

# 8. BAST- Tunnelsymposium

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 145

**bast**

# **8. BAST- Tunnelsymposium**

**vom 6. Juni 2018 in der  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Bergisch Gladbach**

**Tagungsband**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 145**

**bast**

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

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

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

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

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

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

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

## **Impressum**

### **Herausgeber**

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

### **Redaktion**

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

### **Druck und Verlag**

Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9293  
ISBN 978-3-95606-415-9

Bergisch Gladbach, Oktober 2018

## Kurzfassung – Abstract

### 8. BASt-Tunnelsymposium

Seit mehreren größeren Brandereignissen in Straßentunneln um die Jahrtausendwende wurde sowohl im baulichen Brandschutz als auch in der sicherheitstechnischen Tunnelausstattung viel getan. Zahlreiche technische Neu- und Weiterentwicklungen haben seither Eingang in Bau, Ausstattung und Betrieb der Bauwerke gefunden.

Im europäischen aber auch weltweiten Vergleich befinden sich die deutschen Straßentunnel auf einem sehr hohen Sicherheitsniveau. Dies ist auch erforderlich, da Deutschland als Transitland in Europa über ein hoch belastetes Straßennetz verfügt. Tunnel stellen neuralgische Punkte in diesem Netz dar. Daher gilt es hier für den Nutzer ein Optimum an Sicherheit zu gewährleisten, gleichzeitig aber auch den Verkehrsfluss so gering wie möglich durch Wartungs- bzw. Sperrzeiten der Tunnelröhren zu behindern.

Mit diesem Tagungsband sollen die neuesten Erkenntnisse sowohl zur Verkehrssicherheit in Tunneln, als auch zur bautechnischen Sicherheit für die Verwendung in der alltäglichen Praxis nähergebracht werden.

Nach einem allgemeinen Überblick zum Stand von aktuellen Bau-, Instandsetzungs- und Nachrüstungsmaßnahmen im deutschen Fernstraßentunnelnetz erfolgt die Vorstellung zweier Forschungsprojekte der BASt, dem europäischen Projekt ECORoads, welches die Harmonisierung zwischen Sicherheitsanforderungen auf freier Strecke und Tunnel zum Inhalt hat, und dem BASt-eigenen Modelltunnel, in dem längsneigungsabhängige, modellmaßstäbliche Rauchausbreitungsuntersuchungen vorgenommen wurden.

Im zweiten Themenbereich, der die Grundlagen für Planung und Bau fokussiert, wird auf die Fortschreibung des betriebstechnischen Regelwerks, die Entwicklung von Kostenansätzen für Straßentunnel sowie auf planerische Herausforderungen im Rahmen des Großprojektes Fehmarnbeltquerung eingegangen.

Im Themenschwerpunkt Tunnelbetrieb werden neue Erkenntnisse zur Belüftung von Straßentunneln bei

Stau und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Risikoanalyse vorgestellt. Außerdem gibt es ein Update zum Stand der Umsetzung des Pilotprojektes Tunnelsimulator aus zwei Bundesländern.

Im Rahmen der Beiträge zu Instandsetzung und Nachrüstung von Straßentunneln wird dem aktuellen Thema des Umgangs mit Chloridbelastungen von Tunnelinnenschalen nachgegangen, sowie den Besonderheiten bei der Nachrüstung mehrerer Bestandstunnelbauwerke der Stadt Köln mit Schwerpunkt auf dem Stadtautobahntunnel Kalk.

An dieser Stelle sei allen Autoren gedankt, die zu dieser gelungenen Veranstaltung beigetragen haben.

### 8th BASt Tunnel Symposium

Since several major fire events in road tunnels around the turn of the millennium, much has been done both in structural fire protection and in safety equipment of tunnels. Numerous new and further technical developments have since found their way into the construction, equipment and operation of the structures.

In European but also worldwide comparison, the German road tunnels are at a very high safety level. This is also necessary because Germany, as a transit country in Europe, has a highly loaded road network. Tunnels are neuralgic points in this network. It is therefore important to ensure optimum safety for the user while at the same time obstructions of the traffic flow due to maintenance or closure times of the tunnel tubes must be kept as small as possible.

The purpose of these conference proceedings is to present the latest findings on traffic safety in tunnels as well as on structural safety for use in everyday practice.

After a general overview of the current state of construction, repair and retrofitting measures in tunnels within the German trunk road network, two BASt research projects will be presented: the European ECORoads project, which deals with the harmonization of safety requirements on open roads and tunnels, and BASt's own Modell Tunnel, in which longitudinal slope dependent, model-scale smoke propagation investigations were carried out.

In the second topic area, which focuses on the basics for planning and construction, the update of the operational rules and regulations, the development of cost estimates for road tunnels and planning challenges within the context of the major project 'Fehmarnbeltquerung' are dealt with.

The main topic Tunnel Operation presents new findings on the ventilation of road tunnels during traffic jams and the associated effects on risk analysis. There is also an update on the status of the implementation of the tunnel simulator pilot project from two federal states.

Within the framework of the contributions on the repair and retrofitting of road tunnels, the current topic of dealing with chloride loads of tunnel liners is followed up and special features of the retrofitting of several existing tunnel structures of the City of Cologne are described with a focus on the urban motorway tunnel Kalk.

We would like to take this opportunity to thank all the authors who contributed to this successful event.

## Inhalt

<b>Tunnelbau und -betrieb in Deutschland</b>	
Gero Marzahn . . . . .	7
<b>ECORoads – Mehr Sicherheit für den Tunnelnutzer?</b>	
Ingo Kaundinya, Christof Sistenich . . . . .	10
<b>Längsneigungsabhängige modellmaßstäbliche Rauchausbreitungsuntersuchungen</b>	
Shoichi Kume, Christof Sistenich, Felix Wawrzyniak . . . . .	15
<b>Betriebstechnisches Regelwerk für Straßentunnel – Stand der Fortschreibung</b>	
Martin Kostrzewa . . . . .	28
<b>Kostenansätze für Straßentunnel</b>	
Markus Thewes, Götz Vollmann, Peter Hoffmann, Werner Riepe, Andreas Wuttig, Wolf-Dieter Friebe, Ingo Kaundinya, Anne Lehan . . . . .	32
<b>Feste Fehmarnbeltquerung – Herausforderungen bei Planung, Bau und Betrieb des Tunnels</b>	
Friedrich Hilgenstock . . . . .	39
<b>Risikobewertung unterschiedlicher Längslüftungsstrategien bei Bränden in Richtungsverkehrstunneln mit Verkehrsstau</b>	
Bernhard Kohl, Oliver Senekowitsch . . . . .	47
<b>Pilotprojekt Tunnelsimulator Baden-Württemberg</b>	
Nikolaus Wolf . . . . .	54
<b>Chloridbelastung von Tunnelinnenschalen, Analyse, Vorbereitung, Instandsetzung und Konsequenzen für den Neubau</b>	
Uwe Willberg, Angelika Schießl-Pecka . . . . .	58
<b>Tunnelnachrüstung in Köln</b>	
Uwe Grimsehl, Ute Buchmann . . . . .	66



Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn  
Leiter des Referates „Brücken, Tunnel  
und sonstige Ingenieurbauwerke“

Bundesministerium für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

## Tunnelbau und -betrieb in Deutschland

### 1. Bedeutung des Tunnelbaus

Ohne Mobilität keine Prosperität. Das ist das ökonomische Grundprinzip der Wohlstandspyramide. Eine dynamische Volkswirtschaft braucht eine moderne und leistungsfähige Infrastruktur als Voraussetzung für Wachstum, Arbeit und Wohlstand. Sie bildet das Rückgrat für Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft und die Mobilität der Bürgerinnen und Bürger in Deutschland. Als Logistikstandort Nr. 1 in Europa ist Deutschland Verkehrsdrehscheibe zwischen Ost, West, Nord und Süd. Dafür müssen die Voraussetzungen stimmen und stetig angepasst werden. Die trifft auch die Infrastruktur, die den wachsenden Verkehrsansprüchen gerecht werden muss. Besondere Anforderungen ergeben sich aus der prognostizierten Entwicklung des Güterverkehrs auf der Straße.

Deutschland besitzt ein im internationalen Vergleich hervorragend ausgebautes Straßennetz. Dies belegen auch neueste Untersuchungen. Diesen Bestand zu erhalten und dort, – wo nötig – bedarfsgerecht auszubauen, ist eine wesentliche Aufgabe.

Mit dem Investitionshochlauf werden die finanziellen Spielräume für Verkehrsinvestitionen nachhaltig gesichert. Gemäß dem Prinzip „Erhalt vor Neubau“

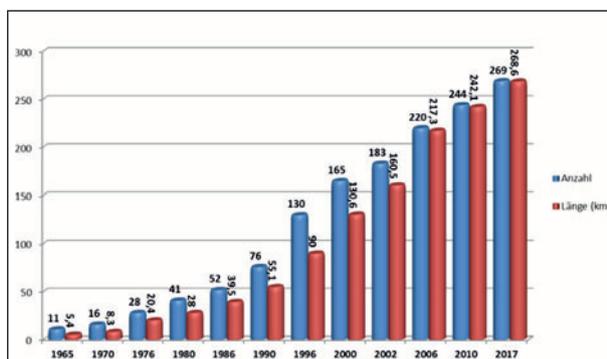


Bild 1: Tunnel der Bundesfernstraßen in Baulast des Bundes [BMVI]

werden die Gelder für die Erhaltung von Bundesfernstraßen von 1,85 Milliarden Euro Ist-Ausgaben im Jahr 2011 auf geplante 4,2 Milliarden Euro in 2020 gesteigert. Die Investitionslinie im Haushalt des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur zeigt für die Erhaltung stetig nach oben. Der Mittelaufwuchs hat ein nie dagewesenes Niveau erreicht.

Dies kommt auch dem Tunnelbau zugute. Obgleich die großen Tunnelprojekte im Rahmen der Verkehrsprojekte Deutsche Einheit VDE im Wesentlichen abgearbeitet sind, nimmt die Anzahl der Tunnel weiterhin stetig zu. Deutschland kann inzwischen auf 415 Tunnel mit einer Gesamtröhrenlänge von mehr als 350 km verweisen. Davon befinden sich 269 Tunnel im Bereich der Bundesfernstraßen mit einer Gesamtröhrenlänge von fast 270 km in der Baulast des Bundes (Bild 1). Die meisten Straßentunnel befinden sich topographisch bedingt im Süden des Landes, insbesondere in Baden-Württemberg, aber auch in Bayern. Weitere 20 Tunnel befinden sich derzeit im Bau, für weitere 90 Tunnel laufen konkrete Planungsschritte.

Viele bestehende Tunnel wurden in der Zeit nach 1990 gebaut, so dass das durchschnittliche Alter der Tunnel nunmehr bei etwa 25 Jahren liegt. Die durchschnittliche Länge der Tunnelröhren beträgt aktuell rund 670 m. Straßentunnel in Deutschland zählen mit ihrer umfangreichen Sicherheitstechnik zu den sichersten Tunneln Europas. Dieses wurde auch durch ein im Wesentlichen abgeschlossenes Nachrüstungsprogramm, bei dem ältere Tunnel an die neuesten Sicherheitsstandards angepasst wurden, erreicht. Den Tunnelnutzern wird damit eine optimale Sicherheit geboten.

### 2. Nachrüstungsprogramm

Als Reaktion auf die Tunnelkatastrophen im benachbarten Ausland Ende des letzten Jahrhunderts wurde ein sicherheitstechnisches Nachrüstungsprogramm entwickelt. Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) hat hierzu gemeinsam mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) eine Bewertung der für die Nachrüstung notwendigen Maßnahmen durchgeführt und eine Prioritätenliste aufgestellt. Auf dieser Grundlage wurde ein Nachrüstungsprogramm erstellt und umgesetzt, welches sowohl bautechnische als auch betriebstechnische Maßnahmen umfasste.

Neben einem Sofortprogramm, bei dem sicherheitstechnische Verbesserungen, wie z. B. die Fluchtwegkennzeichnungen, die Brandnotbeleuchtungen, die optischen Leitelemente und die Umsetzung der Alarm- und Gefahrenabwehrpläne, vorgenommen wurden, war darüber hinaus eine umfassende betriebstechnische Nachrüstung vor allem der Lüftungssysteme, der Brandlüftung, der Branddetektion und -meldung, der Notrufeinrichtungen, der Lautsprecheranlagen und der Fluchtwegkennzeichnung in vielen Fällen erforderlich.

Die Notwendigkeit einer bautechnischen Nachrüstung wurde im Wesentlichen anhand der Abstände der Notausgänge untereinander, der Vorhandensein und der Anordnung von Rettungsstollen und Pannenbuchten, der Anlage von Überfahrten an den Portalen, des Zustands der Entwässerungseinrichtungen (vor allem der Schlitzrinnen), der Rückhaltebecken für Störfälle, der Feuerlöschleitung, der Hydranten, der Löschwasserversorgung an den Portalen, der Anordnung von Zwischendecken sowie des Einbaus von Notrufräumen und des baulichen Brandschutzes der Konstruktion überprüft und festgelegt.

Das Tunnelnachrüstungsprogramm des Bundes mit einem Finanzvolumen von insgesamt ca. 1,2 Mrd. Euro ist in wesentlichen Teilen abgearbeitet. Die Maßnahmen sollen bis auf einzelne Tunnelanlagen in diesem Jahr abgeschlossen sein.

Für den Bereich der betriebstechnischen Maßnahmen heißt dies jedoch nicht, dass Arbeiten zukünftig nicht mehr erforderlich sind. Aufgrund der geringen Lebensdauer vieler Ausrüstungsteile der betriebs-

technischen Ausstattung von zum Teil weniger als 10 Jahren sind inzwischen wieder Instandsetzungen oder Erneuerungen bereits fertiggestellter Tunnel anzuplanen bzw. befinden sich bereits in der Planung oder sogar Umsetzung, obgleich die erreichten Ausstattungsmerkmale der betriebstechnischen Ausstattung weitgehend den geltenden Sicherheitsanforderungen entsprechen.

### 3. Aktuelle Entwicklungen

Fußend auf den vorliegenden Erfahrungen aus dem Inland- und Ausland hat das BMVI in Zusammenarbeit mit der BAST zahlreiche neue Entwicklungen im Tunnelbau initiiert und vorangetrieben. Dazu zählen vor allem nachfolgende Punkte.

#### 3.1 Geothermie

Es wurden in letzten Jahren mehrere Untersuchungen zur Nutzung der Geothermie im Tunnelbau durchgeführt. Im aktuellen Heft B 141 der BAST-Schriftenreihe wurde ein Bericht zum Forschungsvorhaben für den Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln untersucht. Zum Sammeln praktischer Erfahrungen soll im Nachgang ein Testfeld zur Nutzung der Geothermie unter dem Straßenbelag am Grenztunnel Füssen – Reutte ausgeführt werden.

In einem weiteren Tunnel soll die Geothermie zum Heizen eines Betriebsgebäudes im Winter bzw. zum Kühlen im Sommer genutzt werden.

Das BMVI erhofft sich durch den Einsatz von Geothermie weitere Möglichkeiten, die Sicherheit der



**Bild 2:** Neubau paralleler Rettungsstollen (links: 1-schalige Bauweise, begehbar, rechts: 2-schalige Bauweise, befahrbar) [Quelle: Hessen mobil]

Tunnel z. B. durch Heizen der V orportalbereiche im Winter weiter zu verbessern und dabei zugleich durch z. B. weniger Streusalzeinsatz die Umwelt zu schonen.

### 3.2 Kostenansätze im Tunnelbau

Praktische Forschungsergebnisse wurden in einem „Verfahren für Kostenansätze von Straßentunneln“ erarbeitet. Eine zutref fende Ermittlung und auch Überprüfung von Kosten im Tunnelbau ist von entscheidender Bedeutung für die Realisierung von Tunnelprojekten, da es erfahrungsgemäß von der frühen Planungsphase bis zur Realisierung des Tunnels häufig erhebliche Kostensteigerungen gibt, die die eingangs aufgestellten Finanzierungsmodelle infrage stellen. Hierzu wird im weiteren Programm berichtet.

### 3.3 Leitfaden für die Behandlung von zeitgebundenen Kosten (ZGK) im Tunnelbau

Ein wesentlicher Kostenpunkt sind im bergmännischen Tunnelbau oftmals die zeitgebundenen Kosten, die aus dem Bauverfahren herrühren, vertraglich aber nicht einfach zu fassen sind und daher oft Anlass zu Streit zwischen Auftragnehmern und Auftraggebern geben.

Mit dem Leitfaden soll den Auftraggebern eine Hilfestellung zur Ausgestaltung des Bauvertrages in Bezug auf die zeitgebundenen Kosten im bergmännischen Tunnelbau an die Hand gegeben werden. Es werden Hinweise zu den Auswirkungen bei Variation der Einflussgrößen gegeben, so dass letztlich die Vergabestelle im Einzelfall geeignete Festlegungen treffen kann.

Durch die Berücksichtigung einer besonderen Regelung für die Behandlung der zeitgebundenen Kosten bereits bei der vertraglichen Gestaltung können die im Tunnelbau oftmals aus dem Baugrund herrührenden aufwendigen Vertragsanpassungen reduziert werden.

Aufgrund der Erfahrungen bei zahlreichen Projekten wird in diesem Leitfaden ein flexibles Bauzeitmodell favorisiert, bei dem alle wesentlichen Einflüsse berücksichtigt werden können. Im Einzelfall kann eine weitere Verfeinerung z. B. über ein Lohnstundenmodell, sinnvoll sein, bei dem allerdings der Umfang der zu vereinbarenden Sachverhalte ansteigt.

Der Leitfaden wurde mit ARS 7/2017 eingeführt und steht auf der Homepage der BAST zum Download bereit.

### 3.4 BIM im Tunnelbau

Das Building-Information-Modeling (BIM) wird in Zukunft bei Planung, Bau und Erhaltung im Ingenieurbau eine immer größere Bedeutung einnehmen. Im Bereich der Bundesfernstraßen soll es ab dem Jahr 2020 bei allen größeren Bauvorhaben eingesetzt werden. Aktuell laufen mehrere Pilotprojekte in den Ländern und bei der DEGES, bei denen BIM in unterschiedlicher Tiefe und Ausrichtung zur Anwendung kommt. Ein Pilotprojekt der DEGES betrifft u.a. zwei neue Tunnelbauwerke der östlichen Tunnelkette der A 44 in Hessen.

Am Tunnel Spitzenberg im Zuge der A 44 wird BIM eingesetzt und untersucht, wie das Fachmodell Baugrund mit den Erkenntnissen, die während des bergmännischen Vortriebs an der Ortsbrust gewonnen werden, verfeinert und für eine bessere Prognose für den weiteren Vortrieb genutzt werden kann. Ferner sollen die, während der Ausführung über mehrfache Laserscans gewonnenen Geometriedaten zur Auswertung beispielsweise der tatsächlichen Bauteildicken zur Dokumentation in einem Bestandsmodell verwendet werden.

Am Tunnel Holstein und dem zugehörigen Streckenbaulos der A 44 wird mittels BIM die Vertragsabwicklung (Planung, Terminsteuerung, Abrechnung) getestet.

Wegen der enormen Bedeutung von BIM beschäftigt sich auch der Deutsche Ausschuss für Unterirdisches Bauen (DAUB) mit der Thematik und hat einen entsprechenden Arbeitskreis eingerichtet. Mitglieder des Arbeitskreises sind Vertreter der Bauherren, der Bauindustrie und der Forschung und Planung. Ziel ist es, im nächsten Sommer eine DAUB-Empfehlung für den Einsatz von BIM im Tunnelbau herauszugeben.

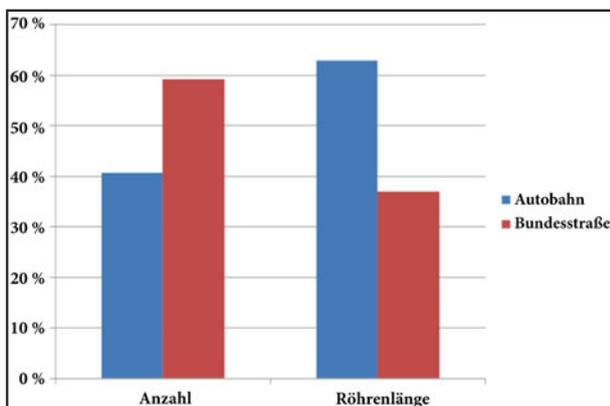
Die BAST wird sich ebenfalls in einem Forschungsprojekt mit den Fragen BIM im Tunnelbau, allerdings mit dem Schwerpunkt der Erhaltungsphase, beschäftigen.

## 4. Infrastrukturgesellschaft Autobahn / Fernstraßen- bundesamt

Die Bundesautobahnen werden ab dem 01.01.2021 nicht mehr in Auftragsverwaltung, sondern in Bundesverwaltung geführt. Der Bund erhält somit die alleinige Verantwortung für Planung, Bau, Betrieb, Erhaltung, vermögensmäßige Verwaltung und Finanzierung der Bundesautobahnen. Zur Erledigung der Aufgaben wird der Bund eine Infrastrukturgesellschaft für Autobahnen und andere Bundesfernstraßen (IGA) in der Rechtsform einer GmbH gründen. Bundesstraßen können auf Antrag eines Landes, soweit sie im Gebiet dieses Landes liegen, in Bundesverwaltung übergehen. Hoheitliche Tätigkeiten werden künftig überwiegend durch das neu zu errichtende Fernstraßen-Bundesamt (FBA) ausgeübt.

Somit fallen Stand heute mindestens 40% der Bundesfernstraßentunnel zukünftig in den Zuständigkeitsbereich der IGA. Bezogen auf die Röhrenlänge entfallen sogar rund zwei Drittel in den Verantwortungsbereich der IGA (Bild 2).

Trotz der mit dem Übergang von einer Auftragsverwaltung in eine Bundesverwaltung eventuell verbundenen strukturellen Änderungen muss und wird es das Bestreben aller sein, den bislang von den Ländern gewährleisteten sicheren Tunnelbetrieb aufrecht zu halten und sich möglicherweise ergebendes Verbesserungspotential zu nutzen. Aufgabe des Bundes wird sein, auch weiterhin ein einheitliches Sicherheitsniveau in allen Tunneln der Bundesfernstraßen, unabhängig von der verwaltungstechnischen Zuständigkeit, sicherzustellen.



**Bild 3:** Tunnel der Bundesfernstraßen in Baulast des Bundes [BMVI]

Kaundinya, Ingo, Dipl.-Ing. und Sistenich, Christof, Dipl.-Ing.

Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST),  
Bergisch Gladbach, Deutschland

## ECORoads – Mehr Sicherheit für den Tunnelnutzer?

### Kurzfassung

Im Ergebnis des europäischen Forschungsvorhabens ECORoads unter Mitwirkung der BAST sind insbesondere die Übergangsbereiche zwischen Tunnelbauwerk und freier Strecke als Abschnitte identifiziert worden, denen besondere Aufmerksamkeit im Rahmen von „Sicherheitsüberprüfungen“ zu schenken ist. Mit der im Projekt vorgenommenen Zusammenführung von Verfahren des Sicherheitsmanagements für die Straßenverkehrsinfrastruktur und für die Tunnelsicherheit gemäß europäischer Richtlinien besteht nun ein integrierter Ansatz für eine zukünftige Anwendung nach dem nationalen Regelwerk sowohl in Tunneln als auch den Übergangsbereichen zur freien Strecke. Die Projektergebnisse wurden durch die BAST in einem Leitfaden zu praxisorientierten Handlungsempfehlungen zusammengefasst. Diese werden ergänzt durch Checklisten zur umfassenden Ermittlung des Ist-Zustandes als Grundlage für weitere Maßnahmen und Empfehlungen.

### 1. Einleitung

Zum Schutz der Verkehrsteilnehmer ist eine sichere Gestaltung der Verkehrsinfrastrukturen unverzichtbar. In Bezug auf die Straßeninfrastruktur haben Straßentunnel eine besondere Bedeutung, da im Vergleich zur freien Strecke auch schon kleinere Ereignisse größere Auswirkungen nach sich ziehen können, verbunden mit weiteren negativen Einflüssen auf die Verfügbarkeit einer hochbelasteten Straßeninfrastruktur.

Das im vorliegenden Beitrag beschriebene Verfahren und der für die Anwendung in Deutschland formulierte Leitfaden basiert auf dem von der europäischen Kommission geförderten Projekt ECORoads (Effective and Coordinated Road Infrastructure Safety Operations), [www.ecoroadsprojekt.eu](http://www.ecoroadsprojekt.eu), ein

Horizon 2020 Projekt, das von einem Konsortium aus insgesamt 16 Partnern aus neun Mitgliedsstaaten sowie Norwegen und die durch die Organisation SEETO (South East Europe Transport Observatory) vertretenden EU-Beitrittskandidaten aus Südosteuropa durchgeführt wurde [1]. Dabei verfolgt das in ECORoads entwickelte Verfahren einen praktischen Ansatz für gemeinsame Sicherheitsüberprüfungen sowohl in Tunneln als auch in den Übergangsbereichen zur freien Strecke, wobei der Schwerpunkt auf der Verkehrssicherheit liegt. Das von ECORoads vorgeschlagene Verfahren zur Ermittlung, Analyse und Bewertung von Schwachstellen fokussiert insbesondere den Übergangsbereich zwischen freier Strecke und Tunnel, welche sich nach dem derzeitigen Regelwerk als "Unstetigkeitsstelle" darstellt.

Der „Leitfaden für die Durchführung von Inspektionen zur Verkehrssicherheit auf Streckenabschnitten mit Tunneln“ fasst die Erkenntnisse aus mehreren im Projekt ECORoads durchgeführten Feldstudien zu praxisorientierten Handlungsempfehlungen zusammen. Diese werden ergänzt durch Checklisten zur umfassenden Ermittlung des Ist-Zustandes als Grundlage für weitere Maßnahmen und Empfehlungen.

## 2. Hintergrund und Anlass

Mit den beiden Richtlinien 2004/54/EG (mit Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln) [2] und 2008/96/EG (über das Sicherheitsmanagement der Straßenverkehrsinfrastruktur) [3] stehen

zwei Richtlinien mit Anforderungen an die Sicherheit in Tunneln und der freien Strecke zur Verfügung, deren Anwendungsbereiche sich bei formaler Auslegung jedoch gegenseitig ausschließen. Ein umfassendes Sicherheitsmanagement sollte demgegenüber sowohl die technischen Besonderheiten im Tunnel als auch die Notwendigkeit eines einheitlichen Verkehrssicherheitsmanagements innerhalb und außerhalb des Tunnels berücksichtigen.

Das Projekt ECORoads zielte darauf ab, die Barriere zwischen den beiden Richtlinien zu überwinden, die in der Praxis in der Anwendung unterschiedlicher Konzepte zur Überprüfung der Verkehrssicherheit auf der freien Strecke (Straßenverkehrssicherheitsaudits/Inspektionen (RSA/RSI)) und zur Sicherheitsinspektion von Tunneln besteht, siehe Bild 1. Ausgehend von einem zwischen Verkehrssicherheits- und Tunnelsicherheitsexperten abgestimmten Ansatz auf der Basis der RSA/RSI-Konzepte der Richtlinie 2008/96/EG wurde dieser in mehreren Feldstudien angewendet und anhand der jeweils gewonnenen Erkenntnisse iterativ weiterentwickelt. Die nach der Richtlinie 2004/54/EG für den Tunnel üblichen Sicherheitsmanagementkonzepte nach den Artikeln 10 bis 12 sowie des Anhangs II werden in dem Ansatz ebenfalls berücksichtigt.

Die Übergangsbereiche zwischen Tunnelbauwerk und freier Strecke sind dabei als die Schnittstellen zwischen den Richtlinien identifiziert worden, denen als Streckenabschnitte besondere Beachtung zu schenken ist. Mit dem entwickelten Untersuchungsansatz, der Zusammenführung von Konzepten zur

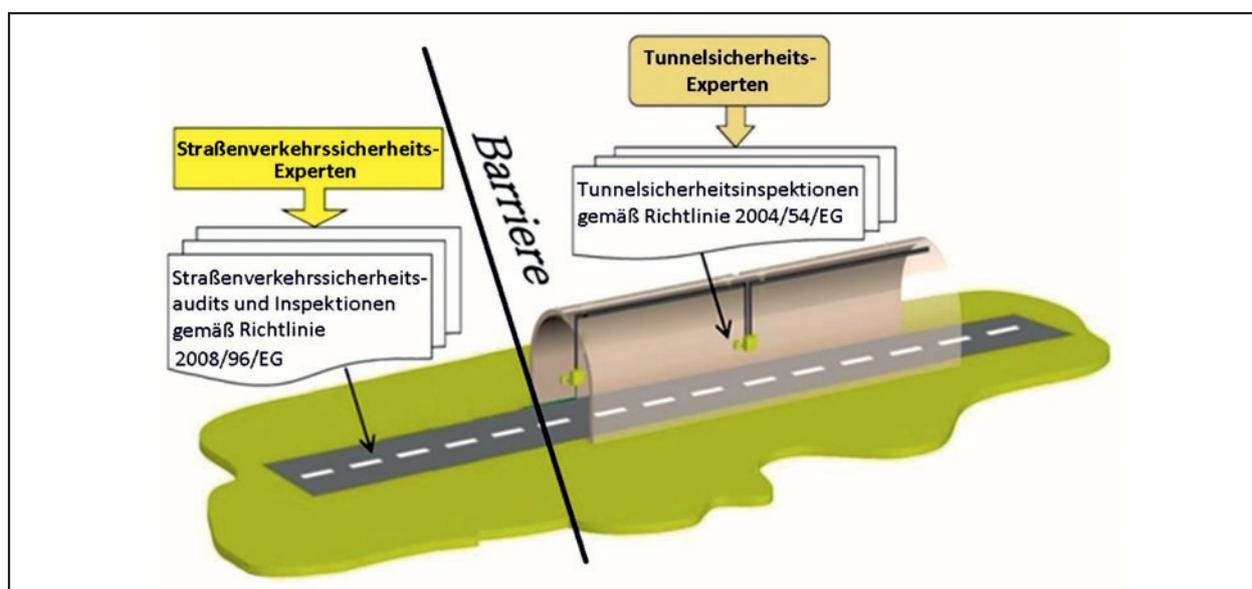


Bild 1: Derzeitiger Status der Richtlinien 2008/96/EG und 2004/54/EG [1]

Verkehrssicherheit und Tunnelsicherheit, besteht nunmehr ein integrierter Ansatz für eine spätere Anwendung im Rahmen von „Wiederkehrenden Inspektionen“ nach Tunnelrichtlinie bzw. „Sicherheitsüberprüfungen“ nach Infrastrukturrichtlinie sowohl in Tunneln als auch auf der freien Strecke, wobei der Schwerpunkt auf der Verkehrssicherheit liegt. Der Wert des Ansatzes liegt insbesondere in der Festlegung der Übergangsbereiche, der an der Inspektion Beteiligten sowie deren Aufgaben und Zuständigkeiten bei der Durchführung von gemeinsamen Sicherheitsüberprüfungen durch Verkehrssicherheits- und Tunnelsicherheitsexperten.

### 3. Inspektionen

#### 3.1 Beteiligte und deren Aufgaben

Für die Planung, Organisation und Durchführung der Inspektionen wurde im Rahmen von ECORO-ADS eine detaillierte Vorgehensweise entwickelt. Einen Überblick über Aufgaben und Verantwortlichkeiten der Beteiligten gibt Bild 2. Die Infrastrukturbetreiber von Straße und Tunnel spielen eine wesentliche Rolle bei den Inspektionen. Sie veranlassen die Inspektionen, greifen jedoch nicht aktiv in diese ein. Im Rahmen der Inspektion werden vom Betreiber notwendige Unterlagen (z. B. Lage- und Höhenpläne, Unfallstatistik, Sicherheitsdokumentation, etc.) für das Verfahren zur Verfügung gestellt, wobei in Abhängigkeit vom Status (Planung, Bau, Inbetriebnahme, Betrieb) sowohl die Art der Unterlagen als auch der erforderliche Untersuchungsumfang variiert. Weitere Aufgaben des Betreibers neben der Bereitstellung der notwendigen Informationen und Daten sind insbesondere die Organisation und Unterstützung der Inspektion ausführenden Stelle vor Ort sowie die abschließende Stellungnahme zum Inspektionsbericht.

Die Durchführung der Inspektion erfolgt durch eine vom Infrastrukturbetreiber unabhängige Stelle. Das Inspektionsteam besteht aus mindestens zwei und vorzugsweise vier Sachverständigen, davon ein bis zwei Sachverständige für Straßenverkehrssicherheit und ein bis zwei Sachverständige für Tunnelsicherheit. Bei drei Sachverständigen sollten zwei den Bereich Straße und einer den Bereich Tunnel abdecken. Die Leitung sollte von einem Sachverständigen für Straßenverkehrssicherheit übernommen werden. Das Inspektionsteam kann bei der Inspektion von Vertretern des Betreibers begleitet werden.

Das Inspektionsteam ist verantwortlich für:

- Beratung und Analyse der erhaltenen Informationen und Daten vor der Inspektion,
- Durchführung einer Besprechung mit dem (den) Betreiber(n) vor der Inspektion,
- Zusammenarbeit mit dem (den) Infrastrukturbetreiber(n) für Klarstellungen vor und nach der Inspektion,
- Durchführung der Inspektion,
- Darstellung erster Inspektionsergebnisse gegenüber dem (den) Betreiber(n) unmittelbar nach der Inspektion während der Abschlussbesprechung,
- Aufstellung und Vorlage des Inspektionsberichts beim Infrastrukturbetreiber.

Im Hinblick auf das Anforderungsprofil der im Inspektionsteam vertretenden Experten sollten diese mindestens über einschlägige Ausbildung und umfassende Kenntnisse und Berufserfahrung im Be-

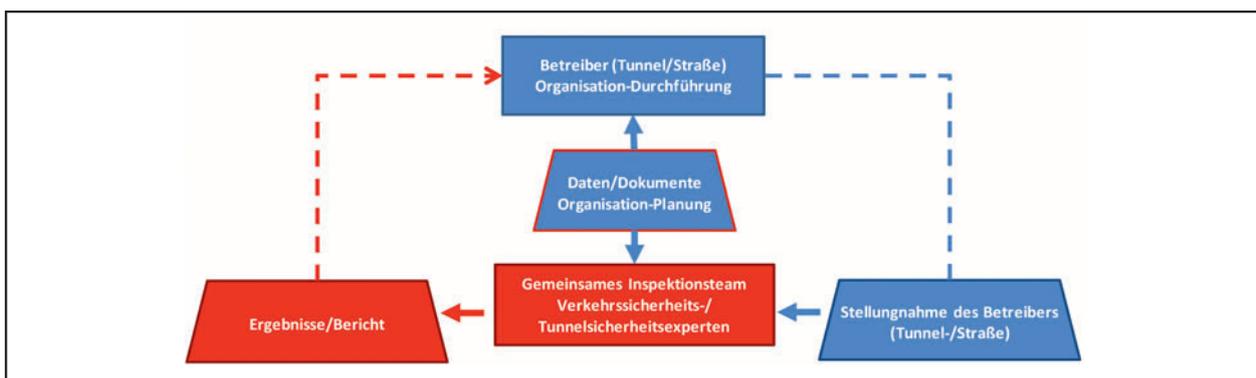


Bild 2: Sicherheitsinspektion: Aufgaben und Verantwortlichkeiten der Beteiligten [1]

reich der Straßenverkehrssicherheit bzw. der Tunnelsicherheit verfügen.

Bei der Durchführung der Inspektion wird die Verwendung von Checklisten empfohlen.

### 3.2 Definition der Inspektionsbereiche

Ein wesentliches Ergebnis, das im Rahmen des ECORoads-Projekts erreicht wurde, ist die Definition des Übergangsbereichs zwischen der freien Strecke und dem Tunnel als ein Bereich, der sowohl innerhalb als auch außerhalb des Tunnels liegt, siehe Bild 3, Bereiche (2) und (4). Seine Gesamtlänge ( $L_{Ges}$ ) bestimmt sich als Mindestlänge nach den untenstehenden Gleichungen (1) bis (3)

$$L_{Ges} = L_1 + L_2 \quad (1) \quad \text{mit} \quad L_1 = \frac{V_1 \cdot t_1}{3,6} \quad (2) \quad \text{und}$$

$$L_2 = \frac{V_2 \cdot t_2}{3,6} + \frac{V_2^2}{254 \cdot (\mu_r \pm \frac{s}{100})} \quad (3)$$

und setzt sich zusammen aus

- der vor dem Tunnel von einem Fahrzeug innerhalb von 10 Sekunden ( $t_1$ ) zurückgelegten Strecke ( $L_1$ ) mit der vor dem Tunnelportal geltenden zulässigen Höchstgeschwindigkeit ( $V_1$ ), und
- dem innerhalb des Tunnels zurückgelegten Bremsweg ( $L_2$ ) eines Fahrzeugs hinter dem Portal, das mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ( $V_2$ ) im Tunnel fährt, sofern diese nicht mit der Entwurfgeschwindigkeit identisch ist. Bei der Berechnung des Bremswegs wird ein Längsreibungskoeffizient von 0,40 (nasse Oberfläche,

hohe Geschwindigkeit) ( $\mu_r$ ) und eine Reaktionszeit von 2 Sekunden ( $t_2$ ) zugrunde gelegt. Desweiteren geht die Neigung ( $s$ ) des Tunnels in die Berechnung ein.

Die Länge der Übergangsbereiche bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten geht aus Tabelle 1 hervor.

Diese Regel zur Ermittlung der Mindestlänge gilt ebenso für die entgegengesetzte Richtung und auch – möglicherweise aufgrund der verringerten Geschwindigkeit innerhalb des Tunnels leicht modifiziert – am Ende des Tunnels für jede Richtung. Aus Gründen der Praktikabilität sollte bei einem Gegenverkehrstunnel je Fahrtrichtung die Länge der Übergangsbereiche gleich lang gewählt werden.

Der Übergangsbereich, genauer gesagt seine Länge, sollte vom Inspektionsteam bei entsprechender Begründung auch verlängert werden können. Eine Notwendigkeit hierfür kann sich aus zu berücksichtigenden Parametern wie der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, Straßenmarkierung, Beschilderung, Beleuchtung oder der baulichen Ausführung ergeben.

Aus der Definition des Übergangsbereichs, in den ein Teil der Tunnelbauwerks als Bestandteil mit eingeschlossen ist, wird der Bereich der Tunnelinnenstrecke als der verbleibende Teil des Bauwerks zwischen den Übergangsbereichen an beiden Enden des Tunnels definiert, siehe Bild 3, Bereich (3). Die freie Strecke vor und nach dem Tunnel (siehe Bild 3, Bereiche (1) und (5)) wird beim vorliegenden Ansatz nicht betrachtet. Hier greifen die konventionellen und in Deutschland etablierten Verfahren nach RSA/RSI.

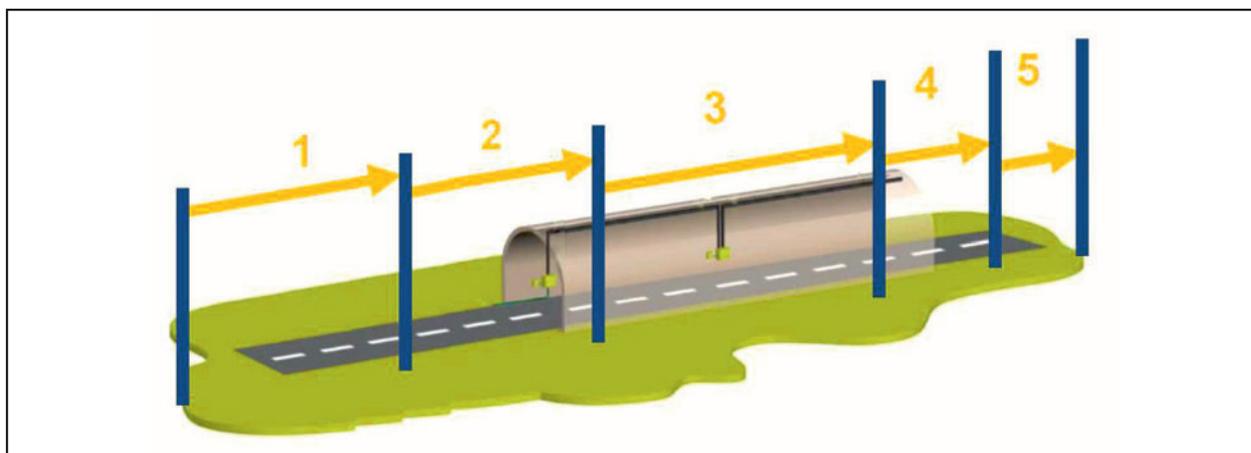


Bild 3: Definition der Streckenbereiche [1]

Geschwindigkeit (85 % Perzentil) ( $V_1 = V_2$ ) [km/h]	60		70		80		100	
Übergangsbereich L <sub>Ges</sub> (mit $t_1 = 10$ s, $t_2 = 2$ s, $\mu_r = 0,4$ , $s = 0$ %) [m]	236		281		329		432	
davon außerhalb ( $L_1$ ) / innerhalb ( $L_2$ ) des Tunnels [m]	167	69	194	87	222	107	278	154

Tab. 1: Länge der Übergangsbereiche bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ohne Neigungseinfluss [1]

### 3.3 Inspektionsbericht

Mit dem Inspektionsbericht liegt dem Infrastrukturbetreiber im Inspektionsbereich ein umfassender Überblick über erkannte Abweichungen und Vorschläge für Maßnahmen zu deren Beseitigung vor. Die vom Betreiber vorzunehmende Bewertung der Maßnahmen hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Sicherheit und ihres zeitlichen und wirtschaftlichen Umsetzungsaufwands ermöglicht eine Priorisierung.

## 4. Leitfaden

Der „Leitfaden für die Durchführung von Inspektionen zur Verkehrssicherheit auf Streckenabschnitten mit Tunneln“ richtet sich vorrangig an Straßen- und Tunnelbetreiber (z. B. Untersuchungsstelle, Tunnelmanager, Sicherheitsbeauftragte, Verkehrsgutachter) im Rahmen von gemeinsamen Sicherheitsüberprüfungen auf der freien Strecke und im Tunnel und beschreibt an der Schnittstelle zwischen den beiden Bereichen zu beachtende Besonderheiten. Der Leitfaden zeigt Möglichkeiten auf, Abweichungen in Bezug auf die Verkehrssicherheit im Übergang von der freien Strecke in den Tunnel aber auch in der Tunnelinnenstrecke zu erkennen und Maßnahmen für ihre Beseitigung abzuleiten. Die im Leitfaden beschriebene gemeinsame Inspektion durch Sachverständige aus dem Bereich Straßenverkehrssicherheitsaudit/Inspektion und Tunnelsicherheit trägt zu einer umfassenderen Einschätzung der Sicherheitsverhältnisse insbesondere im Übergangsbereich zwischen freier Strecke und Tunnel bei. Durch die Identifikation von Abweichungen in Verbindung mit Empfehlungen zur ihrer Beseitigung im Rahmen der Inspektion und späteren Priorisierung durch den Betreiber wird ein Beitrag zur weiteren Erhöhung der Verkehrssicherheit geleistet. Der Anwendungsbereich des Leitfadens umfasst die Übergangsbereiche zwischen freier Strecke und Tunnel sowie die Tunnelinnenstrecke im Zuge zweibahniger richtungsgetrennter Straßen. Als Anlagen sind Checklisten als Hilfestellung zur Überprüfung der zu untersuchenden Streckenabschnitte beigelegt. Diese

beziehen sich auf die Übergangsbereiche und die Tunnelinnenstrecke.

## 5. Fazit

Mit dem beschriebenen Ansatz liegt ein iterativ angepasstes und im Rahmen des ECORoads Projektes an 5 Tunneln getestetes Verfahren zur Begutachtung von Streckenabschnitten mit Tunnelbauwerken vor, wobei der Schwerpunkt auf der Verkehrssicherheit liegt. Der Ansatz umfasst neben der Festlegung der Übergangsbereiche auch die Art der Beteiligung relevanter Stellen, die Aufgaben und Zuständigkeiten sowie die Bereitstellung von Hilfsmitteln bei der Durchführung von gemeinsamen Sicherheitsüberprüfungen durch Verkehrssicherheits- und Tunnelsicherheitsexperten. Für die praktische Anwendung auf Abschnitten der Bundesfernstraßen mit Tunneln wurde das im Projekt ECORoads entwickelte Verfahren in einen auf deutsche Verhältnisse angepassten Leitfaden überführt.

## Literatur

- [1] ECORoads Deliverable D6.2 „Guidelines and recommendations“, <http://www.ecoroad-project.eu/library?id=59>, 31.05.2017
- [2] Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz, Amtsblatt der Europäischen Union vom 7.6.2004, Seiten L 201/56 bis L 201/76
- [3] Richtlinie 2008/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über ein Sicherheitsmanagement für die Straßeninfrastruktur, Amtsblatt der Europäischen Union vom 29.11.2008, Seiten L 319/59 bis L 319/67

Shoichi Kume, Christof Sistenich und  
Felix Wawrzyniak

Hanshin Expressway Company Limited,  
Osaka, (Jap)

Bundesanstalt für Straßenwesen,  
Bergisch Gladbach (D)

## Längsneigungsabhängige modellmaßstäbliche Rauchaus- breitungsuntersuchungen

### Kurzfassung

Im Falle eines Brandes in einem Straßentunnel mit Längslüftungssystem sollte die Lüftung bereits zu einem sehr frühen Brandzeitpunkt die Rauchausbreitung so beeinflussen, dass sichere Selbstrettungsbedingungen für den Tunnelnutzer erreicht und während der Selbstrettungsphase gehalten werden können. Der Beitrag setzt sich mit dem Rauchausbreitungsverhalten in einem Straßentunnel mit Längsneigung und der Steuerung der Lüftung im Brandfall auseinander.

### 1. Einleitung

Wesentliche Aufgabe der Tunnellüftung im Brandfall ist die Verringerung von Rauch und Hitzeeinwirkungen auf den Fluchtwegen, um die Selbstrettung der Tunnelnutzer zu ermöglichen. Dabei soll die Lüftung bereits in der Brandentstehung die Brandgase so beeinflussen, dass der Tunnelnutzer möglichst nicht beeinträchtigt wird und den nächsten Notausgang sicher erreichen kann. Insbesondere in städtischen Straßentunneln kann die wirksame Beeinflussung der Rauchausbreitung eine Herausforderung darstellen, beispielsweise bei komplexen Geometrien mit mehreren Ein- und Ausfahrten, Rampen, geringen Kurvenradien, Mulden und Kuppen sowie wechselnden Längsneigungen. Speziell in diesen Abschnitten kann in hochbelasteten Tunneln auch mit Staus gerechnet werden, was je nach Verkehrslage eine andere Lüftungsstrategie zur Herstellung sicherer Selbstrettungsbedingungen im Brandfall erfordert. Im Richtungsverkehrsfall, wenn Fahrzeuge in einem Stau vor dem Brandherd den Tunnel noch verlassen können, kann der Rauch durch Strahlventilatoren in Fahrtrichtung in Richtung Ausfahrtspor-

tal abgetrieben werden. Bei beidseitigem Stau vor dem Brandherd sollte demgegenüber ein einseitiger Rauchabtrieb vermieden und statt dessen der Rauch durch eine gezielte Beeinflussung der Längsströmung möglichst im Bereich des Entstehungsorts gehalten werden.

Beim Brand in einem Tunnelabschnitt mit Steigung kann in Folge der wirkenden Auftriebskräfte von einer asymmetrischen Rauchausbreitung zu beiden Seiten des Brandherds ausgegangen werden, verbunden mit einer stärkeren Rauchausbreitung auf der Steigungsseite. In Folge der höheren Geschwindigkeit in Verbindung mit einer stärkeren Abkühlung kann der Rauch schneller bis auf Fahrbahnniveau absinken als im abwärtsgerichteten Tunnelbereich. Insbesondere wenn sich Tunnelnutzer auf beiden Seiten des Brandherds befinden, besteht ein größeres Risiko in dem vom Brandherd gesehen ansteigenden Tunnelbereich vom Rauch eingeschlossen zu werden.

In dieser Ausarbeitung werden die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen in einer modellmaßstäblichen Tunnelumgebung im Maßstab 1:18 zum Rauchausbreitungsverhalten bei einer Längsneigung von 3 % dargestellt, in Verbindung mit der Ermittlung von Effekten durch eine tunnelabwärts gerichtete Längsströmung. Temperatur bzw. Auftriebsverhalten und optische Dichte des realen Brandrauchs wird im Modelltunnel durch ein Gasgemisch nachgebildet, die Strömungsverhältnisse werden mittels laseroptischem Verfahren ermittelt. Die Hauptziele der Untersuchungen sind: das Verhalten der Rauchströmung unter dem Einfluss einer Tunnelängsneigung aufzuzeigen, den Effekt einer tunnelabwärts gerichteten Längsströmung auf die Rauchausbreitung zu ermitteln und Erkenntnisse für die Steuerung der Lüftung abzuleiten, um den Rauch möglichst lange im Bereich der Tunneldecke zu halten und ein Absinken hinauszuzögern.

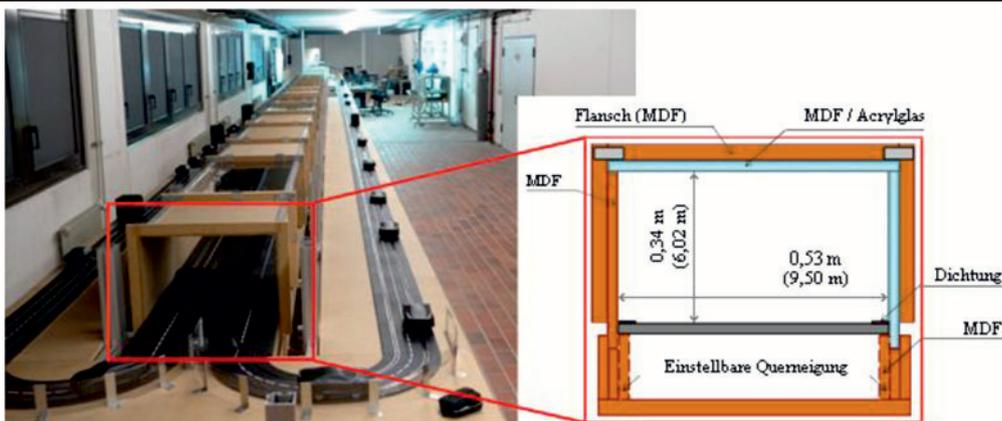
### 2. Versuchsanordnung

#### 2.1 Allgemeines

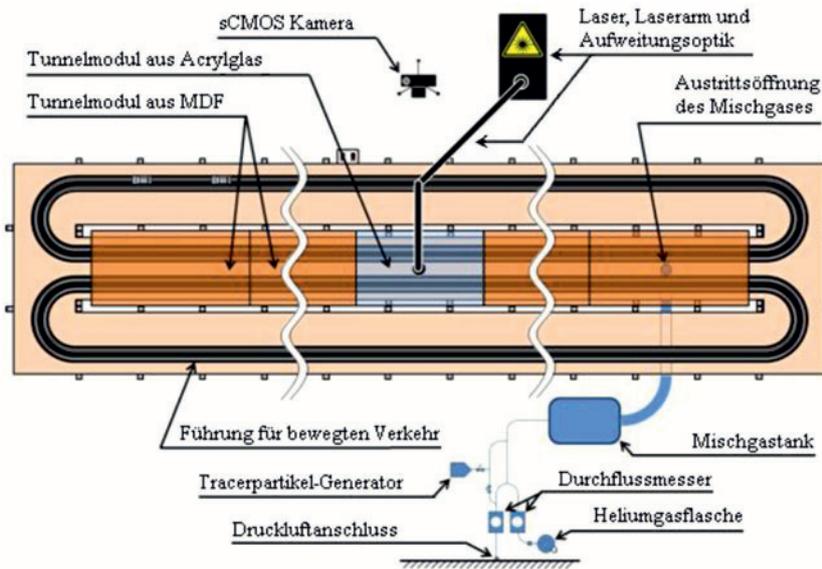
Die schematische Ansicht des Modelltunnels im Maßstab 1:18 ist in Bild 1 dargestellt. Der Modelltunnel ist aus einzelnen miteinander verbundenen Tunnelmodulen mit Untergestell aufgebaut. Weitere Bestandteile des Versuchsaufbaus sind Laser mit Laserarm und Aufweitungsoptik, Mischgasver-

sorgung und sCMOS-Kamera zur PIV-Analyse. Die für die Untersuchung verwendeten Rechteckquerschnitt – Tunnelmodule bestehen aus MDF-Faserplatten sowie einer Kombination aus MDF-Platten und Acrylglas in den Messbereichen. Der Querschnitt eines Moduls ist unter Berücksichtigung des

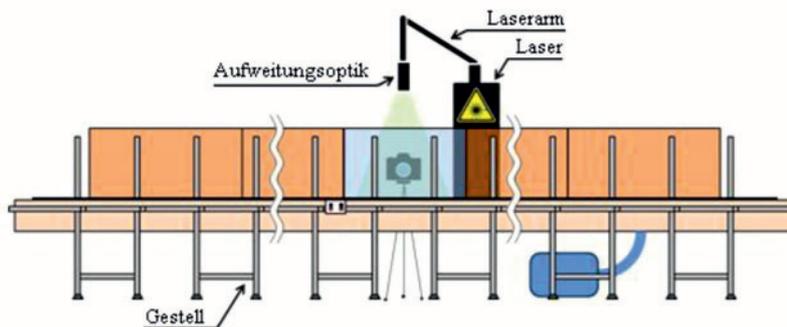
Maßstabs den in den deutschen „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)“ Ausgabe 2006 [1] enthaltenen Spezifikationen eines Regelquerschnitts RQ10,5T bzw. RQ 26t angenähert und entspricht weiterhin der japanischen Ausstattungsrichtlinie von Hanshin Express-



a) Überblick und schematische Querschnittsdarstellung



b) Draufsicht



c) Ansicht

Bild 1: Überblick und schematische Darstellung des Modelltunnels

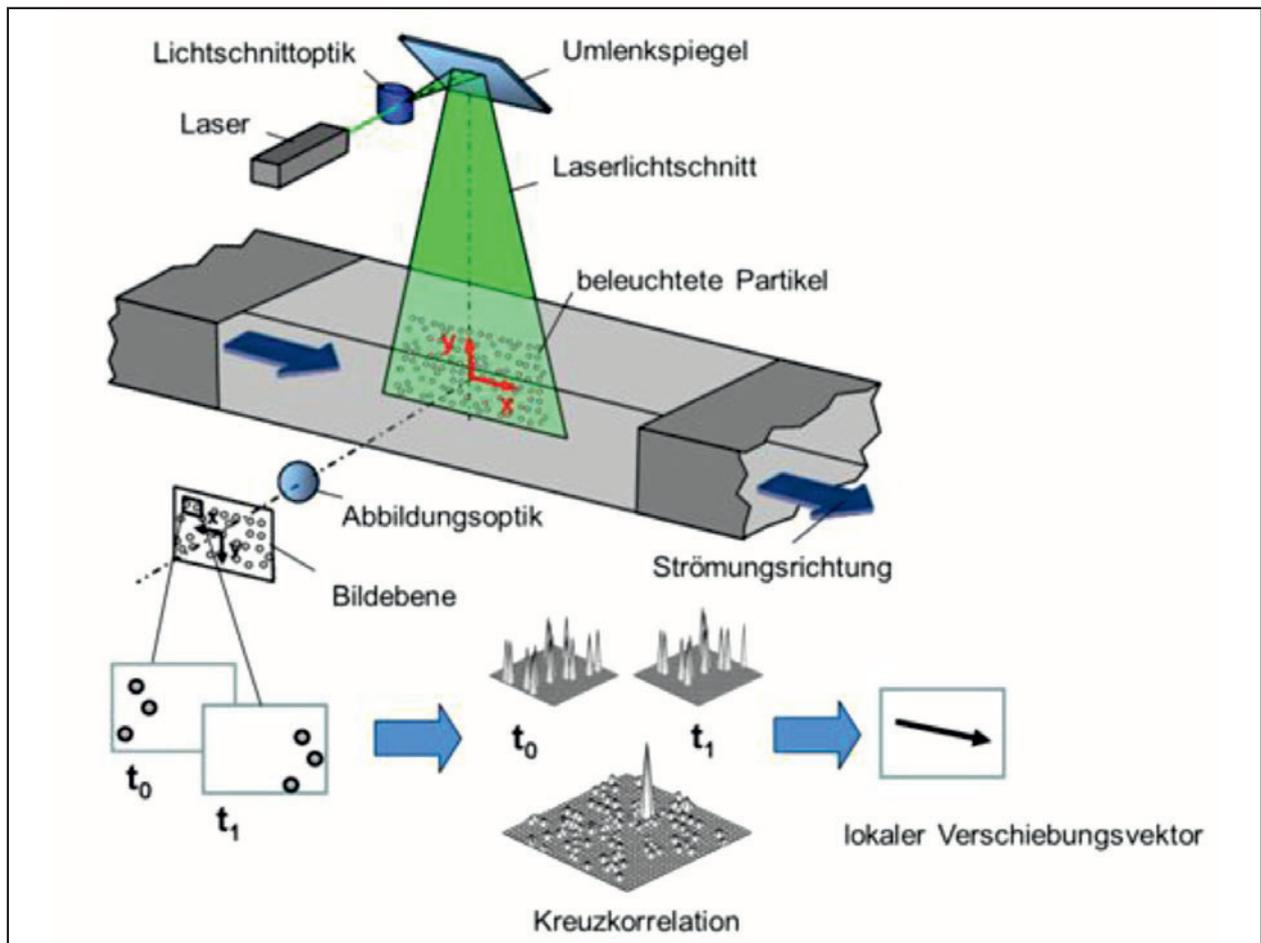


Bild 2: Prinzipskizze zur Particle Image Velocimetry [2]

way. Die Längsneigung kann durch Ändern der Höhe jedes Einzelgestells variiert werden. Das durch den Brand in einem realen Tunnel erzeugte Rauchgas wird durch das aus Luft, Helium und Tracerpartikeln zusammengesetzte Mischgas für den Modelltunnel nachgebildet. Die jeweils separaten Massenströme für Luft und Helium werden über zwei Durchflussregler eingestellt. Die Größe und benötigte Menge der in das Luft/Helium-Gemisch eingeleiteten Tracerpartikel wird mittels eines Partikel-Generators erzeugt. Vor dem Einleiten in den Tunnel wird das Mischgas in einem ca. 120 l großen Tank zwischengespeichert. Die Einleitung des Mischgases erfolgt durch eine kreisförmige Öffnung im Boden eines hierfür vorgesehenen Tunnelmoduls. Das Verhältnis zwischen Luft und Helium sowie der Durchmesser der Austrittsöffnung wird in Abhängigkeit von der nachzubildenden realen Brandleistung eingestellt.

Die in einigen Versuchsanordnungen tunnelabwärts gerichtete Längsströmung wird durch Ventilatoren am höher gelegenen Portal des Modelltunnels erzeugt.

## 2.2 Lasergestützte Strömungsmessungen mittels Particle Image Velocimetry (PIV)

Die Analyse der Bewegungen des Mischgases im Tunnel erfolgt durch die Particle Image Velocimetry (PIV), eine lasergestützte Messmethode zur berührungslosen Ermittlung der Geschwindigkeitsverteilung des Luftstroms. Das Prinzip der PIV geht schematisch aus Bild 2 hervor. Das mit Tracerpartikeln versetzte Mischgas wird am Messort durch zwei in kurzen Abständen vom Laser ausgesandte Impulse beleuchtet und von einer sCMOS-Kamera aufgenommen. Aus dem zeitlichen Abstand zwischen den zwei Bildern ( $\Delta t = t_1 - t_0$ ) lässt sich auch eine räumliche Verschiebung ( $\Delta x = x_1 - x_0$ ) eines Partikels, sofern vorhanden, ermitteln. Der lokale Verschiebungsfaktor  $\Delta x$  wird mit Hilfe der Kreuzkorrelationsfunktion aus den zwei Bildern analysiert und die Geschwindigkeitsverteilung sowie der lokale Geschwindigkeitsvektor der Luftströmung aus den zeitlichen und räumlichen Intervallen  $\Delta t$  und  $\Delta x$  abgeleitet. Die Tracerpartikel weisen einen Durchmesser von weniger als 10  $\mu\text{m}$  auf und werden aus 2-Ethylhexylsebacat (DEHS) erzeugt [2].

### 3 Versuchsbedingungen

#### 3.1 Brandleistung

Zur Simulation des Brandfalls ist die Festlegung der auftretenden Brandleistung erforderlich. Bei den Versuchen wird der Brand eines Pkw mit einer Brandleistung von 5 MW gemäß RABT [1] angenommen. Es wird die gesamte Wärmefreisetzungsrate zur Skalierung des Brands herangezogen.

#### 3.2 Ähnlichkeitsbedingungen

Bei einer modellmaßstäblichen Versuchsdurchführung ist die Wärmefreisetzungsrate geeignet zu skalieren. Für eine strömungsmechanische Ähnlichkeit wird im Allgemeinen der Ansatz verfolgt, die mit dem dominanten Aspekt verbundene Skalierung anzuwenden [3] [4]. Für die Untersuchungen wird angenommen, dass die für die Ausbreitung des Brandrauchs maßgeblichen Kräfte die Trägheit und der Auftrieb sind. Die Ähnlichkeit ist daher über die Froude-Zahl  $F_r$  (-) herzustellen, da diese das Verhältnis zwischen der auf eine Strömung wirkende Trägheitskraft  $F_i$  (N) und der Auftriebskraft  $F_b$ , (N) beschreibt. Im Fall einer Luftströmung  $U$  (m/s) im Tunnelquerschnitt ist  $F_r$  definiert durch

$$F_r = \sqrt{\frac{F_i}{F_b}} = \frac{U}{\sqrt{gH}} \quad \text{Gl. 1}$$

mit

$g$  Erdbeschleunigung ( $\text{m/s}^2$ )

$H$  Tunnelhöhe

Bei Gleichsetzung von  $F_r$  für den realen (real) und den Modelltunnel (model) ist

$$\frac{U_{\text{model}}}{\sqrt{gH_{\text{model}}}} = \frac{U_{\text{real}}}{\sqrt{gH_{\text{real}}}} \quad \text{Gl. 2}$$

$$U_{\text{real}} = \sqrt{\frac{L_{\text{real}}}{L_{\text{model}}}} U_{\text{model}} = \sqrt{\gamma} U_{\text{model}}$$

mit

$\gamma$  Modellmaßstab (-), hier 18.

Das Verhältnis der Volumenströme zwischen Realität und Modell wird demgegenüber durch die folgenden Beziehungen hergestellt:

$$\begin{aligned} q_{\text{model}} &= A_{\text{model}} \cdot U_{\text{model}} \\ &= L_{\text{model}}^2 \cdot U_{\text{model}} \\ &= \gamma^{-2,5} L_{\text{real}}^2 \cdot U_{\text{real}} \\ &= \gamma^{-2,5} q_{\text{real}} \end{aligned}$$

Gl. 3

mit

$A$  Tunnelquerschnitt ( $\text{m}^2$ )

$L$  charakteristische Tunnellänge (m)

Nach dieser Gleichung entspricht der Volumenstrom im Tunnel dem Faktor  $\gamma^{-2,5}$  des Werts im realen Tunnel.

#### 3.3 Anpassung des im Modelltunnel einzusetzenden Mischgases auf die Eigenschaften von realem Brandrauch

In [5] wird der Zusammenhang zwischen Brandleistung und zugehöriger Rauchtemperatur und Rauchmenge anhand eines Heptan-Wannenbrands beschrieben. Hieraus lassen sich in Abhängigkeit von der Brandleistung entstehende Temperaturen und Volumenströme des Rauchgases ableiten. Da ein Brand im Modelltunnel diesen zerstören würde ist das Verhalten von Brandgas im Modell mit einem Mischgas abzubilden, das wesentliche Eigenschaften des Brandgases aufweisen muss. Aus den Parametern Temperatur und Rauchmenge des Realbrandversuchs kann mittels Zustandsgleichung und Froude-Ähnlichkeit bei Verwendung von Helium als Bestandteil des Mischgases das Verhältnis von Helium zu Luft sowie die Gesamtmenge des Mischgases pro Zeiteinheit bestimmt werden. Der Konvertierungsvorgang ist in Bild 3 dargestellt, mit

$Q$  Brandleistung (MW)

$P$  Druck (Pa)

$R$  allg. Gaskonstante (287 J/kg K)

$T$  Temperatur (K)

$\rho$  Dichte (kg/m<sup>3</sup>)

$q$  Volumenstrom (m<sup>3</sup>/s)

He Helium

s Rauch

Unter Verwendung des in Bild 3 gezeigten Verfahrens sind in Tabelle 1 für eine Brandleistung von 5 MW das Verhältnis Helium zu Luft  $\chi$ , die Durchflussmenge  $q_m$ , sowie die auf Helium und Luft entfallenden Anteile dargestellt.

Zur besseren Veranschaulichung wird in den weiteren Abschnitten das Ausbreitungsverhalten des Mischgases einer Rauchausbreitung gleichgesetzt.

Die Tracer-Partikel vermitteln unabhängig von ihrer Funktion als Hilfsmittel zur Bestimmung der Strömungsverhältnisse mittels PIV auch einen guten optischen Eindruck von der Position und den Bewegungen des Mischgases im Tunnelquerschnitt, obgleich sie mit der optischen Dichte eines Brandgases nicht verglichen werden können.

### 3.4 Festlegungen zur Versuchsdurchführung und Lage der Messpunkte

Ziel der Versuche ist es, den Einfluss einer tunnelabwärts gerichteten Längsströmung auf die Rauchausbreitung in einem ansteigenden Tunnelbereich zu ermitteln. Die Festlegung der Tunnellängsneigung

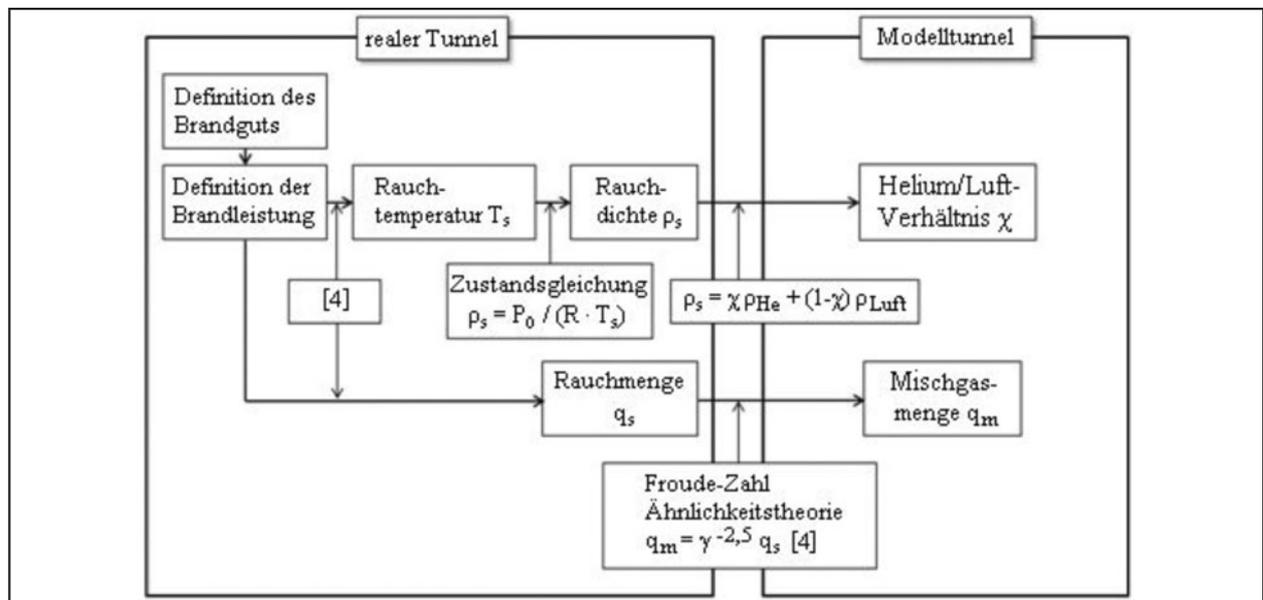


Bild 3: Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen realem Brandgas und Mischgas für den Modelltunnel

Brandtyp	Brandleistung Q (MW)	Helium/Luft Verhältnis $\chi$ (-)	Durchflussmenge $q_m$ (l/min)	Helium (l/min)	Luft (l/min)
Pkw	5	0.62	780	483.6	296.4

Tab. 1: Eigenschaften des Mischgases

Bedingung	Längsneigung (%)	Strömungsgeschwindigkeit (m/s)		Messpunkt, Entfernung vom Brandort (m)	
		Modell	real	Modell	real
Wert	3	0	0	5,6	100
		0,12	0,5	11,2	200
		0,24	1,0	16,8	300

Tab. 2: Versuchsbedingungen

bei den Versuchen auf 3 % erfolgt vor dem Hintergrund entsprechender Vorgaben der RABT sowie der Ausstattungsrichtlinie von Hanshin Expressway, nach der die Längsneigung eines Tunnels 3 % nicht überschreiten sollte. Die Versuche werden sowohl ohne als auch mit einer durch Ventilatoren am höher gelegenen Ende des Tunnels aufgeprägten tunnelabwärts gerichteten Längsströmung (Gegenströmung) durchgeführt. Diese wird vor Einleitung des Mischgases in den Tunnel erzeugt und während der gesamten Versuchsdauer aufrecht erhalten. Neben der Variante „keine Gegenströmung“ beträgt die Geschwindigkeit der tunnelabwärts gerichteten Strömung 0,12 m/s (entsprechend 0,5 m/s im realen Tunnel) und 0,24 m/s (1,0 m/s). Die Versuchsbedingungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Bei der Festlegung der Messpunkte wird sich auf Vorgaben der RABT bezüglich eines 300 m nicht überschreitenden Abstands zwischen Notausgängen in Tunneln (entsprechend 16,8 m im Modelltunnel) abgestützt. Weitere Messpunkte befinden sich in 100 m (5,6 m) und 200 m (11,2 m) Abstand vom Brandort. Die Anordnung der Messpunkte zeigt Bild 4.

### 3.5 Fluchtbedingungen

Den Versuchen liegt das Szenario eines Auffahrunfalls mit Brandfolge auf das Ende eines Staus zugrunde, hinter dem sich weitere Fahrzeuge aufstauen. Die Fahrzeuge vor dem Brandort können aufgrund eines Hindernisses außerhalb des Tunnels den Tunnel nicht verlassen und Tunnelnutzer müssen sich zu beiden Seiten des Brandortes vor dem Rauch selbst retten. Zusätzlich wird angenommen, dass der Brand sich vor einem Notausgang ereignet und die zu überwindende Distanz zum nächsten Notausgang nicht weniger als 300 m beträgt. Aufgrund der Randbedingungen ist ein einseitiger Rauchabtrieb nicht vorzusehen. Der Rauch soll vielmehr an einer Ausbreitung gehindert werden. Die angenommenen Fluchtbedingungen zeigt Bild 5. Aus Fluchtgeschwindigkeit und Zeit ist die jeweilige Position des Tunnelnutzers im Tunnel zu ermitteln, wobei die angenommene Fluchtgeschwindigkeit von 1,3 m/s (bezogen auf den realen Tunnel) der Geschwindigkeit eines durchschnittlichen Fußgängers in normaler Situation entspricht [6]. Durch Messung der Zeit zwischen Brandbeginn (Einleiten des Mischgases) und Ankunft am jeweiligen Mess-

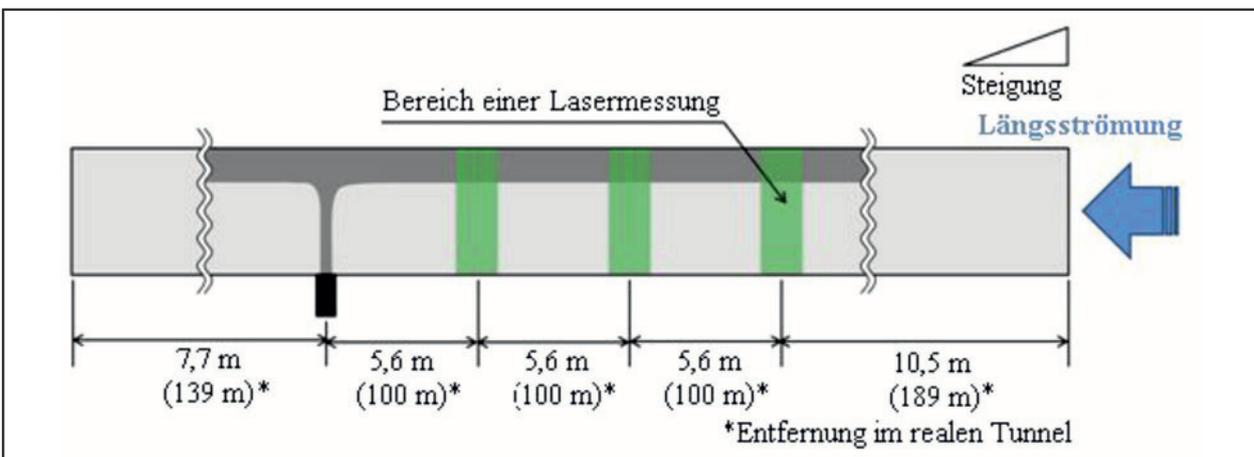


Bild 4: Lage der Messpunkte

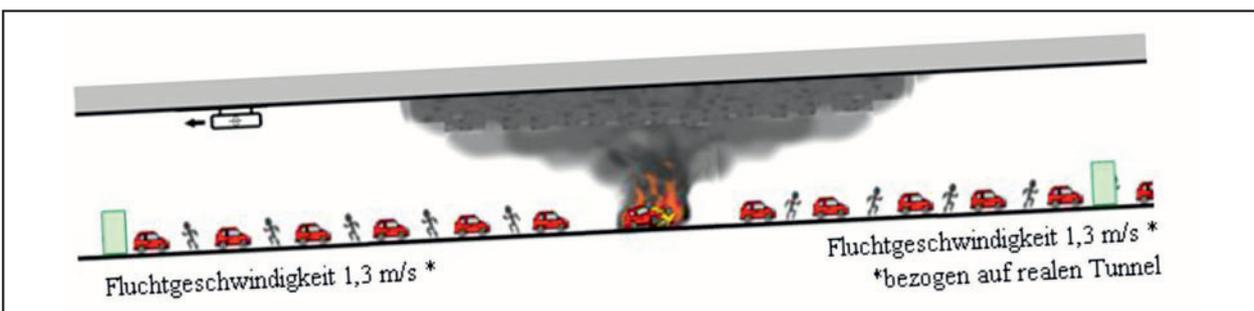


Bild 5: Fluchtbedingungen

punkt ist die Rauchausbreitung zur Bewegung des Tunnelnutzers in Beziehung zu setzen. Diese Beziehung bildet die Grundlage für die in der Versuchsauswertung erfolgende Sicherheitsanalyse.

## 4 Versuchsergebnisse

### 4.1 Minderung der Rauchausbreitung durch die aufgeprägte Längsströmung

Die Versuche am Modelltunnel erfolgen entsprechend der in Tabelle 2 zusammengefassten Bedingungen. Vor Einleitung des Mischgases wird die tunnelabwärts gerichtete Längsströmung erzeugt und während der gesamten Versuchsdauer aufrecht erhalten. Die Zeit zwischen Einleitung des Mischgases und Ankunft am jeweiligen Messpunkt wird gemessen. In Bild 6 ist die Rauchausbreitung der zeitabhängigen Position eines Tunnelnutzers bei drei verschiedenen tunnelabwärts gerichteten Längsströmungen gegenüber gestellt, Bild 6a zeigt die Rauchausbreitung ohne Gegenströmung, Bild 6b die Rauchausbreitung bei einer Gegenströmung von 0,12 m/s (entsprechend 0,5 m/s im realen Tunnel) und Bild 6c bei einer Gegenströmung von 0,24 m/s (1,0 m/s). Auf der x-Achse sind die Abstände vom Brandort aufgetragen, auf der y-Achse die Zeit ab Einleitung des Mischgases als Analogie zu einem Zündzeitpunkt. Die grünen Linien stellen den zeitabhängigen Weg des Tunnelnutzers, die blauen Punkte die vom Mischgas benötigte Zeit bis zum Eintreffen am jeweiligen Messpunkt dar. Der graue Bereich über den blauen Linien zeigt den Ausbreitungsbereich des Mischgases also die Zone eines verrauchten Bereichs an.

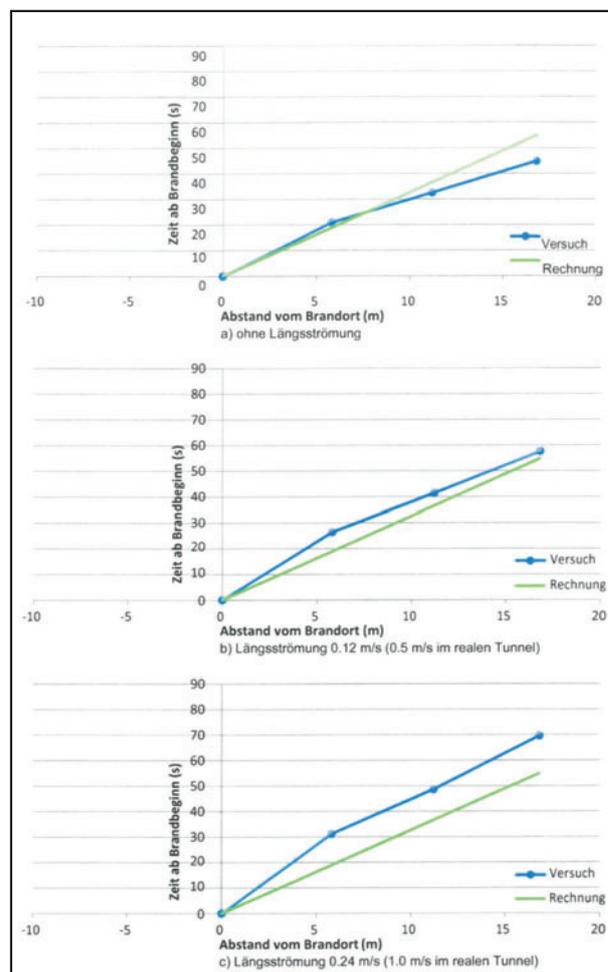
Ohne Gegenströmung kreuzen sich die Linien von Rauchfront und Tunnelnutzer bei etwa 7,5 m (entsprechend 135 m im realen Tunnel), Bild 6a. Dies bedeutet, dass der Notausgang nicht mehr rauchfrei erreichbar ist und Rauch den Tunnelnutzer erreicht und überholt. Bei einer Gegenströmung von 0,12 m/s, Bild 6b und 0,24 m/s, Bild 6c, schneiden sich die Linien hingegen. In diesen Situationen bleibt der Fluchtweg rauchfrei. Es zeigt sich weiterhin, dass eine Schichtung bei einer Gegenströmung von bis zu 0,24 m/s (1,0 m/s im realen Tunnel) erhalten bleibt, siehe Bild 7 und sich der Tunnelnutzer somit auch noch unter der Grenzschicht zwischen Rauch und unbelasteter Tunnelluft bewegen kann.

Die gewählten tunnelabwärts gerichteten Längsströmungen ermöglichen die Ausbildung einer Schichtung und verhindern zunächst eine Verteilung über den gesamten Tunnelquerschnitt. Eine moderate Längsströmung zeigt sich somit in Bezug auf die Rauchfreiheit der Fluchtwege in dem vom Brandort gesehen ansteigen den Tunnelbereich im Vergleich zu einer von einer Längsströmung unbeeinflussten Rauchausbreitung als wirksamer.

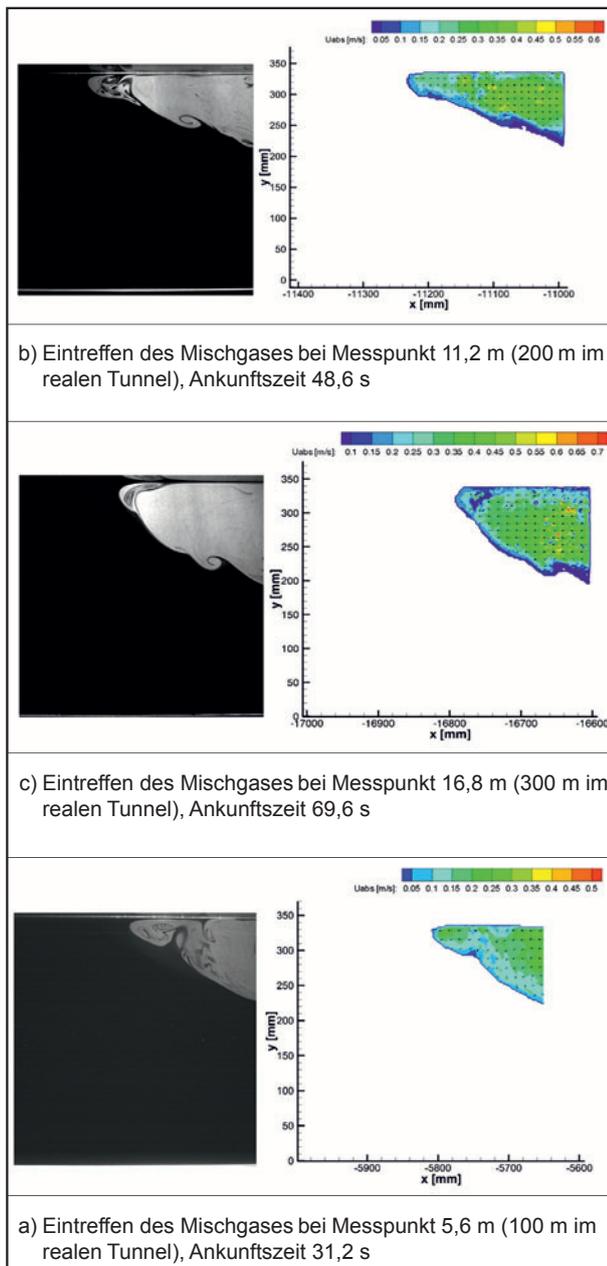
## 5. Simulation und Sicherheitsanalyse

### 5.1 Einführung und Zweck der Simulation

Die durchgeführten Versuche zeigen die positive Wirkung einer tunnelabwärts gerichteten Längsströmung auf die Rauchfreiheit der Fluchtwege im



**Bild 6:** Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse und Positionsberechnungen



**Bild 7:** Rauchausbreitung des Mischgases bei einer entgegengesetzten Längsströmung von 0,24 m/s (1 m/s im realen Tunnel) analysiert mittels PIV

dem vom Brandherd gesehen aufsteigenden Tunnelbereich auf. Aus experimenteller Sicht bleibt jedoch offen, ob auch auf der Gefälleseite die Sicherheit der Tunnelnutzer im Brandfall bis zum Erreichen des nächsten Notausgangs gewährleistet ist. Die Rauchausbreitung sollte daher auch für diesen Bereich untersucht werden.

Zur experimentellen Untersuchung dieser Fragestellung müsste der Modelltunnel auf der Gefälleseite um einen Abschnitt verlängert werden, der dem Bereich zwischen Brandort und nächstem gefälleseitig-

gem Notausgang entspricht und in der Realität eine Länge von 300 m bzw. im Modell von 16,8 m hätte. Da aufgrund der Abmessungen des Versuchslabors diese Verlängerung nicht durchführbar ist, wird der Fragestellung mittels numerischer Simulationen nachgegangen. Hierzu wird der Modelltunnel in ein Simulationsmodell überführt. Die hieraus erhaltenen Simulationsergebnisse werden zunächst mit den experimentellen Ergebnissen verglichen und das numerische Modell validiert. Daraufhin wird das Simulationsmodell um den zusätzlichen Abschnitt erweitert und die gewonnenen Ergebnisse mit den Ergebnissen des validierten Modells verglichen, um den Einfluss der Verlängerung auf die Rauchausbreitung zu ermitteln. In einem dritten Schritt werden die Ergebnisse der Rauchausbreitungssimulationen aus dem erweiterten Modell mit den zeitabhängigen Positionen der Tunnelnutzer verglichen, um diejenige Strömungsgeschwindigkeit zu bestimmen, die mit der geringsten Verrauchung der Fluchtwege einhergeht. Die Simulation wird mit dem vom Nationalen Institut für Standards und Technologie (NIST) des US-Handelsministeriums herausgegebenen Fire Dynamics Simulator (FDS) durchgeführt.

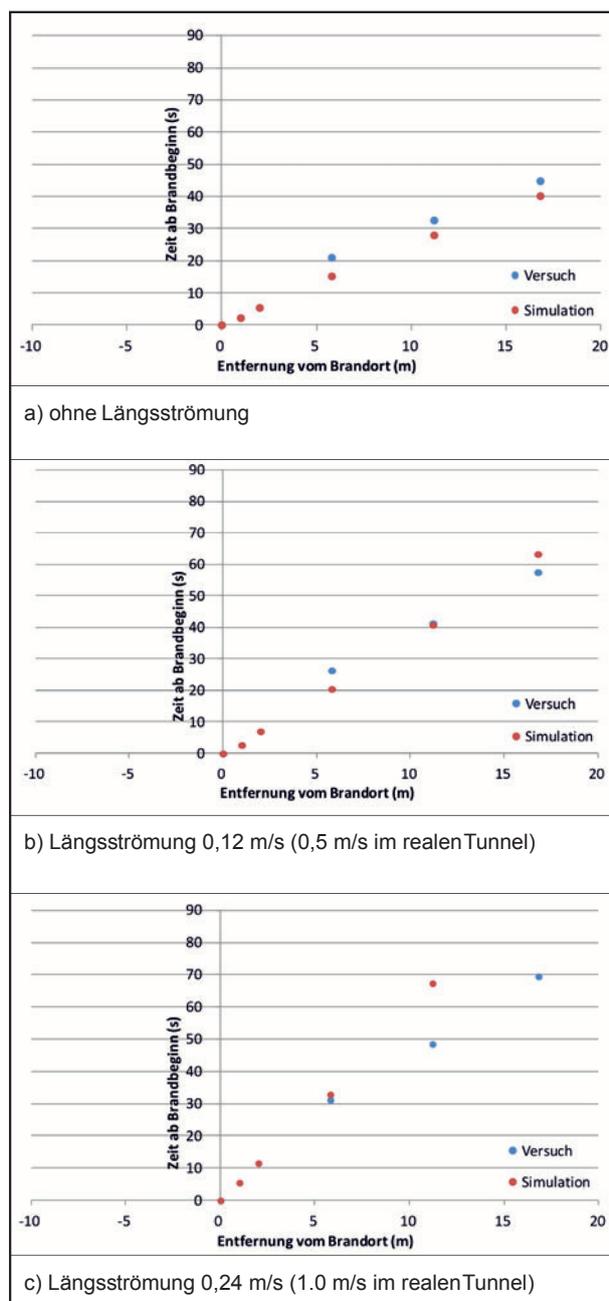
## 5.2 Vergleich der numerischen Modells mit den Versuchsergebnissen

Die Entwicklung des numerischen Simulationsmodells erfolgt anhand der in Bild 1 und Bild 4 dargestellten Abmessungen des Modelltunnels. Hierzu wird der Modelltunnel in ein orthogonales Gitter mit einer Gitterweite von  $1750 \times 26 \times 25$  unterteilt, wobei eine Verdichtung der Raumgitter in Wandnähe zur detaillierten Erfassung wandnaher Reibeffekte erfolgt. Die Ergebnisse der für die verschiedenen Längsströmungen durchgeführten Simulationen werden anhand der experimentellen Ergebnisse validiert.

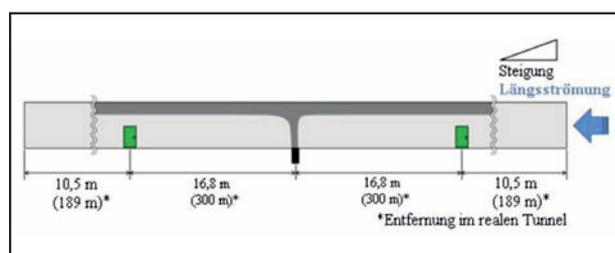
Bei der Interpretation der Simulationsergebnisse wird die Dichteverteilung des Mischgases einer Rauchausbreitung gleichgesetzt, um analog zu Kapitel 3.3 auch die Ergebnisse der Simulation als Rauchausbreitung bezeichnen zu können.

Die Ergebnisse aus Versuchen und Simulation sind in Abhängigkeit von der jeweiligen Längsströmung in Bild 8 gegenübergestellt.

Die blauen Punkte symbolisieren die in Bild 6 dargestellten Versuchsergebnisse, die roten Punkte die



**Bild 8:** Vergleich zwischen Versuchsergebnissen und Simulation



**Bild 9:** Simulationsmodell

durch die Simulationen erhaltenen Werte. Im Vergleich zu sehr gut übereinstimmenden Ergebnissen

bei 0 m/s und 0,12 m/s zeigen sich bei der Längsgeschwindigkeit von 0,24 m/s größere Differenzen. Ursächlich hierfür werden Störungen während des Versuchs zum Beispiel in Form zeitlicher Veränderungen des Luftstroms während der Versuchsdauer gesehen. Insgesamt werden die Ergebnisse der Simulation mit den Ergebnissen der Versuche als gut übereinstimmend eingeschätzt.

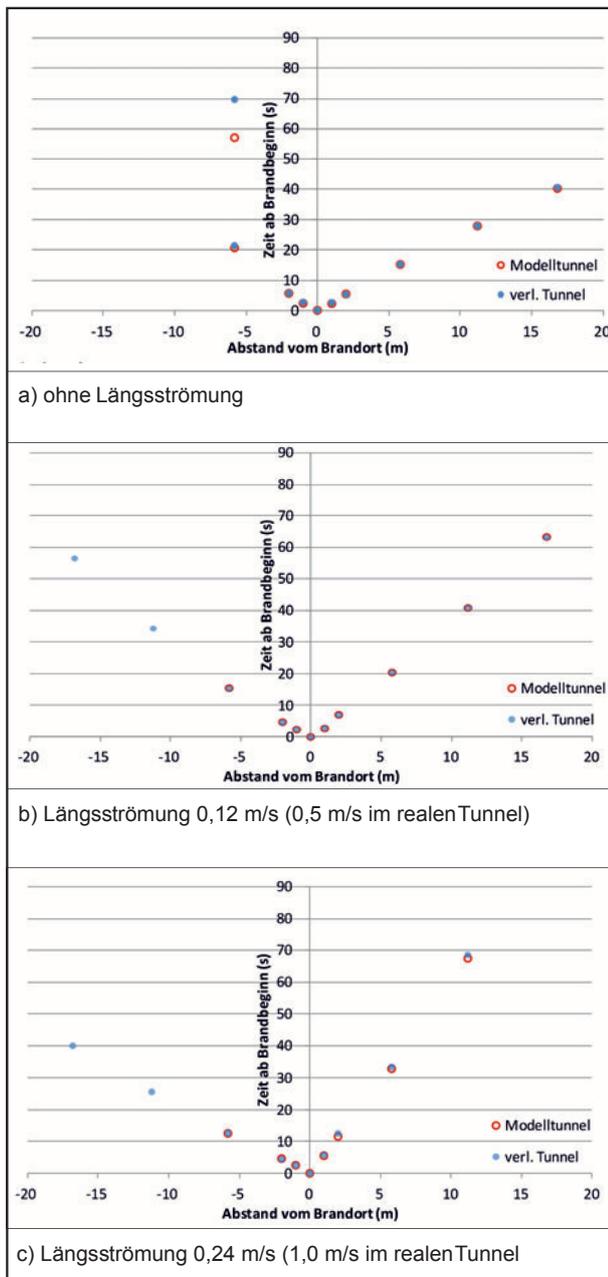
### 5.3 Vergleich zwischen Modelltunnel und Simulationsmodell des verlängerten Tunnels

Um den Einfluss eines verlängerten abwärtsgerichteten Tunnelbereichs auf die Rauchausbreitung zu überprüfen, werden Simulationsmodelle des verlängerten Tunnels entwickelt (Bild 9).

Die Länge des tunnelabwärts gelegenen Bereichs wird auf 27,3 m verlängert, um in der Simulation deutlich über die Distanz eines Notausgangsabstands hinauszugehen. Das Simulationsmodell wird hierzu um 980 Gitter zur Darstellung des verlängerten Bereichs erweitert. Die Längsluftströmung wird wie im ersten Simulationsschritt am höher gelegenen Tunnelportal tunnelabwärts erzeugt. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abhängigkeit von der Längsströmungsgeschwindigkeit in Bild 10 gegenübergestellt. Die roten Kreise stellen die Ergebnisse aus dem ersten Simulationsschritt dar, siehe Bild 8, die blauen Punkte die Ergebnisse aus der Verlängerung, siehe Bild 9. Es zeigte sich ein nur geringer Einfluss der Tunnellänge auf die Rauchausbreitung, unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit, so dass das Simulationsmodell für weitere Untersuchungen des Rauchausbreitungsverhaltens und die Beeinflussung der Selbstrettung der Tunnelnutzer durch Rauch im Bereich der Fluchtwege herangezogen werden kann.

### 5.4 Vergleich der Rauchausbreitung mit der Position flüchtender Tunnelnutzer

Die in Bild 10 dargestellte Rauchausbreitung wird nunmehr dem zeitabhängigen Fluchtwegposition des Tunnelnutzers gegenübergestellt. Die Fluchtgeschwindigkeit beträgt wie zuvor richtungsunabhängig 1,3 m/s bezogen auf den realen Tunnel (0,31 m/s im Modell). Die Ergebnisse sind in Abhängigkeit von der Längsströmungsgeschwindigkeit in Bild 11 dargestellt. Die grüne Linie stellt die zeitab-



**Bild 10:** Gegenüberstellung der Rauchausbreitung im Modelltunnel und simuliertem verlängertem Tunnel bei unterschiedlichen Längsströmungen

hängige Fluchtwegposition, die blaue Linie die Spitze der Rauchausbreitung dar.

Ohne aufgeprägte Gegenströmung zeigt die Simulation im ansteigenden Tunnelbereich eine die Fluchtgeschwindigkeit überschreitende Rauchausbreitungsgeschwindigkeit, Bild 11a, so dass nicht von sicheren Fluchtbedingungen ausgegangen werden kann. Im abwärts gerichteten Tunnelbereich kommt die Rauchausbreitung nach etwa 7 m (125 m) zum Stillstand, so dass der Fluchtweg rauchfrei bleibt. Bei einer Gegenströmung von 0,12 m/s

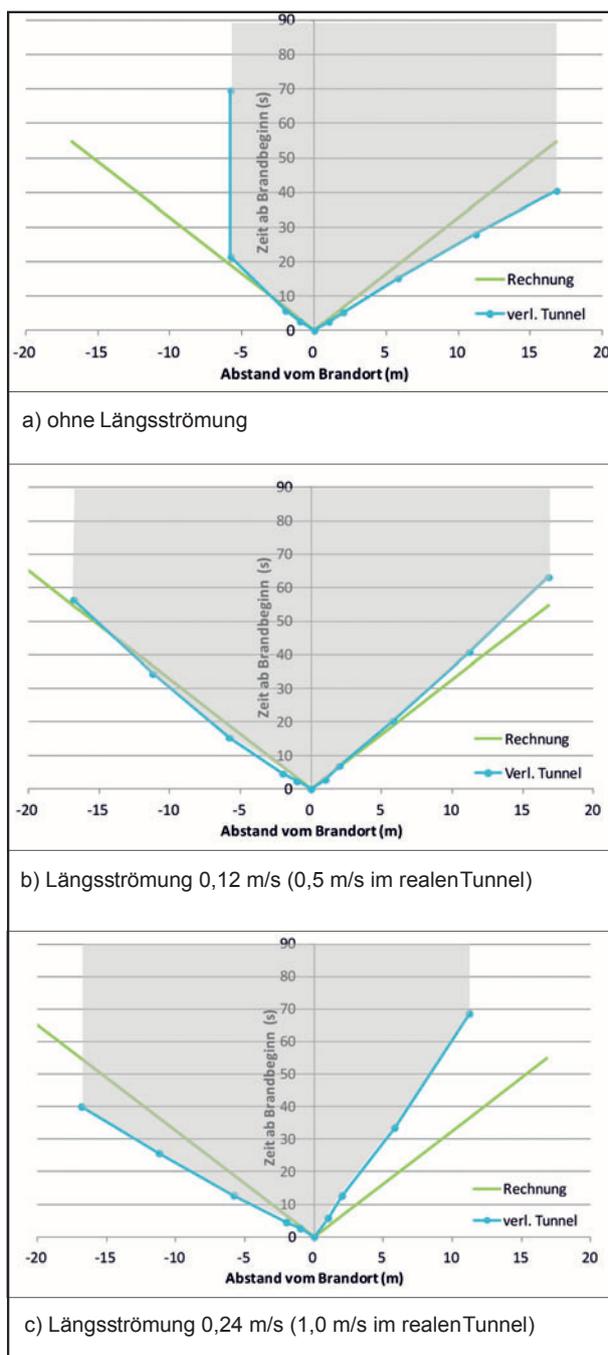
(0,5 m/s im realen Tunnel), Bild 11b, breitet sich der Rauch nahezu symmetrisch aus. Auf beiden Seiten des Brandorts entspricht die Geschwindigkeit der Rauchausbreitung etwa der Fluchtgeschwindigkeit, eine tendenzielle Verrauchung des Fluchtwegs insbesondere auf der Gefälleseite kann dennoch nicht ausgeschlossen werden. Bei einer Gegenströmung von 0,24 m/s, Bild 11c, erfolgte eine stärkere Rauchausbreitung in den abwärts gerichteten Tunnelbereich, so dass der Fluchtweg bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt verraucht ist.

Insgesamt kann in den Simulationen eine hohe Übereinstimmung mit den evaluierten Versuchsergebnissen für den ansteigenden Tunnelbereich gezeigt werden. Im abwärts gerichteten Tunnelbereich zeigen die Ergebnisse demgegenüber einen umgekehrten Trend an. Dies könnte möglicherweise auf ein in Folge der höheren aufgeprägten Längsströmung hervorge-rufenes Backlayering zurückzuführen sein.

Für eine detailliertere Auswertung werden die aus der Simulation erhaltenen Gaskonzentrationen innerhalb des Tunnels weiter untersucht. Bild 12 zeigt einen Längsschnitt des Tunnels mit der Verteilung der Gaskonzentration über die Tunnelhöhe im Bereich zwischen dem Brandort in dem tunnelabwärts liegenden Punkt - 5,8 m bei 0,12 m/s Längsströmung zum Zeitpunkt 16 s nach Brandbeginn. Der gelb-grünblaue Bereich weist Bereiche niedriger Gaskonzentration bzw. im Umkehrschluss Bereiche mit höherer Rauchdichte aus.

Ausweislich Bild 11b erfolgt die Ankunft des Rauchs zum Zeitpunkt  $t = 16s$  am tunnelabwärts gelegenen Punkt -5,8 m, so dass unsichere Fluchtbedingungen für den Nutzer unterstellt werden können. Demgegenüber stellt sich aus Bild 12 ablesen, dass sich die Bereiche niedriger Gaskonzentration, also hoher Rauchkonzentration, am Punkt -5,8 m unter der Tunneldecke konzentrieren, der Rauch den Tunnelnutzer aber nicht erreicht. Die Fluchtbedingungen müssen daher für den Nutzer nicht notwendigerweise unsicher sein da sich das Niveau der Rauchschichtung noch deutlich oberhalb des Nutzers befindet.

Die Beurteilung, wann sichere Fluchtbedingungen vorliegen, wird nachfolgend auf der Basis der aus der Simulation ermittelten maßgeblichen Gaskonzentrationen bzw. der korrespondierenden Rauchkonzentrationen in Augenhöhe des Nutzers vorgenommen.

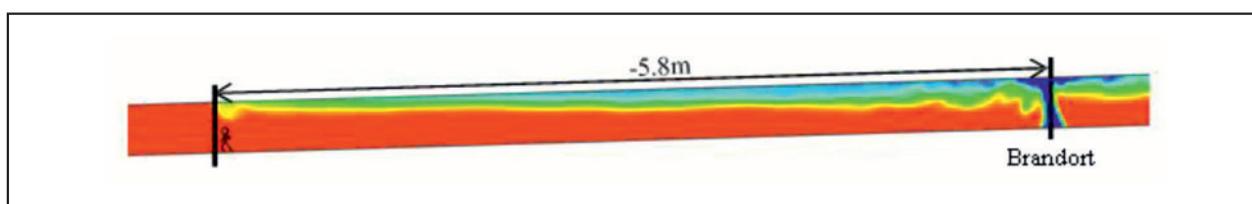


**Bild 11:** Rauchausbreitung und Position der Flüchtenden in Abhängigkeit von der Längsgeschwindigkeit

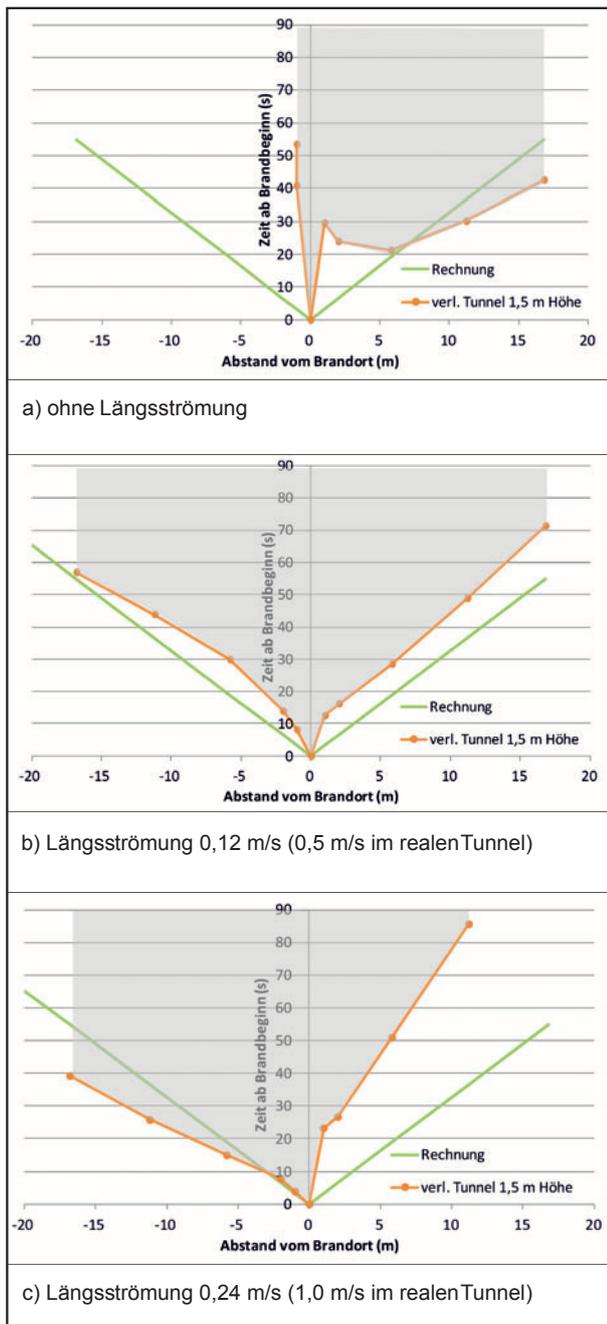
## 5.5 Sicherheitsbewertung bei einer Rauchschicht im Niveau des Flüchtenden

Als maßgebende Größe für sichere Fluchtbedingungen wird die Zeit angenommen, die der Rauch benötigt, um auf ein Niveau in Augenhöhe des Tunnelnutzers abzusinken und die Fluchtbedingungen dann beeinträchtigt. Diese Bewertungshöhe, die hier in einer Höhe von 1,5 m oberhalb des Straßenniveaus angenommen wird, entspricht im Modelltunnel einer Höhe von 0,083 m über der Straßenoberfläche. Aus der Simulation werden somit die Zeiten ermittelt, wann sich die maßgebende Gaskonzentration (Rauchschichtung) in einer Höhe von 0,083 m einstellt. In Bild 13 sind die Ergebnisse der Simulation für die Rauchausbreitung in Augenhöhe der zeitabhängigen Fluchtwegposition des Tunnelnutzers für die verschiedenen Längsströmungen gegenübergestellt. Die grüne Linie stellt die zeitabhängige Fluchtwegposition des Tunnelnutzers, die orange Linie die Rauchschichtung in 1,5 m Höhe dar.

Ohne aufgeprägte Gegenströmung, Bild 13a, schneidet im aufsteigenden Tunnelbereich die Positionslinie die Linie der Rauchfront bei etwa 7 m (126 m). Nach diesem Ergebnis wäre in der Realität der nächste Notausgang nicht mehr sicher zu erreichen. Im abwärts gerichteten Tunnelbereich ist nur ein sehr geringes Backlayering festzustellen, so dass die Rauchausbreitung in Augenhöhe bereits kurz unterhalb des Brandorts zum Stillstand kommt und der Fluchtweg vollständig rauchfrei bleibt. Bei einer Längsströmung von 0,12 m/s (0,5 m/s), Bild 13b, ist in Augenhöhe eine nahezu symmetrische Rauchausbreitung zu erkennen. Beidseitig des Brandortes sind die Notausgänge rauchfrei zu erreichen. Bei einer Längsströmung von 0,24 m/s (1,0 m/s), Bild 13c, erfolgt eine stärkere Rauchausbreitung in dem abwärts gerichteten Tunnelbereich, so dass der Fluchtweg deutlich vor dem Notausgang verrauchert ist. Im ansteigenden Tunnelbereich ist



**Bild 12:** Dichteverteilung im Tunnellängsschnitt zwischen Brandort und Punkt -5.8m bei 0,12 m/s



**Bild 13:** Rauchausbreitung und Position der Flüchtenden in Abhängigkeit von der Längsgeschwindigkeit und einer Rauchsichtung in Höhe von 1,5 m

demgegenüber der nächste Notausgang ohne Beeinträchtigung zu erreichen.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich numerisch eine ideale Längsluftströmung verifizieren, die eine sichere Evakuierung in Brandsituationen in geeigneten Tunneln unterstützt. Aus den gewonnenen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass für reale Tunnel eine abwärtsgerichtete Längsströmung von 0,5 m/s bei einer Neigung von 3 % zur Schaffung günstiger

Selbstrettungsbedingungen bei einem Brand von 5 MW angestrebt werden sollte.

## 6. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird angenommen, dass ein Brand mit 5 MW Brandleistung in einem Tunnel mit einer durchgängigen Steigung von 3 % in einem Stau zu beiden Seiten des Brandortes eintritt und die Fahrzeuge vor dem Brandort den Tunnel nicht verlassen können. Das Verhalten des Rauchs, seine Ausbreitung und seine Schichtung sowie die Sicherheitsanalyse für die Evakuierung sind durch Versuche an einem kleinmaßstäblichen Modelltunnel sowie mittels Simulationen unter Verwendung des Fire Dynamics Simulator untersucht worden. Differenziert werden die Versuche hinsichtlich einer am oberen Portal des Modelltunnels erzeugten tunnelabwärts gerichteten Längsströmung mit einer Geschwindigkeit von 0, 0,12 und 0,24 m/s (entsprechend 0, 0,5 und 1 m/s im realen Tunnel) Ohne aufgeprägte tunnelabwärtsgerichtete Längsströmung bzw. bei einer Längsströmung von 0,24 m/s (1 m/s) breitet sich der Rauch asymmetrisch aus, entweder erfolgt bei zu geringer Längsströmung eine Verrauchung des ansteigenden Tunnelbereich, oder bei einer zu hohen Längsströmungsgeschwindigkeit die Verrauchung des Gefällebereichs, so dass der Fluchtweg bis zum nächsten Notausgang, der nach den RABT in einem realen Tunnel nicht weiter als 300 m entfernt sein darf, nicht unter sicheren Bedingungen zurückzulegen ist. Bei einer tunnelabwärtsgerichteten Längsströmung von 0,12 m/s (0,5 m/s) stellt sich eine relativ symmetrische Rauchausbreitung um den Brandort ein. Hieraus werden im Vergleich zu den anderen untersuchten Geschwindigkeiten relativ sichere Fluchtbedingungen auf beiden Seiten des Brandortes sowohl bei einer Betrachtung der Rauchfront im Bereich der Tunneldecke als auch bei Auswertung der Simulationsergebnisse in Augenhöhe ermittelt.

In der vorliegenden Studie wird eine definierte Brandleistung in Verbindung mit einer Längsneigung mit drei unterschiedlichen definierten tunnelabwärtsgerichteten Längsströmungen untersucht. Weitere Untersuchungen bei anderen Längsströmungsgeschwindigkeiten und Brandleistungen werden notwendig sein, da erwartet werden kann, dass die geeignete Geschwindigkeit in Abhängigkeit von den beiden anderen Parametern variieren wird.

## Literatur

Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), Ausgabe 2006, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit

M. OESER, B. STEINAUER, A. KLEIN, W. SCHRÖDER, W. JESSEN: Untersuchungen zur Optimierung von Längslüftungssystemen für Straßentunnel auf der Basis der Entwicklung eines Modelltunnels; Schlussbericht zu FE 15.0539/2011/ERB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn, 2016 (unveröffentlicht)

O. VAUQUELIN: Experimental simulations of fire induced smoke control in tunnels using an "air-helium reduced scale model": Principle, limitations, results and future, *Tunnelling and Underground Space Technology* 23, pp.171-178, 2008

T. KIKUMOTO, et al.: Characteristic of Plume Behaviour in a small section road tunnel only for passenger cars (A study by numerical simulation), *Proceedings of JSCE, Ser.F, Vol.63*, pp.448-459, 2007. (In Japanese)

O. MÉGRET, et al.: A model to evaluate tunnel fire characteristics, *Fire Safety Journal* 34, pp.393-401, 2000.

R. D. PEACOCK, et al.: *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Springer Science & Business Media, pp.402, 2011.

## Tabellen

Tab. 1: Eigenschaften des Mischgases

Tab. 2: Versuchsbedingungen

## Bildverzeichnis

Bild 1: Überblick und schematische Darstellung des Modelltunnels

a) Überblick und schematische Querschnittsdarstellung

b) Draufsicht

c) Ansicht

Bild 2: Prinzipskizze zur Particle Image Velocimetry [2]

Bild 3: Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen realem Brandgas und Mischgas für den Modelltunnel

Bild 4: Lage der Messpunkte

Bild 5: Fluchtbedingungen

Bild 6: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse und Positionsberechnungen

a) ohne Längsströmung

b) Längsströmung 0,12 m/s (0,5 m/s im realen Tunnel)

c) Längsströmung 0,24 m/s (1.0 m/s im realen Tunnel)

Bild 7: Rauchausbreitung des Mischgases bei einer entgegengesetzten Längsströmung von 0,24 m/s (1 m/s im realen Tunnel) analysiert mittels PIV

a) Eintreffen des Mischgases bei Messpunkt 5,6 m (100 m im realen Tunnel), Ankunftszeit 31,2 s

b) Eintreffen des Mischgases bei Messpunkt 11,2 m (200 m im realen Tunnel), Ankunftszeit 48,6 s

c) Eintreffen des Mischgases bei Messpunkt 16,8 m (300 m im realen Tunnel), Ankunftszeit 69,6 s

Bild 8: Vergleich zwischen Versuchsergebnissen und Simulation

a) ohne Längsströmung

b) Längsströmung 0,12 m/s (0,5 m/s im realen Tunnel)

c) Längsströmung 0,24 m/s (1.0 m/s im realen Tunnel)

Bild 9: Simulationsmodell

Bild 10: Gegenüberstellung der Rauchausbreitung im Modelltunnel und simuliertem verlängerten Tunnel bei unterschiedlichen Längsströmungen

a) ohne Längsströmung

b) Längsströmung 0,12 m/s (0,5 m/s im realen Tunnel)

c) Längsströmung 0,24 m/s (1.0 m/s im realen Tunnel)

Bild 11: Rauchausbreitung und Position der Flüchtenden in Abhängigkeit von der Längsgeschwindigkeit

a) ohne Längsströmung

b) Längsströmung 0,12 m/s (0,5 m/s im realen Tunnel)

c) Längsströmung 0,24 m/s (1.0 m/s im realen Tunnel)

Bild 12: Dichteverteilung im Tunnellängsschnitt zwischen Brandort und Punkt-5.8m bei 0,12 m/s

Bild 13: Rauchausbreitung und Position der Flüchtenden in Abhängigkeit von der Längsgeschwindigkeit und einer Rauchschiebung in Höhe von 1,5 m

a) ohne Längsströmung

b) Längsströmung 0,12 m/s (0,5 m/s im realen Tunnel)

c) Längsströmung 0,24 m/s (1.0 m/s im realen Tunnel)

TOAR Martin Kostrzewa  
Referat „Brücken, Tunnel und sonstige Ingenieurbauwerke“

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

## Betriebstechnisches Regelwerk für Straßentunnel – Stand der Fortschreibung

### 1. Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln

Die Vorgaben zur Festlegung der technischen Ausstattung von Straßentunneln in Deutschland sind in den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT) geregelt, die 1985 erstmals eingeführt wurden.

Nach einer zwischenzeitlich erfolgten technischen Überarbeitung im Jahr 1994 wurden die RABT vor dem Hintergrund der Brandkatastrophen in einigen Alpentunneln um die Jahrtausendwende grundlegend überarbeitet (RABT 2003).

Die derzeit gültigen RABT, Ausgabe 2006, basieren auf den RABT 2003 und wurden in erster Linie um Anforderungen aus der Richtlinie 2004/54/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz (EU-Tunnelrichtlinie) ergänzt.

Kennzeichnend für die RABT 2006 ist einerseits, dass die hinzugenommenen europäischen Regelungen für die Anwendung in Deutschland zugschärft wurden. Zum anderen wurden die Vorgaben der EU-Tunnelrichtlinie bereits für alle Tunnel ab 400 m Gesamtlänge gelten gemacht, zum anderen wurden die Regelungen auch auf Tunnel außerhalb des transeuropäischen Straßennetzes übernommen.

Die RABT 2006 wurde vom zuständigen Arbeitsausschuss der FGSV (AA 3.8) überarbeitet und am 6. Juli 2015 von der FGSV zur Länderabfrage an das BMVI übersandt. Nach Einarbeitung der Stellungnahmen der Länder wurde die Finalversion, Stand 30. Juni 2016, (RABT 2016) am 24. Juni 2016 dem BMVI mit der Bitte um Einführung vorgelegt.

## 2. Vorgehen zur Einführung

Die RABT 2006 wurde, wie auch die Vorgängerversionen, mit Allgemeinem Rundschreiben Straßenbau (ARS) eingeführt. Mit der Einführung der RABT 2016 sollte dieser Weg verlassen werden. Regelungen zur Ausstattung von Straßentunneln sollen zukünftig in die Regelwerke des Brücken- und Ingenieurbaus der Bundesfernstraßen (Bild 1) übernommen werden. Die bislang in den ARS'en enthaltenen, über die RABT hinausgehenden Anforderungen, sowie Anwendungshinweise und Erläuterungen sollten in die RE-Tunnel aufgenommen werden. Die RABT 2016, sowie hiermit in Verbindung stehende Dokumente, sollten dann Anlagen zur RE-Tunnel sein.

Die RABT regeln, obwohl als Rahmenvorschrift geplant, die sinnvoll ausgefüllt werden muss, sehr gezielt technische Vorgaben fußend auf verkehrsrechtlichen Planungsparametern, deren Anordnung nicht den RABT, sondern den Verkehrsbehörden obliegt. Darüber hinaus werden Vorgaben zur Organisation des Tunnelbetriebs getroffen, welche ebenfalls nicht im Zuständigkeitsbereich des Bundes liegen.

Daher entschied sich das BMVI Ende 2017, den fortgeschriebenen Entwurf der RABT aus dem Jahr 2016 trotz zwischenzeitlich nochmals erfolgter Änderungen (E-RABT 2017) aufgrund nicht rechtssicherer Anforderungen nicht für den Bundesfernstraßenbereich einzuführen.



Bild 1: Regelwerke des Brücken- und Ingenieurbaus der Bundesfernstraßen (BAST)

### 3. EABT-80/100

Bei Planung, Bau und Betrieb von Straßentunneln im Zuge von Bundesfernstraßen sollen neben den geregelten Anforderungen an die Tunnelsicherheit auch die Erfahrungen und technischen Entwicklungen nach dem aktuellen Stand der Technik berücksichtigt werden. Diese sind in den weiterhin gültigen RABT 2006 nicht enthalten. Eine Veröffentlichung der Neuerungen war daher auch von Seiten des BMVI erwünscht.

Aus diesem Grund wurde in Abstimmung zwischen FGSV und BMVI die fortgeschriebene Entwurfsfassung der RABT von Vertretern der FGSV und des BMVI erneut überarbeitet und in eine Empfehlungen für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln mit einer Planungsgeschwindigkeit von 80 km/h oder 100 km/h (EABT-80/100) überführt.

Eine Veröffentlichung der EABT-80/100 soll im Jahr 2018 durch die FGSV erfolgen.

### 4. RE-ING, Teil 3

Regelungen zur Planung von Brücken sind im Teil 2 der Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten (RE-ING) mit den Abschnitten enthalten neben den Abschnitten Planungsgrundsätze, Konstruktive Grundsätze und Bauliche Durchbildung auch einen Abschnitt Ausstattung. Es bot sich daher an, die bislang in den RABT beschriebenen planerischen Anforderungen an die betriebstechnische Ausstattung von Straßentunneln zusammen mit baulichen Anforderungen im Wesentlichen statt in die RE-Tunnel in einen Teil 3 der RE-ING zu überführen (Bild 2). Ergänzend sollen die derzeitigen Inhalte der RE-Tunnel ebenfalls in den Teil 3 übernommen werden. Somit kann die RE-Tunnel mit Fertigstellung der RE-ING entfallen.

Hierzu wurde von der Arbeitsgruppe RE-ING des Koordinierungsausschusses Entwurf eine Unterarbeitsgruppe Tunnelbetrieb gegründet, die sich anfangs aus Vertretern der Länder, der BAST und des BMVI zusammensetzt.

Neben der UAG Tunnelbetrieb zur Überführung relevanter Inhalte der RABT in die RE-ING ist die Bund/Länder Arbeitsgruppe (AG) 2.6 Tunnelbau mit der Aufgabe betraut, Inhalte der ZTV-ING, Teil 5 auf ihre Zugehörigkeit zur RE-ING zu überprüfen und um-

gekehrt. Als ein Beispiel, dass Teile der ZTV-ING in die RE-ING zu verlagern sind, ist die Zuordnung der Durchführung von Baugrunduntersuchungen zu nennen. Ebenso soll für den Bereich der Ausstattung der Abschnitt 4, Betriebstechnische Ausstattung, durch die UAG Tunnelbetrieb überprüft werden.

Die Abschnitte der RE-ING sollen um Anhänge ergänzt werden können. Im Zuge ursprünglich Überlegungen zur Überführung der RABT in die RE-Tunnel waren mehrere Anhänge vorgesehen, z. B. in Form von Leitfäden zur Kategorisierung von Gefahrgut, zur Durchführung einer Sicherheitsbewertung und zur Erstellung einer Sicherheitsdokumentation sowie von Ausschreibungstexten für Lautsprecheranlagen und Großflächenruftaster. Auch hierbei wird sich die UAG der Aufgabe stellen müssen, festzulegen, ob Vorgaben übernommen werden oder Verweise ausreichend sind und wie Dopplungen in den Vorgaben zu vermeiden sind.

Das Ziel bei der Erstellung der RE-ING, Teil 3, ist es, die bisherigen hohen Anforderungen an die Tunnelsicherheit auch zukünftig beizubehalten. Die Inhalte des RABT-Entwurfs werden nicht in Frage gestellt. Die nicht erfolgende Einführung beruht auf juristischen Unzulänglichkeiten. Zu den enthaltenen Anforderungen steht der Bund auch weiterhin, was sich in dem Bestreben ausdrückt, die EABT-80/100

Übersicht über den Stand der RE-ING		
Ausgabe November 2017		
Teil:	Abschnitt:	Stand:
1 Allgemeines	1 Grundsätzliches Seite 1 - 5	
	2 Gestaltung Seite 1 - 4	
2 Brücken	1 Planungsgrundsätze Seite 1 - 19	
	2 Konstruktive Grundsätze Seite 1 - 7	
	3 Bauliche Durchbildung Seite 1 - 7	
	4 Brückenausstattung Seite 1 - 15	
	5 Integrierte Bauwerke Seite 1 - 20	
	6 Bewegliche Brücken Siehe ZTV-ING 9-2	
	7 Weistahlbauwerke Siehe ZTV-ING 9-4	
	8 Temporäre Brücken	
3 Tunnel	1 Planungsgrundsätze Seite 1 - xxx	
	2 Konstruktive Grundsätze Seite 1 - xxx	
	3 Bauliche Durchbildung Seite 1 - xxx	
	4 Tunnelausstattung Seite 1 - xxx	
4 Stützbauwerke	1 Planungsgrundsätze Seite 1 - 3	
	2 Raumgitterwände und -wölbe Seite 1 - 3	
	3 Bewehrte Erdkörper Seite 1 - 3	
	4 Drahtgeflechtbehälter	

Bild 2: Aufbau der RE-ING (BMVI)

als Stand der Technik zu veröffentlichen. Durch die Separierung der EU-Tunnelrichtlinie mit ihrem eingeschränkten Geltungsbereich, ist es erforderlich, zu prüfen, in wie weit deren Vorgabe auf alle Tunnel ab 400 m Länge übertragen werden können bzw. sollten.

Die Zuordnung von Inhalten der E-RABT 2017 in die RE-ING Teil 3 erfolgt thematisch zu den Abschnitten (1) Planungsgrundsätze, (2) konstruktive Grundsätze, (3) bauliche Durchbildung und (4) Tunnelausstattung des Teils 3 „Tunnel“ der RE-ING. Bei der Überführung soll zum einen die öfters in den RABT verwendete Öffnungsklausel „es kann abgewichen werden“ vermieden, zum anderen sich auf unverhandelbare Anforderungen fokussiert werden. Regelungen, die eher den Charakter von Empfehlungen, Erläuterungen oder Hinweisen haben, sollen nur noch in den EABT 80/100 enthalten sein.

Die EU-Tunnelrichtlinie bleibt als eigenständiges Regelwerk mit begrenztem Geltungsbereich bestehen, wobei deren Regelungen, soweit sie nicht Bestandteil der RE-ING sind, zur Anwendung empfohlen werden.

Die aus Sicherheitsbetrachtungen resultierenden baulichen Maßnahmen sind bei der Erstellung der Planfeststellungsunterlagen zu berücksichtigen. Daher ist eine frühe Positionierung von Vorgaben im Regelwerk angezeigt. Der Anwender soll erkennen, welche Abschnitte er bei der Planung eines Tunnels in welcher Reihenfolge zu beachten hat.

## 5. Übergangsregelungen

Die bauaufsichtlichen Regelungen der RABT 2006 bleiben inklusive des Allgemeinen Rundschreibens Straßenbau Nr. 10/2006 bis zur Einführung der RE-ING, Teil 3 vollumfänglich bestehen. Darüber hinaus gilt es weiterhin, bei der Planung von Tunneln den aktuellen Stand der Technik zu berücksichtigen. Diesen stellt aus Sicht des BMVI derzeit die EABT-80/100 dar. Ferner enthalten die Empfehlungen die Erfahrungen aus der Nachrüstung und dem Betrieb von nachgerüsteten Tunneln, sowie Erkenntnisse verschiedenster Forschungsprojekte und Untersuchungen der vergangenen Jahre.

Bislang erfolgte die Planung von Tunnelanlagen auf Grundlage der RABT 2006 bzw. der zwischenzeitlich verfügbaren Entwurfsstände der Fortschreibung bis hin zur RABT 2016, deren Anwendung seitens des BMVI zur Berücksichtigung des Standes der Technik akzeptiert war. Da die EABT-80/100 weitestgehend der RABT 2016 entsprechen, ergeben sich somit bis zur Fertigstellung der RE-ING, Teil 3, keine Änderungen für die Planung.

Die von den Tunnelbetreibern aufgebauten Strukturen für den Regelbetrieb der Tunnel sowie für den Ereignisfall haben sich bewährt und sollten auch zukünftig erhalten bleiben.

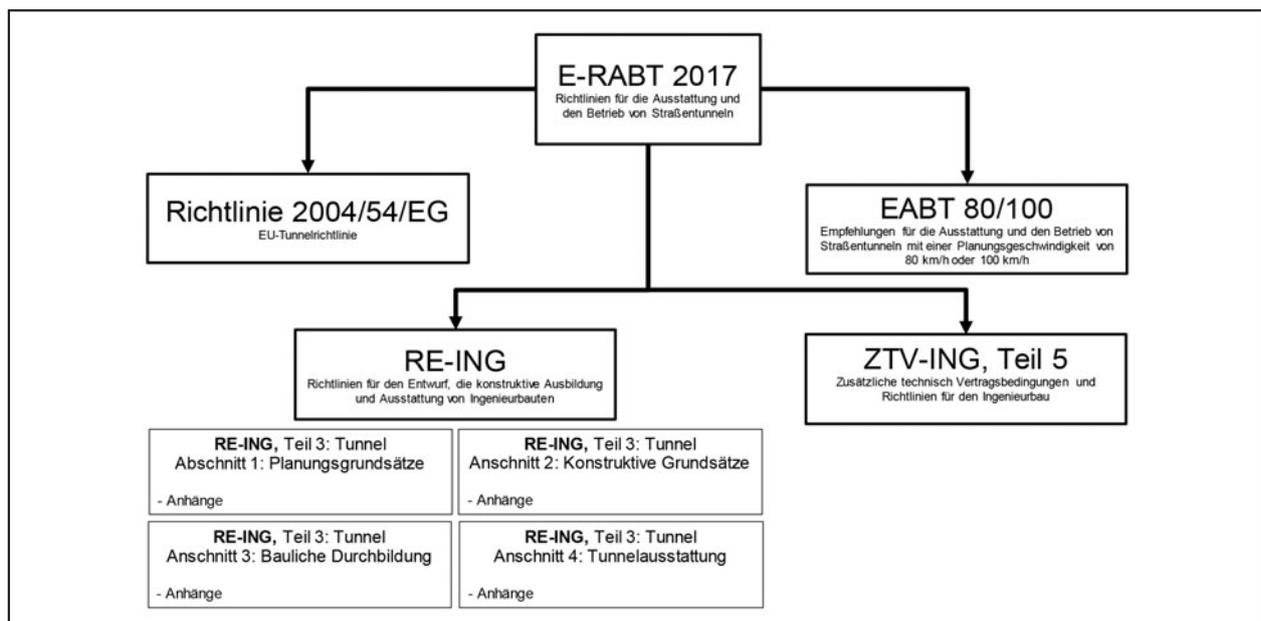


Bild 3: Aufteilung der RABT-Anforderungen (BAST)

Thewes, Markus, Prof. Dr.-Ing.,  
Vollmann, Götz, Dr.-Ing.,  
Hoffmann, Peter, M.Eng.,

Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau  
und Baubetrieb / Ruhr-Universität,  
Bochum, Deutschland

Riepe, Werner, Dipl.-Ing.,

BUNG Ingenieure AG,  
Heidelberg, Deutschland

Wuttig, Andreas, Dipl.-Ing.,

Schüssler-Plan Ingenieurgesellschaft mbH,  
Düsseldorf, Deutschland

Friebel, Wolf-Dieter, Dipl.-Ing.,

Bundesministerium für Verkehr  
und digitale Infrastruktur,  
Bonn, Deutschland

Kaundinya, Ingo, Dipl.-Ing.,  
Lehan, Anne, Dipl. Wirt.-Ing.,

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt),  
Bergisch Gladbach, Deutschland

## Kostenansätze für Straßentunnel

### Kurzfassung

Die Kostenermittlung von Tunnelbauwerken unterliegt zahlreichen Unsicherheiten, aus denen Abweichungen zwischen den geplanten und den festgestellten Kosten resultieren können. Derzeit existiert kein aktuelles Modell zur Kostenschätzung eines Tunnelbauwerks. In diesem Beitrag werden die Untersuchungen des Forschungsvorhabens FE 15.0577/2012/FRB „Verfahren für Kostenansätze von Straßentunnel“, welches durch die BASt beauftragt und durch das BMVI begleitet wurde, kurz vorgestellt. Der Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum, unterstützt durch die Ingenieurbüros Schüssler-Plan und BUNG, untersuchte dabei die Kostenentwicklung in den einzelnen Phasen bei 17 Straßentunnelprojekten der jüngeren Zeit. Neben einer Analyse der baubegleitenden Risiken wurde aus der Vielzahl

der Daten ein dynamisches, softwaregestütztes Rechenmodell entwickelt, mit dem künftige Kosten-schätzungen und -berechnungen exakter durchgeführt werden können.

## 1. Einleitung

Ziel des Forschungsvorhabens FE 15.0577/2012/FRB „Verfahren für Kostenansätze von Straßentunnel“ war die Aktualisierung bekannter Kostenstrukturen für bauliche Kosten sowie eine Ergänzung dieser im Hinblick auf die betriebstechnischen Ausstattungsvariationen für deutsche Straßentunnel. Die Untersuchung wurde in sieben Arbeitsschritten bzw. Arbeitspaketen (AP) zur Erfassung und Modellierung der notwendigen Daten durchgeführt (siehe Bild 1).

Zunächst fand die Bild von geeigneten Bauwerksvarianten einschließlich zuzuordnender Randbedingungen statt, die im weiteren Verlauf kostentechnisch untersucht wurden. Im nächsten Arbeitsschritt fand die Entwicklung der Modelle zur Berechnung von Bauwerks- und Ausrüstungskosten sowie der Modelle zur Durchführung von Risikoanalysen unter Verwendung von unsharfen Eingangswerten statt. Darüber hinaus erfolgte eine Modellentwicklung für die Integration der Kostenansätze in ein Lebenszykluskostenmodell. In den nächsten Arbeitsschritten wurden die Bauwerks- und Ausrüstungskosten von Straßentunneln detailliert auf Basis von Erfahrungen ermittelt. Für die Analyse wurden Projektdaten, vorwiegend Preisspiegel und Leistungsverzeichnisse, von 17 bereits gebauten Straßentunnelprojekten der jüngeren Zeit verwendet. Dabei handelt es sich um 12 Projekte in Geschlossener (bergmännischer) Bauweise und 5 Projekte in Offener Bauweise. In einem weiteren Schritt wurden Berechnungshilfen, in Form von Excel-Tools, entwickelt. Mit Hilfe der Tools wird ermöglicht, die entwickelten Modelle und Kostenansätze in anwenderfreundlicher Form für den späteren Nutzer bereitzustellen. Abschließend wurden die zuvor ermittelten Modelle, Kostenansätze und die Berechnungstools einer Validierung unterzogen und Simulationsrechnungen durchgeführt.

## 2. Untersuchungskonzept

Für eine zielgerichtete Entwicklung neuer Kostenmodelle für Straßentunnel empfahl sich zunächst

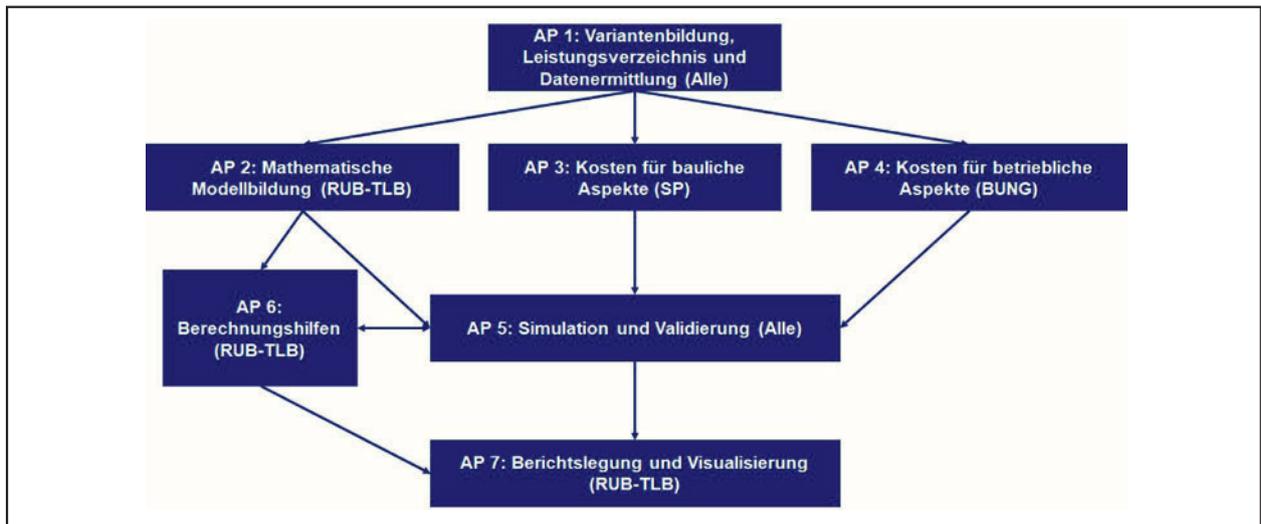


Bild 1: Struktur des Untersuchungskonzepts

	Planung	Ausschreibung / Vergabe	Schlussrechnung
Dokumente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Kostenschätzung</u> und <u>Kostenberechnung</u></li> <li>• STUVA-Untersuchungen (1996)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Submissionsergebnisse (<u>Preisspiegel</u> und <u>Leistungsverzeichnisse</u>)</li> <li>• Anfrage-LVs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Schlussrechnung</u> bzw. <u>Abschlagszahlungen</u></li> <li>• <u>Nachträge</u> (positionsscharf) einschließlich Anspruchsgrundlagen</li> <li>• <u>Experteninterviews</u></li> </ul>
Analysen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vergleich der Kosten</li> <li>• Analyse der Abweichungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vergleich der Bieterpreise / Marktpreise (Positionsebene)</li> <li>• Neustrukturierung</li> <li>• Einheitspreise</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyse der Nachträge und Vergleich mit den Vergabedaten</li> <li>• Ermittlung und Bewertung von Nachtragsrisiken</li> </ul>

Bild 2: Struktur der Kostenanalyse

ein Blick auf die Entstehung von Kostensteigerungen, um die weitere Analyse daraufhin zu justieren und Kostensteigerungen innerhalb ausgeführter Projekte nachvollziehen und kategorisieren zu können. Dies war vor allem vor dem Hintergrund der avisierten Kosten- und Risikomodellierung notwendig.

Bei Betrachtung der typischen Kostensteigerung bei Bauprojekten ließen sich zwei Abweichungen identifizieren:

- Ein  $\Delta 1$  als kostenspezifische Abweichung zwischen der ursprünglichen Kostenberechnung aus der Planungsphase und dem Kostenschlag aus der Vergabephase

- Ein  $\Delta 2$  als Kostensteigerung vom Kostenschlag aus der Vergabephase, hin zur schlussgerechneten Summe des Bauprojekts in der Kostenfeststellung

Vor diesem Hintergrund lässt sich eine Struktur für die Analyse ableiten, mit deren Hilfe im Folgenden die eigentliche Untersuchung vorgenommen wurde (Bild 2).

Die obere Zeile zeigt die für die Analysen erforderlichen und zugrunde gelegten Dokumente der einzelnen Phasen. Die untere Zeile ordnet dabei den verschiedenen Phasen die notwendigen Analyse-schritte zu, die im Verlauf der Untersuchung voll-

Querschnitt nach RABT 2006 (2016)	Breite zw. Borden	Typ	Untertyp	Inhalt
RQ 10,5T (RQ 11t)	7,50 m	G1	1.1	offene Sohle und Lüftungswischendecke
			1.2	offene Sohle, Lüftungswischendecke und Rettungsstollen
			2.1	geschlossene Sohle und Lüftungswischendecke
			2.2	geschlossene Sohle, Lüftungswischendecke und Rettungsstollen
RQ 26t (RQ 31t)	7,50 m	G2	1.1	offene Sohle
			2.1	geschlossene Sohle
RQ 26T (RQ 31T)	10,00 m	G3	1.1	offener Sohle
			2.1	geschlossener Sohle
RQ 33t (RQ 36t)	11,00 m	G4	1.1	offener Sohle
			2.1	geschlossener Sohle

Tab. 1: Basisvarianten für in Geschlossener (bergmännischer) Bauweise hergestellte Tunnelbauwerke

zogen werden müssen. Zudem lässt sich aus der oberen Zeile ablesen, welche der projektbezogenen Dokumente für die jeweiligen Analysen notwendig sind.

## 2.1 Basisvarianten und Kostenstrukturen

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Basisvarianten einschließlich Randbedingungen unter Berücksichtigung der ZTV-ING. und der RABT aufgestellt. Des Weiteren wurden neue einheitliche Kostenstrukturen für die Geschlossene und die Offene Bauweise sowie die Betriebstechnische Ausstattung von Straßentunneln entwickelt. Die Basisvarianten wurden anhand einer Analyse des Bestandes der Straßentunnel deutschlandweit festgelegt. Beispielsweise wurden für die Geschlossene Bauweise die in Tabelle 1 dargestellten Basisvarianten (Typ G1 bis G4) festgelegt und im Rahmen der weiteren Analyse untersucht.

Bei den Regelquerschnitten sind immer die Querschnittstypen gemäß RABT 2006 [1] benannt bzw. in der Klammer das Pendant der RABT2016 im Entwurf [2] ausgewiesen. Bei den parallelen Rettungsstollen ist zu berücksichtigen, dass sie gemäß der aktuellen ZTV-ING. mit einem reduzierten Querschnitt – bezogen auf den Hauptquerschnitt – ausgeführt würden, sowie wenn möglich in 1 – schaliger Bauweise [3].

Zudem wurden zu jeder Basisvariante die Randbedingungen, u. a. Querschnittsformen einschließlich der Abmessungen, sowie Vortriebsklassen definiert.

Die Auswertung der vorliegenden Projektdaten führte zudem zu einer Entwicklung neuer einheitlicher Kostenstrukturen. Dies ermöglicht eine projektübergreifende Analyse und ist für ein allgemein einsetzbares Tool zur Prognose der Projektkosten notwendig. Die in der Vergangenheit entwickelten Kostenstrukturen der STUV A (FE 02.178/1997/FR) und die Kostengruppen aus den Regelwerken der Anweisung zur Kostenermittlung und zur Veranschlagung von Straßenbaumaßnahmen (AKVS) sowie der DIN 276 (Kosten im Bauwesen) wurden bei der Neustrukturierung der Kosten berücksichtigt, gaben allerdings keine geeignete bzw. keine direkt anwendbare Strukturierung vor.

Für jede Basisvariante wurden Haupt- und Unterkostengruppen entwickelt. Die Hauptkostengruppen der Geschlossenen Bauweise sind beispielhaft in Tabelle 2 dargestellt.

## 2.2 Vorab-Analysen und Kostensteigerungsanalysen

Vor der eigentlichen Entwicklung der Modelle und Tools wurden zuerst Vorabanalysen der Geschlossenen und der Offenen Bauweise sowie der Be-

Übersicht Kostenstruktur Geschlossene Bauweise
<b>Vorarbeiten</b> , z. B. Baustelleneinrichtung
<b>Ausbruch</b> Haupttunnel einschl. Pannenbuchten
<b>Ausbruch</b> Querschläge
<b>Ausbruch</b> Sonstige Leistungen, z. B. Geologischer Mehrausbruch
<b>Sicherung</b> Haupttunnel als Spritzbetonschale + Anker
<b>Sicherung</b> Sonstige Leistungen, z. B. Zuschlag Wasserandrang
<b>Entwässerung</b> z. B. Entwässerungsleitungen und Rückhaltebecken
<b>Entwässerung</b> Sonstige Leistungen, z. B. Anschlüsse und Querleitungen
<b>Abdichtung</b> , Bauwerksfugen z. B. KDB und Fugenbänder
<b>Abdichtung</b> Sonstige Leistungen z. B. Querschlagsanbindung, Schutzmatten
<b>Innenschale</b> Haupttunnel z. B. Ortbeton Gewölbe + Bewehrung
<b>Innenschale</b> Querschläge
<b>Innenschale</b> Sonstige Leistungen z. B. Schalwagen und Zwischendecke
<b>Sonstige Rohbauleistungen</b> z. B. Nischenherstellung
<b>Wasserhaltung Bauphase</b> bei mäßigem Wasserandrang
<b>Fahrbahn und Kabelschächte</b> z. B. Asphalt- oder Betonfahrbahn
<b>Portalbauwerk</b> , als Zulage im Portalbereich
<b>Betriebsgebäude</b> , Rohbau

Tab. 2: Entwickelte Kostenstruktur (Hauptkostengruppen) der Geschlossenen (bergmännischen) Bauweise

triebstechnischen Ausstattung von Straßentunneln durchgeführt. Dazu wurden in einem ersten Schritt die wesentlich en Preisdifferenzen der Bieterpreise der vorliegenden Preisspiegel analysiert. Damit wurde verdeutlicht, dass durch eine statische Kostenprognose aufgrund großer Preisdifferenzen, eine zielführende Berechnung der Kosten nur mit großen Unsicherheiten und Unschärfen möglich ist. Aufgrund dessen war die Entwicklung eines Prognosemodells auf Basis einer möglichst umfassenden Grundgesamtheit von Einzelpreisen aufzubauen. D. h. ein Ansatz, bei dem die vollständigen LV's erfasst werden. Eine Aggregation von verschiedenen Positionen zu Hauptpositionen ist dabei zweifelsfrei sinnvoll.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden zudem die Bandbreiten der vorliegenden Submissionsergebnisse untersucht und ermittelt. Dabei wurde beispielsweise für die Projekte der Geschlossenen Bauweise eine durchschnittliche Differenz von 8,26 % vom Mittelwert der Bieterpreise zum wirtschaftlichen Angebotspreis ermittelt. Eine Gesamtansicht der Unterschiede zwischen dem wirtschaftlichsten Angebot und dem Mittelwert aller Bieterpreise ( $\Delta_{\min}$ )

Lfd.-Nr.	$\Delta_{\min}$	$\Delta_{\max}$
1	-3,84 %	4,02 %
2	-10,44 %	8,20 %
3	-8,51 %	7,74 %
4	-4,84 %	10,98 %
5	-1,63 %	1,85 %
6	-7,61 %	8,97 %
7	-5,62 %	8,40 %
8	-13,02 %	16,79 %
9	-11,00 %	19,66 %
10	-12,57 %	6,91 %
11	-6,84 %	7,76 %
12	-13,26 %	21,36 %
<b>Mittelwert:</b>	<b>-8,26%</b>	<b>10,22%</b>

Tab. 3: Bandbreiten der Submissionsergebnisse der vorliegenden Datenbasis von Tunnelprojekten in Geschlossener (bergmännischer) Bauweise

sowie zwischen dem Mittelwert und dem maximalen Angebot ( $\Delta_{\max}$ ) ist in Tabelle 3 dargestellt.

In einem zweiten Schritt der Vorabanalysen, wurden die Kostensteigerungen über den Projektverlauf der

einzelnen vorliegenden Projekte ermittelt. Dabei wurde die Kostendifferenz zwischen der ersten Kostenberechnung und dem Kostenanschlag ( $\Delta 1$ ) und zwischen dem Kostenanschlag und der Kostenfeststellung ( $\Delta 2$ ) ermittelt. Bei der Geschlossenen Bauweise handelt es sich dabei um ein  $\Delta 1$  von 21,20 % und ein  $\Delta 2$  von 17,17 %. Die Ergebnisse der Vorabanalysen gingen zur Berechnung des wirtschaftlichsten Preises und des Preises einschließlich Risiko in die Berechnungen des entwickelten Kostenberechnungs-Tools ein.

### 3. Hilfsmittel für die Kostenprognose einschließlich erster Validierung

Die entwickelten Hilfsmittel sind Kostendiagramme (Kostenrahmen), Kostenschätz-Tools (Kostenschätzung) und Kostenberechnungs-Tools (Kos-

tenberechnung). Diese wurden für Tunnel in Geschlossener und Offener Bauweise sowie die Betriebstechnische Ausstattung entwickelt. Diese werden kurz anhand einer ersten Validierung erläutert.

Für die Validierung wurde ein Straßentunnelprojekt, der Geschlossener Bauweise, 440 Metern Länge und einem Regelquerschnitt 10,5 T (11 t) einschließlich eines Rettungsstollens zur Verfügung gestellt. Mehr als 80 % der Tunneltrasse sind mit der Vortriebsklasse 7, somit als „schwer“, charakterisiert worden. Der wirtschaftlichste Preis aus der Submission wird für die Validierung als Vergleichswert verwendet.

#### 3.1 Kostendiagramme

Die Kostendiagramme sind gegliedert nach Bauweise und Regelquerschnitt. Durch ein einfaches Ablesen wird die schnelle Ermittlung eines Nettoprei-

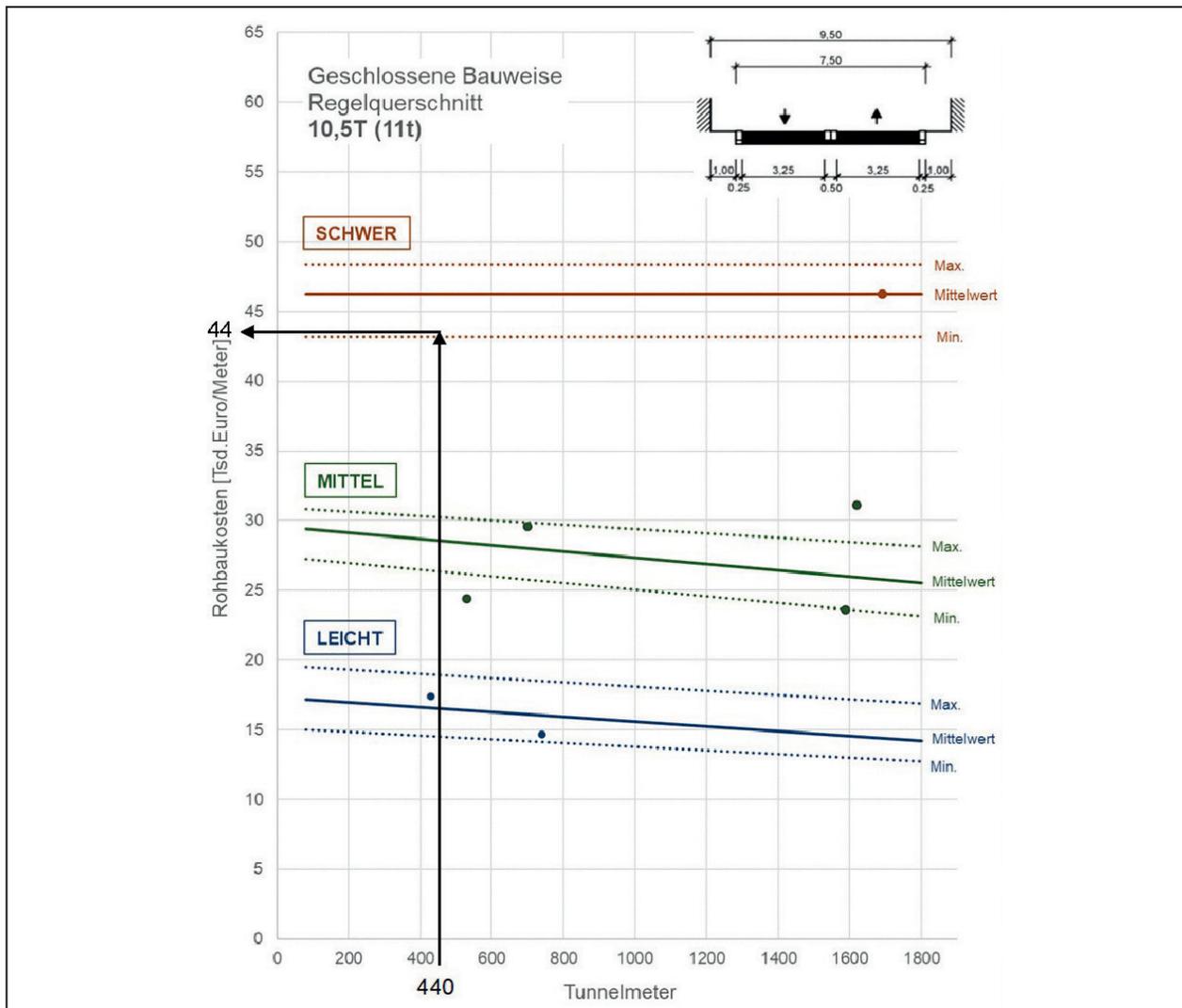


Bild. 3: Kostendiagramm RQ 10,5T (11t), Geschlossene Bauweise

Tunnellänge:	440	m
Querschnitt:	RQ 10,5T (11t)	(Bitte auswählen) Info
<b>Geologische Bedingungen</b>		
leicht:	16,5	%
mittel:		%
schwer:	83,5	%
$\Sigma$	100	%
Info		
		Preisbasis 2016
Faktor:		1,00
Anzahl Schalwagen:	1	Stk
Anzahl Betriebsgebäude:	1	Stk

Bild 4: Auszug der Eingabemaske aus dem Kostenschätztool

ses pro Tunnelmeter ermöglicht. Jedes entwickelte Kostendiagramm enthält mehrere übereinanderliegende Kurven, welche bei der Geschlossenen Bauweise für einen geologischen Schwierigkeitsgrad – „leicht“ (Anteil Vortriebsklasse 4 - 5 > 80 %), „mittel“ (Anteil Vortriebsklasse 5 – 6 > 80 %) und „schwer“ (Anteil Vortriebsklasse 6 - 7 > 80 %) -stehen. Bei der Anwendung desentsprechenden Kostendiagramms im Rahmen der Validierung wurde eine Abweichung zum Submissionsergebnis des Validierungsprojekts von ca. 43 % festgestellt. Somit wird die Genauigkeit der entwickelten Diagramme zum jetzigen Zeitpunkt als sehr niedrig eingestuft. In Bild 3 wird hier repräsentativ für die Geschlossene Bauweise die Validierung des Kostendiagramms für einen Regelquerschnitt 10,5 T (11 t) dargestellt.

### 3.2 Kostenschätz-Tool

Die Kostenschätz-Tools basieren auf Microsoft Excel und ermöglichen durch Angabe des Regelquerschnitts, der Tunnellänge und der prozentualen Verteilung des geologischen Schwierigkeitsgrads, wiederum von „leicht“ bis „schwer“, der Angabe der Anzahl an Schalwägen und Betriebsgebäuden die Berechnung eines ersten Schätzwerts für die Rohbaukosten (Netto) eines Straßentunnels. Beider Validierung des Kostenschätz-Tools für die Geschlossene Bauweise konnte eine Abweichung von 23 % zum Submissionsergebnis des Validierungsprojekts festgestellt werden. Somit wird die Genauigkeit des Kostenschätz-Tools für die Anwendung zur Ermittlung eines ersten Kostenrahmens als gut und für die Kostenschätzung als mittelmäßig eingestuft. Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass aufgrund der rein statischen Berechnung der Kosten große Unsicherheiten und Unschärfen bei der Anwendung entstehen können. Nachfolgend wird ein Auszug der Eingabemaske des Kostenschätz-Tools für die Geschlossene (bergmännische) Bauweise mit den

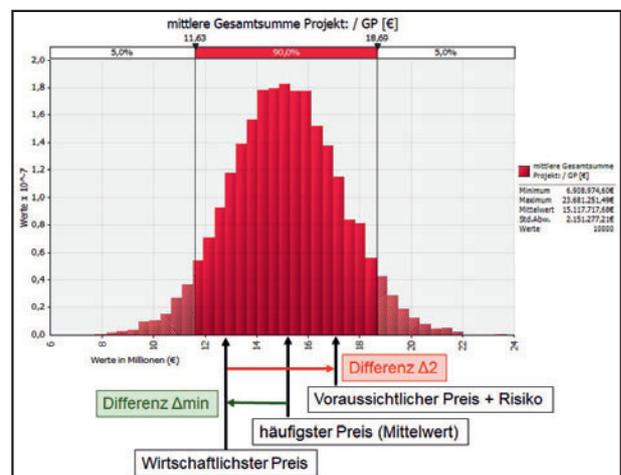


Bild 5: Ergebnis des Kostenberechnungs-Tools als Häufigkeitsverteilung

notwendigen Eingaben für das Validierungsprojekt dargestellt (Bild 4).

### 3.3 Kostenberechnungs-Tool

Das Kostenberechnungs-Tools basiert ebenfalls auf Microsoft Excel und für die Berechnung einschließlich der statistischen Auswertungen ist ergänzend die Software @Risk von der Firma Palisade erforderlich. Der Aufbau jedes entwickelten Tools entspricht der entwickelten neuen Kostenstruktur. Die Daten (Bieterpreise aus den vorliegenden Preispipegeln) sind sortiert nach Basisvarianten und wurden entsprechend in einzelnen Datenblättern hinterlegt. Sie sind in einzelnen Datenreihen angelegt und werden statistisch durch Approximation mittels Verteilungsfunktionen ausgewertet. Durch die Eingabe des Regelquerschnitts und der Tunnellänge wählt der Anwender automatisch die entsprechenden Datenreihen für seine Berechnung aus. Die hinterlegten Datenreihen können zur zukünftigen Aktualisierung der Tools ergänzt werden.

Das Kostenberechnungs-Tool liefert als Ergebnis die Häufigkeitsverteilung der mittleren Gesamtprojektkosten. Zudem kann ein mittlerer Preis (vor-aussichtlicher mittlerer Bieterpreis), der wirtschaftlichste Preis sowie ein Preis einschließlich einer Prognose einer möglichen Kostensteigerung bis zur Schlussrechnung ggf. als Risikozuschlag ausgegeben werden (siehe Bild 5). Die dargestellten Deltas ( $\Delta_{min}$  und  $\Delta_2$ ) entsprechen den im Rahmen der Vorab-Analysen und Kostensteigerungsanalysen entwickelten Differenzen (vgl. Kapitel 2.2).

Bei der Validierung wurde eine Abweichung zum Submissionsergebnis von 3 % festgestellt. Die Prognosegenauigkeit des Kostenberechnungs-Tools wird daher als sehr hoch bewertet.

### 3.4 Zusammenfassung

In Tabelle 4 ist der Vergleich der Berechnungsergebnisse zusammengefasst.

## 4. Ergänzende Entwicklungen

Weitere Entwicklungen im Rahmen des Forschungsvorhabens waren ein Risiko-Tool und ein Lebenszykluskosten-Tool.

Das Risiko-Tool besteht aus einem Risikoregister, welches anhand einer qualitativen Analyse von Nachtragsrisiken erarbeitet wurde. Die Risikobewertung wurde sowohl qualitativ als auch quantitativ anhand einer Auswertung von Nachtragsrisiken

erarbeitet. Diese Risikoanalyse liefert ein sehr umfangreiches Portfolio an Risiken. Es konnte jedoch aufgrund der – zum jetzigen Zeitpunkt – nur sehr kleinen Grundgesamtheit an Eingangsdaten, nur ein Bruchteil der Risiken monetär bewertet werden.

Das Lebenszykluskosten-Tool wurde auf den neu entwickelten Strukturen aufgebaut. Es basiert auf der Kapitalwertmethode und wurde – zum jetzigen Zeitpunkt – durch Platzhalter für die Eingabe von Nutzungsdauern und Wartungsintervallen entwickelt.

## 5. Empfehlungen für die Praxis

- Pflege und Update der Tools und Ergänzung der Datenbasis, um die Qualität vergleichbar hoch zu halten
- weitere Untersuchungen zur Dynamik und zu Auswirkungen von baulichen Risiken
- Anwendung der Tools auf breiter Basis, um eine stetige Weiterentwicklung zu erreichen
- Durchführung konzertierter Schulungen, sofern eine Verwendung geplant ist
- Verwendung der neu entwickelten einheitlichen Struktur zur Gliederung künftiger Projekte hinsichtlich der zukünftigen Digitalisierung und Zentralisierung

	Wirtschaftlichster Preis	Mittelwert der Bieterpreise	Maximalwert der Bieterpreise
Ergebnisvergleich Kostendiagramm mit Submissionsergebnis	+ 43 %	+ 25 %	12,5 %
Ergebnisvergleich Kostenschätztool mit Submissionsergebnis	+ 23 %	+ 7%	- 4%
Ergebnisvergleich Kostenberechnungstool mit Submissionsergebnis	+ 3 %	- 2 %	

Tab. 4: Vergleich der Berechnungsergebnisse der einzelnen Werkzeuge mit dem Submissionsergebnis

## Literatur

- [1] RABT 2006, Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). Köln, Ausgabe 2006.
- [2] RABT 2016 im Entwurf, Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). Köln, Ausgabe Entwurf 2016.
- [3] ZTV-ING Teil 5, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Stand 2018/01.

## Bilder

- Bild 1: Struktur des Untersuchungskonzepts
- Bild 2: Struktur der Kostenanalyse
- Bild 3: Kostendiagramm RQ 10,5T (11t), Geschlossene Bauweise
- Bild 4: Auszug der Eingabemaske aus dem Kostenschätztool
- Bild 5: Ergebnis des Kostenberechnungs-Tools als Häufigkeitsverteilung

## Tabellen

- Tab. 1: Basisvarianten für in Geschlossener (bergmännischer) Bauweise hergestellte Tunnelbauwerke
- Tab. 2: Entwickelte Kostenstruktur (Hauptkostengruppen) der Geschlossenen (bergmännischen) Bauweise
- Tab. 3: Bandbreiten der Submissionsergebnisse der vorliegenden Datenbasis von Tunnelprojekten in Geschlossener (bergmännischer) Bauweise
- Tab. 4: Vergleich der Berechnungsergebnisse der einzelnen Werkzeuge mit dem Submissionsergebnis

Hilgenstock, Friedrich, Dipl.-Ing.,  
WTM Engineers International GmbH,  
Hamburg, Deutschland,

Rambøll-Arup-TEC JV und Femern A/S,  
Kopenhagen, Dänemark

## Feste Fehmarnbeltquerung – Herausforderungen bei Planung, Bau und Betrieb des Tunnels

### Kurzfassung

Seit dem 19. Jahrhundert gibt es Bestrebungen für eine gut ausgebaute Verbindung zwischen Skandinavien und Zentraleuropa über Fehmarn, Deutschland und Lolland, Dänemark. Auch im aktuellen europäischen Verkehrsnetzplan hat der Ausbau der Verbindung eine hohe Priorität, wie schon die Einstufung der Hinterlandanbindung als vordringlichen Bedarf im neuen Bundesverkehrswegeplan 2030 zeigt.

Die Umsetzung des Vorhabens soll als feste Verbindung in Form einer Absenktunnellösung ausgeführt werden. Aufgrund der Länge der Verbindung des Unterwassertunnels waren neuartige Entwicklungen für die wirtschaftliche Umsetzung erforderlich. Die angemessene Berücksichtigung der Umwelt und der Betroffenen bedingt ein herausforderndes Genehmigungsverfahren in beiden Ländern.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Bedeutung, die technische Umsetzung und die Herausforderungen in der Planung, dem Bau und für den Betrieb des Projekts der Festen Querung Fehmarnbelt.

## 1 Einleitung

### 1.1 Lage und Bedeutung

Die direkte und kürzeste Anbindung Skandinaviens nach Zentraleuropa verläuft auf der sogenannten Vogelfluglinie, die auf einer fast geraden Achse Hamburg in Deutschland mit Kopenhagen in Dänemark verbindet. Dabei wird zwischen den Inseln Fehmarn in Deutschland und Lolland in Dänemark der Fehmarnbelt überquert. Diese Verbindung erfolgt zurzeit über eine Fährlinie. Die existierende

Alternative ohne Fähre führt über den Großen Belt und ist um über 140 km länger (siehe Bild 1).

Der Lückenschluss durch eine feste Verbindung zur Sicherstellung einer kontinuierlichen Anbindung in angemessener Verkehrsqualität ist auch von der EU als notwendig erachtet worden und wird seit den 1980er Jahren gefördert.

Die Strecke ist prioritärer Teil des transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN-V) und bildet den zentralen Teil der TEN-V Achse Nr. 20: „Eisenbahnachse Fehmarnbelt“ (Fehmarnbelt Railway Axis) nach Kopenhagen mit Anschluss über den Øresund an das schwedische Eisenbahnnetz, sowie für die TEN-V Achse 20: „Straßenachse Fehmarnbelt“ den Ausbau der Straßenverbindung über Fehmarn bis zum bereits ausgebauten Autobahnabschnitt auf Lolland (siehe Bild 2).

Auch der Bundesverkehrswegeplan 2030 sieht den Ausbau der Hinterlandanbindungen auf deutscher Seite für Bahn und Straße vor. Der Ausbau der Bahn inklusive einer 2-gleisigen Fehmarnsundbrücke ist als vordringlicher Bedarf und der Ausbau der Straßenanbindung als fest disponiertes Projekt aufgeführt.



Bild 1: Lage des Projektes

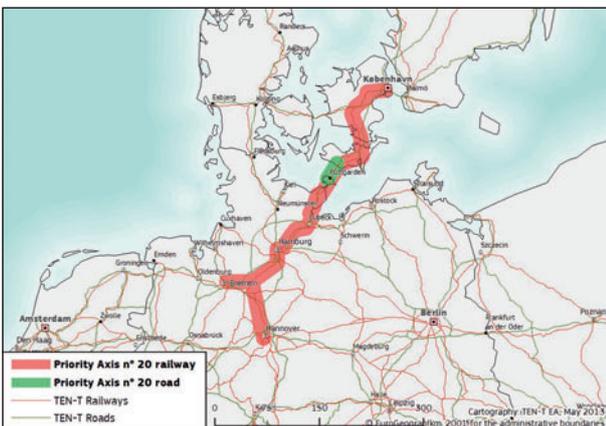


Bild 2: TEN-V Achse 20 Eisenbahn und Straße /2/

Geplant ist die Feste Fehmarnbeltquerung als 18 km langer Absenktunnel auf einer Trasse parallel zu der bestehenden Fährverbindung /1/.

Die feste Querung wird die Reisezeit zwischen Skandinavien und Kontinentaleuropa erheblich reduzieren: Während die aktuellen Fährverbindungen 45 Minuten (plus Wartezeit) dauern, werden Bahnreisende nur 7 Minuten und Autofahrer nicht mehr als 10 Minuten benötigen, um den Tunnel zu passieren. Die Dauer einer Zugfahrt zwischen Hamburg und Kopenhagen wird von etwa 4,5 Stunden auf unter 3 Stunden verkürzt.

## 2 Planerische und bauliche Herausforderungen

### 2.1 Geologie

Das geologische Längsprofil entlang des Tunnels zwischen Fehmarn und Lolland ist in Bild 3 dargestellt.

Sowohl auf der deutschen als auch auf der dänischen Seite fallen die küstennahen Bereiche seicht ab. Der zentrale Bereich im Belt ist annähernd eben. Im Tunnelverlauf besteht das Aushubmaterial aus oberen Schichten post- und spätglazialer Ablagerungen (Gyttja, Sand, Schluff und Ton), darunter liegenden Schichten aus glazialen Ablagerungen (Ton und Geschiebemergel), gefolgt von paläogenen Schichten, die aus stark bis extrem plastischem Ton bestehen.

Die deutsche Seite charakterisiert sich durch paläogenen Ton und Geschiebemergel und das Zentralbecken durch Gyttja, Sand, Schluff und Ton. Auf der dänischen Seite dominieren dicke Ablagerungen von Geschiebemergel /4/.

Die Topographie ist sehr gut für einen Absenktunnel geeignet, die anstehenden Bodenschichten verlangen jedoch eine sorgfältige Berücksichtigung, um langfristiges Setzungs- und Hebevverhalten in dem Bauwerk aufnehmen zu können.

### 2.2 Bauwerk

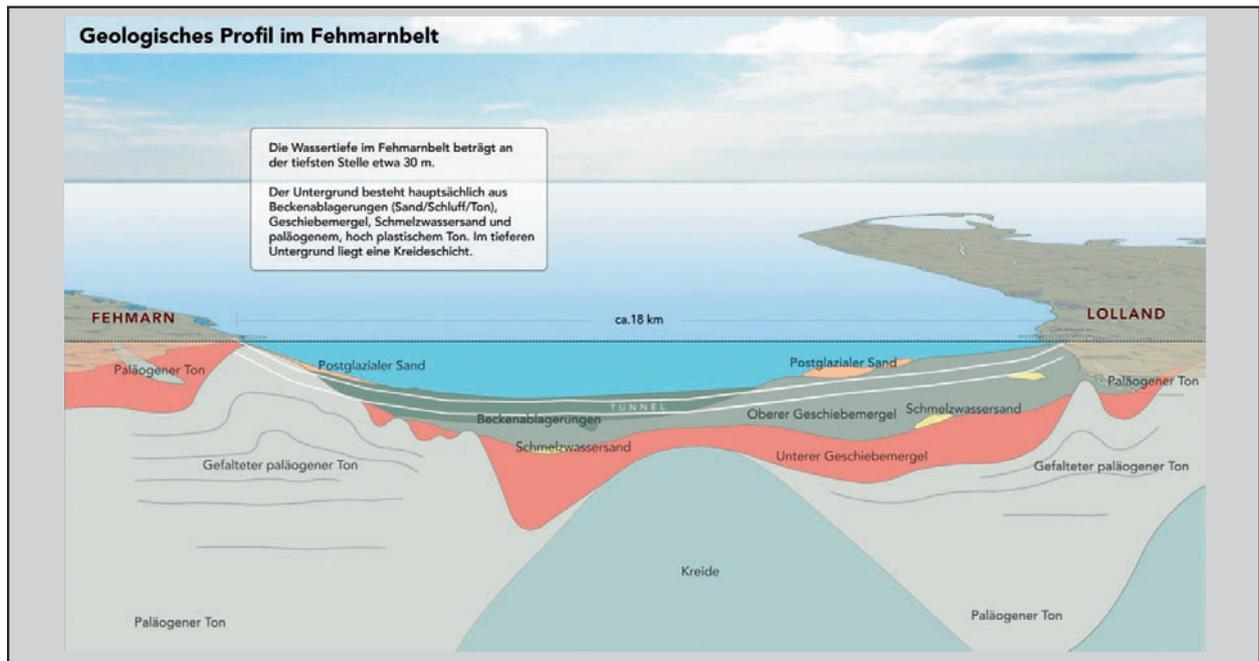
#### 2.2.1 Allgemeines

Der Tunnel hat eine Länge von 18,1 km von Tunnelportal zu Tunnelportal, wovon ein ca. 17,6 km langer Abschnitt als Absenktunnel errichtet werden soll.

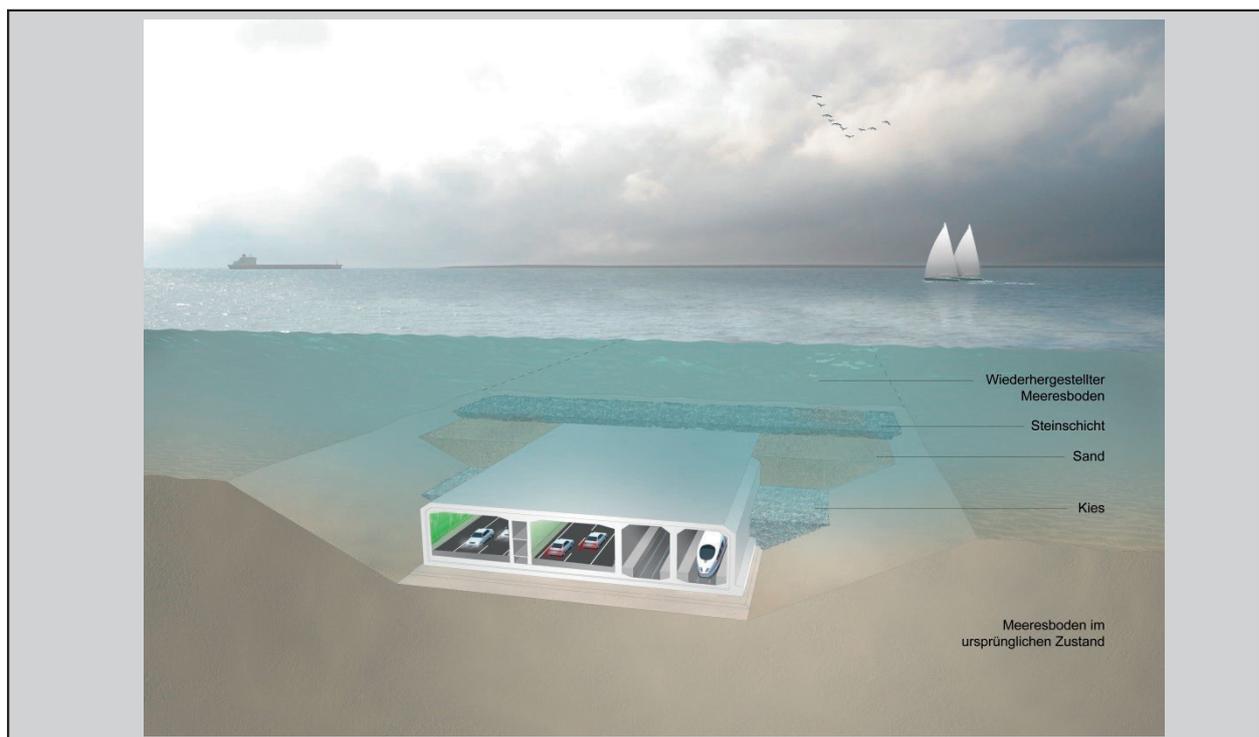
Der Tunnel besteht aus fünf Einzelröhren, zwei Röhren für eine zweigleisige Bahnverbindung auf der Ostseite, zwei Röhren für einen jeweils zweispurigen Straßenquerschnitt mit zusätzlichem Standstreifen auf der Westseite und einer Röhre als Service- und Fluchtröhre zwischen den Straßenröhren (siehe Bild 4).

Der Tunnel ist als Absenktunnel in Stahlbetonbauweise geplant. Die geplante Lebensdauer beträgt 120 Jahre.

Die Tunnelelemente werden in einem Graben unterhalb des Meeresbodens verlegt und durch eine ca. 1,2 m dicke Schutzschicht aus Steinen abgedeckt.



**Bild 3:** Geologisches Längsprofil



**Bild 4:** Absenktunnel

An seiner tiefsten Stelle wird sich die Grabensohle ca. 40 m unter der Meeresoberfläche befinden.

Ein Tunnel dieser Länge führt zu Herausforderungen, die bei den bisherigen Absenktunneln noch nicht aufgetreten sind. Neben einem Sicherheitskonzept, welches der Länge Rechnung trägt, bedarf auch die Versorgung des Tunnels mit Strom, Luft, Löschwasser und Entwässerung neue Konzepte. Bei einem Tunnel von 18 km Länge ist eine zentrale Versorgung von den Portalen allein aus nicht möglich. Da der Tunnelquerschnitt so optimiert ist, dass er vollständig für die reguläre Nutzung gebraucht wird, wurden daher neben den Standardelementen Spezialelemente entwickelt, die Räumlichkeiten außerhalb des normalen Querschnitts für eine dezentrale Unterversorgung bieten. Die Lösung als Absenktunnel erlaubt dafür einen Sprung im Querschnitt, was z. B. bei einem Bohrtunnel nicht möglich ist.

### 2.2.2 Standardelemente

Der Absenktunnel besteht aus 79 Standardelementen. Alle diese Elemente weisen die gleiche geometrische Form auf und werden in einer für diesen Zweck errichteten Produktionsstätte industriell gefertigt (siehe Kapitel 4.3).

Jedes Element weist eine Länge von ca. 217 m, eine Breite von ca. 42 m und eine Höhe von ca. 9 m auf.

Die Straßenröhren haben jeweils eine Breite von 11 m und eine Lichtraumhöhe von 4,7 m. Es sind zwei Fahrstreifen, eine Standspur und Leitwände vorgesehen (siehe Bild 4).

Die Strahlventilatoren sind in speziell ausgebildeten Nischen an der Decke platziert.

Zwischen den Straßenröhren ist eine zentrale Galerie vorgesehen, die als vorübergehende Evakuierungsfläche von einer Röhre in die andere sowie der Aufnahme von Versorgungsleitungen dient.

Die zwei Bahnröhren haben beide eine Breite von ca. 6 m und bieten Platz für jeweils ein Gleis auf einer „Festen Fahrbahn“. Neben den Gleisen sind Fluchtwege und Bereiche für Ausrüstung angeordnet.

### 2.2.3 Spezialelemente

Alle ca. 1,8 km werden insgesamt 10 sogenannte Spezialelemente vorgesehen. Diese Elemente ha-

ben eine Länge von ca. 46 m, eine Breite von ca. 45 m und eine Tiefe von ca. 13 m (siehe Bild 6). Sie werden in einen tiefer ausgehobenen Grabenabschnitt abgesenkt. Das untere Geschoss befindet sich unterhalb der Fahrbahnebene. Der Querschnitt ist zudem aufgeweitet, so dass an der Westseite außerhalb des Standstreifens eine Haltebucht, Treppen und ein Aufzug angeordnet werden können.

Neben den Transformatorenräumen, den Zwischentanks für Abwasser, den Pumpenräumen und Elektroverteilungen befinden sich auch Aufgänge zur Zentralgalerie und den Bahntunnelröhren, um eine Zugänglichkeit aller Tunnelquerschnitte für Wartungszwecke sicherzustellen, ohne dass der laufende Verkehr gequert werden muss.

## 2.3 Bauablauf

### 2.3.1 Grabenaushub

Es sind im großen Umfang Nassbaggerarbeiten notwendig. Den Hauptanteil macht dabei der Aushub des Grabens aus, in den der Absenktunnel verlegt werden soll.

Ein großer Teil des auszuhebenden Bodens besteht aus sehr feinen Bestandteilen in einer festen Konsistenz (siehe Kapitel 2). Hier gilt es ein Bauverfahren zu wählen, welches den festen Boden ausheben kann und zudem möglichst geringe Mengen von Feinstoffen als Sediment freisetzt.

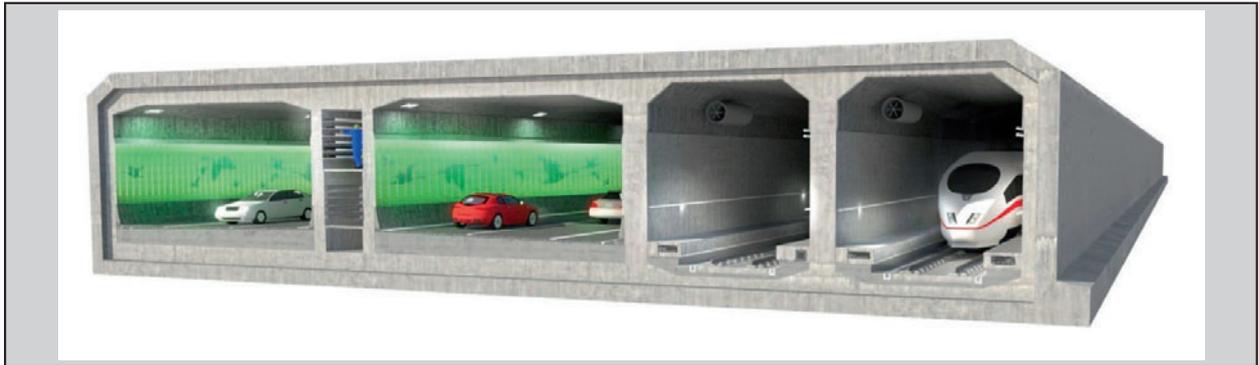
Um dem Genüge zu tun, werden die Aushubarbeiten daher überwiegend mithilfe von auf Stelzenpontons montierten Löffel- und Greifbaggern erfolgen.

### 2.3.2 Landgewinnung

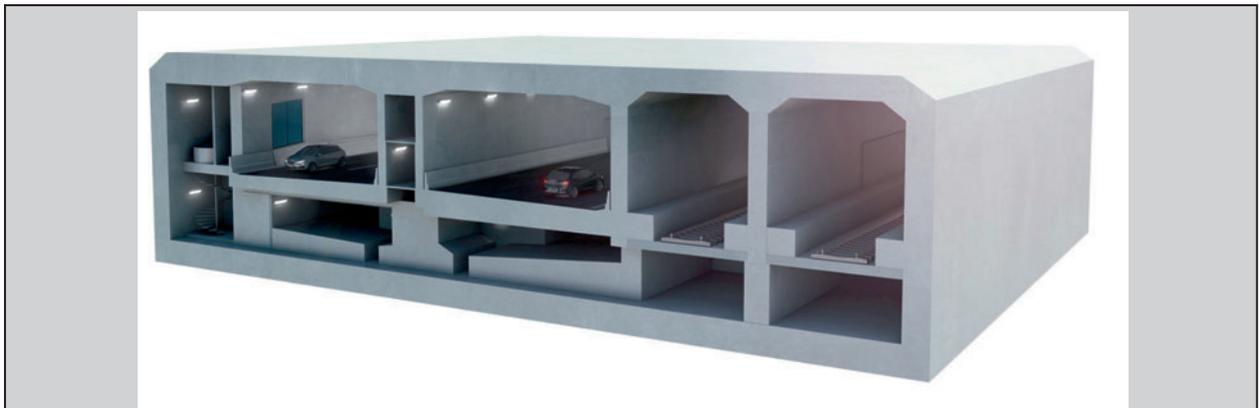
Das Aushubmaterial wird für Landgewinnungszwecke auf Lolland und auf Fehmarn genutzt.

Es sind mehrere Landgewinnungsflächen vorgesehen. Die Landgewinnungsflächen ziehen sich im Strömungsschatten der Molen der Fährhäfen von Puttgarden und Rødbyhavn an der Küste entlang, ohne den Querschnitt im Fehmarnbelt zusätzlich einzuengen (siehe Bild 7).

Diese Flächen werden abschließend naturiert, zum Teil als Feuchtgebiete gestaltet und einer öffentlichen Nutzung zugeführt.



**Bild 5:** Querschnitt Standardelement



**Bild 6:** Querschnitt Spezialelement



**Bild 7:** Landgewinnungsfläche auf Lolland

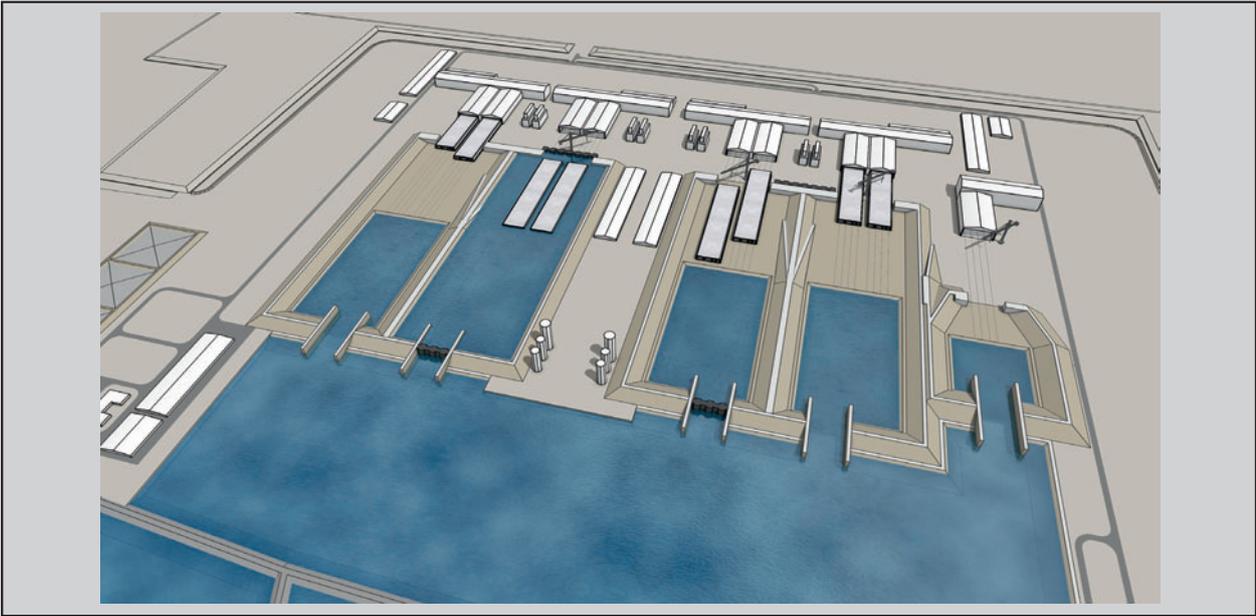
### 2.3.3 Tunnelproduktion

Parallel zum Grabenaushub soll die Produktion der Tunnelelemente in einer zu diesem Zweck errichteten Produktionsanlage auf Lolland erfolgen (siehe Bild 8).

Zum Erreichen einer hohen Fertigungsrate bei gleichzeitiger hoher Ausführungsqualität, ist eine industrielle Fertigung mit acht parallelen Fertigungs-

straßen für die Standardelemente und eine neunte Straße für das Spezialelement vorgesehen. Alle Elemente haben daher die gleiche Geometrie, so dass die Vorteile einer industriellen Produktion voll ausgenutzt werden können.

In jeder Fertigungsstraße werden die Elemente in Segmenten auf Schaltischen bewehrt und als Vollquerschnitt ohne Arbeitsfugen betoniert, um Temperatur- und Schwindspannungen zu minimieren.



**Bild 8:** Produktionsanlage für Tunnelsegmente auf Lolland

Danach wird das Segment im Taktschiebeprozess verschoben und ein weiteres Segment produziert. Nach Erreichen der vollen Elementlänge werden die Segmente untereinander vorgespannt. Das fertige Element kann ausgerüstet und ausgeschwommen werden.

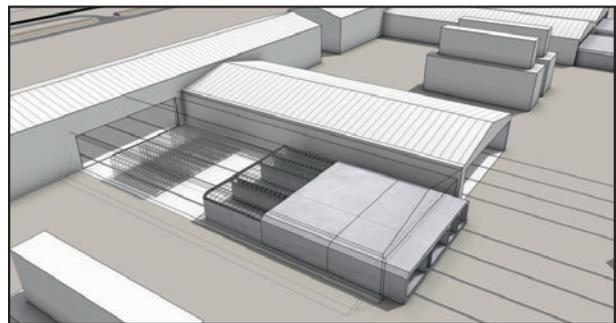
### 2.3.4 Einschwimm- und Absenkvorgang

Sobald der Graben ausgehoben ist, können die Elemente abgesenkt werden. Dafür wird die Grabensohle von Sedimenten befreit und mit einer Bettungsschicht aus Kies versehen. Der Kies wird mit Hilfe von Fallrohren eingebracht und mit hoher Genauigkeit verteilt.

Der eigentliche Absenkvorgang erfolgt durch das Fluten der Ballasttanks innerhalb der Elemente, bis ein Gewicht erreicht wird, welches ein kontrolliertes Absenken mithilfe von Absenkpontons ermöglicht (siehe Bild 10).

### 2.3.5 Grabenverfüllung

Nach Abschluss des Absenkvorgangs und Fixierung der Tunnelsegmente erfolgt die Verfüllung des restlichen Grabens mit Sand. Dabei gilt es zum einen, die Lage des Tunnels nicht zu verändern und zum anderen die Freisetzung von Schwebstoffen möglichst gering zu halten. Abschließend erhält der Tunnel eine Steinschüttung als Schutzschicht.



**Bild 9:** Elementproduktion in einer Produktionshalle

## 3 Genehmigungstechnische Herausforderungen

### 3.1 Allgemeines

Alle Großvorhaben wie die Feste Fehmarnbeltquerung erfordern aufwändige Genehmigungsverfahren [3].

Im Falle der Festen Fehmarnbeltquerung treffen eine Reihe von Faktoren aufeinander, welche den Vorgang besonders komplex werden lassen:

- Als Verbindung zwischen Dänemark und Deutschland sind zwei nationale Genehmigungsverfahren erforderlich.
- Infolge der Querung der Ostsee sind auch internationale Vereinbarungen (Espoo-Konvention,



**Bild 10:** Absenkvorgang eines Elementes auf das Fundamentbett

Helsinki-Konvention) betroffen, die Genehmigungsverfahren erfordern.

- Die Tunneltrasse quert das FFH-Gebiet „Fehmarnbelt“.
- Durch die Kombination einer Straßen- und Bahnverbindung in einem Tunnelbauwerk treffen zwei Vorhaben aufeinander, die in einem gemeinsamen Verfahren genehmigt werden müssen.
- Die Betrachtung der Umweltverträglichkeit wiederum ist nicht auf nationale Grenzen beschränkt. Ein Abgleich der nationalen Umweltuntersuchungen ist daher notwendig.

### 3.2 Genehmigung in Deutschland

Die Genehmigung in Deutschland erfolgt über ein Planfeststellungsverfahren. In diesem Zusammenhang wurden umfangreiche Umweltuntersuchungen vorgenommen und die Auswirkungen aus Bau und Betrieb der Festen Fehmarnbeltquerung auf die Umwelt ermittelt, wo möglich vermieden oder reduziert, und wo nicht völlig vermeidbar, durch umweltverbessernde Maßnahmen kompensiert.

Im Sommer 2014 wurden die Planfeststellungsunterlagen erstmalig eingereicht und ausgelegt (siehe Bild 11).

Im Rahmen der Öffentlichkeitsbeteiligung wurden daraufhin 3.100 Einwendungen eingereicht, die bewertet, erwidert und erörtert wurden.

Berechtigte Hinweise wurden in einer Neuauslegung, die im Sommer 2016 erfolgte, berücksichtigt. Die Neuauslegung resultierte zudem aus neuen gesetzlichen Auflagen und Änderungen in der Planung.



**Bild 11:** Einreichung Planfeststellungsunterlagen

Auch für die Zweitauslegung mit nun 13.600 Einwendungen erfolgte eine Öffentlichkeitsbeteiligung, die im Herbst 2017 abgeschlossen wurde und Ende 2018 zu einem Planfeststellungsbeschluss führen soll.

### 3.3 Genehmigung in Dänemark

In Dänemark werden große Eisenbahn- und Straßenbauprojekte traditionell per Gesetz vom Parlament, dem Folketing, genehmigt/5/.

Das dänische Parlament hat im März 2009 ein Planungsgesetz verabschiedet, mit dem der zwischen den Verkehrsministern der beiden Staaten vereinbarte Staatsvertrag ratifiziert wurde. Dieses Planungsgesetz bildet zugleich die Grundlage für die Vorbereitungen des Projekts, darunter auch der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP).

Die Anhörung zur Umweltverträglichkeitsstudie fand bereits im 3. Quartal 2013 in Rødbyhavn statt. Im Rahmen der Anhörung gingen von dänischen Behörden, Unternehmen und Bürgern insgesamt 42 Stellungnahmen ein.

Auf Basis der Unterlagen wurde im April 2015 im Folketing das Baugesetz verabschiedet, welches die endgültige umweltrechtliche Genehmigung des Vorhabens in Dänemark darstellt.

## 4 Aktueller Stand und Ausblick

Da die Ausschreibungen bereits erfolgt sind, kann der Baubeginn direkt nach dem Planfeststellungsbeschluss auf deutscher Seite erfolgen. Für den Tunnel und die landseitigen Anschlussarbeiten wur-

de das Konsortium Femern Link Contractors (FLC), bestehend aus

- **Unternehmen**

- VINCI Construction Grands Projets S.A.S. (Frankreich)
- Per Aarsleff Holding A/S (Dänemark)
- Wayss & Freytag Ingenieurbau AG (Deutschland)
- Max Bögl Stiftung & Co. KG (Deutschland)
- CFE SA (Belgien)
- Solétanche-Bachy International S.A.S. (Frankreich)
- BAM Infra B.V. (Niederlande)
- BAM International B.V. (Niederlande)

Subunternehmer:

- Dredging International N.V. (Belgien)

- **Berater**

- COWI A/S (Dänemark)

beauftragt.

Für die Nassbaggerarbeiten ist das Konsortium Fehmarn Belt Contractors (FBC) beauftragt, bestehend aus

- **Unternehmen**

- Boskalis International B.V. (Niederlande)
- HOCHTIEF Solutions AG (Deutschland)\*
- Ed. Züblin AG (Deutschland)\*
- Van Oord Dredging and Marine Contractors B.V. (Niederlande)

- **Berater**

- SWECO Danmark A/S (Dänemark)

Im Jahre 2028 soll die Feste Fehmarnbeltquerung fertiggestellt werden.

## Literatur

- /1/ MORGEN, K.; HILGENSTOCK, F.: Aktueller Planungsstand der festen Fehmarnbeltquerung - ein 18 km langer Unterwassertunnel. In: Bautechnik 98 (2012), Heft 7, S. 492-501.
- /2/ Europäische Kommission: Trans-European Transport Network TENTEC. <http://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/site/en/maps.html>, 2015-07-10.
- /3/ MORGEN, K.; HILGENSTOCK, F.: Die Feste Fehmarnbeltquerung. In: Jahresausgabe VDI-Bautechnik 2015/2016 der Fachzeitschrift „Bauingenieur“, S. 41–46.
- /4/ Femern A/S: Konsolidierter technischer Bericht. Kopenhagen, 2011.
- /5/ Femern A/S: Genehmigung in Dänemark. [www.femern.de](http://www.femern.de).
- /6/ MORGEN, K.; HILGENSTOCK, F.: Fehmarn-Belt-Fixed-Link, ein 18 km langer Unterwassertunnel, In: Münchner Tunnelbausymposium, 2016

## Quelle Bilder

alle Darstellungen: Femern A/S, wenn nicht anders vermerkt.

## Autoren

Dipl.-Ing. Friedrich Hilgenstock  
WTM Engineers International GmbH  
[f.hilgenstock@wtm-international.de](mailto:f.hilgenstock@wtm-international.de)

Dr.-Ing. Karl Morgen  
WTM Engineers GmbH  
[k.morgen@wtm-hh.de](mailto:k.morgen@wtm-hh.de)

Johannisbollwerk 6-8  
20459 Hamburg  
[www.wtm-engineers.com](http://www.wtm-engineers.com)

B. Kohl, O. Senekowitsch  
 ILF Consulting Engineers,  
 Linz, Austria

## Risikobewertung unterschiedlicher Längslüftungsstrategien bei Bränden in Richtungsverkehrstunneln mit Verkehrsstau

### Zusammenfassung

Die Vorliegende Studie untersucht die Wirkung unterschiedlicher Längslüftungsstrategien auf die Personensicherheit bei Tunnelbränden in Richtungsverkehrstunneln während eines Verkehrsstaus. Dazu wird anhand des österreichischen Tunnelrisikomodels TuRisMo das Schadensausmaß eines 30 MW Brandes in einem 1.200 m langen Modelltunnel analysiert. Die Ergebnisse bestätigen die Anwendung gängiger Längslüftungsstrategien (Lüftung mit kritischer Geschwindigkeit bei frei fließendem Verkehr bzw. Lüftung mit verminderter Geschwindigkeit bei stockendem Verkehr). Zusätzlich konnte aufgezeigt werden, dass alternative Lüftungsstrategien bei besonderen Parameterkonstellationen (lange Tunnel, langer Notausgangsabstand, Vollstau) eine deutliche Reduktion des vergleichsweise hohen Schadensausmaßes bei Tunnelbränden während eines Verkehrsstaus bewirken können.

## 1 Einleitung

Richtungsverkehrstunnel (RV-Tunnel) haben im Vergleich zu Straßentunneln, die im Gegenverkehr (GV-Tunnel) betrieben werden, wesentliche sicherheitstechnische Vorteile. Insbesondere weisen Kollisionen und Brände in Richtungsverkehrstunneln ein erheblich geringeres Schadensausmaß (Anzahl der Todesopfer / Ereignis) auf als vergleichbare Ereignisse in Straßentunneln mit Gegenverkehr. Das geringere Kollisionsrisiko ergibt sich hauptsächlich aus den niedrigeren Relativgeschwindigkeiten. Im Fall eines Brandes können in einem Richtungsverkehrstunnel mit Längslüftung die stromabwärts befindlichen Fahrzeuge den Tunnel verlassen, während der Bereich stromaufwärts des Brandortes mittels Tunnellüftung rauchfrei gehalten werden kann. Die Insassen von Fahrzeugen, die vor dem Brandort anhalten, können sich somit ohne unmittelbare Ge-

fährdung in Sicherheit bringen. In der Regel kann dies durch ausreichend hohe Längsströmungsgeschwindigkeiten, (Längsströmungsgeschwindigkeiten über der kritischen Geschwindigkeit) erreicht werden, wodurch verhindert wird, dass Rauch in Abschnitte mit flüchtenden Personen eindringen kann (Vermeidung von Back-Layering). Folglich orientieren sich Strategien zur Lüftung im Ereignisfall in Richtungsverkehrstunneln bei fließendem Verkehr üblicherweise an der kritischen Geschwindigkeit für den definierten Bemessungsbrand.

Wenn es in Richtungsverkehrstunneln zu Stau kommt, ändern sich jedoch die Voraussetzungen im Brandfall grundsätzlich. Personen, die sich stromabwärts des Brandortes befinden, sind möglicherweise nicht in der Lage, den Tunnel in ihren Fahrzeugen zu verlassen und müssen daher ihre Fahrzeuge verlassen und sich selbst zu Fuß über die Notausgänge in Sicherheit bringen. Daher muss die übliche Lüftungsstrategie für den Brandfall für Richtungsverkehrstunnel mit Längslüftung bei häufigem Auftreten von Stausituationen überdacht werden.

Diese prinzipiellen Überlegungen spiegeln sich auch in den Regelwerken zur Lüftungsplanung bei Verkehrsstau oder regelmäßig hohem Verkehrsaufkommen in Richtungsverkehrstunneln wider. Die Regelungen in der RABT für die Lüftung in Richtungsverkehrstunneln im Ereignisfall unterscheiden beispielsweise explizit zwischen den Verkehrszuständen „Fließender Verkehr“ – und „Stau“. Im Fließverkehr ist mindestens die kritische Geschwindigkeit einzuhalten (ca. 2,5 – 3 m/s in Abhängigkeit von Querschnittsfaktoren, der Längsneigung und der Bemessungsbrandleistung), um eine Rauchausbreitung entgegen der Strömungsrichtung zu verhindern. Für Brandereignisse bei Verkehrsstau wird diese vorgeschriebene Geschwindigkeit jedoch auf 1,0 – 1,5 m/s reduziert, um eine Rauchschichtung möglichst nicht zu zerstören und die Chancen für eine Selbstrettung zu erhöhen. Für Tunnel mit einer Länge von mehr als 1.200 m ist bei regelmäßiger Staubildungsgefahr zudem ein Rauchabsaugungssystem vorzusehen [1].

Österreichische Vorschriften unterscheiden im Vergleich dazu nicht zwischen unterschiedlichen Verkehrszuständen. Für RV-Tunnel mit einer Länge von mehr als 500 m muss eine Mindestströmungsgeschwindigkeit von 1,5 – 2 m/s erreicht werden [2]. Für RV-Tunnel mit einer Länge von mehr als 1.500 m muss zudem ein verpflichtendes Rauchabsau-

gungssystem installiert werden, wenn regelmäßig mit sehr dichtem Verkehrsaufkommen oder Staubildung zu rechnen ist.

Im Staufall und bei besonders hohen Verkehrsdichten ähneln die Zustände in einem Richtungsverkehrstunnel, die während eines Brandes hinsichtlich der Personenrettung herrschen, jenen in Gegenverkehrstunneln. Ein spezifisches Problem bei Bränden in Gegenverkehrstunneln ist die Exposition von Personen auf beiden Seiten des Brandes. Zwei zusätzliche, vor allem im asiatischen Raum, insbesondere in Japan, angewendete Längslüftungsstrategien für Gegenverkehrstunnel sind die sogenannten Zero-Flow- bzw. die Shut-Down-Strategie. Bei Anwendung der Zero-Flow-Strategie werden die Strahlventilatoren genutzt, um die Strömungsgeschwindigkeit in der Nähe des Brandortes möglichst rasch und gleichmäßig auf null zu reduzieren und damit den Brandrauch auf einen kleineren aber um den Brandort symmetrischen Bereich zu konzentrieren. Vorangegangene Studien haben gezeigt, dass insbesondere die Zero-Flow-Strategie Vorteile für die Selbstrettung bringen kann, weil dadurch die Rauchausbreitungsgeschwindigkeit reduziert werden kann, wodurch mehr Zeit für eine Selbstrettung unter günstigen Bedingungen zur Verfügung steht [3]. Die vorliegende Studie befasst sich daher mit der Frage, ob bzw. unter welchen Umständen diese aus Gegenverkehrstunneln bekannten Lüftungsstrategien auf Richtungsverkehrstunnel übertragbar sind und wie sich die in Europa gebräuchlicheren Zielgeschwindigkeiten zu den in Japan verwendeten Strategien verhalten.

Konkret werden die Auswirkungen fünf unterschiedlicher Längslüftungsstrategien auf das zu erwartende Schadensmaß während eines Tunnelbrandes anhand der quantitativen Analyse eines Modelltunnels untersucht. Diese fünf generischen Lüftungsstrategien werden im Folgenden verbal erläutert.

#### **Lüftung mit hoher Geschwindigkeit**

„Die Strömungsgeschwindigkeit muss hoch genug sein, um die Rauchgase in den verrauchten Bereichen hinreichend zu verdünnen“. Es ist klar, dass es immer eine Längslüftungsgeschwindigkeit geben muss, bei der die Verdünnung der Rauchgase ausreichend hoch ist, um eine Gefährdung der flüchtenden Personen auf ein unkritisches Niveau zu reduzieren. In der vorliegenden Studie wird dies in Form einer Zielgeschwindigkeit der Längsströmung im Brandfall von 6 m/s untersucht. Es ist anzumerken,

dass die Untersuchung derart hoher Längsströmungsgeschwindigkeiten, vor allem im Staufall, theoretischen Charakter hat, da Längslüftungssysteme entsprechend den Anforderungen des Regelwerks nur auf das Erreichen der kritischen Geschwindigkeit im Bemessungsbrandfall unter bestimmten vordefinierten Bedingungen ausgelegt sind. Da bei den Bemessungsannahmen im Zuge der Lüftungslegung jedoch von einer Überlagerung mehrerer ungünstiger Parameter ausgegangen wird, besteht im Ereignisfall häufig eine gewisse Reserve, da es sehr unwahrscheinlich ist, dass diese Parameter in diesem Fall alle gleichzeitig eintreten.

#### **Lüftung mit kritischer Geschwindigkeit**

„Die Strömungsgeschwindigkeit muss ein Backlayering verhindern.“ In der vorliegenden Studie wird diese Methode durch die Annahme einer kritischen Geschwindigkeit von 3 m/s dargestellt.

#### **Lüftung mit geringer Geschwindigkeit**

„Die Strömungsgeschwindigkeit muss im Bereich eines vorgegebenen Zielwertes liegen, der geringer ist als die kritische Geschwindigkeit.“ Es wird ein Backlayering in begrenztem Umfang in Kauf genommen, dafür breitet sich jedoch der Rauchstromabwärts des Brandes weniger rasch aus als dies bei Lüftung mit kritischer Geschwindigkeit der Fall wäre. In der vorliegenden Studie wird diese Methode durch eine Zielströmungsgeschwindigkeit von 1,25 m/s dargestellt.

#### **Zero-Flow-Lüftung**

„Die Luftgeschwindigkeit wird so weit wie möglich auf Null geregelt.“ Durch gezielte Regelung der Lüftung wird die Geschwindigkeit der Rauchausbreitung minimiert und eine symmetrische Rauchausbreitung begünstigt. Es kommt daher jedoch auch stromauf des Brandes zu einer signifikanten Verrauchung.

#### **Shut-Down-Lüftung:**

„Alle Ventilatoren werden abgeschaltet.“ Die resultierende Bewegung von Luft und Rauch wird von den vorherrschenden Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel verbleibender Verkehrsfluss, Brandrauchauftrieb im Tunnelinneren bzw. Druckverhältnisse an den Tunnelportalen, bestimmt.

Die Studie konzentriert sich auf die quantitative Analyse der Auswirkungen dieser fünf Lüftungsstrategien auf die Gefährdung der Tunnelnutzer durch Tunnelbrände. Direkte Vergleiche werden für eine

Reihe von Verkehrszuständen und geometrischen Eigenschaften des Tunnels (Fluchtwegabstand und Tunnellänge) gezogen. Dazu wird das österreichische Tunnelrisikomodell TuRisMo 2 [4] auf einen konkreten Modelltunnel angewendet. Der Risikobewertungsprozess wird im folgenden Abschnitt zusammengefasst. Der gewählte Modelltunnel sowie die berücksichtigten Szenarien werden in Abschnitt 3 definiert und die Ergebnisse in Kapitel 4 vorgestellt.

## 2 Bewertungsmethode

Die österreichische Methode zur Risikobewertung von Straßentunneln basiert auf einem ganzheitlichen Ansatz, der eine detaillierte Bewertung vieler verschiedener Sicherheitsmaßnahmen und eine Analyse der Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Sicherheitsmaßnahmen erlaubt. Faktoren wie vorhandene Ausrüstung und vorherrschende Rahmenbedingungen (wie zum Beispiel Verkehrszustände) werden dabei spezifisch berücksichtigt. Die Methode kombiniert eine quantitative Häufigkeitsanalyse, basierend auf statistischen Auswertungen, und eine quantitative Schadensausmaßanalyse, die

- den rein kollisionsbedingten (mechanischen) Risikoanteil sowie
- ein getrenntes Brandmodell umfasst.

Bild 1 zeigt eine Grafik der Gesamtstruktur des Modells. Details der verschiedenen Teilmodelle sind in [3], [4] und [5] zu finden und werden hier nicht näher erläutert.

Das in der Untersuchung der Strategien zur Lüftung im Ereignisfall verwendete Schadensausmaßmodell für Brand kann wie folgt zusammengefasst werden: Jedes einzelne Brandszenario wird explizit in einem Ereignisbaum berücksichtigt. Eine Reihe von Detailszenarien mit unterschiedlichen lokalen Parametern wird dann auf Basis der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Einflussparameter generiert. Für jedes dieser detaillierten Brandszenarien wird eine instationäre eindimensionale Strömungssimulation durchgeführt, in der alle wichtigen Einflussfaktoren wie Verkehrsaufkommen, Brandort, Lüftungskonzept und meteorologische Rahmenbedingungen berücksichtigt werden.

Die prognostizierte Entwicklung von Längsströmungsgeschwindigkeiten wird dann als Rahmen-

bedingung in einer 3D-CFD-Simulation (Simulationsprogramm FDS – Fire Dynamic Simulator) implementiert, in welcher lokale Auswirkungen wie Backlayering und Rauchentwicklung untersucht werden. Sichtverhältnisse, Wärme- und Schadstoffkonzentrationen aus der 3D-CFD-Simulation werden dann mit der Personenverteilung gemäß Verkehrszustand überlagert. Basierend auf einem Akkumulierungs- und Intoxikationsmodells, das die Auswirkungen von Brandgefahren auf Fluchtgeschwindigkeit und Überlebenswahrscheinlichkeit von Personen beschreibt [6], wird die Gesamtanzahl der zu erwartenden Todesfälle berechnet. Der gesamte Vorgang wiederholt sich dann für die weiteren Detailszenarien.

Der grundsätzliche Ansatz des österreichischen Tunnelrisikomodells ist der deutschen Methode ähnlich. Da für die Untersuchung ein für deutsche Gegebenheiten passender Modelltunnel gewählt wurde, kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse grundsätzlich auch für deutsche Verhältnisse aussagekräftig sind.

## 3 Modelltunnel und Szenariopezifikation

Als Modelltunnel wird ein 1.200m langer Richtungsverkehrstunnel mit generischem Längsprofil verwendet. Die longitudinale Topologie des Tunnels ist in Bild 2 dargestellt. Der Tunnel ist mit einem Längslüftungssystem bestehend aus acht Strahlventilatoren ausgestattet. Es wird von einem durchschnittlichen täglichen Verkehrsaufkommen von 35.000 Fahrzeugen ausgegangen. Die entsprechenden Eingangparameter sind in Tabelle 1 angegeben.

Die verschiedenen Strategien zur Lüftungssteuerung im Ereignisfall und die damit verbundenen Zielströmungsgeschwindigkeiten sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Das Ergebnis der Zielvorgaben ist anhand der zeitlichen Entwicklung der Längsströmungsgeschwindigkeiten in Bild 3 dargestellt. Die dargestellten Geschwindigkeitsverläufe stammen aus den instationären 1D-Berechnungen eines 30 MW Brandes in oben definiertem Modelltunnel bei Vollstau.

Der Relativvergleich der fünf Längslüftungsstrategien wird durch Anwendung der Schadensausmaßanalyse gemäß Kapitel 2 für drei Verkehrszustände (Vollstau-, Stop-and-Go- und Fließverkehr) durch-

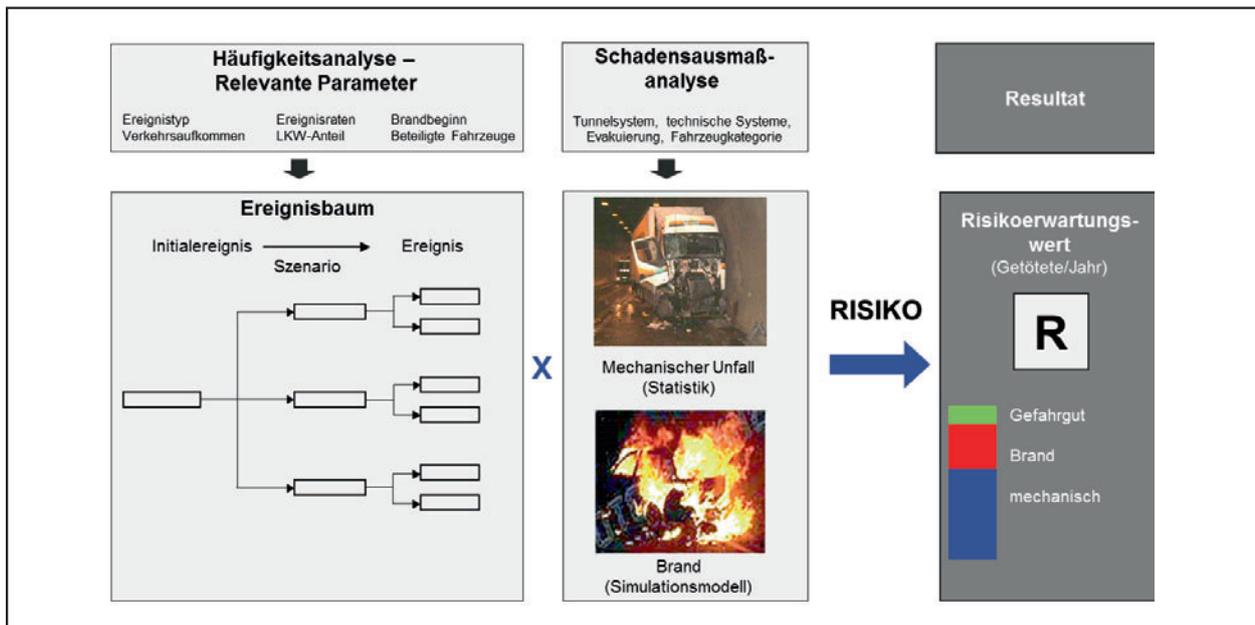


Bild 1: Basisstruktur des österreichischen Tunnelrisikomodells

geführt. Wie erste Berechnungen gezeigt haben hängt die Wirkung der untersuchten Lüftungsstrategien auf das Risiko der Tunnelnutzer nicht nur vom herrschenden Verkehrszustand sondern auch von Tunnellänge und Notausgangsabstand ab. Um den möglichen Einfluss der geometrischen Parameter zu untersuchen und den Geltungsbereich der einzelnen Lüftungsstrategien besser eingrenzen zu können, werden zusätzlich zum Verkehrszustand auch diese baulichen Tunnelparameter variiert. Im Speziellen werden die untersuchten Längslüftungsstrategien für insgesamt neun Kombinationen aus drei Verkehrszuständen und drei Modelltunnelvarianten verglichen, siehe Tabelle 3 und Tabelle 4. (Anmerkung: der dritte Modelltunnel wurde nicht aus praktischen Überlegungen sondern aus untersuchungstechnischen Erwägungen gewählt, um bestimmte Phänomene besser analysieren und darstellen zu können)

## 4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die ermittelten Schadensausmaßwerte für alle 9 definierten Kombinationen aus Verkehrszustand und Modelltunnelvariante erläutert. Das Hauptaugenmerk der Studie liegt auf dem Vergleich der Leistungsfähigkeit der fünf betrachteten Lüftungsstrategien im Ereignisfall. Auf die absoluten Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Szenarien wird in dieser Studie nicht eingegangen.

Bild 4 zeigt die zu erwartenden Schadensausmaßwerte der betrachteten Lüftungsstrategien bei einem 30-MW-Tunnelbrand, für unterschiedliche Kombinationen aus Verkehrsszenario und Modelltunnelvariante. Zur besseren Vergleichbarkeit, wurde eine einheitliche Skala (0 bis 120) für die durchschnittlichen Schadensausmaßwerte aller Szenarien gewählt. Zudem wurde für Szenario  $n$  mit sehr geringen Schadensausmaßwerten Diagramme mit kleineren Skalen inkludiert.

Besondere Beachtung darf dem Ergebnis der Brandrauchlüftung mit einer Zielgeschwindigkeit von 6.0 m/s geschenkt werden. Es zeigt sich, dass selbst bei großen Notausgangsabständen, langen Tunneln und gestautem Verkehr, das zu erwartende Schadensausmaß durch einen 30MW Brand auf unter 1 Todesopfer pro Ereignis reduziert werden kann. Unter Berücksichtigung der im österreichischen Tunnelrisikomodell hinterlegten Rahmenbedingungen bzgl. Schadstoffquellraten, Brandwachstumskurve und Evakuierungsparameter, reicht eine Längsströmungsgeschwindigkeit von 6.0 m/s offensichtlich aus, um eine Gefährdung von Personen stromabwärts des Brandes auf ein Maß zu reduzieren, so dass die Selbstrettung von Personen praktisch in allen Fällen sichergestellt werden kann.

Das zu erwartende Schadensausmaß im Brandfall steigt mit zunehmender Verkehrsstärke bzw. Staudichte an. Dieses intuitiv verständliche Ergebnis trifft

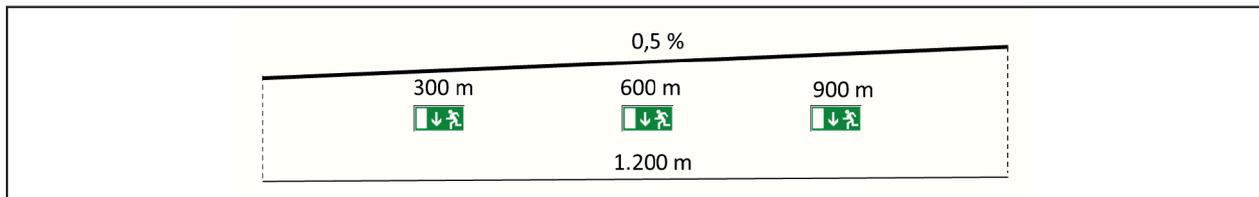


Bild 2: Längsprofil des Modelltunnels

Tunnelsystem	Richtungsverkehrstunnel mit zwei Fahrstreifen
Tunnellänge	1.200 m
Notausgänge	3 (300 m, 600 m, 900 m)
Längsgefälle	0,5 %
Tunnelquerschnitt	Gewölbe, 49,2 m <sup>2</sup>
Maximal zulässige Verkehrsgeschwindigkeit	80 km/h
Durchschnittliches Verkehrsaufkommen	35.000 Fahrzeuge/Tag
Verkehrsmix	85,0 % Personenkraftwagen 14,5 % Lastkraftwagen (Lkw) 0,5 % Busse
Verkehrszustände	Fließender Verkehr, Stop-and-Go- und Vollstau
Lüftungssystem	Längslüftung (8 Strahlventilatoren, Schub = 2025 ± 10 % N, Durchmesser = 1,2 m)

Tab. 1: Modelltunnel – relevante Parameter

Strategie zur Lüftungssteuerung im Ereignisfall	Zielströmungsgeschwindigkeit
Lüftung mit hoher Geschwindigkeit	6,0 m/s
Lüftung mit kritischer Geschwindigkeit	3,0 m/s
Lüftung mit geringer Geschwindigkeit	1,25 m/s
Shut-Down-Lüftung	Abschaltung der Strahlventilatoren nach Branddetektion
Zero-Flow-Lüftung	0 m/s

Tab. 2: Strategien zur Lüftungssteuerung im Ereignisfall

im Allgemeinen auf alle betrachteten Lüftungsstrategien zu.

Auch ein vergrößerter Notausgangsabstand führt bei allen betrachteten Verkehrszuständen zu einer Erhöhung des Schadensausmaßes, wobei der Anstieg des Schadensausmaßes für die Zero-Flow-Strategie am geringsten ist.

Für das Verkehrsszenario Vollstau führt eine Verlängerung des Modelltunnels zu einer Erhöhung des zu erwartenden Schadensausmaßes. Diese Erhöhung ist für die Strategien 3,0 m/s, 1,25 m/s und Shut-Down wiederum wesentlich größer als für die Zero-Flow-Strategie.

Für Stop-And-Go Verkehr sowie frei fließenden Verkehr kann diese Aussage nicht allgemein getroffen werden. Im Falle der Zero-Flow-Strategie bei Stop-And-Go Verkehr, sowie der Zero-Flow-, Shut-Down-,

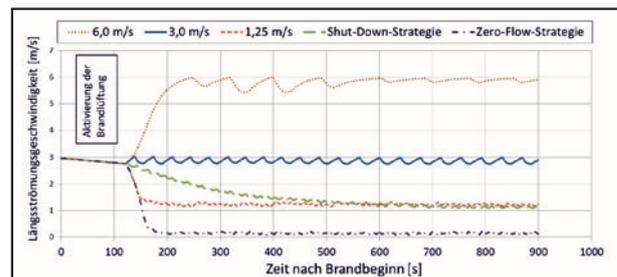


Bild 3: Entwicklung der Längsströmungsgeschwindigkeiten für einen 30 MW Brand

und 1,25 m/s – Strategien bei frei fließendem Verkehr sinkt das Schadensausmaß geringfügig bei einer Verlängerung des Tunnels. Detailanalysen dieser Szenarien zeigen, dass die höhere Trägheit des längeren Tunnels sowie höhere initiale Strömungsgeschwindigkeiten vor Brandbeginn das anfängliche Back-Layering reduzieren und daher zu geringeren Schadensausmaßwerten bei einer Verlängerung des Tunnels führen.

Verkehrsszenario	Brandgröße	Durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]	Verkehrsdichte [Fahrzeuge/m]
Vollstauverkehr	30 MW	5	0,192
Stop-and-Go-Verkehr	30 MW	15	0,120
Fließverkehr	30 MW	80	0,028

Tab. 3: Untersuchte Verkehrsszenarien

Variante	Gesamtlänge	Notausgangs-abstand
1,2 km – 300 m	1,2 km	300 m
1,2 km – 600 m	1,2 km	600 m
2,4 km – 600 m	2,4 km	600 m

Tab. 4: Untersuchte Modelltunnelvarianten

In Bezug auf den Relativvergleich der Lüftungsstrategien zeigt sich, dass konventionelle Lüftungsstrategien wie Lüftung mit kritischer Geschwindigkeit im Fall von Brandereignissen bei zuvor frei fließendem Verkehr wie zu erwarten die größte Sicherheitsleistung erzielen.

Dieser Performancevorteil relativiert sich bei zunehmender Staudichte (6,0 m/s ausgenommen). Für Stop-And-Go Verkehr, also Stauszenarien mit hinreichend hohen mittleren Fahrgeschwindigkeiten stromabwärts des Brandes, kann eine Längslüftung mit geringer Geschwindigkeit (1,25 m/s) die Rauchausbreitung stromaufwärts des Brandes verzögern und dabei gleichzeitig die Gefährdung von Personen stromabwärts des Brandes, aufgrund der verbleibenden Fahrgeschwindigkeit, gering halten.

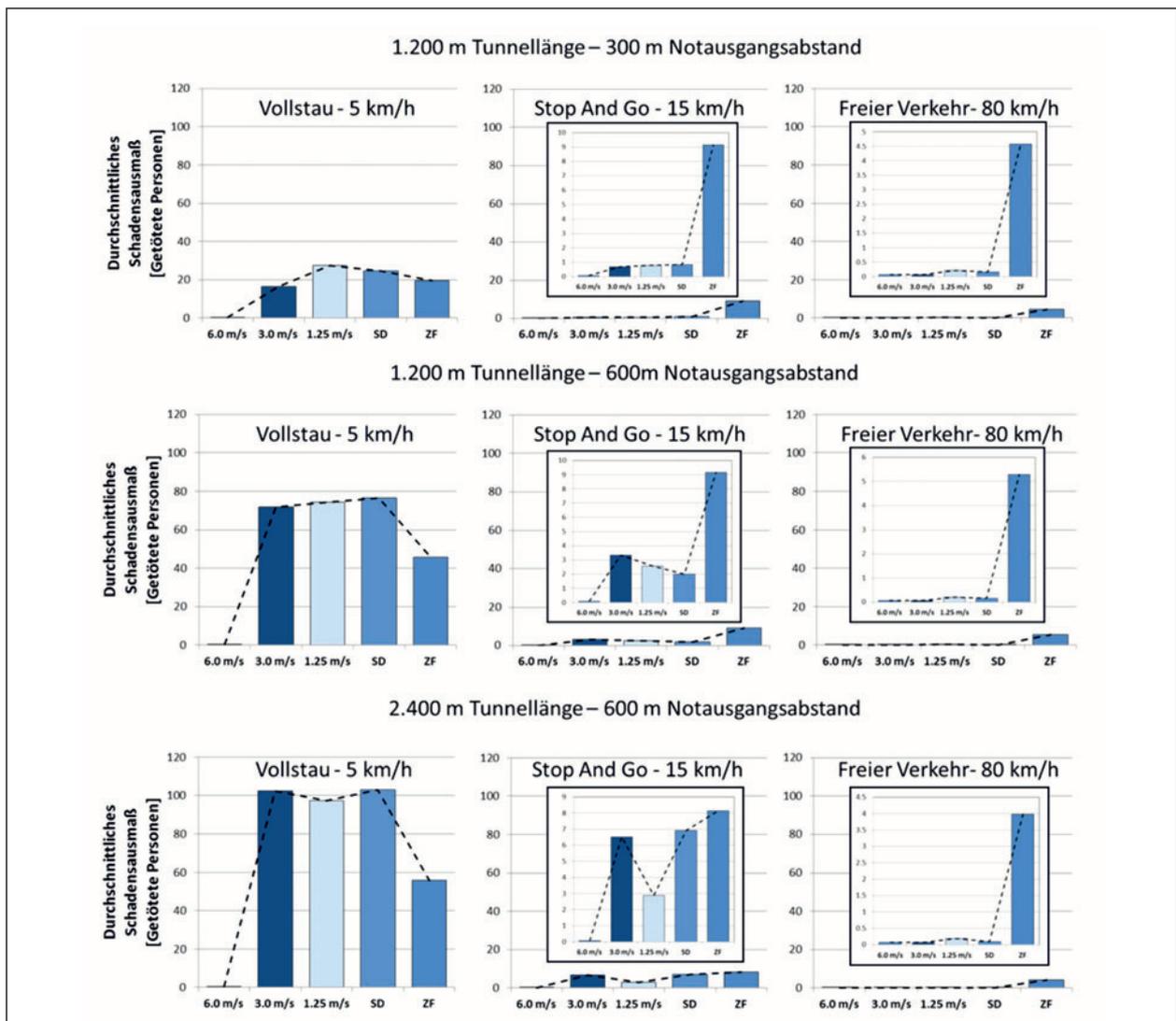
Bei sehr geringen mittleren Fahrgeschwindigkeiten bzw. Vollstau entfällt aber dieser Vorteil der Längslüftung mit geringer Geschwindigkeit. Besonders Tunnel mit vergleichsweise großen Notausgangs-abständen bzw. Gesamtlängen bergen daher die Gefahr sehr hoher Opferzahlen im Brandfall. Für derartige Konstellationen kann die aktive Bremsung der Längsströmung und damit verbundene minimale aber symmetrische Ausbreitung des Brandrauches, zu einer deutlichen Verringerung des Schadensausmaßes pro Brand führen. Insbesondere führt die Zero-Flow-Strategie, im Falle eines Vollstaus, bei einer Modelltunnellänge von 1,2 km und einem Notausgangsabstand von 600 m, zu einer ca. 30 %-Reduktion des Schadensausmaß im Vergleich zur Lüftung mit kritischer oder geringer Geschwindigkeit. Diese Reduktion steigt auf ca. 50 % für die 2.4 km lange Modelltunnelvariante.

## 5 Diskussion

Anhand des österreichischen Tunnelrisikomodells wurden fünf generische Längslüftungsstrategien auf ihre Wirksamkeit im Brandfall bei unterschiedlichen Verkehrsszenarien untersucht. Für frei fließenden Verkehr führt die üblicherweise verwendete Lüftung mit kritischer Geschwindigkeit bzw. Geschwindigkeiten darüber, zur größtmöglichen Sicherheit für die Verkehrsteilnehmer.

Aus theoretischen Überlegungen heraus ist klar, dass es immer eine hinreichend hohe Längsströmungsgeschwindigkeit gibt, ab der die Verdünnung des Brandrauches ausreicht, um ein Gefährdung von Personen stromabwärts des Brandes zu verhindern. Für den betrachteten Modelltunnel wird der notwendige Grad der Verdünnung mit einer Längsströmungsgeschwindigkeit von 6 m/s erreicht. Im Allgemeinen hängt die dafür notwendige Längsströmungsgeschwindigkeit vom Tunnelquerschnitt, den Quellraten, der Brandrauchzusammensetzung und dem Notausgangsabstand ab und ist daher spezifisch für den betrachteten Tunnel bzw. ein spezielles Brandereignis. Zusätzlich müsste das Längslüftungssystem auf derart hohe Strömungsgeschwindigkeiten, insbesondere im Staufall, ausgelegt werden. Außerdem ist anzumerken, dass der Einfluss derart hoher Längsströmungsgeschwindigkeiten auf das Brandanwachsenverhalten nicht vernachlässigt werden sollte [7]. Dieser Effekt eines beschleunigten Brandwachstums wurde in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

Ist die notwendige Längsströmungsgeschwindigkeit nicht bekannt bzw. kann diese aufgrund der Dimensionierung des Längslüftungssystems nicht erreicht werden, verbleiben die Lüftung mit geringer Geschwindigkeit für Stop-And-Go Szenarien sowie Zero-Flow-Lüftung für Vollstau als die günstigsten Lüftungsstrategien. Ebenfalls nicht berücksichtigt wurde der Einfluss sehr geringer Zustrom-Geschwindigkeiten auf die Vollständigkeit der Verbrennung und die damit möglicherweise verbundene Erhöhung des Kohlenmonoxid-Anteils am



**Bild 4:** Schadensausmaßwerte der Längslüftungsstrategien für unterschiedliche Kombinationen aus Verkehrszustand und Modell-tunnelgeometrie

Brandrauch bei der Shut-down bzw. der Zero-flow Strategie. Diesem Effekt sollte in nachfolgenden Studien Rechnung getragen werden.

Prinzipiell bestätigt die Studie die bewährten Lüftungsstrategien für frei fließenden Verkehr und Stop-and-Go Verkehr. Zusätzlich zeigt sie auf, dass nicht-konventionelle Lüftungsstrategien einen Beitrag zur Tunnelsicherheit liefern können, und zwar dann, wenn es aufgrund besonderer Rahmenbedingungen zu Verkehrsstau in Richtungsverkehrstunneln ohne Rauchabsaugungssystem kommt. Der ideale Einsatzbereich der jeweiligen Lüftungsstrategie hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab und kann auf Basis dieser Studie nicht verallgemeinert werden, jedoch wurde der Mehrwert einer Einzelfallbetrachtung bei Zusammentreffen der diskutierten Rahmenbedingungen bestätigt.

## Literatur

- [1] Deutsche Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, RABT 2006 – Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, Köln, 2006.
- [2] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, RVS 09.02.31-Tunnelausrüstung-Ventilationssysteme, Wien, 2014.
- [3] NAKAHORI, I.; SAKAGUCHI, T.; KOHL, B.; FORSTER, C. and VARDY, AE., Risk assessment of zero-flow ventilation strategy for fires in bidirectional tunnel with longitudinal ventilation, 16th ISAVFT, BHR Group, Seattle, 2015.

- [4] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, RVS 09.03.11 Tunnelrisikomodell, Wien, 2015.
- [5] FORSTER, C.; KOHL, B. AND WIESHOLZER, S., Methodologies for accurate risk modeling in the context of integrated quantitative risk analysis, 16th ISAVFT, BHR Group, Seattle, 2015.
- [6] Purser DA, Modeling time to incapacitation and death from toxic and physical hazards in aircraft fires, AGARD, Bd. 467, pp. 41/1-41/12, 1989.
- [7] LONNEMARK, A. and INGASON, H., The Effect of Air Velocity on Heat Release Rate and Fire Development during Fires in Tunnels, Fire Safety Science, Vol 9, pp. 701-712, 2009.

Wolf, Nikolaus  
Referat 92 – Betriebsmanagement, -technik,  
Tunnelbetriebstechnik –

Regierungspräsidium  
Tübingen / Landesstelle für Straßentechnik  
Stuttgart

Vom Bundesministerium für Verkehr und  
Infrastruktur wurden insgesamt drei bundesweite  
Pilotprojekte „Tunnelsimulator“ genehmigt.  
Zwei davon in Nordbayern und einer in Baden-  
Württemberg

Manuskript Veröffentlichung Tagungsband

## Pilotprojekt Tunnelsimulator Baden-Württemberg

Der Tunnelsimulator in Baden-Württemberg spiegelt die bestehende Tunnelbetriebstechnik in der Visualisierungsoberfläche der Betriebstechnik ein zu eins wieder. Bedient man den Tunnelsimulator, so ist die Reaktion ausgelöster Schaltungen mit den identischen Reaktionen versehen, wie die im Echtbetrieb befindliche Tunnelbetriebstechnik im Tunnel. In der Praxis sollen künftig alle betriebstechnischen Nachrüstungen von unter Verkehr nachzurüstenden und neu zu bauenden Straßentunnel erst auf dem Tunnelsimulator auf Herz und Nieren geprüft werden. Nach bestandenen Tests werden die Änderungen / Erweiterungen an der betriebstechnischen Erüchtigung in die bestehende Tunnelbetriebstechnik eingespielt. Mit diesem Vorgehen wird die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer und der Leichtigkeit des Verkehrs noch erhöht. Durch weitere Tests vor Ort wird das Vertrauen in die Zuverlässigkeit der Technik gestärkt.

Der Tunnelsimulator Engeltunnel wurde vom Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur als eines der drei bundesweiten Pilotprojekten genehmigt. In seinem Fall sollte ein Autobahntunnel (Richtungsverkehrstunnel) mit hoher Verkehrsbelastung und hoher Datenpunktzahl abgebildet werden. Der Engeltunnel mit täglich rund 130.000 Fahrzeugen und einer Anzahl von über 40.000 Datenpunkten erfüllt diese Voraussetzungen.

Die betriebstechnische Überwachung und Steuerung von Straßentunnel auf Autobahnen erfolgt in Baden-Württemberg mittels der Übergeordneten

Leittechnik. Mit dem einheitlichen Leitsystem der Übergeordneten Leittechnik steht ein System zur Verfügung, welches technisch ausgereift ist und fortlaufend weiterentwickelt wird.

Die Verkehrsrechnerzentrale in den Räumlichkeiten der Landesstelle für Straßentechnik in Stuttgart-Feuerbach gehört bundesweit zu einer der modernsten Einrichtungen dieser Art. Sie überwacht und steuert derzeit mit der Übergeordneten Leittechnik 16 Straßentunnel.

Die Übergeordnete Leittechnik ist als mehrstufiges Netzwerk aufgebaut, dies gewährleistet eine mehrfache Ausfallsicherheit; die Integration bestehender und zukünftiger Tunnelbetriebstechnik ermöglicht der Einsatz existierender Datennetze entlang der Bundesautobahnen.

Die Übergeordnete Leittechnik umfasst aktuell acht Autobahnmeistereien, zwei Straßenmeistereien und sechzehn Straßentunnel und ist noch offen für weitere Systemerweiterungen.

Der jetzt neu geschaffene Tunnelsimulator ist ein digitales Bild der Übergeordneten Leittechnik in Baden-Württemberg. Auch hier wurde das Drei-Stufen-Modell nachgebildet. Der Engelbergtunnel mit realem Aufbau der Tunnelsteuerung sowie der Übergeordneten Leittechnik bildet hier das erste Modul beim Tunnelsimulator. Bei den jetzt laufenden Vorarbeiten im Engelbergtunnel und künftig bei der betriebstechnischen Nachrüstung des Engelbertunnels kann er sich beweisen. Seine Feuertaufe hat er bei der Umprogrammierung der Tunnellüftung unter Beweis gestellt. Am Tunnelsimulator wurde eine theoretische Berechnung von 972 Szenarien der Tunnellüftung zu Grunde gelegt und gerechnet. Im Praxistest wurde die theoretische Berechnung zu 100 % bestätigt.

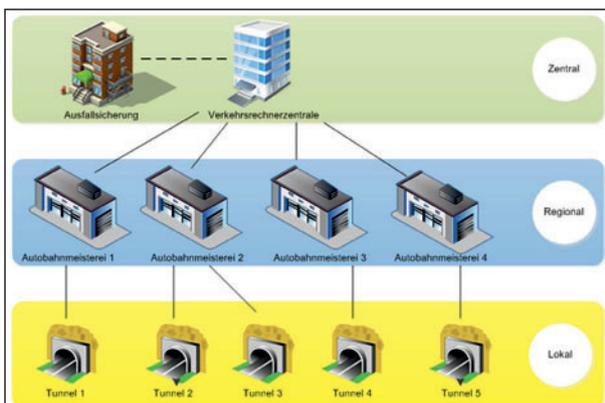


Bild 1: Dreistufen Netzwerk – ÜLT Baden-Württemberg

Der Tunnelsimulator besteht aus einem Hardware-Server, der die notwendigen Server virtuell abbildet. Des Weiteren aus einem Arbeitsplatz „Tunnelsimulator“, einem Arbeitsplatz „Stör- und Bedienrechner“ und einem Serviceplatz „Tunnelsimulator“.

Auf den realen, dem Tunnel baugleichen SPS S7 Steuerungen laufen die Original-Simatic S7 Programme der Übergeordneten Leittechnik, auf den Simulations-Servern und Clients die Original-WinCC Applikationen mit identischen IP-Adressen der Übergeordneten Leittechnik.

Die Tunnelperipherie wurde in Siemens Simulationseinheiten nachgebildet. Die gesamte Simulation läuft in Echtzeit.

Der Kern des Simulators ist ein dynamisches Strömungsmodell mit implementierter Lüftungssimulation. Dazu wurde ein 1D kompressibler / instationärer Solver programmiert. Die Tunnelgeometrie ist in 3D abgebildet, die Netzerstellung erfolgt automatisch durch Festlegung der Auflösung (n Zellen). Es erfolgte eine kompressible Formulierung der Eulergleichungen. Die lüftungstechnischen Einrichtungen werden als Quellterm entsprechender physikalischer Wirkung implementiert.

Die Visualisierung erfolgt mittels des Digitalen Modells (Digital Twin) des Tunnels. Über die OPC-UA Schnittstelle wird die jeweils von der Tunnel SPS aufgeschaltete Videokamera übertragen. Die situationsbedingt aufgeschaltete Tunnelkamera wird in Echtzeit gerendert (OpenGL rendering). Fahrzeugpositionen und -bewegungen; Stau, Brand und Rauchausbreitung (3D CFD Rauchausbreitungssimulation auf 6 CPU's parallel) werden als Livestream mit der Tunnel- und Strömungssimulation gekoppelt und in Echtzeit visualisiert (Full HD).

Die Bedienphilosophie des Tunnelsimulators orientiert sich am Echtsystem der Übergeordneten Leittechnik (ÜLT).

Die Bedienung des ÜLT Simulationssystems (ÜLT Server und Clients) ist, da hier die Originalapplikation eingespielt wurde, identisch zum Echtsystem. Zur Bedienung des Simulationssystems wurde aufgrund der Einheitlichkeit „Look & Feel“ – Bedienphilosophie, die Symbolik und Darstellung vom ÜLT System übernommen.

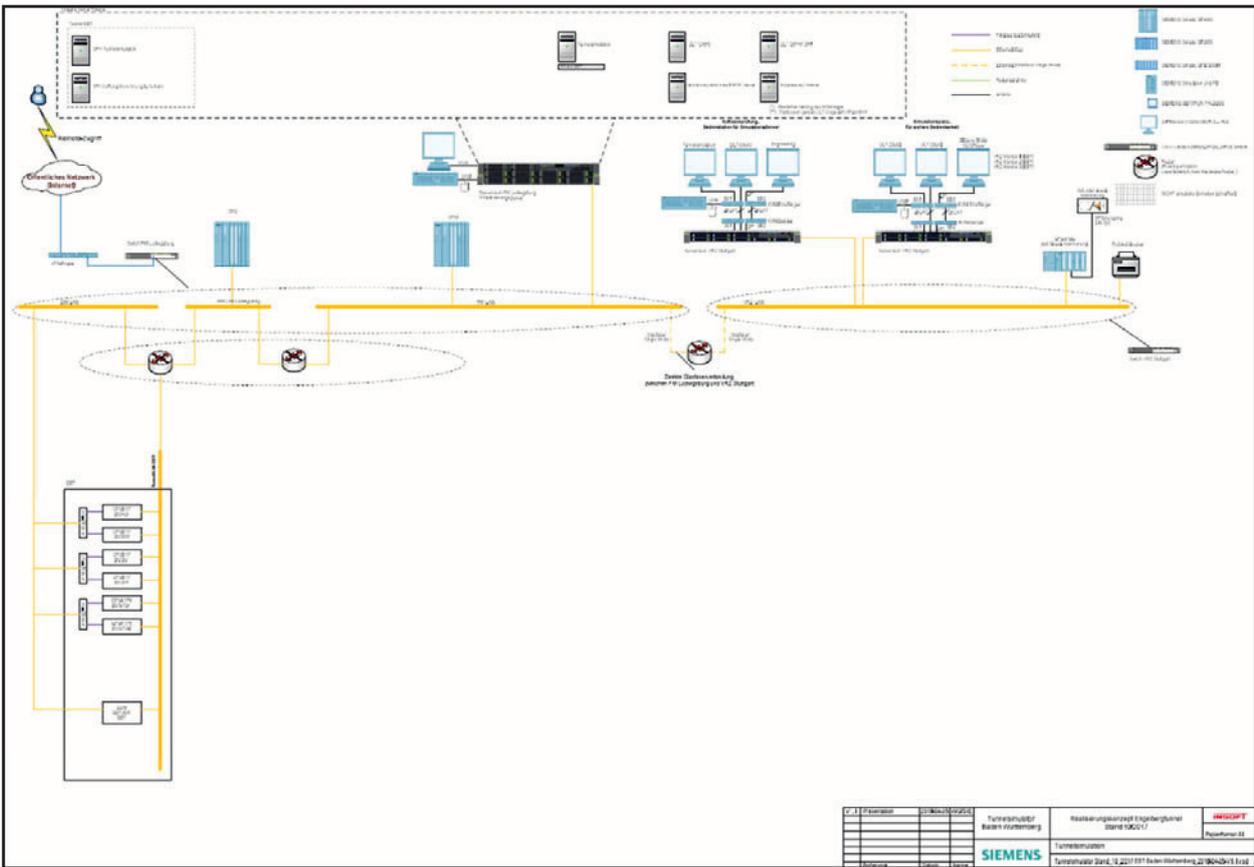


Bild 2: Tunnelsimulator – EBT Übersichtsplan

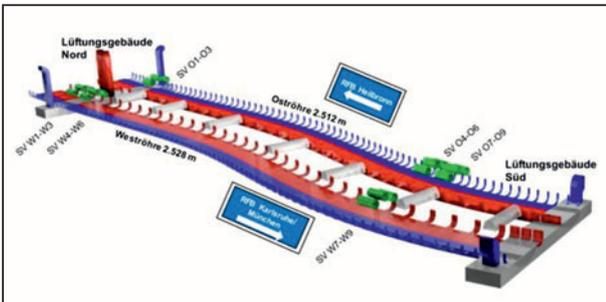


Bild 3: Tunnelsimulator – Lüftungssimulation



Bild 4: Tunnelsimulator – Visualisierung Videobilder

Die Beeinflussung erfolgt mittels Stör und Bedienrechner. Über diesen wird ebenso das dynamische Strömungsmodell des Tunnelsimulators aktiviert.

Das Anwenderprogramm in der Simulations-SPS verhält sich exakt wie die SPS auf der Echtanlage.

Beim Tunnelsimulator sind für den Engelbergtunnel weitere technische Module geplant.

So ist die Erweiterung um die Verkehrsrechnersimulation bereits in der Planung. Hierzu werden ebenso virtuelle Server für den Tunnelsimulator aufgebaut auf denen das Originalprogramm des Verkehrsrechners, die Spiegelung der Streckenstationen und der Bedienrechner des Verkehrsrechners des Engelbergtunnels als weiteres Modul implementiert wird.

Die Bedienung und Programmierung des simulierten Verkehrsrechners erfolgt über den bestehenden Bedienclient des bestehenden Tunnelsimulators.

Mit dieser technischen Erweiterung des Moduls Verkehrs werden die realen Schilder und Verkehrszustände vor Ort im Tunnelsimulator visualisiert.

Der Tunnelsimulator hat seine erste Feuertaufe bereits bestanden. Nachdem eine erste Änderung des

Lüftungsprogramms zusammen mit Fachleuten der Lüftungstechnik und unter den kritischen Augen des Regierungspräsidiums Stuttgart und der Landesstelle für Straßentechnik in der Simulation getestet wurde, konnte die neue Software erfolgreich in die bestehende Tunnelbetriebstechnik eingespielt werden.

Der Einsatz des Tunnelsimulators reduzierte die notwendigen Prüfzeiten im Tunnel deutlich, da Vorort nur noch Stichprobentests notwendig waren. Die Eingriffe in das Verkehrsgeschehen konnte auf eine Tunnelssperrung pro Röhre begrenzt werden.

Dies geschah in den Nächten vom 22. auf den 23. November und 23. auf den 24. November 2017. Der theoretische Test am Tunnelsimulator hat sich mit den Brandversuchen in der Praxis zu 100 Prozent bestätigt. Auf den Tunnelsimulator warten schon die nächsten Aufgaben. So werden die im Augenblick laufenden Vorwegmaßnahmen zu weiteren Tests am Tunnelsimulator führen.

Auch ist der Einsatz des Tunnelsimulators bei der anstehenden Sanierung des Engelbergtunnels geplant. Das Konzept sieht die Erweiterung des Tunnelsimulators um das Modul „Engelbergtunnel neu vor“. Hierbei ist eine Begleitung der einzelnen Bauabschnitte bei der betriebstechnischen Nachrüstung vorgesehen. Es sollen Vorabtests der geplanten Maßnahmen mit dem Tunnelsimulator durchgeführt werden. Für die geplanten Bauphasen notwendigen SPS-Programme werden am Tunnelsimulator geprüft, technisch abgenommen und dann in das LIFESYSTEM der SPSen im Engelbergtunnel übernommen. Funktionstests vor Ort werden signifikant

reduziert und die Leichtigkeit des Verkehrs nur im geringen Umfang behindert.

Ebenso können Optimierungen der Programme in dieser Phase leicht korrigiert und ohne großen Zeitaufwand am Tunnelsimulator getestet werden.

Die Vorteile liegen auf der Hand:

- „Keine risikoreichen Inbetriebnahmen und Testphasen“
- „Keine langen Sperrzeiten durch Tests und Abnahmen“
- „Deutliche Verringerung des Risikos von Totalausfällen am Echtssystem“

Die Realisierung eines solchen Tunnelsimulators als digitales Bild und die Visualisierung der Reaktionen in Echtzeit ist momentan einzigartig. Zudem kann der Tunnelsimulator im Endausbau weitere Straßentunnel in den Simulationsmodus aufnehmen.

Was bedeutet der Einsatz von Tunnelsimulatoren für Baden Württemberg?

- Verkürzung der Inbetriebnahmen vor Ort um 4/5 der Zeit
- Höchstmögliche Tunnelsicherheit durch Testmöglichkeiten aller Datenpunkte im Zusammenspiel mit den Ereignislisten der Tunnelbetriebstechnik
- Kleinstmöglicher Eingriff bei betriebstechnischer Nachrüstung unter Verkehr
- Sichere Bedienbarkeit des Straßentunnels bereits im Simulationsmodus

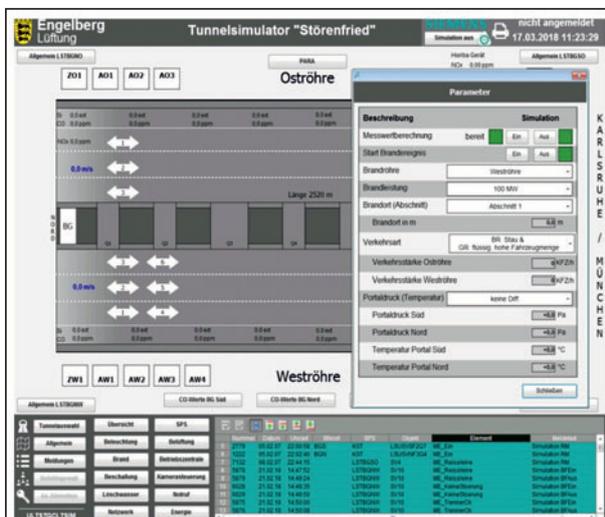


Bild 5: Tunnelsimulator – Bedienphilosophie

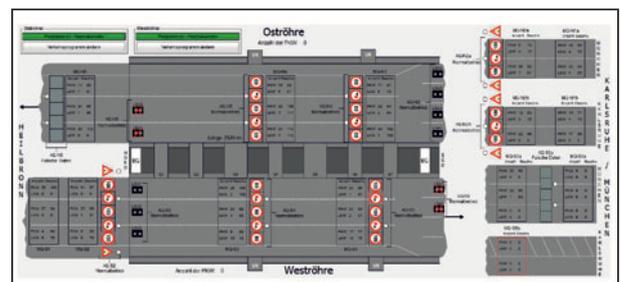


Bild 6: Tunnelsimulator – Verkehrssimulation

Ein gutes Gefühl für den Betreiber und ein immenser Gewinn für den Verkehrsteilnehmer

## Bilder

- Bild 1: Dreistufen Netzwerk – ÜLT  
Baden-Württemberg
- Bild 2: Tunnelsimulator – EBT Übersichtsplan
- Bild 3: Tunnelsimulator – Lüftungssimulation
- Bild 4: Tunnelsimulator – Visualisierung  
Videobilder
- Bild 5: Tunnelsimulator – Bedienphilosophie
- Bild 6: Tunnelsimulator – Verkehrssimulation

Willberg, Uwe, Prof. Dr.-Ing.,  
Autobahndirektion Südbayern, München;

Schießl-Pecka, Angelika, Dr.-Ing.,  
Ingenieurbüro Schießl-Gehlen-Sodeikat,  
München

## Chloridbelastung von Tunnelinnenschalen – Analyse, Vorbereitung, Instandsetzung und Konsequenzen für den Neubau

In Tunnelbauwerken der ABD-Südbayern wurden nach rd. 20-jähriger Nutzung sehr hohe Chloridgehalte in Schlitzrinnen, Notgehwegen und Tunnelwänden festgestellt, die auf Höhe der Bewehrung deutlich über den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalten lagen. Allerdings wurde in den Tunnelinnenschalen bzw. -wänden nur vereinzelt aktive Korrosion beobachtet, so dass alternative Instandsetzungsmöglichkeiten (Kathodischer Korrosionsschutz, elektrochemischer Chloridentzug und Tiefenhydrophobierungen mit Aufhellungen) eingesetzt werden konnten. Aus den gewonnenen Erfahrungen wurde das variable Drei-Stufen-Konzept für künftige Tunnelprojekte entwickelt, um die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen in Tunnelbauwerken zu erhöhen.

### 1 Ausgangssituation

Aufgrund der schweren Brandunfälle im Mont Blanc-Tunnel, dem Tauern- und dem Gotthard-Tunnel wurden die Sicherheitsvorschriften für Tunnelbauwerke europaweit verschärft. Die Bundesrepublik Deutschland hat beschlossen alle Tunnel, die im Zuge des Transeuropäischen Verkehrsnetzes (TERN-Netz) vorhanden sind, entsprechend diesen fortgeschriebenen Vorschriften nachzurüsten.

Im Zusammenhang mit den Tunnelnachrüstungen wurde der bauliche Zustand u. a. folgender Tunnel im Zuständigkeitsbereich der Autobahndirektion Südbayern untersucht:

- B 2neu, Tunnel Farchant
- A 96 Tunnel Eching und Etterschlag
- A 99 Tunnel Allach

## 2 Chloridbelastungen der Tunnelinnenschalen

### 2.1 B 2neu, Tunnel Farchant

Der im Jahr 2000 eröffnete Tunnel Farchant hat eine Länge von 2390 m (Oströhre) bzw. 2275 m (Weströhre). Die Tunnelröhren wurden überwiegend in bergmännischer Bauweise erstellt und haben jeweils eine Fahrbahnbreite von 8 m und jeweils beidseitig neben der Fahrbahn ca. 1 m breite Notgehwege.

Bei den Betonzusammensetzungen wurden unterschiedliche Bindemittelkombinationen (CEM I 32,5 R, CEM II/B-S 32,5 R und CEM III/B-S 32,5 R mit Flugachse) und verschiedene Wasser-Zement-Werte  $(w/z)_{eq}$  zwischen 0,45 bis 0,54 verwendet [1]. Die nominelle Betondeckung betrug 60 mm; es wurde – wie damals in Deutschland üblich – kein Oberflächenschutzsystem aufgebracht.

Bei den Untersuchungen der Tunnelinnenschalen kamen Betondeckungsmessungen, Potenzialfeldmessungen und tiefengestaffelte Bohrmehlnahmen zum Einsatz. Außerdem wurde lokal die Lage der Bewehrung sondiert. Dabei zeigten sich in der ersten Tiefenlage (Abstand von der Betonoberfläche 10 mm) bereits stark erhöhte Chloridgehalte von bis zu 2,7 M.-%/z, in der zweiten Tiefenlage (Abstand von der Betonoberfläche 23 mm) Chloridgehalte von bis zu 1,9 M.-%/z und in der dritten Tiefenlage (Abstand von der Betonoberfläche 38 mm) lagen die Chloridgehalte größtenteils im unkritischen Bereich ( $< 0,3$  M.-%/z) [1].

Dabei war keine eindeutige Abhängigkeit der Chloridwerte vom Abstand zum Tunnelportal erkennbar, allerdings zeigten sich deutliche Unterschiede in Bezug auf die Bindemittelkombinationen. Die Verwendung von CEM II/B-S in Kombination mit Flugachse führte im Vergleich zu CEM I zu deutlich niedrigeren Chloridgehalten im Beton, insbesondere in den größeren Tiefenlagen zur Betonoberfläche. Aktive Korrosion wurde noch nicht festgestellt.

### 2.2 A 96 Tunnel Eching und Etterschlag

Die Tunnel Eching und Etterschlag haben Gesamtlängen von rd. 400 m bzw. 500 m. Beide Tunnel wurden mit einem zweizelligen Rechteckquerschnitt in

offener Bauweise ausgeführt. Die Fahrbahnbreiten der Richtungsfahrbahnen betragen jeweils 2 x 9 Meter, die Breiten der beidseitig vorhandenen Notgehwege jeweils ca. 1 m.

Für den Tunnel Eching wurde für den Konstruktionsbeton ein Beton der Güte B25, für den Tunnel Etterschlag ein B35 eingesetzt, in beiden Fällen wurde CEM I verwendet. Im Tunnel Eching wurde auf den Wandflächen ein Oberflächenschutzsystem appliziert, das sich jedoch bereits nach kurzer Nutzungsdauer ablöste, beim Tunnel Etterschlag wurde auf ein Oberflächenschutzsystem vollständig verzichtet. Die Fertigstellung der beiden Tunnel erfolgte 1995 (Eching) bzw. 1998 (Etterschlag).

In beiden Tunneln wurden umfangreiche Zustandserfassungen der Tunnelwände und -decken sowie der Notgehwege und Schlitzrinnen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden Potentialfeld-, Betondeckungs- sowie Elektrolytwiderstandsmessungen und tiefengestaffelte Bohrmehlnahmen zur Chloridgehaltsbestimmung durchgeführt und lokal Bewehrung sondiert.

Bei den Untersuchungen zur Bewertung der Gefahr von Bewehrungskorrosion zeigte sich in beiden Tunneln, dass alle Tunnelwände fast über die komplette Höhe unerwartet hohe Chloridgehalte aufwiesen. Außerdem ergab sich nur eine vergleichsweise geringe Abnahme der Chloridgehalte mit zunehmender Höhe der Entnahmestelle und keine systematische Abnahme der Chloridgehalte mit zunehmendem Abstand vom Tunnelportal, d. h., erhöhte Chloridgehalte liegen nahezu über die gesamte Tunnellänge und Wandhöhe vor, siehe Bild 1.

Die Chloridgehalte in den Tunnelwänden des Tunnels Etterschlag sind oberflächennah ebenfalls sehr stark erhöht, allerdings sind die Chloridgehalte in größeren Tiefenlagen tendenziell geringer als im Tunnel Eching, was in erster Linie auf die höhere Betongüte und damit einhergehend geringere Kapillarporosität des Betons zurückzuführen ist.

Lokale Bewehrungs Sondierungen im Bereich von Rissen oder Betonierfehlstellen in beiden Tunneln ergaben an einzelnen Bewehrungsstäben korrosionsbedingte Querschnittsverluste von bis zu rd. 50 %.

Die Chloridgehalte in den Tunneldecken erwiesen sich in beiden Tunneln als unkritisch.

### 2.3 A 99 Tunnel Allach

Der zweiröhrige Tunnel liegt im Zuge des Autobahnringes München und hat eine Länge von 1.000 m und wurde in offener Bauweise erstellt. Der rechteckige Tunnelquerschnitt weist je Fahrtrichtung jeweils 3 Fahrstreifen mit Standstreifen und eine mittlere Fahrbahnbreite von 14 m sowie beidseitig jeweils ca. 1 m breite Notgehwege auf. Die Fertigstellung erfolgte 1993, die Inbetriebnahme 1998. Als Beton kam ein B25 mit CEM I zum Einsatz; es wurde ebenfalls keine Beschichtung aufgebracht. In den Tunnelwänden und in der Tunneldecke wurden verzinkte Brandschutzmatten mit einer Betondeckung von rd. 30 mm (Decke) und 40 mm (Wände) eingebaut. Die planmäßige Betondeckung der tragenden Bewehrung betrug 65 mm.

Aufgrund der verzinkten Bewehrung war der Einsatz der Potentialfeldmessung im Rahmen der Untersuchungen nicht möglich. Die zerstörungsfreie Betondeckungsmessung der tragenden Bewehrung war ebenfalls nicht möglich. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der Bauwerksuntersuchung der IST-Zustand der Tunnelwände und -Decken durch Bohrmehlentnahmen und die Erstellung von Sondieröffnungen (Bestimmung der Betondeckung und des Zustands der Bewehrung) beurteilt.

Auch hier wurden in den Tunneldecken unkritische Chloridgehalte ermittelt (max. 0,4 M.-%/z in 30 mm Tiefe). In den Tunnelwänden lagen im ungerissenen Bereich auf Höhe der verzinkten Brandschutzbewehrung hohe Chloridgehalte vor (> 2,0 M.-%/z in 40 mm Tiefe), siehe Bild 2.

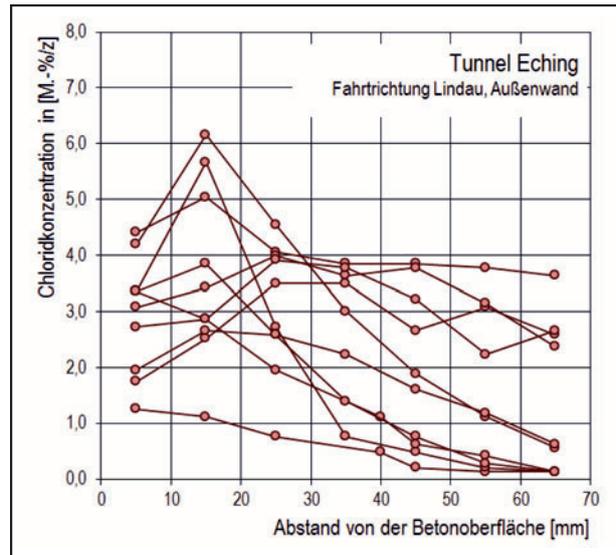


Bild 1: Ergebnisse der Chloridgehaltsbestimmungen an der Außenwand des Tunnels Eching, Fahrtrichtung Lindau [1]

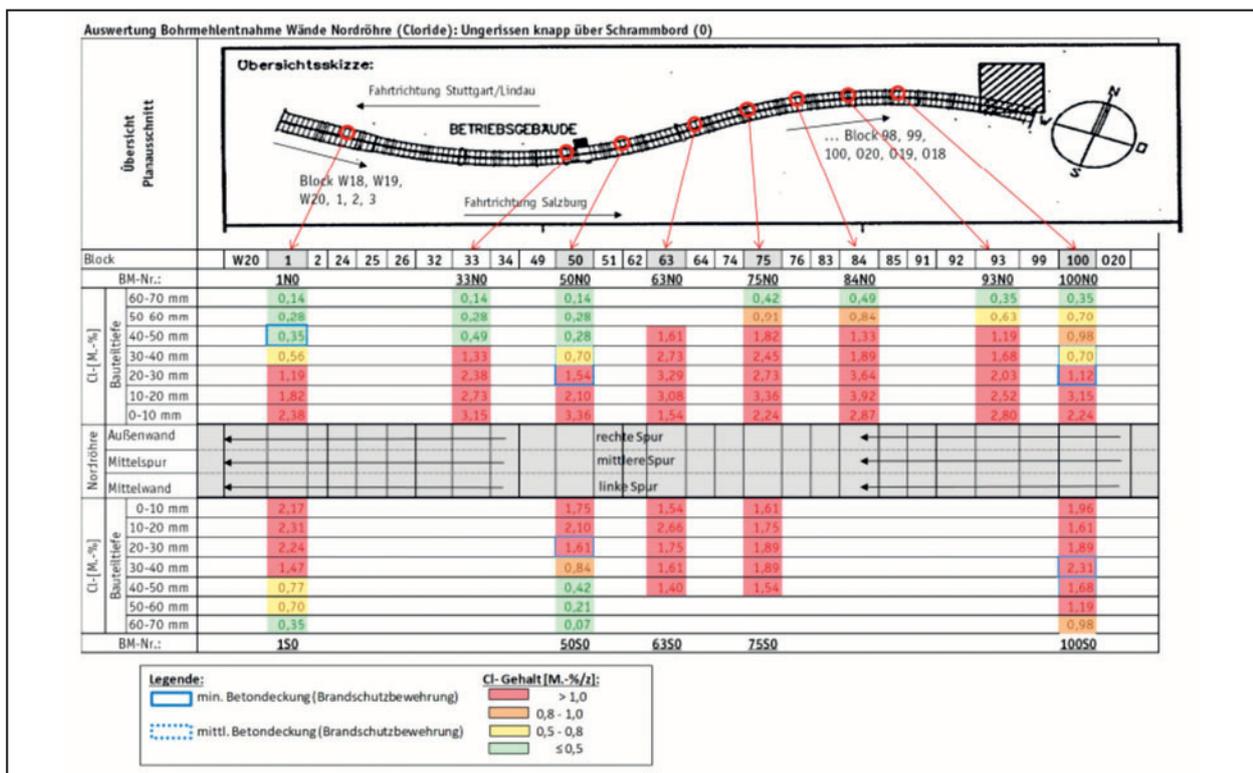


Bild 2: Chloridwerte in den ungerissenen Bereichen der Tunnelwände der Nordröhre des Tunnels Allach [2]

### 3 Analyse, Vorbereitung und Instandsetzung

Der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt  $C_{krit}$  ist keine feste Größe und hängt von einer Vielzahl bauteilspezifischer und klimatischer Randbedingungen ab. In der Instandsetzungsrichtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton wird als unterer Schwellenwert von  $C_{krit}$  ein Chloridgehalt von 0,50 M.-%/z angegeben, oberhalb dessen ein sachkundiger Planer zu Bewertung der Korrosionsgefährdung hinzuzuziehen ist.

Bei der Bewertung der Korrosionsgefährdung für die Straßentunnel Eching und Etterschlag, bei denen bereits aktive Bewehrungskorrosion festgestellt wurde, wurde eintendenziell höherer kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt  $C_{krit}$  in einem Bereich zwischen rd. 0,50 M.-%/z und 1,20 M.-%/z festgestellt [1]. Aus Bild 1 wird ersichtlich, dass selbst bei den vergleichsweise großen Betondeckungen der Tunnelbauwerke Eching und Etterschlag von i. M. rd. 60 mm bei einem Großteil der Bewehrung bereits nach einer Nutzungsdauer von weniger als 20 Jahren von Bewehrungskorrosion ausgegangen werden muss.

Beim Tunnel Farchant wurde der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt zwar zum Untersuchungszeitpunkt auf Höhe der Bewehrung noch nicht erreicht, aber ohne Zusatzmaßnahmen war davon auszugehen, dass die für Tunnel üblicherweise angestrebte Lebensdauer von 100 Jahren keinesfalls erreicht werden kann.

Als Konsequenz wurden für die drei o. g. Tunnel umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen geplant und mittlerweile umgesetzt.

Beim Tunnel Allach werden derzeit die Instandsetzungsmöglichkeiten untersucht, bei denen die Frage des Erfordernisses der Brandschutzbewehrung und deren Restquerschnittes eine entscheidende Rolle spielen wird.

Die Möglichkeit, bei der Instandsetzung von Straßentunneln alternative Lösungsansätze zu verfolgen, hängt nach [1] in erster Linie vom Bauwerkszustand zum Zeitpunkt der Instandsetzung ab. Liegt zu diesem Zeitpunkt bereits eine Einschränkung der Tragfähigkeit infolge korrosionsbedingter Querschnittsverluste vor, ist in der Regel eine konventi-

onelle Betoninstandsetzung unumgänglich, bei der chloridbelasteter Beton mittels Hochdruckwasserstrahlen (HDW) abgetragen, Bewehrung ergänzt und anschließend reprofiliert wird. Allerdings ist diese Vorgehensweise sowohl zeit- als auch kostenintensiv und stellt einen wesentlichen Eingriff in das Bauwerk dar.

Sofern zum Zeitpunkt der Instandsetzung bereits Korrosion stattfindet, allerdings noch ohne relevante Querschnittsverluste, stellt der kathodische Korrosionsschutz häufig eine wirtschaftliche Alternative dar. Dies gilt auch für den Fall, dass zum Zeitpunkt der Instandsetzung zwar noch keine Korrosion stattfindet, die Chloridgehalte innerhalb der Betondeckung jedoch so hoch sind, dass infolge von Umverteilungsprozessen auch ohne weitere Chloridzufuhr zukünftig mit Korrosion gerechnet werden muss. In beiden Fällen ist auch das Aufbringen eines Oberflächenschutzsystems bzw. einer Tiefenhydrophobierung denkbar, allerdings nur in Verbindung mit einem Korrosionsmonitoring system. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese Vorgehensweise speziell bei bereits aktiver Korrosion mit einem deutlich erhöhten Instandsetzungsrisiko verbunden ist und die Anwendung daher einer besonderen Abwägung bedarf. Zur Verringerung des Instandsetzungsrisikos kann der Tiefenhydrophobierung eine elektrochemische Chloridextraktion vorgeschaltet werden.

Sind die Chloridgehalte zum Zeitpunkt der Instandsetzung vorwiegend oberflächennah erhöht und ist auch bei Chloridumverteilung nicht mit einer Korrosionsinitiierung zu rechnen, ist i. d. R. das alleinige Aufbringen einer Tiefenhydrophobierung ausreichend, diese muss aber in regelmäßigen Abständen erneuert werden.

Um die oben beschriebenen Lösungsstrategien hinsichtlich ihrer Eignung bei der Instandsetzung von Tunnelbauwerken zu erproben, wurde vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und der bayerischen Straßenbauverwaltung beschlossen, die Instandsetzung der Tunnelbauwerke Eching und Etterschlag als Pilotprojekte zu realisieren.

Um alle in den Tunnelbauwerken Eching und Etterschlag realisierten Maßnahmen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit beurteilen und vergleichen zu können, wurden im Rahmen der Ausführung im Jahr

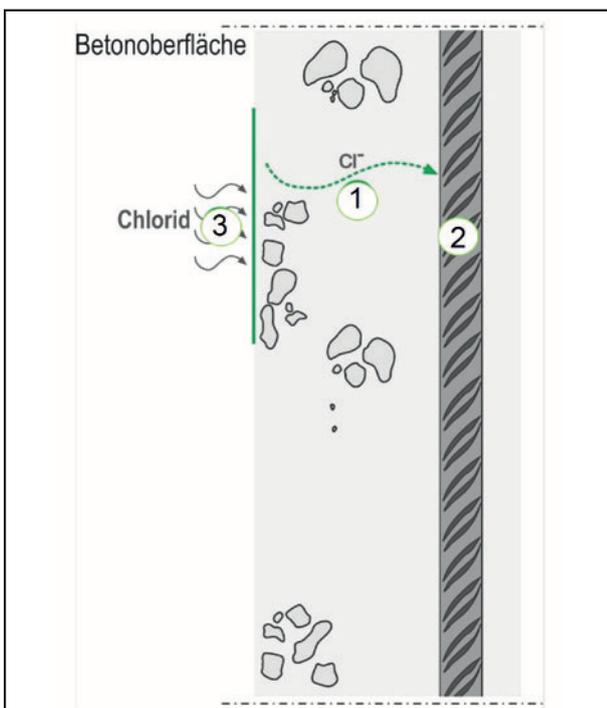
2016 in alle Bauteile verschiedene Sensoren zur Beurteilung der zeit- und tiefenabhängigen Feuch-  
teverteilung im Beton und zur Beurteilung des zeit-  
und tiefenabhängigen Korrosionsverhaltens der un-  
terschiedlichen Bewehrungsmaterialien eingebaut.

Dabei stehen diese Tunnel stellvertretend für eine  
Vielzahl vergleichbarer Infrastrukturbauwerke, bei  
denen die planmäßige Nutzungsdauer ebenfalls nur  
durch umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen  
erreicht werden kann. Daraus leitet sich die zentrale  
Fragestellung ab:

Durch welche Maßnahmen kann bei zukünftigen  
Tunnelprojekten die Dauerhaftigkeit gegenüber  
chloridinduzierter Bewehrungskorrosion derart ver-  
bessert werden, dass die planmäßige Nutzungs-  
dauer ohne umfangreiche Instandsetzungsmaß-  
nahmen erreicht werden kann (Lösungsstrategien  
für Neubauprojekte)?

## 4 Konsequenzen für den Neubau

Chloridinduzierte Korrosion tritt bei Stahlbetonbau-  
teilen auf, bei denen Chloride von der Bauteiloberflä-  
che zur Bewehrungsfläche transportiert werden  
und infolge von Aufkonzentrationen der Chloridge-



**Bild 3:** Mögliche Strategien zur Verbesserung der Dauerhaftig-  
keit, nach [3]

halt auf Bewehrungshöhe den kritischen korrosions-  
auslösenden Chloridgehalt von Betonstahl über-  
schreitet. Daraus ergeben sich für Neubauprojekte  
nach [3] drei mögliche Lösungsstrategien, um Kor-  
rosion zu unterbinden oder die Korrosionsinitiierung  
so weit nach hinten zu verschieben, dass während  
der Nutzungsdauer nicht von einer relevanten Schä-  
digung auszugehen ist, siehe Bild 3.

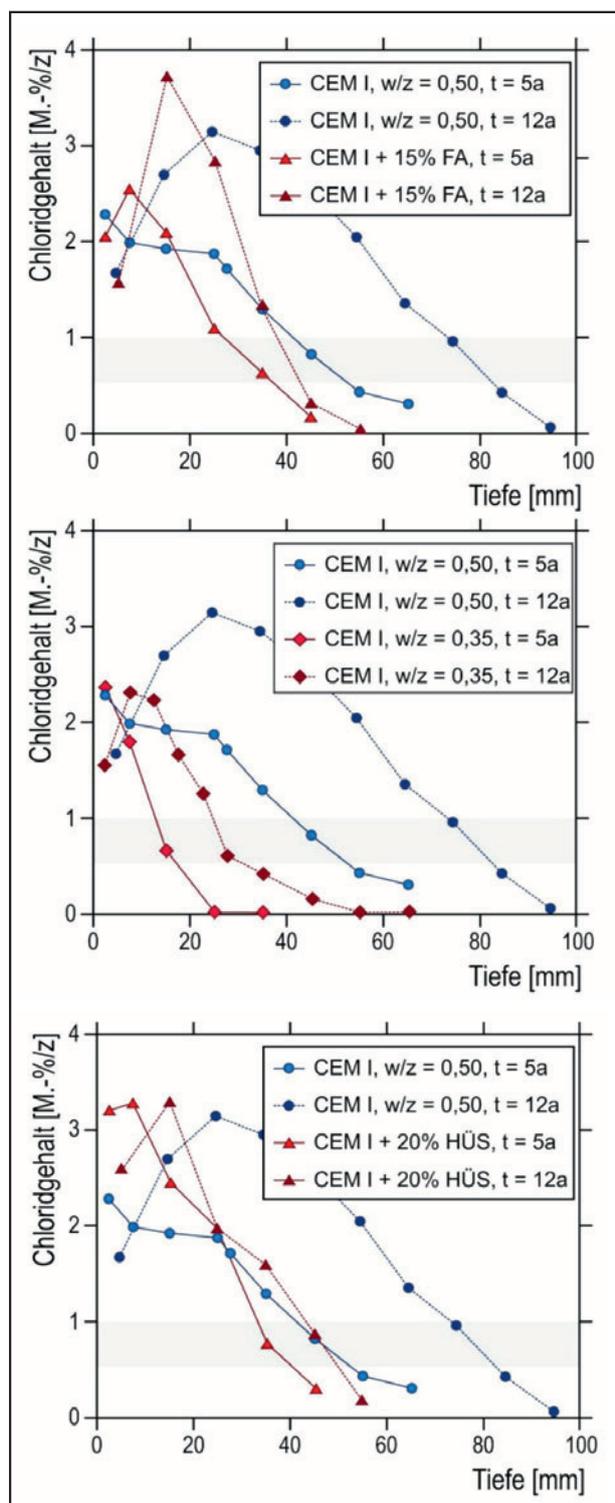
1. Verlangsamung des Chloridtransports zur Bewehrung durch betontechnologische Maßnahmen
2. Erhöhung des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts durch Verwendung von Bewehrungsstahl mit erhöhtem Korrosionswiderstand
3. Unterbinden des Chlorideindringens in den Konstruktionsbeton durch Aufbringen einer Tiefenhydrophobierung

### 4.1 Verlangsamung des Chloridtransports durch betontechnologische Maßnahmen

Der Transport von Chloriden von der Bauteiloberflä-  
che ins Bauteilinnere findet primär im Kapillarporen-  
system des Zementsteins statt. Dementsprechend  
stellen alle Maßnahmen, die eine Reduzierung des  
Kapillarporenanteils und eine generelle Verfeine-  
rung der Porenstruktur bedingen, eine wirksame  
Maßnahme zur Reduzierung des Chloridtransports  
dar. Betontechnologische Maßnahmen zur Redu-  
zierung des Kapillarporenanteils sind hinlänglich be-  
kannt und in der Literatur umfassend beschrieben,  
z. B. [5], [6]. Für den Anwendungsfall des Konstru-  
ktionsbetons für Tunnelkonstruktionen sind dies im  
Wesentlichen die

- Verwendung hüttensandhaltiger Zemente (CEM II/B-S, CEM III/A),
- die Zugabe von Steinkohlenflugasche,
- die Reduzierung des Wasserzementwerts (w/z-Werts).

Umfangreiche Untersuchungen über einen Betrachtungszeitraum von 12 Jahren an einem Versuchsstand im Naxbergtunnel in der Schweiz [4] belegen eindrucksvoll den Effekt betontechnologischer Maßnahmen auf den Chloridtransport, siehe Bild 4.



**Bild 4:** Einfluss betontechnologischer Maßnahmen auf den Chloridtransport in Betonprobekörpern (Ergebnisse von Auslagerungsversuchen im Versuchsstand am Naxbergtunnel nach [4])

Dabei kann durch den Einsatz eines Zements mit höherem Hüttensandgehalt, z. B. CEM II/B-S oder CEM III/A, noch eine deutliche Zunahme dieses Effekts erreicht werden.

## 4.2 Erhöhen des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts durch Verwenden von Bewehrungsstahl mit erhöhtem Korrosionswiderstand

Durch den Einsatz nichtrostender Bewehrungsstähle kann der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt signifikant erhöht werden. In Deutschland wurden als nichtrostende Betonstähle vorwiegend austenitische Stähle der Güte 1.4571 (seltener 1.4429 oder 1.4529) oder austenitisch-ferritische Duplex-Stähle 1.4362 bzw. 1.4462 eingesetzt. Bei diesen Stahlgüten kann Korrosion bei den meisten Anwendungen zielsicher ausgeschlossen werden. Allerdings beschränkt sich ihre Anwendung aufgrund des signifikant höheren Preises unverändert auf Sonderanwendungen.

Eine Alternative zu den hochlegierten nichtrostenden Betonstählen stellen Betonstähle aus der ferritischen Stahlsorte 1.4003 dar. Dabei handelt es sich um einen warmgewalzten Bewehrungsstahl mit einem Chromgehalt > 12 %. Preislich ordnen sich Betonstähle mit erhöhtem Korrosionswiderstand aus 1.4003 zwischen den herkömmlichen Betonstählen und den hochlegierten, nichtrostenden Stählen ein. Gleichzeitig führt die Verwendung dieses Stahls ebenfalls zu einer signifikanten Verschiebung des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts. Laborversuche von BISSCHOP et al. [7] ergaben gegenüber herkömmlichem Betonstahl annähernd eine Verdopplung von  $C_{krit}$ . Wird zusätzlich durch Beizen noch die Walzhaut entfernt, führt dies gemäß [7] in Laborversuchen zu einer weiteren Steigerung von  $C_{krit}$  gegenüber herkömmlichem Betonstahl ungefähr auf den Faktor 4, siehe Bild 5.

Seit 2016 bzw. 2018 liegen für Top12 Stahl der Sorte 1.4003 allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) vor.

## 4.3 Unterbinden des Chlorideintrages durch Tiefenhydrophobierungen

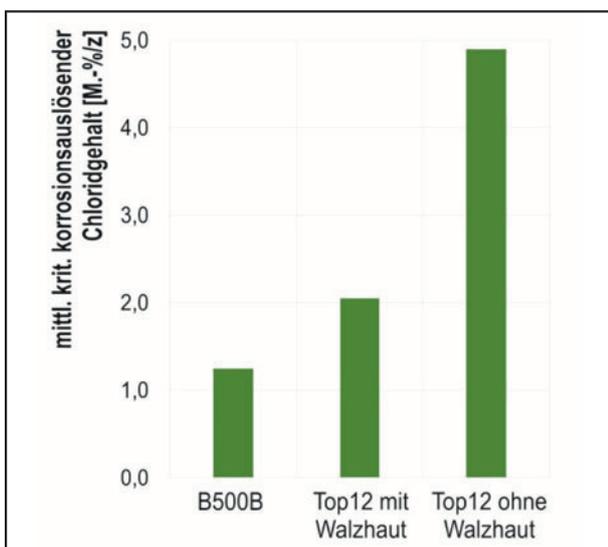
Im Tunnelbereich ist die Applikation von Beschichtungen aufgrund der besonderen klimatischen Bedingungen und der Anforderungen an den Betonuntergrund, insbesondere an den Feuchtegehalt, schwierig, so dass bei vielen Straßentunneln bereits nach kurzer Nutzungsdauer ein Abwittern

oder sogar flächiges Ablösen der Beschichtungen festgestellt wurde. Eine Alternative zu den herkömmlichen Beschichtungssystemen stellen Tiefenhydrophobierungen dar. Im Gegensatz zu den Beschichtungen, die eine geschlossene Schicht auf der Betonoberfläche bilden, dringen Tiefenhydrophobierungen bis zu mehrere Millimeter tief in das Betongefüge ein, kleiden die Porenwandungen aus und verhindern so eine Wasser- und Wassaufnahme des Betons [8]. Durch das Eindringen in das Porengefüge wird ein Ablösen der Hydrophobierung und eine schnelle Abwitterung im Tunnelbetrieb unterbunden. Zwar weisen auch Tiefenhydrophobierungen, die in der Regel Silane als Wirkstoff enthalten, eine Empfindlichkeit gegenüber den klimatischen Randbedingungen bei der Applikation auf, diese ist jedoch deutlich geringer als bei herkömmlichen Beschichtungssystemen.

Im Naxbergtunnel wurde auch der Einfluss von Tiefenhydrophobierungen auf die Chloridaufnahme untersucht, siehe Bild 6. Allerdings wurde die Tiefenhydrophobierung unter Laborbedingungen aufgebracht.

## 5 Das variable 3-Stufenkonzept

Unter dem variablen 3-Stufenkonzept [1] versteht man eine „maßgeschneiderte“ Kombination der unter Ziff. 4 beschriebenen Strategien in Abhängigkeit des Bauteils und der Umgebungsbedingungen auf der Basis von vollprobabilistischen Lebensdauerberechnungen.

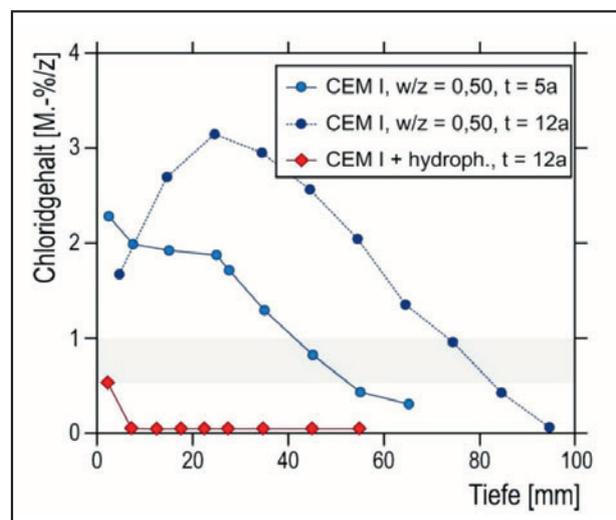


**Bild 5:** Vergleich des krit. korrosionsauslösenden Chloridgehaltes von Betonstahl und Top12 [7]

Zunächst wird das Bauteil z. B. in Hinblick auf seine Ausrichtung, Exposition und die anvisierte Lebensdauer kategorisiert. Im Falle eines Tunnelbauwerks wären dies z. B. die Bauteile „Notgehweg“, „Tunnelwand“ und „Tunneldecke“. Die betontechnologischen Maßnahmen können i. d. R. weitgehend kostenneutral durchgeführt werden und sollten daher grundsätzlich verfolgt werden.

Der Einsatz von korrosionsarmer Bewehrung richtet sich nach der Exposition. So ist z. B. der Einsatz von Top12-Stahl ohne Walzhaut mit einer vierfachen Erhöhung von  $C_{krit}$  gegenüber herkömmlichem Betonstahl für die luftseitige Bewehrung der hochbeanspruchten Wände eines Tunnels zur Sicherstellung einer Lebensdauer von 100 Jahren erforderlich, während bei einer mäßig beanspruchten Tunneldecke eine betontechnologische Optimierung ausreichend ist.

Zahlreiche Erfahrungen haben gezeigt, dass die Dauerhaftigkeit nur dann erreicht werden kann, wenn die Ausführung qualitativ hochwertig ist. Um dies sicherzustellen, sieht das variable 3-Stufen-Konzept nach der Ausführung eine Qualitätskontrolle der dauerhaftigkeitsrelevanten Materialeigenschaften durch den Auftraggeber vor, z. B. mittels Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten ( $D_{RCM}$ ) am Bauwerk. Wird ein bestimmter, im Leistungsverzeichnis verankerter Zielwert nicht erreicht, so ist auf Kosten der ausführenden Firma im Rahmen einer „Rückfallebene“ zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit eine Tiefenhydrophobierung auf das Bauteil aufzubringen.



**Bild 6:** Einfluss einer Tiefenhydrophobierung auf die Chloridaufnahme von Betonprobekörpern am Naxbergtunnel aus [4]

## 6 Ausblick

Zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Neubauprojekten soll das variable 3-Stufenkonzept im Rahmen des weiteren Pilotprojekts Tunnel Tutting unter Praxisbedingungen untersucht und kalibriert werden.

## Literatur

- [1] SCHIESSL-PECKA, A.; SCHNECK, U.; WILLBERG, U.; GOJ, K.; HOCKE, C.: A 96 LINDAU – München, Tunnel Eching und Eттerschlag – Erhaltungsmaßnahmen und Konzept zur Betoninstanzsetzung bei Tunnelnachschrüstungen nach den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Tunnelbau Taschenbuch, S. 180-219.
- [2] BUSCHMEIER, S.; SCHIESSL-PECKA, A.; MAYER, T.F.: Untersuchungen am Tunnel Allach. 2017, (unveröffentlicht).
- [3] MAYER, T.F.; SCHIESSL-PECKA, A.: Lösungsstrategien zur Chloridbelastung in Straßentunneln. VSVI-Tagung Garching, Januar 2017.
- [4] BISSCHOP, J., SCHIEGG, y.; HUNKELER, F.: Modelling the corrosion initiation of reinforced concrete exposed to deicing salts. Forschungsbericht AGB 2011/002, TFB Wildeg, 2016 (www.tfb.ch).
- [5] SCHIESSL, P.; GEHLEN, CH.; SODEIKAT, CH.; MAYER, T.F., SCHIESSL-PECKA, A.: Dauerhafter Konstruktionsbeton für Wasserbauwerke. In: Betonkalender 2008, Band 1, S. 1 – 88. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2007.
- [6] GEHLEN, C.: Probabilistische Nutzungsdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 510. Beuth-Verlag, Berlin, 2000.
- [7] BISSCHOP, J., SCHIEGG, y.; LINDEN, CH.: Effect of rebar and cement type on the critical chloride content of cementitious materials. Proceedings of the Eurocorr 2016, Montpellier, Frankreich.
- [8] SCHIESSL-PECKA, A.; MAYER, T. F.: Three Examples of Using Hydrophobic Impregnations in Tunnels. Proceedings of the fib Symposium 2016, Cape Town, South Africa

## Bilder

- Bild 1: Ergebnisse der Chloridgehaltsbestimmungen an der Außenwand des Tunnels Eching, Fahrtrichtung Lindau [1]
- Bild 2: Chloridwerte in den ungerissenen Bereichen der Tunnelwände der Nordröhre des Tunnels Allach [2]
- Bild 3: Mögliche Strategien zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit nach [3]
- Bild 4: Einfluss betontechnologischer Maßnahmen auf den Chloridtransport in Betonprobekörpern (Ergebnisse von Auslagerungsversuchen im Versuchsstand am Naxbergtunnel nach [4])
- Bild 5: Vergleich des krit. korrosionsauslösenden Chloridgehaltes von Betonstahl und Top12 [7]
- Bild 6: Einfluss einer Tiefenhydrophobierung auf die Chloridaufnahme von Betonprobekörpern am Naxbergtunnel aus [4].

Dipl.-Ing. Uwe Grimsehl  
Dipl.-Ing. Ute Buchmann

Stadt Köln / Amt für Brücken, Tunnel und Stadtbahn-  
bau, Köln

## Tunnelnachrüstung in Köln

### Kurzfassung

Die Straßentunnel in der Stadt Köln sind gekennzeichnet durch große Vielfalt. Einige wurden als Straßentunnel gebaut oder sind durch Überbauung mit Hochbauten entstanden. Andere liegen unter Eisenbahnüberführungen, die im 19. Jahrhundert erbaut wurden. Hier ist die Stadt nicht für die Bauwerke sondern nur für den Verkehrsraum unterhalb der Brücken zuständig. Die Nachrüstung der Tunnel wird durch die individuellen Randbedingungen der örtlichen Situation sowie der Art und des Alters der Bauwerke geprägt und erschwert.

Für sieben Tunnelbauwerke von großer Verkehrsbedeutung hat der Rat der Stadt Köln die Generalsanierung beschlossen. Die Projekte umfassen die Sanierung, den baulichen Brandschutz und die Erhöhung der Sicherheitstechnik auf den aktuellen Stand der Technik.

Die Verwaltungsbehörde gemäß den Richtlinien für den Bau und Betrieb von Straßentunneln ist organisatorisch im Dezernat für Mobilität und Verkehrsmanagement in die städtischen Verwaltungsstrukturen eingebunden (Bild 1).

### 1 Zuständige Dienststelle

In der Stadtverwaltung ist im Dezernat für Mobilität und Verkehrsinfrastruktur das Amt für Brücken, Tunnel und Stadtbahnbau für die Sanierung, Nachrüstung und den Betrieb der Straßentunnel im Kölner Stadtgebiet zuständig.

Das Amt plant, baut und unterhält mit insgesamt ca. 170 Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen die städtischen Ingenieurbauwerke. Planung und Neubau werden in den Abteilungen für Entwurf und Neubau oder in Projektgruppen für große Bauvorhaben abgewickelt. In der Abteilung Bauwerksunterhaltung sind ca. 50 Mitarbeiter beschäftigt mit der Instandhaltung, der Bauwerksprüfung, der Sanierung und

dem Betrieb der Straßentunnel, unterstützt durch eine eigene Brückenmeisterei (Bild 2 – 2c).

Aktuell befinden sich ca. 1.000 unterschiedlichste Bauwerke in der Unterhaltung. Neben den Straßentunneln gehören dazu vier komplette Rheinbrücken, 40 km Stadtbahnstrecken mit 154 Haltestellen aber auch Lärmschutzwände und Uferanlagen.

Die Generalsanierung des Straßentunnels Kalk ist derzeit das umfangreichste Tunnelbauprojekt. Weitere Großprojekte in Köln sind die Sanierung der Mülheimer Brücke und die Erweiterung des Stadtbahnnetzes mit dem Bau der Stadtbahnanbindung der Ortsteile Bocklemünd/Mengenich sowie der 3. Baustufe der Nord-Süd Stadtbahn.

Im Sachgebiet Sanierung und Betrieb der Straßentunnel wird derzeit auch die Tunnelleitzentrale technisch und organisatorisch entwickelt, die später zusammen mit der Verkehrsleitstelle in eine gemeinsame Leitzentrale integriert werden soll, die vom Amt für Verkehrsmanagement aufgebaut und geleitet werden soll.

### 2 Kölner Straßentunnel

Die Stadt Köln ist für insgesamt 27 Straßentunnel zuständig. Die Tunnel wurden aus städtebaulichen Gründen gebaut oder bestehen aus Eisenbahnunterführungen, die breiter sind als 80 m und für die die Verkehrssicherungspflicht für den Straßenraum darunter bei der Stadt Köln besteht (Bild 3).

Prägnante Beispiele der sieben großen und verkehrsreichen Tunnel sind der Rheinfertunnel von 1981, der mit 590 m Länge der längste städtische Tunnel ist, der Straßentunnel Kalk, der im Jahr 1970 als Doppelstocktunnel in eine heute über 100 Jahre alte Eisenbahnunterführung mit einer Länge von 540 m eingebaut wurde oder der Tunnel Herkulesstraße, der als ca. 350m lange Überbauung der A 57 im Jahr 1990 aus Lärmschutzgründen errichtet wurde. Die Tunnelgruppe am Dom im Bereich des Hauptbahnhofs umfasst Tunnel unter den Bahnanlagen und Tunnel die aus städtebaulichen Gründen entstanden sind durch die Überbauung von Straßen mit Museum Ludwig und Philharmonie oder der Domtreppe. Weitere zwanzig Tunnel sind zu einem großen Teil historisch bedingt aus Straßenunterführungen entlang des Kölner Eisenbahnringes in verschiedenen Stadtteilen entstanden wie der Tunnel Gottesweg

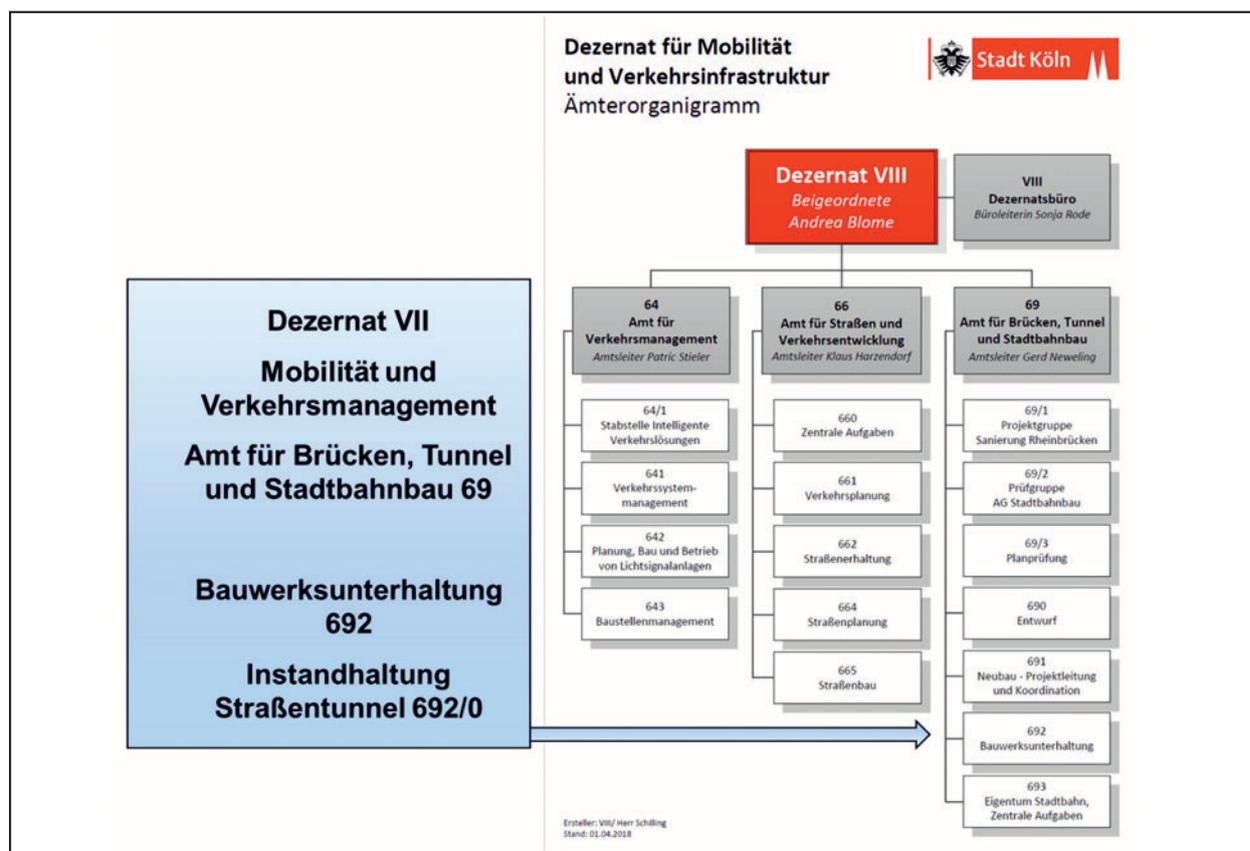


Bild 1: Organigramm zuständige Dienststelle für Tunnel bei der Stadt Köln

(109 m), der Tunnel Heidelberger Straße (100 m) oder der Tunnel Zollstockgürtel (340 m) (Bild 4).

### 3 Verwaltungsbehörde nach RABT

Die Verantwortung für den Betrieb der Straßentunnel liegt bei der Verwaltungsbehörde im Amt für Brücken, Tunnel und Stadtbahnbau, die entsprechend den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT 2006) aufgebaut wurde. Sie wird operativ durch das Sachgebiet „Sanierung und Betrieb Straßentunnel“ vertreten. Hier sind Mitarbeiter mit den Aufgaben und Funktionen von Untersuchungsstelle Tunnelmanager und Tunnelleitzentrale beauftragt und betreuen mit diesen Kompetenzen nicht nur die langen Straßentunnel sondern auch alle anderen Straßentunnel.

Die Frage der Gültigkeit der RABT für kommunale Tunnel wurde erst 2008 juristisch eindeutig geklärt und das Sachgebiet zunächst mit zwei Mitarbeitern begründet. In den letzten Jahren wurde es zu seiner jetzigen Größe von insgesamt 14 Ingenieuren/Inge-

neurinnen und Technikern ausgebaut werden, um zukünftig in der Lage zu sein, die anfallenden Aufgaben regelkonform gemäß dem aktuellen Sicherheitsstandard abzuarbeiten.

Der Sicherheitsbeauftragte ist Mitarbeiter der Kölner Berufsfeuerwehr. Dadurch können die speziellen Anforderungen zum Brandschutz und Rettungswesen wie auch die organisatorischen und örtlichen Besonderheiten bei der Planung der baulichen und betriebstechnischen Ausstattung sehr zielgerichtet eingebracht werden. Synergieeffekte und Optimierungen sind daher auch im Hinblick auf die Durchführung von Sicherheitsübungen gegeben (Bild 5).

### 4 Sanierungs- und Nachrüstungsprogramm

In allen Tunneln wurden seit 2008 sogenannte Pro 1+ -Maßnahmen entsprechend den RABT 2006 durchgeführt (Piktogramme, Notrufsprechstellen, Brandmeldeanlagen) um einen sicheren Zwischenzustand bis zu umfangreichen Sanierungsmaßnahmen zu erreichen.

Zahlen, Daten, Fakten	
4 Rheinbrücken (komplett)	154 Stadtbahnhaltestellen
4 Rheinbrücken (nur Rad- und Gehwege)	40 km Stadtbahnstrecken, umfassend: - 4 km Hochbahn - 30 km Tunnel - 6 km Rampenbauwerke
199 Straßenbrücken	15 km Uferanlagen am Rhein
123 Fußgängerbrücken	5 km Uferanlagen am Fühlinger See
27 Straßentunnel	74 sonstige Bauwerke
41 Lärmschutzwände	
114 Stützwände	

Bild 2: Tabelle der städtischen Ingenieurbauwerke



Bild 2a: Mülheimer Brücke



Bild 2c: Severinsbrücke



Bild 2b: Deutzer Brücke

2008 hatte der Rat die Planung der Generalsanierung von 7 Tunneln beschlossen. Nach EU-weiten Ausschreibungen wurden 2009 Planungsaufträge vergeben. Die betriebliche Nachrüstung war im Fokus und man nahm an, dass die Maßnahmen bis

2017 abgeschlossen sein könnten. Bei der Planung stellten sich jedoch die Komplexität der Maßnahmen und der Umfang der notwendigen baulichen Instandsetzung auch von angrenzenden Rampen und Stützwänden deutlich anders dar, denn jeder Tunnel ist ein Unikat und die Bauwerke sind in die Jahre gekommen. Nach heutigem Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass das Sanierungsprogramm erst 2028 beendet werden kann.

## 5 Verkehrsmanagement

Bei allen Infrastrukturprojekten in einer Großstadt wie Köln sind verkehrliche Abhängigkeiten zwischen den städtischen Großprojekten bzw. den auf dem Kölner Autobahnring geplanten und laufenden Maßnahmen zu beachten.

27 Kölner Straßentunnel - Zahlen, Daten, Fakten	
<b>7 Straßentunnel</b> Verkehrsbedeutung, Bauart Planungsbeschluss 2008	<b>20 Straßentunnel</b> Eisenbahnüberführungen u.a. Verkehrssicherungspflicht der Stadt Köln Beispiele:
Tunnel Kalk / Grenzstraße 320/540 m	Tunnel Hotel Maritim 150 m (Fremdeigentum)
Tunnelgruppe am Dom / Museum Ludwig	Tunnel Zollstockgürtel 340 m (DB)
Tunnel Herkulesstraße 350 m	Tunnel Trankgasse 120 m (DB)
Tunnel Nord-Süd-Fahrt 190 m	Tunnel Johannisstraße 110 m (DB)
Rheinufertunnel 590 m	Tunnel Heidelberger Straße 100 m (DB)
Tunisstraße 185/230 m	
Tunnel Opladener Straße 320 m	

Bild 3: Beispiele Kölner Straßentunnel mit kommunaler Verkehrssicherungspflicht

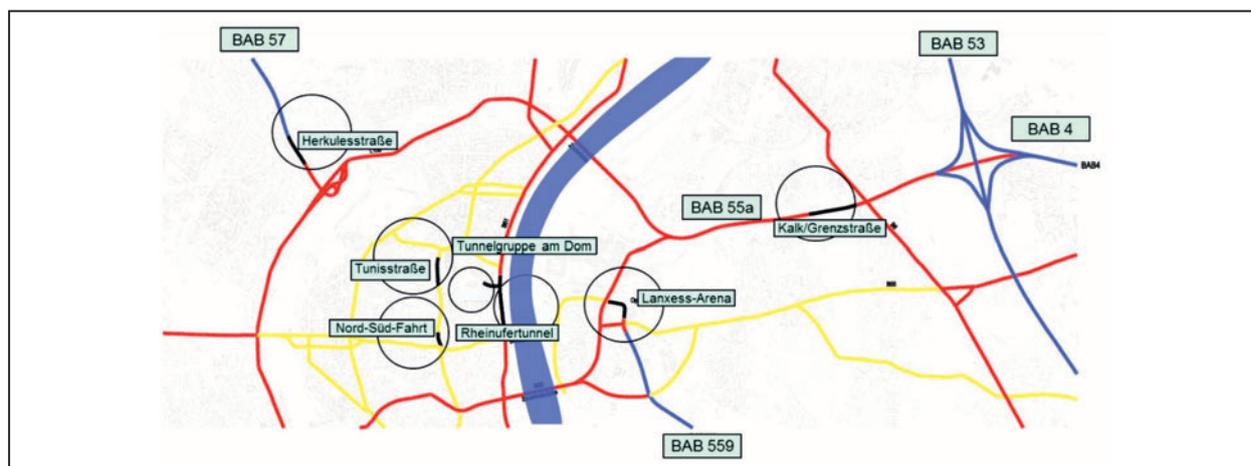


Bild 4: Lage wichtiger Tunnel im Hauptstraßennetz

2017 wurde das neue Dezernat für Mobilität und Verkehrsmanagement gebildet und 2018 ein eigenes Amt für Verkehrsmanagement gegründet. Hier werden die vorhandenen Strukturen optimiert und weiterentwickelt zu einem hochprofessionellen Verkehrsmanagement. Bereits seit einigen Jahren wird der Zeit-Maßnahmenplan fortgeschrieben und in regelmäßigen Pressekonferenzen veröffentlicht. Zum Beispiel kann die Sanierung der Mülheimer Brücke erst nach Abschluss der verkehrseinschränkenden Bauphasen am Tunnel Kalk beginnen, da sonst im Kölner Osten der Verkehr zusammenbräche.

## 6 Generalsanierung Tunnel Kalk

Als erste Baumaßnahme für die Ertüchtigung von sieben Straßentunneln wurde 2012 bis 2013 vorab ein Nottreppenhaus an den Doppelstocktunnel Kalk für rund 3,5 Mio. Euro angebaut. Das Treppenhaus liegt auf dem Gelände des über dem Tunnel liegenden Güterbahnhofs. Hier wurde eine umzäunte Sammelfläche eingerichtet, von der Feuerwehr und Rettungsdienste im Ereignisfall die Verkehrsteilnehmer abholen (Bild 6).

Die Generalsanierung des Tunnels Kalk begann Mitte 2014 und soll – nach erheblichen Bauverzögerungen – 2019 abgeschlossen werden. Die Gesamt

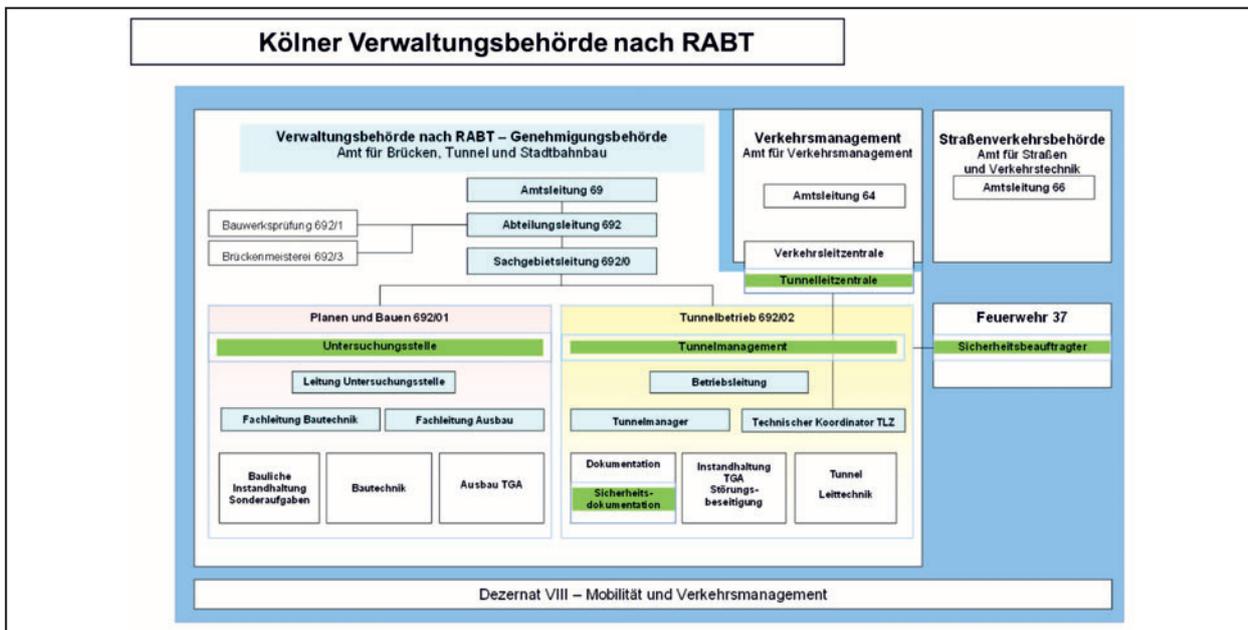


Bild 5: Struktur der Tunnelverwaltung

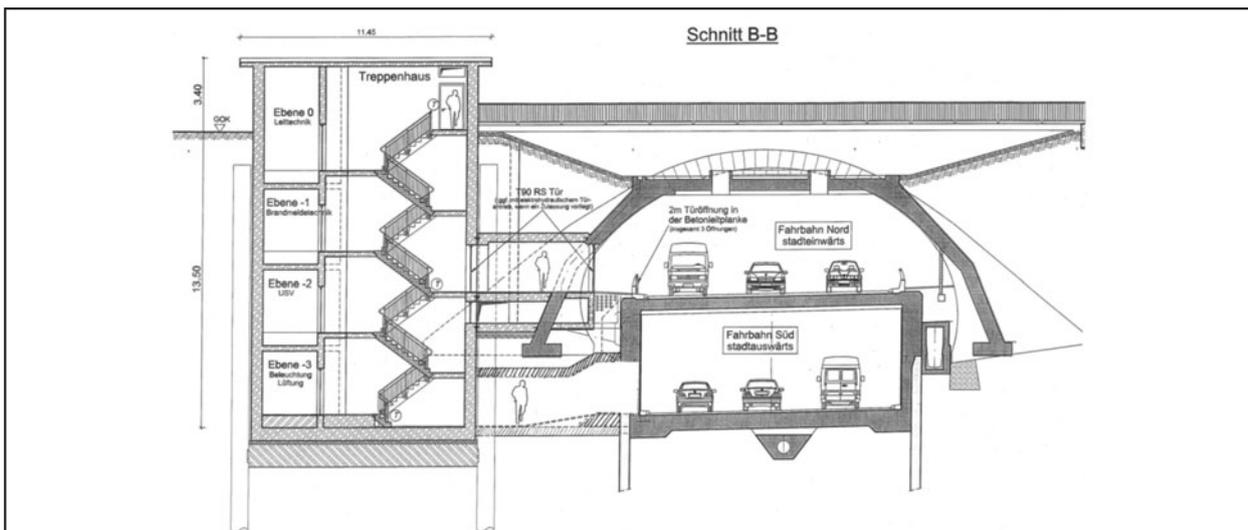


Bild 6: Anbau Nottreppenhaus

kosten werden voraussichtlich deutlich über 30 Mio. Euro betragen (Bild 7 und 8).

Der Tunnel ist eine Besonderheit, die bei der Durchfahrt zunächst nicht auffällt. Es ist ein Doppelstocktunnel. Die oberen Gewölbebrücken aus Stampfbeton wurden bereits 1890 von der Reichsbahn gebaut, um die Gleise des Rangierbahnhofs Kalk Nord über die damalige Grenzstraße zu überführen. Als das Verkehrsaufkommen zunahm, wurde die Straße 1970 zur sogenannten „Stadtautobahn B55a“ als Zubringer von der Zoobrücke zum Kölner Autobahnring sechsspurig ausgebaut. Unterhalb der Bahngewölbe wurden Schlitzwände abgeteufelt und dazwischen eine 540 m lange rechteckige Tun-

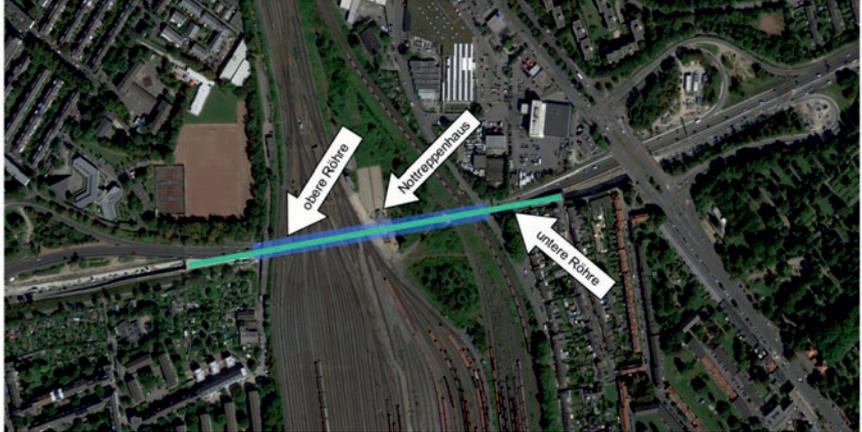
nelröhre aus Stahlbeton gebaut. Eine technische Meisterleistung. Im Zuge dieser Maßnahmen wurden die Gewölbebrücken zu einer 321 m langen oberen Tunnelröhre verbunden. Der Tunnel hat ein Verkehrsaufkommen (DTV) von über 10.000 Kfz/24h und ist damit eine der am höchsten belasteten Straßen in Köln (Bild 9).

Die Generalsanierung umfasst die Bauwerkssanierung, den baulichen Brandschutz und den Einbau der erweiterten Sicherheitsausstattung gemäß RABT.

Zur Bauabwicklung werden jeweils zwei Fahrspuren gesperrt, so dass der Verkehr über jeweils zwei

<b>Generalsanierung Tunnel Kalk/Grenzstraße</b>	
<b>Generalsanierung Erstes Projekt</b>	
<b>Planung 2010 bis 2013</b>	
<b>Verkehrsbedeutung - Folmaßnahme Sanierung Mülheimer Brücke</b>	
<b>Vorabmaßnahme Nottreppenhaus</b>	
<b>Bauzeit 2014 bis 2019</b>	
<b>Gesamtkosten &gt; 30 Mio. €</b>	

**Bild 7:** Sanierung und Nachrüstung des Tunnels Kalk/Grenzstraße auf der B55A

<b>Lage unter Rangierbahnhof Kalk Nord</b>	<b>obere Röhre L = 321 m untere Röhre L = 540 m</b>
	

**Bild 8:** Lageplan Tunnel Kalk

Fahrspuren stadteinwärts und stadtauswärts abgewickelt werden muss. Dies bedingt vier verschiedene Bauphasen. In einer nachlaufenden Bauphase ohne Verkehrseinschränkungen folgenden Arbeiten an der betriebliche Ausstattung mit den erforderlichen Funktionstests sowie Restarbeiten (Bild 10).

Der untere Tunnel weist starke Betonschäden insbesondere an der befahrenen Tunneldecke auf, so dass eine sehr aufwändige Betonsanierung erforderlich wurde. Ergänzend zur klassischen Betoninstandsetzung wurde an den Bauwerksfugen der Decke eine kathodische Korrosionsschutz-Anlage (KKS) eingebaut (Bild 11).

Kurz vor dem geplanten Ende der Bauzeit wurden 2016 Mängel in Form von Hohlstellen an der Tunnel-

decke festgestellt, die dazu führen, dass alle Bauwerksfugen des unteren Tunnels erneut saniert werden müssen einschließlich der erneuten Herstellung der kompletten KKS-Anlage. Da die Schadensursache zwischen Bauherr und der bauausführenden Arbeitsgemeinschaft strittig ist, erfolgt eine außergerichtliche Beweissicherung und Schadensanalyse sowie Quotierung durch einen vereidigten gemeinsamen Gutachter.

Im Anschluss an das Großprojekt ab 2020 soll die nächste – derzeit in Planung befindliche - Maßnahme Generalsanierung Tunnel Herkulesstraße im Zuge der Autobahn A57 im Kölner Westen im Stadtteil Ehrenfeld in den Bau gehen. Dieser Tunnel ist 350m lang und 1990 entstanden durch Abdeckung der Troglage des sechsspurigen Autobahnzubrin-

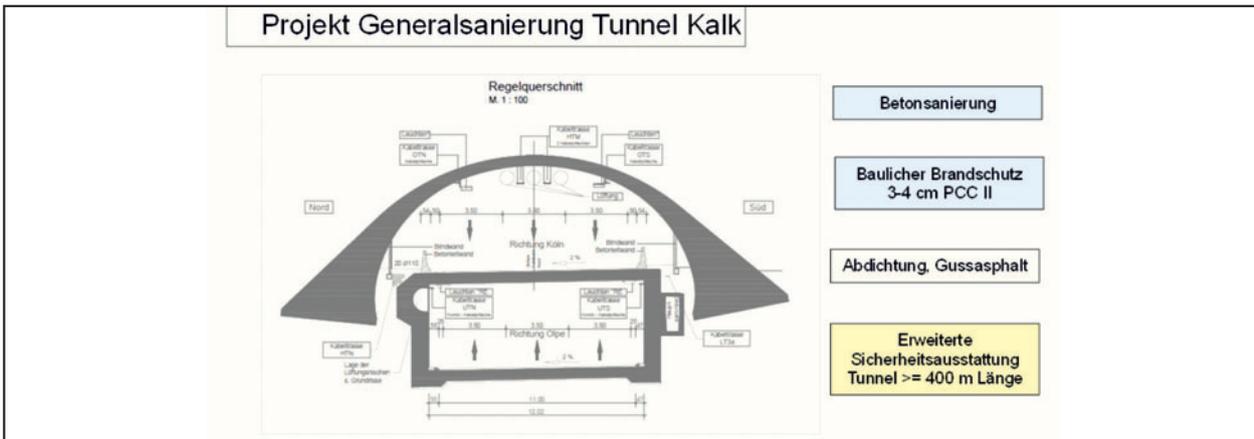


Bild 9: Doppelstocktunnel

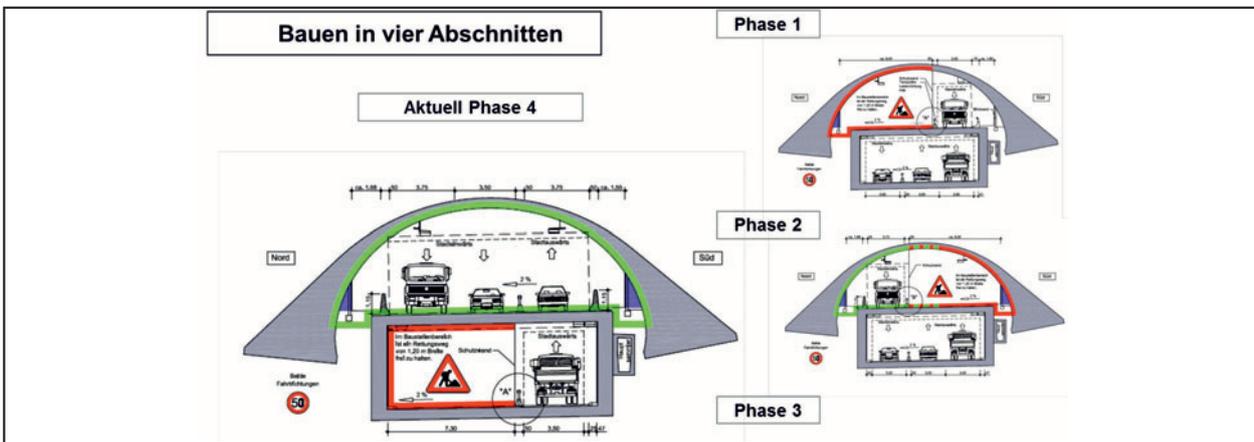


Bild 10: Bauphasen

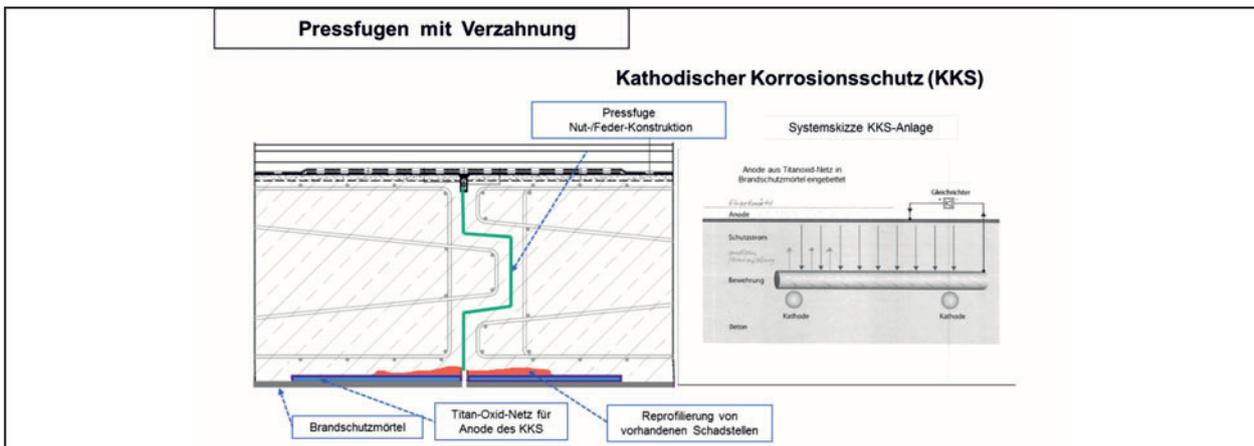


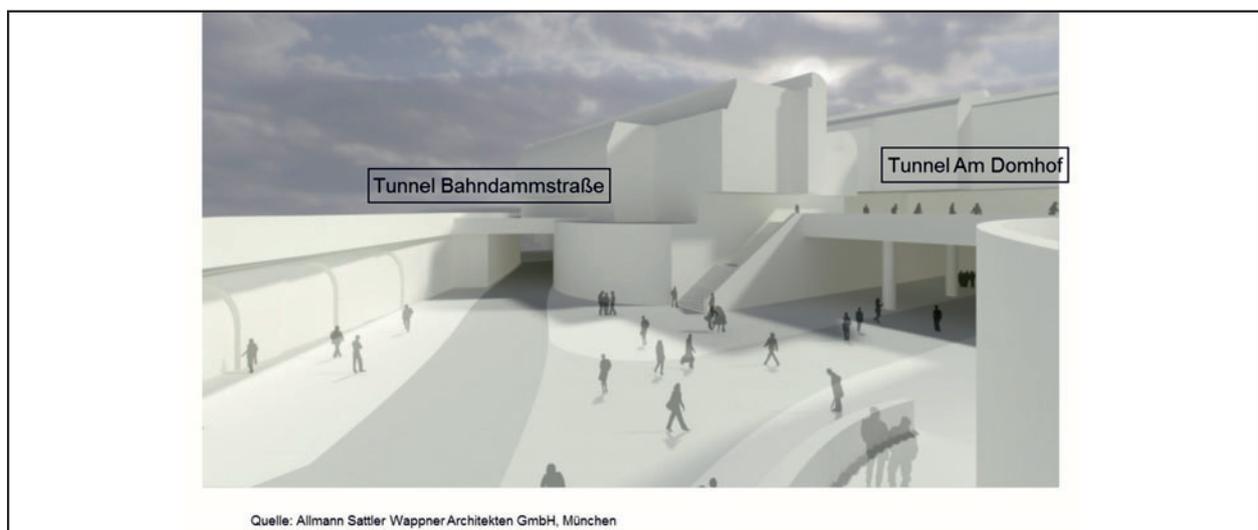
Bild 11: Betonsanierung im Deckenbereich mit KKS

gers durch einen Stahlbetondeckel. Er besteht aus zwei Röhren mit einer Breite von 12,20m. Hier sind die Betonsanierung und die Verbesserung des baulichen Brandschutzes mit umfangreichen Maßnahmen erforderlich. Auch dieser Tunnel erhält wegen der verkehrlichen Bedeutung nach einer Risiko -

betrachtung die erweiterte Sicherheitsausstattung nach RABT. Das vorhandene Betriebsgebäude neben dem Tunnel im Bereich der Grünflächen über dem Tunnel muss erweitert werden. Hier ist die architektonische Gestaltung und Begrünung eine interessante Architekturaufgabe.



**Bild 12:** Tunnelnachrüstung im Bereich des Kölner Doms



**Bild 13:** Städtebauliche Anforderungen bei der Tunnelnachrüstung

## 7 Ertüchtigung im Rahmen städtebaulicher Gestaltung

In den Jahren 2013 bis 2014 wurde die Generalsanierung des Tunnels „Am Domhof“ durchgeführt. Der Tunnel entstand durch die Überbauung mit dem Museum Ludwig und wurde nach Maßgaben des Hochbaus errichtet. Der Tunnel ist ca. 80 m lang und Teil der Tunnelgruppe am Dom (Bild 12 und 13).

Die bauliche und betriebliche Ertüchtigung des Tunnels musste im Rahmen der städtebaulichen Fördermaßnahme „Neugestaltung der östlichen Domumgebung“ im zeitlichen und räumlichen Zusammenhang mit anderen gestalterischen Baumaßnahmen umge-

setzt werden. Dabei war die Ausgestaltung des Tunnels und der betrieblichen Komponenten nicht nur von Funktionalitätserwägungen sondern auch vom Zusammenwirken mit den architektonischen Vorstellungen der Architekten Allmann Sattler Wappner geprägt, die den Architektenwettbewerb zur Stadt- raumgestaltung der Flächen und Bauwerke zwischen Hauptbahnhof und Domplatte gewonnen hatten und mit der Umsetzung beauftragt waren. Der hohe architektonische Anspruch bei der Tunnelertüchtigung war eine ganz besondere Herausforderung. Das Ergebnis ist ein Tunnel mit sehr ansprechender moderner Wertigkeit (Bild 14).

Ein weiteres Beispiel für die Besonderheiten städtischer Tunnel ist die Nord-Süd Fahrt. Der 190 m

lange Tunnel wurde 2005 durch den Neubau eines Kaufhauses überbaut. Das südliche Tunnelportal besticht durch die markante Architektur des transparenten gewölbten Gebäudes (Bild 15).

Auch der 590 m lange Rheinufertunnel mit zwei jeweils dreispurigen Tunnelröhren ist besonders. Er wurde 1979 gebaut, um die Kölner Altstadt mit der Rheinuferpromenade zu verbinden. Über dem Tunnel sind die Grünflächen und Flanierwege des Rheingartens angelegt.

Die unmittelbare Rheinnähe erforderte einen aufwendigen Hochwasserschutz. Große Hochwasserschutztore werden ab einem Rheinpegel von 9,80 m verschwenkt, um die Tunnelmünder wasserdicht zu verschließen. Bei höheren Pegeln muss der Tunnel zur Auftriebssicherheit überflutet werden. Daher liegt die 2005 erbaute Hochwasserschutzwand stadtsseitig hinter dem Tunnel. Die Wand schützt die Altstadt bis zu einem Pegel von 11,30 m (Bild 16).

## 8 Betrieb der Kölner Straßentunnel

Auch für die längeren Tunnel in Köln gab es bis 2012 keine ständige Überwachungsstelle. Erst als festgestellt wurde, dass die Brandmeldeanlage am Tunnel Kalk irreparabel war, wurde im Hinblick auf das hohe Gefährdungspotential und die geplante Generalsanierung als Sofortmaßnahme eine Videoanlage mit Lautsprechen sowie Tunnelsperranlagen eingebaut und eine Tunnelleittechnik installiert, um den sicheren Betrieb zu garantieren. Seitdem wird dieser Tunnel mit externem Wachpersonal in einer Tunnelwache, die provisorisch in einer Containeranlage untergebracht ist, 24 Stunden an 7 Tagen überwacht, um die Feuerwehr frühzeitig über Gefahrenzustände zu alarmieren und den Tunnel zu sperren.

Dieses ist der Kernbaustein für die Weiterentwicklung zu einer zeitgemäßen Tunnelleitzentrale, die längerfristig für ca. 12 Kölner Tunnel sicherheitstechnisch notwendig ist und die entsprechend dem Stand der Technik ausgerüstet wird (Bild 17).

Die Stadt Köln plant eine kombinierte Verkehrs- und Tunnelleitzentrale, die sowohl eine Überwachung und vor allem Steuerung des städtischen Hauptverkehrsnetzes als auch die Überwachung und Steuerung der schrittweise aufzuschaltenden Straßen-

tunnel entsprechend den Anforderungen der RABT ermöglicht.



Bild 14: Abbruch am Weltkulturerbe Dom mit umfangreicher Beweissicherung



Bild 15: Beispiel für Tunnel im Bereich einer Überbauung



Bild 16: Hochwasserschutztore im Rheinufertunnel



**Bild 17:** Betrieb der Kölner Straßentunnel - Tunnelwache

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

#### 2014

**B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen**

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

**B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen**

Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)**

Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle € 15,00

**B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem**

Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn € 18,50

**B 102: Adaptive ‚Tube-in-Tube‘-Brücken**

Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid € 18,00

**B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken**

Briebrecher, Städing € 14,00

**B 104: Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse**

Borrmann, Fischer, Dori, Wild  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 105: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke**

Schnellenbach-Held, Karczewski, Kühn  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 106: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken**

Freundt, Vogt, Böning, Michael, Könke, Beinersdorf € 17,00

**B 107: Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel**

Robertson, Bronstein, Brummermann € 16,00

**B 108: Fahrzeug-Rückhaltesysteme auf Brücken**

Neumann, Rauert € 18,50

**B 109: Querkrafttragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken**

Hegger, Herbrand € 17,00

**B 110: Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton**

Schnellenbach-Held, Peeters, Miedzinski  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 111: Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklung an Brücken**

Müller € 15,00

#### 2015

**B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken**

Kuhlmann, Maier, Ummenhofer, Zinke, Fischer, Schneider € 14,00

**B 113: Versagen eines Einzelelementes bei Stützkonstruktionen aus Gabionen**

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

**B 114: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln**

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

**B 115: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln**

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

**B 116: Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton**

Schnellenbach-Held, Peeters, Brylka, Fickler, Schmidt  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 117: Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells**

Thöns, Borrmann, Straub, Schneider, Fischer, Bügler  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 118: Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit**

Siegert, Holst, Empelmann, Budelmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 119: Untersuchungen zum Brandüberschlag in Straßentunneln**

Schmidt, Simon, Guder, Juknat, Hegemann, Dehn € 16,00

**B 120: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an einem vorgespannten Zweifeldträger**

Maurer, Gleich, Heeke, Zilch, Dunkelberg  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 121: Zerstörungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse**

Diersch, Taffe, Wöstmann, Kurz, Moryson  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 122: Gussasphalt mit integrierten Rohrregistern zur Temperierung von Brücken**

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski, Staack  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2016

### B 123: Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung

Geißler, Krohn € 15,50

### B 124: Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke

Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 125: Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit

Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thrö  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 126: Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur

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

### B 127: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden

Kuhlmann, Hubmann € 21,50

### B 128: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden

Ungermann, Brune, Giese € 21,00

### B 129: Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen

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

### B 130: Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags

Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 132: Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke

Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 133: Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit

Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 134: Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Erhaltungskonzepte von Straßenbrücken

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

## 2017

### B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden

Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton

Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

### B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken

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

### B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie

Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

### B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5

U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln

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

### B 142: Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken

Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brennberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2018

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

Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

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

Neumann, Brauer € 16,50

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

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

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

**Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG**  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)