominimierende Wirksamkeit der Maßnahmen ist quantitativ mittels Abbildung im Risikomodell zu bewerten. Bei der Entscheidungsfindung zur Auswahl von Maßnahmen kommen Kosten-Wirksamkeitsüberlegungen zur Anwendung.
Anwendungserfahrungen	
<p>Das österreichische Risikoanalysemodell ist aufgrund seines modularen Aufbaus für alle Arten von Tunneln und für unterschiedlichste Fragestellungen anwendbar. Eine Vielzahl von Einflussfaktoren wurde bereits auf seine Wirksamkeit auf das Risiko bzw. die Interaktion mit anderen Faktoren/Maßnahmen untersucht.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Einfluss der Längsneigung ▪ Einfluss variabler Tunnelquerschnitte bzw. spezieller Querschnittsformen (z.B. große Höhe) ▪ Einfluss von Lüftungssystemen, Lüftungsregelungen aller Art (inkl. Schwächen infolge Alterung und dergleichen) ▪ Einfluss von Verkehrsmanagementmaßnahmen aller Art ▪ Einfluss von Stau ▪ Einfluss unterschiedlicher Fluchtweglängen ▪ Einfluss von Brandbekämpfungsaktivitäten (BBA, Portalfeuerwehr) ▪ Einfluss von Portalschrankenanlagen ▪ Einfluss von Standstreifen ▪ Einfluss von Maßnahmen die den Zeitablauf Detektion, Alarmierung beeinflussen <p>Das Risikomodell wurde neben Österreich, Schweiz und Deutschland bereits auch in etlichen anderen europäischen Ländern (vor allem solche, die keine eigenen Risikomodelle entwickelt haben, wie Slowenien, Kroatien, Bosnien, Slowakei, Portugal, Griechenland, Irland) sowie auf internationaler Ebene (Neuseeland, Japan, USA, Kolumbien) eingesetzt. Für den Einsatz in der Slowakei wurde eine eigene offizielle Version des Standardmodells entwickelt. Für den Einsatz in Deutschland wurde das Modell an die Spezifikationen des Heftes B66 angepasst.</p> <p>Die Erstellung des Ereignisbaumes zur Quantifizierung der Häufigkeiten der einzelnen Ereignisszenarien erfordert nur geringen Aufwand; die Simulationen zur Quantifizierung der Brand-Schadensausmaßwerte (detaillierte Methode) erfordern hohen Aufwand und sehr hohe Rechenkapazitäten; einzelne Ingenieurbüros haben allerdings mittlerweile Softwaretools entwickelt, die den Bearbeitungsaufwand deutlich verringern.</p> <p>Anwender sind: Ingenieurbüros in Österreich, Deutschland, Dänemark im Auftrag der Tunnelbetreiber bzw. der Behörde</p>	
Inputs / Ansätze zur Weiterentwicklung der Methodik gemäß BAST, Heft B66	
<p>Im Gegensatz zur RVS wird in der BAST-Methodik das Schadensausmaß infolge Brands nur für einzelne Teilszenarien explizit mit FDS modelliert und berechnet. Für einen Teil der Teilszenarien wird anhand der ermittelten Modellwerte das Schadensausmaß über Analogieschlüsse und Abschätzungen hergeleitet. Im Vergleich zum Verfahren nach Heft B66 basiert das österreichische Verfahren auf einer höheren Anzahl von Brandszenarien, abhängig von Tunnelcharakteristiken und Aufgabenstellung (mehrere Brandstandorte, Verkehrsstärken, unterschiedliche initiale Strömungssituation etc.).</p> <p>Die in der BAST-Methodik berücksichtigte Zeitschiene, sowohl in den Strömungsmodellen als auch im Evakuierungsmodell, ist im Vergleich zur RVS-Methodik stark komprimiert. Dies verringert zwar die notwendige Rechenzeit der einzelnen Schadensszenarien, vermindert aber gleichzeitig die Sensitivität des Modells gegenüber Maßnahmen bzw. Begleitumständen, welche auf den zeitlichen Szenarien Ablauf wirken. Während in der</p>	

BASSt-Methodik nur die ersten 5 Minuten nach Brandbeginn betrachtet werden, wird In der detaillierten Version der RVS-Methodik hingegen eine Simulationszeit von 15 Minuten berücksichtigt. Dieser längere zeitliche Verlauf erlaubt eine feinere Auflösung der zeitversetzten Notfallreaktionen (Brandwachstum, Branddetektion, Aktivierungszeitpunkt der Lüftung, Zeitpunkt der Tunnelsperre, Initialisierung der Evakuierung, selbständige Fluchteinleitung aufgrund augenscheinlicher Gefahr) und damit einer realitätsnähere Abschätzung der zu erwartenden Schadensausmaße durch Brandereignisse.

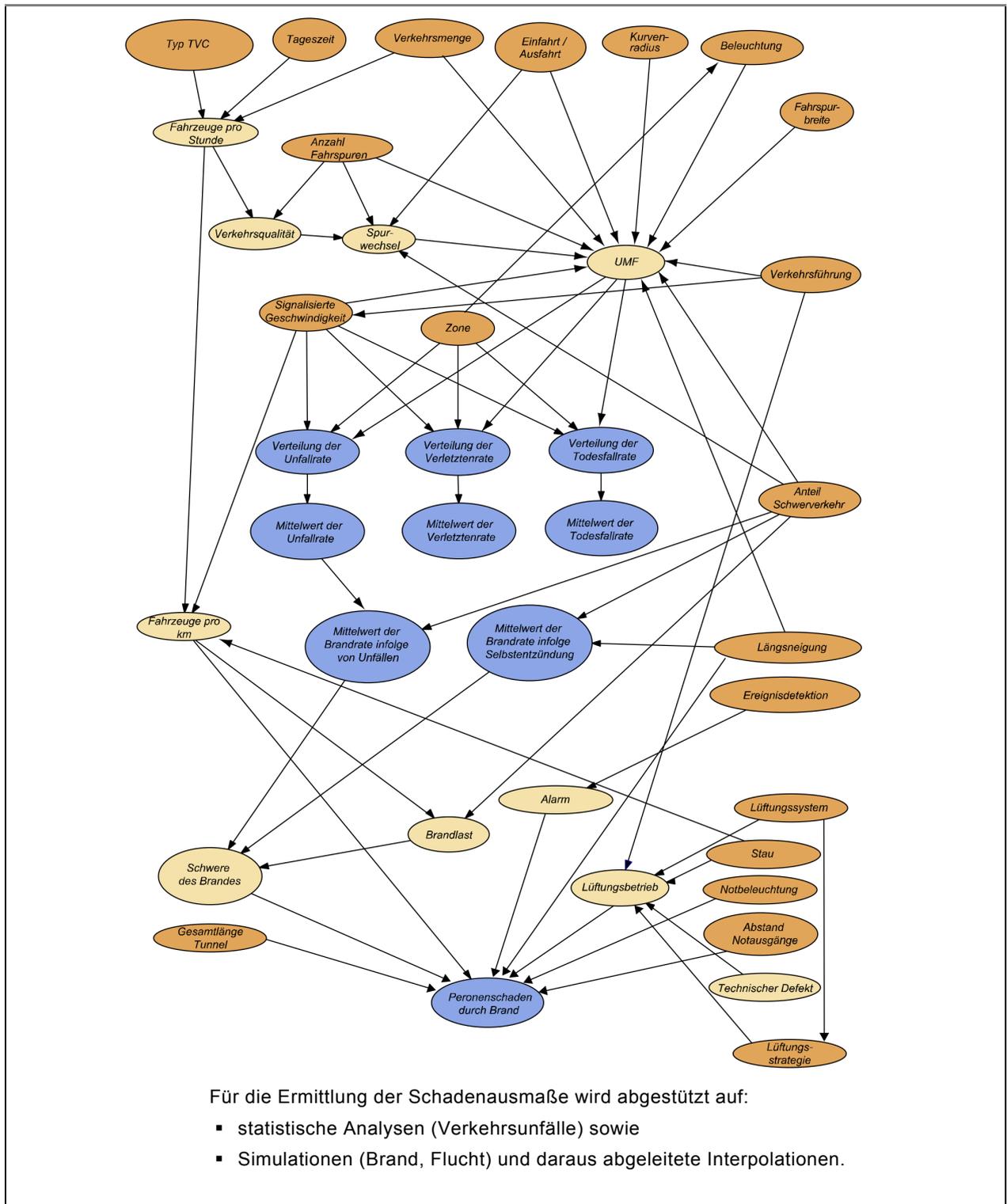
Gerade in den ersten Minuten eines Brandereignisses, bis zur vollen Wirksamkeit der Brandlüftung ist die Rauchausbreitung durch die initialen Strömungsbedingungen determiniert. Aus diesem Grund wird in der RVS-Methodik nach unterschiedlichen Ausgangssituationen (bei fließendem Verkehr, beginnenden Stau infolge eines Ereignisses anhaltender Stau) unterschieden und zusätzlich zu FDS ein instationäres eindimensionales CFD-Modell eingesetzt, das beispielsweise den Einfluss von Fahrzeugbewegungen und dergleichen im Tunnel berücksichtigen kann. Die Ergebnisse der 1D-Simulationen werden dann als Randbedingungen für das 3D-Strömungsmodell angesetzt.

Zur Abschätzung der Konsequenzen eines Tunnelbrandes ist eine breite Betrachtung des möglichen Fluchtverhaltens notwendig. Dies wird im Evakuierungsmodell der RVS-Methodik durch einen probabilistischen Ansatz für das Fluchtverhalten der Tunnelnutzer berücksichtigt. Dabei werden sowohl verschiedene Zeitpunkte der Fluchteinleitung – in Abhängigkeit der allgemeinen Alarmierung durch die Tunnelwarte sowie durch die lokale Rauchdichte – als auch unterschiedliche körperliche Konditionen (Fluchtgeschwindigkeiten, Rauchgas-Widerstandsfähigkeiten) betrachtet. Zudem wird auch das Fehlverhalten der Tunnelnutzer bzw. die Möglichkeit der beeinträchtigten Bewegungsfreiheit, durch einen Anteil nicht-flüchtender Personen, berücksichtigt. Das Fluchtmodell der BASSt-Methodik beruht im Vergleich dazu auf einem deterministischen Ansatz mit lediglich einem Personentyp/einer Fluchtgeschwindigkeit, sowie zwei möglichen Zeitpunkten der Fluchteinleitung (bei Brandbeginn und eine Minute nach Brandbeginn).

Ein weiterer wesentlicher Unterschied besteht in der Berechnung des Fluchterfolges bzw. des Zeitpunktes der Bewegungsunfähigkeit der flüchtenden Personen in den Evakuierungsmodellen. In der BASSt-Methodik wird als Fatalitätskriterium die Unterschreitung einer Mindestsichtweite herangezogen. Dabei ist die Dauer der Unterschreitung nicht von Bedeutung. Eine kurzzeitig erhöhte Rauchdichte, etwa durch eine lokale Verwirbelung infolge der Aktivierung der Lüftung, führt dabei zum gleichen Ergebnis (zum Tod der flüchtenden Person) wie eine langfristig erhöhte Rauchdichte. Im RVS-Modell hingegen wird ein akkumulations-basiertes Modell verwendet, das auf der physiologischen Wirkung der freiwerdenden Hitze sowie der entstehenden toxischen Rauchgasprodukte auf den menschlichen Körper beruht. Dabei werden sowohl Temperatur und Konzentrationswerte als auch die Dauer der Einwirkung zur Berechnung der Sterblichkeit herangezogen.

Schweiz: Tunnelrisikoanalyse für Tunnel der Nationalstrassen / Richtlinie 19004

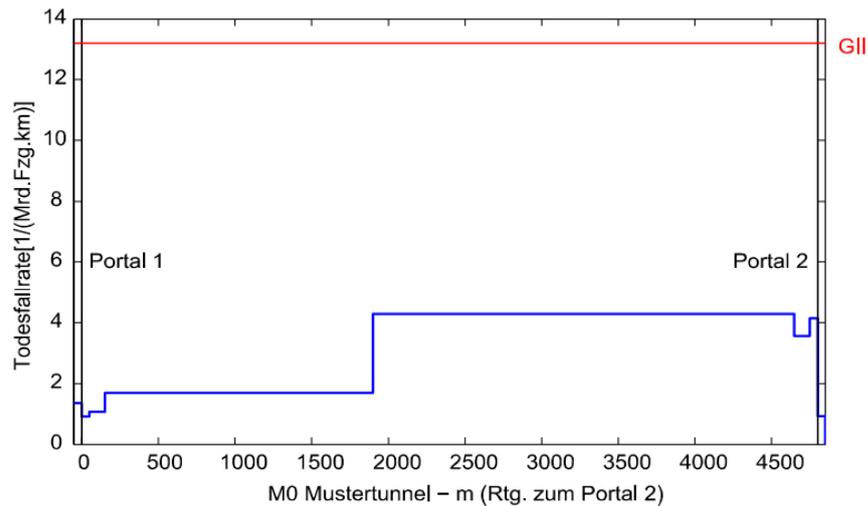
Tunnelrisikoanalyse für Tunnel der Nationalstrassen / Richtlinie 19004	SCHWEIZ / 2014
Bundesamt für Strassen, Richtlinie „Risikoanalyse für die Tunnel der Nationalstrassen“, Richtlinie 19004, Ausgabe 2014	
Beschreibung	
Die Richtlinie „Risikoanalyse für Tunnel der Nationalstrassen“ setzt eine Anforderung des Departments „Umwelt, Verkehr, Energie und Umwelt (UVEK) „Sicherheitsanforderungen an Tunnel im Nationalstraßennetz“ um und 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 „Risikokonzept für Tunnel der Nationalstrassen“ beschrieben.	
Anwendungszweck	
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 neue 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.	
Risikobewertung	
Risikoanalyse	<p>Die Risikoanalyse berücksichtigt folgende Gefahren/Szenarien:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkehrsunfälle mit Personenschäden, ▪ Brandereignisse infolge von Unfällen, ▪ Brandereignisse infolge elektrischer Defekte und Überhitzungen sowie ▪ Brandereignisse infolge mechanischer Überhitzung. <p>Des Weiteren sind Gefahren aus Gefahrgutereignissen berücksichtigt:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Lachenbrand, ▪ Explosionen sowie ▪ Freisetzung toxischer Substanzen. <p>Die Risikoanalyse hat zum Ziel, den nominellen Erwartungswert der Anzahl Todesfälle und Verletzte pro Jahr, in Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten, zu bestimmen. Dabei wird auch der Einfluss bestehender bzw. möglicher zusätzlicher Maßnahmen berücksichtigt.</p> <p>Für die Analyse wird der Tunnel in hinsichtlich der risikorelevanten Einflussgrößen homogene Segmente unterteilt. Die Risiken werden pro Segment und Fahrtrichtung ermittelt und für den Tunnel aggregiert.</p> <p>Das Verfahren beruht auf Berechnungen mithilfe von Bayes'schen Netzen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die im Modell berücksichtigten Einflussgrößen und deren logische Verknüpfung (Knoten) im Bayes'schen Netz.</p>



Risikobeurteilung

Die Beurteilung der Risiken umfasst eine Kombination eines fixen Grenzwertes (individuelles Risiko) und dem Prinzip der Massnahmeneffizienz nach dem ALARP-Prinzip für die kollektiven Risiken.

Ermittelt und beurteilt werden verschiedene Ereignisraten. Nachfolgend ist exemplarisch für einen fiktiven Tunnel die Todesfallrate über den Tunnel dargestellt (inkl. Grenze (GII zur Beurteilung der Tolerierbarkeit)).

**Maßnahmen**

Die Maßnahmenbeurteilung erfolgt anhand einer Kosten-Wirksamkeitsbetrachtung (sofern der Grenzwert für das individuelle Risiko eingehalten wird). Für die Verhinderung von Todesopfern werden Grenzkosten von 6.7 Mio. Schweizer Franken angesetzt.

Anwendungserfahrungen

Die Methode erlaubt 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).

Inputs / Ansätze zur Weiterentwicklung der Methodik gemäß BAST, Heft B66

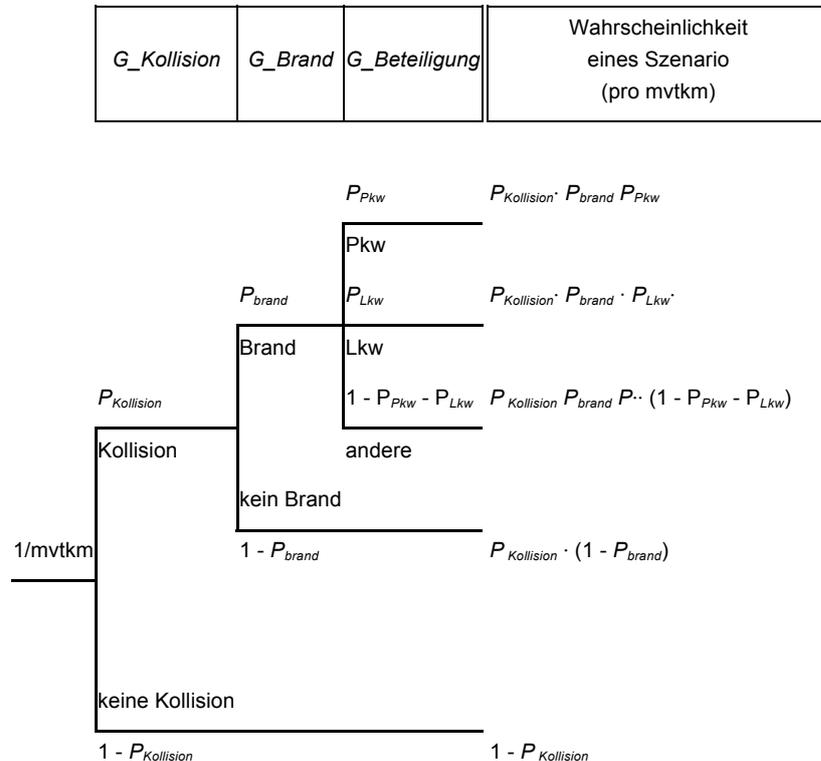
Das Verfahren gemäß Richtlinie „Risikoanalyse für Tunnel der Nationalstrassen“ bietet Ansatzpunkte für mögliche Weiterentwicklungen der Methodik gemäß BAST, Heft B66 in folgenden Bereichen:

- Segmentierung des Tunnels in homogene Segmente
- richtungstrennte Analyse der Risiken
- Berücksichtigung zusätzlicher Tunnelcharakteristika / Einflussgrößen (z.B. Anzahl Fahrspuren, Kurvenradien)

Niederlande: QRA Tunnel

QRA Tunnel		Niederlande / 2012
QRA-tunnels 2.0, Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2012		
Beschreibung		
<p>In dem Gesetz über die Sicherheit von Straßentunneln (Warvw 2013) wird die Durchführung von Risikoanalysen für Tunnel nach der in der Verordnung (Rarvw 2013) 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 sind in dem Hintergrunddokument QRA-Tunnel 2.0 enthalten.</p>		
Anwendungszweck		
<p>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.</p>		
Risikobewertung		
Risikoanalyse	<p>Die Methodik zur Ermittlung der Risiken basiert auf der Verknüpfung von Eintrittswahrscheinlichkeiten mit den jeweiligen Schadensausmaßen eines bestimmten Ereignisses.</p> <p>Das Modell ermöglicht die Berücksichtigung folgender Ereignisse / Szenarien:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Unfälle mit Sachschäden (UMS) ▪ Unfälle mit Personenschaden ▪ Brandereignisse infolge von Unfällen und technischen Defekten ▪ Gefahrgutfreisetzungen <p>Mit dem Modell lassen sich ausschließlich Richtungsverkehrstunnel mit Längslüftung analysieren. Hinsichtlich der geometrischen Ausbildung wird in Längsrichtung unterschieden in die Bereiche der Gefällestrecke, der Horizontalstrecke und der Steigungsstrecke. Bezüglich des Ereignisortes findet eine Differenzierung in stromaufwärtige und stromabwärtige Bereiche statt. Darüber hinaus können die unmittelbar an den Tunnel anschließenden Außenbereiche in die Analyse mit einbezogen werden. Insgesamt lassen sich somit 6 Bereiche unterscheiden:</p>	

Die Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten für ein Szenario / Ereignis erfolgt mit Hilfe eines vorgegebenen Ereignisablaufs. Ausgehend von der Wahrscheinlichkeit eines Kraftfahrzeugkilometers (mvtkm) wird darin über einen Ereignisbaum die Abfolge von Ereignissen abgebildet. Für die Wahrscheinlichkeiten in den Verzweigungspunkten werden Anhaltswerte gegeben, die aber individuell anpassbar sind. Ein Beispiel einer vereinfachten Ereignisbaumstruktur zeigt sie nachfolgende Abbildung:



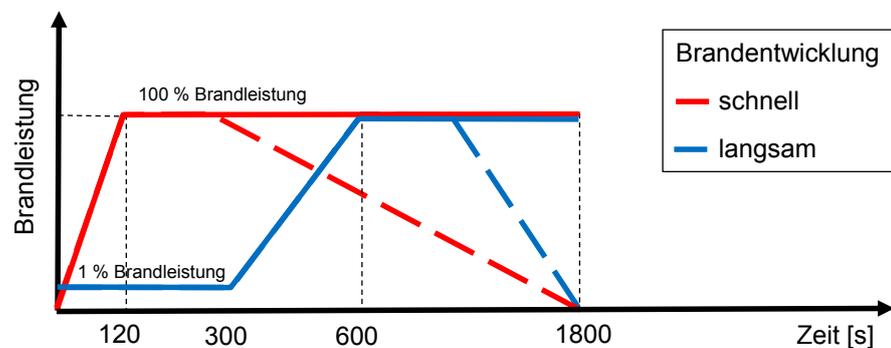
Verzweigungspunkte innerhalb dieses Ereignisbaum bilden hierbei:

- Vorfall (Ereignis)
(Panne, Unfall mit Sachschaden, Unfall mit Personenschaden kein Vorfall)
- Zeitraum
(Spitzenstunde, Tag, Nacht)
- Stau stromabwärts
(Stau, kein Stau)
- Ereignisort
(Tunnelgradiente ansteigend/horizontal/fallend, im Stau)
- Geschwindigkeitserkennung
(Geschwindigkeitsunterschreitung, keine Geschwindigkeitsunterschreitung)
- Fahrzeug
(Pkw, Bus, Lkw ohne brennbare Ladung, Lkw mit brennbarer Ladung, Lkw mit Explosivstoffen, Tanklastwagen)
- Stoffklassen
(entzündliche Flüssigkeiten (LF), toxische Flüssigkeiten (LT), druckverflüssigte, entzündbare Gase (GF), druckverflüssigte, toxische Gase (GT))
- Freisetzung
Flüssigkeiten
(keine, klein kontinuierlich (0,5 m³), groß, kontinuierlich (5 m³), spontan (45 m³))
Gase
(kalter BLEVE, warmer BLEVE, kontinuierlich (in/gegen FR), nicht relevant)

(in/gegen FR), keine)

- Fahrzeugbrand
(Brand, Gelöschter Brand, kein Brand)
- Tanklastwagenbrand
(Zündung direkt / verzögert / keine)
- Brandgröße / Brandleistung
(5 MW, 10 MW, 25 MW, 50 MW, 100 MW, 200 MW)
- Meldung durch Verkehrsteilnehmer
(Meldung, keine Meldung)
- Branderkennung
(Branddetektion, keine Branddetektion)
- Verzögerte Erkennung
(verzögert, nicht verzögert)
- Verfügbarkeit der Lüftung
(Lüftung aktiviert, keine Lüftung)
- Verfügbarkeit Entriegelung (von Fluchttüren / Notausgängen)
(entsperrt, nicht entsperrt)
- Tunnelsperrung (Röhrensperrung)
(Sperrung, keine Sperrung)
- Automatische Aktivierung von Sicherheitseinrichtungen
(Automatischer Start, kein automatischer Start)
- Aktion durch Operator
(Betätigung Nottaste, manuelle Betätigung mit/ohne Entriegelung von Fluchttüren)
- Blockade einer Fluchttür durch Ereignis
(Blockade, keine Blockade)

Zur Ermittlung der Einwirkungen infolge von Bränden und Gefahrgutfreisetzungen wurden zahlreiche Szenarien unter Variation der geometrischen Verhältnisse (Längsneigung, Querschnittsbreite), der Ventilationsbedingungen, der Energie- und Gefahrgutfreisetzungen mittels eines CFD-Modells (Fire Dynamics Simulator) in einem 400 m sowie einem 2000 m langen Modelltunnel vorberechnet. Bei den Brandereignissen wird hierbei unterschieden zwischen einer schnellen Brandentwicklung, bei der innerhalb von 120 s die maximale Brandleistung erreicht wird und einer langsamen Brandentwicklung, die bis 300 s nach Brandbeginn auf 1 % der maximalen Brandleistung verharrt und anschließend innerhalb von weiteren 300 sec auf die maximale Brandleistung ansteigt. Den Verlauf der Brandentwicklungen zeigt nachfolgende Abbildung. Die darin durch die gestrichelten Linien gekennzeichneten Verläufe werden für Brände mit Brandleistungen von 5 MW und 10 MW verwendet.



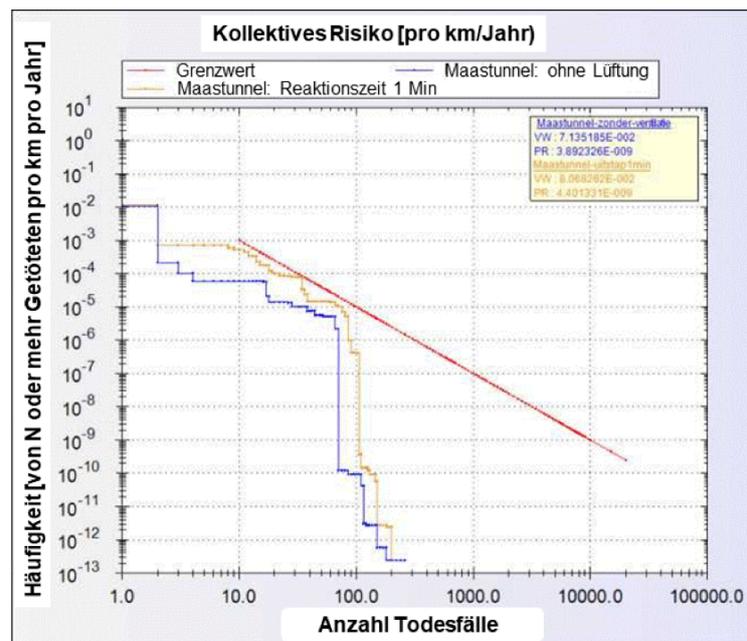
Darauf aufbauend erfolgt in Abhängigkeit der daraus resultierenden Umgebungsbedingungen durch die Einwirkung von Rauch auf die Sichtverhältnisse, toxischen Gasen, Wärme, Druck die Ermittlung von Personenschäden. Hierbei wird in Teilen auf

das Modell von Purser zurückgegriffen, um verstärkende Effekte durch das gleichzeitige Einwirken mehrerer Schadgrößen berücksichtigen zu können.

Positive Effekte auf das zu erwartende Schadensausmaß durch eine aktive Fremdretung werden hierbei nicht berücksichtigt.

Nach Abschluss der Berechnungen werden durch das Modell QRA Tunnel folgende Risikokenngrößen ausgegeben

- (Schadens-) Erwartungswert
Zu erwartende Zahl an Getötete pro Jahr in der betreffenden Tunnelröhre
- Individuelles Risiko
Risiko für einen einzelnen Verkehrsteilnehmer im Tunnel infolge eines Zwischenfalls in der betreffenden Tunnelröhre für jeden in der Tunnelröhre zurückgelegten Kilometer zu sterben
- Kollektives Risiko
Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Unfall im Tunnel eine Gruppe von Menschen auf einen Schlag zu Tode kommt. Die Darstellung erfolgt in Form eines FN-Diagramms (siehe nachfolgende Abbildung)



Risikobeurteilung

Zur Beurteilung der Risiken wird in dem Gesetz über die Sicherheit von Straßentunneln (Warvw 2013) ein Grenzkriterium definiert. Danach darf die Wahrscheinlichkeit von Getöteten Personen im Tunnel $0,1 / N^2$ pro Kilometer Tunnelröhre pro Jahr nicht überschreiten. Darin ist "N" die Anzahl der getöteten Personen. Für Ereignisse mit weniger als 10 Getöteten Personen besteht keine Beschränkung. Das Grenzkriterium ist in Abbildung 4 als rote Linie dargestellt.

Maßnahmen

Mit dem Verfahren ist es möglich, die Wirksamkeit von Sicherheitsmaßnahmen zu ermitteln und zu bewerten.

Anwendungserfahrungen

Das Verfahren ist in den Niederlanden obligatorisch für alle neuen Tunnel 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 (Achtergrunddocument) aufgezeigt. Zur Anwendung der Software wird ein Benutzerhandbuch (Gebruikershandleiding) bereitgestellt. Anwender des Verfahrens sind darauf spezialisierte Risikofachleute in der Verwaltung und Ingenieurbüros.

Inputs / Ansätze zur Weiterentwicklung der Methodik gemäß BAST, Heft B66

Die Methodik zur Ereignisablaufanalyse sowie zur Ermittlung von Schadensausmaßen ist sehr ähnlich zu dem Verfahren der BAST nach Heft B66. Grundsätzlich ist mit dem Verfahren jedoch ausschließlich eine Betrachtung von Richtungsverkehrstunneln möglich. Das Verfahren bezieht hierbei neben Szenarien mit Unfällen und Bränden auch Ereignisse mit Gefahrgutfreisetzungen mit ein. Differenziert wird hierbei zwischen Szenarien mit Beteiligung von Pkw, Bussen, Lkw ohne brennbare Ladung, Lkw mit brennbarer Ladung, Lkw mit Explosivstoffen, Tanklastwagen. Bei den Brandszenarien wird des Weiteren unterschieden zwischen Bränden mit einer schnellen und einer langsamen Brandentwicklung. Der Ermittlung von Schadensausmaßen liegen mittels CFD-Simulationen vorberechnet Einwirkgrößen für Druck, Wärme sowie Rauch- und Schadgaskonzentrationen zugrunde. Die Ergebnisse stützen sich hierbei auf Berechnungen für einen Modelltunnel mit einer Länge von 400 m bzw. 2000 m. Neben der Variation der geometrischen Verhältnisse (Längsneigung und Querschnittsbreite) werden darin auch Szenarien mit und ohne aktivierter Längslüftung berücksichtigt. Die Ermittlung der Auswirkungen erfolgt über die Zeit, die einem flüchtenden zur Verfügung steht, einen sicheren Bereich zu erreichen. Ohne Beeinträchtigung durch Einwirkungen wird von einer Fluchtgeschwindigkeit von 1,1 m/s ausgegangen. Unter dem Einfluss von Rauch verlangsamt sich diese dann in Abhängigkeit der Sichtweite auf eine Geschwindigkeit von 0,3 m/s. Zur Bestimmung der Zeit, wie lange man unter dem Einfluss von Wärme und verschiedenen Schadgaseinwirkungen lebens- und bewegungsfähig ist, wird sich auf das FED Modell nach Purser abgestützt, bei dem die Überlagerung aus verschiedenen Einwirkgrößen Berücksichtigung findet. Als Risikogrößen wird der Schadenserwartungswert, das individuelle und das kollektive Risiko verwendet. Die Bewertung der Risiken erfolgt mittels eines gesetzlich verankerten Grenzkriteriums.

Durch das ausschließliche Fokussieren auf Richtungsverkehrstunnel mit und ohne einer mechanischen Längslüftung sowie die Verwendung von vorberechneten Szenarien lässt sich dieses Verfahren nicht ohne Anpassungen auf Fragestellungen in Deutschland anwenden. Methodisch von Interesse könnte allerdings die Betrachtung von unterschiedlichen Brandverläufen sein.

Untersuchungen und Studien

Richtlinienkonforme Tunnelausstattung

Studie	Deutschland / 2010
<p>Sicherheitsbewertung von Straßentunneln auf Basis richtliniengerecht ausgestatteter Tunnel / FE 29.0235/2009/BAST</p>	
Untersuchungsgegenstand und Ziele	
<p>Die grundsätzlichen Ziele des Forschungsvorhabens waren einerseits die Schaffung eines Bewertungshintergrundes zum Vergleich des Sicherheitsniveaus eines richtliniengerechten Tunnels mit einem in seinen Parametern abweichenden Tunnel. Andererseits wurden eine Bandbreite von Sicherheitswerten für richtliniengerecht ausgestattete Tunnel ermittelt und abschließend Empfehlungen für das Regelwerk abgeleitet. Das Hauptaugenmerk wurde auf vollständige Nachvollziehbarkeit der Rechnungen, entsprechende Dokumentation der Annahmen, Durchführung von Sensitivitätsanalysen sowie auf einfache Darstellung gelegt.</p>	
Ergebnisse und Erkenntnisse	
<p>Im Forschungsprojekt wurden acht, RABT richtlinienkonforme, Modelltunnel einer Risikoanalyse unterzogen. In der Betrachtung des Szenariotyp Brand stellte sich heraus, dass der Risikoerwartungswert bei den betrachteten Tunneln um die Größenordnung einer Zehnerpotenz unterschiedlich sein kann. Im Gegensatz dazu haben die Risikoerwartungswerte für den Szenariotyp Kollision dieselbe Größenordnung.</p> <p>Es hat sich gezeigt, dass der Tunnelquerschnitt im Zusammenhang mit der Lüftungswahl vertiefend untersucht werden sollte. Für die Weiterentwicklung der Festlegungen in den RABT wird empfohlen die Risikoanalyse als Bewertungsinstrument mit einzubeziehen.</p> <p>Aufgrund der durchgeführten Untersuchung kann keine Akzeptanzlinie definiert werden, die zukünftig als Basis für die Sicherheitsbewertung von Tunnel mit besonderer Charakteristik bzw. mit Abweichungen von der RABT herangezogen werden kann. Dementsprechend wird eine Sicherheitsbewertung anhand eines Relativvergleichs zweier Tunnel empfohlen, da so die Unterschiede im Risiko die Unterscheidungsmerkmale der untersuchten Tunnel abbilden.</p> <p>Weist ein Tunnel jedoch Zu- und Abfahrten auf, ist es nicht Zielführend einen Relativvergleich mit dem Risikoerwartungswert eines entsprechenden Tunnels ohne Zu- bzw. Abfahrten zu machen. In solchen Fällen wird eine Kosten-/Wirksamkeitsuntersuchung von Sicherheitsmaßnahmen als zweckmäßig angesehen.</p>	
Inputs / Ansätze zur Weiterentwicklung der Methodik gemäß BAST, Heft B66	
<p>In diesem Forschungsprojekt wird empfohlen, dass für die Ermittlung des Schadensausmaßes Brand folgende Themen weiter vertieft und einheitlich festgelegt werden sollen. Unter anderem sind der Kennwert für die Längsgeschwindigkeit zu Brandbeginn im Tunnel als auch die Art und Weise wie die Fahrzeuge bei der Brandsituation im Tunnel zu situieren sind, zu definieren. Aufgrund einer Sensitivitätsuntersuchung wurde bei allen Tunneln festgestellt, dass für den Szenariotyp Brand immer zwei Szenarien den Risikowert maßgebend bestimmen haben und daher wird empfohlen eben diesen Szenarien vorrangige Beachtung zu schenken. Des Weiteren wird eine Vereinfachung der Berechnungsmethodik durch Vernachlässigung einer getrennten Ermittlung des Modellwerts Schadensausmaß Brand für den 50MW Brand vorgeschlagen. Der Parameter von 60 Sekunden für die Alarmierung und Einleitung der Flucht für die Ermittlung der Selbstrettungsbereiche soll auf einen Wert geändert werden, welcher eine realistische Reaktionszeit beinhaltet. Gegebenenfalls sollen die Skalierungswerte für den Ereignisbaum Brand angepasst werden.</p> <p>Aufgrund der Untersuchungen kann keine absolute Akzeptanzlinie zur Sicherheitsbewertung definiert werden. Es wird für die Sicherheitsbewertung empfohlen, einen Relativvergleich anzuwenden.</p>	

Einfluss Lüftungsart

Studie	Deutschland / 2012
Verfahren zur Bestimmung der Lüftungsart von Straßentunneln / FE 15.0503/2010/ERB	
Untersuchungsgegenstand und Ziele	
<p>Die Studie befasst sich mit der Lüftungsart von Tunneln (Gegenverkehr (GV) sowie Richtungsverkehr (RV)) zwischen 600 m und 1200 m, welche täglich Stau bzw. stockenden Verkehr verzeichnen. Ziel war es das Sicherheitsniveau unterschiedlicher Tunneltypen zu vereinheitlichen. Dazu wurden entsprechende Festlegungen in bestehenden Richtlinien (RABT, RVS, ASTRA und EU-RL) analysiert und verglichen sowie eine Vielzahl von Modelltunnel Risikoeermittlungen und Sensitivitätsanalysen durchgeführt.</p>	
Ergebnisse und Erkenntnisse	
<p>In dieser Studie wurden eine Vielzahl von GV bzw. RV Modelltunnel mit unterschiedlicher Länge, Steigung und Ausstattung einer Risikoanalyse unterzogen. Um den Einfluss der Staucharakteristik darstellen zu können wurden einmal 30 Staustunden/Jahr und einmal 175 Staustunden/Jahr angenommen.</p> <p>Ergebnisse sowie Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen. Für den Gegenverkehrstunnel stellt die Staucharakteristik bzw. der Stauanteil keinen wesentlichen Einflussfaktor dar. Beim Gegenverkehrstunnel befinden sich immer Personen auf beiden Seiten des Brandherdes wobei im Gegensatz dazu es zu einer solchen Situation im Richtungsverkehrstunnel nur im Staufall kommt.</p> <p>Egal ob es sich um einen RV oder GV Tunnel handelt, ein Gewölbequerschnitt ist, in Bezug auf das Brandrisiko, immer als günstiger zu erachten als ein Rechtecksquerschnitt. Dementsprechend ist der Einbau einer Rauchabsaugung in GV-Tunnel mit Gewölbequerschnitt als nicht zweckmäßig zu erachten. Ein GV-Tunnel mit Rechtecksquerschnitt weist jedoch ein zu hohes Risiko auf, wodurch Sicherheitsmaßnahmen wie Rauchabsaugung, verkürzter NA Abstand oder eine höhere Decke in Betracht genommen werden müssen.</p> <p>Ergebnisse der Risikoanalysen entsprechend der Richtungsverkehrsmodelltunnel zeigen, dass sich, mit Fokus auf den Stauanteil des Brandrisikos, die Staucharakteristik stark risikoe erhöhend mit zunehmendem Stauanteil auswirkt. Auch die Längsneigung wirkt sich negativ auf das Brandrisiko aus. Wird jedoch das gesamte System (Stau und fließender Verkehr) betrachtet, so ergeben sich teilweise gegenläufige Trends, die keine eindeutigen Aussagen möglich machen. Dementsprechend war es zur Zeit der Studie nicht möglich einheitliche risikoreduzierende Sicherheitsmaßnahmen für den Richtungsverkehrstunnel festzulegen.</p>	
Inputs / Ansätze zur Weiterentwicklung der Methodik gemäß BAST, Heft B66	
<p>In der Studie wird empfohlen Gegenverkehr- bzw. Richtungsverkehrstunnel mit stockendem Verkehr in den RABT getrennt zu behandeln und zu bewerten.</p> <p>Für Gegenverkehrstunnel wird vorgeschlagen jene mit Gewölbequerschnitt bis zu einer Länge von 1200m und Längslüftungssystem generell zuzulassen. Jene mit Rechteckquerschnitt bis zu 1200m und Längslüftungssystem sollen nur dann zugelassen werden, wenn sie einem Risikovergleich mit einem Referenzstunnel (Gewölbequerschnitt) standhalten.</p> <p>Für Richtungsverkehrstunnel wird vorgeschlagen die Begriffe, die für die Wahl des Lüftungssystem entscheidend sind, wie täglich stockender Verkehr oder ausnahmsweise stockender Verkehr, klar zu definieren. Ansonsten konnten keine eindeutigen allgemeingültigen Aussagen bezüglich der Lüftungsart in Richtungsverkehrstunneln getroffen werden.</p>	

Temperaturbeständigkeit Lüftung

Studie

Deutschland / 2012

Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit von Lüftungstechnischen Einbauteilen / FE 15.0514/2011/ERB

Untersuchungsgegenstand und Ziele

Die angeführte Studie befasst sich mit der Temperaturbeständigkeit von Lüftungstechnischen Einbauteilen. Die in den RABT 2006 definierten Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit dieser Anlagenteile stehen nicht im Einklang mit den in den relevanten europäischen Normen festgelegten Temperaturwiderstandsklassen EN 12101-3 und DIN EN 13501-4, nach welchen die Lüftungstechnischen Einbauteile zu prüfen sind. Untersucht wurden in diesem Rahmen unterschiedliche Brandszenarien für Tunnelanlagen mit und ohne Rauchabsaugung. Ziel dieser Studie war eine Vorhersage der zu erwartenden Temperaturen in den entsprechenden Einbaubereichen als Basis für eine Anpassung der Richtlinie an die Europäische Norm (EN 12101-3).

Ergebnisse und Erkenntnisse

In der Studie wurden zwei längsgelüftete Tunnelanlagen, eine mit Gewölbe- und eine mit Rechtecksquerschnitt, anhand dreidimensionaler CFD-Simulationen analysiert und die Temperaturbeständigkeit von Axialventilatoren bzw. Strahlventilatoren bestimmt. Die Analyse der Temperaturbelastung von Absaugklappe und Absaugventilator erfolgte anhand eindimensionaler CFD-Simulationen.

Aus den Berechnungsergebnissen konnten in Übereinstimmung mit der Europäischen Norm EN 12101-3 Empfehlungen hinsichtlich der Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit Lüftungstechnischer Einbauteile abgeleitet werden.

Prüfklassen für Absaugklappen		
Generell Prüfklasse F400		
Prüfklassen für Absaugventilatoren		
Bemessungsbrandleistung	Mit Absaugkanal	Ohne Absaugkanal
≤30 MW	F200	F200
≤50 MW	F200	F400
>50 MW	F400	F400
Prüfklassen für Strahlventilatoren		
Bemessungsbrandleistung	Anforderung	
≤30 MW	F400	
>30 MW	F400, aber Forderung nach einem Mindestabstand zwischen den Strahlventilatoren (z.B. 200 m)	
Mit:		
F200	Funktionserhalt bei 200°C über 120 min	
F400	Funktionserhalt bei 400°C über 120 min	

Inputs / Ansätze zur Weiterentwicklung der Methodik gemäß BAST, Heft B66

Die Ergebnisse der Studie entsprechen einer Vorhersage der zu erwartenden Temperaturen in den entsprechenden Einbaubereichen, welche als Basis für eine Anpassung der Richtlinie an die Europäische Norm dienen sollen.

Modellierung Tunnellüftung

Studie

Der Einfluss der Tunnellüftung auf das Brandrisiko – ein detaillierter Vergleich unterschiedlicher Modelle und deren Modellannahmen / Konferenzbeitrag ISAVT2019

Untersuchungsgegenstand und Ziele

Die Ursprüngliche Idee dieser Studie entstand beim ISAFI Symposium 2017. Es wurden Ergebnisse zweier unabhängiger Untersuchungen, welche mit Hilfe von etablierten Risikoanalysemodellen durchgeführt wurden, vorgestellt (Schweiz: SRINT kombiniert mit ODEM; Österreich: TuRisMo). Darin wurden unterschiedliche Längslüftungsstrategien in Gegenverkehrstunnel bzw. Richtungsverkehrstunnel mit Stau analysiert und modelliert, die entsprechenden Ergebnisse waren jedoch widersprüchlich. Demzufolge haben sich die Autoren dieser Studien zusammengetan um die jeweiligen Risikoanalysen entsprechend ihrer Fähigkeiten und vor allem entsprechend der getroffenen Annahmen zu analysieren.

Ergebnisse und Erkenntnisse

Kommt es in einem Richtungsverkehrstunnel zu einem Brand, ist klar welche Lüftungsstrategie gewählt werden muss, da sich flüchtenden Personen nur auf der einen Seite des Feuers befinden. Kommt es allerdings zu einer Situation, in welcher sich auf beiden Seiten des Feuers flüchtende Personen befinden, ist es wesentlich komplexer die passende Lüftungsstrategie zu finden.

Entsprechende Resultate bzw. Schlussfolgerungen der beiden oben genannten Risikoanalysemodelle waren widersprüchlich. Um mögliche Ursachen zu ergründen wurde ein Modelltunnel definiert, alle möglichen Parameter fixiert und die Ergebnisse beider Risikomodelle einander gegenübergestellt.

Folgende Schüsse konnten aus der Studie gezogen werden.

Die resultierenden Rauchausbreitungs- sowie die Temperaturprofile der 3D (Österreich) und 1D (Schweiz) CFD Simulationen stimmen mit entsprechenden Profilen aus realen Brandversuchen überein. Risikoreduzierende Maßnahmen, wie verkürzte Notausgangsabstände und Detektionszeiten, wurden in beiden Fällen sehr ähnlich bewertet.

Im Zusammenhang von Rauchausbreitung bzw. Fluchtsimulation wurde festgestellt, dass in der Fluchtsimulation, die in der 3D CFD-Analyse resultierenden Rauchdichten bzw. Temperaturen auf Kopfhöhe verwendet werden. Im Gegensatz dazu wird im Schweizer Modell die über den Querschnitt gemittelte Rauchdichte bzw. Temperatur bei der Fluchtsimulation berücksichtigt.

Des Weiteren werden, im Gegensatz zur 1D Simulation, in der 3D FDS Simulation die im Tunnel vorhandenen Fahrzeuge mitberücksichtigt, was sich wiederum auf die Rauchausbreitung und die Strömungsgeschwindigkeit auswirkt.

Bezüglich der Fluchtsimulationen wurden Unstimmigkeiten in der Berücksichtigung bestimmter auftretender Verbrennungsprodukte und deren Einfluss auf die Überlebensfähigkeit gefunden.

Diese genannten Unterschiede könnten potenziell zu den abweichenden Abschätzungen bezüglich einer langsamen Längslüftungsgeschwindigkeit im Brandfall mit Stau beitragen.

Eine eindeutige Aussage über die beste Lüftungsstrategie im Fall eines Tunnelbrandes während eines Verkehrsstaus, kann aufgrund dieser Studie jedoch nicht getroffen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Frage, wenn überhaupt, nur von Fall zu Fall beantwortet werden kann.

Inputs / Ansätze zur Weiterentwicklung der Methodik gemäß BAST, Heft B66

Es wurden Unterschiede bezüglich der verwendeten, beim Brand zu berücksichtigenden, Verbrennungsprodukte gefunden und es wurde festgehalten, dass jene Raten separat noch einmal zu diskutieren und zu analysieren seien.

Die Rauchausbreitung bzw. die Rauchsichtung ist ein dreidimensionaler Effekt, welcher mit einer dreidi-

mensionalen CFD Simulation simuliert werden sollte. Dabei ist zu beachten, dass die räumliche Auflösung der Simulationsdomäne fein genug gewählt werden muss, um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten. Das wiederum ist Zeit und Kostentechnisch sehr aufwändig.

Einfluss geschwindigkeitsreduzierender Maßnahmen

Methode / Verfahren	International / seit 2008
<p>Die zulässige Höchstgeschwindigkeit in einen Straßentunnel ist bei mechanischen Ereignissen unmittelbar mit der Unfallschwere verbunden.</p> <p>Um schwere Unfälle zu vermeiden, muss die Kollisionsgeschwindigkeit niedrig oder der Kollisionswinkel klein sein. Auch die Schwere der Verletzungen der Verletzten hängt von der Geschwindigkeit und der Masse des Kraftfahrzeugs ab. Bei Unfällen mit feststehenden Objekten hängt ebenso die Schwere des Ereignisses von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs ab.</p> <p>D.h. eine Verringerung des Geschwindigkeitsniveaus führt zu einer Sicherheitsverbesserung für alle Arten von Verkehrsunfällen. Dies wird auch durch viele Untersuchungen auf der ganzen Welt bestätigt, bei denen eine Analyse der Sicherheitslage und des Geschwindigkeitsniveaus vor und nach einer Änderung der Geschwindigkeitsbegrenzungen in verschiedenen Umgebungen durchgeführt wurde.</p> <p>Folgende Maßnahmen können die Geschwindigkeit von Fahrzeugen senken:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Geschwindigkeitsbeschränkungen (Verringerung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit) ▪ Geschwindigkeitsüberwachungen ▪ Veränderung der Fahrbahnbeschaffenheit (Schwellen, Einengungen, etc.) – ist für die Verwendung im Straßentunnel nicht geeignet <p>Die Überprüfung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ist in vielen Fällen notwendig, um das Geschwindigkeitsniveau des Fahrzeugkollektivs in einem bestimmten Bereich zu halten.</p> <p>Es gibt zwei unterschiedliche Arten, die Geschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer zu überprüfen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Lokale Geschwindigkeitskontrolle mittels Laserbox (Messung der punktuellen Geschwindigkeit): Bei einer stationären Radareinrichtung kann prinzipiell von geschwindigkeitsreduzierenden Effekten im Bereich von 500 m bis 800 m ausgegangen werden (Schrammel, Machata, 2000). Der Effekt auf die Reduktion des Geschwindigkeitsniveaus ist situationsbezogen sehr unterschiedlich und ist von Fall zu Fall abzuschätzen (Ausgangsgeschwindigkeit, Situierung im Straßennetz, Randbedingungen, etc.). ▪ Sektionale Geschwindigkeitskontrolle (Messung der Durchschnittsgeschwindigkeit für einen definierten Bereich): Die Auswirkungen einer sektionalen Geschwindigkeitskontrolle wurden aus Messungen von folgenden Anlagen in Österreich ausgewertet: Fixe Anlagen: A22 – Kaisermühlentunnel, A2 – Wechsel, A2 – Eherentalerbergtunnel, A9 – Plabutschunnel, LB 37 – Gföhler Berg; sowie von temporären Anlagen im Zuge von Baustellen: A8 – Aistersheim, A1 – Sattledt-Haid, A9 – Bosrucktunnel, A23 – Hanssonkurve, A2 – Laßnitzhöhe, A2 – Umfahrung Klagenfurt, A10 – Spittal Ost. → Senkung der Unfallrate von 0,074 auf 0,047 (Unfälle/Fahrleistung); Senkung der Unfallkostenrate von 17,552 auf 9,291 (Unfallkosten/Fahrleistung) 	
Beschreibung	
<p>Eine Geschwindigkeitsverringering führt zu vielen direkten Auswirkungen auf die Verkehrsteilnehmer, die für die Sicherheitslage wichtig sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verringerung des Bremsweges ▪ Verringerung des Reaktionsweges (zurückgelegter Weg innerhalb der Reaktionszeit) ▪ Verringerung der Kollisionsgeschwindigkeit ▪ Verringerung der Kraft/Gewalt gegen den menschlichen Körper <p>Die dargelegte These, dass eine Geschwindigkeitsverringering zu einer Verringerung des Schadensausmaßes bei Unfällen (Verletzungsschwere und Verringerung von Todesopfern) führt, wurde in folgenden Untersuchungen untermauert:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Traffic Safety Dimensions and the Power Model to Describe the Effect of Speed on Safety, G. Nilsson 2004 ▪ Power Model, Elvik, 1997 <p>Die Kollisionsgeschwindigkeit der kollidierenden Fahrzeuge führt zu einer kinetischen Energie, die von den Fahrzeugkonstruktionen, passiven Sicherheitsmaßnahmen und den beteiligten Fahrzeuginsassen absorbiert wird.</p>	

Es werden viele Maßnahmen ergriffen, um die Fahrzeuginsassen vor Verletzungen zu schützen. Die durch die Verzögerung aufgrund der plötzlichen Umwandlung der kinetischen Energie verursachten Kräfte können zu Verletzungen in Form von Fraktionen oder Verletzungen wichtiger Organe führen. Kopfverletzungen (Gehirn und Hals) sowie Beinverletzungen sind die häufigsten Verletzungen, die im Krankenhaus behandelt werden müssen (Krafft 1997).

Ergebnisse und Erkenntnisse

Je höher die Geschwindigkeit der beteiligten Fahrzeuge bei einem Unfall ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass jemand verletzt wird. Es steigt mit der Geschwindigkeit auch die Wahrscheinlichkeit, dass jemand getötet wird und der Unfall zu einem tödlichen Unfall wird. Je mehr Personen in einen Unfall verwickelt sind, desto größer ist natürlich die Wahrscheinlichkeit von Verletzungen oder Todesfällen. Höhere Geschwindigkeiten führen zu höheren kinetischen Energien unter den Fahrzeugen und die kinetische Energie ist proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit. Es kann angenommen werden, dass die Verkehrssicherheitssituation durch die kinetische Energie bestimmt wird, und wenn sich die kinetische Energie ändert, ändert sich die Verkehrssicherheitssituation.

Es gibt viele statistische Unfalluntersuchungen bezüglich der Auswirkung geänderter Geschwindigkeitsbegrenzungen auf die Sicherheit. In den meisten Fällen werden diese als „Vorher-Nachher-Studien“ durchgeführt, manchmal auch auf Kontrollstraßen, auf denen die Geschwindigkeitsbegrenzung unverändert blieb. Der geschätzte Effekt ist ein Gesamteffekt dessen, was in Bezug auf den Verkehr zwischen den Vorher- und Nachher-Perioden geschehen ist. Der tatsächliche Sicherheitseffekt der Änderung der Geschwindigkeitsbegrenzung bei Unfällen wird unter Berücksichtigung der Kontrollen oder Schätzungen der Änderungen der Verkehrsentwicklung zwischen den Zeiträumen ermittelt. Die Erfahrungen aus diesen statistischen Untersuchungen sind sehr ähnlich und zeigen, dass die Änderung der Unfallverletzungen als proportional zum Quadrat der relativen Änderung der Geschwindigkeit und der Änderung der kinetischen Energie im System angesehen werden kann. Gleiches scheint für den Anteil tödlicher Unfälle an den Unfallverletzungen zu gelten. Daher ist die Änderung der tödlichen Unfälle proportional zur vierten Potenz der relativen Geschwindigkeitsänderung.

Eine Änderung der Geschwindigkeit wirkt sich sowohl auf das Unfallrisiko als auch auf die Unfallfolgen aus. Angenommen, die Zusammensetzung des Verkehrs bleibt nach der Geschwindigkeitsänderung gleich: Je mehr kinetische Energie im Transportsystem vorhanden ist, desto mehr Energie wird bei Unfällen absorbiert, was zu einer erhöhten Anzahl von Unfällen und Verletzungen sowie zu schwereren Unfällen oder Verletzungen führt.

Power Model – Formeln:

$$\text{Anzahl der UPS}_{\text{nachher}} = \text{Anzahl der UPS}_{\text{vorher}} \times \left[\frac{v_{\text{nachher}}}{v_{\text{vorher}}} \right]^2$$

$$\text{Anzahl der tödlichen Unfälle}_{\text{nachher}} = \text{Anzahl der tödlichen Unfälle}_{\text{vorher}} \times \left[\frac{v_{\text{nachher}}}{v_{\text{vorher}}} \right]^4$$

Die Anzahl der Verletzten pro UPS ist ebenso proportional zum Quadrat der relativen Änderung der Geschwindigkeit und die Anzahl der Toten pro tödlichen Verkehrsunfällen ist proportional zur vierten Potenz der relativen Geschwindigkeitsänderung.

UPS ... Unfall mit Personenschaden

In den bisherigen Anwendungen von TuRisMo wurde der o.a. Ansatz nur zum Teil und eingeschränkt angewendet: keine Verringerung der Unfallrate, Anzahl der Getöteten pro UPS wird nur mit der zweiten Potenz der relativen Geschwindigkeitsänderung verringert.

Anwendungserfahrungen

- Wichtigste praktischer Erfahrungen in der Anwendung: Einfach in der Anwendung und Begründung

- Verbreitungsgrad (nur in Einzelfällen oder weit verbreitet): Große Verbreitung, vor allem bei Genehmigungsverfahren für temporäre Bauphasen
- Aufwand und Komplexität: Die Anwendung ist rechnerisch vergleichsweise einfach.
- Anwender: Anwendung in sämtlichen quantitativen Risikoanalysen in Österreich, Deutschland, Slowakei, Slowenien, Portugal, Griechenland, etc.

Einfluss menschliches Verhalten

Studie	Deutschland / 2017
Abbildung des menschlichen Verhaltens in Risikomodellen für Tunnelbrände: Validierung relevanter Eingangsparameter auf Basis von Probandenversuchen / Konferenzbeitrag: STUVA 2017	
Untersuchungsgegenstand und Ziele	
Im Zuge einer Versuchsreihe der Bundesanstalt für Straßenwesen zum Einfluss von Brandbekämpfungsanlagen auf das Selbstrettungsverhalten wurden erstmals Probandenversuche durchgeführt, bei denen das Reaktions- und Fluchtverhalten der Tunnelnutzer qualitativ sowie quantitativ untersucht wurde. Die Resultate bieten eine Grundlage, die in den Risikomodellen hinterlegten Daten zu überprüfen da eine Validierung seit der Einführung der Modelle vor ca. 10 Jahren nicht stattgefunden hat.	
Ergebnisse und Erkenntnisse	
<p>Um Erkenntnisse hinsichtlich des Flucht- und Reaktionsverhaltens zu erlangen wurden zwei reale Probandenversuche in Straßentunneln mit den Anlagentypen Hochdruckschaum und Wasserdampf durchgeführt. Ziel dieser Studie war es, den Einfluss der Brandbekämpfungsanlagen auf das Verhalten und Erleben der Verkehrsteilnehmer zu erfassen, sowie die dem Tunnelrisikomodell zugrundeliegenden Fluchtparameter zu überprüfen. Hauptaugenmerk lag auf den Parametern Reaktionszeit, mittlere Fluchtgeschwindigkeit sowie Anteil nicht flüchtender Personen. Eben diese Parameter wurden dann im Zuge der Anwendung des Risikomodells auf einem Modelltunnel variiert und mit dem Risikoerwartungswert unter Verwendung der im Modell hinterlegten Evakuierungsparameter verglichen.</p> <p>Alle durchgeführten Parametervariationen führten zu einer Reduktion des Brandrisikos wobei die größte Reduktion auf die höhere Fluchtgeschwindigkeit in den Probandenversuchen zurückzuführen war. Des Weiteren war eine Verkürzung der Reaktionszeit (Zeit zwischen Fluchtaufforderung und Fluchtbeginn) festzustellen, welche sich wiederum positiv auf das Brandrisiko auswirkte. Diese, im Vergleich zu den Modellparametern „guten“ Parameterwerte aus der Studie sind damit zu erklären, dass es sich um eine Versuchssituation handelte und die Probanden sich dessen bewusst waren.</p> <p>Der Anteil nicht flüchtender Personen fiel in der Probandenstudie sehr unterschiedlich aus. Unterschiedlich im Hinblick auf Aktivierung oder Nichtaktivierung der Brandbekämpfungsanlagen als auch unterschiedlich zum im Modell hinterlegten Parameter. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Versuch nach einer gewissen Zeit abgebrochen wurde und da es aufgrund der geringen Anzahl an Probanden zu keinem Gruppeneffekt kam.</p> <p>Abschließend kann gesagt werden, dass die derzeit in der Praxis verwendeten Parameter zur Abbildung des menschlichen Verhaltens eher als konservativ anzusehen sind. Da die Ergebnisse von Risikoanalysen üblicherweise mit relativen also vergleichenden Bewertungsansätzen beurteilt werden, treten diese Unsicherheiten in beiden Risikoerwartungswerten auf und heben sich entsprechend weg.</p> <p>Grundsätzlich ist es erforderlich, bestehende Modelle kontinuierlich auf ihre Aktualität bezüglich aller Eingangsparameter hin zu überprüfen, um ggf. Anpassungen an neue Erkenntnisse vornehmen zu können und dadurch deren Aussagequalität und Realitätsnähe zu verbessern.</p>	
Inputs / Ansätze zur Weiterentwicklung der Methodik gemäß BAST, Heft B66	
<p>In der absoluten Risikobewertung der BAST-Methodik wirken sich die oben beschriebenen Parameterunsicherheiten sehr stark aus. Im Gegensatz dazu ist der relative Risikovergleich in Bezug auf Änderungen der, dem Modell zugrunde gelegten, Parameter weitgehend robust.</p> <p>Es wird empfohlen zukünftig über die Berücksichtigung des Gruppeneffekts in der Risikobewertung und über geeignete Gegenmaßnahmen zur Kompensation der Fluchthemmung nachzudenken.</p>	

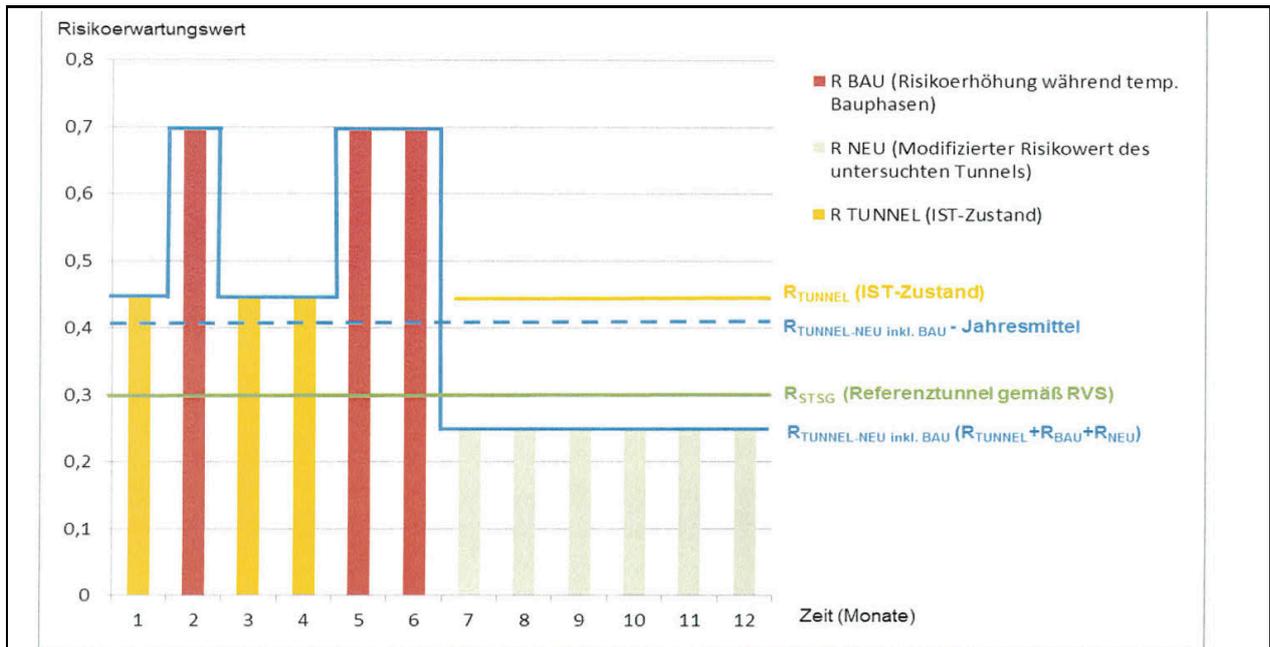
Reaktions- und Fluchtverhalten älterer Verkehrsteilnehmer

Studie	Deutschland 2014
Forschungsprojekt der BAST zum Reaktions- und Fluchtverhalten älterer Verkehrsteilnehmer in Straßentunneln (FE 15.0542/2011/ER)	
Untersuchungsgegenstand und Ziele	
<p>Ziel dieses Forschungsvorhabens war es zu überprüfen, ob die in Risikoanalysen für Straßentunnel bisher verwendeten Parameter, z.B. die Fluchtgeschwindigkeit oder die Erkennbarkeit von Wegweisung, auch für ältere Verkehrsteilnehmer, mit denen aufgrund des demographischen Wandels zukünftig in vermehrtem Maße im Straßenverkehr zu rechnen sein wird, zutreffen. Des Weiteren sollte geklärt werden, ob und welche Änderungen und Maßnahmen getroffen werden müssen, um das aktuelle Sicherheitsniveau auch für ältere Verkehrsteilnehmer mit eventuellen kognitiven, emotionalen und motorischen Einschränkungen zu gewährleisten. Hierzu wurde zunächst mit Hilfe von Verhaltensanalysen in virtueller Realität (VR) untersucht, hinsichtlich welcher Aspekte sich das Verhalten älterer Verkehrsteilnehmer von dem jüngerer unterscheidet. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse und Parameter wurden in ein mikroskopisches Flucht- und Evakuierungsmo- dell übertragen, um den Einfluss auf die Selbstrettung quantifizieren zu können.</p>	
Ergebnisse und Erkenntnisse	
<p>Im Vergleich von älteren mit jüngeren Probanden zeigte sich, dass zwischen diesen Altersgruppen keine Unterschiede hinsichtlich des Verlassens der Fahrzeuge nach Fluchtaufforderung über die Lautsprecheranlage bestehen. Auch bei der Fluchtgeschwindigkeit zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Altersgruppen, wenn auch die Streuung der Gehgeschwindigkeiten bei den Älteren etwa doppelt so groß war wie bei den Jüngeren. Ältere haben weniger oft einen Notausgang aufgesucht als Jüngere. Im Hinblick auf die Wahrnehmung der Gefährlichkeit einer Situation konnte kein Unterschied festgestellt werden, der auf die Altersgruppe zurückzuführen ist.</p> <p>Die auf den Ergebnissen der Verhaltensstudien basierende risikoanalytische Untersuchung ergab keinen nennenswerten Unterschied im Sicherheitsniveau aufgrund einer veränderten Alterszusammensetzung. In einigen Szenarien wurden für das Verkehrsteilnehmerkollektiv 2020 sogar geringere Personenschäden als beim derzeitigen Kollektiv ermittelt. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass der Parameter „Ängstlichkeit“, der dazu beiträgt, dass Personen die Flucht aus dem Fahrzeug beginnen, für ältere Menschen höhere Werte annimmt.</p>	
Inputs / Ansätze zur Weiterentwicklung der Methodik gemäß BAST, Heft B66	
Auf Basis der im Rahmen dieses Forschungsprojektes erlangten Erkenntnisse sind keine weitergehenden Anpassungen zur Berücksichtigung von Älteren in der Methodik nach Heft B66 erforderlich.	

Temporäre Bauphasen

Methode / Verfahren	Österreich / 2010 - 2020
<p>Für die Bewertung von temporären Betriebsphasen gibt es in Österreich zum einen eine grundsätzliche Vorgehensweise gem. RVS 09.03.11, Pkt. 6.3 „Risikobewertung bei zeitlich begrenzten Betriebsphasen“ sowie eine jeweils abgestimmte Vorgehensweise im Einzelfall. Erfahrungen haben gezeigt, dass in vielen Fällen Ergänzungen zu den Rahmenbedingungen in der RVS notwendig sind, da die festgelegten Kriterien meist überschritten werden.</p>	
Beschreibung	
<p>Temporäre Bauphasen sind jene Zeitabschnitte, die in der Regel über ein bis zwei Jahre nicht hinausgehen und in einem Zusammenhang mit den baulichen Tätigkeiten im Tunnel oder dessen Betriebsgebäuden stehen. Dies sind zum Beispiel Tunnelsanierungen, die unter Verkehr oder teilweisem Verkehr (räumlich oder zeitlich) durchgeführt werden; ein Teil des Tunnels (eine Röhre oder eine bestimmte Anzahl von Fahrstreifen) bleiben für den Verkehr befahrbar. Für diesen verbleibenden Verkehr wird das Benutzerrisiko berechnet und mit einem Referenztunnel verglichen. Die Definition des Referenztunnels ist abweichend von den Regelungen für den Normalfall (Regelbetrieb) formuliert:</p> <p>Für den Nachweis eines ausreichend sicheren Betriebes aus während der Bauphase ist einer der nachfolgend beschriebenen Fälle ist einzuhalten:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fall 1: Es ist sicherzustellen, dass das Risiko in einem temporären Gegenverkehrsbetrieb nicht über jenem Risiko eines richtlinienkonformen Referenztunnels mit Gegenverkehr liegt; die limitierenden Randbedingungen sind mit einem Verkehrsaufkommen von max. 10.000 Kfz/24h und Fahrstreifen und einem Schwerverkehrsanteil von 15 % anzusetzen. ▪ Fall 2: Es ist nachzuweisen, dass das Risiko nicht über jenem des Ist-Zustandes des Tunnels liegt. <p>Ist der Nachweis auch mit wirtschaftlich/betrieblich vertretbaren Maßnahmen nicht erreichbar, kann das ALARP-Prinzip (As Low As Reasonably Practicable) zur Vermeidung unverhältnismäßig hoher Kosten im Vergleich zum erzielbaren Nutzen zur Anwendung kommen.</p>	
Anwendungserfahrungen	
<p>In etlichen Fällen ist jedoch weder der 1. noch der 2. Fall – auch mit (verträglichen⁵) Maßnahmen - nicht erreichbar. Darum hat man in Österreich eine zusätzliche Bewertungsmethodik definiert, um diese Verfahren abdecken zu können:</p> <p>Das Risiko der einzelnen Bau-Betriebsphasen wird separat berechnet und für den jeweiligen Betrachtungszeitraum (Kalenderjahr) addiert (einzelne Risikoerwartungswerte aliquot zum Zeitraum). Im Vergleich dazu wird das Referenzrisiko eines Tunnels mit einem JDTV von 10.000 Kfz/24h je Fahrstreifen und einem Schwerverkehrsanteil von 15 % berechnet (siehe Fall 1).</p>	

⁵ Übliche, temporäre Maßnahmen wie zum Beispiel Geschwindigkeitsreduktion, Geschwindigkeitsüberwachung (lokal oder sektional), sowie Schrankenanlagen, Markierungen, temporärer Einsatz einer Portalfeuerwehr etc.



Das Vorgehen wird in Österreich im Zuge von Genehmigungsverfahren zu Sanierungsprojekten (STSG § 7 und § 8) angewandt.

Inputs / Ansätze zur Weiterentwicklung der Methodik gemäß BAST, Heft B66

Die bestehenden Ansätze könnten herangezogen werden, um mehr Ausnahmen zu ermöglichen und so den Handlungsspielraum bei den unterschiedlichsten Projekten zu erhöhen (Bestandstunnel aus den unterschiedlichsten Genehmigungsperioden).

Fahrbahnbelag

Studie	Deutschland 2016
Forschungsprojekt der BASt zum Einsatz offenerporiger Asphalte in Einhausungen und Tunnelbauwerken (FE15.0561/2012/ERB)	
Untersuchungsgegenstand und Ziele	
<p>Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Wechselwirkung zwischen auslaufenden brennbaren Flüssigkeiten und offenerporigen Asphaltbelägen (OPA) zu erfassen und geeignete Eingangsparameter für die Simulation mittels CFD-Berechnungen zu generieren. Mit Hilfe dieser Berechnungen sollten die mit einer offenerporigen Asphaltdeckschicht einhergehenden Risiken bei Flüssigkeitsbränden quantifiziert werden. Grundlage für Abbildung des Ausbreitungs- und Abbrandverhaltens in einem CFD-Modell bildeten Durchfluss- und Ableitversuche sowie Realbrandversuche mit brennbaren Flüssigkeiten auf 80 cm x 80 cm großen Versuchsplatten mit unterschiedlichen Deckschichten. Betrachtet wurden sowohl offenerporige Asphaltbeläge mit unterschiedlichen Hohlraumgehalten sowie ein Splitt-Mastix-Asphalt (SMA) als Deckschicht für eine konventionelle Fahrbahnoberfläche. Die Bestimmung des zeitlichen und räumlichen Ausbreitungsverhaltens von brennbaren Flüssigkeiten auf den verschiedenen Deckschichten erfolgte im Labor mittels konstanter Aufgabe von Benzin. Anschließend wurden im Rahmen von Brandversuchen die zugehörigen Energiefreisetzungsraten bestimmt. Das Fließ- und Abbrandverhalten von brennbaren Flüssigkeiten auf bzw. in offenerporigen Asphalt-oberflächen wurde anschließend auf Basis der erfassten Parameter mittels geeigneter Simulationsmodelle (CFD-Code „OpenFOAM“) abgebildet. Unter Verwendung der entwickelten Modelle wurden Brandsimulationen durchgeführt, die der Quantifizierung der Unterschiede in den Brandwirkungen und damit der zu erwartenden Risiken bei vorliegender dichter oder offenerporiger Deckschicht dienen.</p>	
Ergebnisse und Erkenntnisse	
<p>Die offenerporigen Asphalte unterschieden sich bei den Durchfluss- und Ableitversuchen mit Benzin hinsichtlich der resultierenden räumlichen Austrittsverteilung als auch hinsichtlich der zeitlichen Komponente signifikant vom dichten SMA. In den Brandversuchen zeigte sich durch das Ableiten des Benzins in den Poren eine deutlich verringerte Energiefreisetzungsraten. Bei einer kontinuierlichen Beaufschlagung konzentrierte sich der Brand auf den Ort des Strahlaustritts. In den Versuchen mit gesättigten Platten reduzierte sich die Energiefreisetzung sobald kein Benzin mehr auf der Oberfläche anstand.</p> <p>Die durchgeführten risikoanalytischen Untersuchungen zeigten auf, dass bei Flüssigkeitsbränden eine enorme Ausmaßminderung beim Einsatz von offenerporigem Asphalt zu verzeichnen ist. Unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Flüssigkeitsbränden in Bezug auf die Gesamtheit aller anzunehmenden Brände in Tunneln und Einhausungen ist die Risikominimierung jedoch als gering anzusehen.</p>	
Inputs / Ansätze zur Weiterentwicklung der Methodik gemäß BASt, Heft B66	
<p>Im Fall eines Flüssigkeitsbrandes wird die Brandentwicklung maßgeblich durch die Belagseigenschaften der Fahrbahn beeinflusst. Offenerporige Asphalte können die Energiefreisetzungsraten sehr deutlich verringern und somit zur Risikoreduktion beitragen. Im Zuge von Risikoanalysen sollte daher der Parameter Fahrbahnbelag berücksichtigt werden können.</p>	

Einfluss Thermoscanner

Methode / Verfahren

Österreich, Slowenien, Portugal

Eine Thermoscanner-Anlage kann als risikomindernde Maßnahme vor einem Straßentunnel installiert werden. Die Temperatur der vorbeifahrenden Fahrzeuge wird gemessen und überhitzte Fahrzeuge können identifiziert werden bevor sie in den Tunnel einfahren.

Fährt ein Fahrzeug durch den Scanner wird ein Foto und gleichzeitig ein thermischer Scan des Fahrzeugs angefertigt. Anhand des Fotos wird der Fahrzeugtyp definiert (Pkw, Lkw, Bus, etc.); die Fahrzeugtypen werden wiederum in verschiedene Zonen (wie Motor, Räder, Last, Fahrgastzone) unterteilt und für jede Zone wird eine spezifische, typische maximale Referenztemperatur definiert. Wenn der Thermoscanner innerhalb einer bestimmten Zone Temperaturen jenseits einer solchen Referenztemperatur erkennt, wird das Fahrzeug als überhitzt identifiziert und das Fahrzeug wird auf einen Abkühlbereich geleitet. Dort haben die Fahrer, die Möglichkeit eine Notfallstation aufzusuchen, bei der sie das Thermobild ihres Fahrzeuges sehen und damit die Ursache der Überhitzung ergründen können (z. B. ein überhitzter Reifen). Sie können sich auch mit dem Tunnelbetreiber in Verbindung setzen. Nach dem Abkühlen müssen sie den Thermoscanner erneut passieren, bevor sie schlussendlich durch den Tunnel fahren können.

Somit kann diese Maßnahme die Häufigkeit von Bränden infolge technischer Defekte (Überhitzung Motor, Bremsen, etc.) verringern.

Beschreibung

Die möglichen Auswirkungen der Installation eines Thermoscanners vor dem Portal eines Tunnels können anhand der tatsächlichen Betriebsdaten eines Thermoscanners abgeleitet werden, der bereits seit Anfang 2019 im Arlberg-Tunnel⁶ an der Autobahn S16 in Österreich implementiert ist:

An den Portalen wurden im Jahr 2019 durchschnittlich 0,133 überhitzte Lkws detektiert. In einem Ansatz wird angenommen, dass 50 % der überhitzten Lkws eine Panne im Tunnel hätten (14 km langer Tunnel); dadurch lässt sich die Aussage treffen, dass 0,067 Lkw-Pannen pro Tag durch den Einsatz des TS verhindert werden können.

Von Januar 2019 bis Juni 2019 wurden 371 Alarmer gezählt, von denen 284 Fehlalarme aufgrund einer falschen Identifizierung des Fahrzeugs oder des Fahrzeugteils waren. Die verbleibenden 87 echten Alarmer waren daher 0,1391 Überhitzungen pro Tag. Unter der o.a. Annahme, dass 50 % der Überhitzungen ohne Detektion im Thermoscanners zu einer Panne im Tunnel geführt hätten, können im Arlbergtunnel 0,0666 Pannen/Tag durch die Installation des Thermoscanners vermieden werden.

Im Arlbergtunnel ereigneten sich (ohne TS) 0,283 Pannen pro Tag (langjähriges Mittel); dadurch lässt sich ein Reduktionsfaktor von $0,0666/0,283 = 0,235 \sim 24 \%$ von verhinderten Pannen im Tunnel durch die Installation des Thermoscanners errechnen.

Ergebnisse und Erkenntnisse

Die Auswertungsdaten können mit zunehmender Einsatzzeit des Thermoscanners ergänzt werden und diese Daten können dadurch eine breitere Datenbasis für die Auswertungen ergeben.

Anwendungserfahrungen

- Praktische Erfahrungen: Arlbergtunnel; Auswertungen von 1,5 Jahren:

Im Zuge des Sicherheitsausbaues Arlbergtunnel wurde dieser auch bei beiden Portalen mit Thermoscannern (TS) ausgestattet. Bei Betrieb des Thermoscanners müssen sämtliche KFZ > 3,5t diesen passieren. Der TS Betrieb erfolgt autark – das bedeutet ein Eingriff durch die Operatoren ist lediglich im Störfall erforderlich bzw. wenn eine Fehlauflösung vorliegt.

Die Detektionen des Thermoscanners werden jeden Monat auf Plausibilität hin ausgewertet. Ebenso dient diese Auswertung der Verbesserung der Detektion des Thermoscanners, um Fehldetektionen und die damit verbundene Ausleitung der Fahrzeuge zu verhindern. Bei dieser Plausibilitätsprüfung werden die einzelnen Alarmer mit dem vorliegenden Thermobild und Foto des jeweiligen Fahrzeuges verglichen. Es kann

⁶ Der Arlbergtunnel ist mit ca. 14 km der längste Straßentunnel Österreichs.

dabei die Kategorie falsch oder Fahrzeugteil falsch sein bzw. beides zusammen falsch. Ziel ist es durch die monatliche Auswertung die „Treffergenauigkeit“ des Thermoscanners zu optimieren.

- Anwendung in Risikoanalysen: Karawankentunnel (A-SLO), Maraotunnel (PT):

In langen Tunnelanlagen können die Auswertungsdaten des Arlbergtunnels verwendet werden. Ändert sich die Tunnelcharakteristik zu stark, sind die Grundlagendaten nur mehr beschränkt anwendbar.

Einfluss Elektromobilität

Elektromobilität und Tunnelsicherheit – Gefährdungen durch Elektrofahrzeugbrände	SCHWEIZ / 2018
Bundesamt für Strassen, „Elektromobilität und Tunnelsicherheit – Gefährdungen durch Elektrofahrzeugbrände“, Forschungsprojekt VSS 2016/221, Juni 2018	
Untersuchungsgegenstand und Ziele	
<p>Neben der fortschreitenden Digitalisierung, der aufkommenden «shared mobility» und dem gesellschaftlich vermehrt akzeptierten automatisierten Fahren, wird das elektrisch angetriebene Fahrzeug in den nächsten Jahren mutmaßlich zu einer wichtigen Veränderung im Straßenverkehr führen. Prognosen deuten darauf hin, dass auch in Zukunft mit einem deutlich steigenden Anteil von Elektrofahrzeugen aller Typen im motorisierten Individualverkehr zu rechnen ist und sich die Wachstumszahlen zunehmend auf höheren Niveaus fortsetzen werden. Diese alternativen Antriebsformen beziehen ihre elektrische Energie in der Regel aus hochkapazitiven Batterien, die aufgrund des großen Energieinhalts und der hochreaktiven chemischen Bestandteile mit Brandgefahren und weiteren chemischen oder elektrischen Risiken verbunden sind. Dementsprechend stellt sich u.a. auch die Frage des Einflusses dieser Fahrzeuge auf die Risiken in Straßentunneln.</p>	
<p>Im Auftrag des Bundesamtes für Straßen ASTRA wurde ein Forschungsprojekt initiiert, das sich mit den folgenden Fragestellungen auseinandersetzte:</p>	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Führen Elektrofahrzeugbrände in Straßentunneln im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugbränden zu anderen Gefährdungen? ▪ Müssen der zukünftige Betrieb von Straßentunneln oder deren technische Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen angepasst werden? 	
<p>Dabei wurden drei Zielsetzungen verfolgt:</p>	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Experimentelle Analyse der Auswirkungen eines Elektrofahrzeugbrandes in einem Straßentunnel 2. Aufzeigen der tunnelspezifischen Gefährdungsunterschiede eines Elektrofahrzeugbrandes und einem konventionellen Fahrzeugbrand aufgrund der unterschiedlichen Energiespeicherungen 3. Aufzeigen der erwarteten risikobezogenen Auswirkungen auf den zukünftigen Betrieb von Straßentunneln und möglicher Maßnahmen 	
<p>Der Fokus der Untersuchungen lag auf Personenwagen.</p>	
Ergebnisse und Erkenntnisse	
<p>Die zentralen Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Studie sind:</p>	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die in Versuchen erzeugten Batteriebrände charakterisierten sich hinsichtlich ihrer thermischen Wirkung durch ihre schnelle Entstehung, ihre hohe Energiefreisetzung in kurzer Zeit und teilweise durch thermische Vorgänge wie Verpuffungen und Stichflammen mit starker Rauchbildung und hohen Temperaturen. Es wurden aber keine Explosionen oder andere thermische Auswirkungen beobachtet, die sich von konventionellen Treibstoffbränden markant unterscheiden würden. ▪ Im Gegensatz zu konventionellen Tunnelbränden verändern sich aber die Gefährdungsbilder für Personen: Vollständig brennende Elektrofahrzeuge emittieren ebenso wie konventionelle Fahrzeuge Schadstoffe, die aus der exothermischen Zersetzung des Fahrzeugmaterials entstehen. Aufgrund der chemischen Komponenten von Lithium-Ionen-Batterien sind in den Rauchgasen eines Elektrofahrzeugbrandes aber zusätzliche Stoffe enthalten, die zum einen sehr reaktionsfreudig sind und zum anderen für den Menschen ein erhebliches gesundheitliches Risiko darstellen. In unmittelbarer Nähe führen Elektrofahrzeugbrände zu neuen und potenziell stärkeren chemischen Gefährdungen für Personen als bei konventionellen Fahrzeugbränden. Insgesamt gehen die Autoren aber davon aus, dass sich die chemische Gefährdungssituation für Tunnelnutzer mit zunehmendem Abstand vom Brandereignis nicht verändern wird. ▪ Aufgrund der Versuchserkenntnisse lässt sich gemäß der Studie kein erkennbarer Anpassungsbedarf für die Betriebs- und Sicherheitsausrüstung in Straßentunneln ableiten. Lüftungen von Straßentunneln, als wichtiges Element zur Ermöglichung der Selbstrettung der Tunnelnutzer im Ereignisfall, sind (in der 	

Schweiz) bereits für große Brandereignisse mit erheblichen Schadstoffemissionen ausgelegt. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass Elektrofahrzeugbrände in normgerechten Straßentunneln mit den bestehenden technischen Einrichtungen ausreichend bewältigt und die Schutzziele der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung weiterhin erreicht werden können.

- Die Hypothese, dass sich die Brandgefährdung in Straßentunneln aufgrund von hochkapazitiven Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen generell erhöhen wird, kann aufgrund der Resultate der Studie nicht bestätigt werden. Die Studie kommt zum Schluss, dass die thermischen Brandgefährdungen von Elektrofahrzeugen mit jenen von konventionellen Fahrzeugen vergleichbar sind. In unmittelbarer Nähe und bei ungünstigen Lüftungssituationen führen Elektrofahrzeugbrände hingegen zu neuen und potenziell stärkeren chemischen Gefährdungen.

Inputs / Ansätze zur Weiterentwicklung der Methodik gemäß BAST, Heft B66

Aufgrund der Ergebnisse des Forschungsprojektes lässt sich schlussfolgern, dass für eine Weiterentwicklung der Methodik gemäß BAST Heft B66 die veränderten Gefährdungen durch einen zunehmenden Anteil an Elektrofahrzeugen nicht gesondert berücksichtigt werden müssen.

Fatalitätskriterien

Studie	Japan / 2018-2019
NEXCO-EAST / Forschungsprojekt	
Untersuchungsgegenstand und Ziele	
<p>In dieser Studie wurden mit Hilfe des österreichischen Tunnelrisikomodells verschiedene Fatalitätskriterien verglichen und deren Einfluss auf die Maßnahmenbewertung abgeschätzt. Es wurde eine alternative Art des Notausgangs in Form einer „Rutsche“ im Risikomodell implementiert und relativ zu den üblichen Notausgängen bewertet.</p> <p>Ein weiterer Punkt, der diskutiert wurde, war die räumliche Auflösung, welche für die FDS-Simulationen verwendet wurde.</p>	
Ergebnisse und Erkenntnisse	
<p>In diesem Projekt wurde das österreichische TuRisMo zwei, in Bezug auf den Evakuierungsvorgang, abgewandelten Modellen gegenübergestellt. Eines der Modelle simulierte einen Tunnel mit zwei Notausgangstüren. Im Gegensatz zum österreichischen Modell galten jedoch jene Personen, welche einen Notausgang erreichen, noch nicht als gerettet, sondern evakuierende Personen mussten warten bis der Notausgang frei ist (ein mögliches Aufstauen von Flüchtenden wurde mitberücksichtigt). Das zweite Modell simulierte einen Tunnel mit fünf „Rutschen“ anstatt Notausgangstüren. In beiden Fällen wurde ein Extinktionskoeffizient (EC) von 0.4 als Fatalitätsgrenze angenommen.</p> <p>Für jedes der drei unterschiedlichen Evakuierungsmodelle wurden drei Notfall-Programme in Form einer Kombination aus Lüftungsstrategie und FFFS-Aktivierungszeitpunkt untersucht. Des Weiteren wurden unterschiedliche Brandgrößen sowie unterschiedliche Verkehrszustände ausgewertet und verglichen. Daraus resultierten insgesamt 27 Schadensausmaßwerte für jedes Notfall-Programm.</p> <p>Für die FDS-Simulation der Brände wurde der Einfluss verschiedener räumlicher Netzauflösungen simuliert (1.0m x 0.3m x 0.3m und 0.25m x 0.3m x 0.3m). In einem Vergleich der Simulationsergebnisse stellte sich heraus, dass es an manchen Orten im simulierten Tunnel zu abweichenden Extinktionskoeffizienten kommt. Wird das Fatalitätskriterium EC=0.4 angesetzt, wirken sich diese Unterschiede auf das resultierende Schadensausmaß aus. Wird, sowie im TuRisMo üblich, ein akkumulationsbasiertes Fatalitätskriterium angewandt, bewirken die obengenannten Abweichungen kaum einen Unterschied im Schadensausmaß da dieses Kriterium robuster gegen auftretende Fluktuationen ist.</p>	
Inputs / Ansätze zur Weiterentwicklung der Methodik gemäß BAST, Heft B66	
<p>Der Ansatz, dass sich evakuierende Personen vor einem Notausgang aufstauen und dementsprechend länger einer schädlichen Umgebung ausgesetzt sind, kann unter speziellen Umständen (z B. vollgestauter Tunnel und sehr große Notausgangsabstände) das Ergebnis beeinflussen und sollte daher überdacht werden.</p> <p>Die Ergebnisse dieses Projekts lassen deutlich erkennen, dass das akkumulationsbasierte Fatalitätskriterium robuster in Bezug auf simulationsbedingte Fluktuationen ist als jenes basierend auf der Überschreitung eines Grenzwertes des Extinktionskoeffizienten.</p>	

A2. Einfluss von Tunnelmerkmalen auf die Fahrzeugunfallrate

Die statistisch ermittelte Unfallrate (Quotient aus der Anzahl erfasster Fahrzeugunfälle innerhalb eines Tunnels im Untersuchungszeitraum und der zugrunde liegenden Fahrleistung in Fahrzeug-km) weist sehr große Unterschiede auf. Die Unfallraten für jeden der 156 untersuchten Tunnel (inkl. Elbtunnel) sind in den nachfolgenden Abbildung 30 bzw. Abbildung 10 gegliedert nach Unfallart dargestellt. In 24 Tunneln wurde kein Fahrzeugunfall erfasst (Unfälle außerhalb des Tunnels können jedoch aufgetreten sein), bei den restlichen 132 Tunneln ist die höchste Unfallrate um etwa einen Faktor 150 höher als die tiefste. Der Stellenwert der einzelnen Unfallarten ist zudem sehr unterschiedlich, was bei geringen DTV auf Zufälligkeiten beruhen, aber auch die Folge von Besonderheiten bei der Datenerfassung sein kann.

Statistische Aussagen auf Stufe einzelner Tunnel sind nur beschränkt möglich und deren Signifikanz ist oftmals nicht gegeben. In Tunneln mit einer geringen Fahrleistung kann ein Unfall mehr bzw. weniger beträchtlichen Einfluss haben (Beispiel: ein einziger Alleinunfall im Kirchlwandtunnel, der einen DTV von lediglich 3.700 Fahrzeugen pro Tag aufweist, führt rechnerisch zur zweithöchsten Unfallrate aller Tunnel). Zudem kann die Art der Erfassung von Bagatellunfällen das Resultat maßgeblich beeinflussen. Deshalb wird im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens nicht auf Unfallraten einzelner Tunnel eingegangen, sondern nur auf Mittelwerte über Gruppen von Tunneln. Sind die gewählten Gruppen klein oder weisen die darin enthaltenen Tunnel (zufälligerweise) nur einen geringen DTV auf, so sind die Ergebnisse mit großer Vorsicht zu interpretieren.

Nachfolgend werden für verschiedene Tunnelmerkmale bzw. -merkmalskombinationen die mittleren Raten von Fahrzeugunfällen, gegliedert nach Unfallart, mittels gestapelten Balkendiagrammen dargestellt. Als Interpretationshilfe wird jeweils bei allen Abbildungen oberhalb des jeweiligen Balkens angegeben, über welche Anzahl Tunnel einer definierten Merkmalskombination der Mittelwert gebildet wurde.

Berücksichtigt werden jeweils alle Fahrzeugunfälle, die sich zwischen 2009 und 2019 in den 156 Tunneln zugetragen haben, zu denen DTV-Werte vorliegen (ohne Elbtunnel). Nicht berücksichtigt sind Fahrzeugunfälle, die sich außerhalb von Tunneln ereignet haben, auch wenn sich der Unfallort in Portalnähe befindet.

Auf die Interpretation der Darstellungen wird in Kapitel 7.3.1.6 eingegangen, wo die Ergebnisse zusammengefasst sind.

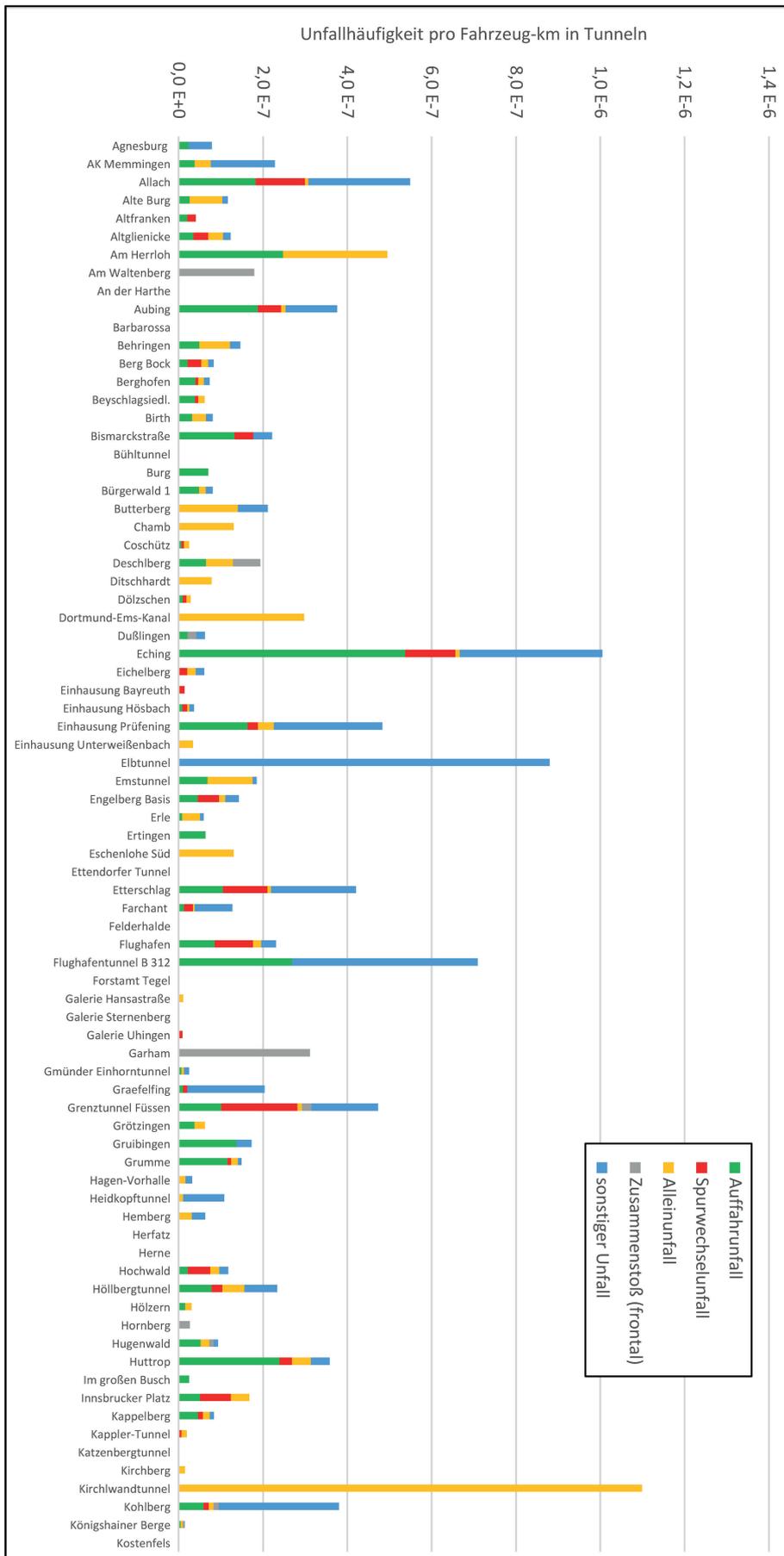


Bild 29: Unfallrate pro Tunnel gegliedert nach Fahrzeugunfall (alphabetisch nach Tunnelname, Teil 1)

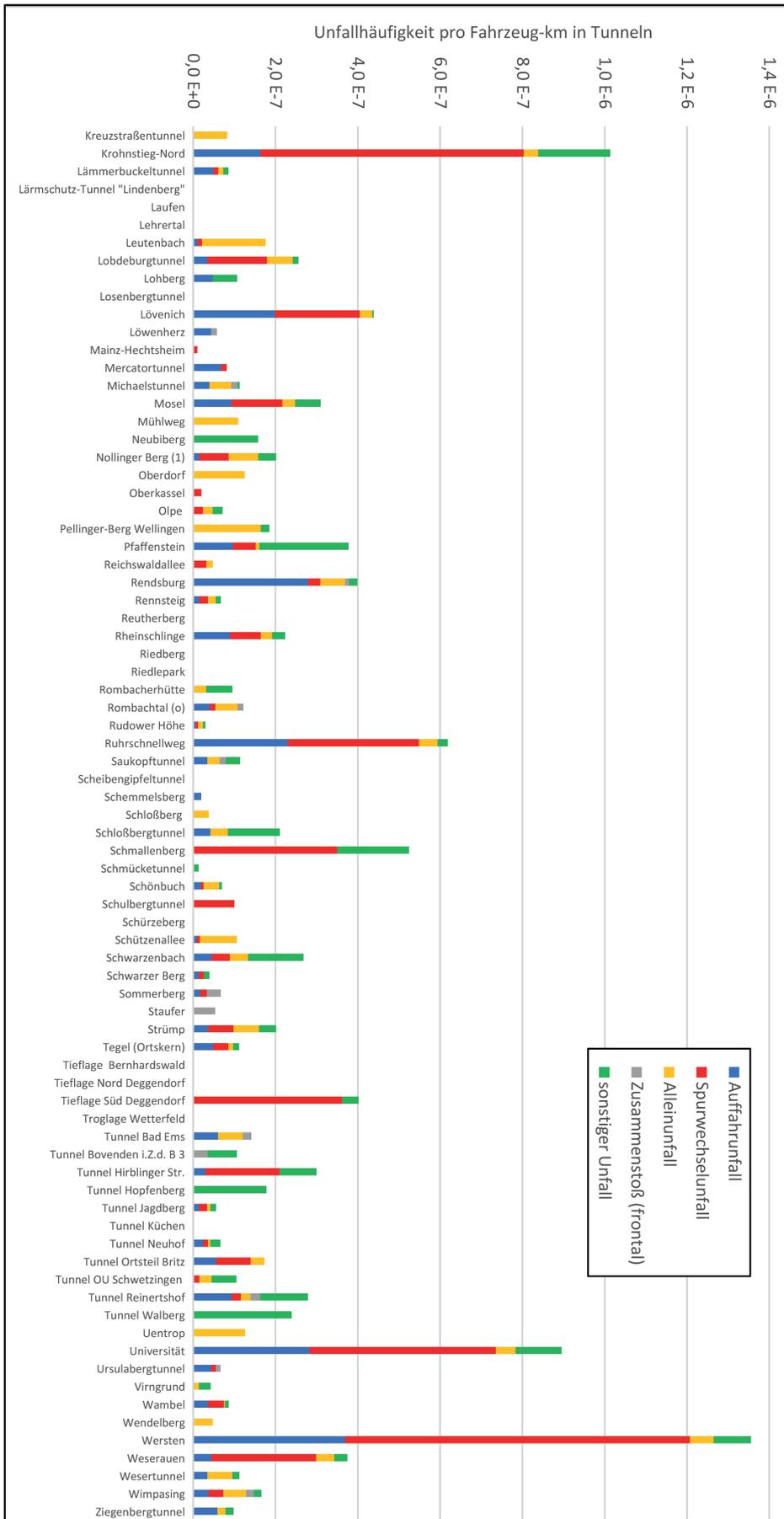


Bild 30: Unfallrate pro Tunnel gegliedert nach Fahrzeugunfall (alphabetisch nach Tunnelname, Teil 2)

Erläuterung zu den Abbildungen

Damit der Leser die statistische Signifikanz der nachfolgend dargestellten Unfallraten einordnen kann, sind pro Abbildung jeweils folgende Größen dargestellt:

1. Anzahl ausgewertete Tunnel der jeweiligen Merkmalskombination (Zahlen oberhalb der Säulen)
2. Fahrleistung innerhalb der Auswerteperiode (pro Mia. Fahrzeug-Kilometer)
3. Anzahl Ereignisse, die sich innerhalb der Auswerteperiode pro Unfallart zugetragen haben

Die Reihenfolge der Zahlen gemäß 2. und 3. von links nach rechts entspricht jeweils der horizontalen Abfolge der Tunnelmerkmale entlang der x-Achse. Gleiches gilt in Bezug auf die Abfolge von unten nach oben bzw. die Reihenfolge der Teilsäulen (vgl. auch nachfolgende Darstellung, welche die Zuordnung über Farben und Beschriftungen erläutert).

	Gegenverkehr mit Zu- oder Abfahrt	Gegenverkehr ohne Zu- oder Abfahrt	Richtungsverkehr mit Zu- oder Abfahrt	Richtungsverkehr ohne Zu- oder Abfahrt
sonstiger Unfall	1	61	132	575
Zusammenstoß (frontal)	3	24	1	6
Alleinunfall	11	41	124	216
Spurwechselunfall	0	21	796	396
Auffahrunfall	8	66	528	607

Kleine Fahrleistungen bzw. eine geringe Anzahl Tunnel weisen darauf hin, dass die zugehörigen Unfallraten starken zufälligen Schwankungen unterworfen sein dürften (z.B. bei einem Vergleich verschiedener Auswerteziträume)

Verkehrsart und Vorhandensein einer Zu- bzw. Abfahrt

a) Unfälle innerhalb von Tunneln

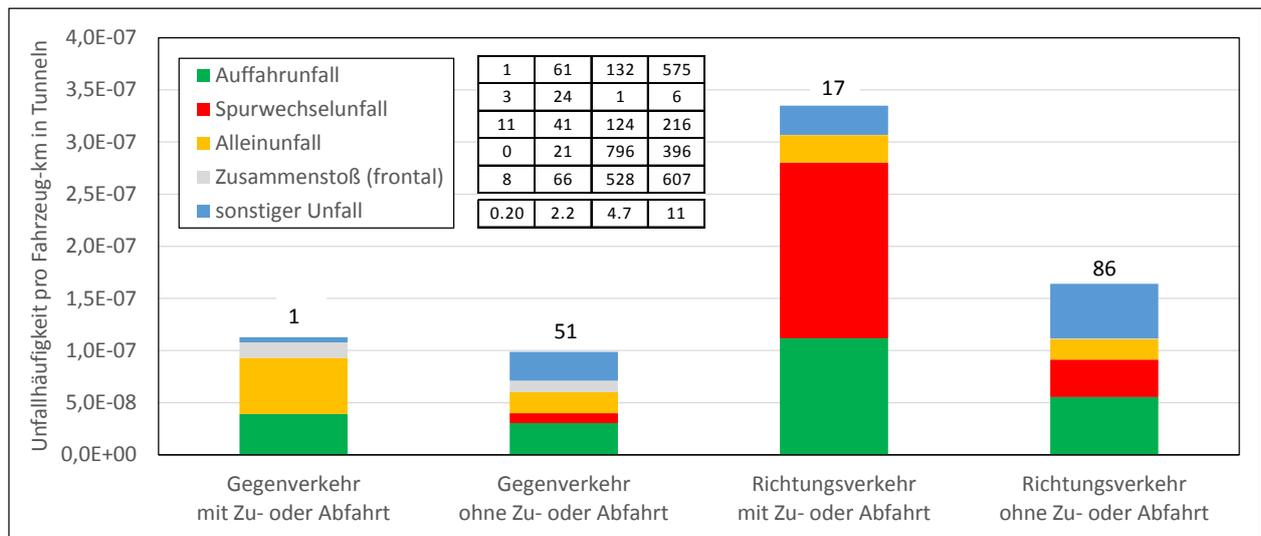


Bild 31: Mittlere Unfallrate gegliedert nach Verkehrsart und Vorhandensein von Zu- / Abfahrt – innerhalb des Tunnels Bsp. Zahlenwerte: Bei Gegenverkehrstunneln ohne Zu-/Abfahrten haben sich über eine Fahrleistung von 2,2 Mia. Fahrzeug-km 21 Spurwechselunfälle ereignet.

b) Alle Unfälle (innerhalb oder außerhalb von Tunneln)

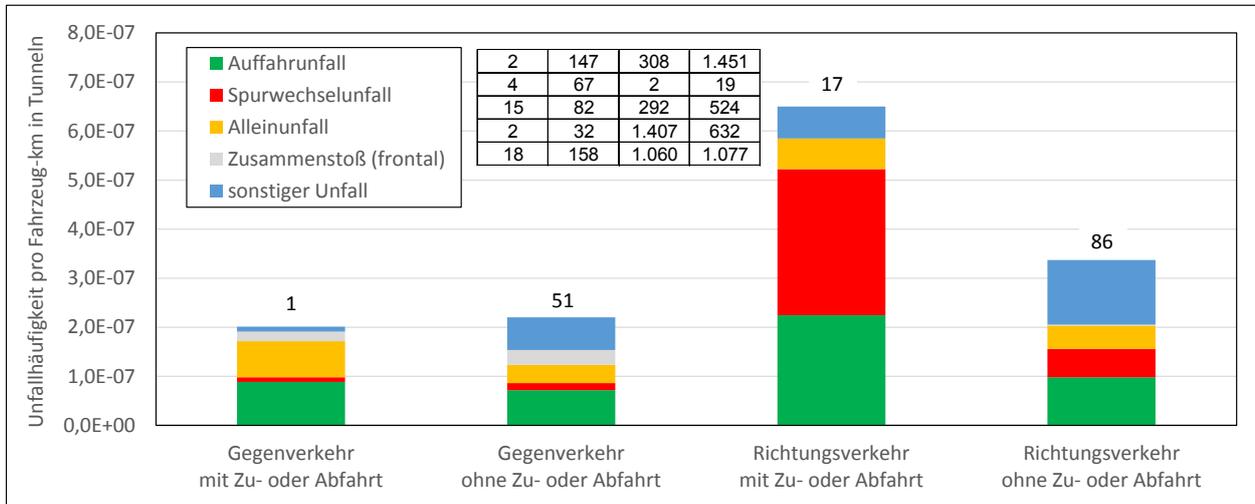


Bild 32: Mittlere Unfallrate gegliedert nach Verkehrsart und Vorhandensein von Zu- / Abfahrt – alle Unfälle.

Bsp. Zahlenwerte: Bei Gegenverkehrstunneln ohne Zu-/Abfahrten haben sich über eine Fahrleistung von 2,2 Mio. Fahrzeug-km 21 Spurwechselunfälle ereignet.

Ein Vergleich der beiden obigen Abbildungen zeigt, dass die relative Häufigkeit von Unfällen sowie die Verteilung nach Unfallart ziemlich unabhängig davon ist, ob alle Unfälle betrachtet werden oder nur diejenigen, die sich innerhalb eines Tunnels zugetragen haben. Schließt man die Unfälle außerhalb von Tunneln in die Auswertungen mit ein, so ergeben sich in etwa doppelt so hohe Unfallraten.

Von allen betrachteten Merkmalen haben die Verkehrsart und das Vorhandensein einer Zu- bzw. Abfahrt im Mittel den größten Einfluss auf die Unfallrate. Wenn im Folgenden der Einfluss weiterer Tunnelmerkmale betrachtet wird, so ist es deshalb für interpretierbare Ergebnisse notwendig, nicht nur Mittelwerte für diese darzustellen, sondern die obige Gliederung ebenfalls vorzunehmen (ansonsten erfolgt die Mittelung über zu heterogene Tunnelgruppen).

Die nachfolgenden Auswertungen beschränken sich auf Unfälle in Tunneln (d.h. solche außerhalb wurden ausgeschlossen).

Einfluss der Anzahl Fahrstreifen

Mangels Gegenverkehrstunnels mit mehreren Fahrstreifen pro Fahrtrichtung werden nur Richtungsverkehrstunnel mit 2 oder 3 Fahrstreifen pro Röhre berücksichtigt.

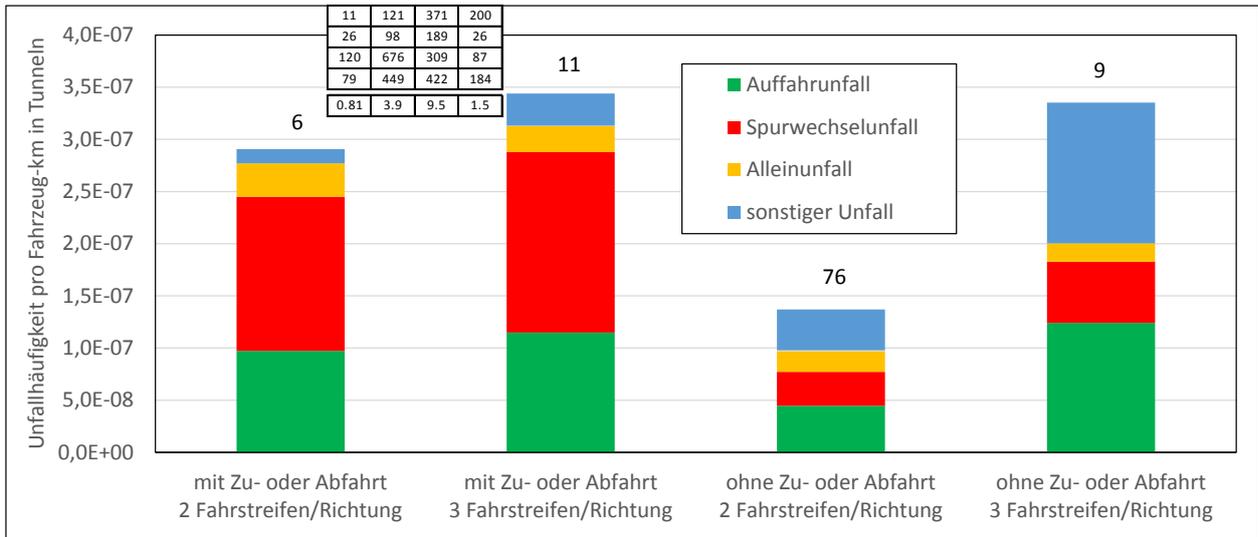


Bild 33: Mittlere Unfallrate für Richtungsverkehrstunnel nach Vorhandensein von Zu- / Abfahrt und Anzahl Fahrstreifen

Einfluss des Verkehrsaufkommens pro Fahrstreifen

Mangels Gegenverkehrstunnels mit mehreren Fahrstreifen pro Fahrtrichtung werden nur Richtungsverkehrstunnel mit 2 oder 3 Fahrstreifen pro Röhre berücksichtigt. Auf der x-Achse ist – neben dem Vorhandensein einer Zu- bzw. Abfahrt – der DTV pro Fahrstreifen (d.h. Quotient aus DTV (beide Richtungen) und der über beide Fahrtrichtungen aufsummierten Zahl der Fahrstreifen) dargestellt.

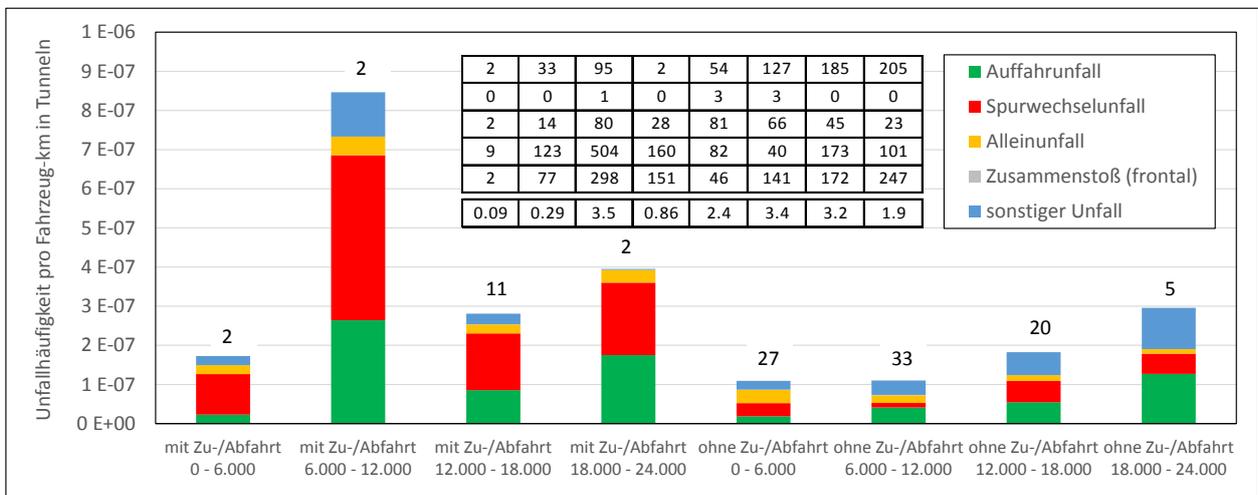


Bild 34: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln gegliedert nach Vorhandensein von Zu- / Abfahrt und DTV pro Fahrstreifen

Einfluss der Tunnellänge

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Einfluss der Tunnellänge bei Gegenverkehrstunneln.

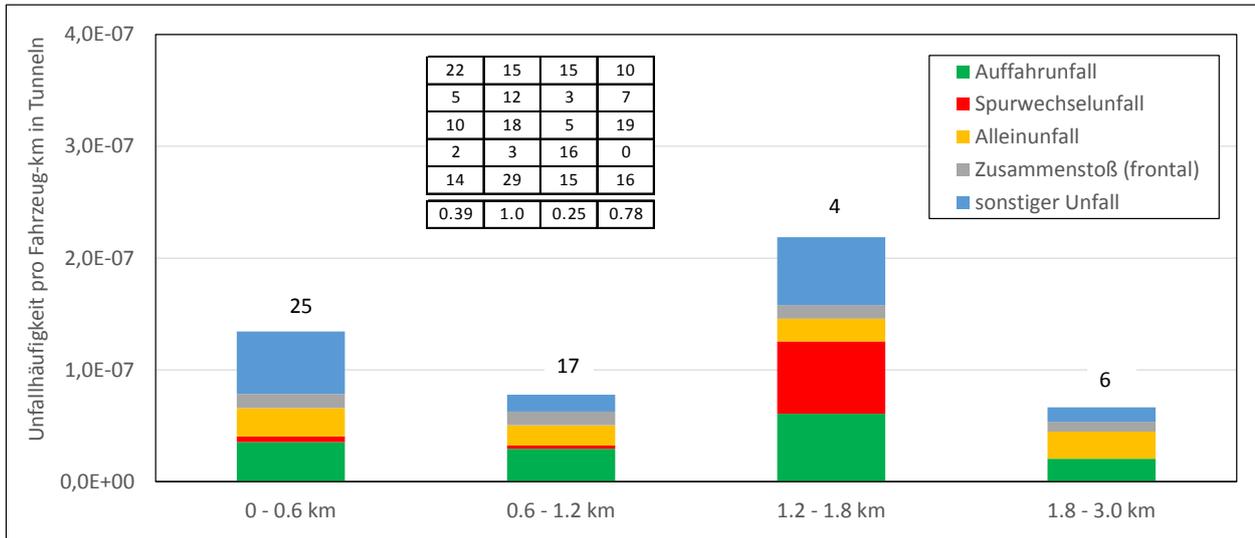


Bild 35: Mittlere Unfallrate von Gegenverkehrstunneln gegliedert nach Tunnellänge

Am Beispiel der Richtungsverkehrstunnel wird anhand der nachfolgenden drei Abbildungen aufgezeigt, wie sich die Ergebnisse und ihre Interpretierbarkeit ändern, wenn die Gesamtheit der Tunnel, über welche die Unfallrate gemittelt wird, zunehmend homogener – und damit aber auch kleiner – gewählt wird. Je homogener die Tunnelgruppe gewählt wird, desto eher lassen sich interpretierbare Zusammenhänge aus den Mittelwerten ableiten – zumindest solange die Zahl der Tunnel, über die gemittelt wird, nicht zu klein wird.

a) Auswertung aller 103 Richtungsverkehrstunnel

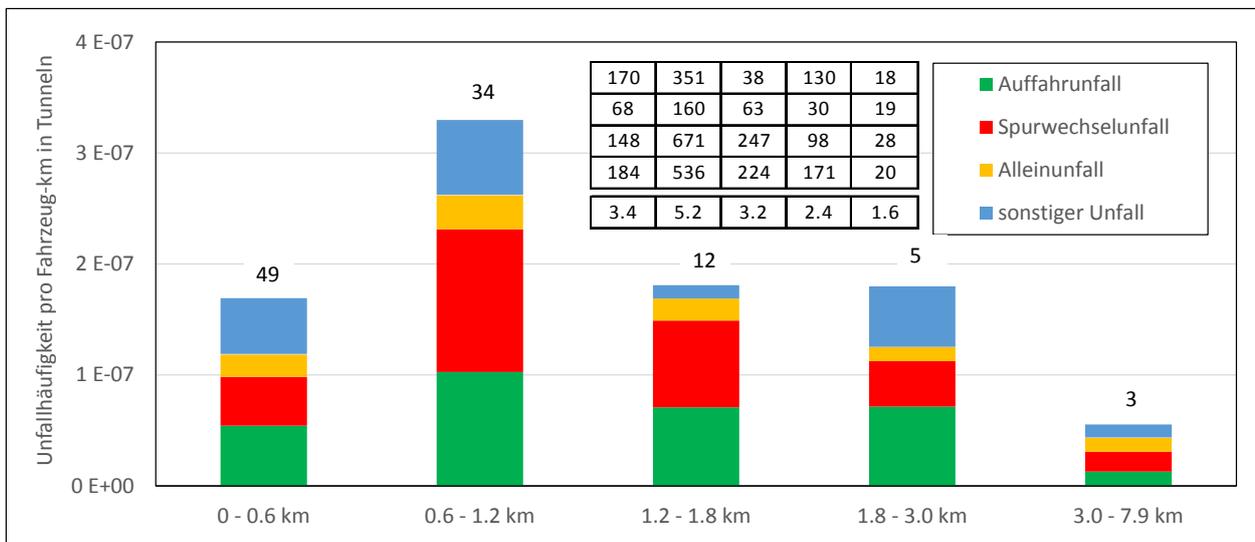


Bild 36: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln gegliedert nach Tunnellänge

b) Auswertung aller 86 Richtungsverkehrstunnel ohne Zu- bzw. Abfahrt

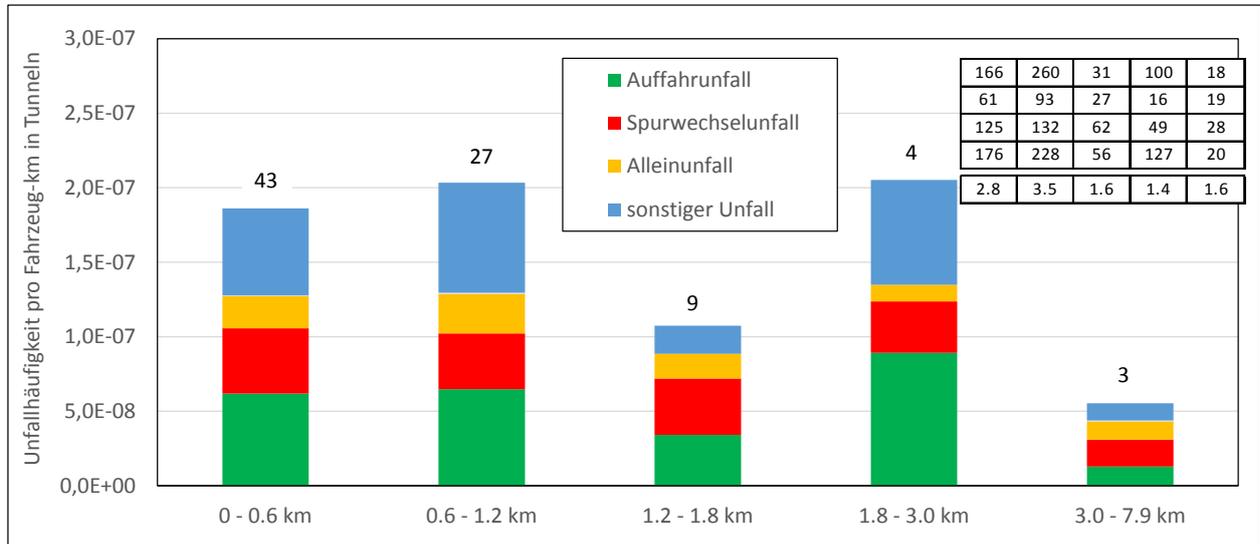


Bild 37: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln ohne Zu- / Abfahrt gegliedert nach der Tunnellänge

c) Auswertung aller 53 Richtungsverkehrstunnel ohne Zu- bzw. Abfahrt mit einem Verkehrsaufkommen zwischen 6.000 und 18.000 Fahrzeuge/Fahstreifen

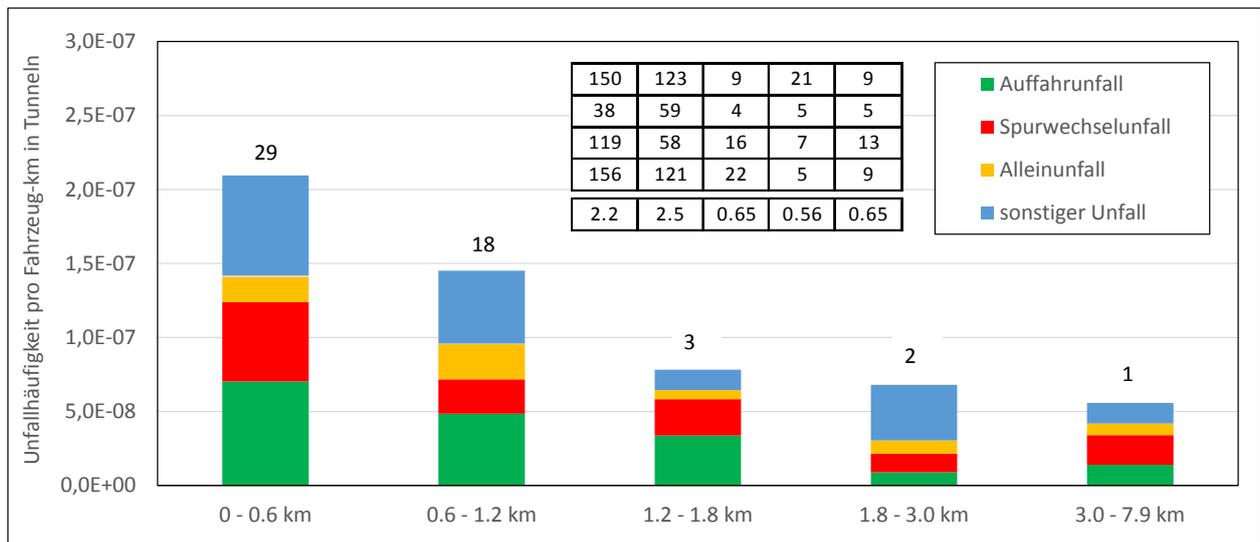


Bild 38: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln ohne Zu- / Abfahrt und mit einem Verkehrsaufkommen pro Fahstreifen zwischen 6.000 und 18.000 Fahrzeuge/Tag gegliedert nach der Tunnellänge

Einfluss des Schwerverkehrsanteils

Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen den Einfluss des Schwerverkehrsanteils auf die Unfallrate für Richtungsverkehrstunnel ohne Zu- bzw. Abfahrt.

a) Auswertung aller 86 Richtungsverkehrstunnel ohne Zu- bzw. Abfahrt

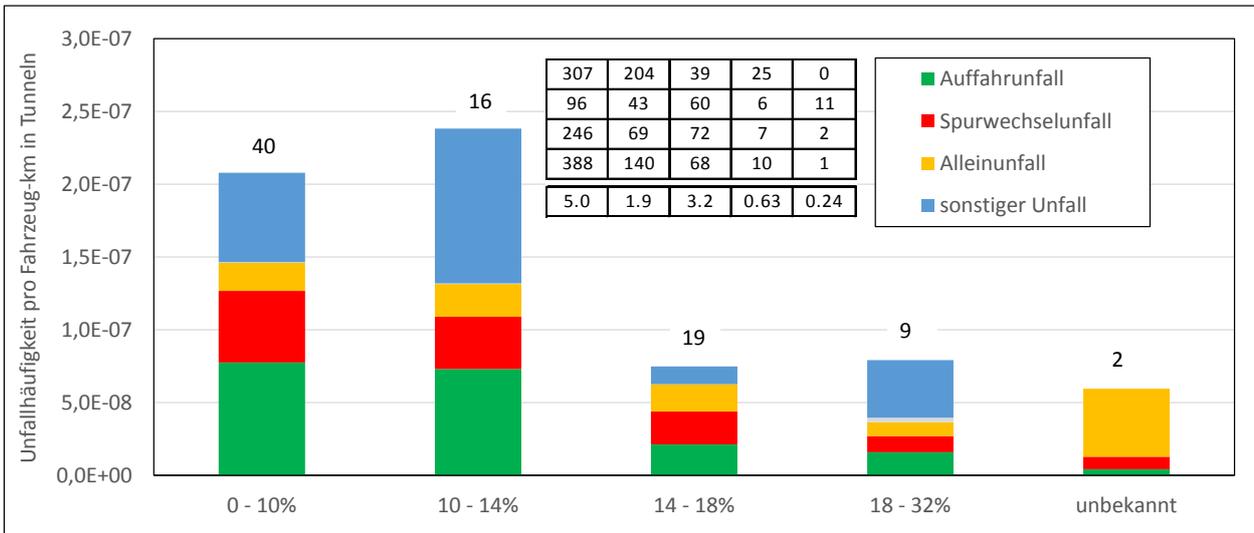


Bild 39: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln ohne Zu- / Abfahrt nach dem Anteil Schwerverkehr

b) Auswertung aller 53 Richtungsverkehrstunnel ohne Zu- bzw. Abfahrt mit einem Verkehrsaufkommen zwischen 6.000 und 18.000 Fahrzeuge/Fahstreifen

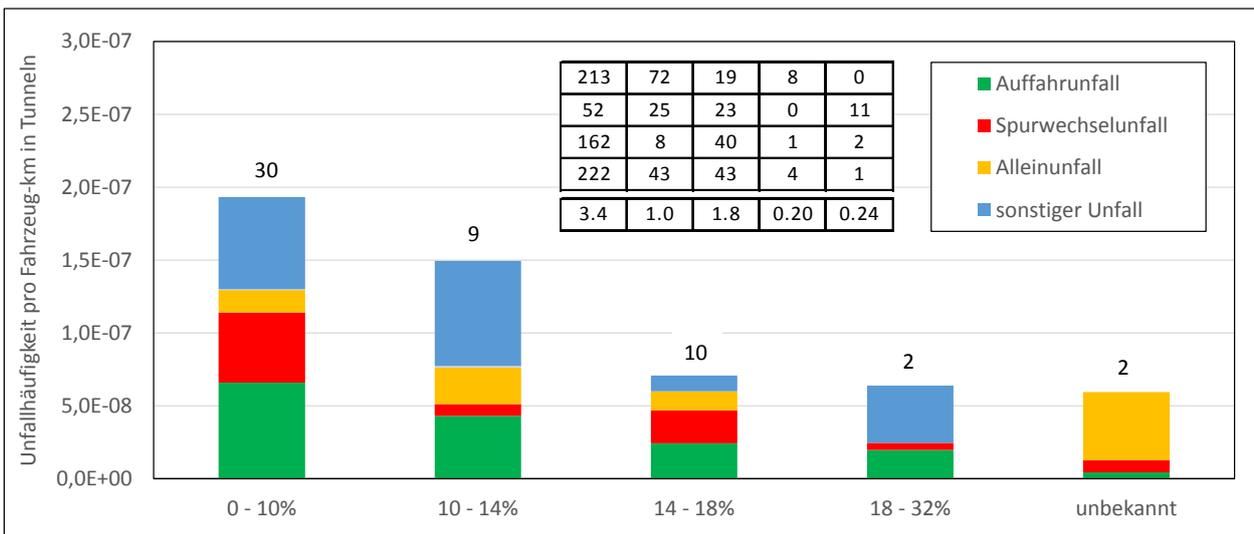


Bild 40: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln ohne Zu- / Abfahrt und mit einem Verkehrsaufkommen pro Fahstreifen zwischen 6.000 und 18.000 Fahrzeuge/Tag nach dem Anteil Schwerverkehr

Einfluss von Seitenstreifen

Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen den Einfluss des Vorhandenseins eines Seitenstreifens auf die Unfallrate für Richtungsverkehrstunnel.

a) *Auswertung aller 103 Richtungsverkehrstunnel*

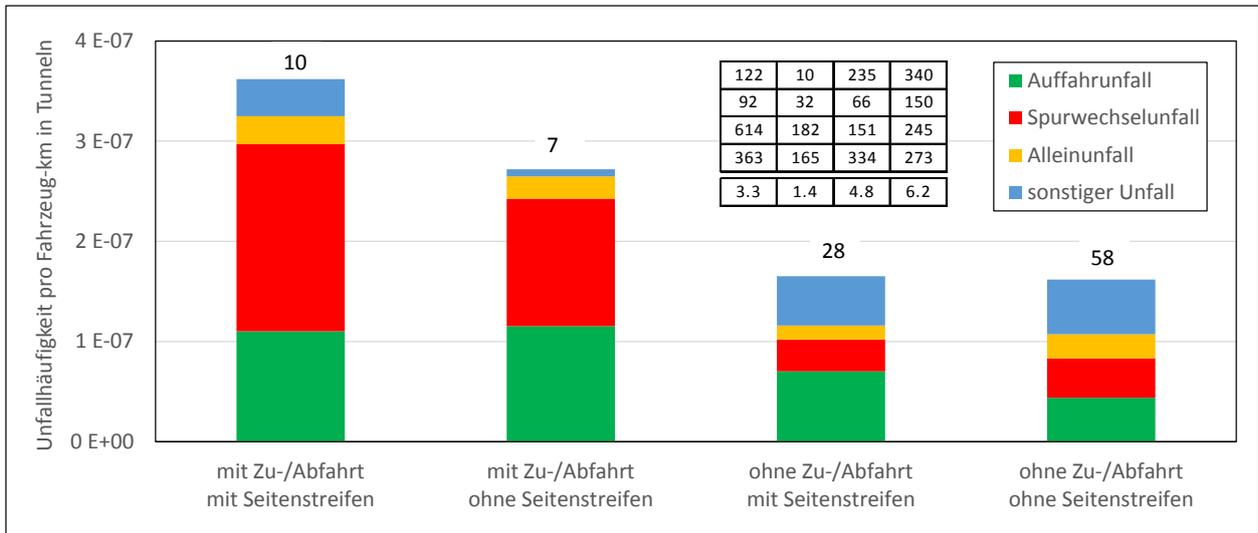


Bild 41: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln gegliedert nach dem Vorhandensein einer Zu- / Abfahrt sowie eines Seitenstreifens

b) *Auswertung aller 39 Richtungsverkehrstunnel mit einem Verkehrsaufkommen ab 12.000 Fahrzeuge/Fahrstreifen*

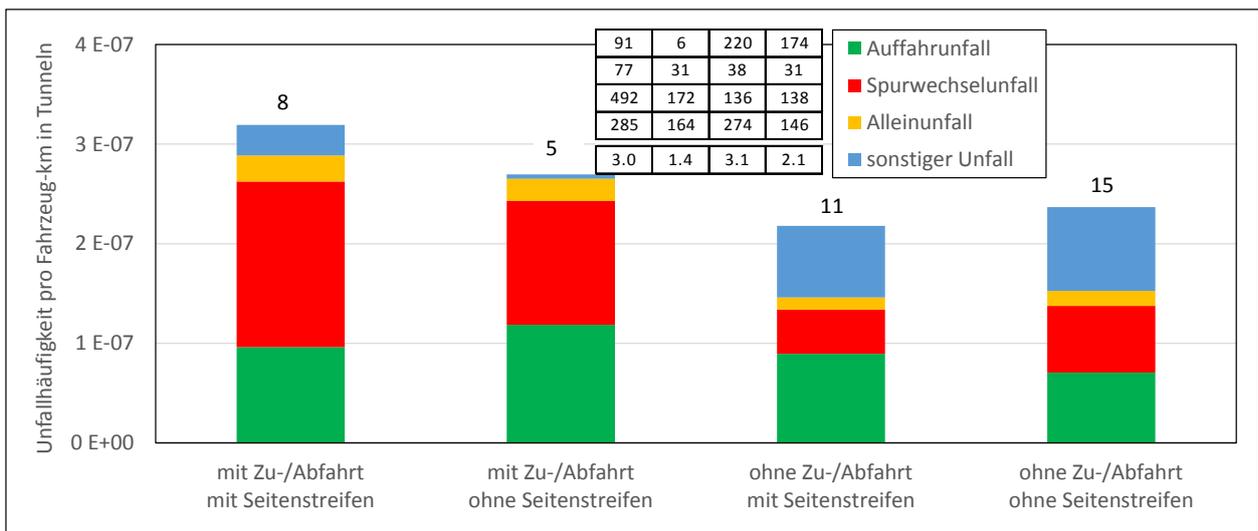


Bild 42: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln mit einem Verkehrsaufkommen pro Fahrstreifen über 12.000 Fahrzeuge/Tag gegliedert nach dem Vorhandensein einer Zu- / Abfahrt sowie eines Seitenstreifens

Einfluss der zulässigen Höchstgeschwindigkeit

Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen den Einfluss der Höchstgeschwindigkeit auf die Unfallrate für Richtungsverkehrstunnel.

a) Auswertung aller 103 Richtungsverkehrstunnel

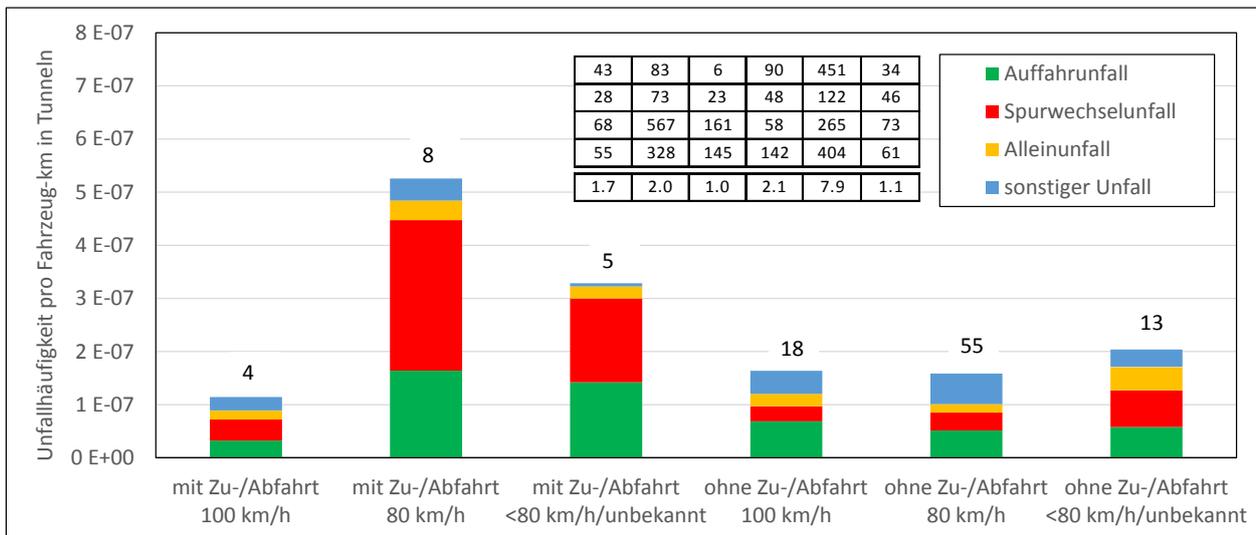


Bild 43: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln gegliedert nach dem Vorhandensein einer Zu- / Abfahrt sowie der zulässigen Höchstgeschwindigkeit

b) Auswertung aller 39 Richtungsverkehrstunnel mit einem Verkehrsaufkommen ab 12.000 Fahrzeuge/Fahrstreifen

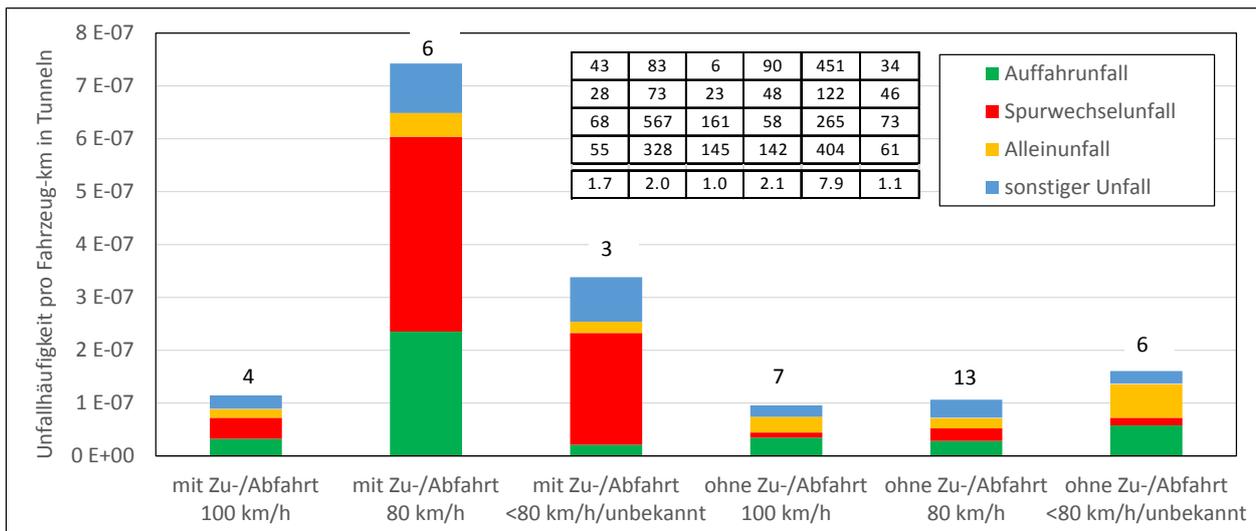


Bild 44: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln mit einem Verkehrsaufkommen pro Fahrstreifen über 12.000 Fahrzeuge/Tag gegliedert nach dem Vorhandensein einer Zu- / Abfahrt sowie der zulässigen Höchstgeschwindigkeit

A3. Auswertungen nach der Unfallschwere

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Auswertungen, bei denen die Unfallschwere, gemessen an der Zahl von Leicht- bzw. Schwerverletzten sowie Todesfällen, als Information mitberücksichtigt wird. Da die Zahl der Unfälle mit Todesopfern sehr klein ist, werden Unfälle mit mindestens einem Schwerverletzten und solche mit mindestens einem Todesopfer zusammengefasst.

Folgende Auswertungen sind in den nachfolgenden drei Abbildungen dargestellt:

- Gliederung der Unfallrate nach Unfalltypen und drei Schweregraden (ohne Verletzte, nur Leichtverletzte, mindestens ein Schwerverletzter),
- Gliederung der Unfallrate nach Richtungs- sowie Gegenverkehrstunnel mit bzw. ohne Zu-/Abfahrt sowie nach Unfallschweregrad,
- Gliederung der Unfallrate nach Richtungs- sowie Gegenverkehrstunnel mit bzw. ohne Zu-/Abfahrt sowie nach Unfalltyp, wobei nur Unfälle mit mindestens einem Leichtverletzten berücksichtigt werden (d.h. Ausschluss von Bagatellunfällen, die in der sonst analogen Abbildung enthalten sind).

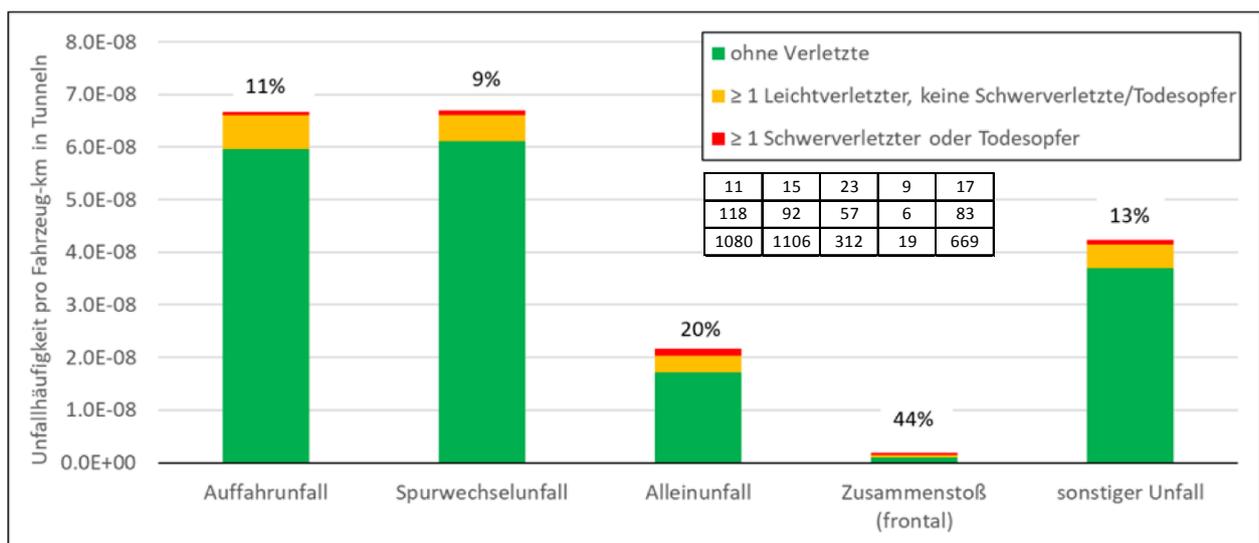


Bild 45: Unfallraten gegliedert nach Unfallart und Unfallschwere. Ausgewertet wurden sämtliche Unfälle innerhalb von Tunneln über die gesamte Auswerteperiode (gesamte zugrunde liegende Fahrleistung: 18,1 Mia Fahrzeug-km)

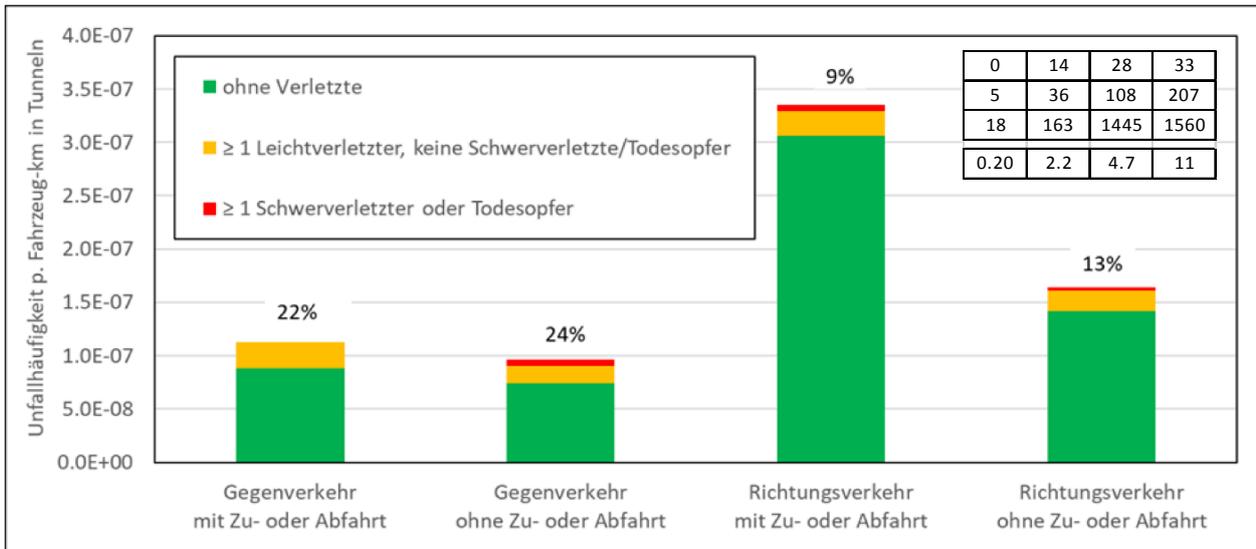


Bild 46: Unfallrate pro Tunneltyp (Gliederung nach Verkehrsführung und Vorhandensein Zu-/Abfahrt) gegliedert nach der Unfallschwere. Ausgewertet wurden alle Unfälle innerhalb von Tunneln.

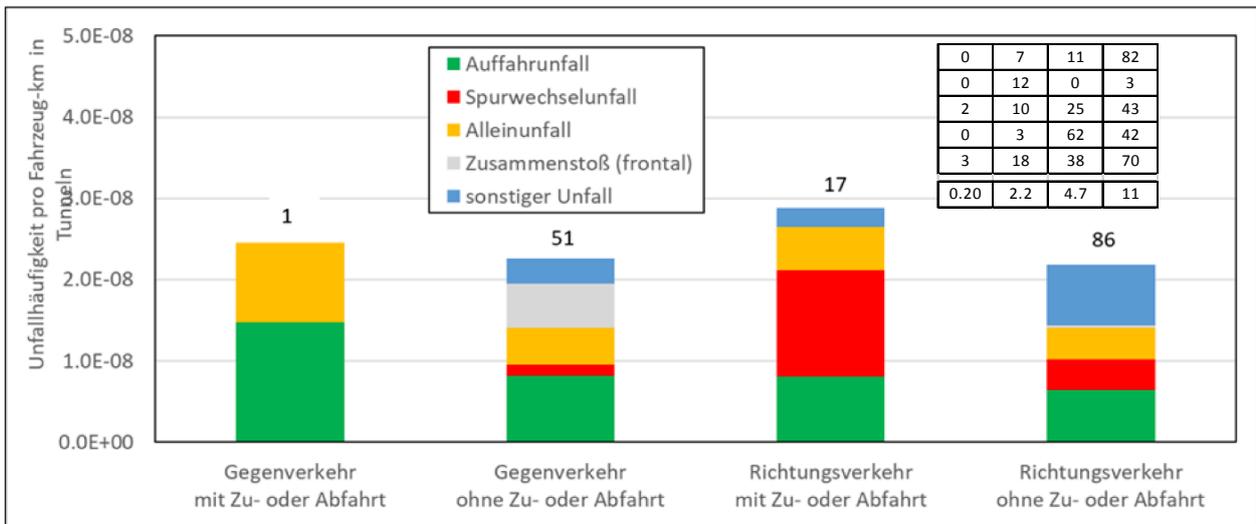


Bild 47: Rate der Unfälle mit Personenschäden (mindestens ein Leichtverletzter) gegliedert nach Tunneltyp und nach Unfallart. oder Todesopfern Einfluss Tunnelmerkmale auf Unfallrate: Verkehrsart und Zu-/Abfahrt. Ausgewertet wurden alle Unfälle innerhalb von Tunneln, die mindestens einen Leichtverletzten gefordert haben.