




Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Masterarbeit



Resilienz von Straßentunneln -
Bedrohungen, Ausfallszenarien und
verkehrliche Auswirkungen

Bernhard Klampfer, BSc

November 2019

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 07.11.2019



Unterschrift Verfasser/in
Bernhard, Klampfer

Gleichheitsgrundsatz

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Es wird ausdrücklich festgehalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für alle Geschlechter zu verstehen sind.

Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit entstand im Rahmen des Verbundprojekts RITUN (Resiliente Straßentunnel), welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Zuge des Programms „Forschung für die zivile Sicherheit 2012-2017“ gefördert wird. Die Erarbeitung erfolgte in Kooperation mit ILF Consulting Engineers sowie deren Projektpartner, der Bundesanstalt für Straßenwesen.



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



ILF Consulting Engineers



Bundesanstalt für
Straßenwesen

Allen Projektbeteiligten, durch deren Zusammenarbeit die Erstellung der Masterarbeit in dieser Form erst ermöglicht wurde, möchte ich einen besonderen Dank für die intensive fachliche Betreuung, die Zurverfügungstellung der Infrastruktur und die Chancen zur persönlichen Weiterentwicklung aussprechen.

Ein großer Dank gilt auch Herrn Professor Galler, der mir im Zuge des Studiums an der Montanuniversität Leoben das nötige breite Wissen in den Bereichen Tunnelbau und -betrieb vermittelt und somit die Grundvoraussetzung einer Mitarbeit an diesem Projekt geschaffen hat.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei den Straßentunnelbetreibern ASFINAG, Autobahndirektion Süd- und Nordbayern sowie Straßen.NRW für die Möglichkeit der Durchführung von Interviews. Damit wurde die Praxistauglichkeit der Arbeit sichergestellt und Erfahrungswerte sowie bestehende Probleme im laufenden Betrieb konnten gemeinsam diskutiert und berücksichtigt werden.

Kurzfassung

Aufgrund der großen Bedeutung der Verkehrsinfrastrukturen für die Gesellschaft sowie Wirtschaft bestehen sehr hohe Erwartungen an die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit des Straßenverkehrsnetzes, gleichzeitig jedoch werden Eigentümer und Betreiber vor immer größere, zum Teil neuartige Herausforderungen gestellt. Tunnel bilden hier aufgrund ihres unmittelbaren Einflusses auf die Leistungsfähigkeit der Netze besonders kritische Systeme, der Ausfall einzelner Bauwerke führt häufig zu erheblichen verkehrlichen Beeinträchtigungen, nicht bloß auf lokaler, sondern auch auf regionaler Ebene. Übergeordnete Ziele sind daher die Aufrechterhaltung der Funktionalität und rasche Rückkehr zum Normalbetrieb von Straßentunneln nach disruptiven Ereignissen – zwei Kernelemente der Resilienz, die einen ganzheitlichen Ansatz verfolgt.

Die Basis stellen eine statistische Auswertung bestehender Straßentunnel im deutschen Bundesfernstraßennetz zur Bildung repräsentativer Tunneltypen sowie die Identifikation relevanter Bedrohungen unter Anwendung des All-Hazard-Ansatzes dar. Mithilfe dieser Grundlagen werden zum einen plausible Schadensszenarien definiert, welche sowohl bauliche, als auch betriebstechnische Aspekte berücksichtigen. Zum anderen erfolgt die Entwicklung verkehrlicher Betriebs-szenarien, vom Normalbetrieb, über verschiedene eingeschränkte Szenarien, wie Fahrstreifensperrungen, Geschwindigkeitsreduktionen oder teilweisen Fahrverboten, bis hin zur Vollsperrung.

Die Verknüpfung dieser beiden Elemente, die Schadensszenarien und verkehrlichen Betriebs-szenarien, wird über die Definition minimaler Betriebsbedingungen erreicht. Diese werden in Abhängigkeit eines ausreichenden Niveaus der Personensicherheit definiert und sind während der Rückkehr zum ursprünglichen Zustand nach disruptiven Ereignissen maßgebend, einer Phase, die bei bestehenden klassischen Ansätzen keine Berücksichtigung findet. Um diesen integralen Bestandteil einer holistischen Betrachtung im Sinne der Resilienz zu erarbeiten, kommen qualitative und quantitative Methoden der Risikobewertung zur Anwendung.

Da neben der Sicherheitsbetrachtung vor allem die Verfügbarkeit der Tunnel und folglich ganzer Straßennetze im Vordergrund steht, werden die verkehrlichen Auswirkungen in Form von Kapazitätsverlusten aufgrund einzelner Betriebs-szenarien mittels mikroskopischer Verkehrssimulationen näher untersucht. So kann unter Erfüllung der Anforderungen an die Personensicherheit mit der Wahl bestmöglicher Betriebs-szenarien die Verfügbarkeit im Falle des Eintretens disruptiver Ereignisse und damit die Resilienz der Straßentunnel effizient gesteigert werden.

Zuletzt werden Resilienzmaßnahmen aufgezeigt und kategorisiert, die über die Vorgaben bestehender Regelwerke hinausgehen und die Resilienz weiter erhöhen. Dabei wird ein Ausblick angestellt, wie die Bewertung der Wirksamkeit und deren praxistaugliche Umsetzung erfolgen kann.

Abstract

As a result of the vital importance of transport infrastructure for both the society and economy high expectations of the availability as well as the reliability of road networks exist. On the other hand owners and operators are faced ever-growing or even new challenges. Due to their direct influence on the capacity of road systems tunnels represent particular critical systems in this context. The outage of just one tunnel often leads to significant detractions of traffic, local as well as regional. Therefore the main objectives are to maintain the functionality and return rapidly to normal conditions after disruptive events – two integral elements of resilience, a holistic approach.

A statistical evaluation of tunnels on the German federal road network forms the basis to define representative tunnel types, which ensure the broad applicability of the methodology. Furthermore these model tunnels allow the development of operation modes, from normal operation, over various restricted services like speed restriction or lane drops to a tunnel closure.

Furthermore relevant threats following an all-hazard-approach are identified, which can result in a multitude of potential damage scenarios.

In order to link the damage scenarios and the operation modes, minimum operating requirements are elaborated, conditional upon the level of personal safety. They come into play while returning to the original functionality after disruptive events, a stage which is not considered in existing approaches. To develop this integral and essential element of a holistic approach in terms of resilience, qualitative and quantitative methods of risk assessments are performed.

In addition to safety considerations, the availability of road tunnels, consequently of road networks, has a high priority. This is why effects on traffic, like the loss of capacity due to restricted operation modes, are analysed using microscopical traffic simulations.

In a final step resilience measures, which exceed the requirements of existing rules and standards, are determined and categorized, in order to increase the resilience even more. In doing so the possibilities of assessment of their effectivity as well as how to put them into practice in a reasonable way are illustrated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund und Motivation	1
1.2	Definitionen und Begriffsverständnis	2
1.3	Konzept der Resilienz	3
2	Aufbau und Methodik	7
3	Definition repräsentativer Tunneltypen	8
3.1	Statistische Auswertung bestehender Straßentunnel	8
3.2	Parameter der repräsentativen Tunneltypen	15
4	Bedrohungsanalyse für Straßentunnel	19
4.1	Sonderfall der vorsätzlichen Handlung	21
5	Schadensszenarien	22
5.1	Verknüpfung mit Bedrohungen	22
5.2	Anforderungen an die Ausstattung von Straßentunneln	23
5.3	Definition der Schadensszenarien	29
6	Entwicklung verkehrlicher Betriebsszenarien	32
6.1	Einröhrige Tunnel im Gegenverkehrsbetrieb	33
6.2	Zweiröhrige Tunnel im Richtungsverkehrsbetrieb	34
7	Minimale Betriebsbedingungen nach disruptiven Ereignissen	37
7.1	Internationale Ansätze zu minimalen Betriebsbedingungen	39
7.2	Methodischer Ansatz	42
7.3	Qualitative Risikobewertung	52
7.4	Quantitative Risikobewertung	57
7.5	Anwendungsbereich und -grenzen	68
8	Untersuchung verkehrlicher Auswirkungen	70
8.1	Beschreibung der Verkehrsflusssimulation	71
8.2	Modellaufbau	77
8.3	Wahl der Eingabeparameter	79
8.4	Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen	82
8.5	Ergebnisse und Auswertung der Verkehrsmodellierung	83
8.6	Grundlagen zur Analyse regionaler verkehrlicher Auswirkungen	88

9	Empfehlungen im Hinblick auf Resilienzmaßnahmen	92
9.1	Resilienzmaßnahmen und deren Kategorisierung	92
9.2	Bewertung von Resilienzmaßnahmen	99
9.3	Ausblick: Umsetzung der Resilienz in der Praxis	100
	Literaturverzeichnis.....	101
	Abkürzungsverzeichnis	103
	Abbildungsverzeichnis	104
	Tabellenverzeichnis.....	106
	Anhang	107
	A1 Interviews mit Betreibern von Straßentunneln	107
	A2 Matrix Bedrohung-Schaden.....	125
	A3 vollständige Liste der Schadensszenarien	126
	A4 Qualitative Risikobewertung	129
	A5 Ergebnisse des Fachworkshops	134
	A6 Auswertung der mikroskopischen Verkehrssimulation	139

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Als ein essentieller Bestandteil der Infrastruktur hat das Straßenverkehrsnetz einen besonderen Stellenwert für unsere ausgesprochen mobile Gesellschaft und Wirtschaft. In einem immer stärker intermodal ausgeprägten Verkehrssystem wird auch künftig der Verkehrsträger Straße eine maßgebende Rolle spielen. Dabei bestehen hohe Ansprüche an die Sicherheit einerseits, sowie große Erwartungshaltungen an die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit andererseits. Leistungsfähige und sichere Transportwege sind eine Grundvoraussetzung eines effizienten Gütertransportes wie auch des steigenden Mobilitätsbedürfnisses und der zuverlässigen Versorgung der Menschen. Eine Beeinträchtigung, Störung oder gar ein Ausfall dieser Systeme hat somit schwerwiegende Folgen, sowohl für die Bevölkerung der betroffenen Region, als auch die Wirtschaft. Die hohen Erwartungen an durchwegs störungsfreie Systeme können in der Praxis jedoch nicht zur Gänze erfüllt werden. Der Umgang mit Ausfällen und Schäden verschiedenster Art und damit einhergehend das Treffen von Entscheidungen zur Akzeptanz auftretender Risiken sind laufend erforderlich.

Tunnel stellen in diesem Zusammenhang neuralgische Punkte im Straßenverkehrsnetz dar. Aufgrund ihrer Flaschenhalswirkung kann der Ausfall nur eines Bauwerks bereits zu einer signifikant verringerten Leistungsfähigkeit großflächiger Netze führen. Hohe Wiederherstellungskosten, lange Ausfallzeiten und damit einhergehend auch beträchtliche gesamtwirtschaftliche Schäden sind die direkte Folge.

Aus dieser Motivation heraus entsteht die Forderung der Sicherstellung der Mobilität durch die Steigerung der Verfügbarkeit von Straßentunneln nach disruptiven Ereignissen. Dabei soll einerseits die Widerstandsfähigkeit des Systems selbst gegen relevante Gefährdungen erhöht, andererseits die Aufrechterhaltung des Verkehrs unmittelbar nach einem Ereignis und die vollständige Wiederherstellung der Funktionalität positiv beeinflusst werden. Genau hier kommt das ganzheitliche Konzept der Resilienz zum Zug, das als Erweiterung klassischer bereits bestehender Methoden eine vollständige Auseinandersetzung mit disruptiven Ereignissen sicherstellt und so die Verfügbarkeit von Straßentunneln als kritische Infrastrukturelemente nachhaltig erhöht.

1.2 Definitionen und Begriffsverständnis

Begriff dt.	Begriff en.	Definition
Bedrohung	Hazard	Potentiell Ereignis, das die Sicherheit und/oder die Verfügbarkeit von Straßentunneln beeinträchtigen kann (in Anlehnung an [1])
Kritikalität	Criticality	Die Bedeutung eines Infrastrukturelements oder -abschnittes für die Verfügbarkeit eines Verkehrsinfrastrukturnetzes [1]
Verwundbarkeit	Vulnerability	Eigenschaften und Umstände von Systemen, die sie anfällig gegenüber den schädigenden Auswirkungen von Gefahren machen. [2]
Risiko	Risk	Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Schadens und der Schwere des Schadens [3]
Resilienz	Resilience	Resilienz ist die Fähigkeit, sich auf tatsächlich oder potentiell disruptive Ereignisse vorzubereiten, sie einzukalkulieren, sie abzuwehren, sie zu verkraften, sich möglichst schnell davon zu erholen und sich ihnen immer erfolgreicher anzupassen. Schadhafte Ereignisse sind menschlich, technisch sowie natürlich verursachte außergewöhnliche Ereignisse oder Veränderungsprozesse, die extreme oder katastrophale Folgen haben. [4]
disruptives Ereignis	disruptive Event	Außergewöhnliches Ereignis, das über die in den Regelwerken zu berücksichtigenden Ereignisse hinausgeht
Kapazität	Capacity	Die Kapazität ist die größtmögliche Verkehrsstärke, die bei gegebenen Randbedingungen, wie zum Beispiel den Straßenverhältnissen, der Witterung oder dem Schwerverkehrsanteil, erreicht werden kann.

1.3 Konzept der Resilienz

Der Begriff der Resilienz (lat. *resilire*, zurückspringen) kommt erstmals in der Entwicklungspsychologie zur Anwendung, wobei hier die Eigenschaft beschrieben wird, schwierige Lebenssituationen ohne anhaltende Beeinträchtigungen zu überstehen. Mittlerweile hat der Resilienzansatz jedoch in zahlreichen weiteren Bereichen Fuß gefasst, vom Gesundheitswesen, über die Energieversorgung bis hin zur Kommunikation und dem Verkehr, allesamt Teil der sogenannten **kritischen Infrastruktur**. Als solche werden Anlagen und Systeme bezeichnet, welche grundlegende Funktionen für die Gesundheit und Sicherheit, das Sozial- und Umweltsystem sowie die Wirtschaft leisten und deren Störung gravierende Auswirkungen auf die Gesellschaft hat.



Abbildung 1-1: Überblick einiger kritischer Infrastrukturen [5]

Im Gegensatz zur anfänglichen Auseinandersetzung in der Psychologie mit langanhaltenden Einflüssen bzw. Störungen betrachten die Ingenieurwissenschaften vor allem abrupte widrige Ereignisse aufgrund von unerwarteten, überraschenden oder auch neuartigen Bedrohungen. Dabei finden sowohl vom Menschen, als auch natürlich verursachte Einflüsse Beachtung.

Aufgabe des Resilienzmanagements, das weniger ein bestimmtes Verfahren, sondern viel mehr ein ganzheitliches Konzept darstellt, ist dabei eine Erhöhung der Widerstands- und Regenerationsfähigkeit technischer wie gesellschaftlicher Systeme und stellt einen iterativen, flexiblen Prozess dar – den Resilienzzyklus.



Abbildung 1-2: Resilienzzyklus, in Anlehnung an [4]

Auf Basis des dargestellten Resilienzkreislaufs kommt im Grundverständnis der vorliegenden Arbeit folgende Definition zur Anwendung:

Resilienz ist die Fähigkeit, sich auf tatsächlich oder potentiell disruptive Ereignisse vorzubereiten, sie einzukalkulieren, sie abzuwehren, sie zu verkraften, sich möglichst schnell davon zu erholen und sich ihnen immer erfolgreicher anzupassen.

Schadhafte Ereignisse sind menschlich, technisch sowie natürlich verursachte außergewöhnliche Ereignisse oder Veränderungsprozesse, die extreme oder katastrophale Folgen haben. [4]

Dabei kommt dem holistischen Aspekt des Resilienzgedankens eine besondere Bedeutung zu, ist doch eine vollständige Auseinandersetzung mit disruptiven Ereignissen und ihren Folgen gegeben:

- Beginnend mit der Phase **prevent** wird das disruptive Ereignis selbst verhindert bzw. dessen Eintrittswahrscheinlichkeit reduziert. Aus organisatorischer Sicht ist hier vor allem die Sensibilisierung und Etablierung einer Sicherheitskultur, sowohl des eingesetzten Personals, als auch der Nutzer, von großer Bedeutung, technisch sind es zum Beispiel Früherkennungssysteme wie Thermoscanner zur Detektion überhitzter Fahrzeuge.
- Über Maßnahmen der Phase **protect**, welche unmittelbar ab dem Zeitpunkt des Eintretens eines potentiell disruptiven Ereignisses bis zu dessen Bewältigung wirken, wird der Funktionalitätsverlust gering gehalten bzw. kann zur Gänze vermieden werden. Dies kann unter anderem durch den Einsatz grundsätzlich robuster Systeme oder das Vorhandensein von Redundanzen erreicht werden.
- Mittels Maßnahmen zur Mitigation der Phase **respond** wird nach der Detektion eines disruptiven Ereignisses rasch und effizient aktiv darauf reagiert und so die Funktionalität möglichst aufrecht erhalten.
- Um den Zyklus zu schließen, muss sich das System nach der Bewältigung eines disruptiven Ereignisses regenerieren (**recover**), die geforderte Funktionalität wird rasch wieder erreicht und Schlüsse können gezogen werden, um in Zukunft noch besser mit disruptiven Ereignissen umzugehen.
- Diese vier Phasen laufen in chronologischer Reihenfolge ab, während das Zentrum **prepare** als übergeordnetes Element angesehen werden kann. Es zeigt keine direkte Wirkung, ist jedoch eine Grundvoraussetzung der effizienten und nachhaltigen Ausführung der übrigen vier Schritte, da hier eine Verbesserung des Verständnisses der Systeme als Gesamtheit erzielt wird.

Nach [6] ist eine Fortführung und Erweiterung traditioneller Sicherheits- und Risikoanalysemethoden entscheidend. Das Mögliche, nicht das Wahrscheinliche, ist einzubeziehen. Gerade unerwartete und neuartige Bedrohungen stellen Systeme vor große Probleme und haben oft gravierende Auswirkungen. Eben nicht zuletzt diesen soll mit Hilfe des Resilienzmanagements begegnet werden. Das Ziel, die Aufrechterhaltung der Funktionalität unter Gewährleistung der Sicherheit, führt viel mehr zum Ansatz erfolgreiche, gut funktionierende Prozesse weiter zu optimieren, als Fehler zur Gänze vermeiden zu wollen. Damit wird die Fähigkeit eines Systems geschaffen, unter wechselnden Bedingungen dauerhaft erfolgreich zu arbeiten und diesen zu widerstehen.

Visualisierung und Bewertung der Resilienz:

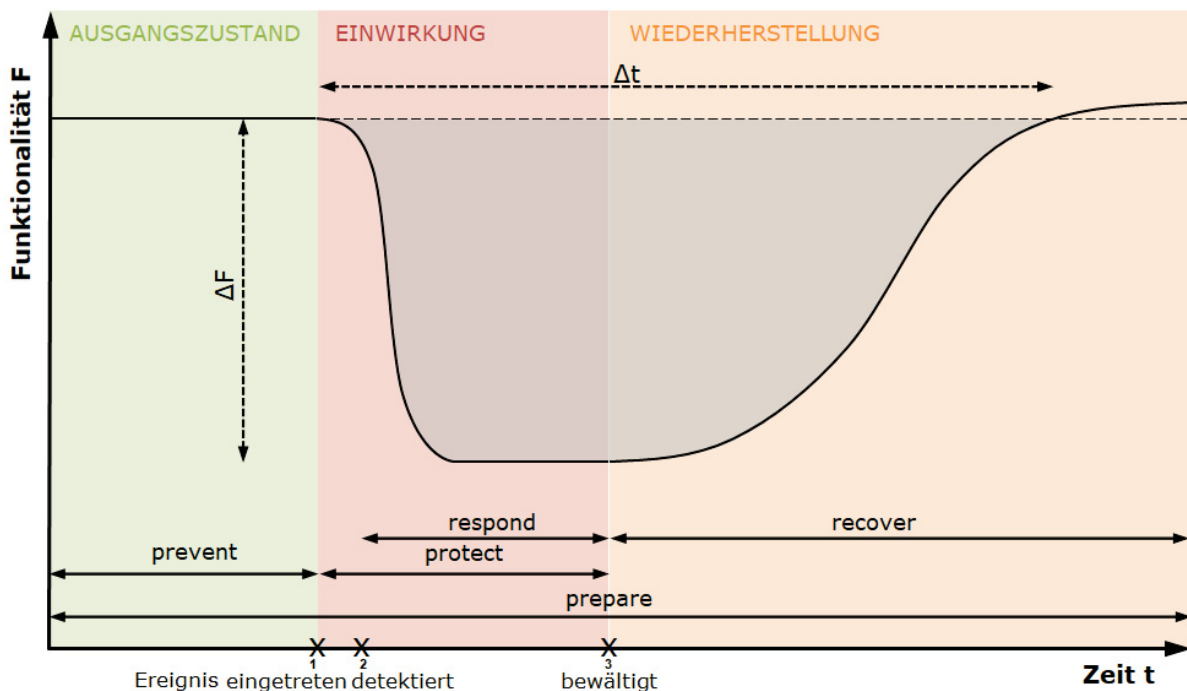


Abbildung 1-3: Funktionalitätskurve mit zugeordneten Phasen des Resilienzkreislaufs, in Anlehnung an [7]

Abbildung 1-3 zeigt einen idealisierten zeitabhängigen Verlauf der Funktionalität eines betrachteten Infrastrukturelements über die Zeit mit dem Eintreten eines disruptiven Ereignisses, wobei die einzelnen Phasen des Resilienzkreislaufs klar zugeordnet sind. Während klassische Risikoanalysen vorrangig die Phasen *prevent* und *protect* betrachten, umfasst das Resilienzkonzept sämtliche Bereiche bis hin zur Wiederherstellung.

Die Bewertung der Resilienz erfolgt einerseits anhand des Verlustes an Funktionalität ΔF nach einem Ereignis, andererseits anhand der Dauer Δt zur Rückkehr zur geforderten Funktionalität. Dabei ist sie umso größer, je kleiner die in Abbildung 1-3 grau schraffiert dargestellte Fläche ist.

Ein resilientes System charakterisiert sich somit im Wesentlichen über die folgenden drei Eigenschaften: [7]

- Die **Eintrittswahrscheinlichkeit** disruptiver Ereignisse ist reduziert.
- Im Falle des Eintretens disruptiver Ereignisse treten verringerte Konsequenzen in Form des **Verlustes an Funktionalität** auf. (ΔF)
- Die **Dauer für die Rückkehr** zur geforderten Funktionalität nach disruptiven Ereignissen reduziert sich. (Δt)

Die Darstellung der Funktionalitätskurve in der Phase der Erholung ist dabei ganz bewusst über das ursprüngliche Niveau hinaus gewählt, da sich ein resilientes System neben der Wiederherstellung der Funktionalität zudem auch darüber auszeichnet, Rückschlüsse aus dem Ereignis zu ziehen und durch Adaptions- bzw. Lerneffekte zukünftig Verbesserungen

zu erzielen. Diese betreffen in den meisten Fällen nicht technische, sondern organisatorische Aspekte, als System wird demnach nicht bloß ein Tunnelbauwerk mit sämtlichen zugehörigen Ausstattungselementen verstanden, sondern insbesondere auch die handelnden Personen der entsprechenden Organisationen und Unternehmen.

Die Funktionalität eines Systems wird anhand von Zielgrößen definiert. Dabei können unter anderem wirtschaftliche sowie sicherheits- und umwelttechnische Aspekte Berücksichtigung finden. Diesen Kategorien werden auf Grundlage der im Bundesverkehrswegeplan 2030 [8] angeführten Nutzen- und Kostenkomponenten beispielweise folgende Zielgrößen zugeordnet:

Kategorie	Zielgröße
Wirtschaft	Reisezeit
	Kapazität
	Betriebskosten
	Wertschöpfung und Beschäftigung
Sicherheit	Verkehrssicherheit und Unfallkosten
Umwelt	Abgasbelastung
	Lärmbelastung
	sonstige Emissionen der Infrastruktur

Tabelle 1-1: mögliche Zielgrößen zur Definition der Funktionalität, in Anlehnung an [8]

Aufgrund der übergeordneten Anforderung einer Steigerung der Verfügbarkeit der Straßenverkehrsinfrastruktur in der vorliegenden Arbeit wird die Verkehrskapazität als entscheidende Zielgröße betrachtet. Da diese grundsätzlichen Anforderungen jedoch von oftmals spezifischen Rahmenbedingungen abhängen, kann der Anwender die Wahl der Parameter samt deren Gewichtung an seine Bedürfnisse anpassen.

2 Aufbau und Methodik

Aufgrund der großen Bedeutung der Verfügbarkeit von Straßentunneln für die Leistungsfähigkeit ganzer Verkehrsnetze ist die Steigerung der Widerstands- und Regenerationsfähigkeit eine übergeordnete Forderung an diese Bauwerke. Ziel ist demnach eine Erhöhung ihrer Resilienz. Anhand der im Folgenden dargestellten Struktur werden die Grundlagen zur Entwicklung effizienter Resilienzmaßnahmen erarbeitet.

<p>Die Betrachtungen erfolgen anhand repräsentativer Tunneltypen, die das bestehende Bundesfernstraßennetz Deutschlands anhand wesentlicher Parameter vollständig abbilden.</p>		<p>repräsentative Tunneltypen Kapitel 3</p>
<p>Eine wichtige Basis bilden die relevanten Bedrohungen für Straßentunnel, zu deren Identifizierung der sogenannte „All-Hazard-Ansatz“ verfolgt wird. Dabei finden natürliche sowie vom Menschen verursachte Bedrohungen Berücksichtigung.</p>		<p>Bedrohungsanalyse Kapitel 4</p>
<p>Auf Grundlage der identifizierten Bedrohungen und der Ausgestaltung bestehender Straßentunnel werden bauliche, betriebstechnische und versperrende Schadensszenarien definiert.</p>		<p>Schadensszenarien Kapitel 5</p>
<p>Die vorliegenden Parameter der repräsentativen Tunneltypen, wie der Betriebsart und dem Regelquerschnitt, bilden die Basis für die Entwicklung verkehrlicher Betriebsszenarien.</p>		<p>verkehrliche Betriebsszenarien Kapitel 6</p>
<p>Die Schadensszenarien werden mithilfe qualitativer und quantitativer Risikoanalysemethoden bewertet, um minimale Betriebsbedingungen nach disruptiven Ereignissen zu definieren, welche unmittelbar zu den ermittelten verkehrlichen Betriebsszenarien führen.</p>		<p>minimale Betriebsbedingungen Kapitel 7</p>
<p>Die verkehrlichen Betriebsszenarien ziehen zum Teil Kapazitätseinschränkungen und folglich Störungen des Verkehrsflusses nach sich. Diese verkehrlichen Auswirkungen werden auf lokaler Ebene unter Anwendung mikroskopischer Verkehrssimulationen untersucht.</p>		<p>verkehrliche Auswirkungen Kapitel 8</p>
<p>Mittels technischer, organisatorischer sowie verkehrlicher Maßnahmen, welche in allen Phasen des Resilienzkreislaufs wirken und über die Vorgaben geltender Regelwerke hinausgehen, wird die Resilienz effizient und nachhaltig gesteigert.</p>		<p>Ausblick Resilienzmaßnahmen Kapitel 9</p>

Abbildung 2-1: Struktur der Arbeit

3 Definition repräsentativer Tunneltypen

Anhand repräsentativer Tunneltypen, die wesentliche Parameter der Straßentunnel in Deutschland berücksichtigen, wird die große Anzahl an Bauwerken in einem überschaubaren Maß abgebildet. Gleichzeitig sind damit auch viele der angestellten Überlegungen und gewonnenen Erkenntnisse der folgenden Kapitel praxistauglich und in breitem Umfang anwendbar, da mithilfe dieser Tunneltypen eine fundierte und belastbare Grundlage weiterer Untersuchungen zur Verfügung steht.

3.1 Statistische Auswertung bestehender Straßentunnel

Die im hochrangigen Straßennetz Deutschlands (Bundesfernstraßen) bestehenden Tunnel werden von Seiten der BAST identifiziert und anschließend anhand folgender Parameter zu deren Kategorisierung dokumentiert:

1. Verkehrsführung (Richtungs- oder Gegenverkehr)
2. Bauweise
3. Tunnellänge
4. Tunnelquerschnitt
5. Verkehrsstärke und Schwerververkehrsanteil

Aufgrund der Komplexität weiterer Betrachtungen werden Galeriebauwerke, Tunnel mit mehreren Zu- und Abfahrten sowie Bauwerke mit Sonderquerschnitten nicht erfasst. Unter diese Annahme finden 230 der 270 bestehenden Straßentunnel in der Statistik Berücksichtigung.

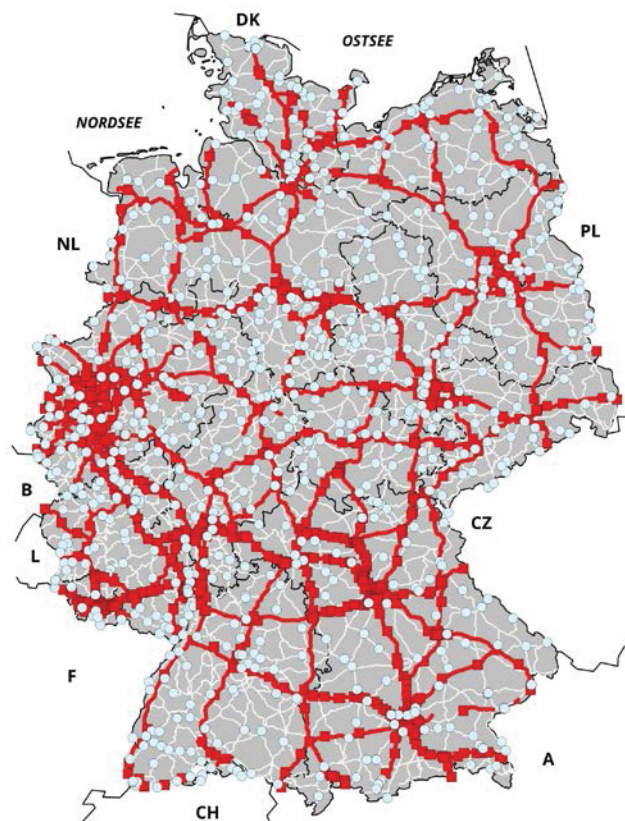


Abbildung 3-1: Bundesfernstraßennetz Deutschlands (Bundesautobahnen und Bundesstraßen) mit Darstellung der Dauerzählstellen [9]

1 Verkehrsführung

Richtungsverkehr	135
Gegenverkehr	95
gesamt	230

Tabelle 3-1: Verkehrsführung bestehender Straßentunnel

Da die statistische Auswertung das Netz der zu einem großen Teil gut ausgebauten Bundesfernstraßen darstellt, liegt der Anteil der Tunnel im Richtungsverkehrsbetrieb mit knapp 60 % bereits deutlich höher und wird in Zukunft in Folge des Ausbaus der Straßenverkehrsinfrastruktur weiter steigen.

2 Bauweise

	offen	konventionell	maschinell	Absenktunnel
Richtungsverkehr	87	42	3	3
Gegenverkehr	40	55	0	0
gesamt	127	97	3	3

Tabelle 3-2: Bauweisen bestehender Straßentunnel

Viele der Straßentunnel sind seichtliegend und daher in offener Bauweise hergestellt. Ist aufgrund einer größeren Überdeckung oder anderer Gründe eine bergmännische Bauweise erforderlich, so wurden die Tunnel fast zur Gänze konventionell aufgeföhren. Der maschinelle Vortrieb kam infolge der Längenverteilung (siehe Abbildung 3-2 bzw. 3-4) kaum zum Einsatz. Ebenso selten vertreten ist die Bauweise des Absenktunnels im Zuge von Flussquerungen.

3 Tunnellänge

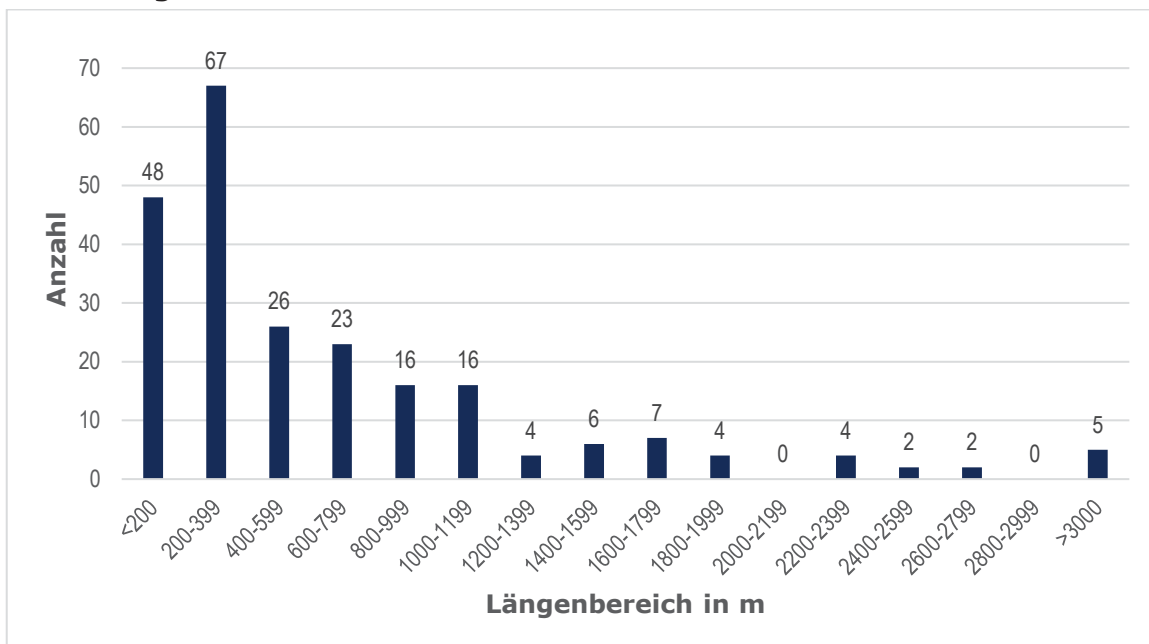


Abbildung 3-2: Längenverteilung aller betrachteten Tunnel

Der deutlich überwiegende Anteil der Tunnel weist eine kurze Länge auf. So sind lediglich rund 22 % der untersuchten Tunnel länger als 1000 m, die Hälfte aller Bauwerke liegt gar nur im Längenbereich von bis zu 400 m. Straßentunnel mit mehreren Kilometern Länge sind im Bundesfernstraßennetz Deutschlands kaum vertreten.

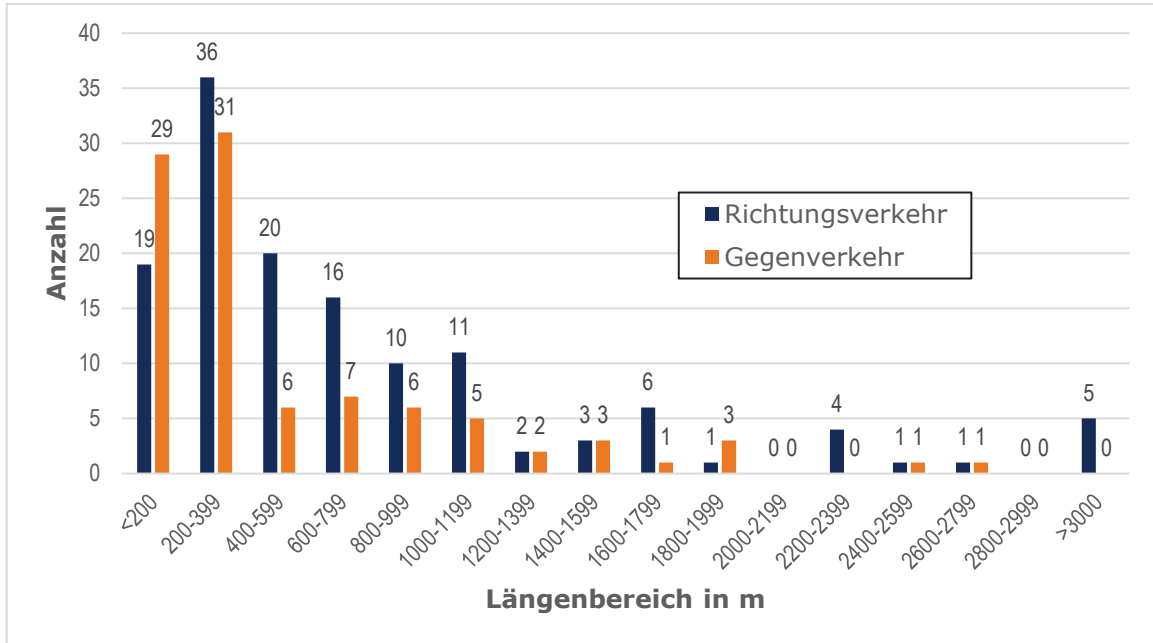


Abbildung 3-3: Längenverteilung nach Verkehrsführung

Aufgrund sicherheitstechnischer Aspekte steigt der Anteil der Tunnel im Richtungsverkehr mit der Länge deutlich an.

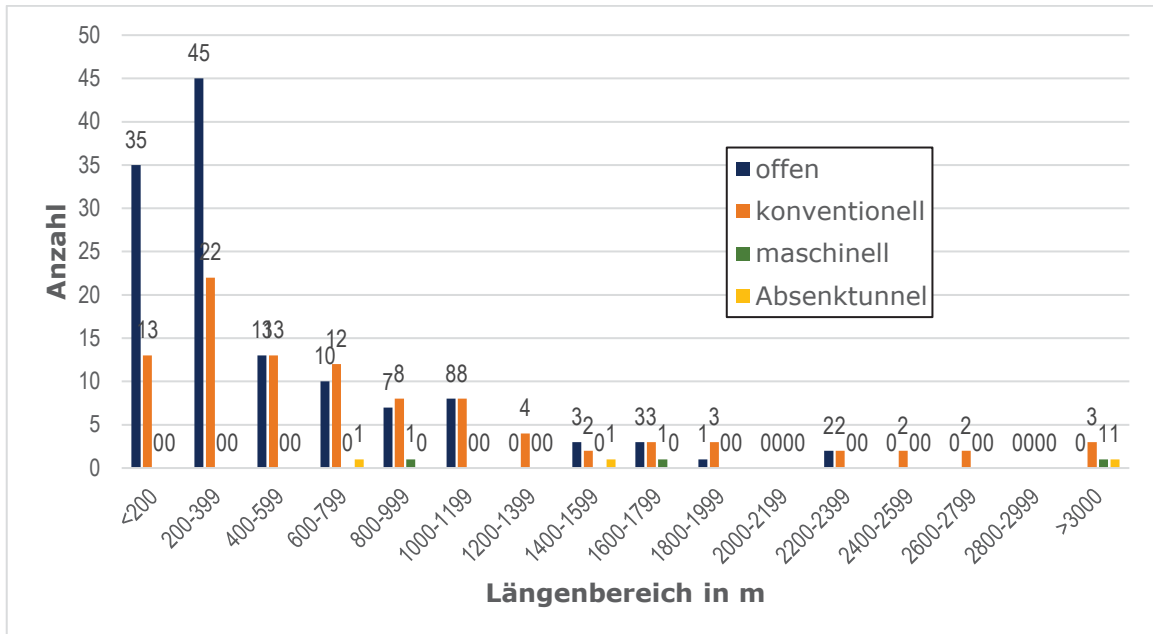


Abbildung 3-4: Längenverteilung nach Bauweise

4 Tunnelquerschnitt

Die Bezeichnung der Regelquerschnitte erfolgt gemäß den RABT [10].

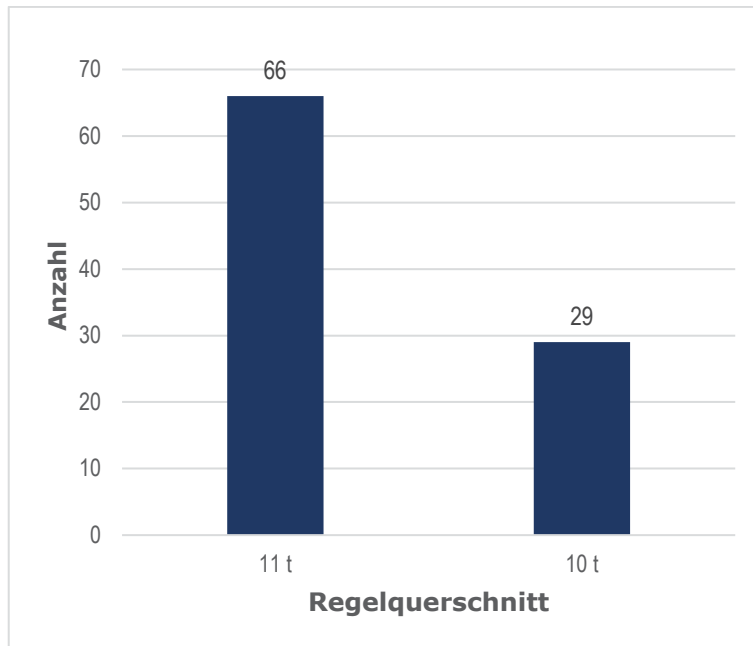


Abbildung 3-5: Querschnittsverteilung der Gegenverkehrstunnel

Bei Tunneln mit Gegenverkehrsbetrieb kommen in Deutschland bislang nur zwei Regelquerschnitte zur Anwendung, wobei sich diese lediglich in der Breite der Fahrstreifen unterscheiden. Der Querschnitt mit der Bezeichnung 11 t ist dabei deutlich häufiger vertreten, weshalb für diesen die Längenverteilung sowie die Bauweise aller entsprechenden Tunnel in Abbildung 3-6 dargestellt wird.

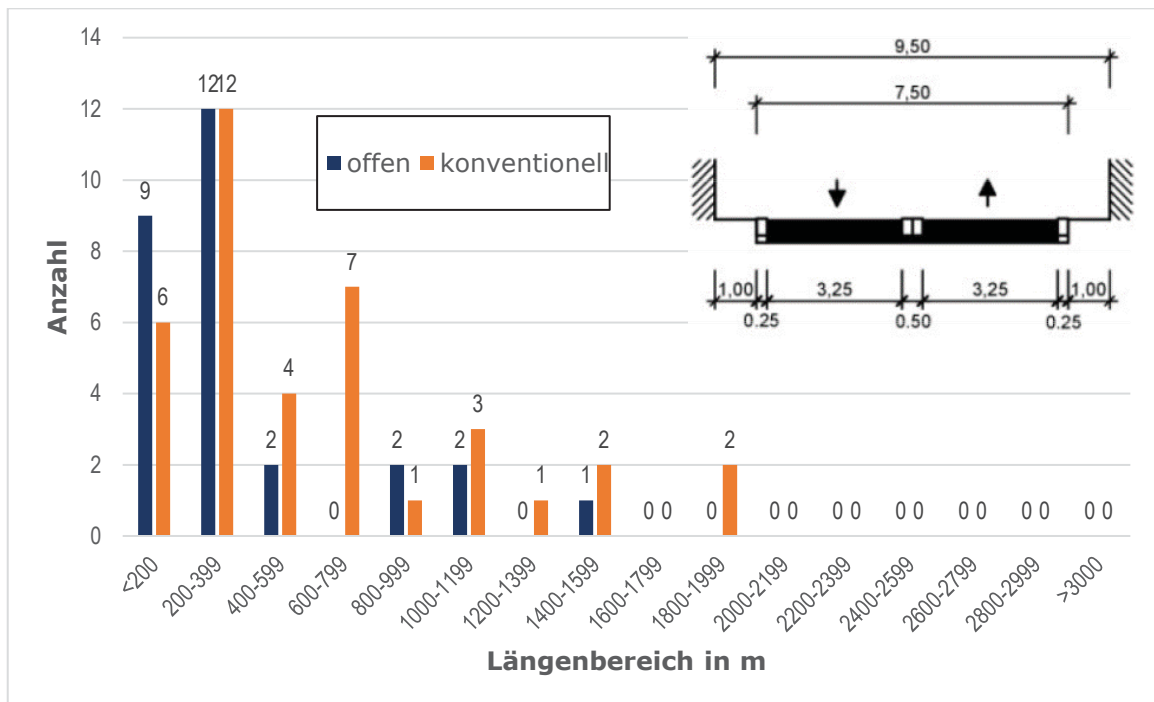


Abbildung 3-6: Längenverteilung für RQ 11 t

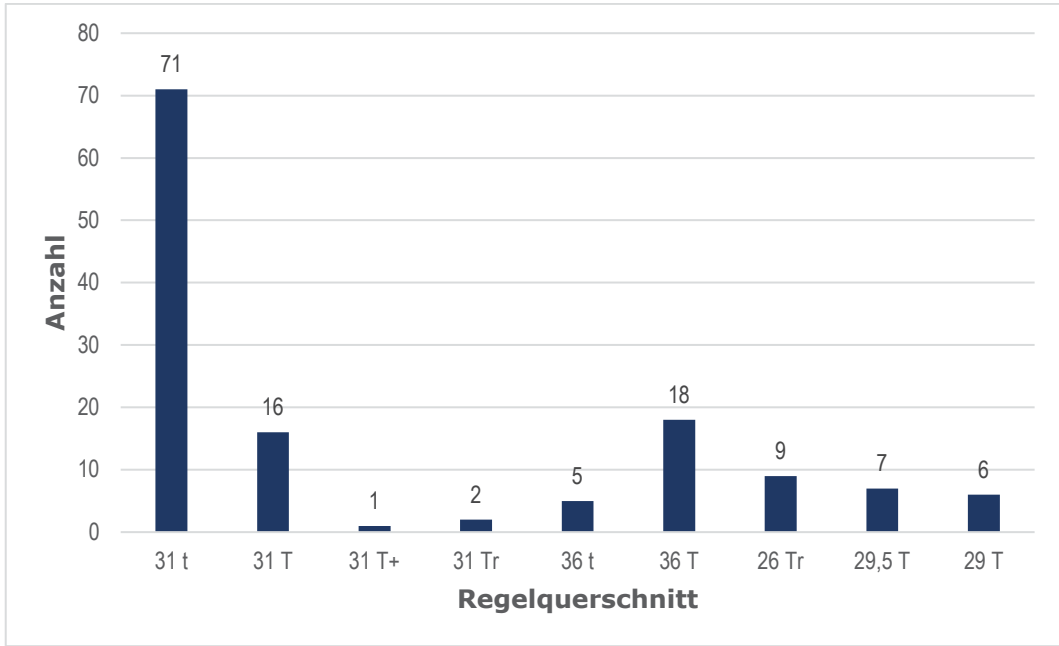


Abbildung 3-7: Querschnittsverteilung Richtungsverkehrstunnel

Im Richtungsverkehr kommt der Regelquerschnitt 31 t mit einem Anteil von 53 % am häufigsten zum Einsatz. Mit deutlichem Abstand dazu finden auch die beiden Querschnitte 31 T sowie 36 T breitere Anwendung. In den folgenden Abbildungen ist für diese drei Regelquerschnitte jeweils die entsprechende Längenverteilung inklusive der zugehörigen Bauweise dargestellt.

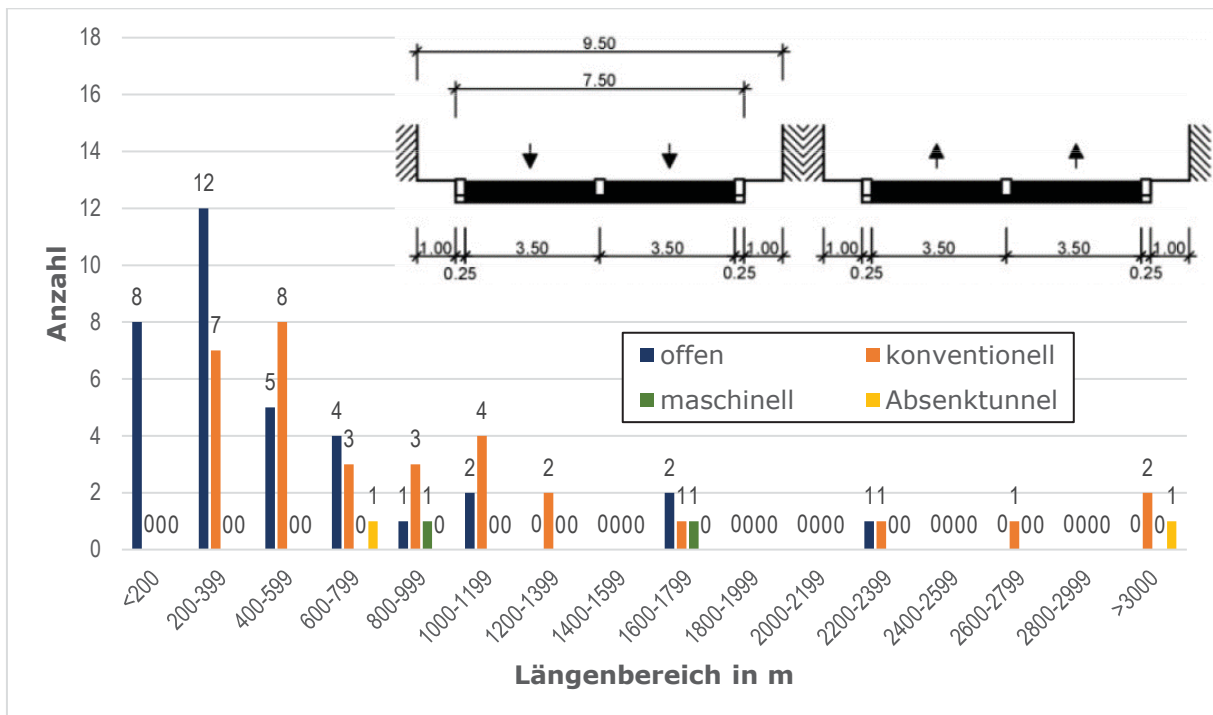


Abbildung 3-8: Längenverteilung für RQ 31 t

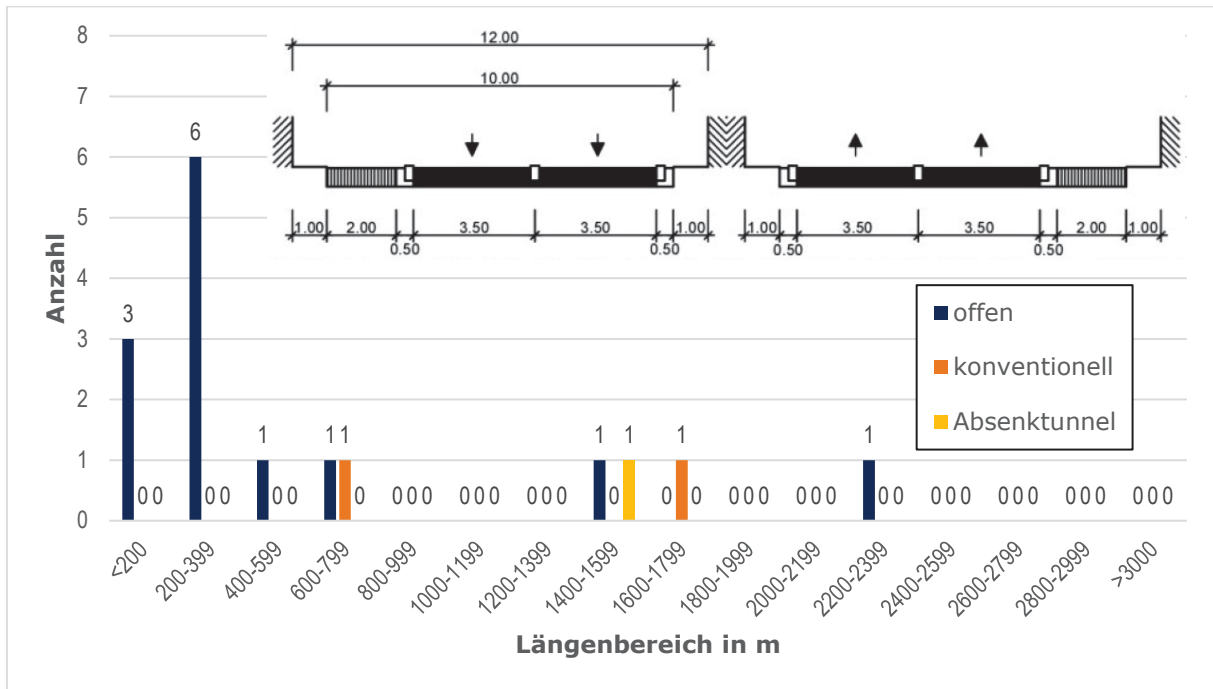


Abbildung 3-9: Längenverteilung für RQ 31 T

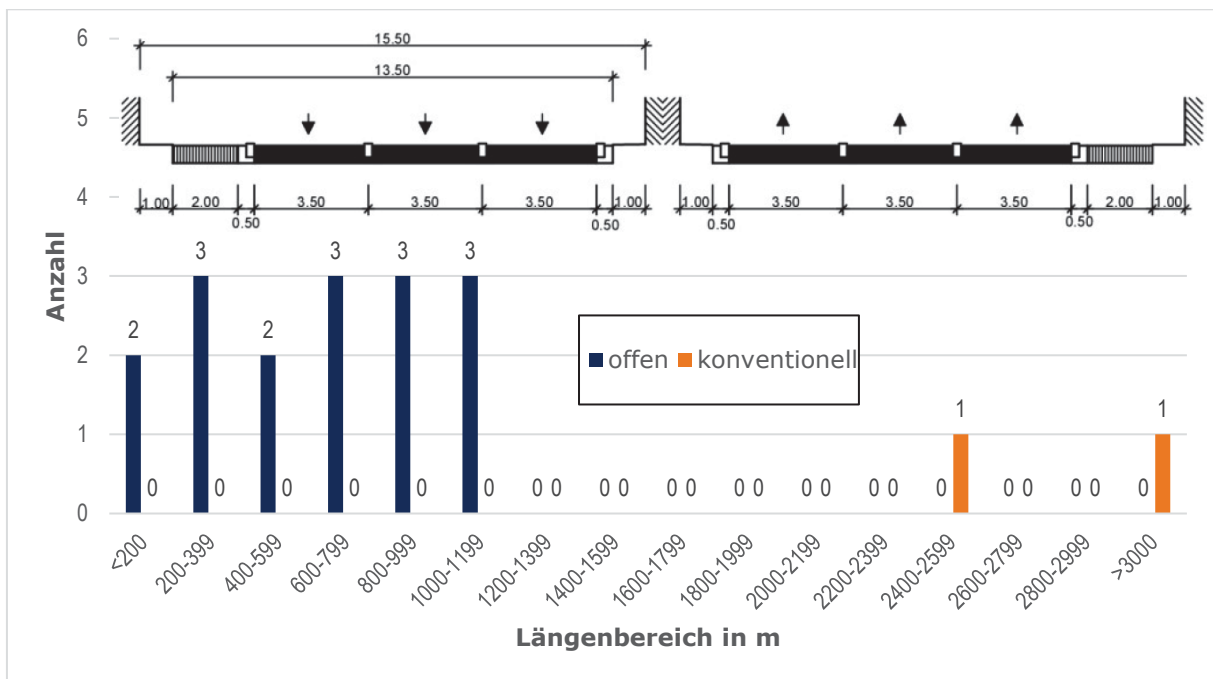


Abbildung 3-10: Längenverteilung für RQ 36 T

5 Verkehrsstärke

RQ	Verkehrsstärke (Kfz/24h*Richtung)		Schwerverkehrsanteil (%)	
	Mittelwert	Spitzenwert	Mittelwert	Spitzenwert
11 t	6.432	12.633	6	9
31 t	16.370	37.488	6	8
31 T	21.392	47.880	7	8
36 T	37.462	57.843	9	11

Tabelle 3-3: Verkehrsstärke inkl. Schwerverkehrsanteil je Regelquerschnitt

Der Mittelwert der Verkehrsstärke beschreibt das arithmetische Mittel aller betrachteten Tunnel, während der Spitzenwert das Mittel jener fünf Prozent der Tunnel repräsentiert, welche die höchste Verkehrsbelastung aufweisen.

3.2 Parameter der repräsentativen Tunneltypen

Auf Grundlage der durchgeführten statistischen Auswertung der Tunnel im Bundesfernstraßennetz Deutschlands werden die repräsentativen Tunneltypen für die weiteren Untersuchungen abgeleitet und definiert.

Exakt 50 % der ausgewerteten Straßentunnel weisen eine Länge von unter 400 m auf, über 1200 m hingegen lediglich rund 15 %, über 3000 m gar nur noch 2 %. Im Hinblick auf diese Ergebnisse sowie die unten angeführten Auslegungskriterien zur Wahl der Lüftungsart werden für Tunnel im Gegenverkehr die Längen der repräsentativen Tunneltypen mit 400, 600 und 1200 m gewählt, im Richtungsverkehr mit 600 und 1200 m. Der Schwerverkehrsanteil wird gemäß den Ergebnissen in Tabelle 3-3 vereinfachend für sämtliche Tunneltypen aller Regelquerschnitte mit 9 % gewählt.

Neben den statistisch erhobenen Daten werden für die endgültige Definition der Modelltunnel auch Angaben anzusetzender Brandlasten sowie der zum Einsatz kommenden Lüftungsarten benötigt. Dies sind in den RABT angeführt:

- Basis der Bemessungsbrandleistung stellt der durchschnittliche tägliche LKW-Verkehr dar:

LKW x km / Tag und Röhre	Brandleistung	Rauchgasmenge
< 4.000	30 MW	80 m ³ /s
> 4.000	50 MW	120 m ³ /s
> 6.000	bis zu 100 MW	bis zu 200 m ³ /s

Tabelle 3-4: Bemessungsbrandleistung [10]

- Die Wahl des geeigneten Lüftungskonzeptes ist abhängig von der Tunnellänge, der Art der Verkehrsführung sowie der Häufigkeit des Auftretens von Stau:

Tunnellänge	Lüftungsart im Brandfall
$l \leq 400$ m	natürliche Lüftung
$400 \text{ m} < l \leq 600$ m	mechanische Längslüftung
$600 \text{ m} < l \leq 1.200$ m	mechanische Längslüftung oder Rauchabsaugung (nach Risikoanalyse)
$l > 1.200$ m	Rauchabsaugung

Tabelle 3-5: Lüftungsart bei GV und RV mit täglich stockendem Verkehr [10]

Tunnellänge	Lüftungsart im Brandfall
$l \leq 600$ m	natürliche Lüftung
$600 \text{ m} < l \leq 3.000$ m	mechanische Längslüftung
$l > 3.000$ m	Rauchabsaugung

Tabelle 3-6: Lüftungsarten bei RV mit in der Regel frei abfließendem Verkehr [10]

Gegenverkehrstunnel:

Regel- querschnitt	Tunnel- länge	Lüftung- system	Bauweise	JDTV (Kfz/24h)	
11 t	400 m	NL	Rechteck	Spitzenwert	25.266
				Mittelwert	12.870
			Gewölbe	Spitzenwert	25.266
				Mittelwert	12.870
	600 m	LL	Rechteck	Spitzenwert	25.266
				Mittelwert	12.870
			Gewölbe	Spitzenwert	25.266
				Mittelwert	12.870
	1.200 m	LL	Rechteck	Spitzenwert	25.266
				Mittelwert	12.870
			Gewölbe	Spitzenwert	25.266
				Mittelwert	12.870
RA		Rechteck	Spitzenwert	25.266	
			Mittelwert	12.870	

Tabelle 3-7: Modelltunnel Gegenverkehr

weitere wesentliche Parameter:

- Längsneigung: 0%
- Abstand der Notausgänge: 300 m (200 m bei Modelltunnel mit 400 m Länge)
- Schwerverkehrsanteil: 9%
- Busanteil: 0,5% (Annahme, keine statistischen Daten verfügbar)
- Staustunden: 30 h pro Jahr gemäß [11]
- Bemessungsbrandleistung: 30 MW
- zulässige Höchstgeschwindigkeit: 80 km/h

verwendete Abkürzungen:

- NL natürliche Lüftung
- LL mechanische Längslüftung
- RA Rauchabsaugung über steuerbare Klappen und Abluftkanal

Richtungsverkehrstunnel:

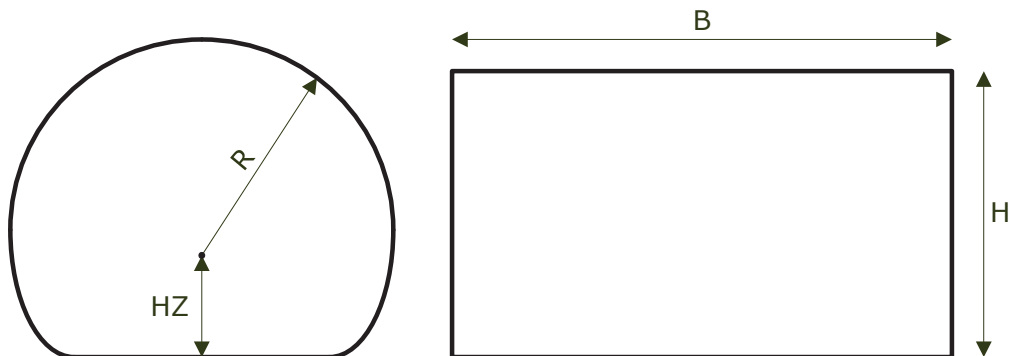
RQ	Tunnel- länge	Stau- stunden	Lüftungs- system	Bauweise	JDTV (Kfz/24h*Röhre)		Bemessungs- brandleistung	
					Spitzenwert	Mittelwert		
31 t	600 m	30 h	NL	Rechteck	Spitzenwert	37.488	-	
					Mittelwert	16.370	-	
			LL	Rechteck	Spitzenwert	37.488	30 MW	
					Mittelwert	16.370	30 MW	
	1.200 m	30 h	LL	Rechteck	Spitzenwert	37.488	50 MW	
					Mittelwert	16.370	30 MW	
				Gewölbe	Spitzenwert	37.488	50 MW	
					Mittelwert	16.370	30 MW	
		500 h	RA	Rechteck	Spitzenwert	37.488	50 MW	
					Mittelwert	16.370	30 MW	
31 T	600 m	30 h	NL	Rechteck	Spitzenwert	47.880	-	
					Mittelwert	21.392	-	
			LL	Rechteck	Spitzenwert	47.880	30 MW	
					Mittelwert	21.392	30 MW	
	1.200 m	30 h	LL	Rechteck	Spitzenwert	47.880	50 MW	
					Mittelwert	21.392	30 MW	
				Gewölbe	Spitzenwert	47.880	50 MW	
					Mittelwert	21.392	30 MW	
		500 h	RA	Rechteck	Spitzenwert	47.880	50 MW	
					Mittelwert	21.392	30 MW	
	36 T	600 m	30 h	LL	Rechteck	Spitzenwert	57.843	30 MW
						Mittelwert	37.462	30 MW
1.200 m		30 h	LL	Rechteck	Spitzenwert	57.843	100 MW	
					Mittelwert	37.462	50 MW	
		500 h	RA	Rechteck	Mittelwert	37.462	50 MW	

Tabelle 3-8: Modelltunnel Richtungsverkehr

weitere wesentliche Parameter:

- Längsneigung: 0%
- Abstand der Notausgänge: 300 m
- Schwerverkehrsanteil: 9%
- Busanteil: 0,5% (Annahme, keine statistischen Daten verfügbar)
- Stautunden: 30 bzw. 500 h pro Jahr gemäß [11]
- zulässige Höchstgeschwindigkeit: 80 km/h bei Tunnel ohne Seitenstreifen
100 km/h bei Tunnel mit Seitenstreifen

Im Zuge der quantitativen Risikobewertung in Kapitel 7.4 werden neben den in den Tabellen 3-7 und 3-8 angegebenen Parametern der Modelltunnel auch deren zugehörige Querschnittsabmessungen für das dreidimensionale Rauchausbreitungsmodell benötigt, wobei zwischen Gewölbe- und Rechteckquerschnitten unterschieden wird:



RQ	Gewölbe		Rechteck	
	R (m)	HZ (m)	B (m)	H (m)
11 t	4,9	1,7	9,5	5,0
31 t	4,9	1,7	9,5	5,0
31 T	-	-	12,0	5,0
36 T	-	-	15,5	5,0

Tabelle 3-9: Querschnittsabmessungen der Modelltunnel

Sehr breite Querschnitte, die mit einem Seitenstreifen ausgestattet sind (31T, 36T), weisen einerseits eine in der Regel hohe Verkehrsstärke auf und sind demnach häufig mit einer Zwischendecke ausgestattet, andererseits werden diese meist in offener Bauweise hergestellt. Daher werden im Falle der Regelquerschnitte 31T und 36T nur die Abmessungen eines Rechteckquerschnitts angeführt.

4 Bedrohungsanalyse für Straßentunnel

Die für Straßentunnel in Deutschland relevanten Bedrohungen werden unter Anwendung des **All-Hazard-Ansatzes** identifiziert, um damit das gesamte Spektrum potentieller Bedrohungen zu erfassen.

Grundlage bilden hier die Ergebnisse des Forschungsprojekts AllTraIn [1], wo unter Anwendung eben dieser Methode die Bedrohungen für Transportinfrastrukturen ermittelt und in einem Katalog zusammengefasst wurden, differenziert nach deren Ursprung - vom Menschen verursacht bzw. natürlich. Gehen die Bedrohungen vom Menschen aus, können diese sowohl aus unbeabsichtigten als auch beabsichtigten bzw. vorsätzlichen Handlungen hervorgehen. Auf Unterschiede in dieser Hinsicht wird unter 4.1 weiter eingegangen. Natürliche Bedrohungen lassen sich in die vier Kategorien meteorologisch, geophysikalisch, gravitationsbedingt und hydrologisch bedingt gliedern. Nicht zuordenbare Bedrohungen werden unter Sonstige angeführt.

Die für die Erfassung getroffenen Betrachtungsgrenzen stellen auch direkt die in Frage kommenden Wirkungsorte der Bedrohungen dar:

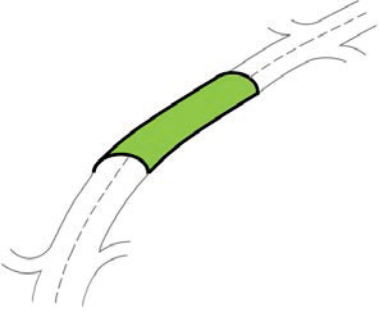
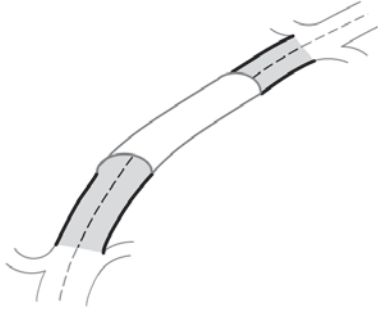

Tunnelbauwerk	Netzelement	zentrale Systeme
		
Tunnel inkl. der betriebstechnischen Ausstattung	gesamter zwischen den nächstgelegenen Anschlussstellen befindlicher Bereich des Straßennetzes	zentrale Systeme wie die ständig besetzte Stelle, das Betriebsgebäude sowie zugehöriges Personal

Tabelle 4-1: Betrachtungsgrenzen und Wirkungsorte der Bedrohungen

Tabelle 4-2 zeigt eine Übersicht sämtlicher für Straßentunnel in Deutschland identifizierten Bedrohungen. Die zugehörige Nummerierung bezieht sich direkt auf die Angaben der Hazard-Fact-Sheets von AllTraIn [1]. Zudem erfolgt eine Zuordnung zu den Wirkungsorten, wodurch eine erste Aussage zu den sich unterscheidenden qualitativen Auswirkungen der Bedrohungen ermöglicht wird.

Bedrohung			Wirkungsort				
Kategorie	Bezeichnung	Nr.	Tunnelbauwerk	Tunnelausstattung	Netzelement	zentrale Systeme	
Naturgefahren	meteorologisch	Sturm	1		x		
		Starkregen	2		x	x	
		Extremer Schneefall	3			x	
		Sturmflut	6		x	x	
		Blitzschlag	8		x		
	geo-physikalisch	Erdbeben	14	x	x		x
		Bodenverformung, -verschiebung	15	x	x		
		Bodensenkung	16	x	x		
		Erdfall	18	x	x		
	gravitationsbedingt	Schneelawine	23		x	x	
		Murgang	24	x	x	x	
		Hangmuren	25	x	x	x	
		Tiefreichende Hangbewegung	26	x	x	x	
		Steinschlag	27		x	x	
		Felssturz	28	x	x	x	
		Bergsturz	29	x	x	x	
	hydrologisch	Fluss-, Seehochwasser	30		x	x	
		Sturzflut	31		x	x	
		Stadthochwasser	32		x	x	
Grundhochwasser		33		x	x		
Gletscherflut / Wasserausbruch		34		x	x		
vom Mensch verursacht	Explosion	41	x	x		x	
	Brand	42	x	x		x	
	Blockade	43			x		
	zu große Fahrzeugabmessungen / Rammen	44/47	x	x			
	Freisetzung von Gefahrenstoffen	46		x	x		
	Sabotage / Vandalismus	48		x		x	
	Diebstahl	49		x		x	
	Cyber-Angriffe / IT-Sicherheitsvorfälle	50		x		x	
Sonstige	umgestürzte Bäume	35		x	x		
	Flächenbrand	36		x	x		
	Stromausfall / Blackout	40		x		x	

Tabelle 4-2: Kategorisierung der Bedrohungen und Zuordnung zu deren Wirkungsorten

4.1 Sonderfall der vorsätzlichen Handlung

Vom Menschen ausgehende Bedrohungen aus beabsichtigten bzw. vorsätzlichen Handlungen können auch unter der Bezeichnung des Angriffs zusammengefasst werden. Als solcher wird jede Handlung mit der Absicht verstanden, Bauwerke, betriebstechnische Einrichtungen, Prozesse, Rettungsmaßnahmen und Personen zu beschädigen, zu stören bzw. an der Ausübung ihrer Aufgaben zu hindern. Ein Angriff hat somit eine dem Ansatz der Resilienz entgegengesetzte Zielsetzung, sowohl der Funktionalitätsverlust, als auch die Wiederherstellungsdauer werden versucht zu maximieren.

Folgende Arten von Angriffen können unterschieden werden:

- physische Angriffe
Diese lassen sich aufgrund der ungehinderten Zugänglichkeit für jedermann und dem verteilten Charakter der Verkehrswege leicht durchführen. Beispiele dieser Kategorie sind Brandstiftung, Beschädigung bzw. Sabotage sicherheitsrelevanter Einrichtungen oder die Blockade von Fluchtwegen.
- Cyber-Angriffe
Das angegriffene System wird entweder in seinem Verhalten verändert, zweckentfremdet oder gänzlich unbenutzbar gemacht. Besonders hervorzuheben ist hier die Schwierigkeit, Angriffe, zum Beispiel auf Überwachungs-, Steuerungs-, oder Kommunikationssysteme, rasch als solche zu erkennen und in weiterer Folge das Ausmaß abschätzen zu können. Hinzu kommt, dass mit nur einer einzigen erfolgreich einsetzbaren Schadsoftware vergleichsweise einfach eine große Anzahl an Tunnelanlagen betroffen sein kann.
- Cyber-physische Angriffe
Bei dieser Art von Angriffen ist das Ziel, mit Beeinträchtigungen bzw. Veränderungen an IT-Systemen physische Komponenten zu beschädigen.

Neben der objektspezifischen Verwundbarkeit, die auch bei vom Menschen ausgehenden nicht beabsichtigten Handlungen bzw. Naturereignissen von Relevanz ist, kommt hier der Aspekt der Attraktivität einer Tunnelanlage hinzu, da die öffentliche Aufmerksamkeit sowie die Wirkung in der Bevölkerung und Politik bei der Wahl des Angriffsziels in vielen Fällen eine entscheidende Rolle spielt.

Im Zuge der Bewertung vorsätzlicher Handlungen können weder eine Eintrittswahrscheinlichkeit, noch mögliche Konsequenzen eindeutig zugeordnet werden. Unter Anbetracht des Resilienzgedankens kommt ihnen daher eine besondere Bedeutung zu, da sie zwar bislang sehr selten auftreten, jedoch das Potential haben, uns vor schwerwiegende und meist unvorhersehbare Probleme zu stellen. Im Falle von Cyber-Angriffen spielt die Detektion eine entscheidende Rolle, da Eingriffe in das IT-System häufig nicht unmittelbar erkannt werden bzw. das Ausmaß in einem frühen Stadium nicht abgeschätzt werden kann.

Unbeabsichtigte Fehlbedingungen eines Operators in der ständig besetzten Stelle fallen zwar nicht in die Kategorie eines Angriffs, da sie nicht vorsätzlich ausgeführt werden, die Auswirkungen sind dennoch wie im Falle von Angriffen nur schwer vorhersehbar.

5 Schadensszenarien

5.1 Verknüpfung mit Bedrohungen

Hinsichtlich der in Kapitel 4 identifizierten Bedrohungen für Straßentunnel kann eine Reihe potentieller Schäden auftreten, am Tunnelbauwerk selbst oder auch an dessen betriebstechnischer Ausstattung. Ein Großteil der Schadensszenarien kann dabei von einer Vielzahl an Bedrohungen verursacht werden, umgekehrt kann ein einzelnes Ereignis aber häufig auch verschiedenste Schadensszenarien nach sich ziehen, wie Abbildung 5-1 zeigt:

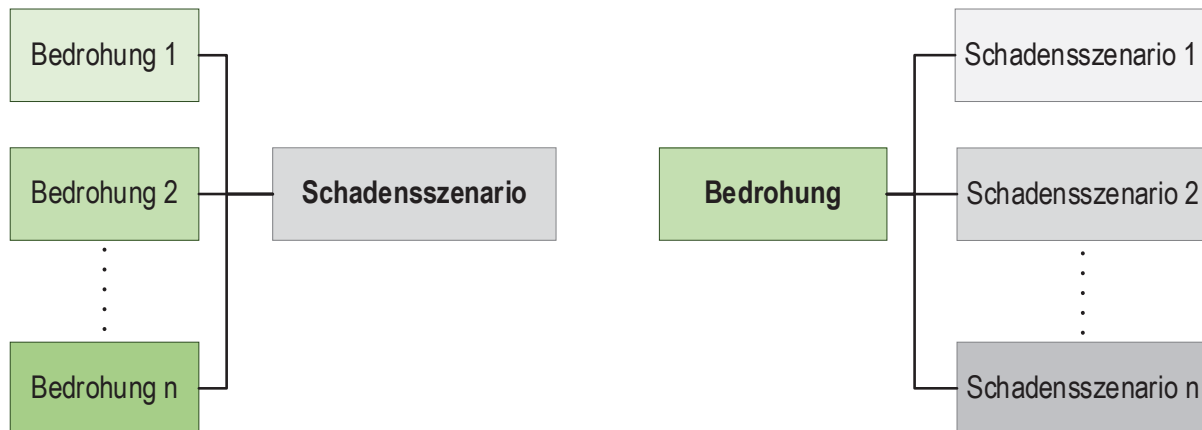


Abbildung 5-1: Zusammengang der Bedrohungen und Schadensszenarien

Die Bewertung der Erhöhung des Risikos durch das Eintreten eines Schadensszenarios erfolgt daher unabhängig von ihrer Ursache, lediglich die Auswirkung davon ist entscheidend. Ein wesentlicher Vorteil besteht somit in der Möglichkeit, die Bewertungsmethodik nicht nur für bekannte, sondern auch neuartige Bedrohungen anzuwenden, da insbesondere der Umgang mit dem Unerwarteten bzw. Unbekannten im Sinne der Resilienz von besonderer Bedeutung ist.

5.2 Anforderungen an die Ausstattung von Straßentunneln

Grundvoraussetzung für die plausible Aufstellung und anschließende Bewertung der Schadensszenarien ist das Verständnis aller sicherheitstechnischen Ausstattungselemente eines Straßentunnels samt deren Abhängigkeiten und ihrem Zusammenwirken.

Die allgemeinen Anforderungen sind in den RABT [10] definiert.

Entwässerung

- Fahrbahntwässerung
Über eine Schlitzrinne auf der gesamten Länge des Tunnels muss in 50 m langen, durch Schotts unterteilten Abschnitten jeweils eine Abflussmenge von mindestens 100 l/s abgeführt werden können.

Energieversorgung

Ein großer Teil der sicherheitstechnischen Anlagen im Tunnel wird über elektrische Energie betrieben. Zur Sicherstellung eines sicheren Betriebs ist daher die Aufrechterhaltung einer ständigen Stromversorgung von großer Bedeutung und Redundanzen sind vorzusehen. Dabei wird zwischen den Versorgungsspannungen der Mittelspannung (10 bis 30 kV) und Niederspannung (400 V bis max. 999 V) unterschieden.

- Mittelspannung
Die Mittelspannungsanlage besteht aus mehreren Trafostationen, von denen aus wiederum die Niederspannungsanlage versorgt wird.
- Niederspannung
Die Niederspannungsanlage besteht aus Verteileranlagen mit Leistungsabgängern und Kopplungsschaltern zwischen den Abgängern.
- USV-Anlage
Mithilfe der unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) in Form einer statischen Wechselrichter- und Batterieanlage werden die Einrichtungen im Tunnel bei einem Netzausfall für mindestens 60 Minuten mit elektrischer Energie versorgt, wobei die Lüftung, Adaptionsbeleuchtung, Tagbeleuchtung und Pumpenanlagen aufgrund des großen Leistungsbedarfs ausgenommen sind.

Beleuchtung

Im Regelbetrieb muss ein mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit fahrender Verkehrsteilnehmer Fahrbahn- und Fahrstreifenbegrenzungen, andere Fahrzeuge sowie Hindernisse auf der Fahrbahn mindestens über die Länge der Haltesichtweite deutlich erkennen können. Um die Anpassung des Auges von der Umgebungsleuchtdichte an jene der Tunnelinnenstrecken zu ermöglichen, erfolgt im Einfahrtsbereich eine adaptive und den aktuellen äußeren Bedingungen entsprechende Regelung der Beleuchtung.

Zur schnellen und sicheren Orientierung der Tunnelnutzer und Einsatzkräfte ist im Ereignisfall die Beleuchtung auf der höchsten Stufe zu betreiben.

Lüftung

Als wesentliches Element der sicherheitstechnischen Einrichtungen dient die Lüftung im Regelbetrieb der ausreichenden Frischluftzufuhr für die Tunnelnutzer, dem Sicherstellen ausreichender Sichtverhältnisse sowie der Reduktion der Schadstoffkonzentrationen im Verkehrsraum, allen voran bei stockendem Verkehr bzw. Stau. Die Steuerung der Lüftungsanlage im Regelbetrieb basiert vorwiegend auf den Luftgütemessungen (Kohlenmonoxid und Sichttrübung).

Im Brandfall besteht die Anforderung der Steuerung der Rauch- und Wärmeentwicklung und somit der Verringerung der Einwirkungen auf die Tunnelnutzer und Rettungskräfte im Zuge der Selbst- bzw. Fremdrettung. Zur Regelung sind hier der Brandort, die Geschwindigkeit der Tunnelluftströmung sowie der Verkehrszustand die wichtigsten Parameter.

Über die Notwendigkeit der Installation einer Lüftungsanlage und den Typ des zum Einsatz kommenden Systems entscheiden vorwiegend Parameter wie die Tunnellänge, die Verkehrsstärke und -zusammensetzung sowie die Art der Verkehrsführung.



Abbildung 5-2: Längslüftung mit Strahlventilatoren [12]

Kommunikation

- Notrufeinrichtung

Notrufsprechstellen an den Portalen bzw. Notrufoptionen im Abstand von 150 m im Tunnel bei einer Länge ab 400 m dienen der direkten Kontaktaufnahme der Tunnelnutzer mit einer ständig besetzten Stelle. So kann im Ereignisfall, im Gegensatz zu einem mit dem Mobiltelefon abgesetzten Notruf, der Standort unmittelbar und exakt bestimmt werden.



- Videoüberwachung
Zur weitgehend lückenlosen Überwachung des Verkehrsraumes und der Notgehwege werden im Abstand von maximal 75 m Kameras angeordnet. Rettungswege werden lediglich punktuell abgedeckt. Die Videobilder werden auf Monitore einer ständig besetzten Stelle übertragen, die manuell aufgeschaltet werden können. Größeren Stellenwert jedoch hat die ereignisorientierte Videoüberwachung, wobei beim Eintreten eines Ereignisses, wie der Benutzung einer Notrufeinrichtung, dem Öffnen einer Notausgangstür oder der Belegung einer Nothalte- und Pannenbucht, sofort und automatisch Livebilder am Alarmmonitor aufscheinen und weitere Maßnahmen unmittelbar getroffen werden können.
- Tunnelfunk
Zur Ermöglichung der Kommunikation für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben, kurz BOS, zu denen Polizei, Feuerwehr und Rettungsdienste zählen, ist eine entsprechende funktechnische Ausstattung im Tunnel erforderlich.
- Verkehrsfunk
Für Durchsagen im Bereich des Tunnels, sowohl für Hinweise auf bestehende Gefahren, als auch zur Information über das richtige Verhalten im Ereignisfall, ist die Einsprache über den UKW-Rundfunk durch die ständig besetzte Stelle bzw. das Betriebsgebäude möglich.
- Lautsprecher
Gemäß den RABT sind alle Tunnel mit Videoüberwachung auch mit Lautsprechern über die gesamte Länge sowie an den Portalen auszurüsten, um den Tunnelnutzern im Ereignisfall Verhaltensanweisungen direkt übermitteln zu können. Die Verständlichkeit der Durchsagen ist nicht nur bei stehendem, sondern auch bei fließendem Verkehr sicherzustellen.

Brandmeldeeinrichtungen

- manuell
Zur manuellen Meldung im Brandfall stehen an allen Notrufräumen, somit im Abstand von 150 m, Handfeuermelder zur Verfügung.
- automatisch
Ein Brand mit einer Brandleistung von 5 MW muss gemäß RABT innerhalb einer Minute nach Zündung auf 50 m genau detektiert werden. Dafür ist ein Brandversuch unter vorgegebenen Randbedingungen, wie z.B. der Strömungsgeschwindigkeit in Längsrichtung, durchzuführen. Zur automatischen Brandmeldung kommt ein linienhaftes Wärmemeldesystem zum Einsatz, welches sowohl auf einen absoluten Temperaturanstieg, als auch auf einen hohen zeitlichen Temperaturgradienten reagiert. Als weiteres System zur Brandmeldung sei hier noch auf die Sichttrübungsmessung hingewiesen, welche die Detektion über Linienmelder, die rein auf den Temperaturanstieg abzielen, entsprechend gut ergänzen.

Brandbekämpfungseinrichtungen

- Handfeuerlöscher
Für die direkte Nutzung der Tunnelnutzern zum Löschen von Bränden im kleinen Maßstab stehen in jeder Notrufräum zwei Handfeuerlöscher zur Verfügung. Die Entnahme wird über Kontakte unmittelbar in der ständig besetzten Stelle registriert.



- Löschwasserversorgung

Löschwasserleitungen, als Trocken- oder Nassleitung ausgeführt, sind bei allen Tunneln mit einer Länge von mehr als 400 m zu installieren. Dabei ist eine Durchflussmenge von 1.200 l/min mit einem Entnahmedruck zwischen 6 und 10 bar für mindestens 60 Minuten zu gewährleisten. Die Entnahmestellen im Abstand von 150 m werden jeweils gegenüber der Notrufeinrichtung angeordnet. Bei kürzeren Tunneln muss an beiden Portalen ein Behälter mit einem Löschwasservorrat von 72 m³ und entsprechenden Entnahmestellen bereitstehen.

Fluchtwege

- Notausgangstür

Die Selbstrettung steht im Ereignisfall stets im Vordergrund, daher werden zur Gewährleistung der Fluchtmöglichkeit in sichere Bereiche gemäß RABT bei Tunneln ab einer Länge von 400 m im Abstand von maximal 300 m Notausgänge angeordnet. Diese sind durch den grünen selbstleuchtenden Rahmen deutlich erkennbar und führen entweder ins Freie, direkt bzw. über Querschläge in die andere Tunnelröhre oder zu Rettungsschächten bzw. -stollen.



Abbildung 5-3: Notausgang im Richard-Strauss-Tunnel in München [13]

- Orientierungsbeleuchtung

Diese wird nur im Brandfall aktiviert und ist ab einer Tunnellänge von 400 m erforderlich.

- Fluchtwegkennzeichnung

Über Flucht- und Pfeilsymbole sowie Entfernungsangaben wird auf die nächstgelegenen Notausgänge bzw. das Tunnelportal hingewiesen.

Die beiden Elemente der Orientierungsbeleuchtung und Fluchtwegkennzeichnung sind vorzugsweise kombiniert in einer Leuchte im Abstand von 25 m angebracht.



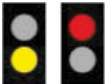
Abbildung 5-4: kombinierte Fluchtwegkennzeichnung mit Orientierungsbeleuchtung [10]

verkehrstechnische Einrichtungen

- Wechselverkehrszeichen
Mithilfe flexibel einsetzbarer WVZ wird die Drosselung der Geschwindigkeit sowie eine Gefahrenwarnung bei Stör- bzw. Notfällen über mechanisch umschaltbare Anzeigen oder LED-Signalisierungen ermöglicht. Diese befinden sich sowohl vor dem Tunnel zur Regelung des Zuflusses, als auch in regelmäßigen Abständen von ca. 600 m im Tunnel.
- Dauerlichtzeichen
Einzelne Fahrstreifen können durch mittig über der entsprechenden Spur angeordneten Dauerlichtzeichen gesperrt bzw. wieder freigegeben werden. Ihr Abstand ergibt sich über die Bedingung, stets das nächste DLZ erkennen zu können und beträgt in etwa 300 bis 600 m.



Abbildung 5-5: über der Fahrbahn angeordnete Wechsel- und Dauerlichtzeichen [12]

- Höhenkontrolle
Zum Schutz der über dem Lichtraum angeordneten betriebstechnischen Ausstattungen und der Vermeidung von Unfällen ist ausreichend weit vor der Einfahrt in den Tunnel eine Höhenkontrolle vorgesehen. Dabei muss ein Anhalten vor dem Portal durch das Sperren des Tunnels noch möglich sein, Optimum stellt jedoch eine zusätzliche Kontrolle bereits vor der letzten Anschlussstelle dar, um so durch das Ausleiten des betroffenen Fahrzeuges die negativen verkehrlichen Auswirkungen so gering wie möglich zu halten.
- Sperrschranken
Zur Verdeutlichung einer Tunnelsperre werden zusätzlich zu den auf Rot geschalteten Lichtzeichenanlagen die Sperrschranken geschlossen. Voraussetzung dafür ist ein funktionierendes Zusammenwirken aller Wechselverkehrszeichen im Vorlaufbereich des Tunnels, beispielsweise um eine schrittweise Geschwindigkeitsreduktion („Geschwindigkeitstrichter“) zu bewirken.
- Lichtzeichenanlage
Das zweifeldrige Wechsellichtzeichen (Rot/Gelb) ist ein Element der Sperreinrichtung eines Tunnels und befindet sich auf Höhe der Schranken sowie direkt am Portal. 
- selbstleuchtende Markierungselemente
Mit am linken und rechten Fahrbahnrand angeordneten selbstleuchtenden Markierungselementen wird die visuelle Führung der Fahrzeuglenker verbessert. Zudem dienen sie im Ereignisfall als wichtige Orientierungshilfe für die Tunnelnutzer.

Messeinrichtungen

- Kohlenmonoxid-Konzentration, Sichttrübung, Strömungsgeschwindigkeit
Die Erfassung der aktuellen Messgrößen im Verkehrsraum dient in erster Linie der Steuerung und Regelung der Lüftungsanlage, wobei die Werte der Kohlenmonoxid-Konzentration und Sichttrübung im Regelbetrieb, der Strömungsgeschwindigkeit hingegen im Brandfall von Relevanz sind. Wie bereits bei den Brandmeldeeinrichtungen erläutert, stellt die Messung der Sichttrübe zusätzlich eine adäquate Unterstützung zur raschen Detektion eines Brandes dar, vor allem bei Ereignissen mit großer Rauch-, aber geringer Hitzeentwicklung.
- Verkehrsdatenerfassung
Um Stör- und Notfälle im Verkehrsablauf, wie z.B. hohe Verkehrsdichte, Stau oder Geisterfahrer, frühzeitig zu erkennen, erfolgt im Tunnel im Abstand von 300 m sowie über einen zusätzlichen Messquerschnitt nach Tunnelende zur Registrierung eines Rückstaus die Erfassung aktueller Verkehrsdaten.
- Überwachung der Kontakte sicherheitstechnischer Ausstattungen
Über angebrachte Kontakte an Ausstattungselementen wie Notruftelefonen, Handfeuerlöschern oder Notausgangstüren wird eine ereignisorientierte Videoüberwachung ermöglicht.

zentrale Einrichtungen

- Betriebsgebäude
Zur sicheren Unterbringung wichtiger Anlagen und Systeme, wie zum Beispiel jener der Energieversorgung, und der gegebenenfalls erforderlichen Möglichkeit der Überwachung und Steuerung vor Ort besteht für jeden Tunnel ein zugehöriges Betriebsgebäude.
- ständig besetzte Stelle
Diese rund um die Uhr verfügbare Stelle zur betriebs- und sicherheitstechnischen Überwachung und Steuerung ist Grundvoraussetzung der Sicherheit der Tunnelnutzer. Um den Verkehrsfluss aufrechtzuerhalten bzw. Personen- und Sachschäden abzuwenden oder zu begrenzen, kann sie durch frühzeitiges Erkennen von Unregelmäßigkeiten oder Störungen steuernd eingreifen. Dabei erfolgt eine Unterscheidung der Maßnahmen zwischen in das System eingebundenen automatisch ablaufenden Aktionen und halbautomatischen Maßnahmen, bei denen das Personal bei der Einleitung und Rücknahme eingebunden ist. Wichtiges Instrument dafür ist die (ereignisorientierte) Videoüberwachung zur visuellen Überprüfung mithilfe der direkt übertragenen Livebilder.

Im Ereignisfall erfolgt sowohl eine Unterstützung der Selbstrettung der Tunnelnutzer, als auch der Fremddrettung durch die Einsatzdienste. Notrufe werden stets direkt an die entsprechende ständig besetzte Stelle weitergeleitet, um so unmittelbar Informationen auf beiden Seiten weitergeben zu können und rasches Eingreifen zu gewährleisten.



Abbildung 5-6: ständig besetzte Stelle [12]

5.3 Definition der Schadensszenarien

Von der groben Einteilung bis hin zur detaillierten Definition werden die Schadensszenarien auf mehreren Ebenen beschrieben. Zuerst erfolgt eine grundsätzliche Gruppierung in die Kategorien baulich, versperrend und betriebstechnisch. Bauliche Szenarien beschreiben strukturelle Schäden am Tunnelbauwerk selbst, hervorgerufen durch statische, dynamische oder thermische Belastung. Blockaden des Verkehrsraumes im Bereich des betrachteten Netzelementes ohne dem Auftreten unmittelbarer Schäden, z.B. durch Steinschlag, Schneeverwehungen oder Überflutungen, werden den versperrenden Schadensszenarien zugeordnet und führen zu einer Einschränkung oder Unterbrechung des Verkehrsflusses. Betriebstechnische Szenarien sind Beeinträchtigungen oder Ausfälle der Funktionalität der Ausstattungselemente eines Straßentunnels.

In diesen drei Kategorien werden jeweils sämtliche entsprechende Systeme aufgenommen, die diesem Bereich zugeordnet sind:

Kategorie	System
baulich	Bauwerk Bauteil Fahrbahn
versperrend	Fahrbahn
betriebs- technisch	Entwässerung Energieversorgung Beleuchtung Lüftung Kommunikationseinrichtungen Brandmeldeeinrichtungen Brandbekämpfungseinrichtungen Notausgänge, Flucht- und Rettungswege verkehrstechnische Einrichtungen Messeinrichtungen zentrale Einrichtungen

Tabelle 5-1: Kategorien und Systeme zur Einteilung der Schadensszenarien

Zur Erfüllung der erforderlichen Funktionalitäten besitzen diese Systeme wiederum mehrere Komponenten (Tabelle 5-2), die mit verschiedenen plausiblen Fehlermodi versehen werden, welche schlussendlich das Schadensszenario an sich darstellen. Je nach Aufbau und Funktionsweise wird dabei zwischen Teil- und Totalausfällen unterschieden. Ist der Tunnel nur partiell betroffen, richtet sich die entsprechende Länge des Teilausfalls nach den gemäß den RABT maximalen Abständen der Einrichtungen, wie zum Beispiel der Notrufeinrichtungen im Anstand von 150 m oder den Notausgängen von 300 m.

Grundsätzlich sind nur Ausstattungselemente berücksichtigt, die nach den RABT vorzusehen sind, Komponenten, die darüber hinaus gehen, werden nicht in die Aufstellung der Schadensszenarien mitaufgenommen. Eine vollständige Auflistung aller Szenarien ist im Anhang A2 zu finden.

Kategorie	System	Komponente
baulich	Bauwerk	einzelne Tunnelröhre
		alle Tunnelröhren
	Bauteil	Innenschale
		Zwischendecke
Auskleidung		
Fahrbahn	Fahrbahn	
versperrend	Fahrbahn	Fahrbahn
betriebs- technisch	Entwässerung	Fahrbahnentwässerung
	Energieversorgung	Mittelspannung
		Niederspannung
		USV-Anlage
	Beleuchtung	Innenstreckenbeleuchtung
		Einfahrtsbeleuchtung
		Beleuchtung der Rettungswege
	Lüftung	Längslüftung Strahlventilatoren
		Querlüftung Lüftungsklappen
		Querlüftung Strahlventilatoren
		Lüftung der Rettungswege
	Kommunikations- einrichtungen	Notrufeinrichtung
		Öffnungskontakte der Notrufeinrichtung
		Videoüberwachung
		Tunnelfunk
		Verkehrsfunk
	Brandmeldeeinrichtungen	Lautsprecher
		Handfeuermelder
		linienhaftes Wärmemeldesystem
	Brandbekämpfungseinrichtungen	Entnahmekontakte der Handfeuerlöcher
		Handfeuerlöscher
	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Löschwasserversorgung
		Notausgang
		Öffnungskontakte der Notausgangstür
		Leuchtrahmen Notausgang
		Orientierungsbeleuchtung
	verkehrstechnische Einrichtungen	Fluchtwegskennzeichnung
		Wechselverkehrszeichen
		Dauerlichtzeichen
		Höhenkontrolle
		Sperrschranken
		Lichtzeichenanlage
		selbstleuchtende Markierungselemente
		Verkehrsdatenerfassung
	Induktionsschleife Pannenbucht	
	Messeinrichtungen	Kohlenmonoxid Messung
		Sichttrübe Messung
		Strömungsgeschwindigkeit Messung
	zentrale Einrichtungen	Betriebsgebäude
		ständig besetzte Stelle

Tabelle 5-2: Komponenten zur Definition der Schadensszenarien

Zur unmittelbaren Verknüpfung der Bedrohungen mit den daraus resultierenden Schadensszenarien zeigt Abbildung 5-7 den grundsätzlichen Aufbau einer Matrix, welche die Bedrohungen den Tunnelkomponenten aus Tabelle 5-2 zuordnet, an denen potentiell Schäden auftreten.

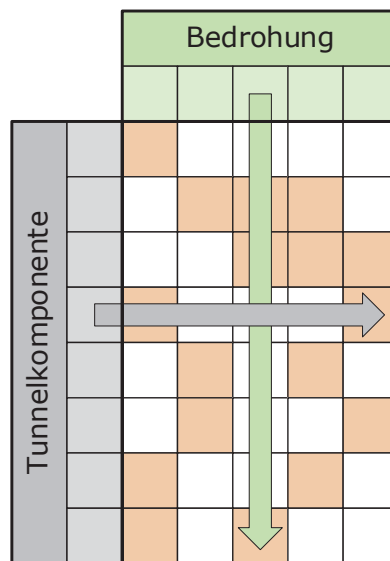


Abbildung 5-7: schematische Darstellung der Matrix zur Verknüpfung der Bedrohungen und Schadensszenarien

Die vollständige Darstellung der Matrix ist im Anhang A2 zu finden. Dabei werden auch die entsprechenden Wirkungsorte der Bedrohungen aus Kapitel 4 wieder aufgegriffen und zugewiesen.

Wird die Matrix innerhalb einer Spalte von oben nach unten betrachtet, können potentiell gleichzeitig auftretende Schadensszenarien nach einem bestimmten Ereignis identifiziert werden. Der Zeile nach von links nach rechts kann erkannt werden, welche Bedrohungen für einzelne besonders kritische Systeme von Relevanz sind, um so Maßnahmen zur Prävention zielgerichteter zu setzen und den Umgang mit Ereignissen zu verbessern.

6 Entwicklung verkehrlicher Betriebsszenarien

Die im vorangegangenen Kapitel definierten Schadensszenarien ziehen unterschiedliche verkehrliche Betriebsszenarien nach sich, vom Normalbetrieb, über verschiedene eingeschränkte Szenarien, wie beispielsweise einer Geschwindigkeitsreduktion oder Fahrstreifensperre, bis hin zur Vollsperrung des Tunnels (s. Abbildung 6-1). Auf Basis der in Kapitel 3.2 festgelegten Modelltunnel werden in Abhängigkeit der Betriebsart (Richtungs- oder Gegenverkehr) und dem Regelquerschnitt (Anzahl und Breite der Fahrstreifen, Verfügbarkeit eines Seitenstreifens) entsprechend durchführbare und plausible verkehrliche Betriebsszenarien entwickelt. Die Tunnellänge ist im Zuge dieser Aufstellung irrelevant.

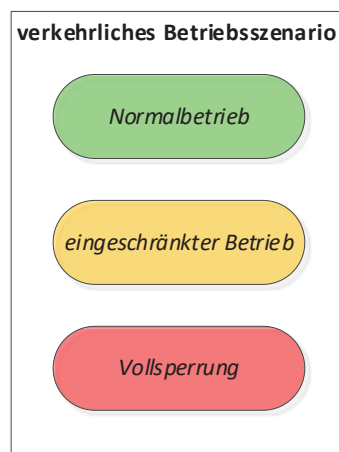


Abbildung 6-1: Kategorisierung der verkehrlichen Betriebsszenarien

Eine Zuordnung zu den Schadensszenarien, die in den hier dargestellten verkehrlichen Betriebsszenarien resultieren, erfolgt in einem weiteren Schritt unter Anwendung der minimalen Betriebsbedingungen in Kapitel 7. Zudem bilden die hier dargestellten Betriebsszenarien die Grundlage für die Untersuchung verkehrlicher Auswirkungen in Kapitel 8.

Legende zu den Tabellen 6-1 bis 6-4:

n	Verkehr nicht beeinflusst
s	Mitbenutzung des Seitenstreifens
↑	Normalbetrieb
↑	eingeschränkter Betrieb
×	Fahrstreifen gesperrt

6.1 Einröhrige Tunnel im Gegenverkehrsbetrieb

Für die Modelltunnel im Gegenverkehrsbetrieb mit dem Regelquerschnitt 11 t gemäß RABT bestehen folgende verkehrliche Betriebsszenarien:







Bezeichnung	Schemaskizze
Normalbetrieb	
Geschwindigkeitsreduktion	
alternierender RV auf beiden Fahrstreifen	
Sperre eines Fahrstreifens, alternierender RV auf einem Fahrstreifen	
Sperre eines Fahrstreifens, Geschwindigkeitsreduktion	
Vollsperrung	

Tabelle 6-1: verkehrliche Betriebsszenarien für Gegenverkehrstunnel

Ein alternierender Richtungsverkehr auf beiden Fahrstreifen kann als Maßnahme bei besonders hohem Verkehrsaufkommen ergriffen werden. Insbesondere, wenn auf der freien Strecke zwei Fahrstreifen zur Verfügung stehen, vor dem Tunnel jedoch auf einen reduziert wird, ist die Kapazität rasch ausgeschöpft. So kann mittels der zum Teil auch als Blockabfertigung bezeichneten Maßnahme Stau im Tunnel vermieden und die Unfallgefahr minimiert werden. Ist ein Fahrstreifen gesperrt, steht nicht immer eine geeignete Umleitungsstrecke zur Verfügung, daher kann der Betrieb im alternierenden Richtungsverkehr auf dem verbleibenden Fahrstreifen hier Abhilfe schaffen.

6.2 Zweiröhrige Tunnel im Richtungsverkehrsbetrieb

Bei der Definition verkehrlicher Betriebsszenarien in Richtungsverkehrstunneln erfolgt eine weitere Differenzierung nach der Anzahl der Fahrstreifen im Normalbetrieb. Tabelle 6-2 zeigt die Betriebsszenarien zweistreifiger Tunnel ohne Seitenstreifen, welche den Modelltunneln der Regelquerschnitte 31 t entsprechen. Für mit einem Seitenstreifen ausgestattete Tunnel zusätzlich mögliche Betriebsszenarien sind in Tabelle 6-3 dargestellt, welche in den repräsentativen Tunneltypen durch den RQ 31 T vertreten sind.








Bezeichnung		Schemaskizze
Normalbetrieb	$2n + 2n$	
Geschwindigkeitsreduktion	$2n + 2$	
Sperre eines Fahrstreifens, Geschwindigkeitsreduktion	$2n + 1$	
Sperre einer Röhre, Normalbetrieb in zweiter Röhre	$2n + 0$	
Sperre einer Röhre, GV-Betrieb in zweiter Röhre 1:1	$2 + 0$	
Sperre einer Röhre, alternierender RV in zweiter Röhre	$2 + 0$	
Vollsperrung	$0 + 0$	

Tabelle 6-2: verkehrliche Betriebsszenarien zweistreifiger Richtungsverkehrstunnel ohne Seitenstreifen (RQ 31 t)




Bezeichnung		Schemaskizze
Seitenstreifenbefahrung	$3s + 3s$	
Sperre einer Röhre, GV-Betrieb in zweiter Röhre 2:1	$3s + 0$	
Sperre eines Fahrstreifens, GV-Betrieb in zweiter Röhre 2:1	$3s + 1$	

Tabelle 6-3: verkehrliche Betriebsszenarien zweistreifiger Richtungsverkehrstunnel mit Seitenstreifen (RQ 31 T), zusätzlich zu Tabelle 6-2

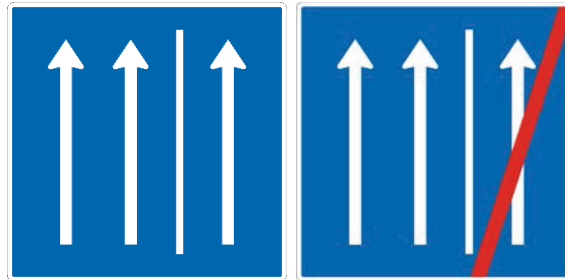
Betriebsszenarien für Querschnitte mit drei Fahrstreifen und Seitenstreifen sind in Tabelle 6-4 dargestellt, entsprechend den Modelltunneln des Regelquerschnitts 36 T.

Bezeichnung		Schemaskizze
Normalbetrieb	$3n + 3n$	
Seitenstreifenbefahrung	$4s + 4s$	
Geschwindigkeitsreduktion	$3n + 3$	
Sperre eines Fahrstreifens, Geschwindigkeitsreduktion	$3n + 2$	
Sperre von zwei Fahrstreifen, Geschwindigkeitsreduktion	$3n + 1$	
Sperre einer Röhre, Normalbetrieb in zweiter Röhre	$3n + 0$	
Sperre einer Röhre, GV-Betrieb in zweiter Röhre 2:1	$3 + 0$	
Sperre einer Röhre, GV-Betrieb in zweiter Röhre 2:2	$4 + 0$	
Sperre eines Fahrstreifens, GV-Betrieb in zweiter Röhre 3:1	$4 + 2$	
Sperre einer Röhre, GV-Betrieb in zweiter Röhre 3:2	$5s + 0$	
Sperre von zwei Fahrstreifen, GV-Betrieb in zweiter Röhre 3:2	$5s + 1$	
Sperre eines Fahrstreifens, GV-Betrieb in zweiter Röhre 3:2	$5s + 2$	
Sperre einer Röhre, alternierender RV in 2. Röhre	$3 + 0$	
Vollsperrung	$0 + 0$	

Tabelle 6-4: verkehrliche Betriebsszenarien dreistreifiger Richtungsverkehrstunnel mit Seitenstreifen (RQ 36 T)

Grundsätzlich können alle hier dargestellten Betriebsszenarien und Verkehrsführungen, wie an der freien Strecke, auch im Tunnel zur Anwendung kommen, sofern die geometrischen Verhältnisse dies zulassen. Jedoch sind die Möglichkeiten im Tunnel in der Praxis meist durch die vorhandene betriebstechnische Ausstattung limitiert, da verkehrs- und sicherheitstechnische Einrichtungen nicht für all diese Szenarien ausgelegt sind. Verkehrliche Betriebsszenarien mit einer Aufteilung einer Richtung auf beide Tunnelröhren ($3s+1$, $4+2$, $5s+1$, $5s+2$) sind steuerungstechnisch nur schwer umzusetzen und finden daher bislang keine Anwendung in der Praxis. Der Betrieb erfolgt demnach stets im reinen Richtungs- bzw. reinen Gegenverkehr.

Die temporäre Freigabe des Seitenstreifens kann als Maßnahme zur Bewältigung besonders hohen Verkehrsaufkommens zum Einsatz kommen. Auch hier ist neben den verkehrlichen Aspekten die Voraussetzung zu beachten, dass die Ausstattung des Tunnels entsprechend ausgelegt sein muss. Beispielsweise im bayrischen Tunnel Allach ist eine temporäre Seitenstreifenfreigabe zu den Spitzenzeiten des Verkehrs in Kombination mit einer Geschwindigkeitsreduktion auf 60 km/h bereits angedacht.



*Abbildung 6-2: Verkehrszeichen
"Seitenstreifen befahren" und „Seitenstreifen nicht mehr befahren“ [14]*

Bei allen Betriebsszenarien mit nur noch einem Fahrstreifen pro Richtung sind Spurwechsel als häufige Unfallursache ausgeschlossen. Kommt ein Betrieb im Gegenverkehr zum Einsatz, ist zur Vermeidung von Frontalzusammenstößen in Abhängigkeit der Platzverhältnisse die Möglichkeit einer baulichen Mitteltrennung zu prüfen. Zwar ist dadurch die barrierefreie Selbstrettung nicht mehr sichergestellt, da die Notausgänge in aller Regel an nur einer Seite angeordnet sind, der Vorteil einer klaren baulichen Trennung der Richtungsfahrbahnen überwiegt in aller Regel jedoch.

7 Minimale Betriebsbedingungen nach disruptiven Ereignissen

Der Zusammenhang der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Elemente, beginnend mit den Bedrohungen, über die Schadensszenarien zu den verkehrlichen Betriebsszenarien, ist in Abbildung 7-1 in Form eines Bow-Tie-Diagramms dargestellt.

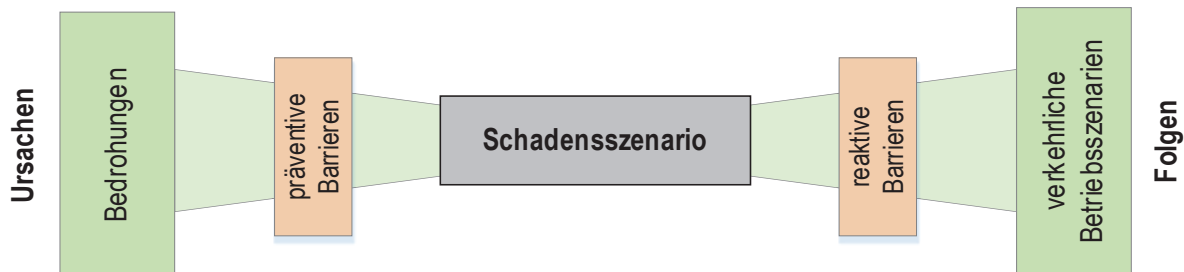


Abbildung 7-1: Bow-Tie-Diagramm:
Verknüpfung Bedrohungen - Schadensszenario – verkehrliche Betriebsszenarien

Bei der Bow-Tie Methode handelt es sich um ein Verfahren der Risikoanalyse, wobei in einem graphischen Modell der Zusammenhang zwischen den Ursachen und Folgen eines Ereignisses gesamtheitlich dargestellt wird. Zentraler Knotenpunkt ist dabei das Top-Event, welches hier über die verschiedenen Schadensszenarien abgebildet wird. Einzelne Schritte können somit entkoppelt und die Übersicht verbessert werden.

Die Bezeichnung leitet sich aus dem Erscheinungsbild ab (Fliege: engl. "bow tie").

Laut ISO 31010 [15] kann diese Methode als Kombination aus Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse angesehen werden und dient neben der Funktion als Werkzeug zur Risikoanalyse nicht zuletzt auch als wichtiges Element der Kommunikation, da eine übersichtliche Darstellung ermöglicht wird.

Auf beiden Seiten des Bow-Tie-Diagramms werden nach Möglichkeit Barrieren angeordnet:

- präventiv
Barrieren wirken dem Kontrollverlust entgegen, der das Schadensszenario (Top-Event) hervorruft. Dies entspricht den Phasen **prevent** und **protect** des Resilienzkreislaufs.
- reaktiv
Hier dienen die Barrieren der Mitigation nach dem Eintreten des Schadensszenarios und werden im Resilienzzyklus durch die beiden Schritte **respond** und **recover** abgebildet.

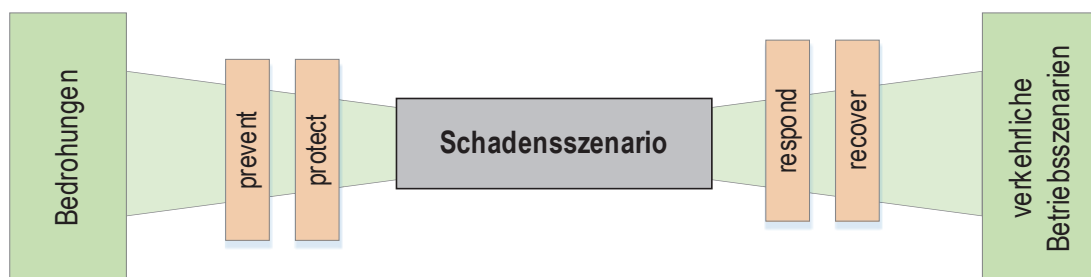


Abbildung 7-2: Einordnung der Phasen des Resilienzkreislaufs im Bow-Tie-Diagramm

Für den Fall des Eintretens von Schadensszenarien ist die laut Regelwerken vorzusehende Ausgestaltung und Ausrüstung unter Umständen nicht mehr gegeben bzw. in vollem Umfang funktionsfähig. Um auch unter diesen Gegebenheiten die Sicherheit zu gewährleisten, werden auf Basis der Personensicherheit minimale Bedingungen für den Betrieb von Straßentunneln nach disruptiven Ereignissen erarbeitet. Unter Miteinbeziehung eventuell erforderlicher temporärer risikoreduzierender Maßnahmen ist so zu zeigen, dass trotz der Abweichungen zu den Vorgaben der Richtlinien zu jedem Zeitpunkt ein tolerables Sicherheitsniveau erreicht oder übertroffen wird. Andernfalls muss der Tunnel bzw. die betroffene Tunnelröhre für den Verkehr gesperrt werden. Demnach wird der Grenzzustand zwischen tolerierbarem und kritischem Risiko über die Erarbeitung **minimaler Betriebsbedingungen** definiert.

Diese Methodik ermöglicht die Personensicherheit als Grundvoraussetzung für den Betrieb sicherzustellen, zudem aber auch die Verfügbarkeit der Straßentunnel nachhaltig zu erhöhen.

Um den Nachweis eines ausreichenden Sicherheitsniveaus zu erbringen, werden in der Praxis zwei grundlegende Ansätze verfolgt:

richtlinienbasierter Ansatz	risikobasierter Ansatz
<i>Ein Tunnel ist ausreichend sicher, wenn er den geltenden Vorschriften entspricht.</i>	<i>Ein Tunnel ist ausreichend sicher, wenn er den vorgegebenen Risikokriterien entspricht.</i>

Tabelle 7-1: Ansätze der Risikobewertung [13]

Der richtlinienbasierte Ansatz basiert auf Maßnahmen, erforderlichen Ausstattungselementen oder weiteren fest definierten Vorgaben, unter dessen Einhaltung das Sicherheitsniveau im Tunnelbetrieb als ausreichend angesehen wird.

Für die zu definierenden minimalen Betriebsbedingungen jedoch kommt lediglich der risikobasierte Ansatz in Frage, da im Fall des Eintretens bestimmter Schadensszenarien die vollständige Entsprechung mit den geltenden Vorschriften, hier die RABT, nicht mehr vorliegt. Auf Grundlage von Risikoanalysen kann jedoch nachvollziehbar bewertet werden, ob die vorgegebenen Risikokriterien, eventuell unter Zuhilfenahme von Kompensationsmaßnahmen, erfüllt sind und somit das geforderte Sicherheitsniveau weiterhin gegeben ist.

Diese Vorgehensweise wird auch mit dem Hinweis in den RABT explizit ermöglicht, dass bei begründeten Abweichungen von den Richtlinien der beschriebene Sicherheitsstandard nicht unterschritten werden darf, eventuell unter Zuhilfenahme risikomindernder Maßnahmen. [10]

7.1 Internationale Ansätze zu minimalen Betriebsbedingungen

Frankreich: *CETU, Definition of safety functions, Application to degraded operating modes and minimum operating requirements* [16]
CETU, Guide to Road Tunnel Safety Documentation, Emergency Response Plans [17]

Zur Gewährleistung der Sicherheit werden fünf Hauptfunktionen definiert:

- Vorbeugen von Ereignissen und Störfällen
- Detektion von Ereignissen und Störfällen
- Alarmieren und Informieren
- Minimieren der Auswirkungen eines Ereignisses bzw. Störfalls
- Sicherstellen der Rückkehr zum Normalfall

Diesen Hauptfunktionen wiederum werden elf Ressourcen zugeordnet:

- bautechnische Anlagen
- zentralisierte Systeme
- Energieversorgung
- Beleuchtung
- Belüftung
- Brandbekämpfung
- Ereignis- und Branddetektion
- Kommunikation
- Verkehrstechnische Einrichtungen
- Personal in Bezug auf den Tunnel
- externes Personal

Die Definition minimaler Betriebsbedingungen und der daraus unter Umständen resultierende eingeschränkte Betrieb erfordert die Berücksichtigung folgender drei Parameter:

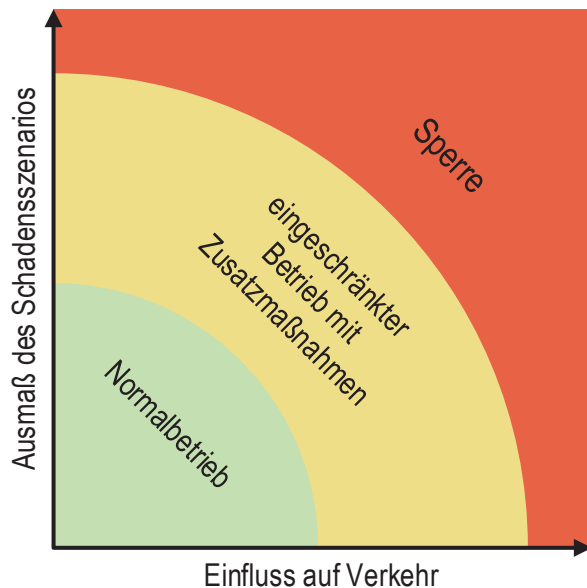
- Art und Ort des Schadensszenarios
- mögliche Kompensationsmaßnahmen oder Verkehrseinschränkungen
- maximale Dauer des eingeschränkten Betriebs

Diese Kriterien bestimmen zudem die Grenzen, unter denen der Tunnel zu sperren ist.

Zur Entwicklung von MOR (Minimum Operating Requirements) erfolgt eine Gliederung der Ressourcen in „kompensierbar“ und „nicht kompensierbar“:

- Nicht kompensierbare Ressourcen sollen stets redundant vorhanden sein, wobei zwischen vollständiger und teilweiser Redundanz unterschieden wird. Ist sie vollständig, kann die Funktion zur Gänze von einem anderen System übernommen werden, einer unmittelbaren und automatischen Aktivierung kommt hier besondere Bedeutung zu. Liegt lediglich eine teilweise Redundanz vor, hat dies hingegen einen eingeschränkten Betrieb zur Folge, die Funktion ist nur noch zu einem bestimmten Teil abgedeckt.
- Kompensierbare Ressourcen brauchen keine Redundanz, bei einem Ausfall wird die Funktion auf andere Weise erfüllt und kompensiert.

Im Betrieb wird somit zwischen drei in Abbildung 7-3 dargestellten grundsätzlichen Zuständen differenziert:



- Normalbetrieb bzw. Zustände nach Ereignissen mit sehr geringem Einfluss auf den Verkehrsfluss (grüner Bereich)
- eingeschränkter Betrieb mit temporären Maßnahmen bzw. Verkehrseinschränkungen (gelber Bereich)
- Sperre (roter Bereich)

Abbildung 7-3: Betriebszustände gem. [17]

Österreich: FSV, Anwendungshinweise zur RVS 09.04.11 Minimale Betriebsbedingungen, Arbeitspapier Nr. 32 [18]

Das Arbeitspapier stellt einen Leitfaden für die Festlegung möglicher Ersatzmaßnahmen im Fall einer eingeschränkten technischen bzw. verkehrlichen Verfügbarkeit oder den Ausfall von Anlagen bzw. Anlagenteilen dar. Darin werden in Abhängigkeit von den Störungen und Anlageneinschränkungen organisatorische und technische Ersatzmaßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen zur Risikominderung vorgeschlagen, um so trotz der vorliegenden Ausfälle oder Störungen einen eingeschränkten Betrieb zu ermöglichen. Darauf aufbauend hat der Straßenerhalter eigene Bewertungen vorzunehmen und daraus abzuleitende Maßnahmen festzulegen.

Das Dokument enthält eine Matrix der minimalen Betriebsbedingungen mit einer Auflistung relevanter Ausfallszenarien und entsprechenden Sofortmaßnahmen sowie technischen bzw. organisatorischen Ersatzmaßnahmen(-kombinationen) zur Senkung des Risikos. Ist dies nicht im ausreichenden Maße möglich, muss der Tunnel komplett gesperrt werden. Zudem wird jedem Szenario eine Priorität zugeordnet, die zum Beispiel folgendermaßen definiert sein können:

- 1 sicherheitskritisch
- 2 betriebskritisch
- 3 betriebsrelevant
- 4 nicht sicherheitskritisch, nicht betriebskritisch, nicht betriebsrelevant

Die Angaben dienen lediglich als Hilfestellung bzw. Leitfaden und ersetzen keinesfalls eine individuelle objektbezogene Betrachtung.

Schweiz: *ASTRA, Minimale Anforderungen an den Betrieb – Straßentunnel, Leitfaden Operative Sicherheit Betrieb (ASTRA 86053) [19]*

Die Grundlage für die Festlegung minimaler Betriebsbedingungen stellen die Grundsätze eines sicheren Betriebs gem. der ASTRA-Richtlinie „Operative Sicherheit Betrieb“ [20] dar:

- Gewährleistung der Verkehrssicherheit, einer ruhigen Verkehrsführung mit einer eindeutigen und erkennbaren Verkehrsleitung
- Gewährleistung der Selbstrettung
- Gewährleistung der Intervention der Ereignisdienste
- Gewährleistung des Betriebs und Erhaltung der Infrastruktur

In Abhängigkeit der vorliegenden Ausfälle erfolgt eine Unterscheidung zwischen folgenden Betriebsarten:

- Ein Verkehrsbetrieb ohne Einschränkungen kann aufrechterhalten bleiben, solange zulässige Abweichungen vom Normalbetrieb innerhalb einer definierten maximalen Dauer vorliegen. Dies betrifft immer nur einzelne Anlagen bzw. Anlagenteile.
- Ausfallkombinationen fallen immer unter die Betriebsart „Betrieb unter minimalen Anforderungen“.

Die große Vielfalt möglicher Ausfall- und Schadenskombinationen macht eine direkte Aufzählung minimaler Bedingungen mit allen notwendigen Funktionsersatzmaßnahmen und risikomindernden Maßnahmen äußerst schwierig. Daher wird in [19] ein Ablauf zur Einrichtung eines Betriebs unter minimalen Anforderungen definiert. Um im Ereignisfall dennoch rasch reagieren zu können, werden Eventualplanungen für verschiedene mögliche Ausfall- bzw. Schadenskombinationen erstellt. Im Zuge dessen werden folgende Maßnahmen festgelegt:

- Sofortmaßnahmen durch die Betriebs- oder Einsatzleitzentrale
- Funktionsersatzmaßnahmen, um die Funktion ausgefallener Ausstattungskomponenten ganz oder teilweise zu übernehmen
- risikomindernde Maßnahmen, insbesondere Verkehrsmaßnahmen wie Geschwindigkeitsreduktion

7.2 Methodischer Ansatz

Ziel der Definition minimaler Betriebsbedingungen ist die Verknüpfung eines Schadensszenarios mit den daraus resultierenden verkehrlichen Betriebsszenarien unter Einhaltung des geforderten Sicherheitsniveaus. Bauliche und versperrende Schadensszenarien führen aufgrund des Verlustes der Standsicherheit, der Anforderungen an die Behebung des Schadens bzw. von Hindernissen unmittelbar zu den verkehrlichen Betriebsszenarien. Die minimalen Betriebsbedingungen sind folglich lediglich für die betriebstechnischen Schadensszenarien zu erarbeiten. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 7-4 dargestellt:

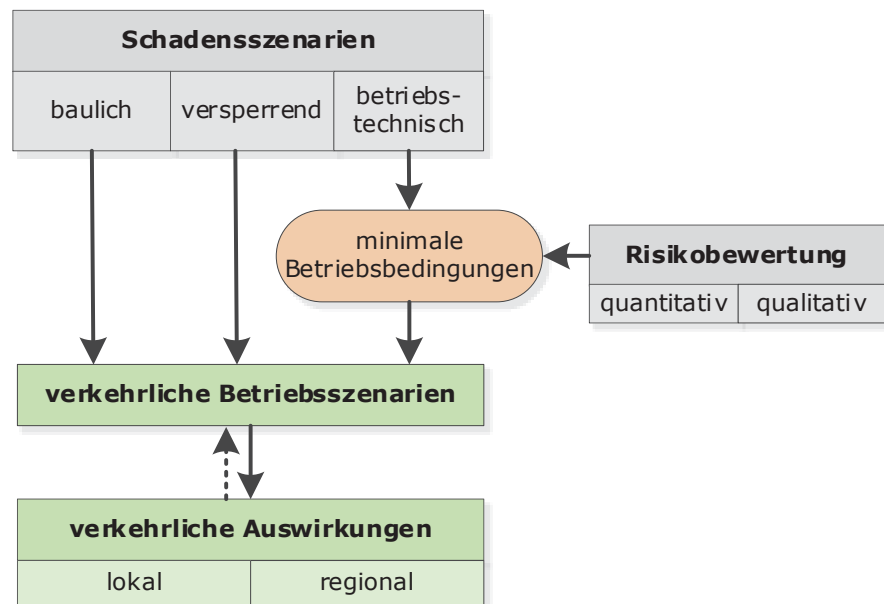


Abbildung 7-4: Verknüpfung der Schadensszenarien mit den verkehrlichen Betriebsszenarien über minimale Betriebsbedingungen

Mithilfe der minimalen Betriebsbedingungen wird demnach definiert, ob und in welcher Form ein Straßentunnel in Folge eines betriebstechnischen Schadensszenarios weiterhin betrieben werden darf, ggf. unter Anwendung risikoreduzierender Maßnahmen.

Auch die minimalen Betriebsbedingungen können im Bow-Tie-Diagramm dargestellt werden. Da sie als die Verknüpfung der betriebstechnischen Schadensszenarien mit den verkehrlichen Betriebsszenarien zu verstehen sind, werden sie folgendermaßen eingeordnet:



Abbildung 7-5: Einordnung der minimalen Betriebsbedingungen im Bow-Tie-Diagramm

Sie können der Phase *recover* des Resilienzkreislaufs zugeordnet werden. Die minimalen Betriebsbedingungen kommen nach dem Eintreten eines Ereignisses zum Tragen und dienen in erster Linie dazu, eine möglichst hohe Verfügbarkeit unter Sicherstellung eines ausreichenden Sicherheitsniveaus zu erhalten bzw. die Dauer bis zur Wiederherstellung der vollen Funktionalität zu reduzieren.

Klassische Verfahren der Risikoanalyse fokussieren auf die im Bow-Tie-Diagramm links angeordneten Phasen *prevent* und *protect*, die Phase *respond* wird in deutschen Straßentunneln vor allem durch die ereignisorientierten Maßnahmen der Alarm- und Gefahrenabwehrpläne (AGAP) abgehandelt. Die minimalen Betriebsbedingungen stellen somit einen integralen Bestandteil der Erweiterung zu einem ganzheitlichen Ansatz im Sinne der Resilienz dar:

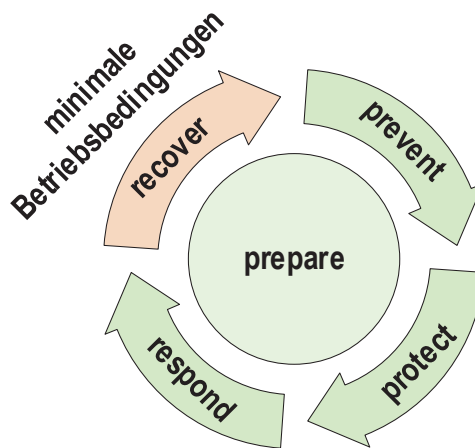


Abbildung 7-6: Vervollständigung des Resilienzkreislaufs durch minimale Betriebsbedingungen

Das Mindestsicherheitsniveau von Straßentunneln in Deutschland wird durch die Angaben der RABT definiert. Einem Referenz-tunnel, der exakt nach allen zutreffenden Vorgaben ausgestattet ist, wird ein dementsprechendes Risiko zugeordnet. Alle Zustände mit einem gleichwertigen oder geringeren Risiko befinden sich im sogenannten **Akzeptanzbereich**, wie Abbildung 7-8 zeigt. Hier liegt ein allgemein akzeptiertes Sicherheitsniveau vor und der Tunnel kann ohne Einschränkungen betrieben werden.

Resultiert nun eine Risikoerhöhung aufgrund eines Schadensszenarios, so bestehen zwei weitere Bereiche. Der **Toleranzbereich** beschreibt den Trade-off zwischen den Anforderungen an die Personensicherheit und die Verfügbarkeit, der Tunnel kann für begrenzte Dauer in diesem Zustand einer leichten Risikoerhöhung betrieben werden. Die minimale Betriebsbedingung entspricht diesem zweiten Schwellwert.

Wesentlich ist dabei die klare Unterscheidung der Begriffe Akzeptanz und Toleranz. Während die Akzeptanz (lat. „accipere“) die Bereitschaft beschreibt, etwas anzunehmen und gutzuheißen, bedeutet tolerieren (lat. „tolerare“) lediglich, dass etwas geduldet bzw. ertragen wird.

Liegt eine noch deutlichere Erhöhung des Risikos vor, wird der **Handlungsbereich** erreicht, ein unmittelbares Eingreifen, um das Risikoniveau rasch und effektiv zu senken, ist hier unerlässlich.

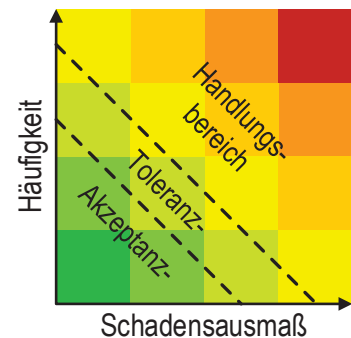


Abbildung 7-7:
Einordnung der Schwellwerte
in der Risikomatrix

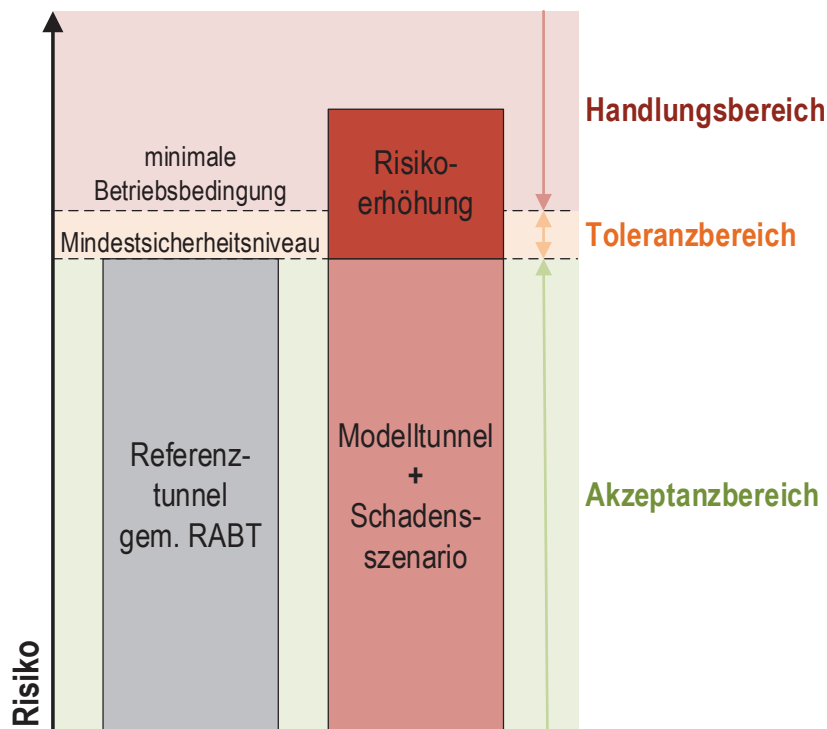


Abbildung 7-8: Schwellwerte des Risikos im Betrieb von Straßentunneln

Die Definition minimaler Betriebsbedingungen erfolgt mithilfe der Bewertung der Schadensszenarien, deren Auswirkungen auf den Betrieb und die Instandhaltung anhand folgendem methodischen Ansatz:

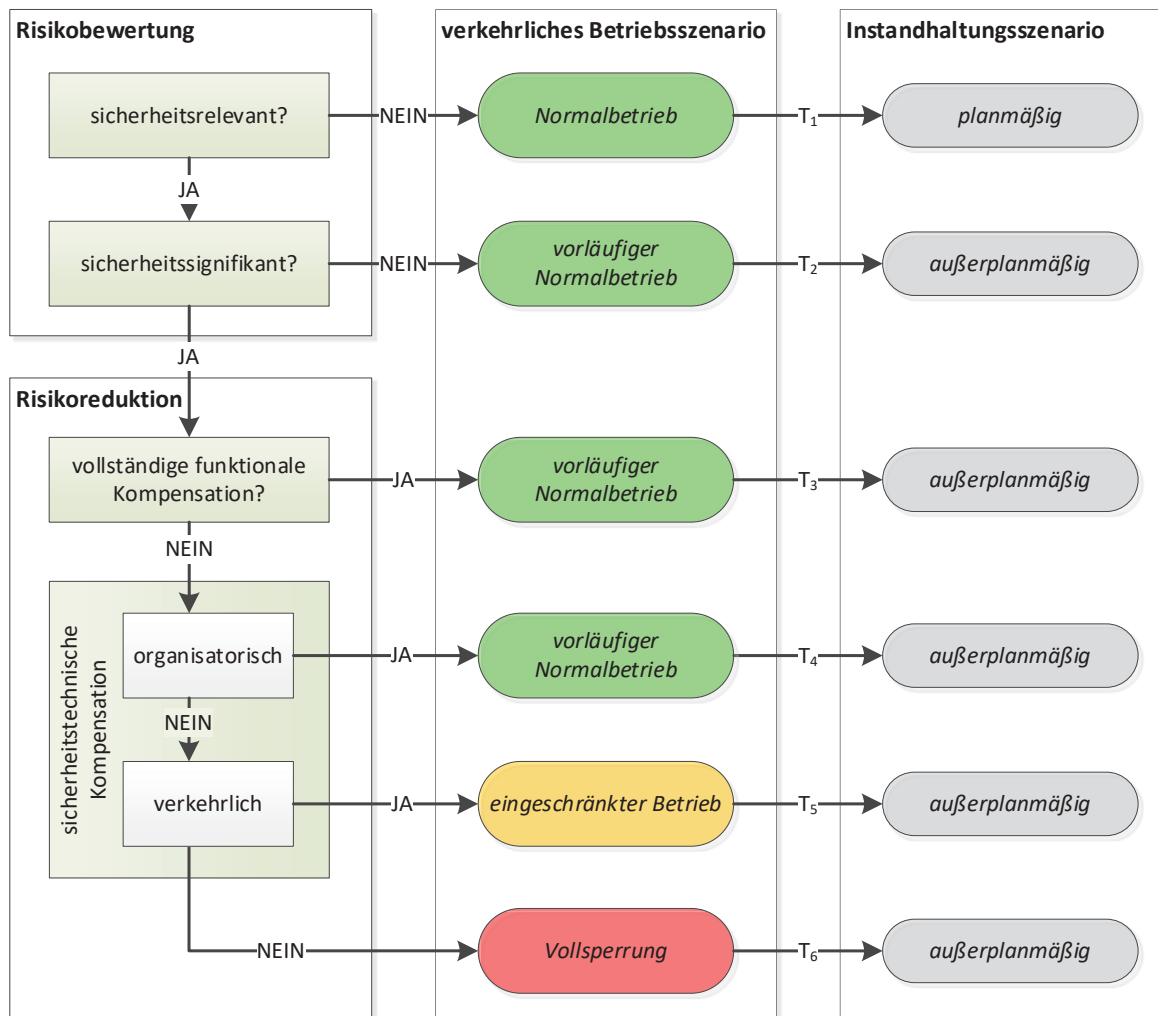


Abbildung 7-9: methodischer Ansatz zur Bewertung von Schadensszenarien

- Zuerst erfolgt die **Risikobewertung** aufgrund eines eingetretenen Schadensszenarios.
- Im nächsten Block der **Risikoreduktion** werden Möglichkeiten der Kompensation des erhöhten Risikos analysiert.
- In Abhängigkeit der Bewertung eines Schadensszenarios und den Möglichkeiten der Kompensation folgen unmittelbar **verkehrliche Betriebsszenarien**, vom (vorläufigen) Normalbetrieb über verschiedene eingeschränkte Szenarien bis hin zur Vollsperrung.
- Diesen sind wiederum **Instandhaltungsszenarien** mit unterschiedlichen Dringlichkeiten bzw. maximalen Dauern bis zu deren Umsetzung zugeordnet.

7.2.1 Risikobewertung

Die Bewertung des Risikos erfolgt in Anlehnung an die Common Safety Methods (CSM) [21] zur Evaluierung und Bewertung von Risiken in zwei Schritten, der Beurteilung der Sicherheitsrelevanz sowie der Sicherheitssignifikanz.

In dieser ersten Einordnung wird davon ausgegangen, dass keine weiteren Komponenten oder Systeme verfügbar sind, um die vom Schadensszenario betroffene Funktion zu übernehmen bzw. zu kompensieren, diese Betrachtung erfolgt im darauffolgenden Schritt im Block der Risikoreduktion unter 7.2.2.

Sicherheitsrelevanz

Sicherheitsrelevant sind alle Schadensszenarien, die durch ihr Auftreten relevante Auswirkungen auf die Sicherheit von Personen verursachen können.

Wird ein Schadensszenario als nicht sicherheitsrelevant bewertet, besteht keine relevante Erhöhung des Risikos und dieses liegt nach wie vor im Akzeptanzbereich. Der Tunnel kann somit ohne Einschränkungen im Normalbetrieb weitergeführt werden. Der Schaden wird im Zuge des nächsten planmäßigen Instandhaltungsszenarios behoben, Intervalle hierfür sind durch die RABT vorgegeben, den Tunnelbetreibern ist jedoch eine frühzeitige Behebung möglich.

Sicherheitssignifikanz

Sicherheitssignifikant sind alle Schadensszenarien, die ein hohes Risikopotential aufweisen, welches aus der Kombination der Wahrscheinlichkeit und Folgeschwere personengefährdender Ereignisse hervorgeht. Die Entscheidung über die Sicherheitssignifikanz hängt folglich von der entstehenden Erhöhung des Risikos ab.

Bei der Einstufung eines Szenarios als sicherheitsrelevant, nicht jedoch –signifikant, liegt das Risiko im Toleranzbereich, der Tunnel kann folglich im vorläufigen Normalbetrieb weitergeführt werden. Die Behebung des Schadens hat aber im Zuge einer außerplanmäßigen Instandsetzung so rasch wie möglich zu erfolgen. In der Praxis ergibt sich die tatsächliche Dauer meist aus den bestehenden Lieferzeiten erforderlicher Ersatzteile. (s. 7.2.4 Instandhaltungsszenario)

Liegt das Risiko aufgrund eines sicherheitssignifikanten Schadensszenarios im Handlungsbereich, ist die Möglichkeit einer Risikoreduktion durch das Setzen von Kompensationsmaßnahmen zu untersuchen bzw. der Tunnel für den Verkehr zu sperren. (gemäß Abbildung 7-9)

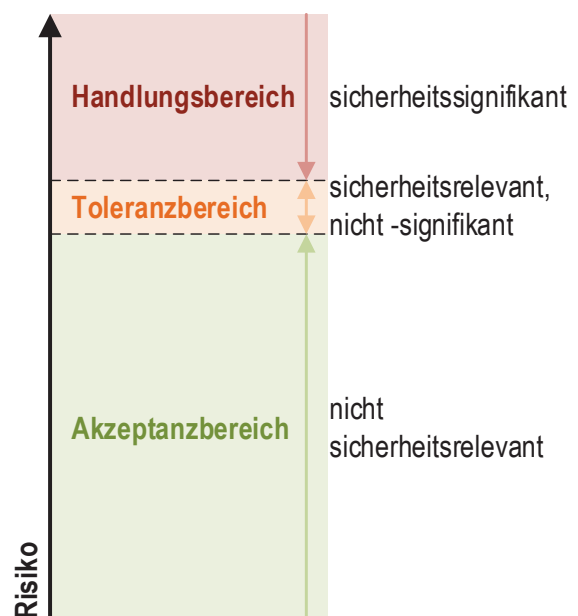


Abbildung 7-10:
Einordnung der Sicherheitsrelevanz und
-signifikanz in der Risikobewertung

7.2.2 Risikoreduktion

Liegt ein sicherheitssignifikantes Schadensszenario vor, wird die Möglichkeit einer Risikoreduktion durch geeignete Kompensationsmaßnahmen untersucht, wobei eine Unterscheidung in funktionale und sicherheitstechnische Kompensation erfolgt. Dies wurde im Rahmen eines Fachworkshops mit einschlägigen Experten diskutiert, die Ergebnisse sind im Anhang A5 dokumentiert.

Funktionale Kompensation

Die Verringerung bzw. der Verlust der Funktionalität der durch das Schadensszenario betroffenen Komponente wird durch eventuell verbleibende Ressourcen bzw. Redundanzen der Komponente selbst oder durch andere Systeme vollständig oder teilweise kompensiert. Demnach kann maximal das ursprüngliche Sicherheitsniveau erreicht werden, eine Verbesserung ist nicht möglich, da im Zuge der funktionalen Kompensation lediglich bereits vorhandene und im Einsatz befindliche Ressourcen betrachtet werden.

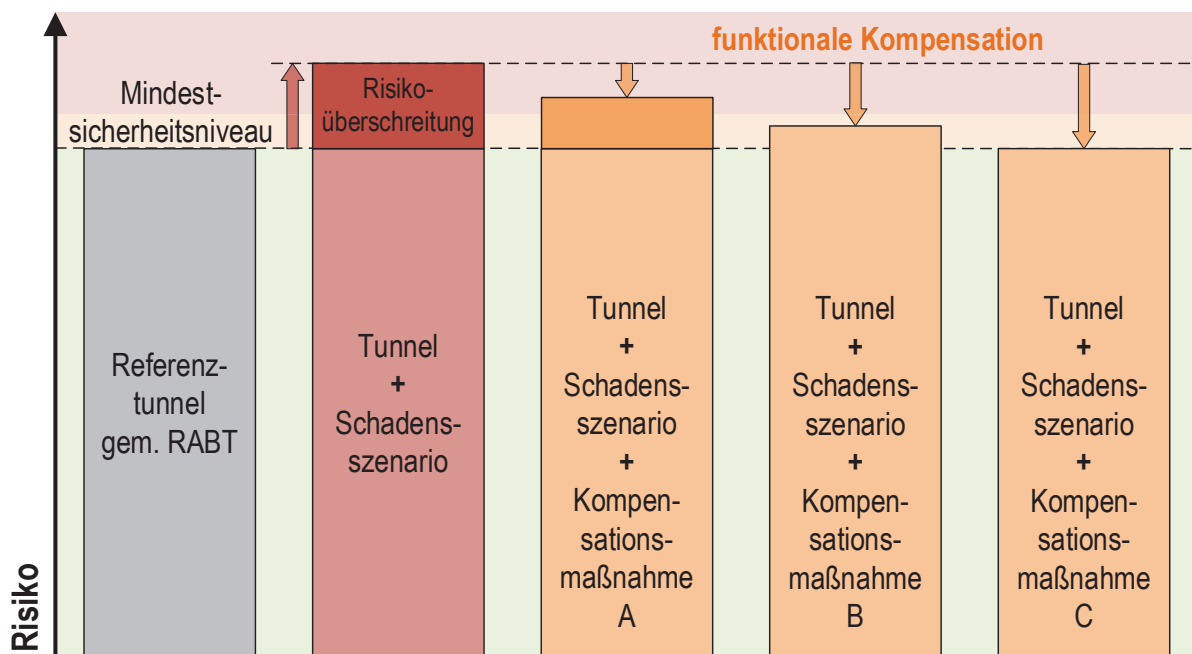


Abbildung 7-11: Risikoreduktion durch funktionale Kompensation

Ist eine vollständige bzw. zumindest bis in den Toleranzbereich reichende funktionale Kompensation erreichbar, kann der Tunnel bis zu einer außerplanmäßigen Instandsetzung im vorläufigen verkehrlichen Normalbetrieb weitergeführt werden. Wenn diese nicht oder nur teilweise umsetzbar ist und das Risiko im Handlungsbereich bleibt, sind (zusätzliche) Maßnahmen zur sicherheitstechnischen Kompensation zu ergreifen, um das Risiko auf ein tolerierbares Niveau zu senken.

So kann beispielsweise ein Ausfall der ohnehin nur selten benutzten manuellen Brandmeldeeinrichtungen (Handfeuermelder) durch die automatischen (linienhaftes Wärmemeldesystem) vollständig funktional kompensiert werden. Umgekehrt hingegen ist dies nicht möglich, in diesem Fall sind zusätzliche sicherheitstechnische Kompensationsmaßnahmen erforderlich.

Sind Schäden oder Störungen auch an anderen Komponenten vorhanden und daher nicht bzw. nicht vollständig funktionsfähig, können diese nicht zur funktionalen Kompensation herangezogen werden, eine ausreichende Risikoreduktion ist somit unter Umständen nicht mehr erreichbar.

Sicherheitstechnische Kompensation

Kann keine ausreichende funktionale Kompensation erfolgen, wird die Erhöhung des Risikos aufgrund eines eingetretenen Schadensszenarios durch (zusätzliche) organisatorische und/oder verkehrliche Maßnahmen sicherheitstechnisch kompensiert.

Diese Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen werden entweder in Ergänzung zu einer nicht ausreichenden oder eigenständig bei einer nicht möglichen funktionalen Kompensation eingesetzt. Dies ist in Abbildung 7-12 dargestellt, Maßnahme D kommt zusätzlich zur unvollständigen funktionalen Kompensation A zum Einsatz, während die sicherheitstechnische Kompensationsmaßnahme E alleine wirkt.

Dabei können auch, im Gegensatz zur funktionalen Kompensation, andere als die vom Schadensszenario beeinflussten Risikoanteile reduziert sowie das ursprüngliche Risikoniveau unterschritten werden, in Abhängigkeit der Wirksamkeit der gesetzten Maßnahmen.

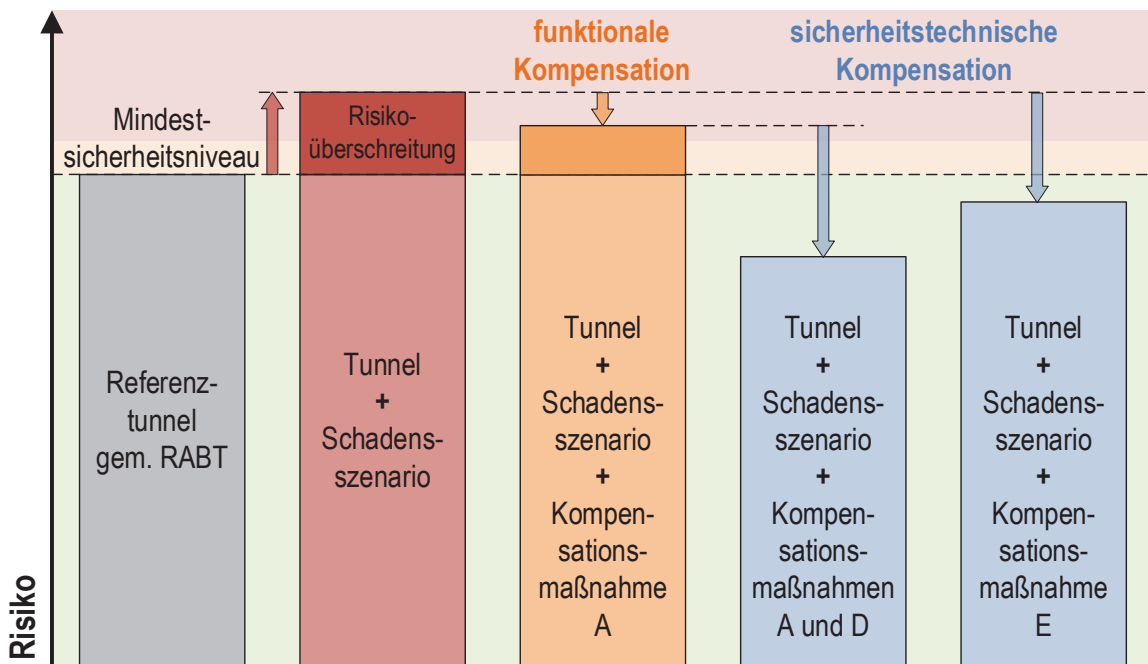


Abbildung 7-12: Risikoreduktion durch funktionale und sicherheitstechnische Kompensation

Tabelle 7-2 zeigt Möglichkeiten der sicherheitstechnischen Kompensation auf, entsprechend dem Ablaufdiagramm gegliedert in organisatorische und verkehrliche Maßnahmen. Zur Bewertung der Wirkung dieser auf das Risikoniveau werden in Anlehnung an die Methodik der qualitativen Risikobewertung (s. Kapitel 7.3) ebenfalls Einflüsse auf die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß, jeweils von Unfällen (mechanische Wirkung) und Bränden, betrachtet.

sicherheitstechnische Kompensation		Einfluss auf Häufigkeit		Einfluss auf Schadensausmaß	
Kategorie	Maßnahme	Unfall	Brand	Unfall	Brand
verkehrlich	Geschwindigkeitsreduktion	x		x	
	Geschwindigkeitskontrolle	x		x	
	LKW-Fahrverbot	x			x
	Fahrverbot für Gefahrguttransporte				x
	PKW-Fahrverbot	x			x
organisatorisch	Feuerwehrebereitschaft				x
	laufende Kontrollfahrten				x

Tabelle 7-2: Einfluss sicherheitstechnischer Kompensationsmaßnahmen

o Geschwindigkeitsreduktion

Mithilfe der Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit wird sowohl eine Verringerung der Unfallhäufigkeit, als auch des mechanischen Schadensausmaßes aufgrund der geringeren kinetischen Energie erreicht.



o Geschwindigkeitskontrolle

Eine konsequente abschnittsbezogene Geschwindigkeitskontrolle („Section Control“) führt nicht nur zu einer Verringerung der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten, sondern auch zu einer Harmonisierung des Fahrverhaltens (gleichmäßigere Geschwindigkeiten und weniger Fahrstreifenwechsel). Dadurch nimmt zum einen die Unfallhäufigkeit ab, zum anderen werden die mechanischen Schadenswirkungen vermindert. Nach [19] kann in RV-Tunneln von einer Reduktion der mittleren realen Geschwindigkeit von 8 km/h bei PKW bzw. 3 km/h bei LKW ausgegangen werden.

o LKW-Fahrverbot

Durch das Vermeiden großer Brandlasten von 30 bis zu 100 MW kann mithilfe dieser Maßnahme das Schadensausmaß von Bränden erheblich verringert werden.



o Fahrverbot für Gefahrguttransporte

Um das Schadensausmaß durch die Vermeidung außerordentlich hoher Brandlasten (100 MW und größer) zu reduzieren, ohne den Tunnel für den gesamten LKW-Verkehr zu sperren, kann ein Fahrverbot für Gefahrguttransporte zum Einsatz kommen.



o PKW-Fahrverbot

Im Hinblick auf strategisch besonders wichtige Verkehrsrouten für die Industrie und dementsprechend möglichen Druck zur Aufrechterhaltung der Verfügbarkeit für den LKW-Verkehr besteht die bislang lediglich theoretische Möglichkeit eines Fahrverbotes ausschließlich für PKW. Aufgrund der dadurch deutlich reduzierten Anzahl im Tunnel befindlicher Personen im Brandfall wird das Schadensausmaß reduziert. Zudem kann eine geringere Unfallrate erreicht werden, einerseits durch die stark herabgesetzte Anzahl an Fahrzeugen und daraus



resultierend verringerten Interaktionen im Verkehrsablauf, andererseits, weil mit den LKW-Lenkern nur noch ausgebildete Berufskraftfahrer den Tunnel durchfahren.

○ Feuerwehrebereitschaft

Durch die Bereitstellung einer ständig einsatzbereiten Feuerwehreinsatztruppe im unmittelbaren Umfeld des Tunnels, einer sogenannten „Portalfeuerwehr“, kann im Brandfall äußerst rasch eingegriffen werden (Anfahrtsdauer von maximal fünf Minuten). Somit kann das Schadensausmaß Brand durch effiziente Brandbekämpfung und Fremdrettung reduziert werden.

Darüber hinaus können positive Auswirkungen hinsichtlich der Personenrettung sowohl im Brandfall, als auch bei mechanischen Unfällen erzielt werden.

○ laufende Kontrollfahrten

Der Streckendienst kann sich mittels Kontrollfahrten laufend ein Bild von der aktuellen Situation vor Ort machen, dies ist insbesondere im Fall einer nicht funktionsfähigen Videoüberwachung von hoher Relevanz. So kann ein Ereignis schneller erkannt und beurteilt werden, um dementsprechend zu reagieren.

Organisatorische Maßnahmen zur sicherheitstechnischen Kompensation haben keinen unmittelbaren Einfluss auf den Verkehr, hier kann der Tunnel im vorläufigen Normalbetrieb weitergeführt werden. Sind diese nicht oder nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand zu realisieren, können verkehrliche Maßnahmen ergriffen werden. Diese zeigen Auswirkungen auf den Verkehrsfluss und haben folglich einen eingeschränkten Betrieb zur Folge. Daher ist der Möglichkeit einer sicherheitstechnischen Kompensation mittels organisatorischer Maßnahmen in der Regel der Vorzug zu geben.

Mit den zur Zeit gemäß den RABT zur Verfügung stehenden Komponenten der betriebstechnischen Ausstattung kann kein unmittelbarer Einfluss auf die Häufigkeit von Bränden genommen werden.

Technische Maßnahmen, welche Ausstattungselemente über die allgemeinen Forderungen der RABT hinausgehend erfordern, wie beispielsweise Thermoscanner, Videodetektion oder automatische Brandbekämpfungsanlagen, können ebenso dazu beitragen, die Häufigkeit oder das Schadensausmaß von Unfällen und Bränden zu reduzieren. Da diese in der Regel, wie auch in den betrachteten Modelltunneln, nicht zur Verfügung stehen, werden sie nicht in die Überlegungen möglicher Kompensationsmaßnahmen mitaufgenommen. Im Hinblick auf mögliche Resilienzmaßnahmen werden diese jedoch wieder aufgegriffen. (s. Kapitel 9)

7.2.3 Verkehrliches Betriebsszenario

In Abhängigkeit der Bewertung der Schadensszenarien ziehen diese gemäß dem in Abbildung 7-9 dargestellten Ablauf verschiedene verkehrliche Betriebsszenarien nach sich:

- **Normalbetrieb**
Im Falle nicht sicherheitsrelevanter Schadensszenarien können Tunnel im Normalbetrieb weitergeführt werden, im Vergleich zum ursprünglichen Zustand werden weder betriebliche noch verkehrliche Änderungen vorgenommen.
- **vorläufiger Normalbetrieb**
Auch hier kann der Tunnelbetrieb ohne unmittelbare verkehrliche Anpassungen fortgeführt werden, im Gegensatz zum Normalbetrieb muss die Behebung des Schadens jedoch zu einem früheren Zeitpunkt erfolgen. (s. 7.2.4)
- **eingeschränkter Betrieb**
Eine Einschränkung des Verkehrs aufgrund sicherheitstechnischer Aspekte erfolgt nur, wenn mittels funktionaler Kompensation und/oder organisatorischer Maßnahmen keine ausreichende Risikoreduktion erfolgen kann bzw. diese mit unverhältnismäßig hohen Kosten verbunden sind. Dabei kommen vor allem Geschwindigkeitsreduktionen und Beschränkungen bestimmter Fahrzeugarten (z.B. LKW, Gefahrguttransporte) zum Einsatz.
- **Vollsperrung**
Ist keine bzw. nur unzureichende Risikoreduktion durch funktionale und sicherheitstechnische Kompensationsmaßnahmen möglich, muss der Tunnel für den Verkehr gesperrt werden.

7.2.4 Instandhaltungsszenario

Im methodischen Ansatz zur Risikobewertung von Schadensszenarien gemäß Abbildung 7-9 werden planmäßige und außerplanmäßige Instandhaltungsszenarien unterschieden.

Planmäßige Instandhaltungsszenarien beschreiben regelmäßig durchgeführte Arbeiten an einem Tunnel mit in den Regelwerken wie den RABT vorgeschriebenen maximalen Intervallen. Diese können bis zu sechs Monate betragen, je nach dem Zeitpunkt des Auftretens eines Schadens kann die Dauer T_1 jedoch auch deutlich kürzer ausfallen.

Tritt ein sicherheitsrelevantes Schadensszenario auf, ist eine außerplanmäßige Instandsetzung erforderlich, die in Abbildung 7-9 zugeordneten Dauern T_2 bis T_6 sind dementsprechend kürzer als T_1 .

Während die Dauern T_2 bis T_4 eines vorläufigen Normalbetriebs im Hinblick auf die Personensicherheit grundsätzlich möglichst kurz gehalten werden, stellt im Falle eines eingeschränkten Betriebes sowie einer Vollsperrung zusätzlich die Verfügbarkeit einen maßgebenden Faktor dar, um die zum Teil erheblichen verkehrlichen Auswirkungen gering zu halten. Darüber hinaus ergibt sich in der Praxis die tatsächlich benötigte Dauer häufig aus den bestehenden Lieferzeiten erforderlicher Ersatzteile.

7.3 Qualitative Risikobewertung

Im Zuge der Durchführung eines internationalen Fachworkshops wurde die qualitative Bewertung anhand der hier beschriebenen Methodik unter Miteinbeziehung der Erfahrung einschlägiger Experten durchgeführt. Darüber hinaus wurden die Erkenntnisse aus den Betreiberinterviews an dieser Stelle diskutiert und berücksichtigt. Ziel der qualitativen Bewertung ist die Beurteilung der Sicherheitssignifikanz betriebstechnischer Schadensszenarien. Gemäß dem in Abbildung 7-9 dargestellten Ablauf werden dafür lediglich die bereits als sicherheitsrelevant eingestuften Schadensszenarien qualitativ bewertet. Dabei flossen im Rahmen des Workshops folgende Parameter als unterstützende Größen und Hilfestellung zur Entscheidungsfindung mit ein:

- Priorität
- Erhöhung des Risikos
 - Einflussfaktoren
 - Exposition
- Risikoaversion

Eine vollständige Darstellung der Ergebnisse des Fachworkshops zur qualitativen Risikobewertung ist im Anhang A4 zu finden.

7.3.1 Priorität

Die Auswirkungen einzelner Schadensszenarien kommen zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu tragen. In Abhängigkeit der Sicherheitsfunktionen, die eine betriebstechnische Komponente erfüllt, kann beurteilt werden, wann ein Schaden zu einer Reduktion des Sicherheitsniveaus beiträgt. Dabei werden die in Tabelle 7-3 beschriebenen Prioritäten unterschieden und der jeweiligen Komponente zugeordnet.

Priorität	relevant bei	Frequenz
1	fließendem Verkehr	immer
2	stockendem/stehendem Verkehr	oft
3	Panne	wahrscheinlich
4	Unfall	gelegentlich
5	Brand	selten
6	Gefahrgutaustritt	kaum

Tabelle 7-3: Prioritäten von Schadensszenarien

Mithilfe der jeweiligen Priorität eines Schadensszenarios kann somit eine qualitative Beschreibung der Frequenz, mit der ein Einfluss auf die Personensicherheit vorliegt, erfolgen. Der Ausfall der Beleuchtung beispielsweise hat unmittelbare Auswirkungen auf den Tunnelnutzer (Priorität 1), während eine nicht funktionsfähige Löschwasserversorgung erst im Brandfall von Relevanz ist (Priorität 5). Diese Einordnung alleine lässt jedoch noch keine Aussage zur Dringlichkeit der Schadensbehebung zu, dafür ist die Berücksichtigung der weiteren Parameter unerlässlich.

7.3.2 Erhöhung des Risikos

Das Risiko in Straßentunneln setzt sich aus verschiedenen Anteilen zusammen, welche im Zuge der Bewertung von Schadensszenarien betrachtet werden müssen. Den größten Beitrag leisten dabei das mechanische Risiko infolge von Verkehrsunfällen sowie das Brandrisiko. Andere Einflüsse, wie jener von Gefahrgutunfällen, sind deutlich geringer [22] und werden im Rahmen der qualitativen Risikobewertung vernachlässigt.

Über die Ermittlung des Produkts aus Häufigkeit und Schadensausmaß je Risikoanteil ist das Personenrisiko im Tunnel wie folgt definiert:

$$R_{ges} = H_{mech} * A_{mech} + H_{Brand} * A_{Brand}$$

R..... Risiko

H..... Häufigkeit

A..... Schadensausmaß

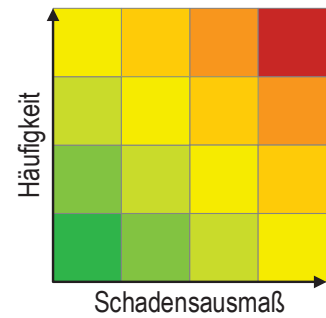


Abbildung 7-13: vereinfachte Risikomatrix zur qualitativen Risikobewertung

Wie Abbildung 7-14 zeigt, kann eine Erhöhung des Risikos sowohl aus einem Anstieg des mechanischen, als auch des Brandrisikos resultieren, jedoch besteht nicht bei jedem Schadensszenario ein Einfluss auf beide Anteile.

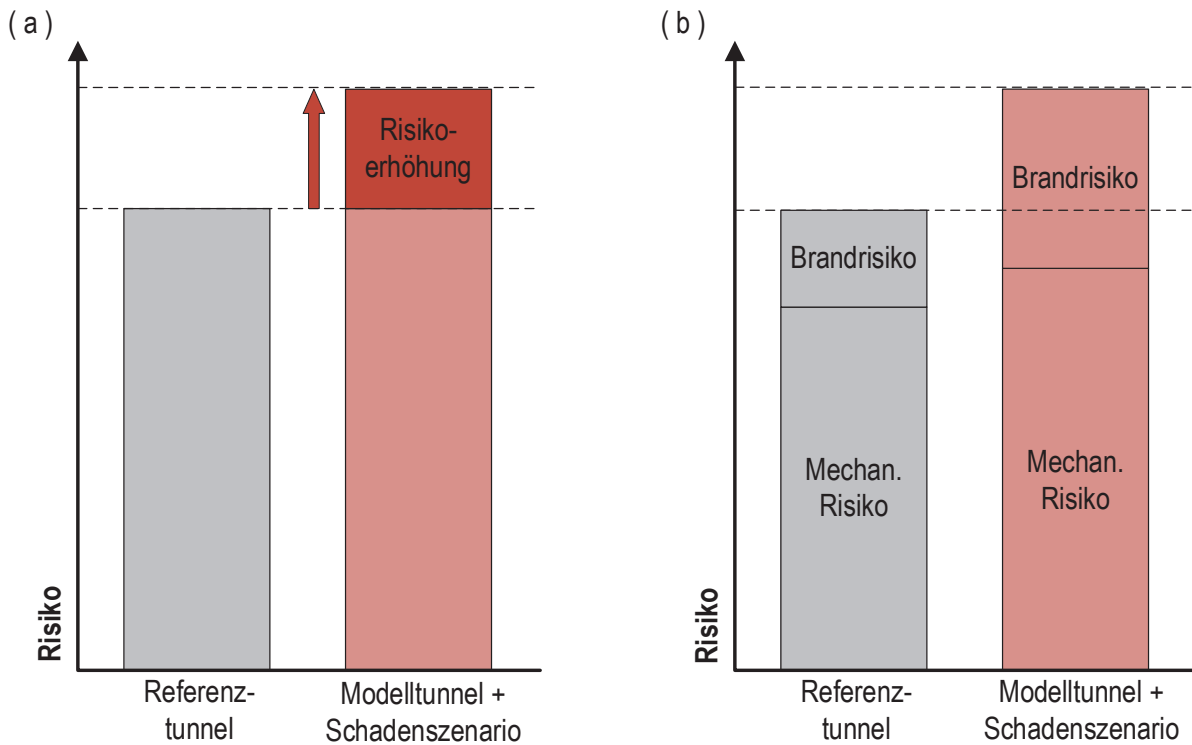


Abbildung 7-14: Risikoerhöhung durch Schadensszenarien (a), Anteile des Risikos (b)

Zur Bewertung eines Schadensszenarios werden die Einflüsse auf die Häufigkeit von Unfällen und Bränden sowie auf das mechanische Schadensausmaß und jenes von Bränden als Parameter herangezogen, wie in Tabelle 7-4 für drei exemplarische betriebstechnische Ausstattungskomponenten dargestellt ist:

Komponente des Schadensszenarios	Einfluss auf Häufigkeit		Einfluss auf Schadensausmaß	
	Unfall	Brand	Unfall	Brand
Löschwasserversorgung				x
Innenstreckenbeleuchtung	x			x
Wechselverkehrszeichen	x		x	

Tabelle 7-4: Einfluss beispielhafter Schadensszenarien auf das Risiko

- Löschwasserversorgung
Der Ausfall verhindert eine effiziente Brandbekämpfung durch die Einsatzkräfte im Zuge der Fremdrettung, wodurch das Schadensausmaß von Bränden erhöht ist.
- Innenstreckenbeleuchtung
Ist diese nicht bzw. nur teilweise funktionsfähig, steigt aufgrund schlechterer Sichtverhältnisse die Unfallhäufigkeit sowie durch eine erschwerte Orientierung der Tunnelnutzer und Einsatzkräfte das Schadensausmaß im Brandfall.
- Wechselverkehrszeichen
Die dynamische Anpassung zulässiger Höchstgeschwindigkeiten oder eine Gefahrenwarnung sind bei einem Ausfall der WVZ nicht mehr durchführbar, damit steigt sowohl die Unfallhäufigkeit, als auch das mechanische Schadensausmaß.

Einflussfaktoren

Tabelle 7-5 zeigt Faktoren, welche einen der in Tabelle 7-4 beschriebenen Einflüsse auf das Risiko haben und durch verschiedene Schadensszenarien zur Wirkung kommen können. Die Intensität des Einflusses wird jeweils mit niedrig, mittel bzw. hoch qualitativ bewertet, in Abhängigkeit der sicherheitstechnischen Funktion, aus denen sich die Faktoren jeweils ableiten.

Erhöhung von		Faktor	Beschreibung	Einfluss
Häufigkeit	Unfall	Sichtverhältnisse	verschlechterte Sichtverhältnisse im Verkehrsraum oder in den Rettungswegen	niedrig
		Geschwindigkeit regulieren	Notwendigkeit einer Anpassung der Geschwindigkeit wird nicht erkannt bzw. eine Regulierung der Geschwindigkeit kann nicht durchgeführt werden.	hoch
		Warnen	Notwendigkeit einer Warnung der Tunnelnutzer wird nicht erkannt bzw. kann nicht gewarnt werden.	hoch
	Brand	-	-	-
Schadensausmaß	mechanisch	Ereignisdetektion	Unfalldetektion ist beeinträchtigt	niedrig
		Geschwindigkeit regulieren	Notwendigkeit einer Anpassung der Geschwindigkeit wird nicht erkannt bzw. eine Regulierung der Geschwindigkeit kann nicht durchgeführt werden.	hoch
	Brand	Ereignisdetektion	Branddetektion ist beeinträchtigt	hoch
		Bedrohung reduzieren	Abführen von Rauch und Brandbekämpfung sind beeinträchtigt	hoch
		Evakuierungsreaktion	verspätete Evakuierungsreaktion der Tunnelnutzer aufgrund ausbleibender Anweisungen	hoch
		Evakuierungsweg	verlängerter Evakuierungsweg aufgrund nicht nutzbarer Rettungswege oder mangelnder Markierung des nächstliegenden Notausgangs	mittel
		Evakuierungsgeschwindigkeit	langsamere Evakuierungsgeschwindigkeit aufgrund schlechter Orientierung oder schlechter Luftverhältnisse	mittel
		Zugänglichkeit	Zugänglichkeit des Tunnel für Einsatzkräfte durch nicht nutzbare Rettungswege beeinträchtigt	mittel
		Koordination der Einsatzkräfte	Möglichkeit zur Koordination des Noteinsatzes beeinträchtigt	niedrig
		Tunnel sperren	keine Tunnelsperrung möglich	hoch
		Gefahrgutbeteiligung	Abführen von flüssigem oder gasförmigem Gefahrgut beeinträchtigt	niedrig

Tabelle 7-5: Einflussfaktoren der qualitativen Risikobewertung

Der mit einem Anteil von rund 90 % deutlich überwiegende Anteil der Fahrzeugbrände resultiert nicht aus Unfällen, sondern aus Pannen [22]. Auf die Pannensrate kann im Gegensatz zur Unfallrate aber kaum Einfluss genommen werden, daher wird die Häufigkeit von Bränden nur in geringem Ausmaß durch eintretende Schadensszenarien beeinflusst, bzw. kann diese kaum bewertet werden.

Exposition

Ist eine betriebstechnische Komponente von einem Teilausfall betroffen, kommt die risikoerhöhende Wirkung nur im jeweiligen Abschnitt zum Tragen. Die Auswirkungen eines solchen Schadensszenarios auf die Personensicherheit im gesamten Tunnel fallen tendenziell geringer aus, da nur Personen, die sich zu jenem Zeitpunkt im betroffenen Abschnitt aufhalten, exponiert sind.

Bereits bei der Definition der Schadensszenarien wurde eine Segmentierung des Modelltunnels in Abschnitte vorgenommen, die entsprechende Länge der Teilausfälle ist in der Regel über den Systemaufbau definiert.

Die Exposition wird dabei normiert auf einer Länge eines Tunnelabschnitts von 1000 m betrachtet. So resultiert zum Beispiel der Ausfall einer Notrufnische, welche gemäß den RABT im Abstand von 150 m angeordnet ist, in einer Exposition von 0,15 (siehe Abbildung 7-15). Mithilfe dieses Wertes erfolgt eine qualitative Unterscheidung der Auswirkungen des Teilausfalls im Gegensatz zum Totalausfall.

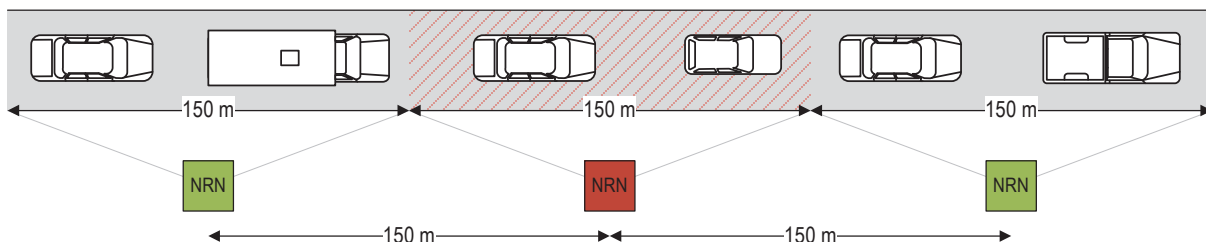


Abbildung 7-15: Exposition bei Ausfall einer Notrufnische (NRN)

Dies ist jedoch nicht für alle Komponenten der betriebstechnischen Ausstattung möglich. So werden in den RABT Anforderungen beispielsweise an die Leuchtdichte der Beleuchtung, die Sprachverständlichkeit der Lautsprecher oder den Entnahmedruck an Löschwasserstellen angeführt. Hier kann die Definition eines Teilausfalls als Leistungsabfall in einem Abschnitt bzw. dem ganzen Tunnel erfolgen.

7.3.3 Risikoaversion / subjektiver Einfluss

Im Zusammenhang mit Ereignissen hohen Schadensausmaßes, wie zum Beispiel bei Großbränden, kommt es neben Personenschäden und beträchtlichen gesamtwirtschaftlichen Kosten oftmals auch zu Reputationsverlusten, starker öffentlicher Wirkung und politischem Druck. Daher wird das von diesen Ereignissen ausgehende Risiko im Vergleich zu deutlich häufiger auftretenden mit geringerem Schadensausmaß wie Unfällen in der subjektiven Wahrnehmung überproportional großer Stellenwert zugeordnet. Neben der reinen Sicherheitsbetrachtung können aber solche Aspekte durchaus auch Berücksichtigung finden und zum Teil in die Entscheidungsfindung miteinbezogen werden, nicht zuletzt um die Akzeptanz in der Gesellschaft sicherzustellen bzw. weiter zu erhöhen. Hier bestätigen auch die durchgeführten Gespräche mit Betreibern von Straßentunneln diese Ansicht, vor allem der Möglichkeit einer effektiven Branddetektion und -bekämpfung wird durchwegs eine ausgesprochen hohe Priorität zugeschrieben.

7.4 Quantitative Risikobewertung

7.4.1 Beschreibung des Risikomodells

Für ausgewählte Schadensszenarien ist eine quantitative Risikobewertung durchführbar, dabei kommt das systembasierte Tunnel-Risikoanalysemodell **TuRiSMo** nach RVS 09.03.11 [23] zum Einsatz. Dieses dient als Werkzeug, um ein anforderungsgerechtes Niveau an Sicherheit für die Tunnelnutzer zu gewährleisten. Untersucht wird das kollektive Personenrisiko der Nutzer, Ergebnis sind die statistisch zu erwartenden Todesopfer pro Jahr und Tunnelbauwerk. Das Risiko wird getrennt in den drei Anteilen mechanische Schadensauswirkungen, Brandwirkungen und Gefahrgutwirkungen dargestellt. Der Risikoerwartungswert resultiert aus den Daten der Häufigkeitsanalyse sowie der Schadensausmaßanalyse - die beiden Kernelemente der Methodik:

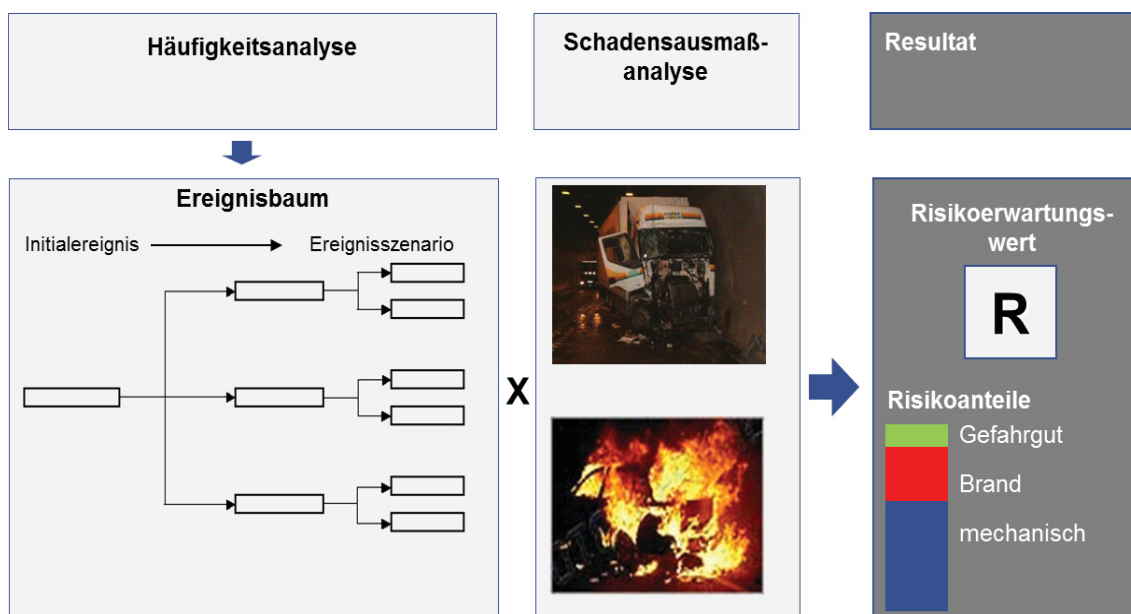


Abbildung 7-16: Basisstruktur des Tunnel-Risikoanalysemodells [23]

In der **Häufigkeitsanalyse** werden anhand eines Ereignisbaumes mögliche Wege von einem Initialereignis mit bekannter Häufigkeit zu verschiedenen Ereignisszenarien entwickelt. Die Auswertung einer österreichischen Tunnelunfalldatenbank der Jahre 1999-2012 [22] bildet hier die Datengrundlage für Pannen- und Unfallraten bzw. relative Häufigkeiten. Somit kann auf umfangreiche und statistisch aussagekräftige Werte zugegriffen werden. Durch Anpassung der relativen Häufigkeiten in den Verzweigungen können Einflussfaktoren, wie zusätzliche risikoreduzierende Maßnahmen, auf die Eintrittswahrscheinlichkeit einzelner Schadensszenarien berücksichtigt werden.

Zur Beschreibung des Ereignisbaumes kommen folgende Eingabeparameter zur Anwendung:

- | | |
|--|--|
| - Verkehrszustand
(fließender Verkehr / Stau) | - Fahrzeugbeteiligung
(PKW / LKW / Bus) |
| - Pannen und Unfälle | - Folgebrand nach Panne oder Unfall |
| - Unfalltyp | - Gefahrgutbeteiligung |
| 0: Alleinunfall | - Personengefährdung bei Brand infolge Panne |
| 1: Unfall im Richtungsverkehr | - Brandgröße |
| 2: Unfall im Begegnungsverkehr | |

Die Quantifizierung des mittleren Schadensausmaßes eines jeden Schadensszenarios erfolgt mithilfe der **Schadensausmaßanalyse**. Die Betrachtung erfolgt in den drei grundlegenden Gruppen der Risikoanteile:

- mechanische Schadenswirkungen von Verkehrsunfällen
Die dafür erforderlichen statistisch aussagekräftigen Daten von Tunnelunfällen mit Personenschaden beruhen auf Auswertungen des Unfallgeschehens auf dem österreichischen Autobahn- und Schnellstraßennetz. Angegeben werden dabei die statistisch erwartbaren Personenschäden pro Ereignis in Abhängigkeit vom Unfalltyp, der Fahrzeugbeteiligung und der Art der Verkehrsführung im Tunnel.
- Schadensauswirkungen von Unfällen mit Beteiligung von Gefahrgut
In Abhängigkeit des transportierten Gutes und eintretenden Szenarios können unterschiedliche Gefährdungen entstehen, z.B. Brände, Explosionen oder Giftwirkungen. Diese werden differenziert nach Bränden mit Gefahrgutbeteiligung und sonstigen Gefahrgutwirkungen in generalisierter und vereinfachter Form berücksichtigt.
- Schadensauswirkungen von Bränden
Brände können sowohl in Folge eines Unfalls, als auch einer Panne entstehen. Der Berechnungsansatz zur Bestimmung der Schadensauswirkungen beinhaltet zwei grundlegende Module, ein Strömungsmodell zur Abbildung der Rauchausbreitung sowie eine Evakuierungssimulation.
Die Simulation der Rauchausbreitung erfolgt mithilfe einer instationären Analyse der Strömungsverhältnisse, wobei ein- und dreidimensionale Modelle kombiniert werden. Somit können globale (1D), wie auch lokale (3D) Effekte der Rauchausbreitung abgebildet werden. Parameter, die einen entscheidenden Einfluss nehmen, sind beispielsweise der Querschnitt, die Längsneigung, etwaige Hindernisse im Tunnel, der ursprüngliche Verkehrsfluss, das Lüftungssystem sowie die Brandgröße und der Brandort. Im Zuge dieser Analyse werden Schadstoffe, welche unmittelbar gesundheitliche Auswirkungen nach sich ziehen, und Ruß, der die Sichtverhältnisse negativ beeinflusst, berücksichtigt. Das Teilergebnis dieses ersten Moduls bilden die zeitabhängigen Temperaturverteilungen und Schadstoffkonzentrationen.
Diese stellen in weiterer Folge die Grundlage der Evakuierungssimulation dar. Dabei wird in einem eindimensionalen Modell die Anzahl der Todesopfer nach der Theorie der Akkumulation toxischer Gase (CO, CO₂, HCN) ermittelt. Zusätzlich fließen auch Effekte des Sauerstoffmangels und der Wärme aus Strahlung bzw. Konvektion ein. Diese zeit- und ortsabhängigen Parameter haben allesamt Einfluss auf die Fluchtgeschwindigkeit der Tunnelnutzer im Zuge der Selbstrettung, wobei sechs Personengruppen (zwei Geschlechter, drei Altersbereiche) mit jeweils drei verschiedenen initialen Gehgeschwindigkeiten differenziert werden.

Die untersuchten Brandszenarien entstehen unter anderem durch Variation folgender grundlegender Parameter :

- Brandleistung: 5 MW für PKW-Brände
30 bzw. 100 MW für LKW-Brände
- Situierung des Brandortes:
Primärereignis:
Brand am vorderen Ende einer zum Stillstand kommenden Fahrzeugkolonne



- Sekundärereignis:
Brand am hinteren Ende einer zum Stillstand kommenden Fahrzeugkolonne



- Tertiärereignis:
Brand in einer stehenden Fahrzeugkolonne



Abbildung 7-17: Brandszenarien: Variation der Situierung des Brandortes [13]

7.4.2 Quantitativ untersuchte Schadensszenarien

Die hier gezeigten Schadensszenarien der beiden Gruppen „Notausgang“ und „Lüftung“ werden quantitativ bewertet, wobei die grundsätzlich gleiche Herangehensweise wie im Zuge der qualitativen Risikobewertung zum Einsatz kommt. Nach der initialen qualitativen Bewertung der Sicherheitsrelevanz wird mithilfe des oben vorgestellten Risikomodells die Sicherheitssignifikanz quantitativ bewertet.

Notausgang

Die Schadensszenarien der Ausfälle von Notausgängen wurden im Zuge des Fachworkshops bereits mit Methoden der qualitativen Risikobewertung untersucht (s. Kapitel 7.3). Um die hier erzielten Ergebnisse zu überprüfen bzw. zu untermauern, werden weitere quantitative Analysen durchgeführt. Dafür werden die längsten Modelltunnel mit einer Länge von 1200 m, jeweils für Richtungs- und Gegenverkehrstunnel, herangezogen. Gemäß den Angaben der RABT verfügen diese folglich über drei gleichmäßig angeordnete Notausgänge im Abstand von 300 m, wie Abbildung 7-18 zeigt:

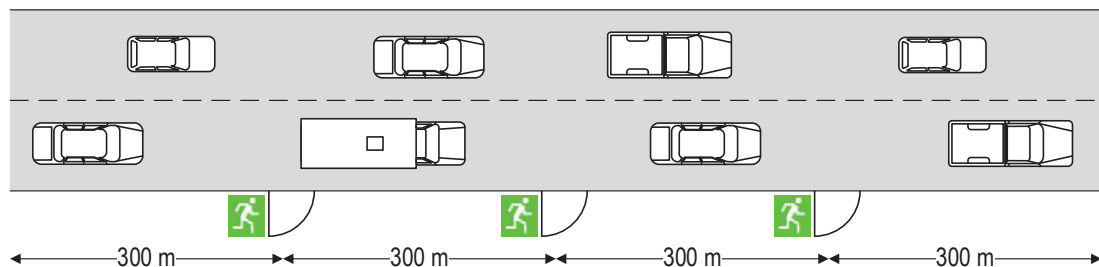


Abbildung 7-18: Anordnung der Notausgänge gemäß RABT an einem 1200 m langen Richtungsverkehrstunnel

Zuerst erfolgt die Untersuchung des Normalzustandes mit allen drei Notausgängen, die den Tunnelnutzern zur Verfügung stehen. So wird anhand des Referenztunnels das Sicherheitsniveau gemäß RABT definiert, welches als Vergleichsbasis für die Bewertung des Risikos aufgrund ausgefallener Notausgänge bzw. zusätzlich implementierter Maßnahmen dient.

Folgende Schadensszenarien werden dabei untersucht:

- Normalzustand (Referenz)
- Einzelausfall (jeweils vom ersten, zweiten bzw. dritten Notausgang)
- Ausfall zweier Notausgänge (1+2 / 1+3 / 2+3)
- Ausfall aller drei Notausgänge

Aufgrund der sich stark unterscheidenden Strömungsverhältnisse in Richtungs- bzw. Gegenverkehrstunneln ist eine Differenzierung dieser beiden Typen im Zuge der Analysen und deren folgenden Ergebnisinterpretationen unerlässlich. Für beide Typen wird ein Tunnel mit Rechteckquerschnitt und mechanischer Längslüftung unter Spitzenverkehr angesetzt, im Gegenverkehr mit dem Regelquerschnitt 11t, im Richtungsverkehr 31t.

Der sicherheitstechnische Einfluss der Ausfälle von Notausgängen kommt lediglich beim Brandrisiko zur Geltung, der mechanische Anteil am Gesamtrisiko bleibt stets unverändert. Daher wird in den Abbildungen 7-19 und 7-20 zur besseren Übersicht ausschließlich das Brandrisiko dargestellt.

Tunnel im Richtungsverkehrsbetrieb

Grundsätzlich steigt das Brandrisiko mit der Anzahl nicht zur Verfügung stehender Notausgänge und damit der Länge des Fluchtweges an. Ausfälle jener Notausgänge, die dem Einfahrtsportal näher liegen, zeigen dabei jedoch geringere Auswirkungen (siehe Abbildung 7-19). Da insbesondere in Richtungsverkehrstunneln stets in Richtung des Ausfahrtsportals gelüftet wird, sind diese Bereiche tendenziell auch stärker verrauchert, wodurch die dort angeordneten Notausgänge als kritischer im Hinblick auf die Personensicherheit anzusehen sind.

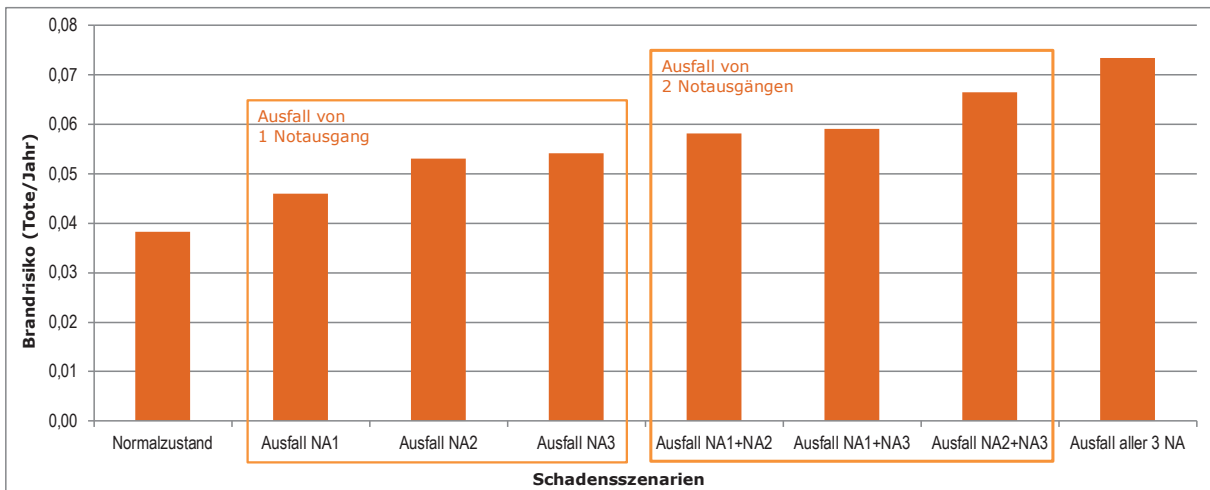


Abbildung 7-19: Einfluss der Schadensszenarien "Notausgang" am Modelltunnel mit Richtungsverkehr

Tunnel im Gegenverkehrsbetrieb

Im Vergleich zum Richtungsverkehrstunnel zeigen die in Abbildung 7-20 dargestellten Ergebnisse bereits im Normalzustand ein deutlich höheres Brandrisiko. Da sich im Gegenverkehr auf beiden Seiten des Brandortes Fahrzeuge befinden, sind stets Tunnelnutzer dem Brandrauch ausgesetzt. Im Richtungsverkehr hingegen können die Verkehrsteilnehmer weiter stromabwärts in den meisten Fällen ungehindert aus dem Tunnel ausfahren, bei einer Belüftung in Richtung des Ausfahrtsportales können sie somit den unmittelbaren Gefahrenbereich verlassen. (Primärereignis, siehe Abbildung 7-17).

Doch nicht nur das Brandrisiko im Normalzustand ist wesentlich höher, hinzu kommt, dass Ausfälle von Notausgängen in Gegenverkehrstunneln deutlich gravierendere Auswirkungen auf die Personensicherheit zeigen. Das Risiko steigt mit der Verlängerung des Fluchtweges demzufolge rascher an, wie Abbildung 7-20 zeigt.

Auch bei Tunneln im Gegenverkehr sind jene Notausgänge als kritischer zu betrachten, die dem Portal näher liegen, zu welchem im Brandfall gelüftet wird. Da hier die Strömungsrichtung aber von einer Vielzahl an Parametern abhängt, vor allem der Meteorologie, der Längsneigung und den Verkehrsverhältnissen, können auf Basis der Betrachtung an Modelltunneln keine weiteren Erkenntnisse zur Situierung der ausgefallenen Notausgänge gewonnen werden. Eine objekt- und standortspezifische Untersuchung ist in der Praxis daher unabdingbar.

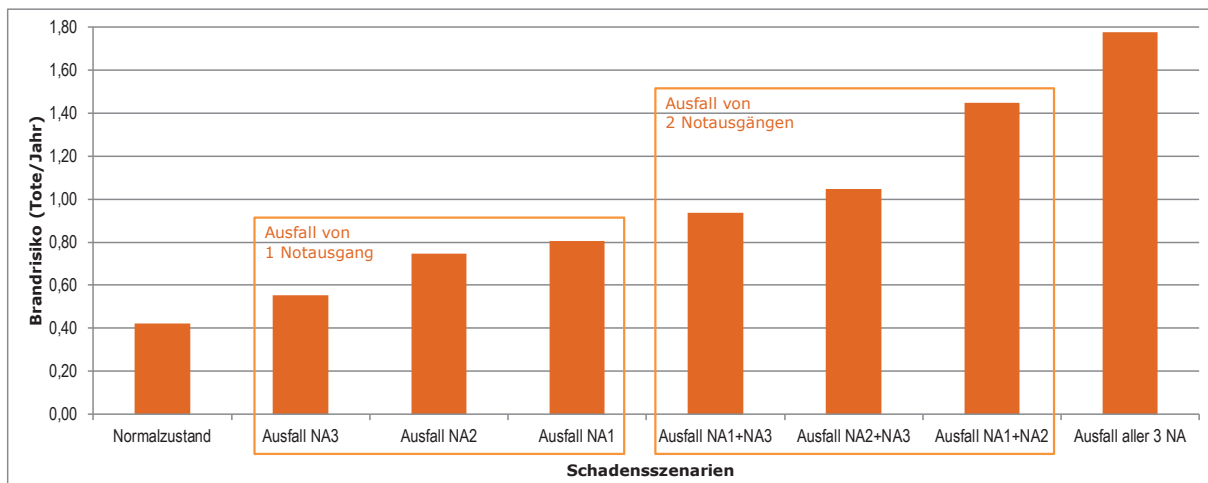


Abbildung 7-20: Einfluss der Schadensszenarien "Notausgang" am Modelltunnel mit Gegenverkehr

Lüftung

Aufgrund der Vielzahl zu berücksichtigender Einflussparameter ist für die Definition minimaler Betriebsbedingungen nach Schadensszenarien betreffend der Lüftung von Straßentunneln eine Risikobewertung mit quantitativen Methoden erforderlich.

Der Einfluss des Ausfalls von Strahlventilatoren in Tunneln mit mechanischer Längslüftung beschränkt sich ebenso auf das Brandrisiko, während das mechanische unverändert bleibt. Die Lüftung nimmt keinen Einfluss auf das Unfallgeschehen, sondern zeigt lediglich im Brandfall Auswirkungen auf das Personenrisiko.

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse der quantitativen Risikobewertung zum Teil beträchtliche Reserven, die im Zuge der Lüftungsauslegung entstehen. Folgende Aspekte führen zu dieser Situation:

- Der Ausfall eines einzelnen Lüfterstandorts, in der Regel aus zwei Strahlventilatoren bestehend, wird jedenfalls durch bestehende Reserven abgedeckt, da bei Bränden im unmittelbaren Bereich eines Lüfters dieser zur Vermeidung von Verwirbelungen nicht aktiviert wird, die Entrauchung aber dennoch möglich sein muss.
- Ein weiteres Lüfterpaar kann als Reserve für sich in der Praxis verändernde meteorologische Bedingungen (z.B. Portaldruckdifferenz) angesehen werden, die in der Untersuchung anhand der Modelltunnel vernachlässigt werden.
- Vergleichsweise kleinere Szenarien, wie PKW-Brände mit 5 MW Brandleistung, treten deutlich häufiger auf als jene mit 30 oder gar 100 MW. Da diese aber bereits mit einer sehr geringen Lüftungsleistung beherrscht werden können, zeigt sich ein negativer Effekt auf Gesamtrisiko erst bei Ausfällen mehrerer Lüfterstandorte.

Bei einem Teilausfall der Lüftung kann somit in vielen Fällen eine funktionale Kompensation (siehe Kapitel 7.2.2) durch verbleibende Reserven des Systems selbst erreicht werden.

Wie bereits zur Untersuchung der Schadensszenarien „Notausgang“ ist auch hier die Unterscheidung zwischen Tunnel im Richtungs- bzw. Gegenverkehr wesentlich.

Tunnel im Richtungsverkehrsbetrieb

Im Zuge der Untersuchung werden die Modelltunnel mit dem Regelquerschnitt 31t mit einer Länge von 600 bzw. 1200 m, jeweils im Spitzenverkehrsszenario, herangezogen. Dabei sind im Normalzustand sieben bzw. neun Strahlventilatoren im Betrieb, die rechten Balken in den Abbildungen 7-21 und 7-22 stellen demnach den Totalausfall der gesamten Lüftung dar, was einer rein natürlichen Lüftung gleichkommt.

Die Ergebnisse zeigen auf, dass bereits mit sehr wenigen verbleibenden Strahlventilatoren das kollektive Risiko nahezu auf dem ursprünglichen Niveau des Referenz隧nells gehalten werden kann. Dabei nimmt die Tunnellänge nur einen geringfügigen Einfluss auf die Auswirkungen der Schadensszenarien.

Es sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Ergebnisse nur für die Betrachtung eines idealen Modell隧nells zutreffen, dieser berücksichtigt weder eine Längsneigung, noch gesonderte meteorologische Bedingungen wie beispielsweise Portaldruckdifferenzen.

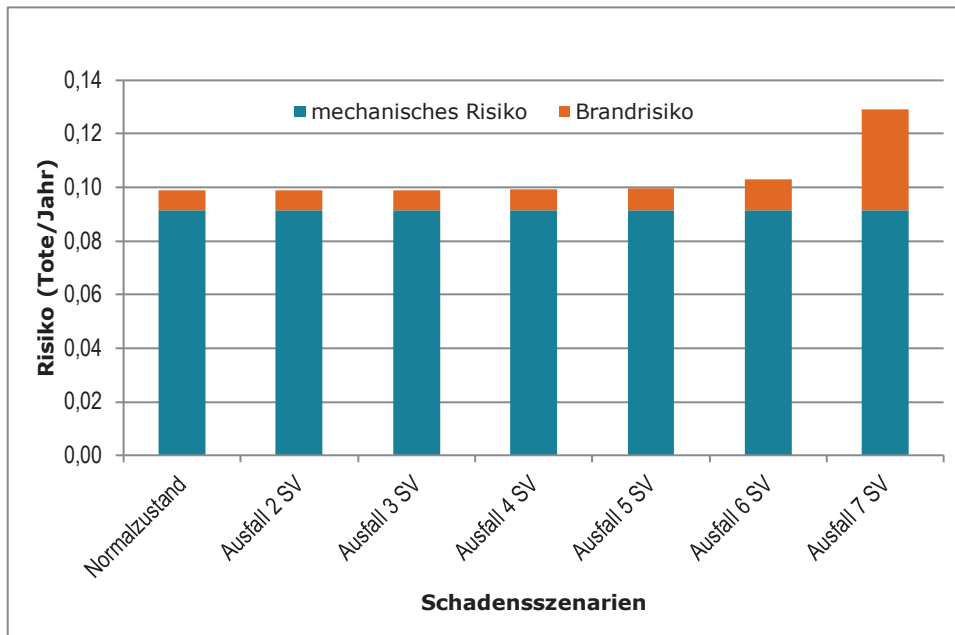


Abbildung 7-21: Einfluss der Schadensszenarien "Lüftung" am Modelltunnel mit Richtungsverkehr, Länge=600m

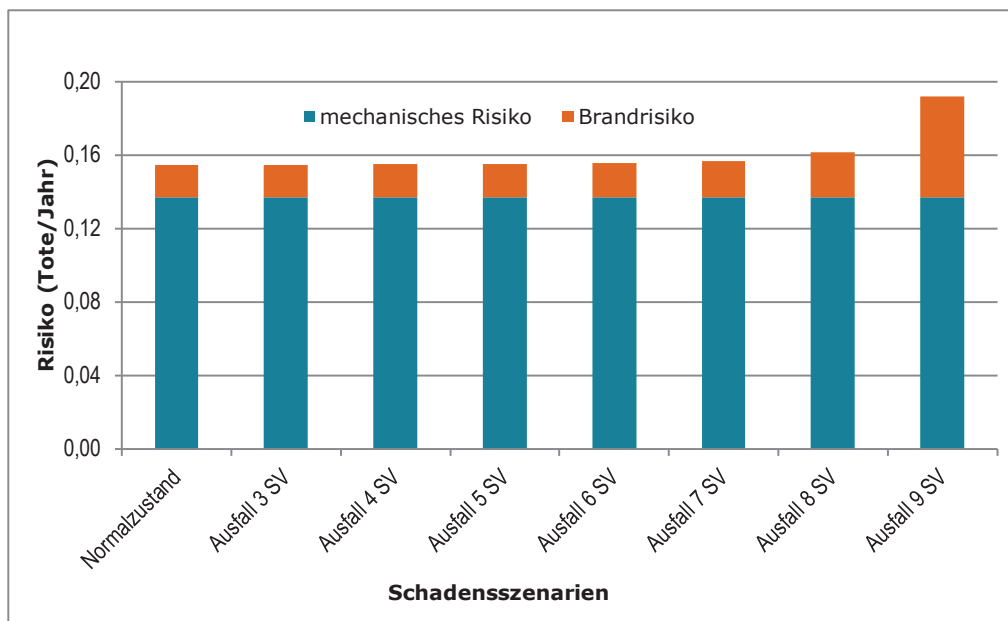


Abbildung 7-22: Einfluss der Schadensszenarien "Lüftung" am Modelltunnel mit Richtungsverkehr, Länge=1200m

Die Längsneigung nimmt bereits im Normalzustand einen großen Einfluss auf das Brandrisiko von Straßentunneln. Um nun auch Aussagen zur Wirkung in Bezug auf die Schadensszenarien der Lüftung treffen zu können, wird eine Sensitivitätsanalyse mit einer Variation der Längsneigung zwischen -3% und +3% durchgeführt. Dafür kommt wiederum der repräsentative Modelltunnel mit dem Regelquerschnitt 31t mit einer Länge von 1200 m im Spitzenverkehrsszenario zur Anwendung.

Bei einer Steigung von +3% zeigt sich deutlich der Effekt des natürlichen Brandrauchauftriebs, selbst bei einem Totalausfall der Lüftung steigt das Brandrisiko nicht an. Dies gilt jedoch wiederum nur unter der Annahme optimaler Bedingungen ohne

meteorologischen Besonderheiten. Zudem kann der Brandrauch im Tunnel ohne funktionierende Lüftung nicht kontrolliert werden, wodurch sich die Rauchausbreitungsrichtung in der Praxis umkehren kann.

Besteht eine negative Längsneigung im Tunnel, führt der Ausfall von Strahlventilatoren zu einem signifikant größeren Anstieg des Brandrisikos. Je größer das Gefälle, desto weniger Ausfälle können kompensiert werden.

Vergleichende Analysen der beiden in den repräsentativen Modelltunneln berücksichtigten Querschnittstypen zeigen zudem, dass Straßentunnel mit Rechteckquerschnitt ein geringfügig höheres Brandrisiko aufweisen. Da diese im Vergleich zum Gewölbequerschnitt in der Regel weniger Raum zur Verfügung haben, dringen Rauchgase rascher in personengefährdende Bereiche vor.

Tunnel im Gegenverkehrsbetrieb

Aufgrund der Untersuchung anhand der Modelltunnel, welche ideal horizontal verlaufen und keine standort- und objektspezifischen Rahmenbedingungen wie die Meteorologie berücksichtigen, können mit der hier angewandten Methodik keine allgemein gültigen Aussagen getroffen werden. Die hier gesetzten Parameter führen bei einem Totalausfall der Lüftung zum Verbleiben des Brandrauches im direkten Umfeld des Brandortes, wodurch sich unter Umständen positive Wirkungen durch die beaufschlagten Schadensszenarien ergeben. In der Praxis führt eine nicht funktionsfähige Lüftung hingegen zu unkontrollierbaren Brandszenarien, eine erhöhte Personengefährdung ist dementsprechend die unmittelbare Folge. Insbesondere bei Tunneln im Gegenverkehrsbetrieb sind aus diesen Gründen individuelle Untersuchungen zwingend erforderlich.

Strömungsgeschwindigkeitsmessung

Da aktuelle und verlässliche Daten zur Strömungsgeschwindigkeit für die Regelung der Lüftungsanlage im Brandfall unerlässlich sind, wird das Schadensszenario eines Totalausfalls aller Messeinrichtungen wie jener der Lüftung behandelt.

7.4.3 Quantitative Bewertung risikoreduzierender Maßnahmen

Die risikoreduzierende Wirkung sicherheitstechnischer Kompensationsmaßnahmen wurde bereits im Kapitel 7.2.2 thematisiert sowie ihr Einfluss auf bestimmte Risikoanteile qualitativ beschrieben. Folgende Maßnahmen werden tiefergehend mithilfe des Risikomodells auch mit quantitativen Methoden bewertet:

- Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit
- konsequente Kontrolle der Geschwindigkeit („Section Control“)
- LKW-Fahrverbot
- PKW-Fahrverbot
- Feuerwehrbereitschaft vor Ort („Portalfeuerwehr“)

Die Bewertung der Kompensationsmaßnahmen erfolgt anhand eines Tunnels im Richtungsverkehrsbetrieb (RQ 31t) mit einer Länge von 1200 m, einem Rechteckquerschnitt und mechanischer Längslüftung. Der Normalzustand stellt hier den Referenz-tunnel dar und definiert somit das Mindestsicherheitsniveau. In weiterer Folge wird das Schadensszenario „Ausfall aller Strahlventilatoren“ beaufschlagt. Um den wesentlichen Einfluss der Längsneigung auf das Brandrisiko zu berücksichtigen, werden die Analysen neben dem ideal horizontal verlaufenden Modelltunnel auch für Tunnel mit einem Gefälle von 3 % durchgeführt. Die Ergebnisse in Abbildung 7-23 zeigen dabei auch sehr stark voneinander abweichende Ergebnisse. Der Totalausfall des Lüftungssystems führt zuerst in beiden Fällen, bedingt durch den Anstieg des Brandrisikos, zu einer Überschreitung des durch den Referenz-tunnel im Normalzustand vorgegebenen Mindestsicherheitsniveaus, wobei die Auswirkungen beim Tunnel mit 3 % Gefälle deutlich gravierender ausfallen. Im nächsten Schritt wird die risikoreduzierende Wirkung der einzelnen Kompensationsmaßnahmen quantitativ bewertet. Während beim horizontal verlaufenden Tunnel mit Ausnahme der Portalfeuerwehr sämtliche oben angeführten Maßnahmen für sich alleine bereits ausreichen, um das Mindestsicherheitsniveau zu erreichen, ist das beim fallenden Tunnel in keinem der untersuchten Fälle möglich.

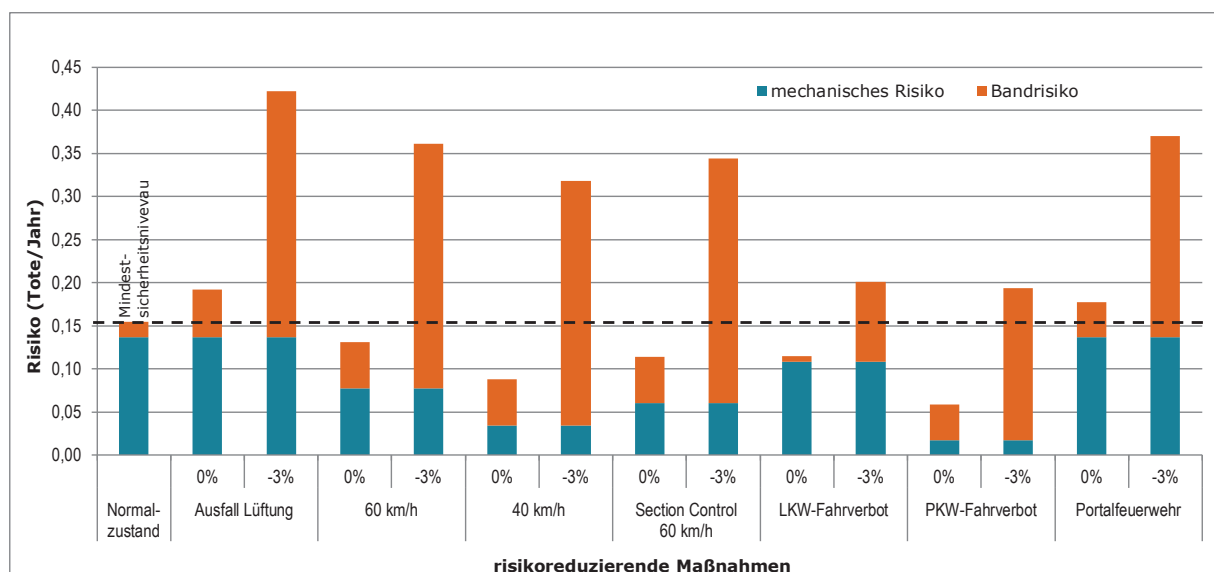


Abbildung 7-23: Einfluss risikoreduzierender Maßnahmen in Abhängigkeit der Längsneigung

Die beiden Maßnahmen **Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit** und **konsequente Kontrolle der Geschwindigkeit** führen zu geringeren tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten und haben somit den grundsätzlich gleichen Effekt: Das mechanische Risiko kann deutlich gesenkt werden, während das Brandrisiko unverändert bleibt.

Ein **LKW-Fahrverbot** zeigt einen Einfluss auf beide Risikoanteile. Aufgrund der geringeren Anzahl an Fahrzeugen im Tunnel und des Wegfalls LKW-induzierter Unfälle reduziert sich das mechanische Risiko um rund 20 %. Der deutlich größere Teil der Risikoreduktion entfällt jedoch auf das Brandrisiko, welches aufgrund der Vermeidung großer Brandereignisse mit 30 bzw. 100 MW um 90 % beim horizontalen Tunnel bzw. 70 % beim geneigten Tunnel herabgesetzt wird. Entsprechend der Definition der Modelltunnel beträgt der Schwerverkehrsanteil im Normalzustand 9 %. Liegt dieser höher oder niedriger, verändern sich dementsprechend auch die Ergebnisse zur Wirkung eines LKW-Fahrverbotes.

Die sehr deutliche Reduktion der Anzahl an Fahrzeugen im Tunnel durch die Maßnahme eines **PKW-Fahrverbotes**, die bei sämtlichen Modelltunneln für einen Anteil von 91 % des gesamten Verkehrsaufkommens verantwortlich sind, führt zu einer Verringerung des mechanischen Risikos um etwa 90 % und des Brandrisikos um 25 % beim waagrechten bzw. 40 % beim Tunnel mit Gefälle.

Die Ergebnisse der quantitativen Bewertung einer **Feuerwehrebereitschaft vor Ort** zeigen aufgrund der stark verringerten Zugriffszeit eine Verringerung des Brandrisikos um rund 25 %, während das mechanische Risiko unverändert bleibt. Da im Hinblick auf die Selbst- und Fremdrettung nach mechanischen Ereignissen ebenso Unterstützung geleistet werden kann, sollten auch diese positiven Wirkungen auf qualitative Weise bewertet werden.

7.5 Anwendungsbereich und –grenzen

Vor dem Eintreten eines disruptiven Ereignisses befindet sich ein Straßentunnel im Normalbetrieb, hier kommen sämtliche Vorgaben der RABT zur Anwendung. Dieser Zustand wird im Resilienzzyklus durch die Phase **prevent** repräsentiert.

Unmittelbar nach dem Eintreten eines Ereignisses werden die ersten Handlungsschritte in aller Regel direkt ereignisbezogen durchgeführt. Dabei kommen neben den Angaben der RABT die Maßnahmen der von den Tunnelbetreibern erstellten Alarm- und Gefahrenabwehrpläne (AGAP) zum Einsatz, widergespiegelt über die Resilienzphasen **protect** und **respond**.

Voraussetzung der Anwendung minimaler Betriebsbedingungen für den temporären Betrieb ist die Kenntnis und richtige Einordnung der aufgetretenen Schäden, weshalb vorab stets eine Lagebeurteilung notwendig ist, um vorhandene Ausfälle, Störungen und Defekte festzustellen. Im Resilienzkreislauf findet sich dieser Schritt und der folgende temporäre Betrieb in der Phase **recover** wieder.

Kommt es zur Instandsetzung und Behebung des Schadensszenarios, ist im Laufe dieses Prozesses nach wie vor die Einhaltung der minimalen Betriebsbedingungen erforderlich. Zusätzlich müssen im Zuge von Arbeiten im Tunnel zur Wiederherstellung die Angaben der Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA) berücksichtigt werden. Die Rückkehr zum ursprünglichen Zustand beschreibt ebenso die Phase **recover** des Resilienzzyklus.

Wie in Kapitel 1.3 beschrieben, ist die Resilienzphase **prepare** zeitlich abgekoppelt über den gesamten Zyklus hinweg zu betrachten.

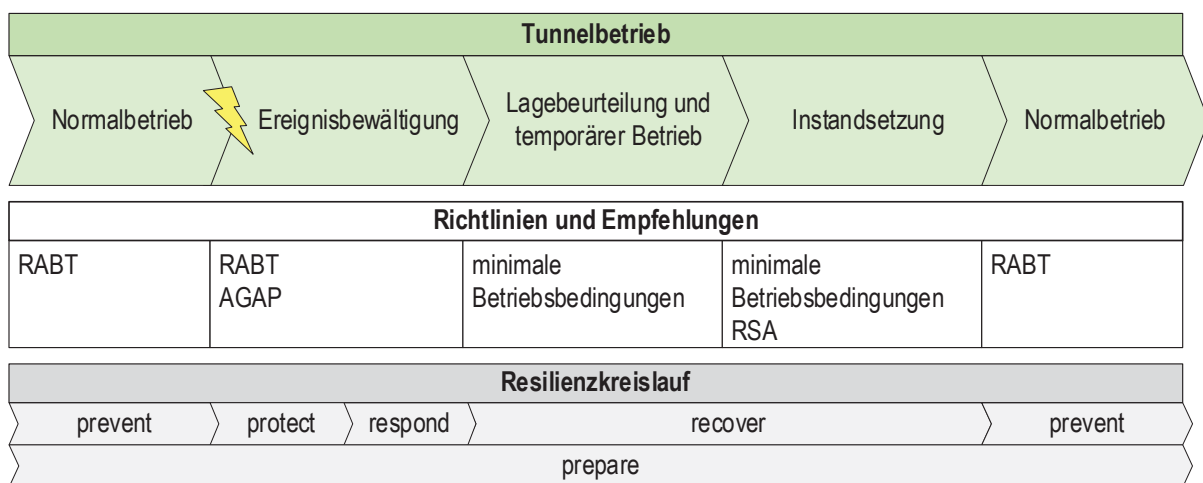


Abbildung 7-24: Anwendungsbereich der minimalen Betriebsbedingungen in den Phasen des Tunnelbetriebs und Einordnung der Resilienzphasen

Anwendungsgrenzen und Umsetzung der Methodik durch die Betreiber

Im Zuge der Definition minimaler Betriebsbedingungen wird das Zusammenwirken mehrerer Schäden, sei es aufgrund zufällig auftretender Konstellationen oder auch Kaskadeneffekten, nicht berücksichtigt. Wie bereits Abbildung 5-1 zeigt, können als Folge eines disruptiven Ereignisses jedoch auch mehrere Schadensszenarien zur gleichen Zeit auftreten, die in ihrem Zusammenwirken einen erhöhten Einfluss auf das Risiko aufweisen. Zum Teil kann dieser Aspekt im Zuge der Anwendung von Maßnahmen zur funktionalen Kompensation Berücksichtigung finden (siehe Kapitel 7.2.2).

Sämtliche Untersuchungen wurden an fiktiven Modelltunneln durchgeführt. Diese repräsentieren zwar auf Grundlage der umfassenden statistischen Auswertung die Tunnel im deutschen Straßennetz in sehr breitem Umfang, häufig vorhandene objektspezifische Besonderheiten können damit jedoch nicht abgebildet werden. Eine bauwerksbezogene Analyse im Anwendungsfall ist daher zwingend erforderlich, um die Übertragbarkeit der vorgestellten Methodik zu überprüfen bzw. sicherzustellen. So ist eine Erweiterung möglicher Schadensszenarien erforderlich, wenn ein Tunnel über die grundsätzlichen Anforderungen geltender Regelwerke hinausgehende Ausstattungskomponenten besitzt. Zudem können Teilausfälle in Abhängigkeit der tatsächlich vorliegenden Anlagenverhältnisse adaptiert werden, wodurch in weiterer Folge die Exposition anzupassen ist.

Die Bewertung eines Schadensszenarios und Anwendung minimaler Betriebsbedingungen setzt immer die exakte Kenntnis aufgetretener Schadensszenarien voraus. Daher ist in Abbildung 7-24 der Schritt der Lagebeurteilung von großer Bedeutung. In der Praxis kann diese Voraussetzung aber nicht immer ohne Probleme erfüllt werden. So stellen vorsätzlich durchgeführte Angriffe, allen voran Cyber-Angriffe, die Tunnelbetreiber vor große Herausforderungen bei der raschen und vollständigen Detektion sowie der Feststellung tatsächlich eingetretener Schäden.

Bei allen in diesem Kapitel angestellten Überlegungen wird das Risiko im Tunnel selbst isoliert betrachtet. Parameter wie die Gestaltung der Anschlussstellen und die Verhältnisse der Umleitungsstrecken sollten im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung jedoch auch stets in Entscheidungsfindungen miteinfließen. So kann durch eine Tunnelsperre die Erhöhung des Risikos in diesem zwar zur Gänze eliminiert werden, die Umleitung großer Verkehrsströme durch Stadtgebiete aber noch größere negative Konsequenzen haben. In Würzburg zum Beispiel kam es nach einem Wohnhausbrand aufgrund des stockenden Verkehrs auf der Umleitungsstrecke während einer Tunnelsperre zu einer Anfahrtszeit der Feuerwehr von rund 50 Minuten. Auch die Unfallhäufigkeit ist auf den meist schlechter ausgebauten Umleitungsstrecken tendenziell höher. Dies erfordert daher zusätzliche objektspezifische Untersuchungen, um so in einem umfassenden Gesamtpaket alle Rahmenbedingungen berücksichtigen zu können.

8 Untersuchung verkehrlicher Auswirkungen

Im Zuge der Risikobewertung zur Definition minimaler Betriebsbedingungen in Kapitel 7 werden die unter Einhaltung des geforderten Mindestsicherheitsniveaus möglichen verkehrlichen Betriebsszenarien je Schadensszenario ermittelt. Dabei können aus einem Schadensszenario mehrere verkehrliche Betriebsszenarien resultieren:

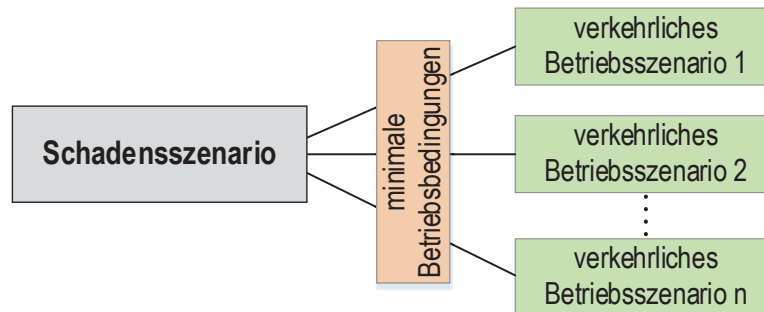


Abbildung 8-1: Zusammenhang der Schadensszenarien und verkehrlichen Betriebsszenarien

Diese wiederum ziehen zum Teil Kapazitätseinschränkungen sowie Störungen des Verkehrsflusses nach sich. Die Untersuchung solcher verkehrlicher Auswirkungen ermöglicht die Definition bestmöglicher verkehrlicher Betriebsszenarien je Schadensszenario im Hinblick auf das übergeordnete Ziel einer Steigerung der Verfügbarkeit von Straßentunneln und damit des Straßennetzes.

Hierfür werden im ersten Schritt die lokalen verkehrlichen Auswirkungen analysiert, um die Einflüsse sämtlicher Betriebsszenarien auf Basis der Modelltunnel näher zu betrachten. Entscheidender Parameter dabei ist die verkehrliche Leistungsfähigkeit, welche über die zur Verfügung stehende Kapazität in Fahrzeugen pro Stunde beschrieben wird. Zu diesem Zweck werden **Verkehrssimulationen auf mikroskopischer Ebene** unter Anwendung der Software *PTV Vissim* durchgeführt.



Abbildung 8-2: Staubildung vor Tunnel [13]

8.1 Beschreibung der Verkehrsflusssimulation

Bei mikroskopischen Modellierungen von Verkehrsabläufen ist jedes einzelne Fahrzeug individuell repräsentiert und eindeutig identifizierbar, wodurch eine direkte Untersuchung einzelner Streckenabschnitte erlaubt wird. Die Software *PTV Vissim* arbeitet zeitschrittorientiert, d.h. in jedem Zeitschritt, der zwischen 0,1 s (10 HZ) und 1 s (1 HZ) gewählt werden kann, werden Daten wie die Beschleunigung, Verzögerung und Fahrstreifenwechsel rechnerisch neu ermittelt.

Grundlage der Simulation des Straßenverkehrs auf mikroskopischer Ebene bildet ein Verhaltensmodell. Im vorliegenden Fall erfolgt die Beschreibung sowohl in axialer, als auch lateraler Richtung, dies entspricht einer Unterscheidung der beiden Gruppen der Abstandsmodelle und Fahrstreifenwechselmodelle, wie sie für mehrstreifige Autobahnquerschnitte erforderlich sind. [24]

- In *PTV Vissim* kommt zur Modellierung der **Längsbewegungen** das psychophysische Abstandsmodell nach Wiedemann 99 zum Einsatz, welches die menschlichen Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozesse in einem Fahrzeugfolgemodell abbildet. Darin wird die individuelle Wahrnehmungsschwelle eines Fahrers gegenüber der Geschwindigkeitsdifferenz zum vorausfahrenden Fahrzeug berücksichtigt. Liegt der Unterschied über dieser Schwelle, beginnt das Folgefahrzeug zu bremsen bzw. zu beschleunigen. Da jedoch nicht die exakt gleiche Geschwindigkeit erreicht werden kann, entsteht eine Pendelbewegung zwischen den beiden Fahrzeugen, der Fahrer muss ständig leicht verzögern und beschleunigen. Über Verteilungsfunktionen der Wunschgeschwindigkeit, des Beschleunigungsvermögens und des Abstandes werden verschiedene Verhaltensweisen realitätsnahe dargestellt.

Im Verkehrsflussmodell nach Wiedemann werden vier grundsätzliche Fahrzustände unterschieden (Abbildung 8-3), der Übergang von einem zum anderen ist von personenspezifischen Schwellen abhängig, die als Funktion der Geschwindigkeitsdifferenz und dem Abstand zweier Fahrzeuge beschrieben werden.

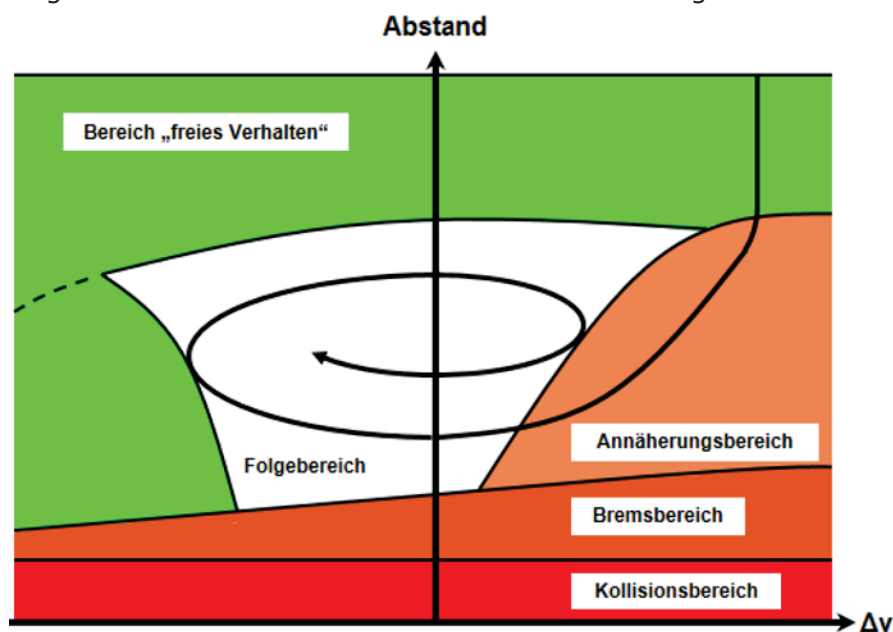


Abbildung 8-3: Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann [25]

- Freies Fahren
Es besteht kein Einfluss eines vorausfahrenden Fahrzeuges, der Fahrer versucht demnach seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen, kann diese jedoch nicht exakt konstant halten. Die Geschwindigkeit variiert somit laufend und pendelt in einem bestimmten Bereich um die Wunschgeschwindigkeit.
 - Annäherung
Der Fahrer muss seine Geschwindigkeit einem vorausfahrenden langsameren Fahrzeug durch Verzögerung anpassen, um bei Erreichen des gewünschten Sicherheitsabstandes eine Geschwindigkeitsdifferenz möglichst von null km/h zu erreichen.
 - Folgen
Das Fahrzeug folgt dem Vorausfahrenden ohne bewusster Verzögerung bzw. Beschleunigung, die Geschwindigkeit schwankt dabei jedoch leicht, wodurch auch der Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen nicht exakt konstant bleibt.
 - Bremsen
Bei Unterschreitung des gewünschten Sicherheitsabstandes, beispielsweise durch plötzliches Bremsen oder Drängeln eines dritten Fahrzeuges, ist eine mittlere bis starke Verzögerung erforderlich.
-
- Zur Untersuchung von **Fahrstreifenwechseln**, wie sie bei Verflechtungsstrecken oder Überholvorgängen vorkommen, werden auch Querbewegungen mit Hilfe eines regelbasierten Modells dargestellt. Ein Wechsel ist nur möglich, wenn aus Sicht des Fahrzeuglenkers keine Behinderung am benachbarten Fahrstreifen erkannt wird und das Manöver ohne Gefährdung für den Fahrer bzw. andere Fahrzeuge ausführbar ist, eine ausreichend große Zeitlücke muss hierfür vorhanden sein. Zudem erfolgt eine Differenzierung zwischen freien Fahrstreifenwechseln aufgrund von Überholvorgängen oder dem Bedarf von mehr Platz und notwendigen Fahrstreifenwechseln zum Erreichen definierter Routen, wobei die Verkehrsteilnehmer in diesem Fall deutlich aggressiver agieren und maximale Verzögerungen sowie minimale Sicherheitsabstände stärker ausnutzen.

Im Folgenden werden die zur Simulation des Autobahnverkehrs erforderlichen Parameter des Fahrverhaltens näher beschrieben, wiederum eingeteilt in Angaben zum:

- Folgeverhalten
- Fahrstreifenwechselfverhalten

Detaillierte Angaben und Erläuterungen zu allen Einstellungen, Parametern und Möglichkeiten von *PTV Vissim* sind zudem im entsprechenden Handbuch zu finden. [25]

1. Parameter zur Beschreibung des Folgeverhaltens:

Parameter	Wert	Einheit
CC0 (Stillstandsabstand):	0.80	m
CC1 (Folgeabstand):	0.80	s
CC2 (Längs-Oszillation):	4.00	m
CC3 (Wahrnehmungsschwelle für Folgen):	-5.00	
CC4 (neg. Geschwindigkeitsdifferenz):	-0.30	
CC5 (pos. Geschwindigkeitsdifferenz):	0.30	
CC6 (Einfluss Geschwindigkeit auf Oszillation):	11.44	
CC7 (Beschleunigung bei Oszillation):	0.25	m/s ²
CC8 (Beschleunigung aus Stillstand):	2.75	m/s ²
CC9 (Beschleunigung bei 80 km/h):	1.50	m/s ²

Abbildung 8-4: Eingabefenster zur Definition des Folgeverhaltens

Vorausschauweite

minimal

Wird relevant, wenn das Querverhalten der Fahrzeuge berücksichtigt werden muss und das Überholen innerhalb des Fahrstreifens, insbesondere von Zweirädern, möglich ist, was bei Autobahnen nicht zutrifft.

maximal

Diesen Bereich kann der Verkehrsteilnehmer in Fahrtrichtung einsehen und somit auf andere Fahrzeuge auf der gleichen Strecke reagieren.

Vorderfahrzeuge

Anzahl der Fahrzeuge, die ein Fahrer nach vorne wahrnehmen kann. Die Vorausschauweite wird zusätzlich zur Anzahl der Vorderfahrzeuge berücksichtigt.

Zurückschauweite

minimal

Wie bei der minimalen Vorausschauweite ist auch hier eine Angabe nur für das Querverhalten innerhalb eines Fahrstreifens - somit nicht auf Autobahnen - von Relevanz.

maximal

Eine Reduzierung ist im Falle sehr engmaschiger Netze von Nutzen, was für den Autobahnverkehr nicht zutrifft.

vorübergehende Unaufmerksamkeit

Fahrzeuge reagieren mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit über einen angegebenen Zeitraum nicht auf vorausfahrende Fahrzeuge, außer im Falle von Notbremsungen.

Gleichmäßiges Aufrückverhalten

Beim Aufrücken auf ein stehendes Hindernis reduzieren Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit gleichmäßiger, das Fahrverhalten wird realistischer simuliert.

Stillstandsabstand für statische Hindernisse

Ist diese Option ausgewählt, kommen Fahrzeuge vor Hindernissen mit dem angegebenen zugehörigen Abstand zum Stillstand, ansonsten wird ein normalverteilter [0,5; 0,15] Zufallswert verwendet. Für den Straßenverkehr wird aufgrund der Imperfektion der Fahrzeuglenker stets eine Verteilung angesetzt.

Parameter des Modells nach Wiedemann 99: **CC0 – CC9**

CC0

durchschnittlicher Wunschabstand in Meter zweier stehender Fahrzeuge

CC1

Folgeabstand in Sekunden, den ein Fahrer in Abhängigkeit der Geschwindigkeit einhalten möchte

Der mittlere Sicherheitsabstand in Meter zu einem vorausfahrenden Fahrzeug errechnet sich somit über: $CC0 + CC1 * v$

Die Geschwindigkeit v wird dabei in m/s eingesetzt.

CC2

Bestimmt die Abstandsdifferenz, bevor ein Folgefahrzeug wieder aufrückt (Längs-Oszillation), um ein stabiles Folgeverhalten zu modellieren.

CC3

Legt den Beginn des Verzögerungsvorganges vor dem Erreichen des Sicherheitsabstandes fest, hier erkennt der Fahrer ein Vorderfahrzeug mit geringerer Geschwindigkeit.

CC4 / CC5

Die beiden Parameter beschreiben die Reaktionsempfindlichkeit auf die Beschleunigung bzw. Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeuges, je geringer, desto sensibler die Reaktion. Die beiden Werte, ein negativer für CC4, ein positiver für CC5, sollen nach [25] in ihrem Betrag gleich groß sein.

CC6

Kontrolliert die Abhängigkeit der Oszillation der Geschwindigkeit vom Abstand. Bei einem Wert von null spielt der Abstand keine Rolle. Mit zunehmendem Wert wird auch die Oszillation bei steigendem Abstand größer, Änderungen der Geschwindigkeit des Vorderfahrzeuges werden demnach schlechter eingeschätzt.

CC7

Beschleunigung während der Oszillation in m/s^2

CC8

Wunschbeschleunigung aus dem Stillstand in m/s^2 , wobei der Wert durch die Verteilungsfunktion der Maximalbeschleunigung des jeweiligen Fahrzeuges begrenzt ist.

CC9

Wunschbeschleunigung bei Geschwindigkeiten ab 80 km/h, um die Leistungsfähigkeit der Kfz realitätsnahe abzubilden, wiederum durch die Maximalbeschleunigung limitiert.

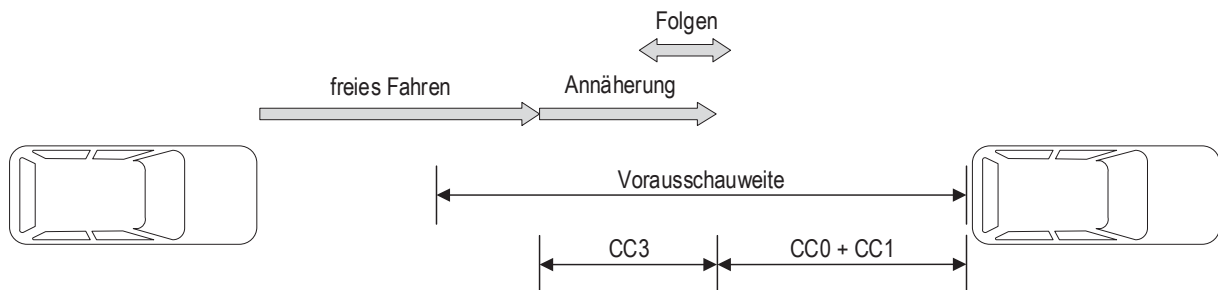


Abbildung 8-5: Zusammenhang zwischen den Fahrzuständen und den Parametern nach Wiedemann 99, in Anlehnung an [26]

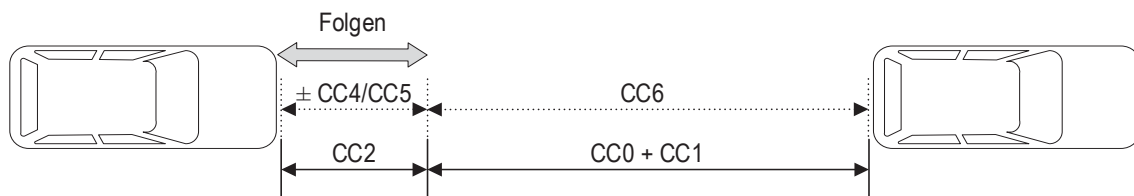


Abbildung 8-6: Darstellung der Parameter nach Wiedemann 99 bei der Folgefahrt, in Anlehnung an [26]

2. Parameter zur Beschreibung des Fahrstreifenwechsellverhaltens

Nr.: 6 Name: Außerorts PKW

Folgeverhalten: **Fahrstreifenwechsel** Querverhalten Lichtsignalanlagen

Grundverhalten: Rechtsfahrgebot

Notwendiger Fahrstreifenwechsel (Route)	eigene	Folgefahrzeug
Maximale Verzögerung:	-2.50 m/s ²	-2.25 m/s ²
- 1 m/s ² pro Entfernung:	300.00 m	300.00 m
Akzeptierte Verzögerung:	-1.50 m/s ²	-1.00 m/s ²

Wartezeit bis zur Diffusion: 60.00 s

Min. Nettoweglücke (vorne/hinten): 2.00 m

Auf langsameren Fahrstreifen wenn Kollisionszeit mind.: 11.00 s

Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand: 0.40

Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen: -7.00 m/s²

Langsamfahrbereiche überholen

Intelligentes Einfädeln

Nach Routenentscheidung stromabwärts von Routenende suchen

Kooperativer Fahrstreifenwechsel

Max. Geschwindigkeitsdifferenz: 10.80 km/h

Max. Kollisionszeit: 10.00 s

Querkorrektur der Hinterkante

Maximale Geschwindigkeit: 3.00 km/h

OK Abbrechen

Abbildung 8-7: Eingabefenster zur Definition des Fahrstreifenwechsellverhaltens

Grundverhalten

Bei freier Fahrstreifenwahl dürfen Fahrzeuge auf jedem Fahrstreifen überholen, mit der Auswahl Rechtsfahrgebot sind Überholvorgänge entsprechend der StVO nur links erlaubt.

Wartezeit bis zur Diffusion

Verstreicht diese Zeitdauer, wird ein an der Nothalteposition auf den notwendigen Fahrstreifenwechsel wartendes Fahrzeug aus dem Netz genommen.

Faktor für reduzierten Seitenabstand

Bei Fahrstreifenwechseln wird der Sicherheitsabstand durch Multiplikation mit diesem Faktor reduziert. Ist das Manöver abgeschlossen, kommt wiederum der ursprüngliche Wert zur Anwendung.

Intelligentes Einfädeln

Durch Aktivierung der Option können Verkehrsteilnehmer früher den Fahrstreifen wechseln, wodurch weniger Fahrzeuge zum Stehen kommen und die Kapazität der Strecke steigt.

Kooperativer Fahrstreifenwechsel

Folgefahrzeuge wechseln den Fahrstreifen, um dem Vorausfahrenden einen notwendigen Fahrstreifenwechsel zu erleichtern.

8.2 Modellaufbau

Die modellierte Strecke ist nicht auf den Tunnel selbst begrenzt, um so die Einflüsse der verschiedenen verkehrlichen Betriebsszenarien praxisgerecht abzubilden. In der Zulaufstrecke erfolgt die stochastische poissonverteilte Einspeisung der Fahrzeuge verschiedener vordefinierter Typen, woraufhin in der Vorlaufstrecke Anpassungen wie Änderungen der Geschwindigkeit, Fahrstreifensperren, Überholverbote oder andere Maßnahmen implementiert werden. Die Auslaufstrecke nach der Durchfahrt des Tunnels dient dem Ablauf des Verkehrs, wodurch eine Beeinflussung des Verkehrsflusses im untersuchten Tunnel und somit der Ergebnisse der Simulation vermieden wird. [27]

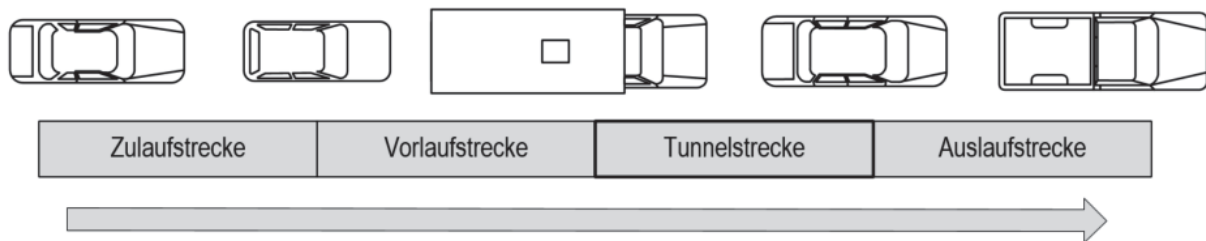


Abbildung 8-8: Modellaufbau in PTV Vissim

Eine Änderung der Verkehrsführung im Tunnel ist nicht zulässig, alle getroffenen Maßnahmen müssen bereits in der Vorlaufstrecke umgesetzt sein, um so einen über die gesamte Tunnellänge möglichst homogenen Verkehrsablauf sicherzustellen.

Zur realitätsnahen Abbildung des Verkehrsflusses wird eine Laufzeit je Simulation von 5400 s (=1,5 h) gewählt. Sämtliche Messungen an der Strecke beginnen nach einer Zeit von 900 s, um so zuerst genügend Fahrzeuge in das Modell einzuspeisen und einen weitgehend stationären Zustand zu erreichen.

Modelltunnel

Die für die mikroskopische Verkehrssimulation benötigten Parameter der im Kapitel 3.2 entwickelten Modelltunnel sind im Folgenden dargestellt. Dabei werden die Tabellen um die Spalte des MSV (maßgebender stündlicher Verkehr) erweitert. Dieser errechnet sich durch Multiplikation des JDTV mit dem k-Faktor, welcher in Abhängigkeit der Eigenschaften der Jahresganglinie gewählt wird. So wird die ungleichmäßige Verteilung des Verkehrs im Tagesverlauf berücksichtigt, um das Verkehrsaufkommen realistisch abzubilden.

Typus der Jahresganglinie	k-Faktor	
überwiegend Urlaubsverkehr	Gesamtquerschnitt	0,18
	Richtungsverkehr	0,20
mittlerer Anteil an Urlaubsverkehr	Gesamtquerschnitt	0,13
	Richtungsverkehr	0,17
überwiegend Berufs- und Wirtschaftsverkehr	Gesamtquerschnitt	0,10
	Richtungsverkehr	0,12

Tabelle 8-1: k-Faktor in Abhängigkeit der Jahresganglinie [28]

Da das Gros der untersuchten Tunnel klar vorrangig durch Berufs- und Wirtschaftsverkehr belastet wird, kommt ein k-Faktor von 0,12 zur Anwendung.

Verkehrsart	RQ	Tunnellänge	JDTV (Kfz/24h,Röhre)		MSV (Kfz/h)
			Spitzenwert	Mittelwert	
RV	31 t 2 Fahrstreifen	600 m	Spitzenwert	37.488	4499
			Mittelwert	16.370	1964
		1.200 m	Spitzenwert		
			Mittelwert		
	31 T 2 Fahrstreifen + Seitenstreifen	600 m	Spitzenwert	47.880	5746
			Mittelwert	21.392	2567
		1.200 m	Spitzenwert		
			Mittelwert		
	36 T 3 Fahrstreifen + Seitenstreifen	600 m	Spitzenwert	57.843	6941
			Mittelwert	37.462	4495
		1.200 m	Spitzenwert		
			Mittelwert		

Tabelle 8-2: Modelltunnel der Verkehrssimulation im Richtungsverkehr

Verkehrsart	RQ	Tunnellänge	JDTV (Kfz/24h,Richtung)		MSV (Kfz/h)
			Spitzenwert	Mittelwert	
GV	11 t 2 Fahrstreifen	400 m	Spitzenwert	12.633	1516
			Mittelwert	6.435	772
		1.200 m	Spitzenwert		
			Mittelwert		

Tabelle 8-3: Modelltunnel der Verkehrssimulation im Gegenverkehr

Tunnel im Gegenverkehr mit einer Länge von 600 m wurden hier in der Betrachtung der verkehrlichen Auswirkungen nicht untersucht, die Unterschiede zu jenem mit 400 m Länge sind vernachlässigbar klein. Nichtsdestotrotz bleiben alle drei Varianten in der quantitativen Risikobewertung erhalten, da hier gemäß RABT bei jedem Längenbereich verschiedene Lüftungssysteme zum Einsatz kommen, die sehr wohl einen erheblichen Einfluss auf die Personensicherheit haben.

8.3 Wahl der Eingabeparameter

Fahrverhalten

Parameter des Fahrverhaltens sind, im Gegensatz zu den gefahrenen Geschwindigkeiten, nicht direkt zu messen. Bei der Festlegung der Größen ist besonderer Wert auf das Zusammenwirken aller Einstellungen zu legen. Soll ein bestimmtes Verhalten, wie z.B. mehr oder weniger aggressiv, abgebildet werden, so müssen sämtliche Parameter stets korrespondierend zueinander angepasst werden, um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten. In [29] wurden die für den Autobahnverkehr relevanten Einstellungen durch die Untersuchung verschiedener Parametersets, die jeweils ein bestimmtes Verhalten unter Zusammenwirken aller Werte repräsentieren, gewählt. Durch den Vergleich verschieden dichten Folge-, sowie unterschiedlich aggressivem Fahrstreifenwechselverhalten erfolgte die Auswahl der Parameter, wie sie in Tabelle 8-4 und 8-5 angegeben sind und auch für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit herangezogen werden.

Parameter		Wert	Einheit
Fahrzeugfolgemodell Wiedemann 99	CC0	0,80	m
	CC1	0,80	s
	CC2	4,00	m
	CC3	-5,00	s
	CC4	-0,30	-
	CC5	0,30	-
	CC6	11,44	-
	CC7	0,25	m/s ²
	CC8	2,75	m/s ²
	CC9	1,50	m/s ²
Vorausschauweite	minimal	0	m
	maximal	250	m
	Vorderfahrzeuge	2	-
Zurückschauweite	minimal	0	m
	maximal	150	m
vorübergehende Unaufmerksamkeit	Dauer	1,0	s
	Wahrscheinlichkeit	0,20	%

Tabelle 8-4: Parameter des Folgeverhaltens

Parameter		PKW	LKW	Einheit
Grundverhalten		Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot	-
eigener notwendiger Fahrstreifenwechsel	maximale Verzögerung	-2,50	-1,75	m/s ²
	-1 m/s ² pro Entfernung	300	300	m
	akzeptierte Verzögerung	-1,50	-1,00	m/s ²
notwendiger Fahrstreifenwechsel Folgefahrzeug	maximale Verzögerung	-2,25	-1,50	m/s ²
	-1 m/s ² pro Entfernung	300	300	m
	akzeptierte Verzögerung	-1,00	-0,50	m/s ²
Wartezeit bis zur Diffusion		60,00	60	s
minimale Nettoweglücke (vorne/hinten)		2,00	4,00	m
auf langsameren Fahrstreifen, wenn Kollisionszeit mind.		11,00	1,00	s
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand		0,40	0,60	-
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen		-7,00	-7,00	m/s ²
Langsamfahrbereiche überholen		nein	nein	-
intelligentes Einfädeln		ja	ja	-
nach Routenentscheidung stromabwärts von Routenende suchen		ja	ja	-
kooperativer Fahrstreifenwechsel		ja	nein	-
- maximale Geschwindigkeitsdifferenz		10,80	-	km/h
- maximale Kollisionszeit		10,00	-	s
Querkorrektur der Hinterkante		nein	nein	-

Tabelle 8-5: Parameter des Fahrstreifenwechselerhaltens

Verhalten beim Einordnen

Bei einer Reduktion der Anzahl verfügbarer Fahrstreifen sind die Verkehrsteilnehmer der betroffenen Spuren zum Wechseln des Fahrstreifens gezwungen. Die programminterne Anweisung, ab welcher Stelle vor der Fahrstreifenreduktion ein Wechsel versucht wird, erfolgt über die Angabe der Entfernung von der Verbindungsstrecke, welche die Fahrzeuge mit entsprechender Route erreichen müssen. Bei einer Untersuchung des Spurwechselverhaltens vor Arbeitsstellen auf deutschen Autobahnen [30] zeigte sich, dass die Mehrheit der Fahrzeuglenker nicht unter Anwendung des optimalen Reisverschlussystems am Ende, sondern im Bereich von 600 bis 300 m davor auf den entsprechenden Fahrstreifen wechseln. Mit dem Wert von **600 m** für die Option „Einordnen“ in *Vissim* wird dieses Verhalten der Verkehrsteilnehmer auch sehr gut wiedergespiegelt, da sie zwar mit dem Versuch eines Wechsels direkt hier beginnen, der Vorgang bei hohen Verkehrsstärken von der Vielzahl an Fahrzeugen jedoch über die gesamte Länge verteilt passiert.

Wunschgeschwindigkeit

Die Wunschgeschwindigkeit ist jene Geschwindigkeit, mit der ein Fahrer fahren würde, wenn er nicht durch andere Fahrzeuge oder Netzobjekte, wie beispielsweise Signalanlagen, daran gehindert würde. [25] Für die Simulation der in dieser Arbeit untersuchten verkehrlichen Betriebsszenarien erfolgt eine Unterscheidung der Wunschgeschwindigkeiten auf der freien Strecke bzw. im Tunnelnormalbetrieb sowie jener in Arbeitsstellen.

Analysen von Verkehrsbeeinflussungsanlagen auf der A44 [31] bilden die Grundlage der Verteilungen an der freien Strecke in Deutschland, differenziert nach zugelassener Höchstgeschwindigkeit und Fahrzeugtyp (Tabelle 8-6). Aufgrund von Verkehrsmessungen an Arbeitsstellen längerer Dauer an sechs verschiedenen Bundesautobahnen wurden in [32] Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für den Innenbereich von Arbeitsstellen mit zweistreifiger Richtungsverkehrsführung abgeleitet. Dabei erfolgt eine Unterscheidung zwischen den Fahrzeugtypen LKW und PKW, der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, sowie der verfügbaren Breite der (Behelfs-) Fahrstreifen. (Tabelle 8-7)

V _{zul} in km/h	Wunschgeschwindigkeit in km/h			
	PKW		LKW	
	Mittelwert	Standard- abweichung	Mittelwert	Standard- abweichung
ohne	142	20	92	5
120	120	20	91	5
100	110	18	90	5
80	100	15	85	4
60	80	12	70	3

Tabelle 8-6: Wunschgeschwindigkeitsverteilungen an der freien Strecke nach [31]

b _{FS,min} in m	V _{zul} in km/h	Wunschgeschwindigkeit in km/h			
		PKW		LKW	
		Mittelwert	Standard- abweichung	Mittelwert	Standard- abweichung
< 2,75	60	74	8	68	5
< 2,75	80	90	10	80	7
≥ 2,75	80	95	10	83	8

Tabelle 8-7: Wunschgeschwindigkeitsverteilungen in Arbeitsstellen nach [32]

Die Wunschgeschwindigkeiten liegen großteils deutlich über den zulässigen Höchstgeschwindigkeiten, vor allem bei einer restriktiven Beschränkung auf 60 km/h. LKW weisen dabei eine erheblich geringere Streuung auf als PKW, wodurch ein gleichmäßiger Verkehrsablauf grundsätzlich begünstigt wird.

Der Einfluss der angesetzten Wunschgeschwindigkeiten ist bei den hier untersuchten Modelltunneln aufgrund der durchwegs hohen Verkehrsstärken jedoch als gering einzustufen, vor allem bei zusätzlichen den Verkehrsfluss beeinträchtigenden Maßnahmen. Die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit wird bei dichtem Verkehr somit in erster Linie über die oben beschriebenen Parameter des Folgeverhaltens bestimmt.

8.5 Ergebnisse und Auswertung der Verkehrsmodellierung

Mithilfe von im Modell implementierten Querschnittmessungen im Tunnel werden an einem definierten Punkt des Netzes die Anzahl an Fahrzeugen je Zeiteinheit (=Verkehrsstärke) erfasst. Ist die Kapazität der Tunnelstrecke ausreichend groß, um den entsprechend den Verkehrsdaten der Modelltunnel angesetzten Fahrzeugzufluss zu bewältigen, können alle Fahrzeuge in das Netz eingespeist werden und passieren anschließend den Messquerschnitt. Bei zu hohem Verkehrsaufkommen hingegen können nicht sämtliche Fahrzeuge während der Simulationsdauer den Tunnel erreichen oder gelangen erst gar nicht über den Zuflussquerschnitt in das Modell.

Da bei eingeschränkten Betriebsszenarien die Leistungsfähigkeit sowohl vor, als auch nach dem Tunnelbauwerk größer ist, kommt es zu keiner Beeinflussung durch den Verkehr weiter stromabwärts.

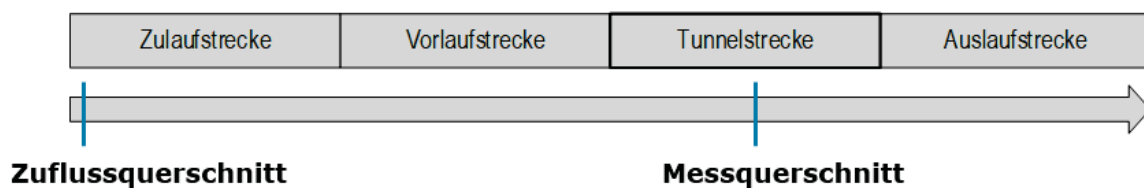


Abbildung 8-10: Anordnung des Zufluss- und Messquerschnitts

Mithilfe dieser Modellanordnung wird im ersten Schritt die Möglichkeit der Abwicklung des Verkehrsaufkommens der Modelltunnel in Abhängigkeit der verkehrlichen Betriebsszenarien untersucht. Darüber hinaus wird die Kapazität, ebenso je Modelltunnel und Betriebsszenario, in Relation zum Normalbetrieb ermittelt.

Die Kapazität, auch als Leistungsfähigkeit bezeichnet, ist definiert als die größtmögliche Verkehrsstärke, die bei gegebenen Randbedingungen, wie z.B. den Straßenverhältnissen, der Witterung oder dem Schwerverkehrsanteil, erreicht werden kann. Obwohl die Kapazität meist als deterministischer Wert angegeben wird, bricht aufgrund der großen Bandbreite stochastischer Einflüsse des Individualverkehrs der Verkehrsfluss nicht immer exakt bei Überschreitung dieses Wertes zusammen. Vielmehr ist sie ebenso als Zufallsgröße zu verstehen, die mithilfe einer Verteilungsfunktion die Wahrscheinlichkeit des Zusammenbruchs bei einer bestimmten Verkehrsstärke angibt.

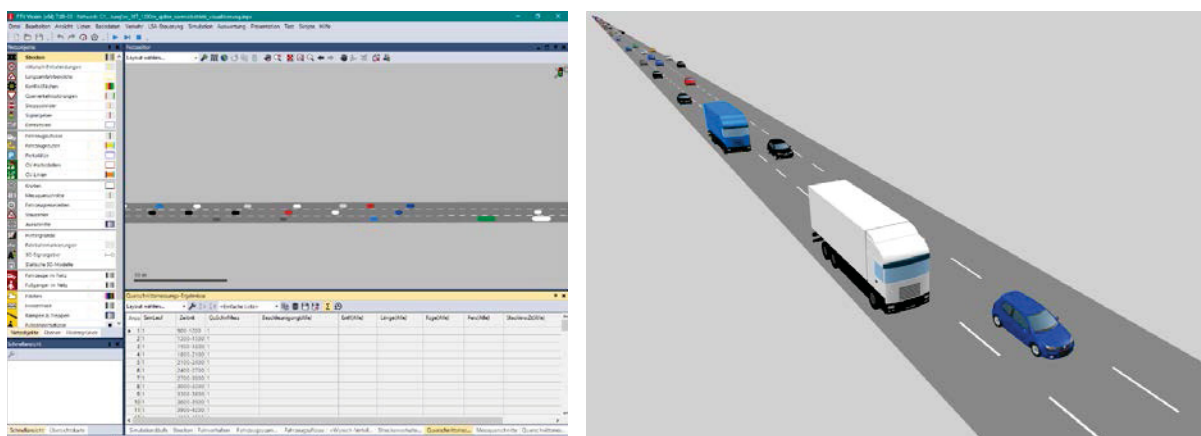


Abbildung 8-11: Arbeitsoberfläche in PTV Vissim

Gegenverkehrstunnel








verkehrliches Betriebsszenario		Kapazität (%)	
Bezeichnung	Schemaskizze	↓	↑
Normalbetrieb		100	100
Geschwindigkeitsreduktion 60 km/h		100	100
Geschwindigkeitsreduktion 40 km/h		95	95
Sperre eines Fahrstreifens		100	0
alternierender RV auf beiden Fahrstreifen		35	35
alternierender RV auf einem Fahrstreifen		35	35
Vollsperrung		0	0

Tabelle 8-8: Kapazität von Gegenverkehrstunneln je Betriebsszenario

Da Tunnel im Gegenverkehrsbetrieb im Netz der Bundesfernstraßen nur bei vergleichsweise geringen Verkehrsstärken zur Anwendung kommen, entstehen im Normalbetrieb sowie bei Geschwindigkeitsreduktion auch bei Ansatz des Spitzenwertes des Verkehrs noch keine Einschränkungen des Verkehrsflusses. Lediglich bei alternierendem Richtungsverkehr ist hier die Restkapazität von 35 % nicht mehr für die bestehende Nachfrage ausreichend, wodurch ein starker Rückstau vor den Portalen entsteht. Die verbleibende Kapazität bei Einsatz eines alternierenden Richtungsverkehrs hängt jedoch sehr stark von der gewählten Dauer der Intervalle sowie der Tunnellänge ab, wodurch hier keine allgemein gültige Aussage getroffen werden kann. Durch das Nutzen beider Fahrstreifen im alternierenden Richtungsverkehr entsteht kaum ein Zugewinn an Kapazität, da bei den betrachteten Modelltunneln mit einer Länge von 400 bzw. 1200 m zu wenig Platz für ausreichend Überholmanöver zur Verfügung steht.

Für die mittlere Verkehrsstärke der Modelltunnel ist bei allen verkehrlichen Betriebsszenarien eine ausreichende Leistungsfähigkeit gegeben.

Die Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h im Normalzustand auf 60 km/h hat kaum Einfluss auf die Kapazität, bei einer Beschränkung auf 40 km/h verbleiben rund 95 % der ursprünglichen Leistungsfähigkeit. Dieser Wert muss klar von vom Fall einer grundsätzlichen Höchstgeschwindigkeit von 40 km/h unterschieden werden, da im Gegensatz dazu bei einer Geschwindigkeitsreduktion die Verringerung der Kapazität aufgrund der Störung des Verkehrsflusses durch zusätzliche Bremsmanöver zum Erreichen der angepassten Fahrgeschwindigkeit auftritt, die sich bei hohem Verkehrsaufkommen mehr und mehr verstärken und bis zum Stillstand führen können. Eine Geschwindigkeitsreduktion führt somit in den meisten Fällen lediglich zu gering ausfallenden Mehrreisezeiten, nicht jedoch zu Kapazitätseinschränkungen.

Bei der Sperre eines Fahrstreifens und Umfahrung des Tunnels ist die Kapazität abhängig von der gewählten Umleitungsstrecke, wobei neben Einschränkungen der Leistungsfähigkeit auch Mehrreisezeiten sowie eine höhere Unfallgefahr aufgrund der meist längeren Strecke und höheren Unfallrate pro Kilometer auftreten können.

Richtungsverkehrstunnel

Konträr zu den Ergebnissen der Tunnel im Gegenverkehrsbetrieb zeigen sich bei den Richtungsverkehrstunneln für das bestehende Verkehrsaufkommen zum Teil deutlich zu geringe Kapazitäten. So entstehen bei den mit dem Spitzenwert der JD TV hochbelasteten Modelltunneln auch bereits im Normalbetrieb erhebliche Einschränkungen des Verkehrsflusses. Durch eine temporäre Freigabe des Seitenstreifens kann hier die Leistungsfähigkeit ausreichend erhöht werden, wie bereits in Kapitel 6 beschrieben, müssen hier jedoch sämtliche Rahmenbedingungen bezüglich der Auslegung betriebstechnischer Ausstattung sowie vorhandener Fahrstreifenbreiten gegeben sein.

Bei den angesetzten Höchstwerten des Verkehrsaufkommens, wie auch die Erfahrung mit den im Berufsverkehr teilweise täglich auftretenden Staus die Problematik direkt zeigt, führt ein Betrieb mit weiteren Einschränkungen, wie er hier untersucht wird, unmittelbar zu noch stärker ausgeprägten und teils gravierenden Störungen im Verkehrsablauf.

Wird als Zufluss nur der mittlere durchschnittliche Verkehr angesetzt, treten im Normalbetrieb sowie bei Beschränkungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit keine Probleme auf. Wie auch bei Tunnel im Gegenverkehrsbetrieb entsteht eine relevante Verringerung der Kapazität durch Geschwindigkeitsreduktion von rund 10 % erst bei einer Beschränkung auf 40 km/h. (s. Tabelle 8-9 und 8-10)

Fahrstreifenreduktionen führen, sowohl auf zweistreifigen (RQ 31 t, 31 T), als auch auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen (36 T) bei beiden angesetzten Verkehrsstärken zwangsläufig zu einer zu geringen Kapazität. Bei der Reduktion von zwei auf einen Fahrstreifen verbleibt eine Leistungsfähigkeit von rund 40 %. Trotz der Halbierung der Fahrstreifenanzahl wird bedingt durch die zahlreichen Verflechtungsvorgänge und damit einhergehender zusätzlicher Fahrstreifenwechsel nur noch weniger als die Hälfte der ursprünglichen Kapazität erreicht. Die Wegnahme eines Fahrstreifens einer dreistreifigen Fahrbahn resultiert in einer Restkapazität von etwa 65 %, verbleibt nur noch ein Fahrstreifen, beträgt sie rund ein Viertel, auch hier aufgrund der Verflechtung.

Ein weiterer Aspekt bezüglich der Fahrstreifenreduktion betrifft neben verkehrlichen Belangen auch das Risikoniveau im Tunnel. Verbleibt aufgrund der teilweisen Sperre lediglich ein Fahrstreifen einer Richtung, so sind Spurwechsel als häufige Unfallursache ausgeschlossen und das Unfallrisiko im Tunnel selbst wird reduziert. Allerdings kommt dieser Effekt aufgrund des kritischen Bereichs der Verflechtung vor dem Tunnel in einer ganzheitlichen Betrachtung kaum zur Geltung.

Wird eine Röhre zur Gänze gesperrt, kann mittels einem Betrieb im Gegenverkehr in der zweiten verbleibenden Röhre zwar die höchstmögliche Kapazität erreicht werden, da dies aufgrund der betriebstechnischen Ausstattung jedoch nicht immer durchgeführt werden kann, verbleibt in vielen Fällen nur noch die Umleitung aller Fahrzeuge einer Richtung über Alternativrouten bzw. der Betrieb im alternierenden Gegenverkehr.

Einen weiteren Grund für die Entscheidung zur Umleitung einer Richtung kann ein zu langer Rückstau vor den Tunnelportalen darstellen, der bis zur nächsten Anschlussstelle zurückreichen und somit sehr großräumige negative verkehrliche Auswirkungen nach sich ziehen würde. Aufgrund dieser Argumentation wurde beispielsweise nach dem Brand im Tunnel Rannersdorf auf der S 1 Wiener Außenring Schnellstraße im April 2019 entschieden, den Verkehr einer Richtung großräumig über das hochrangige Straßennetz umzuleiten.

verkehrliches Betriebsszenario		Kapazität (%)	
Bezeichnung		Schemaskizze	
			↓ ↑
Normalbetrieb	2n + 2n		100 100
Geschwindigkeitsreduktion 60 km/h	2n + 2		100 100
Geschwindigkeitsreduktion 40 km/h	2n + 2		100 90
Sperre eines Fahrstreifens, Geschwindigkeitsreduktion	2n + 1		100 40
Sperre einer Röhre, GV-Betrieb in 2. Röhre 1:1	2 + 0		40 40
Sperre einer Röhre, GV-Betrieb in 2. Röhre 2:1	3 + 0		100 40
Sperre einer Röhre, RV-Betrieb in 2. Röhre	2n + 0		100 0
Sperre einer Röhre, alternierender RV in 2. Röhre	2 + 0		35 35
Vollsperrung	0 / 0		0 0

Tabelle 8-9: Kapazität zweistreifiger Richtungsverkehrstunnel je Betriebsszenario

verkehrliches Betriebsszenario		Kapazität (%)		
Bezeichnung	Schemaskizze	↓	↑	
		Normalbetrieb	3n + 3n	100
Geschwindigkeitsreduktion 60 km/h	3n + 3	100	100	
Geschwindigkeitsreduktion 40 km/h	3n + 3	100	90	
Sperre eines Fahrstreifens Geschwindigkeitsreduktion	3n + 2	100	65	
Sperre zweier Fahrstreifen Geschwindigkeitsreduktion	3n + 1	100	25	
Sperre einer Röhre, GV in 2. Röhre 2:2	4 + 0	65	65	
Sperre einer Röhre, GV in 2. Röhre 2:1	3 + 0	65	25	
Sperre einer Röhre, RV in 2. Röhre	3n + 0	100	0	
Sperre einer Röhre, alternierender RV	3 + 0	38	38	
Vollsperrung	0 + 0	0	0	

Tabelle 8-10: Kapazität dreistreifiger Richtungsverkehrstunnel je Betriebsszenario

Untersuchung eines LKW-Fahrverbotes

Im Zuge der Definition minimaler Betriebsbedingungen erweist sich die Maßnahmenkombination einer Geschwindigkeitsreduktion und eines Fahrverbotes für LKW als effektive Maßnahme, das Risiko vor allem aufgrund der Vermeidung großer Brandlasten signifikant zu senken. Um neben dem Einfluss auf die Personensicherheit auch jenen auf die Kapazität des Netzabschnittes zu beurteilen, werden zusätzliche Simulationen des Verkehrsablaufes mit Berücksichtigung eines LKW-Fahrverbotes durchgeführt. Dabei zeigt sich im Vergleich zu den Untersuchungen mit einem Schwerverkehrsanteil der Modelltunnel von 9 % eine gesteigerte Kapazität von rund 5-6 %.

Die Durchführbarkeit dieser Maßnahme hängt in der Praxis jedoch erheblich von den zur Verfügung stehenden Umleitungsstrecken ab. Hierfür sind in einem weiteren Schritt makroskopische Verkehrssimulationen an realen Beispieltunneln erforderlich, um auch die regionalen verkehrlichen Auswirkungen beurteilen zu können. (s. Kapitel 8.6)

8.6 Grundlagen zur Analyse regionaler verkehrlicher Auswirkungen

Zur Ermittlung indirekter gesamtwirtschaftlicher Kosten aufgrund eingeschränkter verkehrlicher Betriebsszenarien reicht eine Untersuchung anhand von Beispieletunneln nicht aus, hier ist eine objekt- und standortbezogene Betrachtung unter Berücksichtigung aller individuellen Rahmenbedingungen anhand geeigneter Beispieletunnel erforderlich. Mithilfe dieser können unter Anwendung makroskopischer Verkehrssimulationen die Auswirkungen im Straßennetz auf regionaler Ebene analysiert und bewertet werden. Diese Bewertung basiert auf drei grundsätzlichen Zielsystemen, welchen jeweils aussagekräftige Indikatoren zugeordnet werden:

Zielsystem	Regionalwirtschaft	Umwelt	Schutz von menschlichem Leben und Schutzgütern
Indikator	Mehrreisezeit	Luftschadstoff- und Klimagasemissionen	Unfallgeschehen

Tabelle 8-11: Zielsysteme und zugehörige Indikatoren

Die Einflüsse der einzelnen Indikatoren werden aggregiert, um so die gesamtwirtschaftlichen Kosten in Abhängigkeit der Dauer der eingeschränkten verkehrlichen Betriebsszenarien zu erhalten.

Als Beispieletunnel werden der Tunnel Pfaffenstein an der A93 in Regensburg und die Einhausung Bayreuth an der A9 gewählt. Aufgrund ihrer Bedeutung im Autobahnnetz Bayerns sind diese beiden Bauwerke ideal geeignet. Zudem können anhand dieser Richtungsverkehrstunnel mit unterschiedlichen Regelquerschnitten auch verschiedene verkehrliche Betriebsszenarien näher analysiert werden. Der Tunnel Pfaffenstein ist mit zwei Fahrstreifen pro Richtung ausgestattet und besitzt keinen Seitenstreifen, während die Einhausung Bayreuth dreistreifig mit Seitenstreifen ausgebildet ist.

Die Analysen werden für die in den Tabellen 8-12 und 8-13 dargestellten verkehrlichen Betriebsszenarien durchgeführt. Bei deren Auswahl ist neben der Praxisrelevanz besonderer Wert auf ausreichende Variabilität zu legen, um so auch markante und mithilfe des Modells abbildbare Unterschiede herausarbeiten zu können. Zur Schaffung einer Vergleichsbasis wird zuerst stets der Normalbetrieb analysiert, für die nachfolgend untersuchten eingeschränkten Betriebsszenarien können mittels Gegenüberstellung dazu die auftretenden gesamtwirtschaftlichen Kosten beziffert werden. Die Ergebnisse der mikroskopischen Verkehrssimulation dienen hier als Grundlage, da sie die in Relation zum Normalbetrieb verbleibenden Restkapazitäten der Betriebsszenarien je Richtung als wesentlichen Eingabeparameter zur Verfügung stellen. Wie in Kapitel 8.5 beschrieben, wurde mittels mikroskopischer Simulationen auch ein LKW-Fahrverbot untersucht. Da die Durchführbarkeit dieser Maßnahme jedoch in erster Linie von den zur Verfügung stehenden Umfahungsstrecken abhängig ist, wird auch dieses Szenario auf makroskopischer Ebene unter Miteinbeziehung des umliegenden Straßennetzes analysiert. Ebenso mit aufgenommen wird die Simulation und Untersuchung der Auswirkungen eines reinen PKW-Fahrverbotes, während der LKW-Verkehr den Tunnel weiter normal nutzt. Wie aus den

Betreiberinterviews hervorging, besteht zum Teil erheblicher Druck der Industrie, die Verfügbarkeit von Straßentunneln als wichtigen Bestandteil ihrer Lieferrouten aufrechtzuerhalten. Um die Vorteile eines Seitenstreifens aufzuzeigen, wird weiters im Tunnel Pfaffenstein das hypothetische Szenario einer 4+0 Verkehrsführung unter der Annahme eines um einen Seitenstreifen erweiterten Querschnitt untersucht.



verkehrliches Betriebsszenario			Kapazität (%)		
Nr.	Bezeichnung		Schemaskizze	↓	↑
1	Normalbetrieb 80 km/h	$2n + 2n$		100	100
2	Vollsperrung beider Richtungen	$0 + 0$		0	0
3	Sperre einer Röhre, GV in 2. Röhre 1:1, 60 km/h	$2 + 0$		40	40
4	Sperre einer Röhre, GV in 2. Röhre 2:2, 60 km/h	$4s + 0$		100	100
5	Sperre einer Röhre, RV in 2. Röhre	$2n + 0$		100	0
6	Sperre eines Fahrstreifens, 60 km/h	$2n + 1$		100	40
7	LKW-Fahrverbot in einer Richtung	$2n + 2$		100	100
8	PKW-Fahrverbot in einer Richtung	$2n + 2$		100	100

Tabelle 8-12: untersuchte verkehrliche Betriebsszenarien im Tunnel Pfaffenstein









verkehrliches Betriebsszenario			Kapazität (%)		
Nr.	Bezeichnung		Schemaskizze	↓	↑
1	Normalbetrieb 100 km/h	$3n + 3n$		100	100
2	Vollsperrung beider Richtungen	$0 + 0$		0	0
3	Sperre einer Röhre, GV in 2. Röhre 2:2, 60 km/h	$4 + 0$		65	65
4	Sperre einer Röhre, GV in 2. Röhre 2:1, 60 km/h	$3 + 0$		65	25
5	Sperre einer Röhre, RV in 2. Röhre	$3n + 0$		100	0
6	Sperre eines Fahrstreifens, 60 km/h	$3n + 2$		100	65
7	LKW-Fahrverbot in einer Richtung	$3n + 3$		100	100
8	PKW-Fahrverbot in einer Richtung	$3n + 3$		100	100

Tabelle 8-13: untersuchte verkehrliche Betriebsszenarien der Einhausung Bayreuth

Die Durchführung und Auswertung der makroskopischen Verkehrssimulationen sind nicht mehr Bestandteil der vorliegenden Arbeit, die bisherigen Ergebnisse dieses Kapitels stellen jedoch die Basis der nachfolgenden Analysen regionaler verkehrlicher Auswirkungen dar. Zum besseren Verständnis werden in Abbildung 8-12 exemplarische Ergebnisse einer Verkehrssimulation auf makroskopischer Ebene am Beispiel der Sperrung einer Tunnelröhre am deutschen Bundesfernstraßennetz gezeigt. Dafür kommt eine sogenannte Differenzdarstellung zum Einsatz, die direkt in einer Kartendarstellung Änderungen im Verkehrsfluss, sowohl kleinräumig, als auch im großen Maßstab, abbildet. Die Farbe Rot signalisiert dabei eine Verkehrszunahme, Grün eine Entlastung.

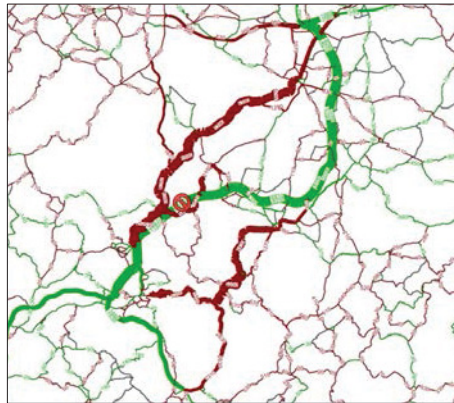


Abbildung 8-12: regionale verkehrliche Auswirkungen anhand einer exemplarischen Differenzdarstellung [34]

9 Empfehlungen im Hinblick auf Resilienzmaßnahmen

Definition Resilienzmaßnahmen

Unter Resilienzmaßnahmen werden sämtliche technischen, organisatorischen und verkehrlichen Maßnahmen verstanden, die über die Vorgaben geltender Regelwerke hinausgehen und eine Steigerung der Resilienz zum Ziel haben.

9.1 Resilienzmaßnahmen und deren Kategorisierung

Sämtliche Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz werden einer der Phasen des Resilienzkreislaufs zugeordnet, wobei der Zeitpunkt des Entfaltens ihrer Wirkung, nicht jener der Implementierung der Maßnahme, entscheidend ist.

Wie in der Definition beschrieben wird eine grundsätzliche Unterscheidung zwischen technischen, organisatorischen und verkehrlichen Maßnahmen getroffen. In dieser Form kategorisiert werden in Tabelle 9-1 exemplarisch mögliche Resilienzmaßnahmen aufgezeigt und auf den darauffolgenden Seiten näher beschrieben.

Diese beruhen häufig auf bereits bestehenden Ansätzen, werden jedoch im Sinne der Resilienz auf eine neue Art und Weise betrachtet sowie vor allem bewertet. Entscheidend dabei ist der ganzheitliche Blickwinkel, um vorhandene Maßnahmen effizient und zielgerichtet einsetzen zu können.

Einige der Maßnahmen dienen in erster Linie der Personensicherheit, welche von reinen Resilienzmaßnahmen unterschieden werden müssen. Nichtsdestotrotz entstehen dabei zum Teil auch positive Effekte auf die Verfügbarkeit von Straßentunneln bzw. können sie helfen, unter Einhaltung der minimalen Betriebsbedingungen das Mindestsicherheitsniveau nach einem Ereignis weiterhin sicherzustellen und folglich den Verkehrsfluss zumindest teilweise aufrechterhalten zu können.

Auch Praxiserfahrungen zeigen bereits deutlich die mögliche Wirksamkeit von Resilienzmaßnahmen. Großbrandereignisse wie jene in Deutschland im Tunnel Königshainer Berge an der BAB 4 zwischen Dresden und Görlitz im Jahr 2013 und im österreichischen Gleinalmtunnel an der Pyhrnautobahn A 9 im Jahr 2018 hatten jeweils eine mehrmonatige Sperrung aufgrund erheblicher Schäden, sowohl am Bauwerk, als auch an der betriebstechnischen Ausstattung, zur Folge. Die in Millionenhöhe entstandenen direkten Kosten aufgrund der Schäden am Tunnel wurden dabei von indirekt auftretenden Kosten bedingt durch die hohe Belastung der Umleitungsstrecken, Mehrreisezeiten oder auch den Mautentgang deutlich übertroffen. Im Gegensatz dazu konnte durch den effizienten Einsatz einer automatischen Brandbekämpfungsanlage im Arlberg-Straßentunnel in Österreich ein Brand vergleichbaren Ausmaßes rasch eingedämmt und sowohl Personen-, als auch Bauwerksschäden zur Gänze vermieden werden. Damit war die Freigabe für den Verkehr und Wiederherstellung der vollen Verfügbarkeit bereits nach wenigen Stunden möglich. Hier zeigt sich der positive Einfluss nicht nur in der erheblichen Steigerung der Nutzersicherheit, sondern aus dem Blickwinkel der Resilienz insbesondere auch in der äußerst raschen Rückkehr zur ursprünglichen Funktionalität.

Resilienzmaßnahmen				
Resilienz- phase	technisch	organisatorisch	verkehrlich	
prepare	<ul style="list-style-type: none"> ○ Frühwarnsysteme ○ Thermoscanner ○ Gefahrguterkennung ○ größere lichte Durchfahrtshöhe ○ Anprallschutz ○ redundante Systeme (z.B. Notstromaggregat, redundante Pumpen, redundante TLZ) ○ automatische Brandbekämpfungsanlagen ○ baulicher Brandschutz ○ zweischalige Bauweise ○ Detektionssysteme: z.B. Videodetektion, akustisches Tunnelmonitoring, Rauchdetektion 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Überwachung aller Tunnel in TLZ, auch bei Länge < 400m ○ Sensibilisierung der Tunnelnutzer ○ intensive Zutrittsüberwachung und -kontrolle 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Verkehrsüberwachung ○ dynamische Verkehrsbeeinflussung ○ teilweise Fahrverbote 	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ effektive Sperranlage des Tunnels ○ Verkürzung der Notausgangsabstände 	<ul style="list-style-type: none"> ○ regelmäßige Instandhaltung ○ Feuerwehrbereitschaft vor Ort 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Gefahrenwarnung für Tunnelnutzer 	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ausstattung von RV-Tunneln für den GV-Betrieb ○ Querschnitte mit Seitenstreifen ○ provisorische Wiederherstellung nicht funktionsfähiger Komponenten 	<ul style="list-style-type: none"> ○ rascher und effizienter Einsatz der Rettungskräfte ○ Bauwerksschutz durch Rettungskräfte ○ informieren der Tunnelnutzer zu Verhalten im Ereignisfall ○ Notfallpläne und Übungen ○ Schulung Personal ○ klare und transparente Zuständigkeiten bzw. Verantwortlichkeiten ○ Vorhalten von Ersatzteilen ○ Verwenden modularer Systeme ○ betriebseigenes Personal vor Ort ○ Definition minimaler Betriebsbedingungen ○ effiziente Schadensbeurteilung ○ beschleunigte Baubewilligungen nach Ereignissen 	<ul style="list-style-type: none"> ○ dynamische Verkehrsbeeinflussung 	
				<ul style="list-style-type: none"> ○ alternative Verkehrsträger ○ optimierte Verkehrsführung im Tunnel ○ optimierte Alternativrouten und Umleitungsstrecken

Tabelle 9-1: Kategorisierung von Resilienzmaßnahmen

PREVENT
technisch
Frühwarnsysteme: z.B. für Naturgefahren wie Hochwasser, um eine angemessene Reaktion und Vorbereitung frühzeitig zu ermöglichen
Thermoscanner: Detektion überhitzter Fahrzeuge bzw. Fahrzeugteile, um durch sofortige Sperrung Brände im Tunnel zu vermeiden
Gefahrguterkenennung: verhindern des Befahrens des Tunnels von Fahrzeugen mit bestimmten Gefahrgütern
größere lichte Durchfahrtshöhe: Wie aus den Betreiberinterviews hervorging, entstehen aufgrund des Unterschieds der minimalen lichten Höhe der freien Strecke und in Tunneln immer wieder Probleme aufgrund der Höhenkontrolle bzw., wenn diese nicht vorhanden ist, mit dem Anprall an der Tunnelausstattung. Mit dem Angleichen der lichten Durchfahrtshöhen können Probleme dieser Art deutlich reduziert werden.
Anprallschutz: Die Installation eines massiven Anprallschutzes direkt am Einfahrtsportal eines Straßentunnels unterbindet das Einfahren unzulässig hoher Fahrzeuge und folglich die Beschädigung betriebstechnischer Ausstattungselemente oberhalb des Lichtraumprofils.
organisatorisch
Überwachung aller Straßentunnel in TLZ: Die RABT fordern eine Überwachung von Tunneln in einer ständig besetzten Stelle nur bei einer Länge von über 400 m. Die statistische Auswertung deutscher Straßentunnel in Kapitel 3.1 hat jedoch gezeigt, dass die Hälfte der bestehenden Anlagen eine Länge von unter 400 m aufweisen. Das Potential einer effektiveren Überwachung und somit auch Steuerung ist hier folglich sehr groß.
Sensibilisierung der Tunnelnutzer: siehe Kapitel 9.3
intensive Zutrittsüberwachung und -kontrolle: Der Straßentunnel an sich als öffentlicher Verkehrsraum ist im Normalbetrieb zur Gänze zugänglich, das Betriebsgebäude, die ständig besetzte Stelle und sonstige betriebsrelevante Einrichtungen hingegen sind im Hinblick auf vorsätzlich ausgeführte Handlungen (s. Kap 4.1) vor unbefugtem Zutritt effektiv und systematisch zu schützen.
verkehrlich
Verkehrsüberwachung und dynamische Verkehrsbeeinflussung: Wird der Verkehrszustand stets überwacht, können Probleme rasch erkannt und angemessen darauf reagiert werden, bzw. können diese durch frühzeitige Maßnahmen vermieden werden.
teilweise Fahrverbote: Dürfen bestimmte Fahrzeuggruppen (z.B. LKW, Gefahrguttransporte) den Tunnel nicht befahren, können viele Risiken ausgeschlossen bzw. minimiert werden. Diese Maßnahme ist in der Regel jedoch nur temporär einzusetzen.

PROTECT
technisch
<p>redundante Systeme: Hier ist grundsätzlich auf eine regelmäßige Funktionsüberprüfung zu achten, da redundante Systeme nur selten zum Einsatz kommen, im Bedarfsfall aber rasch und zuverlässig arbeiten müssen.</p> <p>Notstromaggregat: Gemäß RABT müssen Straßentunnel mit einer USV-Anlage ausgestattet sein. Diese ist mit einer Stunde jedoch zeitlich nur stark begrenzt einsatzfähig und kann einige wesentliche Ausstattungskomponenten, allen voran die Lüftung, nicht versorgen, weshalb hier der Einsatz leistungsfähiger Notstromaggregate Abhilfe schaffen kann.</p> <p>Pumpen: Im Fall starker Regenereignisse ist bei Tunneln mit Tiefpunkten ein funktionierendes Pumpensystem von großer Bedeutung, die Anordnung redundanter Anlagen kann die Ausfallsicherheit im Ereignisfall deutlich erhöhen.</p> <p>Tunnelleitzentrale: Ist die Verbindung einer ständig besetzten Stelle zu einem oder mehreren Tunneln unterbrochen, kann eine andere redundante TLZ die Aufgaben der Überwachung und Steuerung dieser Tunnel gleichwertig übernehmen und somit der Betrieb aufrechterhalten bleiben.</p>
<p>automatische Brandbekämpfungsanlagen: Die in Kapitel 9.1 beschriebenen Praxisbeispiele zeigen die Möglichkeiten automatischer Brandbekämpfungsanlagen, zum Beispiel in Form von Hochdruckwassernebelanlagen (HDWNA), deutlich auf. Aufgrund der enorm hohen Investitions-, aber auch Wartungs- und Betriebskosten kommen diese bislang jedoch nur äußerst selten zum Einsatz.</p>
<p>baulicher Brandschutz, zweischalige Bauweise: erhöhter Schutz im Brandfall</p>
<p>Detektionssysteme: z.B. Videodetektion, akustisches Tunnelmonitoring, Rauchdetektion Eine rasche und exakte Detektion sicherheitsrelevanter Ereignisse stellt die frühzeitige Einleitung entsprechender weiterer Maßnahmen sicher.</p>
organisatorisch
<p>regelmäßige Instandhaltung: Befindet sich das Tunnelbauwerk sowie dessen betriebstechnische Ausstattung durch regelmäßige Instandhaltungsarbeiten in einem einwandfreien Zustand, wird das Schadenspotential infolge disruptiver Ereignisse reduziert.</p>
<p>Feuerwehrebereitschaft vor Ort: temporäre Maßnahme, wenn ein erhöhtes Brandrisiko aufgrund aktuell vorliegender Umstände besteht</p>
verkehrlich
<p>Gefahrenwarnung: Werden die Tunnelnutzer vor aktuell bestehenden Gefahren gewarnt, sind sie besser darauf vorbereitet und aufmerksamer, wodurch die Verkehrssicherheit positiv beeinflusst und das Unfallrisiko gesenkt wird.</p>

RESPOND
technisch
effektive Sperranlage: verhindert, dass im Ereignisfall zusätzliche Personen in den Tunnel und damit in den Gefahrenbereich gelangen
Verkürzung der Notausgangsabstände: Insbesondere bei Einhausungen, wenn die beiden Röhren lediglich durch eine Wand getrennt sind, können die Notausgangsabstände mit vergleichsweise geringem Aufwand kurz gestaltet und damit die Fluchtwege erheblich verkürzt werden.
organisatorisch
rascher und effizienter Einsatz der Rettungskräfte: Optimierung der Alarmierung, der Zufahrt, der Kommunikation vor Ort sowie der Vernetzung verschiedener Einsatzdienste
Bauwerksschutz durch Rettungskräfte: Der Fokus bleibt klar auf der Fremdrettung, zusätzlich kann aber auch ein positiver Einfluss auf die rasche Wiederherstellung der Funktionalität genommen werden, indem die Einsatzkräfte den Bauwerksschaden, beispielsweise durch aktives Kühlen von Betonoberflächen im Brandfall, möglichst gering halten.
informieren der Tunnelnutzer zu Verhalten im Ereignisfall: Neben der Information an die Verkehrsteilnehmer direkt vor Ort im Ereignisfall, zum Beispiel über die Lautsprecher, können auch mittels langfristiger Maßnahmen Verbesserungen erzielt werden. So kann das richtige Verhalten der Tunnelnutzer beispielsweise bereits in Fahrschulen thematisiert werden, um damit eine große Anzahl an Personen zu erreichen.
Notfallpläne und Übungen: systematische Vorbereitung auf außergewöhnliche Ereignisse, z.B. Großbrand, Black Out
Schulung Personal: standardisierte Schulungen der Operatoren in den ständig besetzten Stellen und der Einsatzkräfte
klare und transparente Zuständigkeiten bzw. Verantwortlichkeiten: Um eine effiziente Abwicklung aller zu treffenden Maßnahmen zu gewährleisten, müssen sämtliche Aufgaben klar zugeordnet werden. Nur so kann im Ereignisfall entsprechend rasch eingegriffen und die Funktionalität möglichst aufrechterhalten bleiben.
verkehrlich
dynamische Verkehrsbeeinflussung: kontrolliertes Eingreifen in den Verkehrsfluss, um die Auswirkungen nach disruptiven Ereignissen zu reduzieren

RECOVER
technisch
<p>Ausstattung von RV-Tunneln für den GV-Betrieb: Die Flexibilität wird durch das Schaffen zusätzlicher Möglichkeiten der Verkehrsführung erhöht. Umleitungen, die häufig durch Stadtgebiete verlaufen, können somit in vielen Fällen vermieden werden.</p>
<p>Querschnitte mit Seitenstreifen: Neben der besseren Zugänglichkeit des Tunnels für Einsatzdienste ermöglicht die Anordnung eines Seitenstreifens je nach Regelquerschnitt zusätzliche Verkehrsführungen, wie beispielsweise 4+0. Damit kann die Kapazität eingeschränkter Betriebsszenarien zum Teil deutlich erhöht und folglich der Verlust an Funktionalität nach disruptiven Ereignissen wesentlich reduziert werden. (siehe auch Kapitel 8.5 und 8.6)</p>
<p>provisorische Wiederherstellung nicht funktionsfähiger Komponenten: Um den Betrieb, wenn auch unter Einschränkungen, so rasch wie möglich wieder aufzunehmen, können beschädigte Ausstattungselemente temporär und provisorisch angeordnet werden, bis die Instandsetzung abgeschlossen ist und die fix installierten Komponenten voll einsatzfähig sind. So wurden zum Beispiel im österreichischen Tunnel Rannersdorf nach dem Brand im April 2019 die Notrufeinrichtungen, Videoüberwachung sowie Brandmeldeanlagen provisorisch ersetzt, um den Betrieb nach vier Wochen wieder teilweise aufnehmen zu können. [35]</p>
organisatorisch
<p>Vorhalten von Ersatzteilen: Ermöglicht den unverzüglichen Ersatz nicht funktionsfähiger Komponenten, wobei auch die Ersatzteile einer Alterung unterliegen und eine regelmäßige Wartung erfordern.</p>
<p>Verwenden modularer Systeme: Die Vorteile der Ersatzteilkhaltung kommen durch die Verwendung modularer Systeme noch stärker zur Geltung, da diese so für mehrere Objekte eingesetzt werden können.</p>
<p>betriebseigenes Personal vor Ort: Betriebseigenes Personal, z.B. Betriebselektriker, verschafft im Ereignisfall eine rasche Einsatzfähigkeit aufgrund der höheren Verfügbarkeit im Vergleich zum Einsatz von Fremdfirmen. Zudem verfügt solch ein Personal durch die umfassende Erfahrung mit den in ihrem Zuständigkeitsbereich liegenden Tunnelbauwerken über ein ausgeprägtes objektspezifisches Wissen mit allen seinen Besonderheiten.</p>
<p>Definition minimaler Betriebsbedingungen: Diese zeigen ihre positive Wirkung durch das Schaffen von Handlungssicherheit im Betrieb von Straßentunneln bei vorhandenen Schäden an sicherheitsrelevanten betriebstechnischen Einrichtungen.</p>
<p>effiziente Schadensbeurteilung: Wie im Kapitel 7.5 beschrieben, ist die Voraussetzung der Anwendung minimaler Betriebsbedingungen die Kenntnis aufgetretener Schäden. Aus diesem Grund begünstigt eine effiziente Schadensbeurteilung deren rascheren Einsatz.</p>
<p>beschleunigte Baubewilligungen nach Ereignissen: Sind aufgrund eines Schadensszenarios umfangreiche Arbeiten erforderlich, kann die Vorlaufzeit dafür durch die beschleunigte Abwicklung von Baubewilligungen für Instandsetzungsarbeiten nach disruptiven Ereignissen verkürzt werden.</p>

RECOVER
verkehrlich
<p>alternative Verkehrsträger: Nimmt die Schadensbehebung lange Zeit in Anspruch (mehrere Monate) und ist der Tunnel während dieser Zeit nicht oder nur stark eingeschränkt befahrbar, entstehen neben den verkehrlichen Auswirkungen am Straßennetz selbst auch intermodale Konsequenzen. Daher spielen hier Ausweichmöglichkeiten auf alternative Verkehrsträger ebenso eine wesentliche Rolle in der Aufrechterhaltung der Mobilität der Menschen.</p>
<p>optimierte Verkehrsführung im Tunnel: Planung von objektspezifisch angepassten optimierten Verkehrsführungen im Tunnel bzw. dem gesamten Netzelement, um die Kapazität möglichst aufrechtzuerhalten</p>
<p>optimierte Alternativrouten und Umleitungsstrecken: Im Fall einer Vollsperrung des Tunnels sind mögliche Alternativrouten und Umleitungsstrecken frühzeitig zu planen und eventuell an die verkehrlichen Erfordernisse anzupassen.</p>

9.2 Bewertung von Resilienzmaßnahmen

Der Möglichkeit einer Bewertung der Resilienz kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie die Grundlage zur Beurteilung der Zweckmäßigkeit bzw. Verhältnismäßigkeit von Investitionskosten in über die Anforderungen geltender Regelwerke hinausgehende Resilienzmaßnahmen schafft.

Die Wirkung der Resilienzmaßnahmen auf den Verlauf der Funktionalitätskurve kommt in zwei Ebenen zur Geltung, dargestellt mit den beiden grünen Pfeilen in Abbildung 9-1:

- vertikal: Reduktion des Funktionalitätsverlustes ΔF
- horizontal: Reduktion der Einwirkungs- und Wiederherstellungsdauer Δt

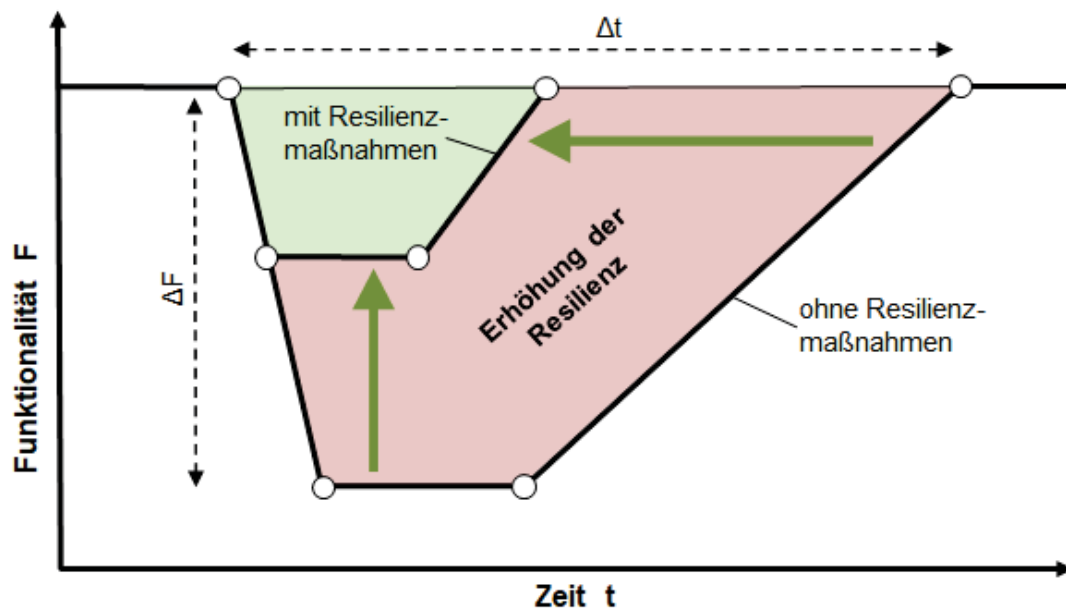


Abbildung 9-1: Wirkung von Resilienzmaßnahmen auf den Verlauf der Funktionalitätskurve, in Anlehnung an [36]

Die Resilienz kann als das Integral des Funktionalitätsverlustes über die Zeit betrachtet werden. Mithilfe von Resilienzmaßnahmen wird diese Fläche verkleinert, dementsprechend kann eine Bewertung der Wirksamkeit dieser im Vergleich zum ursprünglichen Zustand erfolgen. Um solch eine Berechnung praxistauglich durchführen zu können, wird der Verlauf der Funktionalitätskurve in einer idealisierten Form dargestellt, wie dies in Abbildung 9-1 exemplarisch dargestellt ist. Ferner kann die Resilienz auch durch eine Reduktion der Eintrittswahrscheinlichkeit disruptiver Ereignisse gesteigert werden.

Die Funktionalität ist über Zielgrößen definiert, in der vorliegenden Arbeit die Verfügbarkeit im Sinne einer möglichst hohen verkehrlichen Kapazität. In Kapitel 1.3 wurden bereits Möglichkeiten einer Erweiterung zu einer Kombination mehrerer zu berücksichtigender Parameter genannt. Werden verschiedene Zielgrößen zur Definition der Funktionalität miteinbezogen, muss diesen in Abhängigkeit der vorliegenden spezifischen Anforderungen jeweils eine Gewichtung zugeordnet werden.

9.3 Ausblick: Umsetzung der Resilienz in der Praxis

Voraussetzung eines nachhaltigen und effizienten Resilienzmanagements ist die Berücksichtigung des Resilienzgedankens nicht nur im Betrieb, sondern insbesondere auch bereits im Zuge der Planungs- und Bauphase. Langfristig muss das Ziel zudem sein, das Konzept in Regelwerken zu etablieren und besonders wirkungsvolle Maßnahmen schon hier zu berücksichtigen. Die Resilienzmaßnahmen dürfen sich dabei nicht bloß auf die Objektebene mit einzelnen isolierten Tunnelbauwerken beschränken, die Betrachtung muss auch die Netzebene und somit das gesamte Straßennetz in einer bestimmten Region miteinbeziehen.

Neben der Sicherheit, welche unumstritten den wesentlichsten Parameter und die Grundvoraussetzung sämtlicher weiterer Überlegungen darstellt, soll die Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur verstärkt in den Fokus der Eigentümer, Betreiber und Politik rücken. Erst mit einem deutlich ausgeprägten Bewusstsein für die Resilienz können durch gezielt eingesetzte Maßnahmen die positiven Effekte und Wirkungen vollständig zur Geltung kommen.

Neben der Vielzahl an Maßnahmen, die jene Personen betreffen, welche direkt mit den entsprechenden Systemen arbeiten und demzufolge einen tiefergehenden Einblick haben, sind im Sinne einer holistischen Betrachtung der Resilienz nicht zuletzt auch die Nutzer der Straßenverkehrsinfrastruktur miteinzubeziehen. Hier kommt dem direkten Dialog auf Augenhöhe und einer klaren Kommunikation der Informationen eine wesentliche Bedeutung zu, um so die Gesellschaft für die entsprechenden Themen zu sensibilisieren und die Entwicklung einer stärker ausgeprägten Sicherheitskultur bzw. eines deutlichen Resilienzbewusstseins zu fördern. So ging aus den Betreiberinterviews zum Beispiel hervor, dass im Falle einer Tunnelsperre das Rotlicht der Lichtsignalanlage vor den Portalen für oft mehrere Minuten missachtet wird, die Verkehrsteilnehmer den Tunnel trotz Sperre befahren und damit sich selbst oder andere leicht vermeidbaren Gefahrensituationen aussetzen.

Die Quantifizierung der Resilienz ist ein essentielles Instrument zur erfolgreichen Argumentation gegenüber Entscheidungsträgern. Noch deutlicher wird der Nutzen jedoch anhand erfolgreich umgesetzter Projekte mit einer Implementierung nachweislich effizienter Resilienzmaßnahmen aufgezeigt. Organisatorische Maßnahmen stoßen dabei grundsätzlich auf größere Akzeptanz, in erster Linie, da sie mit geringeren Kosten verbunden sind als technische Aufrüstungen oder Anpassungen. Zudem können sie häufig in kürzerer Zeit zur Umsetzung kommen.

Die Erkenntnisse vorangegangener Forschung, dieser Arbeit und auch die Einschätzungen der Betreiber in den Interviews zeigen deutlich das große Potential des Resilienzkonzepts. Durch die Erweiterung bereits bestehender Methoden und Instrumente zu einer ganzheitlichen Betrachtung im Sinne der Resilienz kann die Verfügbarkeit von Straßentunneln und daraus resultierend größerer Verkehrsnetze effizient und langfristig gesteigert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Krieger, B. Kohl, J. M. de Brito und J. Spousta, „AllTraIn - All-Hazard Guide für Transportinfrastrukturen,“ Europäische Kommission, 2013-2015.
- [2] J. Krieger, B. Kohl, M. Zibert und D. Dolenc, „SecMan - Sicherheitshandbuch für die europäische Straßeninfrastruktur,“ Bergisch Gladbach, 2013.
- [3] „ISO/IEC Guide 73, Risk management - Vocabulary,“ Genf, 2009.
- [4] K. Thoma, „Resilien-Tech. 'Resilience-by-Design': Strategie für die technologischen Zukunftsthemen. acatech Studie,“ acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2014.
- [5] „RESILENS - Realising European ReSILIENCE for Critical INfraStructure,“ <http://www.resilens.eu>, 2015-2017.
- [6] E. Hollnagel, Resilience Engineering in Practice. A Guidebook, Farnham: Ashgate, 2011.
- [7] M. Bruneau, „A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities,“ Earthquake Spectra, Volume 19, No. 4, 2003.
- [8] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Bundesverkehrswegeplan 2030,“ Berlin, 2016.
- [9] Bundesanstalt für Straßenwesen, „Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2015, Heft V 304,“ Carl Schünemann Verlag, Bergisch Gladbach, 2018.
- [10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, „RABT - Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln,“ FGSV, Köln, 2006.
- [11] B. Kohl, H. Kammerer, R. Leucker, F. Leismann, A. Mühlberger und P. Gast, „Bericht zum Forschungsprojekt FE: 15.0563/2012/ERB Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln,“ Carl Schünemann Verlag, Bergisch Gladbach, 2017.
- [12] Bundesanstalt für Straßenwesen, „Sicherheit geht vor, Straßentunnel in Deutschland,“ Bergisch Gladbach, 2017.
- [13] ILF Consulting Engineers, Harald Kammerer, „TUSI - Innovationslehrgang Tunnelsicherheit,“ Leoben, 2018.
- [14] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Deutschland, „Straßenverkehrs-Ordnung (StVO),“ 2017.
- [15] „ISO/IEC 31010:2009 Risk management - Risk assessment techniques,“ Genf, 2009.
- [16] CETU - Centre d'Études des Tunnels, „Definition of Safety Functions, Application to degraded operating modes and minimum operating requirements,“ Bron, 2014.
- [17] CETU - Centre d'Études des Tunnels, „Guide to Road Tunnel Safety Documentation, Booklet 5, Emergency Response Plans,“ Bron, 2006.
- [18] FSV - Forschungsgesellschaft Straße - Schiene- Verkehr, „Anwendungshinweise zur RVS 09.04.11: Minimale Betriebsbedingungen, Arbeitspapier Nr. 32,“ Wien, 2018.
- [19] ASTRA - Bundesamt für Straßen, „Minimale Anforderungen an den Betrieb - Straßentunnel,“ Dokumentation ASTRA 86053, Bern, 2013.

-
- [20] ASTRA - Bundesamt für Straßen, „Operative Sicherheit Betrieb,“ Richtlinie ASTRA 16050, Bern, 2018.
- [21] Europäische Eisenbahnagentur, „Leitlinie zur Anwendung der CSM-Verordnung,“ Valenciennes, 2009.
- [22] A. Lentz, „Auswertung der ASFINAG-Tunnelbrandstatistik 2006-2012,“ Linz, 2013.
- [23] FSV - Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, „RVS 09.03.11 Tunnelrisikoanalysemodell,“ Wien, 2015.
- [24] K. Erlemann, „Objektorientierte mikroskopische Verkehrsflussimulation,“ Bochum, 2007.
- [25] PTV AG, „PTV Vissim 7 Benutzerhandbuch,“ Karlsruhe, 2014.
- [26] S. Müller, „Makroskopische Verkehrsmodellierung mit der Einflussgröße der Telematik,“ Berlin, 2012.
- [27] H. Werdin, H. Honermann, R. Laube und I. Belopitov, „Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Autobahnen,“ Zürich, 2004.
- [28] FSV - Forschungsgesellschaft Straße - Schiene- Verkehr, „RVS 03.01.11 Beurteilung des Verkehrsablaufs auf Straßen,“ Wien, 2012.
- [29] M. Cik, M. Fellendorf, R. Fenzl, E. Gaube und G. Kribernegg, „Optimiertes Dimensionierungsverfahren für Autobahnknoten OKIMAK,“ Wien, 2014.
- [30] A. Sümmermann, „Verkehrssicherheits- und Verkehrsablaufuntersuchungen in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Autobahnen in Deutschland,“ Aachen, 2012.
- [31] W. Brilon, A. Weinert und N. Wu, „Verkehrstechnische Untersuchung der Verkehrsbeeinflussungsanlage A 44. Schlussbericht zum Forschungsprojekt,“ Landschaftsverband Westfalen-Lippe, 2000.
- [32] N. von der Heiden, „Kapazität und Verkehrsablauf in Arbeitsstellen auf Autobahnen,“ Bochum, 2017.
- [33] Bundesministerium für Verkehr, „RSA - Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen,“ Verkehrsblatt-Verlag, 1995.
- [34] „Verbundprojekt SKRIBT, Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen, Bericht zu Verfahren zur Identifizierung kritischer Bauwerke,“ Europäische Kommission, 2011.
- [35] ASFINAG, 15 Mai 2019. [Online]. Available: <https://www.asfinag.at/ueberuns/newsroom/pressemitteilungen/2019/sanierung-brandschaeden-s-1-tunnel-rannersdorf/>. [Zugriff am 28 August 2019].
- [36] G. Mayer, S. Großmann, F. Roth, C. Zulauf, B. Kohl, H. Kammerer und A. Dahl, „Resilienz der Straßenverkehrsinfrastruktur - Stand der Forschung und Potentiale im Management von außerwöhnlichen Ereignissen,“ 2. Zwischenbericht; FE 01.0199/ARB/2017, 2019.
- [37] K. Schinagl und G. Christöfl, „Temporäre Gegenverkehrsführung A9 Phyrn Autobahn - Plabutschunnel,“ Bergisch Gladbach, 2018.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
GV	Gegenverkehr
RV	Richtungsverkehr
RQ	Regelquerschnitt
JDTV	jahresdurchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in Kfz/24h
MSV	maßgebende stündliche Verkehrsstärke in Kfz/h
Kfz	Kraftfahrzeug
PKW	Personenkraftwagen
LKW	Lastkraftwagen, alle Fahrzeuge mit einem höchstzulässigen Gesamtgewicht größer 3,5 t
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
RABT	Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
RSA	Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen
StVO	Straßenverkehrsordnung
AGAP	Alarm- und Gefahrenabwehrplan
HDWNA	Hochdruckwassernebelanlage
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
TLZ	Tunnelleitzentrale
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Überblick einiger kritischer Infrastrukturen [5]	3
Abbildung 1-2: Resilienzyklus, in Anlehnung an [4]	3
Abbildung 1-3: Funktionalitätskurve mit zugeordneten Phasen des Resilienzkreislaufs, in Anlehnung an [7]	5
Abbildung 2-1: Struktur der Arbeit	7
Abbildung 3-1: Bundesfernstraßennetz Deutschlands (Bundesautobahnen und Bundesstraßen) mit Darstellung der Dauerzählstellen [9]	8
Abbildung 3-2: Längenverteilung aller betrachteten Tunnel.....	9
Abbildung 3-3: Längenverteilung nach Verkehrsführung	10
Abbildung 3-4: Längenverteilung nach Bauweise	10
Abbildung 3-5: Querschnittsverteilung der Gegenverkehrstunnel	11
Abbildung 3-6: Längenverteilung für RQ 11 t	11
Abbildung 3-7: Querschnittsverteilung Richtungsverkehrstunnel.....	12
Abbildung 3-8: Längenverteilung für RQ 31 t	12
Abbildung 3-9: Längenverteilung für RQ 31 T.....	13
Abbildung 3-10: Längenverteilung für RQ 36 T.....	13
Abbildung 5-1: Zusammengang der Bedrohungen und Schadensszenarien	22
Abbildung 5-2: Längslüftung mit Strahlventilatoren [12]	24
Abbildung 5-3: Notausgang im Richard-Strauss-Tunnel in München [13]	26
Abbildung 5-4: kombinierte Fluchtwegkennzeichnung mit Orientierungsbeleuchtung [10]	26
Abbildung 5-5: über der Fahrbahn angeordnete Wechsel- und Dauerlichtzeichen [12]...27	27
Abbildung 5-6: ständig besetzte Stelle [12]	28
Abbildung 5-7: schematische Darstellung der Matrix zur Verknüpfung der Bedrohungen und Schadensszenarien.....	31
Abbildung 6-1: Kategorisierung der verkehrlichen Betriebsszenarien	32
Abbildung 6-2: Verkehrszeichen "Seitenstreifen befahren" und „Seitenstreifen nicht mehr befahren“ [14]	36
Abbildung 7-1: Bow-Tie-Diagramm: Verknüpfung Bedrohungen - Schadensszenario - verkehrliche Betriebsszenarien	37
Abbildung 7-2: Einordnung der Phasen des Resilienzkreislaufs im Bow-Tie-Diagramm...37	37
Abbildung 7-3: Betriebszustände gem. [17]	40
Abbildung 7-4: Verknüpfung der Schadensszenarien mit den verkehrlichen Betriebsszenarien über minimale Betriebsbedingungen.....	42
Abbildung 7-5: Einordnung der minimalen Betriebsbedingungen im Bow-Tie-Diagramm 42	42
Abbildung 7-6: Vervollständigung des Resilienzkreislaufs durch minimale Betriebsbedingungen	43
Abbildung 7-7: Einordnung der Schwellwerte in der Risikomatrix.....	44
Abbildung 7-8: Schwellwerte des Risikos im Betrieb von Straßentunneln	44
Abbildung 7-9: methodischer Ansatz zur Bewertung von Schadensszenarien.....	45
Abbildung 7-10: Einordnung der Sicherheitsrelevanz und –signifikanz in der Risikobewertung.....	46
Abbildung 7-11: Risikoreduktion durch funktionale Kompensation	47

Abbildung 7-12: Risikoreduktion durch funktionale und sicherheitstechnische Kompensation	48
Abbildung 7-13: vereinfachte Risikomatrix zur qualitativen Risikobewertung	53
Abbildung 7-14: Risikoerhöhung durch Schadensszenarien (a), Anteile des Risikos (b)..	53
Abbildung 7-15: Exposition bei Ausfall einer Notrufrutsche (NRN)	56
Abbildung 7-16: Basisstruktur des Tunnel-Risikoanalysemodells [23].....	57
Abbildung 7-17: Brandszenarien: Variation der Situierung des Brandortes [13]	59
Abbildung 7-18: Anordnung der Notausgänge gemäß RABT an einem 1200 m langen Richtungsverkehrstunnel	60
Abbildung 7-19: Einfluss der Schadensszenarien "Notausgang" am Modelltunnel mit Richtungsverkehr	61
Abbildung 7-20: Einfluss der Schadensszenarien "Notausgang" am Modelltunnel mit Gegenverkehr	62
Abbildung 7-21: Einfluss der Schadensszenarien "Lüftung" am Modelltunnel mit Richtungsverkehr, Länge=600m	64
Abbildung 7-22: Einfluss der Schadensszenarien "Lüftung" am Modelltunnel mit Richtungsverkehr, Länge=1200m	64
Abbildung 7-23: Einfluss risikoreduzierender Maßnahmen in Abhängigkeit der Längsneigung.....	66
Abbildung 7-24: Anwendungsbereich der minimalen Betriebsbedingungen in den Phasen des Tunnelbetriebs und Einordnung der Resilienzphasen.....	68
Abbildung 8-1: Zusammenhang der Schadensszenarien und verkehrlichen Betriebsszenarien	70
Abbildung 8-2: Staubbildung vor Tunnel [13]	70
Abbildung 8-3: Fahrzeugfolgemedell nach Wiedemann [25]	71
Abbildung 8-4: Eingabefenster zur Definition des Folgeverhaltens.....	73
Abbildung 8-5: Zusammenhang zwischen den Fahrzuständen und den Parametern nach Wiedemann 99, in Anlehnung an [26]	75
Abbildung 8-6: Darstellung der Parameter nach Wiedemann 99 bei der Folgefahrt, in Anlehnung an [26].....	75
Abbildung 8-7: Eingabefenster zur Definition des Fahrstreifenwechselferhaltens	76
Abbildung 8-8: Modellaufbau in PTV Vissim.....	77
Abbildung 8-9: Verkehrsführung 2n+1 gemäß RSA [33]	82
Abbildung 8-10: Anordnung des Zufluss- und Messquerschnitts.....	83
Abbildung 8-11: Arbeitsoberfläche in PTV Vissim	83
Abbildung 8-12: regionale verkehrliche Auswirkungen anhand einer exemplarischen Differenzdarstellung [34].....	91
Abbildung 9-1: Wirkung von Resilienzmaßnahmen auf den Verlauf der Funktionalitätskurve, in Anlehnung an [36].....	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: mögliche Zielgrößen zur Definition der Funktionalität, in Anlehnung an [8] .	6
Tabelle 3-1: Verkehrsführung bestehender Straßentunnel	9
Tabelle 3-2: Bauweisen bestehender Straßentunnel	9
Tabelle 3-3: Verkehrsstärke inkl. Schwerverkehrsanteil je Regelquerschnitt.....	14
Tabelle 3-4: Bemessungsbrandleistung [10]	15
Tabelle 3-5: Lüftungsart bei GV und RV mit täglich stockendem Verkehr [10]	15
Tabelle 3-6: Lüftungsarten bei RV mit in der Regel frei abfließendem Verkehr [10]	15
Tabelle 3-7: Modelltunnel Gegenverkehr.....	16
Tabelle 3-8: Modelltunnel Richtungsverkehr	17
Tabelle 3-9: Querschnittsabmessungen der Modelltunnel.....	18
Tabelle 4-1: Betrachtungsgrenzen und Wirkungsorte der Bedrohungen	19
Tabelle 4-2: Kategorisierung der Bedrohungen und Zuordnung zu deren Wirkungsorten	20
Tabelle 5-1: Kategorien und Systeme zur Einteilung der Schadensszenarien	29
Tabelle 5-2: Komponenten zur Definition der Schadensszenarien.....	30
Tabelle 6-1: verkehrliche Betriebsszenarien für Gegenverkehrstunnel	33
Tabelle 6-2: verkehrliche Betriebsszenarien zweistreifiger Richtungsverkehrstunnel ohne Seitenstreifen (RQ 31 t)	34
Tabelle 6-3: verkehrliche Betriebsszenarien zweistreifiger Richtungsverkehrstunnel mit Seitenstreifen (RQ 31 T), zusätzlich zu Tabelle 6-2	34
Tabelle 6-4: verkehrliche Betriebsszenarien dreistreifiger Richtungsverkehrstunnel mit Seitenstreifen (RQ 36 T).....	35
Tabelle 7-1: Ansätze der Risikobewertung [13]	38
Tabelle 7-2: Einfluss sicherheitstechnischer Kompensationsmaßnahmen.....	49
Tabelle 7-3: Prioritäten von Schadensszenarien.....	52
Tabelle 7-4: Einfluss beispielhafter Schadensszenarien auf das Risiko	54
Tabelle 7-5: Einflussfaktoren der qualitativen Risikobewertung.....	55
Tabelle 8-1: k-Faktor in Abhängigkeit der Jahresganglinie [28]	77
Tabelle 8-2: Modelltunnel der Verkehrssimulation im Richtungsverkehr	78
Tabelle 8-3: Modelltunnel der Verkehrssimulation im Gegenverkehr.....	78
Tabelle 8-4: Parameter des Folgeverhaltens.....	79
Tabelle 8-5: Parameter des Fahrstreifenwechselverhaltens	80
Tabelle 8-6: Wunschgeschwindigkeitsverteilungen an der freien Strecke nach [31].....	81
Tabelle 8-7: Wunschgeschwindigkeitsverteilungen in Arbeitsstellen nach [32].....	81
Tabelle 8-8: Kapazität von Gegenverkehrstunneln je Betriebsszenario.....	84
Tabelle 8-9: Kapazität zweistreifiger Richtungsverkehrstunnel je Betriebsszenario	86
Tabelle 8-10: Kapazität dreistreifiger Richtungsverkehrstunnel je Betriebsszenario	87
Tabelle 8-11: Zielsysteme und zugehörige Indikatoren.....	88
Tabelle 8-12: untersuchte verkehrliche Betriebsszenarien im Tunnel Pfaffenstein.....	89
Tabelle 8-13: untersuchte verkehrliche Betriebsszenarien der Einhausung Bayreuth	90
Tabelle 9-1: Kategorisierung von Resilienzmaßnahmen	93

Anhang

A1 Interviews mit Betreibern von Straßentunneln

Ziel eines jeden Projekts muss immer die Eignung und Praxistauglichkeit für den Endnutzer darstellen. Nur über das Miteinbeziehen aller Beteiligten ist eine praxisorientierte Bearbeitung möglich, wodurch schlussendlich auch die Akzeptanz als Voraussetzung für den Erfolg gesteigert wird. Aus diesem Grund wurden Interviews mit Betreibern von Straßentunneln, sowohl in Deutschland, als auch in Österreich, durchgeführt. So konnten der aktuelle Stellenwert der Problemstellung, der Stand der Technik und deren Umsetzung sowie zukünftige Erwartungshaltungen und Ziele abgefragt und diskutiert werden.

Durchgeführt wurden Gespräche mit der ASFINAG in Österreich sowie den Autobahndirektionen Nord- bzw. Südbayern (ABDSB, ABDNB) und dem Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen (Straßen.NRW) in Deutschland.

Folgende Fragestellungen wurden mit den Betreibern diskutiert:

- (1)** Welchen Stellenwert hat das Thema Verfügbarkeit von Straßentunneln aus Sicht eines Betreibers?
- (2)** Welche Bedrohungen werden hinsichtlich der Verfügbarkeit von Straßentunneln für besonders bedeutsam angesehen?
- (3)** Welche Maßnahmen zur Gewährleistung der Verfügbarkeit von Straßentunneln werden derzeit umgesetzt?
- (4)** Welche Systeme oder Technologien werden zusätzlich zu Maßnahmen zur Tunnelsicherheit eingesetzt, um
 - Manipulationen an wichtigen Systemen zu detektieren,
 - den Zugang zum Tunnelbauwerk, zur Leitstelle, etc. zu überwachen,
 - Vandalismus / Sabotage frühzeitig zu entdecken?
- (5)** Welche Sicherheitseinrichtungen fallen erfahrungsgemäß häufig aus? Gibt es diesbezüglich spezielle Maßnahmen, wie z.B. das Vorhalten von Ersatzteilen oder zeitliche Vorgaben der Wiederherstellung?
- (6)** Welche (strategischen) Vorgaben bestehen derzeit hinsichtlich des Betriebs von Straßentunneln bei Ausfall von Sicherheitseinrichtungen?
Gibt es (organisationsweite) Regelungen, welche Betriebseinschränkungen bei welchen Systemeinschränkungen resultieren?
- (7)** Welche Vorgaben bestehen derzeit hinsichtlich der Nutzung von Richtungsverkehrstunneln im Gegenverkehrsbetrieb – in Bauphasen oder nach außergewöhnlichen disruptiven Ereignissen?

ausschließlich ABDNB bzw. Straßen.NRW:

- (8)** Gibt es Vorgaben bzw. Überlegungen zu minimalen Bedingungen für den sicheren Betrieb von Tunneln?
- (9)** Was passiert, wenn die Kommunikation zwischen Leitzentrale und Tunnel unterbrochen ist?
- (10)** Verkehrsführung im Tunnel:
 - 10.1** Kommt ein alternierender Richtungsverkehr bzw. eine Blockabfertigung in Tunneln zum Einsatz?

- 10.2** Erfolgt eine Seitenstreifenfreigabe auch im Tunnel?
 - 10.3** Welche Sonderverkehrsführungen an Arbeitsstellen im Tunnel können zur Anwendung kommen? (z.B. 4+0, 3s+0, 3s1, ...)
 - 10.4** Wie groß werden die Stufen des Geschwindigkeitstrichters bei einer Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit gewählt?
 - 10.5** Unter welchen Bedingungen wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf 80, 60 oder auch 40 km/h beschränkt?
 - 10.6** Wird ein LKW-Fahrverbot als sicherheitstechnische Maßnahme zur Reduzierung der Brandlasten eingesetzt?
-
- (11)** Welche Daten werden aufgezeichnet, die für eine detaillierte Risikoanalyse ausgewertet werden können?
 - (12)** Wo sehen Sie Möglichkeiten zur Erhöhung der Verfügbarkeit von Straßentunneln in Bezug auf die bestehende Praxis?

ASFINAG

Datum: 19.02.2019

Im gesamten Netz der ASFINAG bestehen derzeit 165 Tunnel mit einer Gesamtlänge von 400 km, welche von neun Verkehrsmanagementzentralen überwacht und gesteuert werden.

(1)

Die Bedeutung der Verfügbarkeit ist sehr hoch und gilt als eines der wesentlichsten Ziele, nicht zuletzt da aufgrund der Mauteinnahmen von rund € 1,4 Mrd. jährlich auch wirtschaftliches Interesse besteht.

Freie Strecke und Tunnel haben grundsätzlich die gleiche Priorität, da die Verfügbarkeit des gesamten Netzabschnitts entscheidend ist. Aufgrund der schwierigeren Randbedingungen in Tunnelbauwerken erweisen sich diese jedoch besonders oft als problematisch.

(2)

Vor allem Unfälle werden als besonders bedeutsam angesehen, Anlagenausfälle hingegen treten selten auf. Kritisch sind zudem Ausfälle der Überwachungszentrale und Cyber-Angriffe, wobei hier der Schulung und Sensibilisierung der Mitarbeiter eine entscheidende Rolle zukommen. Sabotage und Vandalismus stellen bislang kaum ein Problem dar und beschränken sich zum größten Teil auf Probleme wie beschädigte Zäune oder Graffiti.

(3)

Derzeit werden diese vor allem über die Einhaltung der geltenden Regelwerke, in Österreich die RVS, definiert. Darüber hinausgehende Maßnahmen betreffen häufig die Lüftung, teilweise auch den baulichen Brandschutz.

In Neubauten standardmäßig umgesetzt ist die Vorbereitung eines Richtungsverkehrstunnels für den Betrieb im Gegenverkehr. Dazu zählen die erweiterte Auslegung der Lüftung und Beleuchtung genauso wie das Herstellen von Bodenhülsen für Plastikpoller, um im GV eine klare Trennung der Fahrstreifen auch ohne entsprechender Bodenmarkierung herstellen zu können.



Abbildung A-1: Plastikpoller zur Mitteltrennung [37]

Zur Vorbereitung eines notwendigen Fahrstreifenwechsels können Betonleitwände mit einem Hebestempel eingesetzt werden. Bei höheren Anforderungen stellt ein Mittelstreifenüberfahrt-Leitsystem (MÜLS) inklusive Boden-LED und Überkopfwegweiser zurzeit das Optimum dar. Aufgrund der Kosten von rund € 2 Mio. beschränkt sich der Einsatz auf Tunnel hoher verkehrlicher Belastung mit dem Erfordernis einer raschen Umleitung des Verkehrs, wie dies zum Beispiel bei der Sanierung des Plabutschunnels bei Graz der Fall ist.

Hochdruckwassernebelanlagen (HDWNA) werden so weit wie möglich vermieden. Gründe sind zum einen die mit € 1,5 – 2 Mio. pro km hohen Anschaffungskosten, zum anderen auch der hohe Aufwand für Wartung, Betrieb, Funktionstests usw. Bauliche Maßnahmen zum Brandschutz werden daher klar vorgezogen.

In Österreich sind diese Anlagen zurzeit in vier Tunneln installiert, wobei bei jedem einzelnen Projekt sehr spezifische Anforderungen zu dieser Entscheidung geführt haben.

Zur Vermeidung möglicher Cyber-Angriffe sind die Wartungszugänge der Fremdfirmen sehr eingeschränkt, zudem sind alle Zugriffe geplant, beobachtet und genau dokumentiert.

An einigen kritischen und hochbelasteten Netzabschnitten, seit 2013 im Großraum Wien, mit Beginn im Jahr 2018 auch um Linz, kommen sogenannte „Traffic Manager“ zum Einsatz, die rund um die Uhr zur Verfügung stehen und im Ereignisfall mit Blaulichterlaubnis sehr schnell vor Ort sind. Sie sind im Zuge des Streckenkontrolldienstes stets auf der Strecke, wodurch eine rasche Anfahrt und ein unmittelbares Eingreifen begünstigt wird. Zurzeit fungieren 28 Personen als Ersthelfer und unterstützen die Einsatzorganisationen mit professionellem Verkehrsmanagement, wie dem Absichern nach Pannen und Unfällen, der Weitergabe von Informationen an die Verkehrsteilnehmer oder dem aktiven Vorbeileiten an Behinderungen. Mit rund 12.000 Einsätzen jährlich allein in Wien tragen sie somit wesentlich zur Aufrechterhaltung des Verkehrsflusses bei und erhöhen die Verfügbarkeit wichtiger Abschnitte des hochrangigen Straßennetzes.

(4)

Die Videoüberwachung kommt nicht nur im gesamten Tunnelbauwerk, sondern auch in allen Betriebsgebäuden und Leitzentralen zum Einsatz, welche zudem mit mehreren Zonen der Zutrittskontrolle ausgestattet sind.

Seit 2018 werden sogenannte "Performance-Tests" an den einzelnen Tunnelbauwerken durchgeführt. Ziel ist dabei eine regelmäßige Überprüfung im 4-Jahresrhythmus bei markanten Änderungen im System. Unter einer Vollsperrung werden gewerkübergreifend Störungen simuliert und die folgenden Prozesse systematisch überprüft. Dabei wird der Tunnel nicht nur stichprobenartig, sondern vollständig mit allen vorhandenen Komponenten detailliert untersucht. Bei einem fünf Kilometer langen zweiröhrigen Tunnel ist dafür eine Vollsperrung über zwei Nächte erforderlich. Der Zugewinn an Sicherheit ist durch diese Maßnahme laut ASFINAG als sehr groß einzuschätzen.

(5)

Grundsätzlich fallen die Sicherheitseinrichtungen sehr selten aus. Im Falle des Eintretens erfolgt über ein Ticketsystem eine automatische Meldung an den Betriebstechniker. Hier erfolgt zudem eine Zuteilung zu einer von vier Prioritätsklassen, welche die maximale Dauer zur Entstörung vorgeben. Diese liegen zwischen zwei Stunden bei sehr kritischen Ausfällen bis zu sechs Monaten bei geringerer Priorität.

Die in der ASFINAG zur Anwendung kommende Ersatzteilstrategie regelt systematisch die Art und Weise des Vorhaltens von Ersatzteilen. Großer Wert wird dabei auf möglichst modulare Systeme gelegt, welches aufgrund der Ausstattungselemente verschiedenster Lieferanten jedoch nur begrenzt umsetzbar ist. So ist der Großteil der Ersatzteile jeweils für nur ein bestimmtes Objekt bestimmt.

(6)

Bereits seit 2006 bestehen in der ASFINAG strategische Vorgaben zur Definition minimaler Betriebsbedingungen für verschiedenste technische Gewerke. Diese sind in einer ca. 180 Einträge umfassenden Liste mit Schadensszenarien zusammengefasst, denen jeweils die erforderlichen Maßnahmen zugeordnet und objektspezifisch festgelegt sind. Kaskadeneffekte finden hier keine Berücksichtigung. Die Maßnahmen werden nicht automatisch ausgeführt, dem Operator aber vom System direkt angezeigt und im Anschluss verifiziert. Neben den sicherheitstechnischen Aspekten spielen auch Tunnelspezifika, wie die Bedeutung für das gesamte Verkehrsnetz, eine Rolle, wobei die Sicherheit stets den wichtigsten Faktor darstellt.

Ein Ausfall der Energieversorgung, der Lüftung oder der Beleuchtung zu 100% führt immer zur Vollsperrung, da hier aus Sicht der ASFINAG keine ausreichenden Kompensationsmaßnahmen getroffen werden können. Fällt hingegen die Videoüberwachung zur Gänze aus, werden intensive Kontrollfahrten durchgeführt und der Tunnelbetrieb unter Anwendung etwaiger zusätzlicher Maßnahmen, wie einer Geschwindigkeitsreduktion oder dem Vorhalten von Personal vor Ort, aufrechterhalten.

Gesonderte Regelungen bestehen für den Fall eines "Blackouts", dem großflächigen Ausfall der Stromversorgung. Hier ist ein Betrieb in ausgesuchten kritischen Tunneln auch bei einem Totalausfall der Beleuchtung möglich, wie z.B. im Kaisermühlentunnel in Wien.

(7)

Aufgrund der in Österreich bestehenden Rechtslage wird hier klar zwischen planbaren und nicht planbaren Ereignissen unterschieden. Der Betrieb von RV-Tunneln im GV darf lediglich im Falle planbarer Ereignisse, wie einer Baustelle für Wartungszwecke, durchgeführt werden. Bei außergewöhnlichen disruptiven Ereignissen hingegen ist diese Maßnahme derzeit nicht möglich, eine Änderung der vorliegenden Situation wird jedoch als wesentlich angesehen und bewusst angestrebt.

Aufgrund zweier kürzlich eingetretener Brandereignisse in österreichischen Straßentunneln wurde hier im Speziellen zusätzlich über die gesammelten Erfahrungswerte aus der Praxis diskutiert:

- Brand im Gleinalmtunnel im Oktober 2018:

Hier kam erst wenige Monate nach Fertigstellung der zweiten Röhre ein 65 Tonnen schwerer Mobilkran mit 3,5 m³ Öl im Fahrzeug in sehr kurzer Zeit in Vollbrand. Rechnerisch betrug die aufgetretene Brandlast rund 80 MW. Aufgrund der gut geschulten Einsatzkräfte und funktionierenden technischen Komponenten kam es zu keinem Personenschaden. Die Zwischendecke, die Innenschale sowie sämtliche Ausstattungselemente mussten auf einer Länge von 200 Metern erneuert werden, der Tunnel war folglich drei Monate gesperrt. Die Nebenröhre wurde zum Zeitpunkt des Brandes saniert, dadurch war bereits eine Baufirma vor Ort, welche die Arbeiten sehr rasch aufnehmen konnte. Zudem kam der Schalwagen aus der Parallelröhre zum Einsatz, womit die Ausfallszeit deutlich geringer gehalten wurde. In diesem Fall besteht eine Ersatzroute im hochrangigen Straßennetz, wobei eine erhöhte Reisezeit von rund 15 Minuten entsteht. Die Kosten der baulichen Maßnahmen betragen ca. € 2 Mio., der Mautentgang, auch aufgrund der bestehenden Sondermaut im Tunnel, fällt mit rund € 3 bis 5 Mio. jedoch wesentlich höher aus.

- Brand im Arlbergtunnel im Jänner 2019:

Der Arlbergtunnel mit einer Länge von ca. 14 km wird im Gegenverkehr betrieben und weist eine JDTV von ca. 10.000 KFZ/d auf, wobei große saisonale Schwankungen auftreten. Aufgrund des Konzepts der Fluchtwege über die Zwischendecke muss diese im Brandfall geschützt werden, zu diesem Zweck kommt eine HDWNA zum Einsatz.

Beim Brand eines beladenen Autotransporters (ca. 50 MW Brandlast) wurde die automatische Brandbekämpfungsanlage nach der exakten Detektion des Ereignisses nach nur wenigen Sekunden vom Operator manuell aktiviert, automatisch erfolgt dies erst nach Ablauf einer Minute. Da der Brand so wesentlich eingedämmt wurde, waren keine Personen betroffen und traten auch keine Schäden auf, weder am Bauwerk, noch an der Ausrüstung. Somit konnte der Tunnel bereits nach nur rund vier Stunden wieder für den Verkehr freigegeben werden.

Autobahndirektion Südbayern

Datum: 18.03.2019

(1)

Da die Straßentunnel von hoher verkehrlicher und somit auch wirtschaftlicher Bedeutung sind, wird der Stellenwert als sehr hoch eingestuft. Hinzu kommt vielfach politischer Druck, Tunnelsperren zu vermeiden und die Verfügbarkeit aufrechtzuerhalten, wie dies am Beispiel des Tunnel Aubing der Fall war. Hier wurde der Betrieb während eines Ausfalls der Stromversorgung fortgesetzt, Lüftung und Löschwasserversorgung waren jedoch aufgrund der nicht vorhandenen Versorgung über die USV-Anlage nicht verfügbar. Der Druck, wichtige Industriestandorte weiter beliefern zu können, nahm dabei großen Einfluss auf die Entscheidung.

(2)

Besonders kritisch werden Brandereignisse und Unfälle mit Gefahrgutbeteiligung beurteilt. Überdies wird den Themen Cyber-Security sowie unbefugte Zugriffe auf das Verkehrssystem große Bedeutung zugeschrieben.

(3)

Im Abstand von vier Jahren werden Übungen im Tunnel durchgeführt. Zudem finden Begehungen mit Einsatzorganisationen statt, um so einen Überblick über die Verhältnisse vor Ort zu bekommen.

Zur Steigerung der Verfügbarkeit wird der Schulung des Personals, aber auch der externen Einsatzorganisationen, große Bedeutung zugeschrieben. Dabei besteht auch der Wunsch nach einem Schulungs- und Trainingszentrum im Realmaßstab, um so Übungen durchführen zu können, ohne Tunnel sperren zu müssen bzw. Bauwerke inklusive deren Ausstattung zu beschädigen.

Über die gemäß den RABT geforderten Wartungsintervallen hinausgehend werden an vielen Objekten vier Wartungen jährlich durchgeführt, zwei davon im kleineren Maßstab mit individuell ausgewählten zu überprüfenden Systemen. Jede Komponente wird durchschnittlich nach spätestens drei Jahren einer Überprüfung unterzogen.

Tagsüber sind oftmals Tunnelelektriker direkt vor Ort im Einsatz, um so bei Störungen und Ausfällen rasch eingreifen zu können. Außerhalb deren Arbeitszeiten beträgt die Dauer bis zum Eintreffen im Tunnel bis zu 20 Minuten.

(4)

Die Videoüberwachung stellt für das Erkennen von Sabotageakten oder versuchten Manipulationen das klar wichtigste Instrument dar.

Zurzeit werden nach und nach die Schachtdeckel entlang der Strecke mittels Glasfaserkabel ausgerüstet, um so das Öffnen dieser oder sonstige Probleme unmittelbar zu erkennen.

Die große Anzahl an Personen, Organisationen und Unternehmen mit Zugangsberechtigungen zu diversen Räumlichkeiten im Zusammenhang mit dem Tunnelbetrieb wird als kritisch betrachtet. In sämtlichen Tunneln sind zudem Generalschlüssel in Feuerwehrschlüsseldepots hinterlegt, welche jedoch nicht explizit überwacht werden und allen Feuerwehren zugänglich sind.

(5)

Es werden keine Sicherheitseinrichtungen hervorgehoben, welche besonders häufig ausfallen. Aufgrund der besonderen Bedeutung der Videoüberwachung werden je Tunnelobjekt rund vier bis fünf Kameras als Ersatzteile vorgehalten. Im Bedarfsfall werden unter Umständen auch Geräte von den Portalen bzw. der Umgebung demontiert und kommen im Tunnel zum Einsatz.

Die in den RABT angegebene Löschwassermenge von 72 m³ wird als nicht ausreichend angesehen. So ist zum Beispiel nach der Reinigung eines Straßentunnels der Tank häufig bereits zur Hälfte geleert. Eine großzügigere Dimensionierung, wie in Österreich mit 108 m³, wird als sinnvolle Maßnahme erachtet.

(6)

Als wichtigste Grundlage im Ereignisfall dienen die für jeden Tunnel eigens erstellten Alarm- und Gefahrenabwehrpläne (AGAP). Bei der Entscheidungsfindung fließt die Bedeutung des Objekts im Verkehrsnetz stark mit ein, zudem ist von „gesundem Menschenverstand“ und der Bedeutung der gesammelten Erfahrung der handelnden Personen die Rede. Bei vielen Szenarien werden zehn Minuten akzeptiert, in denen der Betrieb fortgesetzt wird, wobei die Dauer auch häufig davon abhängig ist, wie rasch Personal vor Ort bereitgestellt werden kann.

Als die wesentlichsten Komponenten der Sicherheitseinrichtungen werden die Branddetektion und –bekämpfung genannt, welche zur Gewährleistung der minimalen Betriebsbedingungen in jedem Fall funktionstüchtig sein müssen.

Die eingesetzten Geschwindigkeitsbeschränkungen liegen bei 40, 50, 60, 80 und 100 km/h, wobei die Reduktion auf 60 km/h im Ereignisfall sehr breite Anwendung findet. Im Betrieb wurden jedoch auch häufig Probleme mit sehr restriktiven Beschränkungen der Geschwindigkeit festgestellt, da diese nicht von allen Verkehrsteilnehmern eingehalten werden und durch die damit auftretenden Geschwindigkeitsdifferenzen Unfälle begünstigt werden.

Ist die Kommunikation zwischen der ständig besetzten Stelle und dem Tunnel unterbrochen, wird nach spätestens 15 Minuten das Betriebsgebäude vor Ort besetzt, wobei für die Anfahrt nochmals bis zu 25 Minuten erforderlich sind. Die Polizei hat in diesem Fall die Möglichkeit, ebenfalls auf die Livebilder der Videoüberwachung zuzugreifen und damit für einen beschränkten Zeitraum die Beobachtung, nicht jedoch die Steuerung, des Tunnels durchzuführen.

(7)

Anders als in Österreich können Richtungsverkehrstunnel sowohl nach planmäßigen, als auch nach nicht planmäßigen Ereignissen im Gegenverkehr betrieben werden, sofern dies in der Sicherheitsdokumentation des entsprechenden Objekts enthalten und verkehrsrechtlich genehmigt ist. Die dafür zusätzlich erforderliche Ausstattung beinhaltet eine Mittelstreifenüberfahrt, die Anpassung der Lüftung für den GV-Betrieb, eine entsprechende Adaptionsbeleuchtung an beiden Seiten sowie Wechselverkehrs- und

Dauerlichtzeichen in beide Richtungen. Die Kosten für die Nachrüstung eines Richtungsverkehrstunnels werden mit rund € 3,5 bis 4 Mio. beziffert.

Die Einrichtung des GV-Betriebes nimmt ca. 1,5 Stunden in Anspruch. Die Entscheidung über die Zweckmäßigkeit hängt von der zu erwartenden Dauer der Betriebsbehinderung ab und wird in aller Regel getroffen, während bereits eine Umleitungsstrecke in Betrieb ist.

Direkt bei der Freigabe für den Verkehr eines RV-Tunnel im GV-Betrieb treten zum Teil gefährliche Situationen ein, da manche Verkehrsteilnehmer wie gewohnt den linken Fahrstreifen zum Überholen nutzen, der Tunnel jedoch im GV betrieben wird.

Straßen.NRW

Datum: 04.06.2019

(1)

Die Aufrechterhaltung der Verfügbarkeit wird als die strategische Hauptaufgabe angesehen und spielt dementsprechend im täglichen operativen Geschäft eine sehr große Rolle. Über die Forderung der RABT hinausgehend werden nicht nur Tunnel mit einer Länge ab 400 m, sondern sämtliche auf den westfälischen Autobahnen befindliche Tunnel in der Tunnelleitzentrale überwacht und gesteuert.

Zur Priorisierung der Tunnel wird für jedes Bauwerk eine Tunnelkennziffer errechnet, welche relevante Merkmale wie den JDTV, die Stauwahrscheinlichkeit, die Länge, den Querschnitt oder vorhandene Zu- und Abfahrten im Tunnel berücksichtigt. Gleichzeitig wird aber auch die Bedeutung der Tunnel für die Versorgungssicherheit, zum Beispiel der Rettungsdienste, berücksichtigt.

(2)

Die Relevanz der Bedrohungen wird nach Lage bzw. Exposition individuell unterschieden. Beispielsweise können Starkregenereignisse erhebliche betriebliche und verkehrliche Einschränkungen nach sich ziehen, insbesondere, wenn ein Tiefpunkt im Zuge einer Wannelage im Bereich des Tunnels vorliegt. Bisherige Starkregenereignisse zeigten jedoch, dass die Entwässerung sowie ev. vorhandene Pumpen in der Regel gut funktionieren. Voraussetzung dafür ist die regelmäßige Reinigung der zugehörigen Komponenten, wie z.B. den Schlitzrinnen, sowie die Wartung der technischen Geräte. Zudem muss das nachgelagerte Entwässerungssystem eine ausreichende Kapazität aufweisen. Diese betriebliche Instandhaltung erfolgt durch den Betriebsdienst. Als ergänzende Maßnahme können an den Portalen von kurzen Tunneln angebrachte Kameras zusätzlich dazu genutzt werden, Probleme der Entwässerung bzw. daraus resultierende Überschwemmungen frühzeitig zu erkennen.

Blitzschlag kann Überspannungen verursachen, welche in weiterer Folge zu Ausfällen des Steuerungssystems führen können. Durch Überspannungsschutzsysteme wird dies in den meisten Fällen jedoch verhindert.

Die Tunnelleitzentrale ist für die betriebliche Instandhaltung der technischen Tunnelausstattung zuständig, die Instandhaltung des Tunnelbauwerks und der baulichen Anlagen werden von den jeweiligen Meistereien übernommen. Dabei erfolgt eine Abstimmung der geplanten Wartungstermine mit den Meistereien. Allerdings werden diesen keine fixen Intervalle vorgeschrieben. Die Durchführung hat „wie die Sicherheit es erfordert“ zu erfolgen. Besonders in Ballungszentren können auf Grund von Personalmangel bei den Meistereien Probleme bei der Tunnelwartung entstehen.

Als häufigste vom Menschen ausgehende Bedrohung wird das Rammen bzw. Abreißen von betriebstechnischen Ausstattungskomponenten durch Fahrzeuge zu großer Abmessungen, vom Fahrstreifen abkommende Fahrzeuge und verlorene Ladung genannt.

(3)

Auch die betriebstechnische Ausstattung kurzer Tunnel mit einer Länge von weniger als 400 m wird in der TLZ überwacht (siehe auch Antwort 1). Eine zusätzliche Ausstattung dieser Tunnel mittels Videoüberwachung wird als sinnvoll angesehen. So könnte im Ereignisfall rasch und adäquat eingegriffen werden, um die Auswirkungen auf den Verkehrsfluss möglichst gering zu halten. Zudem wird auf die in den letzten Jahren stark fallenden Preise der Kamerasysteme verwiesen, wodurch die Umsetzung dieser Maßnahme erleichtert wird.

Derzeit wird bei der Nachrüstung der Tunnel Olpe und Hemberg (A46) die Tunnelbeleuchtung nicht wie zum Zeitpunkt der Errichtung üblich mittig im Querschnitt, sondern jeweils direkt über den einzelnen Fahrstreifen angeordnet, um so im Falle notwendiger Wartungsarbeiten nur eine Fahrspur sperren zu müssen.

NRW verfügt über zwei redundante ständig besetzte Stellen, die TLZ Hamm (Bereich Westfalen) und TLZ Duisburg (Bereich Rheinland). Jeder der beiden Standorte ist im Bedarfsfall in der Lage, die Überwachungs- und Steuerungsaufgaben der anderen Zentrale vollständig zu übernehmen.

(4)

In allen Betriebsgebäuden und der Tunnelleitzentrale sind Einbruchmeldeanlagen installiert, um so jeden versuchten Eingriff unmittelbar zu detektieren. Eine Überwachung der Ausgänge der Fluchtwege erfolgt ausschließlich mit Hilfe überwachter Türkontakte, nicht aber mittels Videoüberwachung.

Bezüglich des Themas Cybersicherheit wird auf die Ergebnisse des durch die BAST koordinierten Verbundforschungsprojektes Cyber-Safe verwiesen. Der Landesbetrieb Straßenbau NRW als Projektpartner mit der zugehörigen TLZ in Hamm als Pilotzentrale waren am Projekt beteiligt.

Aus Sicht von Straßen.NRW hat das Thema Anlagengesundheitsüberwachung, das in Kürze in Hamm umgesetzt werden soll, großes Entwicklungspotential.

(5)

Bei der USV-Anlage kommt es häufig zu Ausfällen, bzw. muss sie regelmäßig gewartet werden. Dies ist mit hohen Kosten verbunden, der Austausch der Batterie beläuft sich auf rund 10.000 – 15.000 Euro.

Ersatzteile werden nicht vorgehalten. Als Gründe dafür werden zum einen die Problematik eines geeigneten Lagers, aber auch die aufwändige Verwaltung und Wartung sowie die Alterung der Komponenten genannt.

Zeitliche Vorgaben bestehen lediglich für die Reaktion, nicht jedoch für die Wiederherstellung. Da im Gegensatz zum Großteil der anderen Bundesländer kein eigenes Personal für Reparaturen vor Ort zum Einsatz kommt und die Arbeiten an Fremdfirmen vergeben werden, würde solch eine Vorgabe für die maximale Dauer der Wiederherstellung jedoch auch zu höheren Kosten für Wartungsverträge führen. Die Einführung solcher

Vorgaben müsste auf Bundesebene erfolgen, da die Wartungsverträge vom Bund vorgegeben werden. Als maßgebend für die Dauer der Durchführung von Reparaturen wird die Verfügbarkeit des jeweiligen Spezialisten der Wartungsfirmen angesehen.

(6)

Nach einem Ereignis wird in Abstimmung mit den Einsatzkräften entschieden, welche betrieblichen Einschränkungen erforderlich sind.

(7)

Grundsätzlich sind Richtungsverkehrstunnel nicht für den Betrieb im Gegenverkehr ausgestattet. Soll eine Freigabe erfolgen, ist immer eine Abstimmung mit den Einsatzkräften und dem Sicherheitsbeauftragten erforderlich. Sind zur Trennung der Fahrstreifen Trennwände vorhanden, wird die Erreichbarkeit der Notausgänge, welche in der Regel an nur einer Seite angeordnet sind, eingeschränkt. Zudem sind diese nicht mehr barrierefrei erreichbar. Dem gegenüber steht jedoch ein höheres Unfallrisiko bei einer Trennung lediglich mit Fahrstreifenmarkierungen und ev. Leitkegeln oder ähnlichem.

Im Zuge baulicher Maßnahmen kommt der Betrieb im Gegenverkehr durchaus zum Einsatz. Üblicherweise wird die für den GV-Betrieb zusätzlich erforderliche Betriebstechnik nach Abschluss der Arbeiten rückgebaut und kommt ggf. noch auf anderen Tunnelbaustellen zum Einsatz. Bislang bestehen demnach keine Synergieeffekte dieser betriebstechnischen Ausstattung zum Normalbetrieb im Richtungsverkehr.

(8)

Zwar werden Überlegungen zu minimalen Betriebsbedingungen angestellt, allen voran für als wichtig angesehene Komponenten wie der Lüftung, beim Eintreten eines Ereignisses entscheidet aber meist der Operator selbst, im Zweifelsfall gilt Sicherheit vor Leichtigkeit. Dabei werden alle zu diesem Zeitpunkt erreichbaren Organe (z.B. Sicherheitsbeauftragter, Untersuchungsstelle) konsultiert.

Es existieren keine Vorgaben zur tolerierbaren Dauer verschiedener betriebstechnischer Ausfälle oder angemessener betrieblicher Reaktionen. Die Anweisungen in den Alarm- und Gefahrenabwehrplänen (AGAP) sind ereignisbezogen, handeln somit nicht unmittelbar betriebstechnische Störungen ab. Empfehlungen bezüglich der Handhabung betriebstechnischer Ausfälle müssten aus tunnelspezifischen Voruntersuchungen hervorgehen. Die Notwendigkeit solcher Untersuchungen müsste von der zuständigen Verkehrsbehörde vorgegeben werden.

(9)

Dies ist eine relevante Bedrohung aus Sicht Straßen.NRW. Bei einer vollkommen unterbrochenen Verbindung ist das Betriebsgebäude über die Wartungsfirma zu besetzen. Um dieses Szenario zu verhindern, ist neben einer eigenen oder über die Telekom gemieteten Sandleitung zu jedem Tunnel die Redundanz über eine ISDN-Leitung sichergestellt. Zudem fungieren in NRW bei Ausfall beider Verbindungen die TLZ in Hamm und Duisburg als gegenseitige Redundanz. Der Zugriff und die Steuerung aller Tunnel der jeweils anderen Stelle sind möglich.

(10)**10.1**

Zum Einsatz kommt lediglich eine Blockabfertigung im Sinne einer Zuflussregelung bei Tunneln mit hohem Verkehrsaufkommen, wie zum Beispiel am Tunnel Erle an der A2. Ein alternierender Richtungsverkehr in nur einer Tunnelröhre wird im Autobahnnetz NRW aufgrund der sehr hohen Verkehrsstärken nicht angewandt.

10.2

An der freien Strecke erfolgt bei besonders hohem Verkehrsaufkommen häufig eine Freigabe des Seitenstreifens, diese wird bislang jedoch vor Tunnelstrecken wieder zurückgenommen. Sind alle erforderlichen Rahmenbedingungen, allen voran die Auslegung der Lüftung, gegeben, ist grundsätzlich eine Seitenstreifenfreigabe auch im Tunnel möglich.

10.3

Alle in den RSA genannten Verkehrsführungen können grundsätzlich auch im Tunnel zur Anwendung kommen. Hier gilt ebenso, dass neben den geforderten Fahrstreifenbreiten die entsprechende Auslegung der betriebstechnischen Ausstattungselemente sichergestellt sein muss.

10.4

Die Stufen der Geschwindigkeitsreduktion werden mit maximal 40 km/h gewählt.

10.5

-

10.6

-

(11)

Bei der Aufzeichnung von Ereignissen wird lediglich die Anzahl, nicht jedoch deren Dauer dokumentiert. Die Entscheidung über die Erstellung eines Protokolls, und somit der Einordnung eines Ereignisses, obliegt dem Operator. Protokollierte Ereignisse werden im Zuge der jährlichen Statistik an die BAST gemeldet.

Störungen der Betriebstechnik werden durch die zuständigen Mitarbeiter von Straßen.NRW überwacht, um angemessen auf Häufungen von Ausfällen der betrieblichen Ausstattung reagieren zu können oder Justierungen der Sensorik vorzunehmen. Wenn Misstände vermutet werden, kann die Historie der betriebstechnischen Meldungen gezielt überprüft werden.

Sämtliche Daten müssen mindestens fünf Jahre lang vorgehalten werden, in der Praxis geschieht dies aber häufig auch für längere Zeiträume. In der TLZ Hamm werden diese im Langzeitarchiv gespeichert.

Autobahndirektion Nordbayern

Datum: 27.06.2019

(1)

Das Ziel ist eine höchstmöglich verantwortbare Verfügbarkeit ausreichend sicherer Tunnel. Dabei wird Sicherheit im Tunnel ganzheitlich betrachtet und kann sowohl über die Konformität der betriebstechnischen Ausstattung mit den geltenden Vorschriften und Richtlinien, als auch, im Falle von Abweichungen dazu, über Kompensationsmaßnahmen erreicht werden. Nicht nur die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer im Tunnel selbst, sondern auch eine erhöhte Gefährdung entlang der Ausweichrouten wird in die Überlegungen miteinbezogen.

Am Beispiel der Kollision eines PKWs mit der Notrufnische in der Einhausung Goldbach/Hösbach (A3) im März 2017 wird der hohe Stellenwert der Verfügbarkeit aufgezeigt. Dort musste zur Reparatur der Schäden die in der Notrufnische untergebrachte Unterverteilung der Energieversorgung außer Betrieb genommen werden. Während der Maßnahme standen außer der Einrichtung der Notrufnische selbst somit auch Videokameras, Lautsprecher, Sichttrübe-Messung, Leuchtrahmen und Orientierungsbeleuchtung im Bereich der Unterverteilung nicht zur Verfügung. Um den Tunnel über die Dauer der Sanierung weiterhin betreiben zu können, wurden in einem Sanierungskonzept durch den Tunnelmanager der angedachte Sanierungsablauf und die umzusetzenden Kompensationsmaßnahmen genau beschrieben. Die Kompensation wird durch eine Kombination aus verkehrlichen und organisatorischen Maßnahmen erreicht. Die Sondergenehmigung für eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h wird unter diesen geänderten Bedingungen eingeschränkt. Bei Nacht stehen aufgrund der Arbeiten im Tunnel weniger Fahrstreifen zur Verfügung.

Während die Verwaltungsbehörde dafür zuständig ist, grundsätzliche Entscheidungen zu treffen und Anforderungen zu formulieren, ist es die Aufgabe des Tunnelmanagers im Ereignisfall, diese Entscheidung für den jeweiligen Tunnel unter Berücksichtigung der baulichen und verkehrlichen Besonderheiten zu treffen und zu argumentieren.

(2)

Bedrohungen für die betriebstechnischen Einrichtungen, wie Cyber-Angriffe und großflächige Stromausfälle, werden als besonders bedeutsam angesehen.

Um die Gefahr durch Cyber-Angriffe zu senken, wird die Wichtigkeit einer strikten Trennung zwischen Leitstellensystem und Büronetz betont. Für den Fall, dass die Stromzufuhr über beide Einspeisungen ausfällt, ist zusätzlich zur USV-Anlage eine zweite Rückfallebene durch Notstromaggregate für alle Tunnel Nordbayerns installiert. Jedes Aggregat wird durch einen 3.000 Liter großen Tank versorgt, wobei der tägliche Verbrauch bei rund 2.600 Liter liegt. Damit können mit Ausnahme der Lüftung alle betriebstechnischen Ausstattungselemente betrieben werden und Tunnel müssen zum Teil nicht, wie sonst gemäß RABT, nach 5 Minuten gesperrt werden. Die Notstromversorgung wird vom Betriebselektriker circa einmal monatlich für eine Stunde betrieben, um die Funktionalität zu überprüfen und sicherzustellen.

Als eindeutige betriebstechnische Auslöser einer Tunnelsperre (ohne verkehrliches Ereignis) werden der Komplettausfall der Steuerung sowie der Ausfall der Lüftung in Tunneln mit einer Länge über 600 m genannt. Die Lüftung kann weder über die USV, noch über die eingesetzten Notstromaggregate versorgt werden.

(3)

Die Autobahnmeistereien verfügen über betriebseigene Elektriker und elektrotechnisch unterwiesenes Personal, welche im Bereitschaftsdienst als erste Anlaufstelle für den Tunnelmanager zur Verfügung stehen. So kann im Stör- und Ereignisfall rasch eine erste Einschätzung der Schäden erfolgen und ggf. eingegriffen werden. Die zuständigen Elektriker können sich auch per Fernzugriff über ihren Betriebslaptop in das Leitstellensystem einschalten, Videobilder sind dabei nicht verfügbar, jedoch die gesamte Leittechnik. Außerdem bestehen für alle fünf Tunnel Instandhaltungsverträge mit nur einer Firma. Dies wird als Vorteil angesehen, da die langfristige Zusammenarbeit eine eingespielte Kommunikation zwischen Tunnelmanager und Wartungsunternehmen fördert. Ebenso gestaltet sich das Vorhalten von Ersatzteilen einfacher, da gleiche Ausstattungselemente in den verschiedenen Tunneln verbaut sind. Hierfür wird eine dezentrale Lagerhaltung betrieben. Bei größeren Arbeiten gilt die Auflage, Vertragspartner aus dem näheren Umfeld einzubinden.

Als Maßnahmen zur Gewährleistung der Verfügbarkeit kommen sowohl technische, also auch organisatorische Maßnahmen zum Einsatz. So wird zum Beispiel, über die Forderungen der RABT hinausgehend, eine Videodetektion in manchen der Tunnel installiert, die zukünftig Ereignisse wie Personen im Verkehrsraum, stehende Fahrzeuge und auch Rauch zuverlässig detektieren soll. In der besonders gefährdeten Einhausung Goldbach/Hösbach befindet sich die Videodetektion aufgrund der baulichen Besonderheiten (Entlüftung durch hydraulisch betriebene Fenster) in der Testphase. Eine Verdichtung der Sichttrübe-Sensoren kann ebenfalls sehr erfolgreich zur schnelleren Branddetektion beitragen. Eine Tunnelsperre muss nach dem Erkennen eines Ereignisses mittels Videodetektion stets vom Operator bestätigt werden, bei der Sichttrübemessung hingegen erfolgt im Falle eines detektierten Brandes eine automatische Sperre.

Potential für die Erhöhung der Verfügbarkeit mittels organisatorischer Maßnahmen wird auch bei der Fremdrettungsphase gesehen. So trainierten Einsatzkräfte aus Nordbayern zu Schulungszwecken an der IFA in der Schweiz für den Fall eines Tunnelbrandes. Dabei liegt der Fokus nicht nur auf der Rettung von Personen, sondern auch auf dem Bauwerksschutz (z.B. bewusstes Kühlen von Betonoberflächen), der erheblichen Einfluss auf die Dauer der nachfolgenden Reparaturarbeiten haben kann.

Anlässlich der jüngsten Tunnelbrände in Österreich (Gleinalm, Arlberg, Rannersdorf) wird ein Konzept für die Bewältigung von Großbränden erarbeitet. Dabei wird in Zusammenarbeit mit den Einsatzkräften das Vorgehen in der Phase der Ereignisbewältigung, wie auch die daraus resultierenden Maßnahmen für die Übergangsphase bis zur Wiederherstellung des Normalbetriebs erarbeitet. Im Zuge des Erfahrungsaustausches der Bundesländer werden solche Ideen auch mit anderen Tunnelverantwortlichen geteilt.

(4)

-

(5)

-

(6)

Zum Teil bestehen Überlegungen in den je Tunnel ausgearbeiteten AGAP (Alarm- und Gefahrenabwehrplänen), vor allem verkehrliche Maßnahmen sowie Angaben zur Informationsweitergabe.

(7)

Sämtliche Tunnel im Autobahnnetz Nordbayerns werden im Normalbetrieb im Richtungsverkehr geführt und sind bereits für einen Gegenverkehrsbetrieb ausgelegt. Dies ist sowohl im Wartungsfall bei der geplanten Sperre einer Röhre, als auch im Ereignisfall möglich.

Bei der in diesem Fall oft zur Anwendung kommenden 4+0 Verkehrsführung wird zum Teil auf eine bauliche Mitteltrennung verzichtet, um so eine barrierefreie Selbstrettung zu ermöglichen, meist jedoch überwiegt der Vorteil einer Trennwand durch die Vermeidung von Frontalzusammenstößen.

Als zusätzliche sicherheitstechnische Maßnahme erfolgt ein Fahrverbot für Gefahrguttransporte.

(8)

Sämtliche Einschränkungen und Maßnahmen zur Kompensation werden grundsätzlich ereignisbezogen vom Tunnelmanager getroffen. Die Entscheidungen müssen daher in sehr kurzer Zeit gefällt werden. Dabei wird nicht allein das Risiko im Tunnel selbst isoliert betrachtet, sondern auch Parameter wie die Gestaltung der Anschlussstellen und Verhältnisse der Umleitungsstrecken finden Berücksichtigung. So kann durch eine Tunnelsperre hier die Erhöhung des Risikos zwar zur Gänze eliminiert werden, die Umleitung großer Verkehrsströme durch Stadtgebiete aber noch größere negative Konsequenzen haben. In Würzburg zum Beispiel kam es nach einem Wohnhausbrand aufgrund des stockenden Verkehrs durch eine Tunnelsperre zu einer Anfahrtszeit der Feuerwehr von 50 Minuten. Auch die Unfallhäufigkeit ist auf den meist schlechter ausgebauten Umleitungsstrecken tendenziell höher.

Um die Ausnahmegenehmigung für eine Höchstgeschwindigkeit im Tunnel von 100 km/h zu bekommen, muss ein Tunnel von Beginn an über zusätzliche sicherheitstechnische bauliche Anlagen oder Ausstattungen verfügen, um das Referenzniveau des Risikos gemäß RABT einzuhalten. Der Tunnelmanager argumentiert, dass bei einer Störung der Ausstattung und der daraus folgenden Risikoerhöhung die Voraussetzungen für diese Höchstgeschwindigkeit nicht mehr gegeben sind. Die Reduktion der Geschwindigkeit auf 80 km/h ist somit ein probates Mittel, um das Risiko auf ein akzeptables Niveau zu senken.

(9)

Sämtliche Tunnel können nicht nur über die Tunnelleitzentrale, sondern auch über die redundanten Ausweichzentralen in den Autobahnmeistereien Fürth/Erlangen und Fischbach gesteuert werden. Außerdem muss das Betriebsgebäude des Tunnels auf Anordnung des Tunnelmanagers von der Autobahnmeisterei besetzt werden. Dies kann sich vor allem im Winter schwierig gestalten, da in dieser Periode die Meistereien mit dem Winterdienst besonders stark ausgelastet sind.

(10)**10.1**

Ein alternierender Richtungsverkehr kam bislang noch nicht zum Einsatz, wird jedoch als letzter Ausweg zur Vermeidung von Gegenverkehr genannt.

10.2

Bei Neubauprojekten werden die Seitenstreifen bereits breiter als in den Regelquerschnitten der RABT vorgesehen ausgeführt, um so bessere Anlagenverhältnisse für eine spätere temporäre Seitenstreifenfreigabe zu erhalten. Zudem wird auf den Tunnel Allach in Südbayern verwiesen, wo eine temporäre Seitenstreifenfreigabe in Kombination mit einer Geschwindigkeitsreduktion auf 60 km/h vorgesehen ist.

10.3

Grundsätzlich können je nach den vorliegenden Platzverhältnissen alle Sonderverkehrsführungen zum Einsatz kommen, mit Ausnahme jener mit einer Splittung des Richtungsverkehrs auf beide Tunnelröhren, wie z.B. bei 3s+1. Die Tunnel werden demnach stets im reinen Richtungs- bzw. reinen Gegenverkehrsbetrieb geführt. Der Grund hierfür liegt in der Steuerungstechnik, die beiden Röhren müssten sonst wie zwei komplett eigenständige Tunnel gesteuert werden.

10.4

-

10.5

Bei Arbeiten im Tunnel wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit grundsätzlich mit maximal 60 km/h gewählt.

10.6

Eine Komplettsperre eines Tunnels für den gesamten LKW-Verkehr wird kaum eingesetzt, nicht zuletzt aufgrund des hohen Schwerverkehrsanteils auf der BAB 3 und den daraus resultierenden negativen verkehrlichen Auswirkungen auf den Umleitungsstrecken. Ein Fahrverbot nur für Gefahrguttransporte hingegen wird häufiger angewandt.

(11)

-

(12)

Grundsätzlich können bauliche, anlagentechnische und organisatorische Maßnahmen zur Erhöhung der Verfügbarkeit getroffen werden:

- Mithilfe einer Vergrößerung des Lichtraumprofils auf eine Höhe von 4,70 m, wie auch im restlichen Autobahnnetz der freien Strecke, sind Probleme mit der Höhenkontrolle weitgehend vermeidbar. Zurzeit müssen zudem Großtransporte oft über Umleitungsstrecken und durch Ortsgebiete fahren, da Tunnelbauwerke Zwangspunkte im Straßennetz darstellen.
- Tunnel in offener Bauweise, wo der Mehraufwand im Vergleich zu bergmännisch hergestellten Tunneln deutlich geringer ausfällt, sollten möglichst mit Seitenstreifen hergestellt werden. Wartungs- und Reparaturarbeiten im Tunnel können damit häufig ohne Fahrstreifensperren durchgeführt werden, wodurch die Verfügbarkeit deutlich erhöht wird.
- Notstromaggregate bzw. Netzersatzanlagen sind in der Lage, wesentliche Systeme auch bei einem Ausfall der Netzversorgung zu betreiben und erhöhen somit im Fall länger andauernder Stromausfälle wesentlich die Verfügbarkeit.

- In Schulungen und Trainings für Einsatzkräfte sollen diese sensibilisiert werden, neben der Rettung der Tunnelnutzer auch Aufmerksamkeit auf den Schutz der Infrastruktur selbst zu legen, z.B. durch das aktive Kühlen von Betonoberflächen. Damit kann die Zeit zur Wiederherstellung bis hin zur Wiederinbetriebnahme oftmals deutlich reduziert werden.
- Um nach Ereignissen wie Großbränden oder einem Blackout angepasst und rasch zu reagieren, aber auch um in möglichst kurzer Zeit wieder den Ursprungszustand und Normalbetrieb zu erreichen, sollen Konzepte für den Umgang mit diesen Szenarien erstellt werden.
- Personal vor Ort (z.B. Betriebselektriker), das bei Störungen, Ausfällen und Ereignissen rasch eingreifen kann, trägt wesentlich zu Erhöhung der Verfügbarkeit bei. Ein großer Vorteil liegt in der Erfahrung dieser Personen, die alle in ihren Zuständigkeitsbereich fallenden Tunnel mit den entsprechenden Besonderheiten detailliert kennen.
- Das Einplanen von Redundanzen und Vorhalten von Ersatzteilen ermöglicht grundsätzlich die Vermeidung längerer Ausfallzeiten.
- Um zukünftig ein effizienteres Entstören der Tunnel zu ermöglichen und deren Verfügbarkeit zu steigern, wird die nachhaltige und langfristige Planung eines fortschrittlichen Instandhaltungs- und Störungsmanagements (in Anlehnung an das Facility Management) angestrebt.

A3 vollständige Liste der Schadensszenarien

Kategorie	System	Komponente	Fehlermodus	#	
baulich	Bauwerk	einzelne Tunnelröhre	Verlust der Standsicherheit	01	
		alle Tunnelröhren	Verlust der Standsicherheit	02	
	Bauteil	Innenschale		Tragfähigkeit beeinträchtigt	03
				Tragfähigkeit nicht beeinträchtigt, einzelner Fahrstreifen betroffen	04
				Tragfähigkeit nicht beeinträchtigt, gesamter Querschnitt betroffen	05
		Zwischendecke		Tragfähigkeit beeinträchtigt	06
				Tragfähigkeit nicht beeinträchtigt, einzelner Fahrstreifen betroffen	07
				Tragfähigkeit nicht beeinträchtigt, gesamter Querschnitt betroffen	08
	Auskleidung		einzelner Fahrstreifen betroffen	09	
			gesamter Querschnitt betroffen	10	
	Fahrbahn	Fahrbahn		einzelner Fahrstreifen betroffen	11
				gesamter Querschnitt betroffen	12
versperrend	Fahrbahn	Fahrbahn	einzelner Fahrstreifen betroffen	13	
			gesamter Querschnitt betroffen	14	
			Leistungsminderung des Verkehrsflusses	15	
betriebs- technisch	Entwässerung	Fahrbahntwässerung	Teilausfall	16	
			Totalausfall	17	
	Energieversorgung	Mittelspannung	Totalausfall Anschluss	18	
		Niederspannung	Teilausfall	19	
		USV-Anlage	Totalausfall	20	
	Beleuchtung	Innenstreckenbeleuchtung		Ausfall einer Leuchte	21
				Teilausfall	22
				Totalausfall	23
		Einfahrtsbeleuchtung		Ausfall einer Leuchte	24
				Teilausfall	25
				Totalausfall	26
	Beleuchtung der Rettungswege		Ausfall in einem Rettungsweg	27	
			Ausfall in allen Rettungswegen	28	
	Lüftung	Längslüftung Strahlventilatoren		Ausfall einer Einheit	29
				Teilausfall	30
				Totalausfall	31
		Querlüftung Lüftungsklappen		Ausfall einer Einheit	32
				Teilausfall	33
				Totalausfall	34
		Querlüftung Strahlventilatoren		Ausfall einer Einheit	35
			Teilausfall	36	
			Totalausfall	37	
Lüftung der Rettungswege			Ausfall in einem Rettungsweg	38	
		Ausfall in allen Rettungswegen	39		

Tabelle A-1: vollständige Liste der Schadensszenarien

Kategorie	System	Komponente	Fehlermodus	#	
betriebs- technisch	Kommunikations- einrichtungen	Notrufeinrichtung	Ausfall einer Einheit	40	
			Totalausfall	41	
		Öffnungskontakte der Notrufeinrichtung	Einzelausfall	42	
			Totalausfall	43	
		Videoüberwachung	Ausfall einer Kamera	44	
			Ausfall einer Kamera in einer Pannenbucht	45	
			Ausfall zweier benachbarter Kameras	46	
			Totalausfall	47	
		Tunnelfunk	Totalausfall	48	
		Verkehrsfunk	Totalausfall	49	
		Lautsprecher	Ausfall einer Einheit	50	
			Teilausfall	51	
			Totalausfall	52	
		Brandmelde- einrichtungen	Handfeuermelder	Einzelausfall	53
				Totalausfall	54
	linienhaftes Wärmemeldesystem		Ausfall eines Abschnitts	55	
			Totalausfall	56	
	Entnahmekontakte der Handfeuerlöscher		Einzelausfall	57	
		Totalausfall	58		
	Brandbekämpfungs- einrichtungen	Handfeuerlöscher	Einzelausfall	59	
			Totalausfall	60	
		Löschwasserversorgung	Ausfall einer Entnahmestelle	61	
			Teilausfall	62	
			Totalausfall	63	
	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Notausgang	Ausfall eines Rettungsweges (Fluchtweg < 600m)	64	
			Ausfall zweier benachbarter Rettungswegen (Fluchtweg 600-900m)	65	
			Ausfall von mehr als zwei benachbarten Rettungswegen (Fluchtweg > 900m)	66	
		Öffnungskontakte der Notausgangstür	Einzelausfall	67	
			Totalausfall	68	
		Leuchtrahmen Notausgang	Ausfall eines Rahmens	69	
			Totalausfall	70	
		Orientierungsbeleuchtung	Ausfall einer Einheit	71	
			Ausfall eines Abschnitts	72	
			Totalausfall	73	
		Fluchtwegskennzeichnung	Ausfall einer Einheit	74	
	Totalausfall		75		
	verkehrstechnische Einrichtungen	Wechselverkehrszeichen	Ausfall vor dem Tunnel	76	
			Ausfall einer Einheit im Tunnel	77	
			Totalausfall	78	
		Dauerlichtzeichen	Ausfall einer Einheit	79	
			Totalausfall	80	
		Höhenkontrolle	Totalausfall	81	
		Sperrschranken	Totalausfall	82	
		Lichtzeichenanlage	Totalausfall	83	
		selbstleuchtende Markierungselemente	Ausfall einer Leuchte	84	
			Ausfall eines Abschnitts	85	
			Totalausfall	86	
		Verkehrsdatenerfassung	Ausfall einer Messeinheit	87	
			Totalausfall	88	
		Induktionsschleife Pannenbucht	Totalausfall	89	

Fortsetzung zu Tabelle A-1: vollständige Liste der Schadensszenarien

Kategorie	System	Komponente	Fehlermodus	#
betriebs- technisch	Messeinrichtungen	Kohlenmonoxid Messung	Ausfall einer Messeinheit	90
			Totalausfall	91
		Sichttrübe Messung	Ausfall einer Messeinheit	92
			Totalausfall	93
		Strömungsgeschwindigkeit Messung	Ausfall einer Messeinheit	94
			Totalausfall	95
	zentrale Einrichtungen	Betriebsgebäude	keine Überwachungsmöglichkeit	96
			keine Steuerungsmöglichkeit	97
		ständig besetzte Stelle	keine Überwachungsmöglichkeit	98
			keine Steuerungsmöglichkeit	99

Fortsetzung zu Tabelle A-1: vollständige Liste der Schadensszenarien

A4 Qualitative Risikobewertung

Tabelle A-2 zeigt die Ergebnisse des Expertenworkshops der in Kapitel 7.3 beschriebene Methodik zur qualitativen Bewertung betriebstechnischer Schadensszenarien. Diese dient der Beurteilung der Sicherheitssignifikanz, weshalb gemäß Abbildung 7-9 lediglich bereits als sicherheitsrelevant eingestufte Szenarien untersucht wurden.

#	Schadensszenario		Priorität	Einflussfaktoren auf Häufigkeit		Einflussfaktoren auf Schadensausmaß		Exposition	Sicherheits-signifikanz	
	Kategorie	System		Komponente	Fehlermodus	Unfall	mechanisch			Brand
16	betriebs-techn.	Entwässerung	Fahrbahnentwässerung	Teilausfall	6	-	-	Gefahrgutbeteiligung	Entwässerungsleistung <100l/s je 50m Abschnitt	Nein
17	betriebs-techn.	Entwässerung	Fahrbahnentwässerung	Totalausfall	6	-	-	Gefahrgutbeteiligung	gesamter Tunnel	Ja
18	betriebs-techn.	Energieversorgung	Mittelspannung	Totalausfall Anschluss	1	- Sichtverhältnisse regulieren - Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Warnen	- Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Ereignisdetektion	- Ereignisdetektion - Bedrohung reduzieren - Evakuierungsreaktion - Evakuierungsgeschwindigkeit - Koordination der Einsatzkräfte - Tunnel sperren - Gefahrgutbeteiligung	gesamter Tunnel	Ja
19	betriebs-techn.	Energieversorgung	Niederspannung	Teilausfall	1	- Sichtverhältnisse	-	- Ereignisdetektion - Bedrohung reduzieren - Evakuierungsreaktion	150 m	Ja
20	betriebs-techn.	Energieversorgung	USV-Anlage	Totalausfall	1	- Sichtverhältnisse - Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Warnen	- Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Ereignisdetektion	- Ereignisdetektion - Bedrohung reduzieren - Evakuierungsreaktion - Evakuierungsgeschwindigkeit - Koordination der Einsatzkräfte - Tunnel sperren - Gefahrgutbeteiligung	gesamter Tunnel	Ja
22	betriebs-techn.	Beleuchtung	Innenstreckenbeleuchtung	Teilausfall	1	- Sichtverhältnisse	-	- Ereignisdetektion - Evakuierungsgeschwindigkeit	150m/verringerte Leuchtleistung	Ja
23	betriebs-techn.	Beleuchtung	Innenstreckenbeleuchtung	Totalausfall	1	- Sichtverhältnisse	-	- Ereignisdetektion - Evakuierungsgeschwindigkeit	gesamter Tunnel	Ja
25	betriebs-techn.	Beleuchtung	Einfahrtsbeleuchtung	Teilausfall	1	- Sichtverhältnisse	-	-	50 m/verringerte Leuchtleistung	Ja
26	betriebs-techn.	Beleuchtung	Einfahrtsbeleuchtung	Totalausfall	1	- Sichtverhältnisse	-	-	gesamte Einfahrtsstrecke	Ja
27	betriebs-techn.	Beleuchtung	Beleuchtung der Rettungswege	Ausfall in einem Rettungswege	5	-	-	- Evakuierungsweg	300 m	Nein
28	betriebs-techn.	Beleuchtung	Beleuchtung der Rettungswege	Ausfall in allen Rettungswegen	5	-	-	- Evakuierungsweg	gesamter Tunnel	Ja

Tabelle A-2: Ergebnisse der qualitativen Risikobewertung

#		Schadenszenario			Priorität	Einflussfaktoren auf Häufigkeit		Einflussfaktoren auf Schadensausmaß		Exposition	Sicherheits-signifikanz
		Kategorie	System	Komponente		Fehlermodus	Unfall	mechanisch	Brand		
38	betriebs-techn.	Lüftung	Lüftung der Rettungswege	Ausfall in einem Rettungsweg	5	-	-	-	Bedrohung reduzieren	300 m	Nein
39	betriebs-techn.	Lüftung	Lüftung der Rettungswege	Ausfall in allen Rettungswegen	5	-	-	-	Bedrohung reduzieren	gesamter Tunnel	Ja
40	betriebs-techn.	Kommunikations-einrichtungen	Notrufeinrichtung	Ausfall einer Einheit	3	-	-	-	Ereignisdetektion	150 m	Nein
41	betriebs-techn.	Kommunikations-einrichtungen	Notrufeinrichtung	Totalausfall	3	-	-	-	Ereignisdetektion	gesamter Tunnel	Ja
43	betriebs-techn.	Kommunikations-einrichtungen	Öffnungskontakte der Notrufeinrichtung	Totalausfall	3	-	-	-	Ereignisdetektion	gesamter Tunnel	Nein
44	betriebs-techn.	Kommunikations-einrichtungen	Videoüberwachung	Ausfall einer Kamera	2	-	-	-	Verkehrsgeschwindigkeit regulieren	75 m	Nein
45	betriebs-techn.	Kommunikations-einrichtungen	Videoüberwachung	Ausfall einer Kamera in Pannenhoch	3	-	-	-	Verkehrsgeschwindigkeit regulieren	600 m	Nein
46	betriebs-techn.	Kommunikations-einrichtungen	Videoüberwachung	Ausfall zweier benachbarter Kameras	2	-	-	-	Verkehrsgeschwindigkeit regulieren	150 m	Ja
47	betriebs-techn.	Kommunikations-einrichtungen	Videoüberwachung	Totalausfall	2	-	-	-	Verkehrsgeschwindigkeit regulieren	gesamter Tunnel	Ja
48	betriebs-techn.	Kommunikations-einrichtungen	Tunnelfunk	Totalausfall	5	-	-	-	Koordination der Einsatzkräfte	gesamter Tunnel	Ja
49	betriebs-techn.	Kommunikations-einrichtungen	Verkehrsfunk	Totalausfall	3	-	-	-	Evakuierungsreaktion	gesamter Tunnel	Nein
50	betriebs-techn.	Kommunikations-einrichtungen	Lautsprecher	Ausfall einer Einheit	3	-	-	-	Evakuierungsreaktion	rund 150 m	Nein
51	betriebs-techn.	Kommunikations-einrichtungen	Lautsprecher	Teilausfall	3	-	-	-	Evakuierungsreaktion	verringerte Sprach-verständlichkeit	Ja
52	betriebs-techn.	Kommunikations-einrichtungen	Lautsprecher	Totalausfall	3	-	-	-	Evakuierungsreaktion	gesamter Tunnel	Ja
53	betriebs-techn.	Brandmelde-einrichtungen	Handfeuermelder	Einzelausfall	5	-	-	-	Ereignisdetektion	150 m	Nein
54	betriebs-techn.	Brandmelde-einrichtungen	Handfeuermelder	Totalausfall	5	-	-	-	Ereignisdetektion	gesamter Tunnel	Ja
55	betriebs-techn.	Brandmelde-einrichtungen	linienhaftes Wärmemeldesystem	Ausfall eines Abschnitts	5	-	-	-	Ereignisdetektion	150 m	Ja
56	betriebs-techn.	Brandmelde-einrichtungen	linienhaftes Wärmemeldesystem	Totalausfall	5	-	-	-	Ereignisdetektion	gesamter Tunnel	Ja
57	betriebs-techn.	Brandmelde-einrichtungen	Ertnahmekontakte der Handfeuerlöscher	Einzelausfall	5	-	-	-	Ereignisdetektion	150 m	Nein
58	betriebs-techn.	Brandmelde-einrichtungen	Ertnahmekontakte der Handfeuerlöscher	Totalausfall	5	-	-	-	Ereignisdetektion	gesamter Tunnel	Ja

Fortsetzung zu Tabelle A-2: Ergebnisse der qualitativen Risikobewertung

#	Schadensszenario			Priorität	Einflussfaktoren auf Häufigkeit		Einflussfaktoren auf Schadensausmaß		Exposition	Sicherheits-signifikanz
	Kategorie	System	Komponente		Fehlermodus	Unfall	mechanisch	Brand		
59	betriebs-techn.	Brandbekämpfungseinrichtungen	Handfeuerlöscher	Einzelausfall	5	-	-	- Bedrohung reduzieren	150 m	Nein
60	betriebs-techn.	Brandbekämpfungseinrichtungen	Handfeuerlöscher	Totalausfall	5	-	-	- Bedrohung reduzieren	gesamter Tunnel	Nein
61	betriebs-techn.	Brandbekämpfungseinrichtungen	Löschwasser-versorgung	Ausfall einer Entnahmestelle	5	-	-	- Bedrohung reduzieren	150 m	Ja
62	betriebs-techn.	Brandbekämpfungseinrichtungen	Löschwasser-versorgung	Teilausfall (Druck, Volumen)	5	-	-	- Bedrohung reduzieren	gesamter Tunnel	Ja
63	betriebs-techn.	Brandbekämpfungseinrichtungen	Löschwasser-versorgung	Totalausfall	5	-	-	- Bedrohung reduzieren	gesamter Tunnel	Ja
64	betriebs-techn.	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Notausgang	Ausfall eines Rettungswegs (Fluchtweg max. 600m)	5	-	-	- Evakuierungsweg - Zugänglichkeit	300 m	Ja
65	betriebs-techn.	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Notausgang	Ausfall zweier benachbarter Rettungswege (Fluchtweg 600-900m)	5	-	-	- Evakuierungsweg - Zugänglichkeit	600 m	Ja
66	betriebs-techn.	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Notausgang	Ausfall von mehr als zwei benachbarten Rettungswegen (Fluchtweg > 900m)	5	-	-	- Evakuierungsweg - Zugänglichkeit	≥ 900 m	Ja
67	betriebs-techn.	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Öffnungskontakte der Notausgangstür	Einzelausfall	5	-	-	- Ereignisdetektion	300 m	Ja
68	betriebs-techn.	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Öffnungskontakte der Notausgangstür	Totalausfall	5	-	-	- Ereignisdetektion	gesamter Tunnel	Ja
69	betriebs-techn.	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Leuchtrahmen Notausgang	Ausfall eines Rahmens	5	-	-	- Evakuierungsweg	300 m	Nein
70	betriebs-techn.	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Leuchtrahmen Notausgang	Totalausfall	5	-	-	- Evakuierungsweg	gesamter Tunnel	Nein
72	betriebs-techn.	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Orientierungsbeleuchtung	Ausfall eines Abschnitts	5	-	-	- Evakuierungsgeschwindigkeit - Evakuierungsweg	150 m	Nein
73	betriebs-techn.	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Orientierungsbeleuchtung	Totalausfall	5	-	-	- Evakuierungsgeschwindigkeit - Evakuierungsweg	gesamter Tunnel	Ja
75	betriebs-techn.	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Fluchtwegs-kennzeichnung	Totalausfall	5	-	-	- Evakuierungsweg	gesamter Tunnel	Ja

Fortsetzung zu Tabelle A-2: Ergebnisse der qualitativen Risikobewertung

#	Schadensszenario		Priorität	Einflussfaktoren auf Häufigkeit		Einflussfaktoren auf Schadensausmaß		Exposition	Sicherheits-signifikanz
	Kategorie	System		Komponente	Fehlermodus	Unfall	mechanisch		
76	betriebs-techn.	Verkehrstechnische Einrichtungen	Wechselverkehrszeichen	Ausfall vor dem Tunnel	2	- Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Warnen	-	600 m	Ja
78	betriebs-techn.	Verkehrstechnische Einrichtungen	Wechselverkehrszeichen	Totalausfall	2	- Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Warnen	-	gesamter Tunnel	Ja
80	betriebs-techn.	Verkehrstechnische Einrichtungen	Dauerlichtzeichen	Totalausfall	3	- Warnen	- Tunnel sperre	gesamter Tunnel	Nein
81	betriebs-techn.	Verkehrstechnische Einrichtungen	Höhenkontrolle	Totalausfall	1	- Warnen	-	gesamter Tunnel	Nein
82	betriebs-techn.	Verkehrstechnische Einrichtungen	Sperrschranken	Totalausfall	3	-	- Tunnel sperre	gesamter Tunnel	Ja
83	betriebs-techn.	Verkehrstechnische Einrichtungen	Lichtzeichenanlage	Totalausfall	2	- Warnen	- Tunnel sperre	gesamter Tunnel	Ja
85	betriebs-techn.	Verkehrstechnische Einrichtungen	selbstleuchtende Markierungselemente	Ausfall eines Abschnitts	1	- Warnen	- Evakuierungsgeschwindigkeit	150 m	Nein
86	betriebs-techn.	Verkehrstechnische Einrichtungen	selbstleuchtende Markierungselemente	Totalausfall	1	- Warnen	- Evakuierungsgeschwindigkeit	gesamter Tunnel	Nein
88	betriebs-techn.	Verkehrstechnische Einrichtungen	Verkehrsdatenerfassung	Totalausfall	2	- Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Warnen	-	gesamter Tunnel	Nein
89	betriebs-techn.	Verkehrstechnische Einrichtungen	Induktionsschleife Pannenbuchten	Totalausfall	3	- Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Warnen	-	gesamter Tunnel	Nein
93	betriebs-techn.	Messeinrichtungen	Sichttrübe Messung	Totalausfall	1			gesamter Tunnel	Ja bei GV bzw. RV mit täglich stockendem Verkehr
94	betriebs-techn.	Messeinrichtungen	Strömungsgeschwindigkeits- Messung	Ausfall einer Messeinheit	5	-	- Bedrohung reduzieren	ein Lüftungsabschnitt	Ja
95	betriebs-techn.	Messeinrichtungen	Strömungsgeschwindigkeits- Messung	Totalausfall	5	-	- Bedrohung reduzieren	gesamter Tunnel	Ja

Fortsetzung zu Tabelle A-2: Ergebnisse der qualitativen Risikobewertung

#	Schadensszenario		Priorität	Einflussfaktoren auf Häufigkeit		Einflussfaktoren auf Schadensausmaß		Exposition	Sicherheits-signifikanz	
	Kategorie	System		Komponente	Fehlermodus	Unfall	mechanisch			Brand
96	betriebs-techn.	Zentrale Einrichtungen	Betriebsgebäude	keine Überwachungs-möglichkeit	1	- Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Warnen	- Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Ereignisdetektion	- Ereignisdetektion - Bedrohung reduzieren - Evakuierungsreaktion - Tunnel sperren	gesamter Tunnel	Ja
97	betriebs-techn.	Zentrale Einrichtungen	Betriebsgebäude	keine Steuerungs-möglichkeit	1	- Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Warnen	- Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Ereignisdetektion	- Bedrohung reduzieren - Evakuierungsreaktion - Tunnel sperren	gesamter Tunnel	Ja
98	betriebs-techn.	Zentrale Einrichtungen	Ständig besetzte Stelle	keine Überwachungs-möglichkeit	1	- Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Warnen	- Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Ereignisdetektion	- Ereignisdetektion - Bedrohung reduzieren - Evakuierungsreaktion - Tunnel sperren	gesamter Tunnel	Ja
99	betriebs-techn.	Zentrale Einrichtungen	Ständig besetzte Stelle	keine Steuerungs-möglichkeit	1	- Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Warnen	- Verkehrsgeschwindigkeit regulieren - Ereignisdetektion	- Bedrohung reduzieren - Evakuierungsreaktion - Tunnel sperren	gesamter Tunnel	Ja

Fortsetzung zu Tabelle A-2: Ergebnisse der qualitativen Risikobewertung

A5 Ergebnisse des Fachworkshops

Die Ergebnisse des Fachworkshops zur Risikobewertung von Schadensszenarien, Definition möglicher risikoreduzierender Maßnahmen und den resultierenden verkehrlichen Betriebsszenarien werden im Folgenden anhand der in Kapitel 7.2 entwickelten Methodik dargestellt. Die Vorgehensweise ist zur besseren Übersicht in Abbildung A-3 noch einmal farblich markiert veranschaulicht, um die einzelnen Schritte in der Ergebnistabelle auf den folgenden Seiten rasch zu erfassen.

Schadensszenario	Sicherheitsrelevanz	Sicherheits-signifikanz	funktionale Kompensation	sicherheitstechnische Kompensation	verkehrliches Betriebsszenario
------------------	---------------------	-------------------------	--------------------------	------------------------------------	--------------------------------

Abbildung A-3: Struktur der Ergebnisse des Fachworkshops

#	Kategorie	Schadensszenario		Bewertungs- methode	Sicherheits- relevanz	Sicherheits- signifikanz	funktionale Kompensation	Anteil	sicherheitstechnische Kompensation		verkehrliches Betriebszenario	Anmerkungen
		System	Komponente						Fehlmodus	organisatorische Maßnahmen		
1	baulich	Bauwerk	einzelne Tunnelöhre	Verlust der Standsicherheit							Vollsperrung	in der betroffenen Röhre
2	baulich	Bauwerk	alle Tunnelröhren	Verlust der Standsicherheit							Vollsperrung	in allen Röhren
3	baulich	Bauteil	Innenschale	Tragfähigkeit beeinträchtigt							Vollsperrung	in den betroffenen Röhren
4	baulich	Bauteil	Innenschale	Tragfähigkeit nicht beeinträchtigt, einzelner Fahrstreifen betroffen							Normalbetrieb	Normalbetrieb bis zur Instandsetzung, dann resultiert das verkehrliche Betriebszenario aus den Platzanordnungen der Bauarbeiten
5	baulich	Bauteil	Innenschale	Tragfähigkeit nicht beeinträchtigt, gesamter Querschnitt							Normalbetrieb	Normalbetrieb bis zur Instandsetzung, dann resultiert das verkehrliche Betriebszenario aus den Platzanordnungen der Bauarbeiten
6	baulich	Bauteil	Zwischendecke	Tragfähigkeit beeinträchtigt							Vollsperrung	in den betroffenen Röhren
7	baulich	Bauteil	Zwischendecke	Tragfähigkeit nicht beeinträchtigt, einzelner Fahrstreifen betroffen							Normalbetrieb	Normalbetrieb bis zur Instandsetzung, dann resultiert das verkehrliche Betriebszenario aus den Platzanordnungen der Bauarbeiten
8	baulich	Bauteil	Zwischendecke	Tragfähigkeit nicht beeinträchtigt, gesamter Querschnitt							Normalbetrieb	Normalbetrieb bis zur Instandsetzung, dann resultiert das verkehrliche Betriebszenario aus den Platzanordnungen der Bauarbeiten
9	baulich	Bauteil	Auskleidung	einzelner Fahrstreifen betroffen							Normalbetrieb	Normalbetrieb bis zur Instandsetzung, dann resultiert das verkehrliche Betriebszenario aus den Platzanordnungen der Bauarbeiten
10	baulich	Bauteil	Auskleidung	gesamter Querschnitt betroffen							Normalbetrieb	Normalbetrieb bis zur Instandsetzung, dann resultiert das verkehrliche Betriebszenario aus den Platzanordnungen der Bauarbeiten
11	baulich	Fahrbahn	Fahrbahn	Fahrbahnschäden, einzelner Fahrstreifen							Geschwindigkeitsreduktion, ggf. Sperrung der betroffenen Fahrstreifen	verkehrliches Betriebszenario während der Instandsetzung resultiert aus den Platzanordnungen der Bauarbeiten
12	baulich	Fahrbahn	Fahrbahn	Fahrbahnschäden, gesamter Querschnitt							Geschwindigkeitsreduktion, ggf. Vollsperrung	verkehrliches Betriebszenario während der Instandsetzung resultiert aus den Platzanordnungen der Bauarbeiten
13	versperrend	Fahrbahn	Fahrbahn	einzelner Fahrstreifen betroffen							Sperrung der betroffenen Fahrstreifen, ggf. Vollsperrung	Sperre des Fahrstreifens, bis versperrendes Element beseitigt werden konnte. Ggf. ist für die Beseitigung eine temporäre Vollsperrung erforderlich
14	versperrend	Fahrbahn	Fahrbahn	gesamter Querschnitt betroffen							Vollsperrung	-
15	versperrend	Fahrbahn	Fahrbahn	Leistungsminimierung des Verkehrsflusses							Geschwindigkeitsreduktion	Leistungsminimierung aufgrund schlechter Sichtverhältnisse (z.B. Nebel, Staub) oder Fahrbahnverhältnisse (z.B. Ölspur)
16	betriebs- technisch	Entwässerung	Fahrbahn- entwässerung	Telaustfall (Entwässerungsleistung <100l/s je 50m Abschnitt)	Ja	Nein					Normalbetrieb	-
17	betriebs- technisch	Entwässerung	Fahrbahn- entwässerung	Todaustfall	Ja	Ja	Videoüberwachung	teilweise		verstärkte Videoüberwachung der Portale und Tunnelstapel	Einschränkung der Gefährdungsrisiko auf Kategorie D	-
18	betriebs- technisch	Energieversorgung	Mittelspannung	Todaustfall Anschluss	Ja	Ja	USV	teilweise		eingeschränkter Betrieb für 1 Std.; Geschwindigkeitsreduktion danach: Vollsperrung	für 1 Std.: Geschwindigkeitsreduktion, danach: Vollsperrung	-
19	betriebs- technisch	Energieversorgung	Niederspannung	Telaustfall (150m)	Ja	Ja		-		Geschwindigkeitsreduktion und Gefahrenwarnung	Geschwindigkeitsreduktion	-
20	betriebs- technisch	Energieversorgung	USV-Anlage	Todaustfall	Ja	Ja	Netzversorgung	vollständig			vorläufiger Normalbetrieb	-
21	betriebs- technisch	Beleuchtung	Innenstreifen- beleuchtung	Ausfall einer Leuchte	Nein						Normalbetrieb	-
22	betriebs- technisch	Beleuchtung	Innenstreifen- beleuchtung	Telaustfall (150m oder verringerte Leuchtleistung)	Ja	Ja		-		Geschwindigkeitsreduktion und Gefahrenwarnung	Geschwindigkeitsreduktion	-
23	betriebs- technisch	Beleuchtung	Innenstreifen- beleuchtung	Todaustfall	Ja	Ja	Orientierungsbeleuchtung selbstleuchtende Markierungselemente	teilweise		Geschwindigkeitsreduktion und Gefahrenwarnung	Geschwindigkeitsreduktion	-
24	betriebs- technisch	Beleuchtung	Einfahrtsbeleuchtung	Ausfall einer Leuchte	Nein						Normalbetrieb	-
25	betriebs- technisch	Beleuchtung	Einfahrtsbeleuchtung	Telaustfall (50 m oder verringerte Leuchtleistung)	Ja	Ja	verbleibende Einfahrtsbeleuchtung	teilweise		Erhöhung der Leuchtdichte verbleibender Leuchten	Geschwindigkeitsreduktion	Erhöhung der Leuchtdichte an die Lichtverhältnisse im Freien anpassen.
26	betriebs- technisch	Beleuchtung	Einfahrtsbeleuchtung	Todaustfall	Ja	Ja		-		Geschwindigkeitsreduktion und Gefahrenwarnung	Geschwindigkeitsreduktion	-
27	betriebs- technisch	Beleuchtung	Beleuchtung der Rettungswege	Ausfall in einem Rettungswege	Ja	Nein					vorläufiger Normalbetrieb	Lausprecherdurchsagen im Ereignisfall
28	betriebs- technisch	Beleuchtung	Beleuchtung der Rettungswege	Ausfall in allen Rettungswegen	Ja	Ja	Lausprecher	vollständig			vorläufiger Normalbetrieb	Lausprecherdurchsagen im Ereignisfall

Tabelle A-3: Ergebnisse des Fachworkshops

#	Kategorie	System	Schadensszenario		Bewertungs- methode	Sicherheits- relevanz	Sicherheits- signifikanz	funktionale Kompensation	Anteil	sicherheitstechnische Kompensation		verkehrsliches Betriebszenario	Anmerkungen
			Komponente	Fehlmodus						organisatorische Maßnahmen	verkehrliche Maßnahmen		
29	betriebs- technisch	Lüftung	Längslüftung Strahlventilatoren	Ausfall einer Einheit	quantitativ								
30	betriebs- technisch	Lüftung	Längslüftung Strahlventilatoren	Teilausfall	quantitativ								
31	betriebs- technisch	Lüftung	Längslüftung Strahlventilatoren	Totalausfall	quantitativ								
32	betriebs- technisch	Lüftung	Querdüfung Lüftungskleppen	Ausfall einer Einheit	quantitativ								
33	betriebs- technisch	Lüftung	Querdüfung Lüftungskleppen	Teilausfall	quantitativ								
34	betriebs- technisch	Lüftung	Querdüfung Lüftungskleppen	Totalausfall	quantitativ								
35	betriebs- technisch	Lüftung	Querdüfung Strahlventilatoren	Ausfall einer Einheit	quantitativ								
36	betriebs- technisch	Lüftung	Querdüfung Strahlventilatoren	Teilausfall	quantitativ								
37	betriebs- technisch	Lüftung	Querdüfung Strahlventilatoren	Totalausfall	quantitativ								
38	betriebs- technisch	Lüftung	Lüftung der Rettungsweg	Ausfall in einem Rettungsweg	qualitativ	Ja	Nein						
39	betriebs- technisch	Lüftung	Lüftung der Rettungsweg	Ausfall in allen Rettungswegen	quantitativ	Ja	Ja						
40	betriebs- technisch	Kommunikations- einrichtungen	Notrufeinrichtung	Ausfall einer Einheit (150m)	qualitativ	Ja	Nein						
41	betriebs- technisch	Kommunikations- einrichtungen	Notrufeinrichtung	Totalausfall	qualitativ	Ja	Ja	Videüberwachung und Lausprecher	teilweise				nicht verfügbare Einrichtungen für Tunnelnutzer kennzeichnen
42	betriebs- technisch	Kommunikations- einrichtungen	Öffnungskontakte der Notrufeinrichtung	Einzelausfall	qualitativ	Nein							
43	betriebs- technisch	Kommunikations- einrichtungen	Öffnungskontakte der Notrufeinrichtung	Totalausfall	qualitativ	Ja	Nein						
44	betriebs- technisch	Kommunikations- einrichtungen	Videüberwachung	Ausfall einer Kamera (75m)	qualitativ	Ja	Nein						
45	betriebs- technisch	Kommunikations- einrichtungen	Videüberwachung	Ausfall einer Kamera in Panoramabucht	qualitativ	Ja	Nein						
46	betriebs- technisch	Kommunikations- einrichtungen	Videüberwachung	Ausfall zweier benachbarter Kameras	qualitativ	Ja	Ja	verstärkte Streckenkontrolle	-				
47	betriebs- technisch	Kommunikations- einrichtungen	Videüberwachung	Totalausfall	qualitativ	Ja	Ja	verstärkte Streckenkontrolle	-				
48	betriebs- technisch	Kommunikations- einrichtungen	Tunnelfunk	Totalausfall	qualitativ	Ja	Ja	Information an Einsatzdienste	-				
49	betriebs- technisch	Kommunikations- einrichtungen	Verkehrsfunk	Totalausfall	qualitativ	Ja	Nein						
50	betriebs- technisch	Kommunikations- einrichtungen	Lausprecher	Einzelausfall	qualitativ	Ja	Nein						
51	betriebs- technisch	Kommunikations- einrichtungen	Lausprecher	Teilausfall (verringerte Sprachverständlichkeit)	qualitativ	Ja	Ja	Information an Einsatzdienste	teilweise				
52	betriebs- technisch	Kommunikations- einrichtungen	Lausprecher	Totalausfall	qualitativ	Ja	Ja	Information an Einsatzdienste	teilweise				

siehe Kapitel 7.4 Quantitative Risikobewertung

Fortsetzung zu Tabelle A-3: Ergebnisse des Fachworkshops

#	Kategorie	Szenario		Bewertungs- methode	Sicherheits- relevanz	Sicherheits- signifikanz	funktionale Kompensation	Anteil	sicherheitstechnische Kompensation		verkehrliches Betriebszenario	Anmerkungen
		Komponente	Fehlmodus						organisatorische Maßnahmen	verkehrliche Maßnahmen		
53	betriebs- technisch	Brandmelde- einrichtungen	Einzelausfall (150m)	qualitativ	Ja	Nein					vorfälliger Normalbetrieb	nicht verfügbare Einrichtungen für Tunnelnutzer kennzeichnen
54	betriebs- technisch	Brandmelde- einrichtungen	Totalausfall	qualitativ	Ja	Ja	linienhaftes Wärme Meldesystem	vollständig			vorfälliger Normalbetrieb	nicht verfügbare Einrichtungen für Tunnelnutzer kennzeichnen
55	betriebs- technisch	Brandmelde- einrichtungen	Ausfall eines Abschnitts (150m)	qualitativ	Ja	Ja	Rauchmeldesystem und Videoüberwachung ODER Handfeuermelder und sicherheitstechnische Kompensation	vollständig BZW. teilweise		Geschwindigkeitsreduktion	Geschwindigkeitsreduktion	-
56	betriebs- technisch	Brandmelde- einrichtungen	Totalausfall	qualitativ	Ja	Ja	Rauchmeldesystem und Videoüberwachung ODER Handfeuermelder und sicherheitstechnische Kompensation	vollständig BZW. teilweise		Geschwindigkeitsreduktion und LKW-Fahrverbot	Geschwindigkeitsreduktion und LKW-Fahrverbot	-
57	betriebs- technisch	Brandmelde- einrichtungen	Einzelausfall	qualitativ	Ja	Nein					vorfälliger Normalbetrieb	-
58	betriebs- technisch	Brandmelde- einrichtungen	Totalausfall	qualitativ	Ja	Ja	linienhaftes Wärme Meldesystem	vollständig			vorfälliger Normalbetrieb	-
59	betriebs- technisch	Brandbekämpfungs- einrichtungen	Einzelausfall (150m)	qualitativ	Ja	Nein					vorfälliger Normalbetrieb	nicht verfügbare Einrichtungen für Tunnelnutzer kennzeichnen
60	betriebs- technisch	Brandbekämpfungs- einrichtungen	Totalausfall	qualitativ	Ja	Nein					vorfälliger Normalbetrieb	nicht verfügbare Einrichtungen für Tunnelnutzer kennzeichnen
61	betriebs- technisch	Brandbekämpfungs- einrichtungen	Ausfall einer Entnahmestelle (150m)	qualitativ	Ja	Ja					vorfälliger Normalbetrieb	nicht verfügbare Einrichtungen für Tunnelnutzer kennzeichnen
62	betriebs- technisch	Brandbekämpfungs- einrichtungen	Totalausfall (Druck, Volumen)	qualitativ	Ja	Ja					vorfälliger Normalbetrieb	nicht verfügbare Einrichtungen für Tunnelnutzer kennzeichnen
63	betriebs- technisch	Brandbekämpfungs- einrichtungen	Totalausfall	qualitativ	Ja	Ja					vorfälliger Normalbetrieb	-
64	betriebs- technisch	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Ausfall eines Rettungswegs (Fluchtweg max. 600m)	qualitativ	Ja	Ja				Geschwindigkeitsreduktion und Gefahrenvermutung und LKW-Fahrverbot	Geschwindigkeitsreduktion und LKW-Fahrverbot	nicht verfügbare Einrichtungen für Tunnelnutzer kennzeichnen
65	betriebs- technisch	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Ausfall zweier benachbarter Rettungswege (Fluchtweg 600-900m)	qualitativ	Ja	Ja				Geschwindigkeitsreduktion und Gefahrenvermutung und LKW-Fahrverbot	Geschwindigkeitsreduktion und LKW-Fahrverbot	nicht verfügbare Einrichtungen für Tunnelnutzer kennzeichnen
66	betriebs- technisch	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Ausfall von mehr als zwei benachbarten Rettungswegen (Fluchtweg > 900m)	qualitativ	Ja	Ja				Geschwindigkeitsreduktion und Gefahrenvermutung und LKW-Fahrverbot	Geschwindigkeitsreduktion und LKW-Fahrverbot	nicht verfügbare Einrichtungen für Tunnelnutzer kennzeichnen
67	betriebs- technisch	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Einzelausfall	qualitativ	Ja	Ja	Videoüberwachung	teilweise			vorfälliger Normalbetrieb	-
68	betriebs- technisch	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Totalausfall	qualitativ	Ja	Ja	Videoüberwachung	teilweise			vorfälliger Normalbetrieb	-
69	betriebs- technisch	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Ausfall eines Rahmens	qualitativ	Ja	Nein					vorfälliger Normalbetrieb	-
70	betriebs- technisch	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Totalausfall	qualitativ	Ja	Nein					vorfälliger Normalbetrieb	-
71	betriebs- technisch	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Ausfall einer Einheit (25m)	qualitativ	Nein						Normalbetrieb	-
72	betriebs- technisch	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Ausfall eines Abschnitts (150m)	qualitativ	Ja	Nein					vorfälliger Normalbetrieb	-
73	betriebs- technisch	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Totalausfall	qualitativ	Ja	Ja	selbstleuchtende Markierungselemente	vollständig			vorfälliger Normalbetrieb	-
74	betriebs- technisch	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Ausfall einer Einheit (25m)	qualitativ	Nein						Normalbetrieb	-
75	betriebs- technisch	Notausgänge, Flucht- und Rettungswege	Totalausfall	qualitativ	Ja	Ja	Videoüberwachung und Lausprecher	teilweise			vorfälliger Normalbetrieb	im Ereignisfall Tunnelnutzer über Lausprecher informieren

Fortsetzung zu Tabelle A-3: Ergebnisse des Fachworkshops

#	Kategorie	Sicherheitsrisikozusammenhang		Bewertungsmethodik	Sicherheitsrelevanz	Sicherheits-signifikanz	funktionale Kompensation	Anteil	sicherheitstechnische Kompensation		verkehrliches Betriebszenario	Anmerkungen
		System	Komponente						Fehlmodus	organisatorische Maßnahmen		
76	betriebs-technisch	Verkehrstechnische Einrichtungen	Wechselverkehrszeichen	Ausfall vor dem Tunnel	Ja	Ja				Geschwindigkeitsreduktion durch temporäre Verkehrszeichen	Geschwindigkeitsreduktion	-
77	betriebs-technisch	Verkehrstechnische Einrichtungen	Wechselverkehrszeichen	Ausfall einer Einheit im Tunnel	Nein						Normalbetrieb	-
78	betriebs-technisch	Verkehrstechnische Einrichtungen	Wechselverkehrszeichen	Totalausfall	Ja	Ja				Geschwindigkeitsreduktion durch temporäre Verkehrszeichen	Geschwindigkeitsreduktion	-
79	betriebs-technisch	Verkehrstechnische Einrichtungen	Dauerlichtzeichen	Ausfall einer Einheit (300-600m)	Nein						Normalbetrieb	-
80	betriebs-technisch	Verkehrstechnische Einrichtungen	Dauerlichtzeichen	Totalausfall	Ja	Nein				im Ereignisfall: Fernsteuersperre durch temporäre Verkehrszeichen	vorläufiger Normalbetrieb, bei stehendem Fahrzeug im Tunnel: Geschwindigkeitsreduktion u. Gefahrenwarnung	-
81	betriebs-technisch	Verkehrstechnische Einrichtungen	Leuchtenkontrolle	Totalausfall	Ja	Nein					vorläufiger Normalbetrieb	-
82	betriebs-technisch	Verkehrstechnische Einrichtungen	Sperrelemente	Totalausfall	Ja	Ja		vollständig		Lichtzeichenanlage und, wenn vorhanden: Wechselverkehrszeichen und/oder Dauerlichtzeichen	vorläufiger Normalbetrieb	-
83	betriebs-technisch	Verkehrstechnische Einrichtungen	Lichtzeichenanlage	Totalausfall	Ja	Ja		vollständig		Sperrelemente und Wechselverkehrszeichen und Dauerlichtzeichen	vorläufiger Normalbetrieb	-
84	betriebs-technisch	Verkehrstechnische Einrichtungen	selbstleuchtende Markierungselemente	Ausfall einer Leuchte	Nein						Normalbetrieb	-
85	betriebs-technisch	Verkehrstechnische Einrichtungen	selbstleuchtende Markierungselemente	Ausfall eines Abschnitts (150m)	Ja	Nein					vorläufiger Normalbetrieb	-
86	betriebs-technisch	Verkehrstechnische Einrichtungen	selbstleuchtende Markierungselemente	Totalausfall	Ja	Nein					vorläufiger Normalbetrieb	-
87	betriebs-technisch	Verkehrstechnische Einrichtungen	Verkehrsblendenfassung	Ausfall eines Messenheits (300m)	Nein						Normalbetrieb	-
88	betriebs-technisch	Verkehrstechnische Einrichtungen	Verkehrsblendenfassung	Totalausfall	Ja	Nein					vorläufiger Normalbetrieb	-
89	betriebs-technisch	Verkehrstechnische Einrichtungen	Induktionschleife	Totalausfall	Ja	Nein					vorläufiger Normalbetrieb	-
90	betriebs-technisch	Messeinrichtungen	Kohlenmonoxid-Messung	Ausfall einer Messeinheit (=ein Lüftungsabschnitt)	Nein						Normalbetrieb	-
91	betriebs-technisch	Messeinrichtungen	Kohlenmonoxid-Messung	Totalausfall	Nein						Normalbetrieb	-
92	betriebs-technisch	Messeinrichtungen	Sichtrohr-Messung	Ausfall einer Messeinheit (300m)	Nein						Normalbetrieb	-
93	betriebs-technisch	Messeinrichtungen	Sichtrohr-Messung	Totalausfall	Ja	Ja bei GV bzw. RV mit täglich stockendem Verkehr		-		präventive Betriebsstufung bei GV bzw. RV mit täglich stockendem Verkehr	vorläufiger Normalbetrieb	-
94	betriebs-technisch	Messeinrichtungen	Strömungsgeschwindigkeits-Messung	Ausfall einer Messquerschnitts (=ein Lüftungsabschnitt)	Ja	Ja		vollständig		Messung über verbleibende Messgeräte	vorläufiger Normalbetrieb	-
95	betriebs-technisch	Messeinrichtungen	Strömungsgeschwindigkeits-Messung	Totalausfall								
96	betriebs-technisch	Zentrale Einrichtung	Betriebsgebäude	keine Überwachungsmöglichkeit	Ja	Ja		vollständig		Ständig besetzte Stelle		Bewertung erfolgt wie Totalausfall der Lüftung, da keine Regelung erfolgen kann. siehe Kapitel 7.4 Quantitative Risikobewertung
97	betriebs-technisch	Zentrale Einrichtung	Betriebsgebäude	keine Steuerungsmöglichkeit	Ja	Ja		vollständig		Ständig besetzte Stelle		vorläufiger Normalbetrieb
98	betriebs-technisch	Zentrale Einrichtung	Ständig besetzte Stelle	keine Überwachungsmöglichkeit	Ja	Ja		vollständig		Tunnel sperren (ständig besetzte Stelle) und Betriebsgebäude besetzen und Tunnel von dort aus überwachen/steuern.		-
99	betriebs-technisch	Zentrale Einrichtung	Ständig besetzte Stelle	keine Steuerungsmöglichkeit	Ja	Ja		vollständig		Polizei informieren und Betriebsgebäude besetzen und Tunnel von dort aus überwachen/steuern oder ggf. sperren.		-

Fortsetzung zu Tabelle A-3: Ergebnisse des Fachworkshops

A6 Auswertung der mikroskopischen Verkehrssimulation

Im Folgenden werden die Daten sämtlicher durchgeführter Simulationsläufe dargestellt, wobei in der Spalte „Messung“ jeweils angegeben wird, ob der angesetzte Fahrzeugzufluss auch am Messquerschnitt im Tunnel auftritt und somit abwickelt werden kann, bzw. zu welchem Anteil dies möglich ist.

verwendete Abkürzungen:

- GV Gegenverkehr
- RV Richtungsverkehr
- v_{red} Geschwindigkeitsreduktion
- FS Fahrstreifen

Tunnel- länge	Verkehr	verkehrliches Betriebsszenario	Schema- skizze	Zufluss (Kfz/h)	Messung	
					↓	↑
400 m	spitze	Normalbetrieb		1516	✓	✓
		v _{red} 60 km/h			✓	✓
		v _{red} 40 km/h			✓	✓
		alternierender RV 2 FS			51%	51%
		alternierender RV 1 FS			51%	51%
		Sperre 1 FS, v _{red} 60/40 km/h			✓	0%
	mittel	Normalbetrieb		772	✓	✓
		v _{red} 60 km/h			✓	✓
		v _{red} 40 km/h			✓	✓
		alternierender RV 2 FS			✓	✓
		alternierender RV 1 FS			✓	✓
		Sperre 1 FS, v _{red} 60/40 km/h			✓	0%
1200 m	spitze	Normalbetrieb		1516	✓	✓
		v _{red} 60 km/h			✓	✓
		v _{red} 40 km/h			✓	✓
		alternierender RV 2 FS			52%	52%
		alternierender RV 1 FS			52%	52%
		Sperre 1 FS, v _{red} 60/40 km/h			✓	0%
	mittel	Normalbetrieb		772	✓	✓
		v _{red} 60 km/h			✓	✓
		v _{red} 40 km/h			✓	✓
		alternierender RV 2 FS			✓	✓
		alternierender RV 1 FS			✓	✓
		Sperre 1 FS, v _{red} 60/40 km/h			✓	0%

Tabelle A-4: Auswertung der Verkehrssimulation der GV-Tunnel mit RQ 11 t

Tunnel- länge	Verkehr	verkehrliches Betriebsszenario		Schemaskizze	Zufluss (Kfz/h)	Messung	
						↓	↑
600 m	spitze	Normalbetrieb	2n + 2n		4499	94%	94%
		LKW-Sperre	2n + 2			94%	✓
		v _{red} 60 km/h	2n + 2			94%	92%
		v _{red} 40 km/h	2n + 2			94%	83%
		GV-Betrieb in 2. Röhre 1:1	2 + 0			37%	37%
		alternierender RV	2 + 0			35%	35%
		Sperre 1 FS, v _{red} 60 km/h	2n + 1			94%	37%
	mittel	Normalbetrieb	2n + 2n		1964	✓	✓
		v _{red} 60 km/h	2n + 2			✓	✓
		v _{red} 40 km/h	2n + 2			✓	✓
		GV-Betrieb in 2. Röhre 1:1	2 + 0			93%	93%
		alternierender RV	2 + 0			81%	81%
Sperre 1 FS, v _{red} 60 km/h	2n + 1		✓	93%			
1200 m	spitze	Normalbetrieb	2n + 2n		4499	94%	94%
		LKW-Sperre	2n + 2			94%	✓
		v _{red} 60 km/h	2n + 2			94%	90%
		v _{red} 40 km/h	2n + 2			94%	81%
		GV-Betrieb in 2. Röhre 1:1	2 + 0			36%	36%
		alternierender RV	2 + 0			33%	33%
		Sperre 1 FS, v _{red} 60 km/h	2n + 1			94%	36%
	mittel	Normalbetrieb	2n + 2n		1964	✓	✓
		v _{red} 60 km/h	2n + 2			✓	✓
		v _{red} 40 km/h	2n + 2			✓	✓
		GV-Betrieb in 2. Röhre 1:1	2 + 0			92%	92%
		alternierender RV	2 + 0			76%	76%
Sperre 1 FS, v _{red} 60 km/h	2n + 1		✓	92%			

Tabelle A-5: Auswertung der Verkehrssimulation der RV-Tunnel mit RQ 31 t

Tunnel-länge	Verkehr	verkehrliches Betriebsszenario		Schemaskizze	Zufluss (Kfz/h)	Messung	
						↓	↑
600 m	spitze	Normalbetrieb	2n + 2n		5746	73%	73%
		LKW-Sperre	2n + 2			73%	78%
		Seitenstreifenbefahrung	3s + 3s			✓	✓
		v _{red} 80 km/h	2n + 2			73%	72%
		v _{red} 60 km/h	2n + 2			73%	71%
		v _{red} 40 km/h	2n + 2			73%	65%
		GV-Betrieb in 2. Röhre 1:1	2 + 0			28%	28%
		GV-Betrieb in 2. Röhre 2:1	3s + 0			71%	28%
		alternierender RV	2 + 0			28%	28%
		Sperre 1 FS, v _{red} 80 km/h	2n + 1			73%	30%
	Sperre 1 FS, v _{red} 60 km/h	2n + 1		73%	28%		
	mittel	Normalbetrieb	2n + 2n		2567	✓	✓
		Seitenstreifenbefahrung	3s + 3s			✓	✓
		v _{red} 80 km/h	2n + 2			✓	✓
		v _{red} 60 km/h	2n + 2			✓	✓
		v _{red} 40 km/h	2n + 2			✓	✓
		GV-Betrieb in 2. Röhre 1:1	2 + 0			62%	62%
		GV-Betrieb in 2. Röhre 2:1	3s + 0			✓	62%
		alternierender RV	2 + 0			62%	62%
		Sperre 1 FS, v _{red} 80 km/h	2n + 1			✓	60%
Sperre 1 FS, v _{red} 60 km/h		2n + 1		✓		62%	
1200 m	spitze	Normalbetrieb	2n + 2n		5746	73%	73%
		LKW-Sperre	2n + 2			73%	77%
		Seitenstreifenbefahrung	3s + 3s			✓	✓
		v _{red} 80 km/h	2n + 2			73%	72%
		v _{red} 60 km/h	2n + 2			73%	72%
		v _{red} 40 km/h	2n + 2			73%	63%
		GV-Betrieb in 2. Röhre 1:1	2 + 0			28%	28%
		GV-Betrieb in 2. Röhre 2:1	3s + 0			72%	28%
		alternierender RV	2 + 0			26%	26%
		Sperre 1 FS, v _{red} 80 km/h	2n + 1			73%	30%
		Sperre 1 FS, v _{red} 60 km/h	2n + 1			73%	28%

Tabelle A-6: Auswertung der Verkehrssimulation der RV-Tunnel mit RQ 31 T

Tunnel -länge	Verkehr	verkehrliches Betriebsszenario		Schemaskizze	Zufluss (Kfz/h)	Messung	
						↓	↑
1200 m	mittel	Normalbetrieb	$2n + 2n$		2567	✓	✓
		Seitenstreifenbefahrung	$3s + 3s$			✓	✓
		$v_{red} 80 \text{ km/h}$	$2n + 2$			✓	✓
		$v_{red} 60 \text{ km/h}$	$2n + 2$			✓	✓
		$v_{red} 40 \text{ km/h}$	$2n + 2$			✓	✓
		GV-Betrieb in 2. Röhre 1:1	$2 + 0$			63%	63%
		GV-Betrieb in 2. Röhre 2:1	$3s + 0$			✓	63%
		alternierender RV	$2 + 0$			59%	59%
		Sperre 1 FS, $v_{red} 80 \text{ km/h}$	$2n + 1$			✓	60%
		Sperre 1 FS, $v_{red} 60 \text{ km/h}$	$2n + 1$			✓	63%

Fortsetzung zu Tabelle A-6: Auswertung der Verkehrssimulation der RV-Tunnel mit RQ 31 T























Tunnel- länge	Verkehr	verkehrliches Betriebsszenario		Schemaskizze	Zufluss (Kfz/h)	Messung	
						↓	↑
600 m	spitze	Normalbetrieb	3n + 3n		6941	82%	82%
		LKW-Sperre	3n + 3			82%	88%
		Seitenstreifenbefahrung	4s + 4s			✓	✓
		v _{red} 80 km/h	3n + 3			82%	83%
		v _{red} 60 km/h	3n + 3			82%	82%
		v _{red} 40 km/h	3n + 3			82%	75%
		GV-Betrieb in 2. Röhre 2:1	3 + 0			54%	22%
		GV-Betrieb in 2. Röhre 2:2	4 + 0			54%	54%
		alternierender RV	3 + 0			32%	32%
		Sperre 1 FS, v _{red} 80 km/h	3n + 2			82%	55%
		Sperre 1 FS, v _{red} 60 km/h	3n + 2			82%	54%
		Sperre 2 FS, v _{red} 60 km/h	3n + 1			82%	22%
	mittel	Normalbetrieb	3n + 3n		4495	✓	✓
		Seitenstreifenbefahrung	4s + 4s			✓	✓
		v _{red} 80 km/h	3n + 3			✓	✓
		v _{red} 60 km/h	3n + 3			✓	✓
		v _{red} 40 km/h	3n + 3			✓	✓
		GV-Betrieb in 2. Röhre 2:1	3 + 0			86%	34%
		GV-Betrieb in 2. Röhre 2:2	4 + 0			86%	86%
		alternierender RV	3 + 0			50%	50%
Sperre 1 FS, v _{red} 80 km/h	3n + 2		✓	86%			
Sperre 2 FS, v _{red} 60 km/h	3n + 1		✓	34%			

Tabelle A-7: Auswertung der Verkehrssimulation der RV-Tunnel mit RQ 36 T

Tunnel- länge	Verkehr	verkehrliches Betriebsszenario		Schemaskizze	Zufluss (Kfz/h)	Messung	
						↓	↑
1200 m	spitze	Normalbetrieb	3n + 3n		6941	83%	83%
		LKW-Sperre	3n + 3			83%	87%
		Seitenstreifenbefahrung	4s + 4s			✓	✓
		v _{red} 80 km/h	3n + 3			83%	83%
		v _{red} 60 km/h	3n + 3			83%	82%
		v _{red} 40 km/h	3n + 3			83%	74%
		GV-Betrieb in 2. Röhre 2:1	3 + 0			54%	22%
		GV-Betrieb in 2. Röhre 2:2	4 + 0			54%	54%
		alternierender RV	3 + 0			32%	32%
		Sperre 1 FS, v _{red} 80 km/h	3n + 2			83%	55%
		Sperre 1 FS, v _{red} 60 km/h	3n + 2			83%	54%
		Sperre 2 FS, v _{red} 60 km/h	3n + 1			83%	22%
	mittel	Normalbetrieb	3n + 3n		4495	✓	✓
		Seitenstreifenbefahrung	4s + 4s			✓	✓
		v _{red} 80 km/h	3n + 3			✓	✓
		v _{red} 60 km/h	3n + 3			✓	✓
		v _{red} 40 km/h	3n + 3			✓	✓
		GV-Betrieb in 2. Röhre 2:1	3 + 0			86%	34%
		GV-Betrieb in 2. Röhre 2:2	4 + 0			85%	85%
		alternierender RV	3 + 0			50%	50%
Sperre 1 FS, v _{red} 80 km/h		3n + 2		✓		85%	
Sperre 2 FS, v _{red} 60 km/h		3n + 1		✓		34%	

Fortsetzung zu Tabelle A-7: Auswertung der Verkehrssimulation der RV-Tunnel mit RQ 36 T