

9. BASt-Tunnelsymposium

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 157

The logo for the Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) is displayed in a stylized, lowercase, green font with a white outline. The letters are bold and rounded, with the 'a' and 's' having a distinctive shape. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Erratum

Im Heft **B 157** der „Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen“ mit dem Titel:

9. BASt-Tunnelsymposium

muss im Innentitel folgende Korrektur vorgenommen werden:

9. BASt-Tunnelsymposium vom 27. Januar 2021

Tagungsband

Aufgrund der Corona-Pandemie konnte das Symposium nicht wie geplant im November 2020 in Bergisch Gladbach stattfinden.

Im Januar 2021 wurde es als rein digitale Veranstaltung durchgeführt.

Wir bitten um Beachtung.

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG, Bremen

Januar 2021

9. BASt-Tunnelsymposium

vom 17. November 2020

Tagungsband

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 157

bast

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

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

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

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

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

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

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

Impressum

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

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

ISSN 0943-9293

ISBN 978-3-95606-536-1

Bergisch Gladbach, November 2020

Kurzfassung – Abstract

9. BAST-Tunnelsymposium

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. Neben der Sicherheit und Verfügbarkeit wird erwartet, dass insbesondere auch die Themen Digitalisierung, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit in der Zukunft den Tunnelbau- und Tunnelbetrieb (weiter) prägen werden.

Mit diesem Tagungsband sollen die neuesten Erkenntnisse zu diesen Zukunftsthemen für die Verwendung in der alltäglichen Praxis nähergebracht werden.

Nach einem allgemeinen Überblick zum Stand von aktuellen Bau-, Instandsetzungs- und Nachrüstungsmaßnahmen im deutschen Fernstraßentunnelnetz wird im zweiten Themenblock, der den Betrieb und die Erhaltung fokussiert, auf den Einsatz von BIM im Rahmen der Tunnelerhaltung sowie den Einfluss von Nutzungsdauern auf die Lebenszykluskosten von Tunneln eingegangen. Der Themenblock schließt mit der Vorstellung der geothermischen Nutzung von Bergwasser für einen nachhaltigen Betrieb am Grenztunnel Füssen.

Im Rahmen der Beiträge zum Themenblock „Erhöhung der Verfügbarkeit“, werden Konzepte vorgestellt, die es ermöglichen die Verfügbarkeit im Ereignisfall zu optimieren sowie die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen infolge von Modernisierungen beziehungsweise Erneuerungen strategisch zu berücksichtigen. Der letzte Beitrag in diesem Block stellt Ihnen das Ergebnis des Forschungsprojektes „RITUN – Resiliente Straßentunnel“ vor.

Abgerundet wird die Veranstaltung mit Praxisbeispielen zur Nachrüstung von Tunneln unter Verkehr. Am Engelbergbasistunnel bei Leonberg und am Rathaustunnel in Lüdenscheid wird die Bandbreite zu treffender Maßnahmen für die Aufrechterhaltung

eines sicheren Verkehrsablaufs während umfangreicher Ertüchtigungsarbeiten dargestellt.

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

9th BAST-Tunnelsymposium

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 congested road network. Tunnels are neuralgic points in this network. It is therefore important to ensure optimum safety for the user, but at the same time to minimize disruption to traffic flow due to maintenance or closure of the tunnel tubes. In addition to safety and availability, it is expected that the topics of digitalization, sustainability and economic efficiency will (further) shape tunnel construction and operation in the future.

These conference proceedings are intended to bring the latest findings on these topics closer for use in everyday practice.

After a general overview of the status of current construction, maintenance and retrofitting measures in the German trunk road tunnel network, the second block of topics, which focuses on operation and maintenance, deals with the use of BIM in tunnel maintenance and the influence of service life on the life cycle costs of tunnels. The thematic block concludes with the presentation of the geothermal use of mountain water for sustainable operation at the tunnel Füssen.

In the context of the contributions to the thematic block “Increasing Availability”, concepts are presented that make it possible to optimize availability in the event of an incident and to strategically consider the macroeconomic effects resulting from modernization or renewal. The last article in this block presents the results of the research project RITUN – Resilient Road Tunnels.

The conference proceedings are rounded off with practical examples of retrofitting tunnels under

traffic. At the Engelberg Base Tunnel near Leonberg and the Rathaus Tunnel in Lüdenscheid, the range of measures to be taken to maintain a safe traffic flow during extensive retrofitting work is presented.

At this point we would like to thank all authors who contributed to this successful event.

Inhalt

Tunnelbau und -betrieb in Deutschland – aktuelle Entwicklungen und Trends

Wolf-Dieter Friebe 7

BIM für die Erhaltung von Straßen- tunneln – Zielstellung, Modellansätze und Anforderungen

Hendrik Wahl, Götz Vollmann,
Markus Thewes, Markus König,
Werner Riepe & Ferdinand Weißbrod 11

Einfluss der Nutzungsdauer auf die Lebenszykluskosten von Tunnelbau- werken

Anne Lehan & Markus Thewes 18

Nachhaltiger Tunnelbetrieb – Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen

Esther Schreck 25

Strategien zur Optimierung der Verfügbarkeit im Ereignisfall

Kalliopi Anastasiadou, Markus Deublein,
Franziska Roth & Christoph Zulauf 28

Modernisierung und Erneuerung von Ingenieurbauwerken: Berücksichtigung gesamtwirtschaftlicher Auswirkungen bei der strategischen Planung

Christoph Walther, Annette Kindl &
Andreas Stadler 33

Leitfaden zur Steigerung der Resilienz von Straßentunneln

Bernhard Kohl, Harald Kammerer &
Bernhard Klampfer 41

Ertüchtigung des A 81 Engelberg- basistunnels unter Aufrechterhaltung des Verkehrs

Markus Gey 47

L 530 Rathaustunnel Lüdenscheid – Gesamtinstandsetzung unter erschweren Bedingungen

Dirk Lange, Stephanie Schmitz &
Nikolai Weber 53

Friebel, Wolf-Dieter, Dipl.-Ing.

Referat „Brücken, Tunnel und sonstige
Ingenieurbauwerke“

Bundesministerium für Verkehr und digitale
Infrastruktur, Berlin, Deutschland

Tunnelbau und -betrieb in Deutschland – aktuelle Entwicklungen und Trends

1 Zahlen, Daten, Fakten

Brücken und Tunnel sind herausragende Bauwerke unseres Straßen- und Schienennetzes – architektonisch, technisch und symbolisch. Sie sind wichtige Bindeglieder unserer Verkehrswege und führen die Menschen in unserem Land zusammen. Sie überwinden natürliche Hindernisse oder garantieren kreuzungsfreie Querungen. Kurz: Sie machen Mobilitätsströme schneller, sicherer und effizienter.

Brücken und Tunnel leisten dadurch einen zentralen Beitrag zu Wachstum, Wohlstand und Arbeit in Deutschland. Denn: Wohlstand braucht Wege. Das ist ein ökonomisches Grundprinzip.

Unsere rund 40.000 Brücken an Bundesfernstraßen und über 270 Kilometer Straßentunnel in

Deutschland haben dabei eine absolute Schlüsselstellung und bei den Investitionen für Modernisierungen oberste Priorität. Viele Bauwerke leisten oft ein Mehrfaches dessen, was wir uns bei Planung und Bau vorstellen konnten. Sie müssen daher nicht nur substanziell erhalten, sondern für das Verkehrswachstum der Zukunft ertüchtigt werden.

Das ist ein wichtiges Signal und zeigt: Modernisierung und Erhalt sind zentrale Bausteine für die Zukunftsfähigkeit unserer Infrastruktur, die nur in enger Partnerschaft von Verwaltung, Wirtschaft und Öffentlichkeit erfolgreich sein können. 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.

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 420 Tunnel mit einer Gesamtröhrenlänge von rund 360 km verweisen. Davon befinden sich 273 Tunnel im Bereich der Bundesfernstraßen mit einer Gesamtröhrenlänge von über 270 km in der Baulast des Bundes (Bild 1). Die meisten Straßentunnel befinden sich topografisch bedingt im Süden des Landes, insbesondere in Baden-Württemberg, aber auch in Bayern. Weitere 28 Tunnel befinden sich

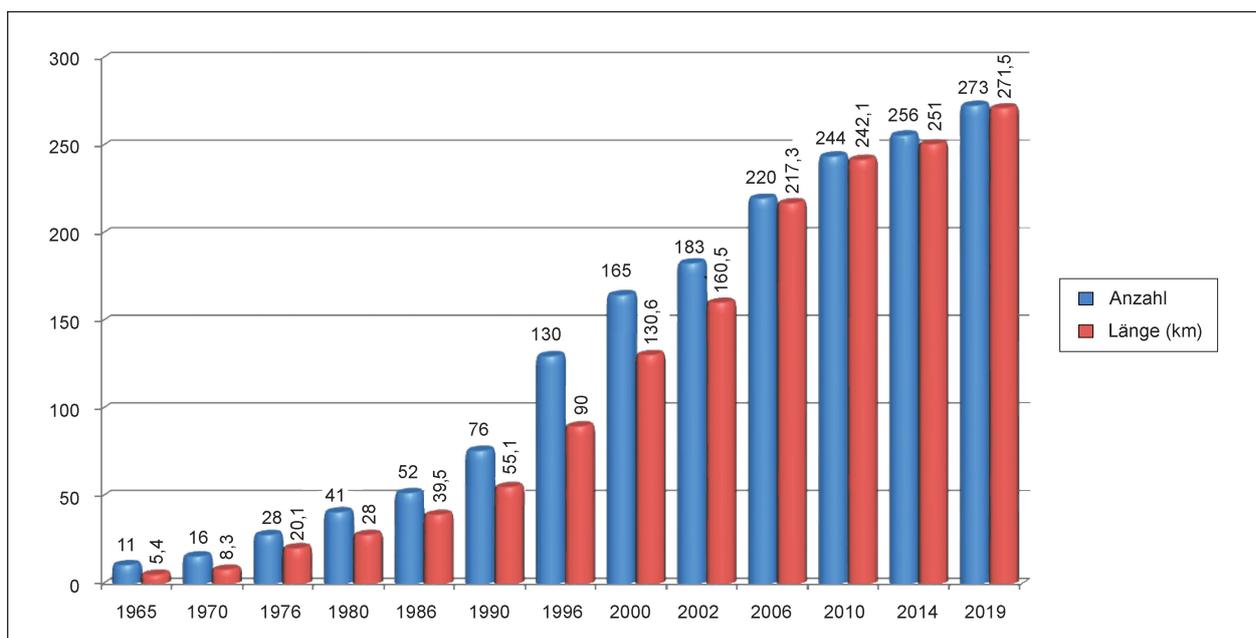


Bild 1: Tunnel der Bundesfernstraßen in Baulast des Bundes (BMVI)

derzeit im Bau, für weitere 70 Tunnel laufen konkrete Planungsschritte.

Viele bestehende Tunnel wurden in der Zeit nach 1990 gebaut, sodass das durchschnittliche Alter der Tunnel nunmehr bei etwa 25 Jahren liegt. Die durchschnittliche Länge der Tunnelröhren beträgt aktuell rund 660 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 und Tunnelerhaltung

Als Reaktion auf die Tunnelkatastrophen im benachbarten Ausland Ende des letzten Jahrhunderts wurde ein sicherheitstechnisches Nachrüstungsprogramm durchgeführt. Die dafür vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) gemeinsam mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) erarbeitete Prioritätenliste wurde im Wesentlichen umgesetzt. Mit dem Nachrüstprogramm wurden sowohl bautechnische als auch betriebstechnische Maßnahmen realisiert.

Neben einem Sofortprogramm, bei dem sicherheitstechnische Verbesserungen, wie z. B. die Fluchtwegkennzeichnungen, die Brandnotbeleuchtungen,



Bild 2: Brandversuch am Schönbuchtunnel bei Herrenberg (A 81) nach erfolgter Nachrüstung (Quelle: RP Stuttgart)

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, des Vorhandenseins und der Anordnung von Rettungstollen 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 betriebstechnischen Ausstattung von zum Teil weniger als 10 Jahren sind inzwischen wieder Instandsetzungen oder Erneuerungen bereits fertiggestellter Tunnel zu planen bzw. befinden sich bereits in der Umsetzung, obgleich die erreichten Ausstattungsmerkmale der betriebstechnischen Ausstattung weitgehend den geltenden Sicherheitsanforderungen entsprechen.

Im bautechnischen Tunnelbau sind die notwendigen Erhaltungsmaßnahmen häufig durch Schäden am Beton aufgrund von Chloriden geprägt. Die großen Erhaltungsmaßnahmen sind vielfach unter laufendem Verkehr mit aufwendigen Verkehrssicherungsmaßnahmen durchzuführen. Ein Beispiel ist hierfür der Engelbergbasistunnel, bei dem aufgrund des hohen Verkehrs 6 Fahrsteifen während fast der gesamten Baumaßnahme von mehreren Jahren aufrechterhalten werden müssen.

3 Aktuelle Entwicklungen

Fußend auf den vorliegenden Erfahrungen aus dem Inland- und Ausland hat das BMVI in Zusammenarbeit mit der BAST und dem Deutschen Ausschuss für Unterirdisches Bauen e. V. (DAUB) 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. In 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.

Beim Neubau des Albaufstiegs im Zuge der A 8 wird ein Pilotprojekt mit Wärmetauschern mittels Absorberrohren geplant, die in der Innenschale der zu bauenden Tunnel verlegt werden.

Das BMVI erhofft sich durch den Einsatz von Geothermie weitere Möglichkeiten, die Sicherheit der Tunnel z. B. durch Heizen der Vorportalbereiche 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“ [1] erarbeitet. Eine zutreffende 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 Lebenszyklusbetrachtungen von Straßentunneln

Im Rahmen einer nachhaltigen Kostenplanung ist die Kenntnis über die Lebenszykluskosten eines Tunnels und dessen betriebstechnische Ausstattung unabdingbar. In der DAUB-Empfehlung für die „Ermittlung von Lebenszykluskosten für Straßentunnel“ [2] wird eine systematische Vorgehensweise zur Ermittlung und Analyse der Lebenszykluskosten auf Grundlage der aktuellen Forschung beschrieben. Unter Berücksichtigung der technischen, wirtschaftlichen und sozioökonomischen Einflussfaktoren lässt sich die Nutzungsdauer und deren Kosten ermitteln.

3.4 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 [3] 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, sodass 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.

Die Erfahrungen mit der Anwendung des Leitfadens sind durchweg positiv und verhindern bzw. reduzieren Vertragsstreitigkeiten auf der Baustelle.

3.5 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 wird es bei größeren Bauvorhaben bereits eingesetzt. 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 im Bau befindliche 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 – bspw. der tatsächlichen Bauteildicken zur Dokumentation in einem Bestandsmodell – zur Auswertung verwendet werden.

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

Der Deutsche Ausschuss für Unterirdisches Bauen (DAUB) hat zum Thema digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten die bemerkenswerte Empfehlung „BIM im Untertagebau“ [4] herausgegeben, die das Thema umfassend beschreibt. Der Arbeitskreis besteht aus Vertretern der Bauherren, der Bauindustrie und der Forschung und Planung.

Die BAST hat zum Thema BIM das Forschungsprojekt „Building Information Modeling (BIM) für Tunnel“ [5] beauftragt, das sich mit den Fragen BIM im Tunnelbau, mit dem Schwerpunkt der Erhaltungsphase beschäftigt.

Literatur

- [1] THEWES, M.; HOFMANN, P. et al.: Verfahren für Kostenansätze von Straßentunneln (Fachaufsätze im Tunnelbautaschenbuch 2019 und 2020)
- [2] Ermittlung von Lebenszykluskosten für Straßentunnel, DAUB AK (www.daub-ita.de)
- [3] Leitfaden für die Behandlung von zeitgebundenen Kosten (ZGK) im Tunnelbau, BMVI (www.bast.de)
- [4] BIM im Untertagebau, DAUB AK (www.daub-ita.de)
- [5] Forschungsvorhaben „Building Information Modeling (BIM) für Tunnel“ (in Bearbeitung)

Wahl, Hendrik, M. Sc.
 Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und
 Baubetrieb
 Ruhr-Universität, Bochum, Deutschland

Vollmann, Götz, Dr.-Ing.
 Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und
 Baubetrieb
 Ruhr-Universität, Bochum, Deutschland

Thewes, Markus, Prof. Dr.-Ing.
 Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und
 Baubetrieb
 Ruhr-Universität, Bochum, Deutschland

König, Markus
 Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen
 Ruhr-Universität, Bochum, Deutschland

Riepe, Werner, Dipl.-Ing.
 BUNG Ingenieure AG, Heidelberg, Deutschland

Weißbrod, Ferdinand, M. Eng.
 BUNG Ingenieure AG, Heidelberg, Deutschland

BIM für die Erhaltung von Straßentunneln – Zielstellung, Modellansätze und Anforderungen

Kurzfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts FE 15.0623/2016/RRB „BIM im Tunnelbau“ werden derzeit durch die Autoren dieser Veröffentlichung die Grundlagen für ein BIM-basiertes Betriebsmodell von Straßentunneln entwickelt. Dies inkludiert die Berücksichtigung von bereits bestehenden, modelltheoretischen Grundsätzen sowie eine ergänzende Erfassung von Anforderungen von Bauherrn und Betreibern unter Berücksichtigung der betrieblichen Aspekte während des Lebenszyklus.

1 Einleitung

Der Betrieb und der Unterhalt eines Tunnelbauwerks des Bundesfernstraßennetzes stellen eine hohe Anforderung für das Betriebspersonal bzw. den Betreiber dar. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der stets wachsenden Anforderungen an die Aufrechterhaltung bzw. Erhöhung seiner Verfügbarkeit im Netz sowie der ökonomischen Opti-

mierung im Hinblick auf die Lebenszykluskosten des Bauwerks. Eine konsequente Anwendung der BIM-Methodik (Building Information Modeling) kann dabei theoretisch einen sinnvollen und zielgerichteten Beitrag leisten, da hierdurch ein vollständiges Modell des Bauwerks mit allen verbauten technischen Elementen und den für die Betreiberaufgaben notwendigen Informationsgrundlagen zur Verfügung gestellt wird.

Die Auswertung bisheriger Pilotprojekte und Forschungsergebnisse zeigt, dass der Fokus derartiger Applikationen bislang vornehmlich auf der Planungs- und Ausführungsphase der Bauwerke lag. Da die resultierenden Datenstrukturen jedoch nur bedingt für den Betriebszeitraum anwendbar sind, ist die Entwicklung neuer Modellierungsregeln auf Basis spezifischer Informationsanforderungen für den Betrieb notwendig, um sowohl einen verlustfreien Übergang von der Bau- in die Betriebsphase zu gewährleisten als auch die übergeordnete Zielsetzung einer Optimierung der Betriebsphase zu erreichen.

In der Folge werden die hierfür notwendigen Grundlagen, erste Modellansätze und sich ergebende Anforderungen diskutiert und vorgestellt.

2 Grundlagen des Informationsmanagements mit BIM

2.1 BIM-Referenzprozess

Im Zusammenhang mit Straßentunnelbauwerken beschreibt der Begriff des BIM eine kollaborative Arbeitsmethodik auf Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks, welche die konsistente Erfassung und Verwaltung von Informationen und Daten während des Lebenszyklus ermöglicht. Ziele und Herangehensweisen für eine ganzheitliche und flächendeckende Anwendung von BIM wurden erstmals im „Stufenplan Digitales Bauen und Betreiben“ vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) definiert, in dem der Einsatz von BIM ab 2020 für neu zu planende Vorhaben zwingend vorgeschrieben wird. [1]

Der Stufenplan beinhaltet ebenfalls die Spezifizierung eines übergeordneten BIM-Referenzprozesses (siehe Bild 1) auf Basis der HOAI-Leistungsphasen. Zur Ausschreibung einer BIM-Leistung sind dazu vom Auftraggeber sogenannte Informationsanforderungen (AIA) festzulegen, in denen genauer

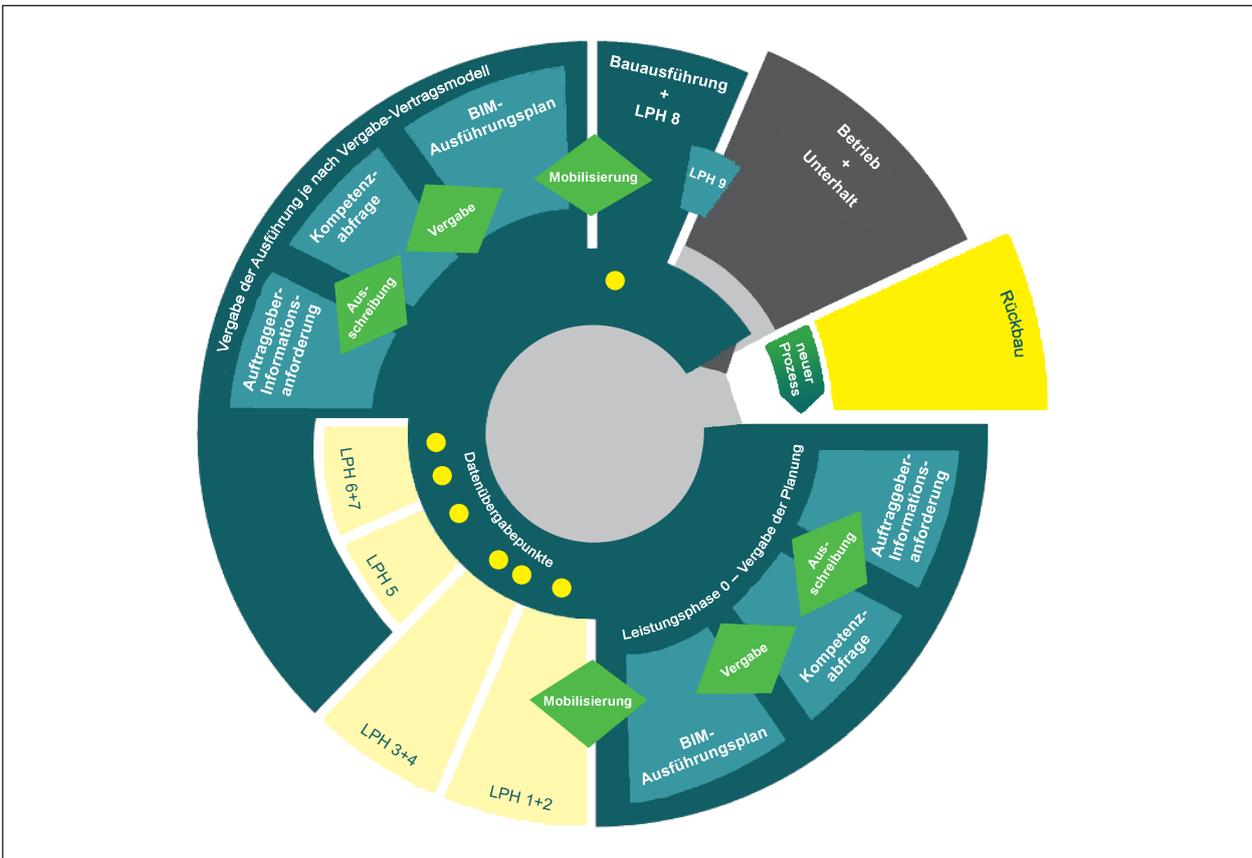


Bild 1: BIM-Referenzprozess entlang der HOAI-Leistungsphasen [2]

zu spezifizieren ist, welche Daten zu welchem Zeitpunkt benötigt werden. Er ist zudem verantwortlich für die Erstellung eines BIM-Abwicklungsplan (BAP), in dem die Prozesse zur Herstellung der geforderten Daten festgelegt sind, sowie für die Überprüfung einer vorhandenen BIM-Kompetenz beim Auftragnehmer. Die gelben Punkte in Bild 1 stellen den Zeitpunkt zur Übergabe der Daten an den Auftraggeber während der unterschiedlichen Leistungsphasen dar.

Grundsätzlich müssen auch Modelle für die Betriebsphase diesen Vorgaben genügen. Dies gilt insbesondere, um das Handover – also die Modellübergabe von der Bau- zur Betriebsphase – reibungsfrei und ohne Wissensverlust realisieren zu können. Hierzu ist es notwendig, dass eine einheitliche Vorgehensweise über alle Leistungsphasen hinweg eingehalten wird.

2.2 Hierarchie der Informationsanforderungen

Informationsmodelle für die Planungs- und Ausführungsphase und den Betrieb sind zuallererst auf

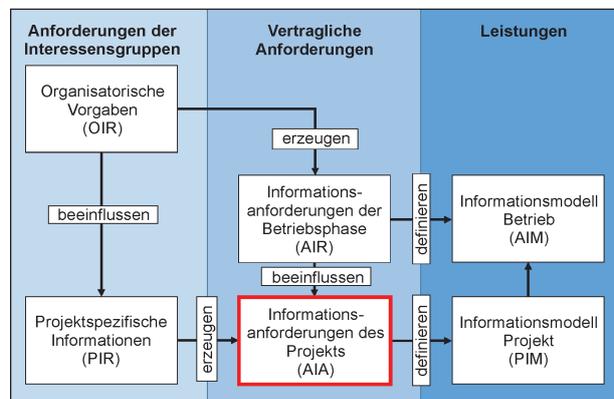


Bild 2: Hierarchie der Informationsanforderungen in Anlehnung an [3]

Grundlage der Anforderungen aller beteiligten Interessensgruppen zu erstellen. In Anlehnung an die DIN EN ISO 19650-1 [3] setzen sich die Informationsanforderungen dabei aus drei Typen zusammen (siehe Bild 2):

- Organisatorische Informationsanforderungen (engl.: organisation information requirements, OIR); basieren auf den strategischen Zielen des Auftraggebers (bspw. Optimierung des Unterhalts).

Organisatorische Vorgaben	Administrative Randbedingungen	Strategische Ziele	
		Organisationsstruktur	
	Betriebliche Randbedingungen	Aktivitäten	Maßnahmen der Bauwerkserhaltung
			Instandhaltung der betriebstechnischen Ausstattung
			Betrieb
	Regulative Randbedingungen	Dokumentation	
Zustands- und Datenerfassung			

Bild 3: Übersicht der organisatorischen Vorgaben, die sich maßgeblich aus administrativen, betrieblichen und regulativen Randbedingungen zusammensetzen

- Projekt-Informationsanforderungen (engl.: project information requirements, PIR); also notwendige Informationen um Bauvorhaben zu realisieren (bspw. örtliche Randbedingungen).
- Asset-Informationsanforderungen (engl.: asset information requirements, AIR), notwendige Informationen für den Betrieb (bspw. objektspezifische Informationen).

Dabei wird deutlich, dass die Informationsanforderungen des Projektes in Form der AIA (Auftraggeber-Informationsanforderungen), welche die informationsbezogenen und inhaltlichen Anforderungen des Auftraggebers an die Abwicklung stellen, eine zentrale Rolle bei der Umsetzung von BIM einnehmen.

3 Betreiberanforderungsanalyse

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde für das hier vorgestellte Projekt ein Ansatz entwickelt, der zunächst eine Analyse der Betreiberanforderungen vorsieht. Dieser beinhaltet dabei sowohl in einem ersten Schritt die Analyse von organisatorischen Vorgaben als auch die darauf aufbauende Ableitung von Informationsanforderungen für spezifische Anwendungsfälle eines BIM-Informationsmodells.

Im Allgemeinen wurden dazu entsprechende Regelwerke, Richtlinien und Empfehlungen analysiert. Die Erfahrungen im Umgang mit aktuellen Bauwerken des Bundesfernstraßennetzes zeigen jedoch auch, dass die Anforderungen über die rein regulativen Vorgaben hinausgehen müssen, um spezifische Eigenheiten des Betriebs vor Ort abbilden zu können. Deshalb wurden im Rahmen der

Analyse auch Experteninterviews mit Vertretern von Landesbehörden durchgeführt, um sowohl die Randbedingungen als auch den spezifischen Bedarf für ein BIM-basiertes Betriebskonzept zu erfassen.

3.1 Organisatorische Vorgaben

Zur Untersuchung der organisatorischen Vorgaben, welche für ein BIM-basiertes Betriebskonzept von Straßentunnel zu berücksichtigen sind, wurden administrative, betriebliche und regulative Randbedingungen betrachtet (siehe Bild 3).

Nachfolgend werden die einzelnen Randbedingungen zusammenfassend dargestellt.

3.1.1 Administrative Randbedingungen

Maßgeblich für die Ausrichtung einer Organisation ist die strategische Zielsetzung. Die RABT 2006 [4] in Verbindung mit den EABT-80/100 [100] definiert als übergeordnete Aufgabe die Gewährleistung eines sicheren Betriebs von Straßentunneln.

Diesbezüglich werden Anforderungen an die Organisationsstruktur gestellt, welche sich aus dem Spannungsfeld von Verwaltungsbehörden, Tunnelmanagern, Untersuchungsstellen, Sicherheitsbeauftragten und Tunnelbetriebsstellen ergeben. Bild 4 zeigt die Beziehungen zwischen den Organisationseinheiten und gibt zudem die entsprechenden Aktivitäten an.

Hinsichtlich eines ganzheitlichen Informationsmanagementprozesses sind auch weitere Akteure (hier als Beispiel der Service) zu berücksichtigen, welche in diesem Fall die Organisationseinheiten

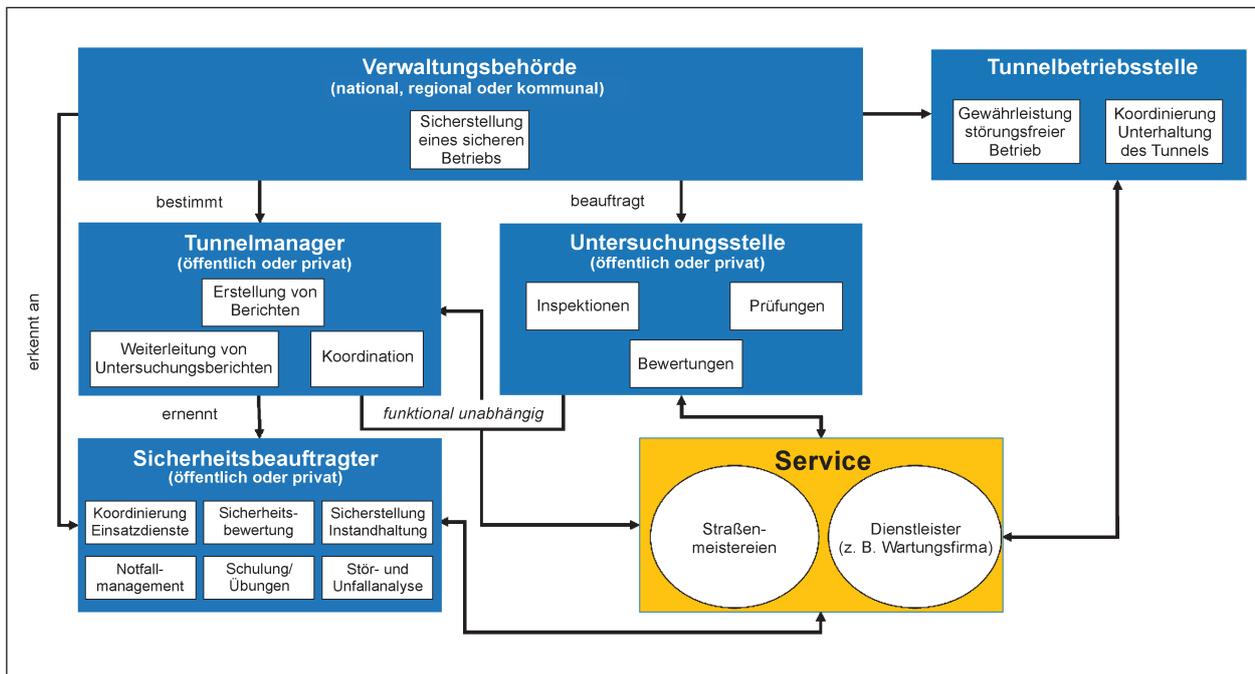


Bild 4: Organisationsstruktur des Tunnelbetriebs mit der Bild beispielhafter Schnittstellen zum Service und zu den Einsatzdiensten gemäß RABT 2006 [4] in Verbindung mit den EABT 80-100 [5]

bei Aufgaben bezüglich der bauwerksbezogenen Erhaltung und Instandhaltung der betriebstechnischen Ausstattung unterstützen.

3.1.2 Betriebliche Randbedingungen

Die Aktivitäten der Organisationseinheiten resultieren aus den Phasen der Erhaltung (bauwerksbezogen) sowie der Instandhaltung und dem Betrieb (ausstattungsbezogen), wobei die Einteilung in Anlehnung an die DAUB-Empfehlung zur Ermittlung von Lebenszykluskosten [6] erfolgt. Somit stellen diese gemäß DIN EN ISO 19650-1 [3] auslösende Ereignisse dar, durch die sich der Zustand des Bauwerks oder der Ausstattung in der Regel verändert, was wiederum einen Informationsaustausch hervorruft. Aus den Aktivitäten resultierende betriebliche Aspekte, wie bspw. Wartungszyklen und korrespondierende Kosten, können durch das digitale Informationsmanagement aufeinander abgestimmt und somit optimiert werden.

3.1.3 Regulative Randbedingungen

Unabhängig vom Einsatz der BIM-Methodik werden in gültigen Regelwerken, Richtlinien und Empfehlungen (wie bspw. die DIN 1076 [7] in Verbindung mit den RI-EBW-Prüf [8]) auch Anforderungen an die Dokumentation (Bauwerksunterlagen, Bestandsun-

terlagen etc.) sowie die Erfassung und Strukturierung von Daten (u. a. Zustandsdaten, Bauwerksdaten) definiert.

Um zu verhindern, dass die Informationen aus unterschiedlichen Systemen kopiert und konvertiert werden müssen und ggf. sogar ein Mehraufwand bei der Verwaltung dieser Informationen entsteht, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes INTERLINK [9] ein Ansatz zur Verlinkung unterschiedlicher Informationsquellen entwickelt. Die Datenhaltung erfolgt dadurch dezentral und Informationen der ASB-ING [10] bzw. Daten aus dem Programmsystem SIB-Bauwerke können über die Verlinkung ins Modell integriert werden.

3.2 Informationsanforderungen der Betriebsphase für spezifische Anwendungsfälle

Die Ableitung von Anwendungsfällen erfolgte maßgeblich auf Grundlage einer Diskussion im Rahmen der durchgeführten Experteninterviews. Dabei wurden zunächst allgemeine Ziele der Organisation und daraus ableitbare BIM-Ziele abgefragt. In einem weiteren Schritt wurden dann aktuelle Herausforderungen während der Betriebsphase sowie potenzielle Chancen diskutiert, woraufhin entsprechende BIM-Anwendungsfälle abgeleitet wurden,

die Aufgaben und Lieferleistungen im Zusammenhang mit dem digitalen Betriebsmodell beschreiben. Dabei wurden entsprechend Gesprächspartner aus allen Organisationseinheiten sowie ergänzend unterstützende Akteure (Straßenmeistereien, Wartungsfirmen) befragt.

3.2.1 BIM-Ziele, Herausforderungen und Chancen

Neben dem übergeordneten strategischen Ziel der Gewährleistung eines sicheren Straßentunnelbetriebs (siehe Kapitel 3.1.1) wird grundlegend eine hohe Verfügbarkeit der Tunnelbauwerke angestrebt, wobei das Optimierungspotenzial insbesondere bei der Planung von Instandhaltungsmaßnahmen gesehen wird. Nachfolgend sind die daraus resultierenden BIM-Ziele hinsichtlich der Instandhaltung als Ergebnis der Interviews zusammengefasst. Weitere Aspekte, wie bspw. das Notfallmanagement sind hier nicht aufgelistet, werden jedoch im Forschungsprojekt ebenfalls berücksichtigt.

- Einheitlich strukturierte Bestandsdokumentation zur effizienteren Verwaltung von Betriebsdaten,
- Auswertung von Betriebsdaten, bspw. durch Verknüpfung mit Modulen/Tools,
- Reduzierung des Aufwands zur Dokumentenverwaltung durch Digitalisierung von Prozessen (bspw. Wartung auf Grundlage digitaler Arbeitskarten und Verknüpfung mit dem Modell),
- Unterstützung bei der Abrechnung von fremdvergebenen Leistungen,
- Prüfungen hinsichtlich betrieblicher Belange bereits früh in der Planungsphase.

Die Erfahrungen aus der Praxis zeigen dabei, dass derzeit insbesondere durch Mangel an Personal die Möglichkeiten zur Optimierung der Planung von Instandhaltungsmaßnahmen beschränkt sind. Ein erheblicher Mehraufwand besteht dabei auch aufgrund doppelt durchgeführter Arbeiten, wie beispielsweise dem Erstellen von Listen sowie der Prüfung und Sortierung von Dokumenten.

3.2.2 BIM-Anwendungsfälle für ein Betriebsinformationsmodell

Zunächst sind mit Abschluss der Bereitstellungsphase (Planung, Bau und Ausstattung) die relevan-

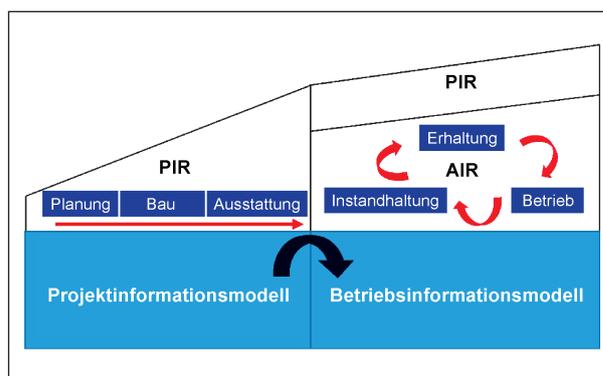


Bild 5: Handover zwischen Projekt- und Betriebsphase eines Straßentunnels in Anlehnung an DIN EN ISO 19650-1 [3]

ten Informationen aus dem daraus hervorgehenden As-built-Modell in das Modell für die Betriebsphase zu überführen. Dabei ist eine vollständige Übernahme der Informationen aus der Projektphase nicht zu empfehlen, da es das Betriebsinformationsmodell unnötig überladen könnte. Vielmehr sind unter Berücksichtigung der in den AIA spezifizierten BIM-Anwendungsfälle die erforderlichen Informationen aus dem As-built-Modell zu transferieren und entsprechend zu ergänzen (siehe Bild 5, mit Angabe der auslösenden Ereignisse für den Informationsaustausch). Die Erstellung des Betriebsmodells ist somit eine eigene, abzugrenzende Aufgabe bzw. Lieferleistung und somit als einzelner Anwendungsfall zu betrachten, wobei dieser auch die Verwaltung des Modells beinhalten sollte.

Bei Bestandsbauwerken sind Informationen für das Betriebsmodell direkt aus den korrespondierenden Bauwerksunterlagen abzuleiten. Ergänzend dazu kann die geometrische Modellierung durch Photogrammetrie oder Laserscanning erfolgen, wobei der Bedarf im Vorfeld projektspezifisch zu prüfen ist.

In Tabelle 1 werden auf Grundlage der ermittelten BIM-Ziele aus Kapitel 3.2.1 und unter Berücksichtigung der betrieblichen Anforderungen die wichtigsten von den Autoren ermittelten BIM-Anwendungsfälle für den Betriebszeitraum von Straßentunneln dargestellt, verknüpft mit beispielhaften jeweils korrespondierenden Informationsanforderungen. Dabei können geometrische und alphanumerische Informationen direkt im Modell als Datentyp hinterlegt werden, sodass diese über Schnittstellen bspw. von Analysetools verarbeitet werden können. Zudem besteht die Möglichkeit, Dokumente in einer Cloud zu hinterlegen und die URL entsprechend mit dem Modell bzw. den einzelnen Objekten zu verknüpfen.

BIM-Anwendungsfall	Informationsanforderungen zur Umsetzung		
	Geometrische Informationen	Semantische Informationen	Dokumente
Zustandsorientierte Bewertung einzelner Objekte zur Instandhaltungsplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Koordinaten 	<ul style="list-style-type: none"> • Anlagenzustand • Betriebsstunden • Nutzlebensdauer • Funktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Datenblätter • Arbeitskarten
Dokumentenmanagement	I. d. R. nicht relevant	<ul style="list-style-type: none"> • Bezeichnung • Inhalt 	Strukturierung der Dokumente und Verlinkung mit dem Modell → Verfügbar über Plattform Bspw. Pläne, Bestands- und Arbeitskarten etc.
Unterstützung der Kostenplanung während des Betriebs	I. d. R. nicht relevant	<ul style="list-style-type: none"> • Objektkosten • Zyklen/Intervalle 	<ul style="list-style-type: none"> • Wartungsvertrag
Aufbau einer Störfalldatenbank mit Informationen zu vergangenen Störfällen und den Lösungen zur Behebung	I. d. R. nicht relevant	<ul style="list-style-type: none"> • Datum Störung • Datum Lösung • Art der Maßnahme 	<ul style="list-style-type: none"> • Störfallliste* • Mängelliste*
Verortung von Objekten, bspw. für den effizienten Austausch abgekündigter Produkte	<ul style="list-style-type: none"> • Koordinaten 	<ul style="list-style-type: none"> • Klasse • Typbezeichnung • GUID • Anzahl • Einbaudatum • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Pläne • Bestandskarten

* kann aus Informationen abgeleitet werden

Tab. 1: Wichtige BIM-Anwendungsfälle bzw. jeweilige Zwecke, für die Daten und Informationen erstellt und verwendet werden

Es wird deutlich, dass betriebliche Belange keinen hohen geometrischen Detaillierungsgrad einzelner Objekte erfordern, sondern in der Regel die jeweiligen Koordinaten ausreichen. Diese Anforderung wurde auch im Rahmen der Experteninterviews entsprechend benannt. Hinsichtlich der semantischen Informationsanforderungen des Betriebs, ist zwischen statischen und dynamischen Informationen zu unterscheiden. So können bspw. Typbezeichnungen oder relevante Angaben aus den Produktdatenblättern im Rahmen des „Handovers“ im Betriebsmodell hinterlegt werden (statische Informationen), während z. B. dynamische Informationen über Störfälle oder zustandsbezogene Daten durch die jeweiligen Ereignisse ausgelöst werden und während der Betriebsphase entsprechend hinzuzufügen sind (siehe Kapitel 3.1.2).

4 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Betreiberanforderungsanalyse konnten Anwendungsfälle für den Betrieb von Stra-

ßentunnel sowohl auf Grundlage der organisatorischen Vorgaben als auch den betrieblichen Belangen aus der Praxis ermittelt werden. Für die abgeleiteten BIM-Anwendungsfälle wurden beispielhaft Informationsanforderungen spezifiziert. Im weiteren Projektverlauf sind nun die Informationsanforderungen in einem sog. Information Delivery Manual zu erfassen, in dessen Rahmen die verschiedenen Anwendungsfälle innerhalb eines BIM-basierten Betriebskonzeptes als eine übergreifende „Process Map“ dargestellt sind. Parallel dazu wird ein komplementäres Datenmodell auf Basis des IFC-Standards entwickelt, welches eine Erweiterung um wesentliche Elemente der Tunnelbauwerke und Tunnelausstattung für die Betriebsphase darstellen soll.

Die exemplarische Umsetzung der Ergebnisse dieses Forschungsprojektes wird an einem geeigneten Bestandsbauwerk demonstriert. Dafür erfolgt auch eine Verifizierung der Funktionalitäten des BIM-Modells durch die exemplarische Anwendung der im Laufe des Projekts weiter zu spezifizierenden Anwendungsfälle.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Stufenplan Digitales Planen und Bauen. Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken, 2015
- [2] planen-bauen 4.0 GmbH. Aus: Arbeitsgemeinschaft des BMVI – BIM4INFRA2020: Handreichungen – Teil 1: Grundlagen und BIM-Gesamtprozess, April 2019
- [3] DIN EN ISO 19650-1: Organisation und Digitalisierung von Informationen zu Bauwerken und Ingenieurleistungen, einschließlich Bauwerksinformationsmodellierung (BIM) – Informationsmanagement mit BIM – Teil 1: Begriffe und Grundsätze. August 2019
- [4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Empfehlungen für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln mit einer Planungsgeschwindigkeit von 80 km/h oder 100 km/h. Köln 2019
- [6] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V.: Empfehlungen für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Straßentunnel. Köln November 2018
- [7] DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung. November, 2011
- [8] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 – RI-EBW-PRÜF. Februar 2017
- [9] INTERLINK: <https://roadotl.eu/static/ireport/index.html>, zuletzt abgerufen am 15.07.2020
- [10] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS) – Abteilung Straßenbau: Anweisung Straßeninformationsbank Segment Bauwerksdaten – ASB-ING. Oktober 2013

Lehan, Anne, Dipl. Wirt.-Ing.
 Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt),
 Bergisch Gladbach, Deutschland

Thewes, Markus, Prof. Dr.
 Ruhr Universität Bochum (RUB),
 Bochum, Deutschland

Einfluss der Nutzungsdauer auf die Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken

Kurzfassung

Die Ermittlung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken unterliegt aufgrund des langen Betrachtungszeitraumes zahlreichen Unsicherheiten, da Höhe und Fälligkeit des erforderlichen Mitteleinsatzes im Rahmen der Erhaltung vielfach schwierig zu prognostizieren sind. Aufbauend auf umfangreichen Kostenanalysen stellt dieser Beitrag den aktuellen Stand zur Erstellung eines Lebenszykluskostenprognosemodells vor, mit dem eine besserer Abschätzung der voraussichtlichen Kosten für die verschiedenen Phasen im Lebenszyklus von Tunnelbauwerken ermöglicht werden soll. Schwerpunkt der Untersuchung liegt dabei auf der differenzierten Betrachtung von Nutzungsdauern der betriebs- und sicherheitstechnischen Tunnelausstattung. Mittels dieses Ansatzes sollen zukünftig neben der Ermittlung von Lebenszykluskosten auch Grundlagen für die Mittelplanung zur Erhaltung oder auch für Instandhaltungsoptimierungen bereitgestellt werden.

1 Einleitung

Unter einer Lebenszykluskostenanalyse versteht man die ganzheitliche Betrachtung der Entwicklung von Initial- und Folgekosten eines Bauwerks über weite Teile seiner Nutzungsdauer, ggf. sogar über seine gesamte Lebensdauer, also „von der Wiege bis zur Bahre“. Bisher wurden bei Entscheidungen über Ausführungsvarianten in der Regel die reinen Herstellkosten als Grundlage herangezogen ohne die Folgekosten aus Nutzung und Erhaltung zu berücksichtigen, obwohl diese über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, die Herstellkosten übersteigen können. Um hinreichend genaue Prognosen

über Kostenentwicklungen als Basis wirtschaftlicher Entscheidungen und im Sinne eines effektiven Bauwerksmanagements abgeben zu können ist es allerdings notwendig, die im Laufe der Nutzung verursachten Kosten zu ihrem Fälligkeitszeitraum sowie ihrer voraussichtlichen Höhe zu prognostizieren. Tunnelbauwerke gehören zu den kostenintensiven Anlagegütern der Straßeninfrastruktur und zeichnen sich im Gegensatz zu anderen Ingenieurbauwerken dadurch aus, dass sie neben den Investitionskosten sehr hohe Folgekosten im Betrieb verursachen, da sie einen hohen Anteil an betriebs- und sicherheitstechnischen Ausstattungselementen aufweisen. Die Anzahl der Tunnelbauwerke steigt stetig. Es ist besonders charakteristisch für Tunnel, dass es sich bei ihnen um ein öffentliches Gut mit sehr hohen Verfügbarkeits- bei gleichzeitig besonders hohen Sicherheitsanforderungen handelt. Tunnelbauwerke weisen Nutzungsdauern von 90 bis 130 Jahren auf und binden neben den sehr hohen Investitionskosten auch langfristig hohe Finanzmittel für Folgekosten. Der zukünftig erforderliche Mitteleinsatz ist aufgrund dieses langen Betrachtungszeitraumes mit großen Unsicherheiten behaftet.

Bei der Planung werden in jüngerer Zeit auch zunehmend Betrachtungen der Lebenszykluskosten berücksichtigt. Hierbei wird bislang als Entscheidungskriterium für die betriebs- und sicherheitstechnische Ausstattung von Tunnelbauwerken für die theoretische Nutzungsdauer gemäß der Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung (ABBV) ein pauschaler Durchschnittswert von 20 Jahren angesetzt. Gerade vor dem Hintergrund einer weiteren Zunahme des betriebstechnischen Ausstattungsumfanges eines Tunnels kann eine pauschale Betrachtung der Nutzungsdauer potenziell zu einer fehlerhaften Unterschätzung der Folgekosten führen. Dies erfordert zukünftig eine differenzierte Betrachtung der Nutzungsdauern der einzelnen betriebstechnischen Komponenten unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Lebenszyklusaspekte.

Der Zustand der Bauwerke insbesondere älterer Baujahre sowie das begrenzte Erhaltungsbudget zwingen die Eigentümer und Betreiber ihre Investitionen in bestehende oder neue Bauwerke verstärkt auf die Zahlungsströme während der Nutzungsphase hin zu optimieren. Betrug das Erhaltungsbudget für die Bundesfernstraßen 2011 noch jährlich 1,85 Mrd. €, wurde es bis 2020 auf 4,2 Mrd. € jährlich angehoben [1]. Zudem sollen bis 2030 ca. 65 % der im BVWP vorgesehenen Mittel in den Erhalt der Infrastruktur fließen.

Dieser Beitrag stellt den aktuellen Stand der Ergebnisse einer differenzierten Untersuchung von Nutzungsdauern von Elementen der Sicherheits- und Betriebsausstattung von Straßentunneln vor und behandelt damit wesentliche Parameter für die Ermittlung von Lebenszykluskosten. In Verbindung mit aktuellen Kostensätzen in den verschiedenen Lebenszyklusphasen soll so eine Basis geschaffen werden, zahlenmäßig fundierte und genauere Prognosen zur Ermittlung des Finanzmittelbedarfs auf Basis der Lebenszykluskostenbetrachtung für die Erhaltung erstellen und entsprechende Instandhaltungsstrategien für einen optimierten Mitteleinsatz ableiten zu können.

2 Relevante Aspekte von Lebenszykluskosten

Eine Lebenszykluskostenbetrachtung erfordert eine detaillierte Aufteilung in die maßgeblich kostenverursachenden Prozesse, wobei neben den Initialkosten auch die Folgekosten aus der Nutzung des Bauwerks zu erfassen sind. Bild 1 zeigt eine angepasste Klassifizierung der im Rahmen der Erhaltung anfallenden Phasen und Prozesse zur Bestimmung der Lebenszykluskosten der Tunnelausstattung.

Die einleitenden Prozesse stellen im Rahmen der Bauwerksherstellung die Planung und die Erstausrüstung dar. Befindet sich das Bauwerk im Betrieb, so entstehen Folgekosten die sich den Phasen Instandhaltung und Betrieb zuteilen lassen. In der Phase der Instandhaltung sind neben den jährlich anfallenden Aufwendungen für Wartung, Inspektion und Instandsetzung zyklisch anfallenden Kostenaufwendungen für Verbesserungs- und Erneuerungsmaßnahmen zu berücksichtigen. In die Phase Betrieb lassen sich Prozesse wie z. B. die Tunnelüberwachung, die Versorgung (Strom, Wasser) als auch unter dem Aspekt sonstiger Betriebskosten

Abgaben für Gebühren, Funk, Telekommunikation und Versicherung einordnen.

Die Ermittlung der Kosten für die jeweiligen Phasen wurde mitunter durch Forschungsprojekte unterstützt. Die dabei erzielten Ergebnisse in Kombination mit weiteren Analysen sollen schließlich in ein gesamtheitliches Lebenszykluskostenprognosemodell überführt werden.

2.1 Kosten der Erstausrüstung

Im Rahmen des Projektes FE15.0577 „Verfahren für Kostenansätze von Straßentunnel“, wurden analog für die verschiedenen HOAI-Leistungsphasen Kostenprognosemodelle zur Erstellung von Kostenrahmen, Kostenschätzung sowie der Kostenberechnung auf Basis aktuell schlussgerechneter Tunnelprojekte erstellt [3] [4] [5]. Mit steigendem Detaillierungsgrad über die Planungsreife sowie dem Projektfortschritt konnte in einer anschließenden Validierung für die Ausstattung der Validierungstunnel aufgezeigt werden, dass die Prognoseergebnisse nur geringe Abweichungen zum Submissionsergebnis aufwiesen. Das im Rahmen dieses Projekts entwickelte Kostenberechnungstool wurde zwischenzeitlich zur Unterstützung der Straßenbauverwaltungen in eine Online-Version überführt. Entsprechende Zugangsdaten erhalten Mitglieder der Straßenbauverwaltung auf Anfrage über tunnel@bast.de.

2.2 Kosten der Instandhaltung

Im Rahmen einer weiteren Untersuchung im Projekt FE 15.0601 „Lebenszykluskostenbetrachtung zur betriebstechnischen Ausstattung von Straßentunneln“ erfolgte die Untersuchung der Instandhaltungskosten der betriebs- und sicherheitstechnischen Ausstattung. Getrennt nach Klasseneinteilung

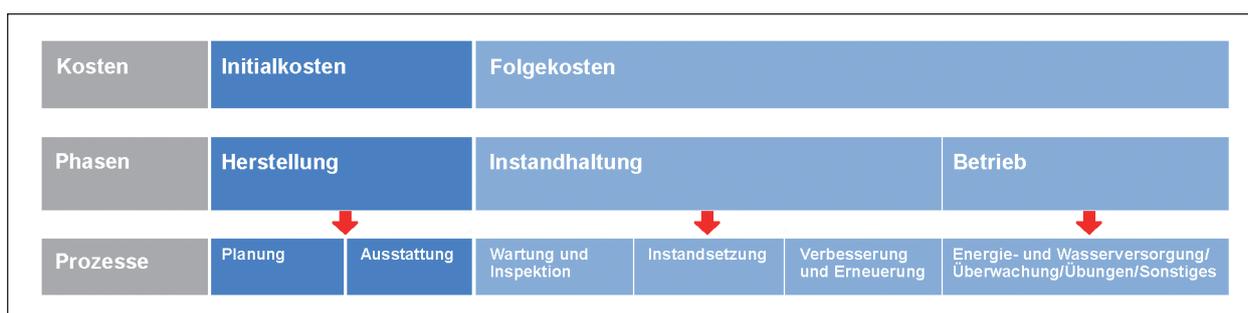


Bild 1: Lebenszyklusphasen und -prozesse der Tunnelausstattung [2]

lung für Tunneltyp und Tunnellänge konnten Kostenspannen ermittelt werden. Es zeigte sich, dass die ermittelten Werte innerhalb der Klassen große Bandbreiten (teilweise Faktor 2,5) aufwiesen, was nach derzeitigen Erkenntnissen auf unterschiedliche Instandhaltungsstrategien und deren Spielräume sowie auch maßgeblich auf den Unikat-Charakter eines jeden Tunnelbauwerkes zurückzuführen sind. Es wird davon ausgegangen, dass bei Erweiterung der Datengrundlage die Kostenbandbreiten vermindert werden können.

Bild 2 zeigt exemplarisch die Zusammensetzung der Instandhaltungskosten auf Grundlage von 11 Tunnelbauwerken. Der größte Anteil der kumulierten Kosten ist dabei von pauschalen Wartungsver-

trägen geprägt. Dies wirkt sich hinsichtlich der Mittelplanung auf Basis von Prognosen positiv aus, da diese Kosten somit im Vergleich zu den zyklisch anfallenden Verbesserungen oder umfanglicheren Erneuerungen jährlich planbar sind. Von allen Ausstattungskomponenten weisen die Sicherheitsanlagen die höchsten Aufwände im Rahmen der Instandhaltung auf.

Insgesamt konnten erste Kostenkennwerte für Wartung, Instandsetzung sowie Erneuerung ermittelt werden. Auch wurde geprüft, welche Gründe Anlass für Erneuerungen darstellten (Bild 3). Auf Basis der vorliegenden Daten zeigte sich, dass Erneuerungen zu 45% aufgrund von technischen Defekten veranlasst werden. Jeweils 13 % erfolgten aufgrund

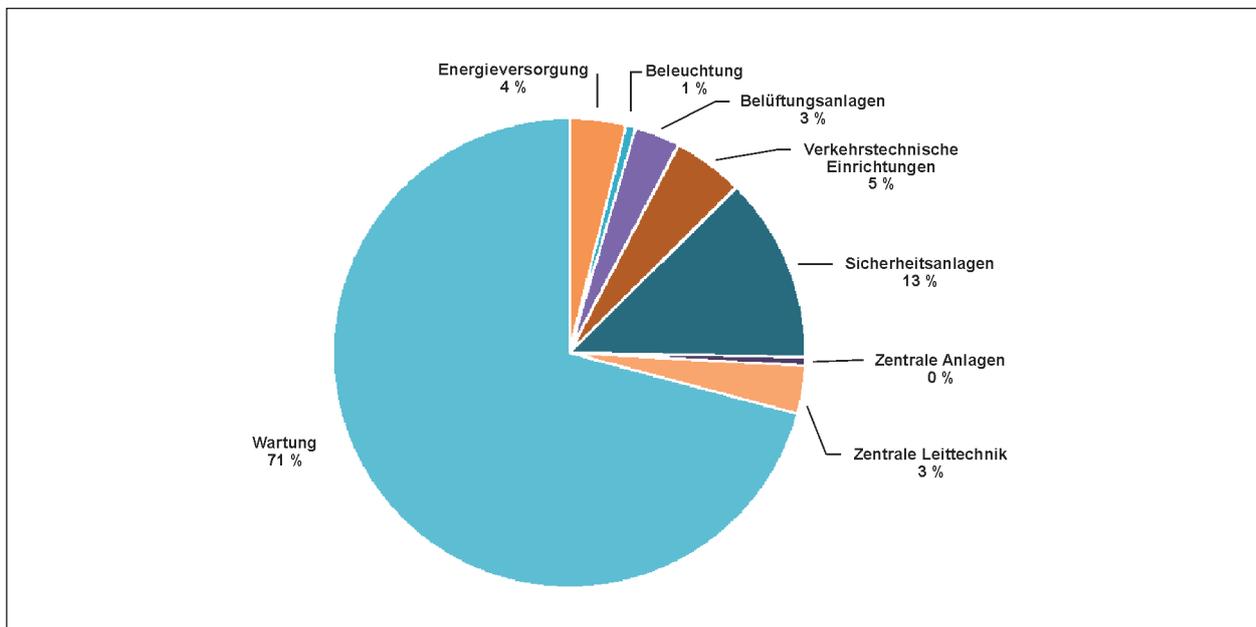


Bild 2: Prozentuale Zusammensetzung der Instandhaltungskosten

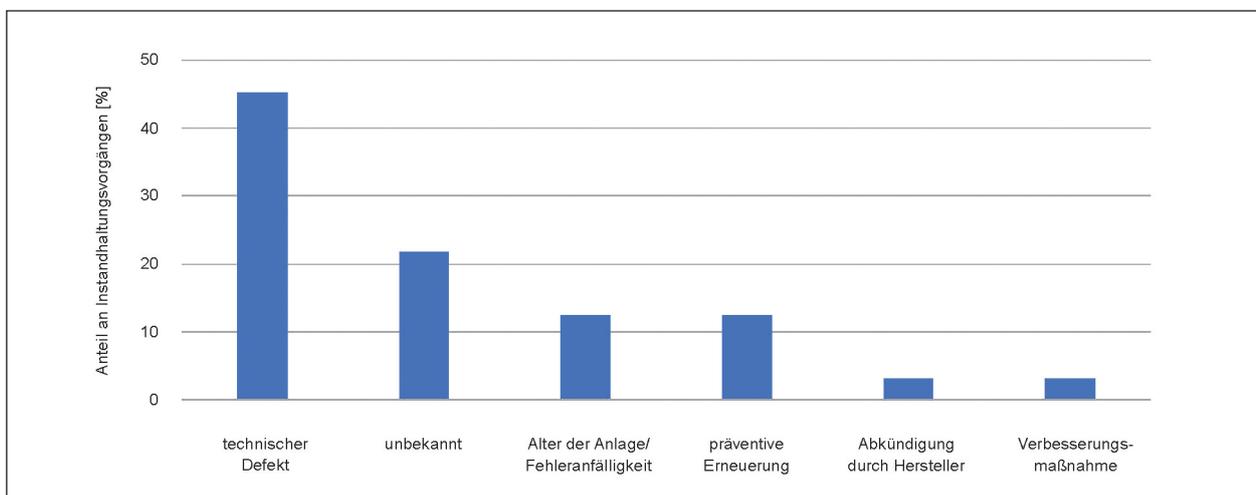


Bild 3: Häufigkeit und Gründe für Erneuerungsmaßnahmen der Tunnelausstattung [6]

des Alters der Anlage oder stellten präventive Erneuerungen dar. Bei 3% der Maßnahmen musste eine Erneuerung erfolgen, da herstellerseitig keine Ersatzteile mehr zur Verfügung standen und weitere 3% stellten Verbesserungsmaßnahmen dar. Bei 22% ließen sich die Gründe für die Erneuerung nicht nachträglich ermitteln, es handelte sich jedoch überwiegend um nicht kostenintensive Komponenten wie Monitore oder Netzwerktechnik [6].

3 Nutzungsdaueranalysen

Die unter Kapitel 2.2 aufgeführten Erneuerungen stellen in der Regel kleinere Maßnahmen dar, die dem Funktionserhalt des jeweiligen Ausstattungstitels dienen. Erneuerung von wesentlichen Teilen oder gar einer gesamten Titelgruppe stellen jedoch Kostenkomponenten dar, die zyklisch anfallen. Diese Zyklen richten sich nach der Nutzungsdauer der jeweiligen Ausstattungskomponente. Für eine Lebenszykluskostenbetrachtung ist es relevant, den Zeitpunkt annähernd zu kennen, wann welche Kosten entstehen werden, um sie im finanzmathematischen Sinne richtig in eine Kostenprognose einfließen zu lassen. Die Vergleichsbasis dafür liefert der bisherige pauschale Ansatz der ABBV von 20 Jahren theoretischer Nutzungsdauer für die Tunnelausrüstung. Dafür wurde an verschiedenen Bauwerken für alle Bestandteile analysiert, wie lang die tatsächliche Nutzungsdauer betrug, bevor es zu einer Erneuerung kam. Diese Praxisdaten wurden um

Experteneinschätzungen und Literaturangaben ergänzt. Der daraus generierte und nach Titelgruppen strukturierte Datensatz wurde in einem Teilmodul für ein Lebenszykluskostenprognosemodell statistisch aufbereitet, um im nächsten Schritt der Auswertung eine passende Verteilungsfunktion zur Beschreibung des Datensatzes auszuwählen. Dafür wurde für alle Titelgruppen sowie für ihre einzelnen Bestandteile Datenreihen der ermittelten Nutzungsdauern angelegt und zur Analyse auf die Software @risk der Fa. Palisade zurückgegriffen. Das Verfahren zur Auswahl der entsprechenden Verteilung eines Datensatzes wurde bereits in [3] beschrieben. Darüber hinaus wurde zur Auswahl der geeigneten Verteilung ein Abgleich mit der Dichtefunktion des vorliegenden Datensatzes durchgeführt.

Grundsätzlich eignet sich die Weibull-Verteilung gut für Lebensdaueranalysen von Bauteilen, jedoch ist dem Bild 4 exemplarisch für die Sicherheitsanlagen zu entnehmen, dass sich einzelne Datensätze besser durch andere Verteilungen wie in diesem Fall durch eine Extremwertverteilung abbilden lassen.

Die Extremwertverteilung (rote Kurve) und die Weibullverteilung (grün) zeigen beide eine große Affinität zu der zugrundeliegenden Wertereihe, die Auswahl ist daher ergänzend für den Einzelfall durch Plausibilitätsbetrachtungen zu stützen. In diesem Fall wird die Extremwertverteilung den Extremwerten in den Bereichen 10 und 15 Jahre besser gerecht, da die Angaben aktuellere Experteneinschätzungen wie auch die Analyseergebnisse von Aus-

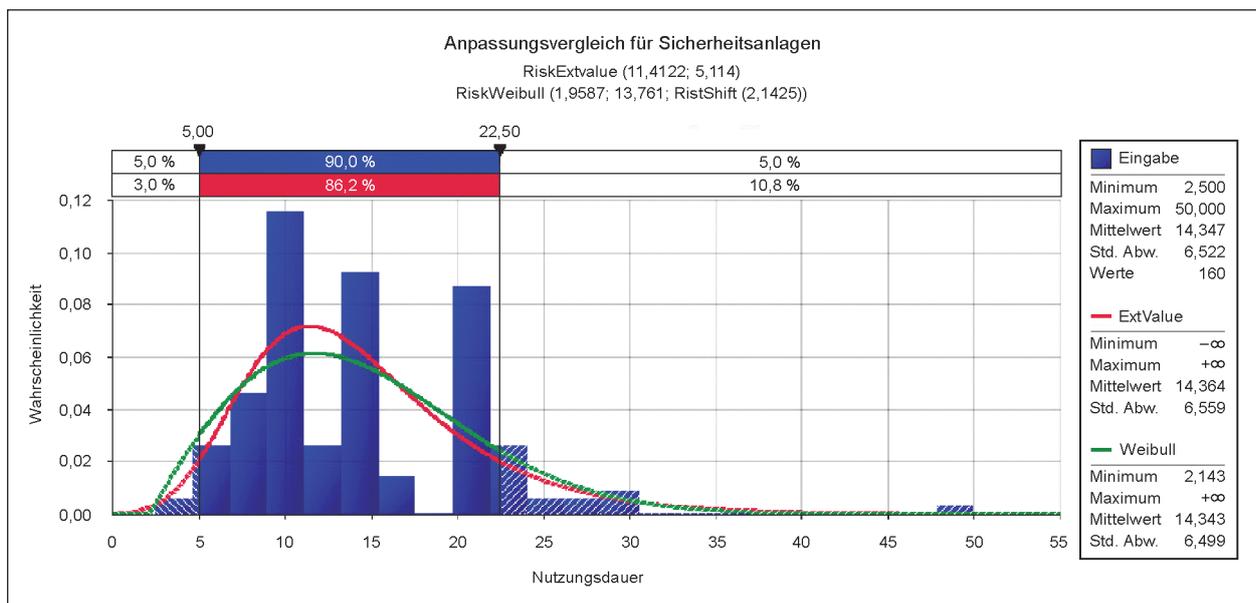


Bild 4: Anpassungsvergleich der Häufigkeitsverteilung zur Beschreibung der Nutzungsdauer der Titelgruppe Sicherheitsanlagen

tauschzyklen an realen Bauwerken angemessen widerspiegeln. Die Häufigkeiten im Bereich von 20 Jahren Nutzungsdauer beruhen maßgeblich auf Literaturangaben und Experteneinschätzungen teils älterer Quellen und können durch die Wahl der Extremwertverteilung hier in Relation zu den häufigeren und aktuelleren Angaben leicht abgeschwächt werden. Weiter kann durch den Kurvenverlauf der Extremwertverteilung dem Aspekt, dass insbesondere die Elemente von Sicherheitsanlagen einen hohen Anteil an elektronischen Komponenten aufweisen und durch technologische Entwicklungen stark beeinflusst werden, verstärkt Rechnung getragen werden. Es ist anzunehmen, dass der Anteil von störanfälligen Einzelkomponenten, frühzeitige technologische Überholung sowie Fragen der Ersatzteilverfügbarkeit sich in kürzeren Nutzungsdauern widerspiegeln werden.

3.1 Nutzungsdauerangaben zur Kostenprognose

Für Lebenszykluskostenschätzungen, wie sie z. B. im Zuge von Linienbestimmungsverfahren durchzuführen sind, aber auch für die Berechnung von Ablösungsbeträgen, eignet sich aufgrund der teils geringen Informationsgüte eine Abschätzung auf Basis einer pauschalen Kennzahl. Dafür wurde anhand der vorliegenden Datengrundlage ein gewichteter Mittelwert über den Wertanteil an der Tunnelausstattung gebildet. Dieser weist eine Nutzungsdauer von 15,3 Jahren auf, und entspricht somit le-

diglich 75 % des bisher empfohlenen pauschalen Ansatzes gemäß der ABBV. Je nach Betrachtungszeitpunkt und –raum, insbesondere dann, wenn auf Basis einer Lebenszyklusbetrachtung Budgetierungen vorgenommen werden sollen, sind detailliertere Ansätze von Nutzungsdauern von zumindest der einzelnen Titelgruppen erforderlich. Auf Basis der Datengrundlage sowie unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation konnten für die einzelnen Ausstattungstitel die in Bild 5 dargestellten wahrscheinlichsten Nutzungsdauern ermittelt werden. Es zeigt sich, dass keine Titelgruppe als Ganzes mehr als 20 Jahre Nutzung aufweist, die Zentrale Leittechnik mit 11,4 Jahren sogar nur wenig mehr als die Hälfte der pauschalen ABBV-Angabe erreicht. Als besonders robust lassen sich Komponenten zur Energieversorgung bewerten.

Eine hinreichend genaue Planungsgrundlage lässt sich erreichen, wenn eine Betrachtung auf mindestens der Untertitelgruppenebene erfolgt. Exemplarisch wird dies anhand der Titelgruppe Sicherheitsanlagen dargestellt. Tabelle 1 ist zu entnehmen, dass innerhalb dieser Titelgruppe große Unterschiede in den Nutzungsdauern bestehen. Über die gesamten Komponenten von Sicherheitsanlagen ergibt sich eine prognostizierte Nutzungsdauer von 14,4 Jahren. Innerhalb der einzelnen Untertitel wie Löscheinrichtung oder einer Lautsprecheranlage differieren die Angaben deutlich, sodass hier ein getrennter Austausch empfohlen wird.

Bei Betrachtung der Einzelkomponenten und auch im Vergleich mit den Kosten für kleinere Erneue-

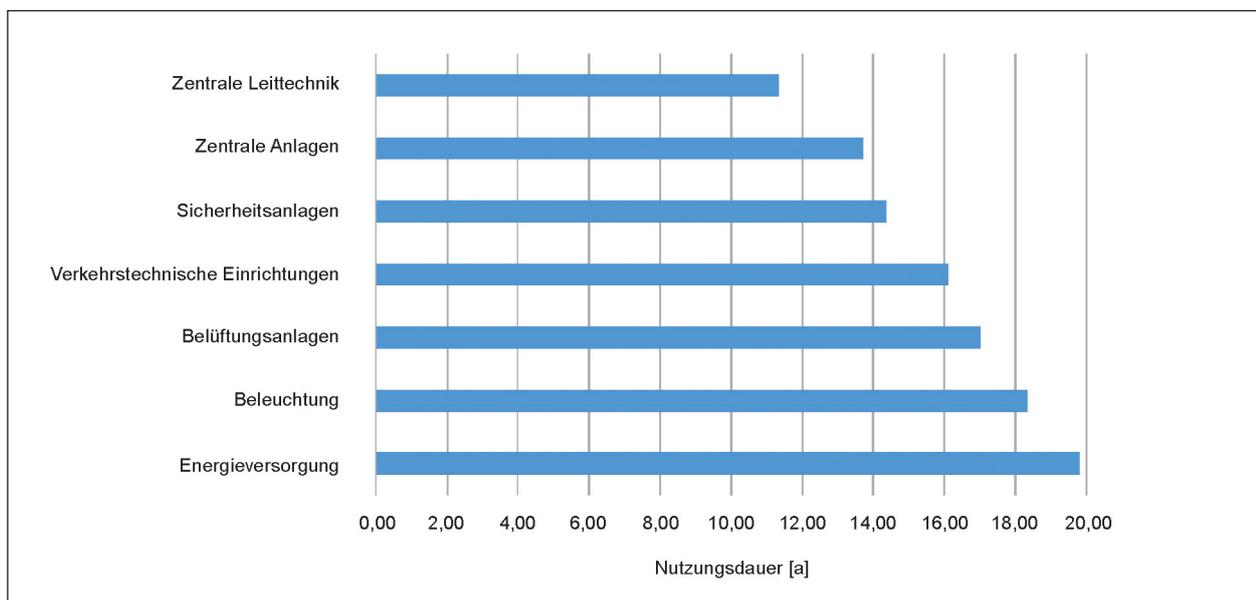


Bild 5: Wahrscheinliche Nutzungsdauern der Tunnelausstattung

Titelgruppe		ND [Jahre]
Sicherheitsanlagen		14,4
Untertitelgruppen	Videoüberwachungsanlage	12,4
	Lautsprecheranlage	11,3
	Brandmeldeanlage	14,4
	Elektroausstattung	12,0
	Orientierungsbeleuchtung und Fluchtwegkennzeichnung	18,6
	Aktive Leiteinrichtungen	12,5
	Notruf-Stationen	17,4
	Löscheinrichtungen	19,6
	Tunnelfunk	15,0

Tab. 1: Nutzungsdauern der Untertitelgruppen der Sicherheitsanlagen

Die Analyse zeigt sich, dass es innerhalb der jeweiligen Untertitelgruppen Elemente gibt, die Nutzungsdauern deutlich unter 10 Jahren aufweisen. Innerhalb der Untertitelgruppe Sicherheitsanlagen weisen einzelne Komponente wie z. B. Lautsprecherverstärker (5,9 Jahre), Monitore (7,5 Jahre) und die LED-Module der Leiteinrichtung (7,2 Jahre) noch einmal erheblich geringere Nutzungsdauern auf, sodass sie im Sinne der Funktionssicherheit bis zur Erneuerung der Kompletanlage teilweise mehrfach auszutauschen sind.

Diese Komponenten sind im Sinne der Planbarkeit von Maßnahmen zu ermitteln, hinsichtlich ihrer Relevanz für die Betriebssicherheit zu bewerten, um im Nachgang darauf aufbauend eine Strategie für Erneuerungen abzuleiten.

3.2 Nutzungsdauerbetrachtung zur Bildung von Instandhaltungsstrategien

Die Wahl einer ausgewogenen Instandhaltungsstrategie steht stets in dem Spannungsfeld, die hohen Sicherheitsanforderungen an Tunnelbauwerke zu jeder Zeit erfüllen zu können, die finanziellen Rahmenbedingungen einzuhalten und gleichzeitig ein Höchstmaß an Verfügbarkeit aufzuweisen (Bild 6). Eine Möglichkeit, dies zu erreichen stellt die Bündelung von Maßnahmen dar. Für einen solchen Schritt ist jedoch eine Voraussetzung, dass verlässliche Spannen über Nutzungsdauerangaben existieren, die Planer von Instandsetzungen befähigen, eine ausgewogene Strategie zu erstellen, welche mitunter verschiedene Ansätze von Instandhal-

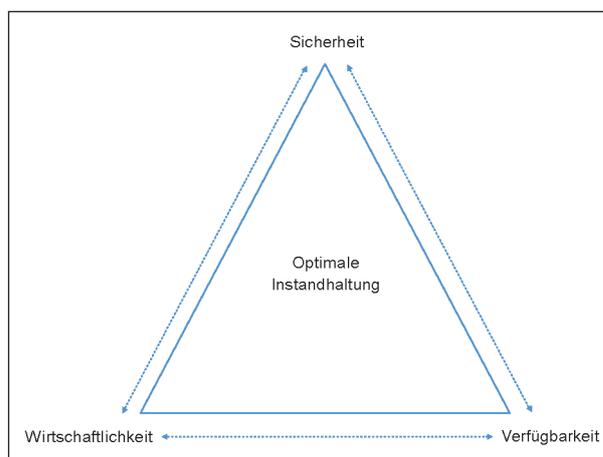


Bild 6: Spannungsfeld der optimalen strategischen Tunnelinstandhaltung

ungsstrategien kombiniert. So kann es sich im Sinne von Bündelungen durchaus positiv auswirken, wenn bei nicht stark sicherheitsrelevanten Tunnelausstattungs-komponenten auf Instandsetzungsbedarf reagiert wird, andererseits bei sicherheitsrelevanten Aspekten es zu präventiven Eingriffen vor Ablauf der eigentlich theoretisch angesetzten Nutzungsdauer kommt. Auch kann die Planung zur Ersatzteilbevorratung maßgeblich davon beeinflusst sein, wie lang die geplante Nutzungsdauer des Anlagentitels angesetzt wird.

Ein Anwendungsfeld der Lebenszykluskostenberechnung kann daher sein, Grundlagen zur Entscheidungsunterstützung von Maßnahmenbündelungen unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer und der Gewichtung einzelner Bestandteile zu liefern. In diesem Zusammenhang ist es jedoch erforderlich, neben der Nutzungsdauer einzelner Komponenten, ihren Einfluss auf die Betriebssicherheit (kritische Funktionsbestandteile), ihre singuläre Möglichkeit zur Erneuerung sowie Abhängigkeiten zu anderen Systemkomponenten mit in die Bewertung einfließen zu lassen.

Die Erzielung einer optimalen Bündelung ist jedoch für jeden Einzelfall auf Kombinationsmöglichkeit hin zu überprüfen und mit baulichen Maßnahmen abzustimmen.

4 Fazit und Ausblick

Die hier vorgestellten Untersuchungsansätze und Zwischenergebnisse finden Eingang in die Erstellung eines Lebenszykluskostenprognosemodells.

Mit diesem soll es zukünftig möglich sein, die voraussichtlichen Kosten für die verschiedenen Phasen im Lebenszyklus von Tunnelbauwerken fundierter abschätzen zu können. Die Prognosegenauigkeit wird dabei maßgeblich von der Güte der Eingangsdaten aktueller Kostensätze sowie der Vorhersage über den Zeitpunkt, zu dem diese Kosten voraussichtlich anfallen werden bestimmt. Die Ermittlung dieser Zeitpunkte kann über die Nutzungsdauern der Ausstattungskomponente erfolgen. Hierfür konnte in einem ersten Schritt gezeigt werden, dass die nach ABBV anzusetzende theoretische Nutzungsdauer von 20 Jahren für die Tunnelausstattung ungenau ist und dieser Ansatz in der Konsequenz zu einer Unterbewertung der Erhaltungskosten führen kann. Für tiefergehende Fragestellungen oder kürzere Betrachtungszeiträume, wie etwa zur Mittelplanung der Erhaltung oder auch für Instandhaltungsoptimierungen, kann ebenfalls auf diese Methodik zurückgegriffen werden. Allerdings sind hierfür detaillierte Nutzungsdauerbetrachtungen erforderlich, für die im Rahmen dieser Arbeit die notwendigen Grundlagen geschaffen werden. Zukünftig kann das Modell mit der Arbeitsmethodik BIM verknüpft werden, um vorhandene Potenziale einer verbesserten Datengrundlage zu nutzen und so Kostenprognosen weiter zu verbessern.

Literatur

- Ingenieurbau, Heft B 145, Bergisch Gladbach: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, ISBN 978-3-95606-415-9, 2018
- [4] THEWES, M.; HOFFMANN, P.; VOLLMANN, G.; FRIEBEL, W.-D.; KAUNDINYA, I.; LEHAN, A.; WUTTIG, A.; RIEPE, W.: Entwicklung eines Kostenmodells zur exakteren Abschätzung der Herstellkosten von Tunnelbauwerken – Teil 1. In: DGGT (Hrsg.), Taschenbuch für den Tunnelbau 2019. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2019
- [5] THEWES, M.; HOFFMANN, P.; VOLLMANN, G.; FRIEBEL, W.-D.; KAUNDINYA, I.; LEHAN, A.; WUTTIG, A.; RIEPE, W.: Entwicklung eines Kostenmodells zur exakteren Abschätzung der Herstellkosten von Tunnelbauwerken – Teil 2. In: DGGT (Hrsg.), Taschenbuch für den Tunnelbau 2020. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2020
- [6] KLEIN, A.; LOHFERT, O.; WEHBERG, I.: Lebenszykluskostenbetrachtung zur betriebstechnischen Ausstattung von Straßentunneln (FE 15.0601/2014/RRB). Unveröffentlichter Projektbericht der Ingenieurgesellschaft für Straßenwesen Aachen mbH im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2019
- [1] MARZAHN, G.: Tunnelbau und -betrieb in Deutschland. In: Tagungsband zum 8. BAST-Tunnelsymposium, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 145, Bergisch Gladbach: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, ISBN 978-3-95606-415-9, 2018
- [2] Empfehlungen für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Straßentunnel; herausgegeben von DAUB – Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB) und German Tunnelling Committee (ITA-AITES) – Arbeitsgruppe Lebenszykluskosten; 2018
- [3] THEWES, M.; VOLLMANN, G.; HOFFMANN, P.; RIEPE, W.; WUTTIG, A.; FRIEBEL, W.-D.; KAUNDINYA, I.; LEHAN, A.: Kostenansätze für Straßentunnel. In: Tagungsband zum 8. BAST-Tunnelsymposium, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und

Schreck, Esther, Dipl.-Geol.

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt),
Bergisch Gladbach, Deutschland

Nachhaltiger Tunnelbetrieb – Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen

Kurzfassung

Basierend auf mehreren durch die Bundesanstalt für Straßenwesen initiierten Forschungsprojekten wurde das geothermische Potenzial des anfallenden Bergwassers am Grenztunnel Füssen deutlich. Durch eine nur gering schwankende Wassermenge und niedrige Temperaturschwankungen eignet sich das Wasser ganzjährig zur Klimatisierung von Gebäuden und zur Beheizung von Freiflächen während der Frostperiode. Am Nordportal des Grenztunnels befinden sich zwei Betriebsgebäude, die u. a. Server für die Tunneltechnik beherbergen. Im Rahmen einer notwendigen Erweiterung der Betriebsgebäude am Nordportal des Tunnels wurde durch die Autobahndirektion Südbayern daher die Klimatisierung des Betriebsgebäudes 1 im Jahr 2019 auf die Nutzung des Dränagewassers umgerüstet. Das neu errichtete Betriebsgebäude 2 wurde direkt mit einer geothermischen Anlage zur Heizung und Klimatisierung ausgestattet, die ebenfalls das Wasser aus dem Tunnel nutzt. Zusätzlich wird in einer durch die Autobahndirektion Südbayern auf dem Betriebsgelände errichteten geothermischen Pilotanlage in einem Forschungsprojekt der BASt ab Winter 2020 die Nutzung des Dränagewassers zur Flächenbeheizung von Fahrbahnoberflächen für die Schnee- und Eisfreihaltung untersucht.

1 Grundlagen

Mit oberflächennaher Geothermie kann aus dem Untergrund erneuerbare Wärmeenergie gewonnen und zum Heizen oder Kühlen verwendet werden. Die an Tunnelbauwerken anfallenden Drainagewässer bieten die Möglichkeit einer geothermischen Nutzung. In einer Grundlagenstudie der BASt „Wärmeenergie aus dränierten Bergwässern von Straßentunneln“ [1] wurden zahlreiche deutsche Straßentunnel auf ihre Eignung zur geothermischen

Nutzung von Tunneldränagewasser untersucht. Der Forschungsbericht „Geothermische Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken“ [2] erläutert grundlegende Anforderungen an geothermische Anlagen bei Tunnelbauwerken und liefert einen Planungseleitfaden für die Umsetzung entsprechender Projekte. Aus den Ergebnissen eines weiterführenden Forschungsprojektes [3], das durch das Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart (IGS) durchgeführt wurde, ergaben sich bisher zwei vielversprechende Projekte an unterschiedlichen Tunneln. Durch Modellierungen des IGS [3] wurde deutlich, dass das anfallende Wasser neben einer Nutzung zur Klimatisierung von Betriebsgebäuden auch zum Betrieb einer Flächenheizung zur Schnee- und Eisfreihaltung von Fahrbahnoberflächen genutzt werden kann. Insbesondere die Bedingungen am Grenztunnel Füssen mit ganzjährig nur leicht variierenden Wassertemperaturen und -mengen bieten die Möglichkeit verschiedener geothermischer Anwendungen.

2 Geothermie am Grenztunnel Füssen

Der Grenztunnel Füssen liegt am südlichen Ende der BAB A7 und ist 1.271 m lang (Bild 1). Die Nordseite des Tunnels entwässert vollständig zum Nordportal, das sich auf deutschem Staatsgebiet befindet, während das Südportal in Österreich liegt. Betrieben wird der Tunnel auf deutscher Seite durch den Freistaat Bayern, Autobahndirektion Südbayern. Die Betriebsgebäude zur Unterbringung der Tunneltechnik befinden sich westlich des Nordportals (Bild 3).

Im Rahmen einer Grundlagenstudie der BASt [1] wurde das geothermische Potenzial des Dränagewassers am Grenztunnel Füssen deutlich. Die ermittelten Mengen von 15,5 l/s anfallender Wasserschüttung aus der West- und Ostulme machten mehrere Optionen zur Nutzung offensichtlich. Der Einsatz des Dränagewassers bietet zudem den Vorteil, dass keine zusätzliche Bohrung zur Gewinnung der geothermischen Energie abgeteuft werden muss.

Im anschließenden Forschungsprojekt [3], das durch das IGS durchgeführt wurde, wurde das Potenzial des Bergwassers zur Klimatisierung von Betriebsgebäuden bestätigt und die Möglichkeit einer Beheizung der Fahrfläche vor dem Tunnelpor-

tal dargelegt. Damit könnte der Taumittleinsatz vor dem Tunnel reduziert, und die Gefahr der Glättebildung vor dem Portal reduziert werden. Die vorgeschlagene Methode der direkten, passiven Beheizung, bei der das Dränagewasser ohne Temperaturhub direkt zur Beheizung in den Rohrsystemen zirkuliert, bietet den Vorteil, dass dem Wasser keine Energie zugeführt werden muss. Da von dieser Methode keine dokumentierten Freiflächenheizun-

gen existierten, wurde im Rahmen des Projektes durch das IGS ein Konzept für eine Pilotanlage einer direkten, passiven Freiflächenheizung auf dem Betriebsgelände am Nordportal des Grenztunnels entwickelt. Das entwickelte Technikum besteht aus neun 3 x 3 m großen Testfeldern (Bild 2), die mit unterschiedlich angeordneten Rohrsystemen und Fahrbahnaufbauten ausgestattet sind. Die Anlage ist zudem mit einer Druckluftanlage zum Entleeren der Rohrleitung bestückt. Diese soll eine Beschädigung der Rohrsysteme bei einem unplanmäßigen Einfrieren der Anlage verhindern. Mithilfe der geothermischen Pilotanlage soll so eine Umsetzung dieser Technik vor dem Tunnelportal möglich gemacht werden. Die Ausführungsplanung und Bau der Anlage wurde durch die ABD Südbayern beauftragt. Die Bauarbeiten an der geothermischen Pilotanlage wurden im Dezember 2019 beendet und die Anlage ging in den Testbetrieb über (Bild 4). Das neue Forschungsprojekt der BAST wird voraussichtlich im Winter 2020 starten, um unter realen Bedingungen den Betrieb der direkten, passi-



Bild 1: Nordportal des Grenztunnel Füssen an der BAB A 7 in Südbayern (Quelle: BAST)

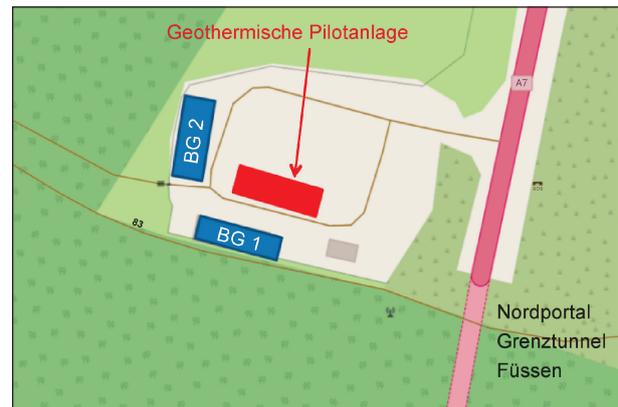


Bild 3: Lage der Betriebsgebäude 1 und 2 sowie der geothermischen Pilotanlage am Nordportal des Grenztunnel Füssen an der BAB A 7 (Quelle: OpenstreetMap und Mitwirkende (C-BY-SA))

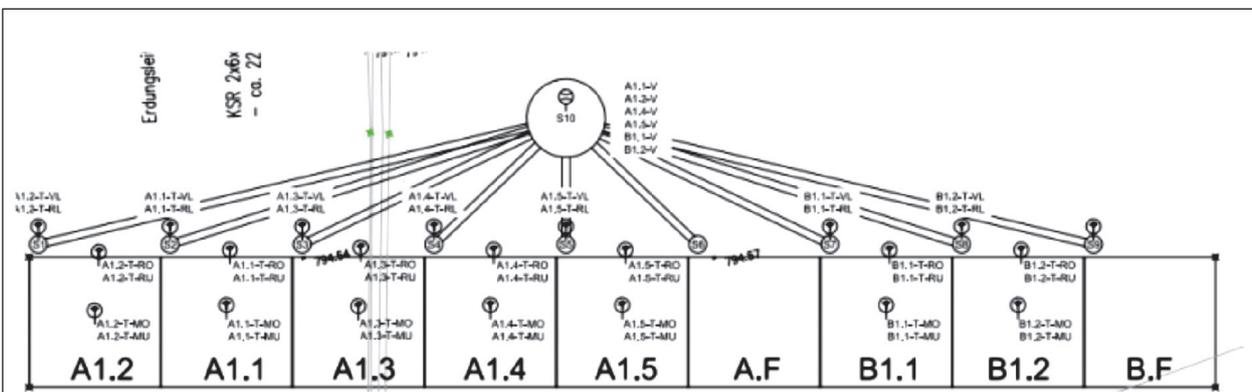


Bild 2: Aufbau des Technikums mit insgesamt 9 unterschiedlichen Testfeldern (Quelle: Autobahndirektion Südbayern)



Bild 4: Geothermische Pilotanlage im Testbetrieb bei leichtem Schneefall im Februar 2020. Die beheizten Flächen sind deutlich zu erkennen (Quelle: BAST)

ven Freiflächenheizung zur Schnee- und Eisfreihaltung am Grenztunnel Füssen zu testen und zu optimieren.

Im Rahmen von Modernisierungsplänen wurde zudem im Jahr 2019, veranlasst durch die Autobahndirektion Südbayern, die Kühlung des Betriebsgebäudes 1 auf die geothermische Nutzung des Dränagewassers umgestellt. Das neu errichtete Betriebsgebäude 2, das sowohl über einen Besprechungsraum, Sanitäreanlagen als auch über Platz für weitere Server der Tunneltechnik verfügt, wurde direkt mit einer Wärmepumpenanlage zur Heizung und Klimatisierung ausgestattet. Das bisher ungenutzte geothermische Potenzial des Bergwassers wird hier nachhaltig zum energiesparenden Betrieb der Tunneltechnik eingesetzt.

3 Ausblick

Anfallende Bergwässer in Tunneln werden bisher gesammelt und in Flüsse eingeleitet ohne ihr geothermisches Potenzial zu nutzen. In Hinsicht auf die Nutzung erneuerbarer Energien im Bereich von Straßentunneln bieten sich hier jedoch innovative Möglichkeiten für die Zukunft. So kann das Wasser zur Kühlung von Betriebsgebäuden und Serverräumen der Tunneltechnik genutzt werden und die Betriebskosten für die energieintensive Klimatisierung gesenkt werden. Außerdem ist die Beheizung von wichtigen Fahrbahnoberflächen z. B. vor Tunnelportalen oder vor Betriebsgebäuden zur Schnee- und Eisfreihaltung und somit zur Minderung der Taumittelnutzung möglich.

Literatur

- [1] BLOSFELD, J. & RÖNNAU, I. (2014): Wärmeenergie aus dränierten Bergwässern von Straßentunneln, BAST-Forschungsbericht F1100.2310018 (unveröffentlicht)
- [2] ADAM, D.; MARKIEWICZ, R.; UNTERBERGER, W. & HOFINGER, H.(2012): Einsatzmöglichkeiten und wirtschaftlicher Nutzen von geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken, Schlussbericht zum FE-Projekt 15.0485/2009/BRB
- [3] MOORMANN, C. & BUHMANN, P. (2017): Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln, Berichte der BAST, B 141

Anastassiadou, Kalliopi, Dr.-Ing.
Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt),
Bergisch Gladbach, Deutschland

Deublein, Markus, Dr. sc. ETH
Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu),
Bern, Schweiz

Roth, Franziska, MSc. ETH
EBP Schweiz AG, Zollikon Schweiz

Zulauf, Christoph, Dipl. Ing. ETH
EBP Schweiz AG, Zollikon Schweiz

Strategien zur Optimierung der Verfügbarkeit im Ereignisfall

Die Funktionsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktursysteme ist für die heutige Gesellschaft von zentraler Bedeutung. Zur Identifikation und Priorisierung von Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz dieser Systeme wurde eine pragmatische Methodik entwickelt. Sie ermöglicht die Analyse und Bewertung unterschiedlicher Maßnahmen hinsichtlich ihrer Resilienz Wirkung und basiert auf drei iterativen Schritten: Im ersten Schritt wird ein Resilienz-Screening durchgeführt mit dem Ziel, den Grad der Resilienz des Systems zu ermitteln. Anschließend werden mögliche Maßnahmen hinsichtlich ihres Potenzials zur Erhöhung der Resilienz bewertet. Im dritten Schritt werden die Kosten dieser Maßnahmen ermittelt und in Bezug zu ihrer Effektivität gesetzt. Die Methode unterstützt so ein ganzheitliches Resilienzmanagementkonzept zur Verbesserung der Funktionsfähigkeit von Verkehrsinfrastruktursystemen.

1 Einführung

Die Bereitstellung einer sicheren, gebrauchstauglichen Verkehrsinfrastruktur und ein effizientes Verkehrsmanagement zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs und einer hohen Verfügbarkeit sind eine wesentliche Grundvoraussetzung für Mobilität und Wirtschaft. Diese Anforderungen stellen eine große Herausforderung für Betreiber und Eigentümer der Verkehrsinfrastrukturen dar. Schlüsselementen wie Straßentunneln fällt dabei eine besondere Rolle zu. Eine wesentliche Herausforderung für Entscheidungsträger im Infrastrukturmanagement liegt im Umgang mit Störungen, ausgelöst durch disruptive Ereignisse.

In den letzten Jahren wurden verschiedene methodische Ansätze zur Bewertung der Resilienz von Verkehrsinfrastrukturen auf wissenschaftlicher Ebene diskutiert und etabliert (z. B. VURGIN et al. (2010); PRIOR et al. (2015); PROAG et al. (2014); KIM et al. (2016); ZHANG et al. (2016, 2017); HERRERA et al. (2017)). Für die praktische Umsetzung fehlt jedoch vielfach ein pragmatischer Ansatz. Im Rahmen eines Forschungsprojektes der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) wurde ein Ansatz entwickelt, der den wissenschaftlichen Stand der Resilienzforschung mit den praktischen Bedürfnissen der Infrastrukturbetreiber verbindet und so den Entscheidungsprozess bei der Maßnahmenplanung unterstützen kann.

2 Prinzip der Resilienz

Im Rahmen des Projekts wurde Resilienz definiert als die Fähigkeit eines Systems, auf disruptive Ereignisse vorbereitet zu sein, sie zu vermeiden, zu überwinden und sich rasch zu erholen (HUGHES et al. (2014); HYNES et al. (2016); DEUBLEIN et al. (2017)). Disruptive Ereignisse, verursacht durch Natur, Technik oder Menschen, haben negative Auswirkungen auf das System, die in einer Funktionalitätseinbuße des Systems resultieren (Bild 1).

Mit geeigneten Maßnahmen kann die Resilienz eines Systems erhöht werden. Diese Maßnahmen können baulicher, technischer oder organisatorischer Art sein und sollen den maximalen Verlust an Funktionalität und/oder die Zeit bis zur Wiederherstellung der vollen Funktionsfähigkeit des Systems verringern, indem sie z. B. die Robustheit steigern oder Redundanzen erhöhen. Die Maßnahmen lassen sich einer der fünf Phasen des in Bild 2 dargestellten Resilienz-Zyklus' zuordnen. Maßnahmen,

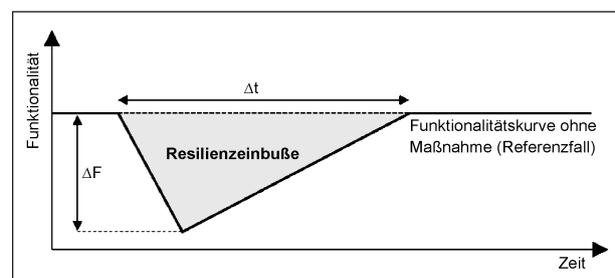


Bild 1: Vereinfachte Funktionalitätskurve eines Systems. ΔF ist der maximale Funktionsverlust bei einer Störung und Δt die Zeit, bis sich das System vollständig erholt hat (DEUBLEIN et al. (2018))

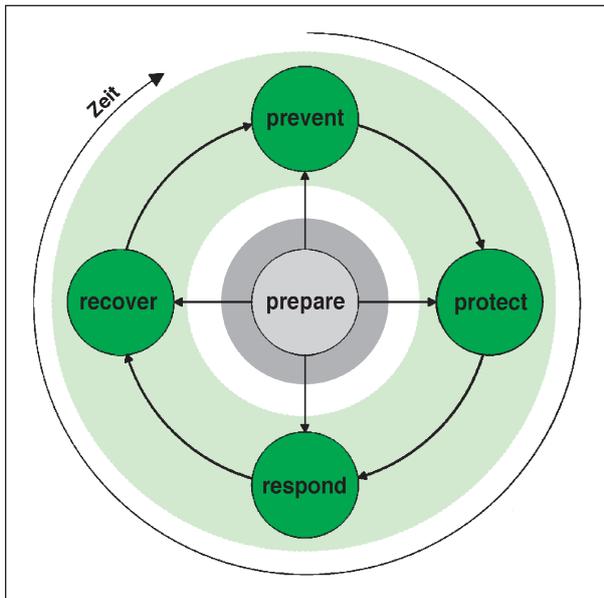


Bild 2: Resilienz-Zyklus mit den fünf Ansatzpunkten zur Erhöhung der Resilienz eines Systems (THOMA (2014), adaptiert von DEUBLEIN et al. (2018))

die den Phasen Prävention, Schutz, Reaktion und Erholung zugeordnet werden können, zeigen ihre Wirkung in chronologischer Reihenfolge.

Vorbereitende Maßnahmen (Prepare) sind zeitlich entkoppelt. Sie wirken sich indirekt auf die Resilienz des Systems aus, indem sie die Wirkung von Maßnahmen in den anderen Phasen verstärken.

3 Resilienzmanagement-Zyklus

Die Ermittlung der Resilienz eines Systems bedarf eines umfassenden Verständnisses der Zusammenhänge zwischen einzelnen Systemelementen und Maßnahmen. Im Projekt wurde der Resilienzmanagement-Zyklus in Bild 3 auf der Grundlage des aktuellen Forschungsstandes entwickelt (z. B. MAYER et al. (2012); HAARDT et al. (2014); HUGHES et al. (2014); AllTraln (2015); RESILENS (2015); ANASTASSIADOU et al. (2016); DEUBLEIN et al. (2017); MAYER et. al (2020)). Der Zyklus basiert auf einem iterativen Prozess, der mit der Definition der Ziele und der Systemgrenzen beginnt. Im Netscreening werden die kritischen Elemente des Systems (z. B. Tunnel in einem Straßennetz) identifiziert, gefolgt von einer Analyse maßgeblicher Gefährdungen (z. B. Überschwemmung, Brand, technisches Versagen).

Die Systemdefinition, das Netscreening und die Gefährdungsanalyse dienen als Grundlage für den

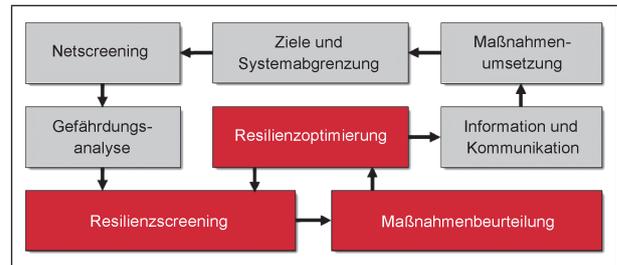


Bild 3: Resilienzmanagement-Zyklus (DEUBLEIN et al. (2018))

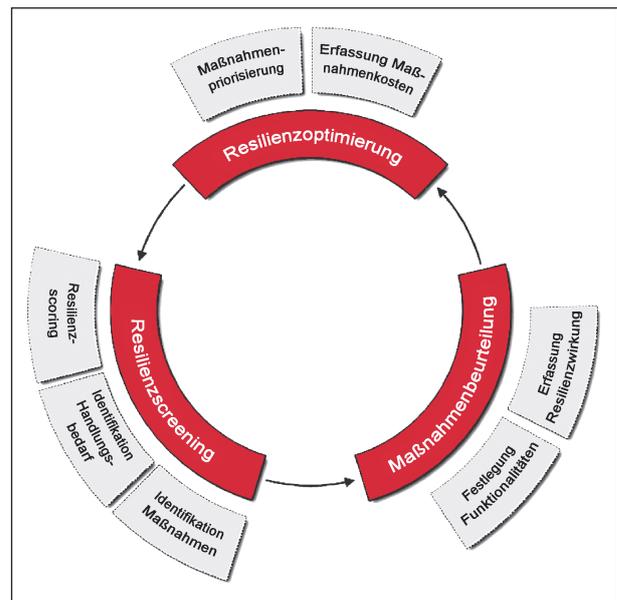


Bild 4: Elemente der Methodik (DEUBLEIN et al. (2018))

Kern des Resilienzmanagement-Zyklus: das Resilienz-Screening, die Maßnahmenbewertung und die Resilienzoptimierung. Schließlich müssen die Maßnahmen kommuniziert und umgesetzt werden. Ein kontinuierliches Monitoring stellt sicher, dass die Funktionsleistung des Systems den Anforderungen und Zielen genügt.

4 Identifikation und Priorisierung von Resilienzmaßnahmen

Die Methodik umfasst drei Schritte (Bild 4): Zunächst wird im Resilienz-Screening der Handlungsbedarf anhand eines definierten Kriteriensets ermittelt. Dieses zeigt diejenigen Handlungsfelder mit den größten Verbesserungspotenzialen auf. Darauf aufbauend werden Maßnahmen zur Verbesserung der Resilienz identifiziert und hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Resilienz des Systems bewertet.

Schließlich werden in der Resilienzoptimierung eine Kosten-Wirksamkeits-Analyse durchgeführt und die Maßnahmen priorisiert.

4.1 Resilienz-Screening

Ziel des Screenings ist die Erfassung der aktuellen System-Resilienz und die Identifikation des Handlungsbedarfs zu deren Verbesserung.

4.1.1 Bewertung der Resilienz

Basierend auf einem Kriterienset wird die Resilienz des definierten Systems mithilfe eines Punktesystems quantitativ bewertet. Die Kriterien wurden fünf verschiedenen Kategorien/Dimensionen zugeordnet: soziale, ökologische, ökonomische, physische und institutionelle (WELLE et al., 2014). Für jedes Kriterium wird ein Resilienz-Score zwischen 0 und 5 Punkten vergeben. Die Festlegung basiert auf pragmatischen Expertenschätzungen, ergänzt durch quantitative Informationen (soweit verfügbar). Als Ergebnis erhält der Nutzer eine Resilienzbewertung S für

- jedes Kriterium,
- jede Dimension und
- das gesamte System.

4.1.2 Ermittlung des Handlungsbedarfs

Zur Ermittlung des Handlungsbedarfs werden die Resilienz-Scores S mithilfe von Gewichtungskoeffizienten für die Einzelkriterien c_c und die Dimensionen c_d in Handlungsindizes α nach Gleichung (1) transformiert.

$$\alpha = \frac{100}{5} (5 - S) c_c c_d \quad (1)$$

Je größer α , desto größer der Handlungsbedarf. Dem Nutzer steht es frei, die Handlungsfelder entweder anhand der Handlungsindizes der Kriterien oder der Dimensionen zu definieren. Der Handlungsbedarf wird definiert, indem ein Schwellenwert für den minimal akzeptablen Handlungsbedarfsindex α festgelegt wird. Wenn der Handlungsbedarfsindex α eines Kriteriums oder einer Dimension den vordefinierten Schwellenwert überschreitet, sollten entsprechende Maßnahmen ergriffen werden.

4.1.3 Identifikation von Resilienzmaßnahmen

Im Rahmen des Projekts wurde ein Ansatz entwickelt, das jedem Kriterium und jeder Dimension eine oder mehrere Maßnahmen zuordnet. Wenn diese Maßnahmen umgesetzt werden, ändert sich der Handlungsbedarfsindex des entsprechenden Kriteriums bzw. der Dimension. Dadurch kann der Anwender konkrete Maßnahmen identifizieren, die hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Resilienz des Systems bewertet werden sollten. So lässt sich das breite Spektrum möglicher Maßnahmen eingrenzen.

4.2 Maßnahmenbeurteilung

Im Zuge der Maßnahmenbeurteilung werden die ausgewählten Maßnahmen hinsichtlich ihrer Resilienz Wirkung bewertet.

4.2.1 Festlegung der Funktionalitäten

Um die Auswirkung einer Maßnahme auf die Resilienz des Systems zu bewerten, wird die Resilienz des Systems auf der Grundlage einer oder mehrerer Hauptfunktionalitäten ausgedrückt. Beispielsweise kann sich die Funktionalität eines Straßennetzs aus mehreren Teilfunktionalitäten wie Reisezeit, Verkehrskapazität oder Verkehrssicherheit zusammensetzen. Es ist die Aufgabe des Systemverantwortlichen, die Teilfunktionalitäten zu definieren, welche die Gesamtfunktionalität des Systems geeignet repräsentieren.

4.2.2 Bewertung der Resilienz Wirkung

Der Einfluss einer Maßnahme auf die Resilienz ist charakterisiert durch ihren Effekt auf den Funktionsverlust ΔF und die erforderliche Zeit Δt , um sich nach einem disruptiven Ereignis zu erholen (Bild 5).

Ausgehend von der relativen Veränderung in ΔF und Δt wird die Wirksamkeit E der Maßnahme m auf die Teilfunktionalität f und das kritische Element k mithilfe einer Bewertungsskala quantifiziert. Der relative Verlust in ΔF und Δt aufgrund einer bestimmten Maßnahme wird für jede Teilfunktionalität f und für jedes kritische Element k im System quantitativ abgeschätzt. Zusätzlich kann jede Unterfunktionalität resp. jedes kritische Element mit einem Faktor c_f resp. c_k gewichtet werden.

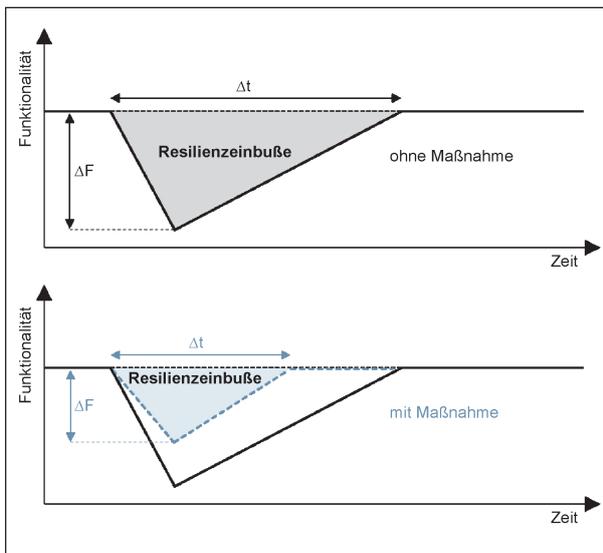


Bild 5: Funktionskurve mit und ohne Maßnahme (DEUBLEIN et al. (2018))

Die gewichtete Summe der Wirksamkeit E der Maßnahme über alle Teilfunktionen und kritischen Elemente zeigt die Auswirkung der Maßnahme auf die Resilienz des Systems Gleichung (2).

$$I_m = \sum_{k=1}^i \sum_{f=1}^j c_k c_f E_m \quad (2)$$

Wobei I_m die Gesamtwirkung der Maßnahme m auf die Funktionalität des Gesamtsystems und E_m die Wirkung der Maßnahme auf die Teilfunktionalität f und das kritische Element k ist. E_m wird auf der Grundlage der relativen Veränderung in ΔF und Δt unter Verwendung einer vordefinierten Bewertungsskala von -6 bis +6 definiert.

4.3 Optimierung der Resilienz

Auf der Grundlage der quantifizierten Auswirkungen der Maßnahmen auf die Resilienz des Systems wird eine Kosten-Wirksamkeits-Analyse durchgeführt. Die Ergebnisse dienen dazu, die Maßnahmen zu priorisieren.

4.3.1 Erfassung der Kosten

Für die Abschätzung der Kosten C_m werden neben den Investitionskosten auch die Lebenszykluskosten (z. B. Wartungs- und Betriebskosten) berücksichtigt.

4.3.2 Priorisierung der Maßnahmen

Die Kosten-Wirksamkeit ε_m der einzelnen Maßnahmen wird auf Grundlage diskontierter jährlicher Kosten der Maßnahme bewertet, die in Relation zur quantifizierten Wirkung der Maßnahme hinsichtlich Resilienz gesetzt werden (Gleichung (3)).

$$\varepsilon_m = \frac{C_m}{E_m} \quad (\text{Gl. 3})$$

Ausgehend von der Kostenwirksamkeit und weiteren Aspekten, wie der Umsetzungszeit oder der Anhängigkeit von weiteren Maßnahmen, werden die untersuchten Maßnahmen priorisiert.

5 Schlussfolgerungen

Die entwickelte Methode bietet ein Instrument zur Identifikation und Priorisierung kostenwirksamer Maßnahmen zur Gewährleistung der Resilienz von Verkehrsinfrastrukturen. Sie kombiniert wissenschaftliche Grundlagen mit umsetzungsorientierten Bedürfnissen aus der Praxis. Die Methodik erlaubt eine pragmatische Abschätzung auf Basis von Expertenschätzungen, kann aber auch vertiefender Ansätze und Modelle für eine detailliertere Quantifizierung der charakteristischen Variablen ΔF und Δt integrieren. Darüber hinaus kann das generische Konzept der Methodik potenziell nicht nur auf Verkehrsinfrastrukturen angewendet, sondern auch auf andere Systeme (z. B. Ver- und Entsorgungssysteme) übertragen werden.

Literatur

- AllTrain (2015): All-Hazard Guide for Transport Infrastructure. (Available online under <https://www.all-train-project.eu>. Last accessed on 18th of Feb 2019)
- ANASTASSIADOU, K.; KAMMERER, H.; KAUNDINYA, I.; MITSAKIS, E.; STAMOS, I. (2016): RAINEX, Risk-Based Approach for the Protection of Land Transport Infrastructure against Extreme Rainfall (Available online under <https://www.rainex-project.eu>. Last accessed on 25th of Feb 2019)
- DEUBLEIN, M.; BRUNS, F.; ROTH, F.; ZULAUF, C. (2017): Stand der Technik hinsichtlich der

- Bewertung von Resilienzmaßnahmen. BAST-Forschungsbericht FE 89.0320/2016
<https://www.resilens.eu>. Last accessed on 5th of Feb 2019)
- DEUBLEIN, M.; ROTH, F.; BRUNS, F.; ZULAUF, C. (2018): Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen. BAST-Forschungsbericht FE 89.0330/2017
- HAARDT, J.; KAMMERER, H. (2014): SECMAN – Security Manual for European Road Infrastructure (Available online under <https://www.bast.de/EN/Publications/>. Last accessed on 22th of Feb 2019)
- HERRERA, E. K.; FLANNERY, A.; KRIMMER, M. (2017): Risk and Resilience Analysis for Highway Assets. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2604, 1 – 8
- HUGHES, J.; HEALY, K. (2014): Measuring the resilience of transport infrastructure – NZ Transport Agency research report 546
- HYNES, M. W.; PURCELL, S. M.; WALSH, S. D.; EHIMEN, E. (2016): Formalizing Resilience Concepts for Critical Infrastructure. In: IRGC (Ed.), EU Research Project RESILENS, Resource Guide on Resilience. Lausanne: EPFL International Risk Governance Center
- KIM, S.; YEO, H. (2016): A Flow-based Vulnerability Measure for the Resilience of Urban Road Network. Procedia – Social and Behavioral Sciences, 218, 13 – 23
- MACHADO-LEÓN, J. L.; GOODCHILD, A. (2017): Review of Performance Metrics for Community-Based Planning for Resilience of the Transportation System. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2604, 44 – 53
- PRIOR, T. (2015): Measuring Critical Infrastructure Resilience: Possible Indicators, Risk and Resilience Report 9 (Available online under <https://www.files.ethz.ch>. Last accessed on 25th of Feb 2019)
- PROAG, S.; PROAG, V. (2014): The cost benefit analysis of providing resilience. Procedia Economics and Finance, 18, 361 – 368
- RESILENS (2015): Realising European Resilience for Critical Infrastructure (Available online under <https://www.resilens.eu>. Last accessed on 5th of Feb 2019)
- THOMA, K. (2014): Resilience-by-Design: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen. Acatech STUDIE
- MAYER, G.; ULBRICH, J.; DÜNSER, C.; ZULAUF, C.; KAUNDINYA, I.; HOLTHAUSEN, N. (2012): Security of Road Transport Networks (SeRoN) – Deliverable 400: Importance of the structures for the traffic network. (Available online under <https://www.seron-project.eu>. Last accessed on 28th of Jan 2019)
- MAYER, G.; GROßMANN, S.; DEUBLEIN, M.; ROTH, F.; ZULAUF, C.; KOHL, B.; KAMMERER, H.; DAHL, A.: Resilienz der Straßenverkehrsinfrastruktur, BAST-Forschungsbericht FE01.0199/ARB/2017, 2020
- VUGRIN, E. D.; WARREN, D. E.; EHLEN, M. A.; CAMPHOUSE, R. C. (2010): A Framework for Assessing the Resilience of Infrastructure and Economic Systems. In: Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems (pp. 77 – 116). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
- WELLE, T.; WITTING, M.; BIRKMANN, J.; BROSSMANN, M. (2014): Assessing and Monitoring Climate Resilience – From Theoretical Considerations to Practically Applicable Tools – A Discussion Paper. Deutsche Gesellschaft für international Zusammenarbeit (GIZ) GmbH (Available online under <https://www.adaptationcommunity.net>. Last accessed on 25th of Feb 2019)
- ZHANG, W.; WANG, N. (2016): Resilience-based risk mitigation for road networks. Structural Safety, 62, 57 – 65
- ZHANG, W.; WANG, N.; NICHOLSON, C. (2017): Resilience-based post-disaster recovery strategies for road-bridge networks. Structure and Infrastructure Engineering, 13(11), 1404 – 1413

Walther, Christoph, Prof. Dr.
PTV AG, Karlsruhe, Deutschland

Kindl, Annette, Dipl.-Ing.
PTV AG, Berlin, Deutschland

Stadler, Andreas, Dr.
PTV AG, Karlsruhe, Deutschland

Modernisierung und Erneuerung von Ingenieurbauwerken: Berücksichtigung gesamtwirtschaftlicher Auswirkungen bei der strategischen Planung

Kurzfassung

Für die umfangreichen Arbeiten zur Modernisierung und Erneuerung von Brücken und Tunneln insbesondere im Fernstraßennetz des Bundes ist ein strategisches Planungsverfahren notwendig. Dieses soll notwendige Maßnahmen an Brücken und Tunneln in ein optimiertes Modernisierungsprogramm überführen. Die Zielfunktion der Optimierungsaufgabe ist darauf ausgerichtet, die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen (Reisezeiten, Unfälle, Schadstoffemissionen) durch Nichtverfügbarkeit oder beschränkte Nutzbarkeit der Bauwerke vor und während der Realisierung von Maßnahmen zu minimieren sowie die Tragfähigkeit der Brücken und die Zustände der Tunnel maximal zu verbessern. Die explodierende Kombinatorik möglicher Maßnahmen und Bauwerke erfordert die Beschränkung auf Teilnetze. Der vorliegende Beitrag berichtet über die prototypische Entwicklung eines solchen Verfahrens und eine erste Anwendung auf ein Teilnetz in Nordrhein-Westfalen, das zahlreiche Rheinbrücken mit hoher netzweiter Bedeutung enthält.

1 Ausgangssituation

Zahlreiche Brückenbauwerke der Bundesfernstraßen, die vor 1985 gebaut wurden, weisen bauartbedingt eine Tragfähigkeit auf, die oftmals bereits heute den Belastungen durch den Güterverkehr nicht genügt. Für die im Bundesverkehrswegeplan für das Jahr 2030 prognostizierten Lkw-Zahlen ist ihre Tragfähigkeit noch weit weniger ausgelegt. Mithilfe der Nachrechnungsrichtlinie [1] können bestehende

Straßenbrücken, die nicht nach aktuellem Normungsstand geplant und errichtet wurden, hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit bewertet werden. Ist die Tragfähigkeit einer Straßenbrücke absehbar nicht mehr ausreichend, besteht Handlungsbedarf, und es sind Modernisierungsmaßnahmen abzuleiten oder das Bauwerk zu ersetzen. Auch für zahlreiche Tunnelbauwerke stehen Maßnahmen an, um alle Anforderungen der Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT) [3] zu erfüllen.

Aufgrund der hohen Anzahl an „nachgerechneten“ betroffenen Bauwerken, greift die Betrachtung einzelner Bauwerke und ihrer Modernisierungsoptionen zu kurz. Benötigt wird ein strategischer Planungsansatz, der die Bauwerke auch in ihrem verkehrlichen Kontext zueinander betrachtet. Erforderlich ist somit ein Verfahren, das Modernisierungs- und/oder Erneuerungsmaßnahmen an Brücken oder Tunneln in ein optimiertes Modernisierungsprogramm überführt und die vorübergehend negativen gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen durch Nichtverfügbarkeit oder beschränkte Nutzbarkeit der Bauwerke minimiert. Die explodierende Kombinatorik möglicher Maßnahmen und Bauwerke erfordert dabei die Beschränkung auf Teilnetze. Der Beitrag beruht auf zwei Forschungsprojekten [5], [6], im Rahmen derer ein solches Verfahren prototypisch für Brückenbauwerke realisiert wurde. Die Berücksichtigung der netzweiten Implikationen bei Maßnahmen sind jedoch auch für Tunnel als kritische Anlagen der Straßenverkehrsnetze gleichermaßen von zentraler Bedeutung.

2 Struktur des Planungsverfahrens für Modernisierung und Erneuerung von Ingenieurbauwerken im Überblick

Das Planungsverfahren umfasst drei Stufen:

1. Bauliche und verkehrliche Vorselektion inklusive Analyse des Maßnahmenbedarfs
2. Analyse der verkehrlichen Wirkungen von Maßnahmen an einzelnen Bauwerken und von Maßnahmenkombinationen an mehreren Bauwerken
3. Aufstellung optimierter Modernisierungsprogramme

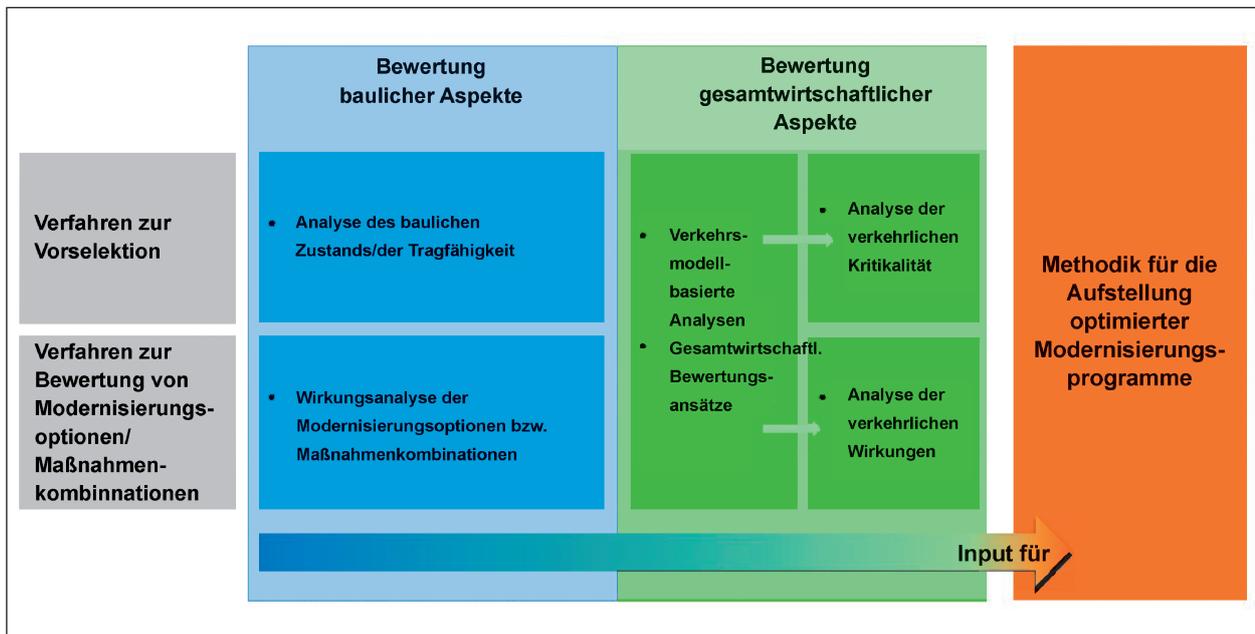


Bild 1: Struktur des Planungsverfahrens

Allen Stufen ist gemeinsam, dass sie sowohl bauliche als auch verkehrliche Aspekte berücksichtigen. Die Analyse und Bewertung der verkehrlichen Aspekte erfolgt auf allen Stufen mit den gleichen verkehrsmodellbasierten Verfahren und den gleichen gesamtwirtschaftlichen Bewertungsansätzen (Bild 1).

Die nachfolgende Erläuterung des Planungsverfahrens erfolgt ausschließlich für Brückenbauwerke. Für die baulichen Analysen bei Tunneln sind entsprechende Teilverfahren zu entwickeln. Die Identifizierung der verkehrlichen Wirkung eingeschränkter Infrastrukturnutzung ist jedoch für Tunnel und Brücken modellseitig identisch. Im vorliegenden Beitrag wird sie sogar ausschließlich anhand eines Tunnels illustriert.

3 Modellbasierte Ermittlung verkehrlicher Wirkungen eingeschränkter Infrastrukturkapazitäten während der Durchführung von Maßnahmen

Zur Ermittlung der Wirkungen von tragfähigkeits-, zustands- und baustellenbedingten Verkehrseinschränkungen wurde die makroskopische Verkehrsplanungssoftware PTV Visum eingesetzt und das deutschlandweite Straßennetz- und Verkehrsdatenmodell PTV Validate als Datenbasis verwendet. Mithilfe des Verkehrsmodells lassen sich u. a. die Auswirkungen einer (Teil-)Sperrung vollständig erfassen. Diese ergeben sich sowohl für die direkt betroffenen Verkehrsteilnehmer, bei denen das Bauwerk unmittelbar auf der Route liegt, als auch für die indirekt betroffenen Verkehrsteilnehmer, deren Routen von verlagerten Verkehren belastet werden. Vorarbeiten hierzu wurden in den Projekten SeRoN [9], SKRIBT [10] und SKRIBT^{PLUS} [11] geleistet.

Derselbe Ansatz wurde auch im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts „Resiliente Straßentunnel (RITUN)“ verfolgt [2], das die Steigerung der Resilienz von Straßentunneln gegenüber äußeren Einflüssen untersucht. Hierfür wurden die verkehrlichen Auswirkungen der Nichtverfügbarkeit bzw.

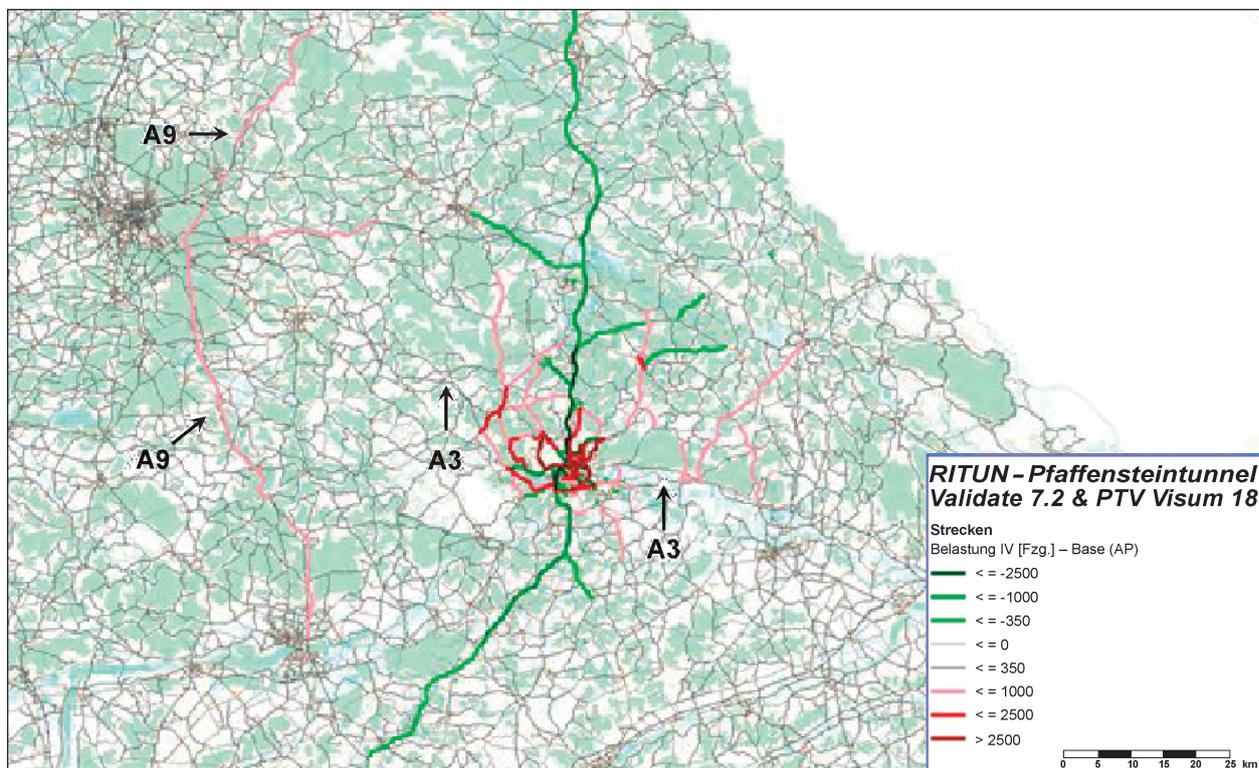


Bild 2: Differenz der Verkehrsbelastung DTWV zwischen Tunnelsperrung und Normalbetrieb auf überregionaler Netzebene (die Geodaten liefert das Unternehmen HERE Technologies (©2020 HERE Deutschland))

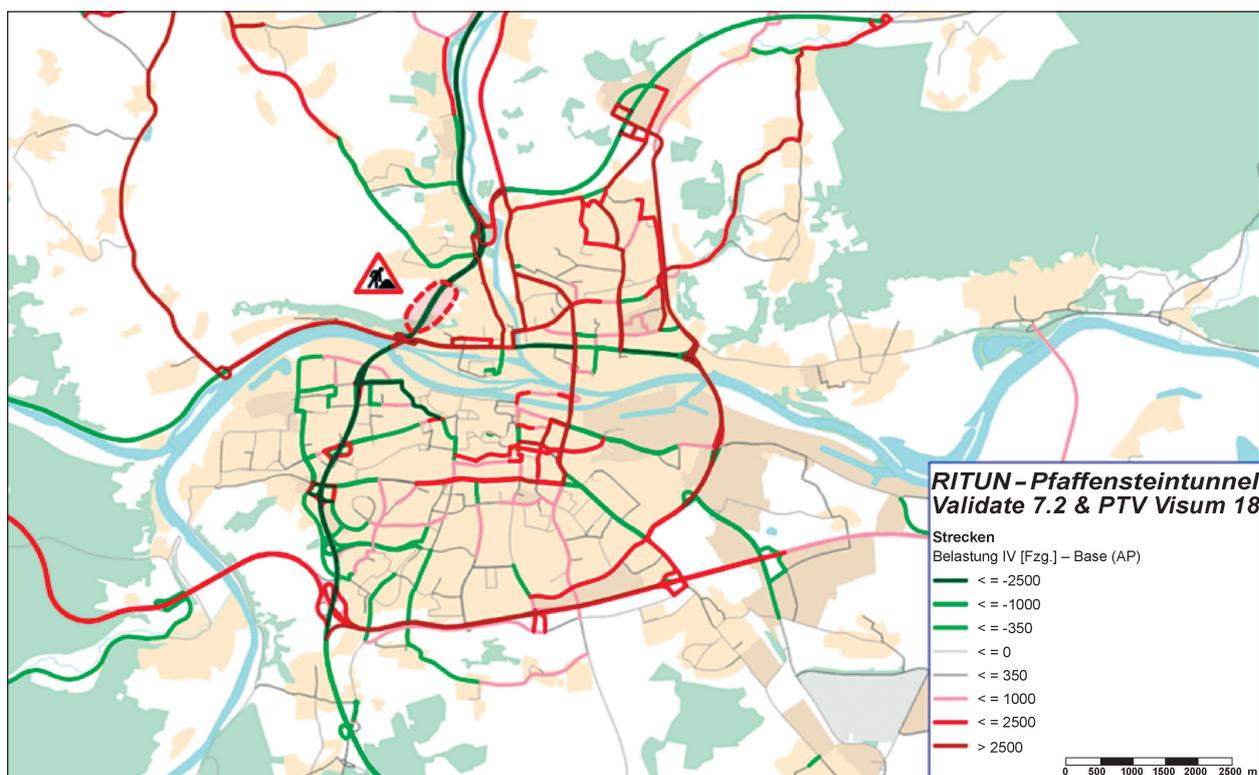


Bild 3: Differenz der Verkehrsbelastung DTWV zwischen Tunnelsperrung und Normalbetrieb auf lokaler Netzebene (die Geodaten liefert das Unternehmen HERE Technologies (©2020 HERE Deutschland))

eingeschränkter Verfügbarkeit für den Tunnel Pfaffenstein an der Bundesautobahn A 93 bei Regensburg quantifiziert. Die Bilder zeigen überregional (Bild 2) und lokal rund um Regensburg (Bild 3) die veränderten Verkehrsmengen auf den von einer vollständigen Sperrung des Tunnels betroffenen Streckenabschnitten.

4 Gesamtwirtschaftliche Bewertung von verkehrlichen Wirkungen eingeschränkter Infrastrukturkapazitäten während der Durchführung von Maßnahmen

Modernisierungsmaßnahmen oder die Erstellung von Ersatzneubauten führen zu einem Eingriff in den Verkehrsablauf. Bei der gesamtwirtschaftlichen Bewertung werden die verkehrlichen Wirkungen, also die Veränderungen der Belastungen im Straßennetz, in Indikatoren (Messgrößen) überführt, die den (meist zusätzlichen) Verzehr an Ressourcen der Gemeinschaft erfassen. Hierzu zählen beispielsweise Reisezeiten oder der Ausstoß von Klimagasen. Berechnungsvorschriften hierzu finden sich im Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030 [8].

Im Rahmen der Bewertung werden definierte Planfälle (z. B. basierend auf Maßnahmen oder auf eingeschränkter Verfügbarkeit von Bauwerken vor der Maßnahmendurchführung) dem hypothetischen Bezugsfall einer uneingeschränkten Nutzbarkeit der Bauwerke gegenübergestellt. Diese Gegenüberstellung kann für ein repräsentatives Jahr erfolgen, aber auch für einen Bewertungszeitraum von mehreren Jahren, der Zeiten vor, während und nach der Maßnahmendurchführung umfasst. Die Bewertung erfolgt

- auf der Kostenseite über die Investitionskosten der Modernisierungs- oder Erneuerungsmaßnahme(n) sowie
- auf der Nutzenseite über die Differenz der monetarisierten Werte der Indikatoren (s. o.) von Plan- und Bezugsfall. Durch diese Differenzbildung ergeben sich
 - negative verkehrliche Nutzen (Mehrreisezeiten, erhöhte Luftschadstoff- und Klimagas-

emissionen sowie ein ansteigendes Unfallgeschehen) aufgrund von Verkehrseinschränkungen während der Durchführung der Maßnahme(n),

- ggf. negative verkehrliche Nutzen aufgrund von tragfähigkeits- oder zustandsbedingten Verkehrseinschränkungen vor der Durchführung der Maßnahme(n),
- ggf. positive Beiträge im Bewertungszeitraum aufgrund der durch die Realisierung von Maßnahmen nicht mehr erforderlichen zustandsbedingten Verkehrseinschränkungen und
- eine Erhöhung des Restwerts des Bauwerks ausschließlich aufgrund von durchgeführten Erneuerungsmaßnahmen am Ende des Bewertungszeitraums.

Alle Bewertungskriterien liegen entweder originär als monetäre Werte vor (Investitionskosten und Restwert des Bauwerks) oder werden über die Kostensätze des BVWP-Bewertungsverfahrens [8] monetarisiert. Damit lässt sich auf der Nutzenseite eine monetäre Summe bilden, die den Investitionskosten gegenübergestellt wird: die Nutzen-Kosten-Differenz zur Bestimmung der gesamtwirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit von Maßnahmen(-kombinationen).

5 Struktur des Planungsverfahrens für Modernisierung und Erneuerung von Ingenieurbauwerken im Detail

5.1 Stufe 1: Bauliche und verkehrliche Vorselektion inklusive Analyse des Maßnahmenbedarfs

Das Verfahren zur Vorselektion von Bauwerken unter baulichen und verkehrlichen Aspekten ermöglicht es den Baulasträgern, frühzeitig besonders kritische Bauwerke zu identifizieren. Diese können dann in ein Verfahren zur Maßnahmenplanung auf Teilnetzebene einbezogen werden.

Mit dem Instrument der baulichen Vorselektion kann eine Einschätzung darüber getroffen werden, ob unter baulichen Aspekten ein Maßnahmenbedarf besteht und wenn ja, ob eher von einer Modernisie-

rungsmaßnahme oder einem Ersatzneubau auszu- gehen ist. Bei Brückenbauwerken sind bereits über Angaben zum Baujahr und zum Hauptbaustoff des Überbaus für viele Bauwerke erste Einstufungen möglich. Das Vorselektionsmaß als numerisches Ergebnis bezieht die gängigen Verfahren der Bundesanstalt für Straßenwesen (Priorisierungssystem und Tragfähigkeitsindex) ein.

Eng verknüpft mit der baulichen Vorselektion ist die Konkretisierung des baulichen Maßnahmenbedarfs. Art der Maßnahme und Eingreifzeitraum (Zeitraum, in dem eine Maßnahme begonnen werden kann bzw. muss) werden für jede Brücke auf Basis des baulichen Vorselektionsmaßes und des Bauwerkszustands (Substanzkennziffer) ermittelt. Auch das sogenannte „Vorrangnetz Brücke“, das festlegt, entlang welcher Autobahnen bundesweit bis spätestens zum Jahr 2030 alle Brücken durchgehend auf ein bestimmtes Ziellastniveau ertüchtigt sein sollen [7], wird im Rahmen der Konkretisierung der Eingreifzeiträume berücksichtigt. Über die Anwendung von standardisierten Maßnahmen können

in einem frühen Planungsstadium grobe Maßnah- mendauern und -kosten geschätzt werden.

Das Instrument der verkehrlichen Vorselektion erlaubt – auch vor dem Hintergrund ggf. bereits bestehender verkehrlicher Einschränkungen – eine Beurteilung darüber, welche Bedeutung das Bauwerk im Straßennetz hat und wie wichtig daher eine Maßnahme unter verkehrlichen Aspekten ist. Es gibt auch Hinweise dazu, ob während der Maßnah- mendurchführung mit großen negativen verkehr- lichen Wirkungen zu rechnen ist.

Das verkehrliche Vorselektionsmaß wird im Sinne einer verkehrlichen Kritikalität anhand der folgen- den drei Größen bestimmt (Bild 4):

- Gesamtwirtschaftliche Kosten bei Vollsperrung des Bauwerks: Bewertung der verkehrlichen Bedeutung des Bauwerks im Netz,
- gesamtwirtschaftliche Kosten bei verkehrseinschränkenden Maßnahmen: Bewertung der

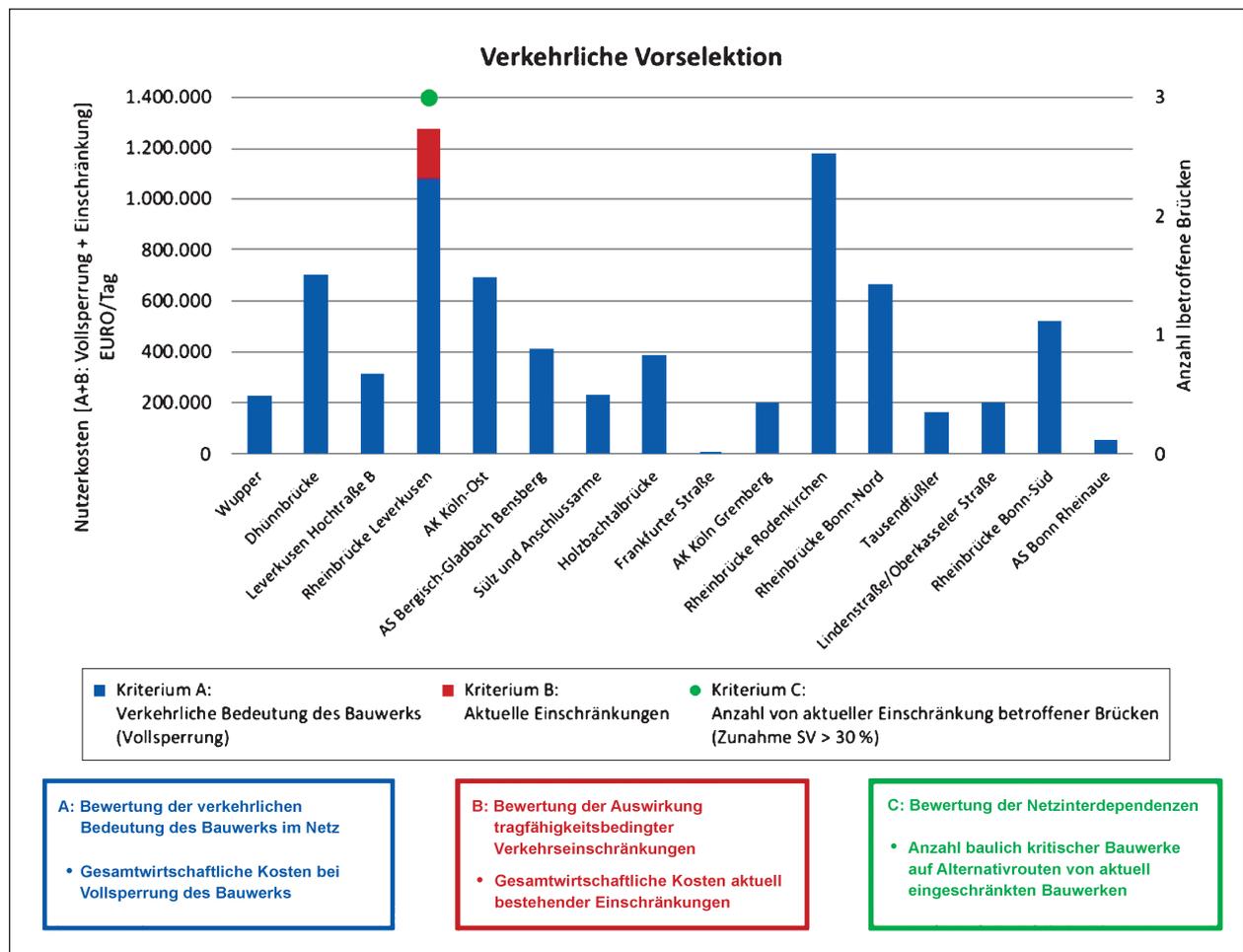


Bild 4: Ergebnisse der Vorselektion für ein Kollektiv der Rheinbrücken zwischen Duisburg und Bonn

Auswirkungen ausschließlich bei bereits bestehenden tragfähigkeits- oder zustandsbedingter Verkehrseinschränkungen und

- Anzahl der baulich kritischen Bauwerke auf Alternativrouten: Bewertung der Netzinterdependenzen ausschließlich im Falle bereits bestehender tragfähigkeitsbedingter Verkehrseinschränkungen.

Die Aggregation der drei Kriterien zu einem verkehrlichen Vorselektionsmaß erfolgt durch folgende Verknüpfung der monetarisierten Größen (gesamtwirtschaftliche Kosten) mit der nicht-monetarisierten Größe (Anzahl kritischer Bauwerke auf Alternativrouten):

$$A + [B * (C + 1)]$$

Es werden also die durch aktuell bestehende Verkehrseinschränkungen verursachten gesamtwirtschaftlichen Kosten mit der Anzahl der baulich kritischen Bauwerke auf Alternativrouten gewichtet $[B * (C+1)]^1$. Dieser Wert wird zu den gesamtwirtschaftlichen Kosten, welche durch einen Bauwerksausfall entstehen würden, addiert.

5.2 Stufe 2: Eingrenzung von Maßnahmenkombinationen

Obwohl die Erarbeitung optimierter Modernisierungsprogramme aufgrund der kombinatorischen Vielfalt an Maßnahmen und Bauwerken auf regionale Teilnetze mit hoher verkehrlicher Bedeutung beschränkt werden muss, verbleiben trotzdem zwei relevante Problembereiche:

- (1) Die Ermittlung der verkehrlichen Auswirkungen von gleichzeitigen (Teil-)Sperrungen von Bauwerken mit ihren Wechselwirkungen im Verkehrsmodell: Diese ist allein schon vor dem Hintergrund der großen Anzahl der zu modernisierenden Bauwerke auch in Teilnetzen erforderlich. Darüber hinaus lässt die aktuell gute

Finanzausstattung des Programms zur Brückenmodernisierung parallele Modernisierungsmaßnahmen an mehreren Bauwerken eines Teilnetzes zu.

- (2) Für Modernisierungsprogramme für regionale Teilnetze muss von bis zu 50 Bauwerken pro Teilnetz ausgegangen werden. Daher ergibt sich weiterhin eine theoretisch sehr große Anzahl an möglichen Kombinationen von Verkehrseinschränkungen an unterschiedlichen Bauwerken: In einem Teilnetz dieser Größe sind bei einer angenommenen Obergrenze von 10 gleichzeitigen Verkehrseinschränkungen bereits mehr als 10 Milliarden Kombinationen möglich.

Diese Vielfalt muss im Verfahren durch plausible Ansätze reduziert werden:

- Die Vorselektionsergebnisse und die erfassten Bauwerkszustände liefern Eingreifzeiträume für jedes Bauwerk. Kritisch sind demzufolge nur noch Kombinationen von Bauwerken mit sich überlappenden Eingreifzeiträumen.
- Unter verkehrlichen Aspekten können Kombinationen ausgeschlossen werden, die voraussichtlich zu unerwünschten Verlagerungen auf Innerortsstraßen führen (Ergebnisse der Verkehrsmodellierung).
- Kombinationen, welche mit großer Wahrscheinlichkeit höhere gesamtwirtschaftliche Kosten verursachen als die separate Durchführung der jeweiligen Einzelmaßnahmen, können als „ungünstig“ betrachtet und von weiteren Betrachtungen ausgeschlossen werden.
- Ergänzend wurde ein Schätzverfahren entwickelt, mit dem die gesamtwirtschaftlichen Wirkungen für ausgewählte Kombinationen ausreichend gut approximiert werden.

5.3 Stufe 3: Aufstellung optimierter Modernisierungsprogramme

Das optimierte Modernisierungsprogramm als Ergebnis einer strategischen Planung soll alle notwendigen Maßnahmen an den Bauwerken eines Teilnetzes umfassen, um die Verfügbarkeit des Straßennetzes nachhaltig zu sichern und dabei die Belastungen für die Nutzer möglichst gering zu hal-

¹ Um das Betrachtungsbauwerk selbst mit einzubeziehen, wird als Multiplikationsfaktor die Anzahl der Brücken + 1 verwendet. So wird auch vermieden, dass Bauwerke, bei denen sich keine baulich kritischen Bauwerke auf den Alternativrouten befinden, aufgrund der Multiplikation mit Null hinsichtlich ihrer verkehrlichen Kritikalität insgesamt mit „Null“ bewertet werden.

ten. Dies bedeutet, die Investitionskosten und die gesamtwirtschaftlichen Kosten zu minimieren sowie gleichzeitig Tragfähigkeit (bei Brücken) und Substanz der Bauwerke zu verbessern. Die letztgenannte Komponente lässt sich näherungsweise über die Restwerte der Bauwerke im Teilnetz abbilden. Die Zielfunktion für ein solches Optimierungsverfahren, das als Lösungsraum alle Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen enthält, die das Auswahlverfahren positiv durchlaufen haben und verkehrlich zulässig sind, lautet also:

- Maximiere die Nutzen-Kosten-Differenz (NKD),

$$\text{Max! NKD} = \sum \text{Restwert} - \sum \text{Nutzerkosten} - \sum \text{Baulastträgerkosten}.$$

Die besonderen Herausforderungen sind dabei:

- der sehr große Lösungsraum, da die derzeit gute Finanzausstattung der Länder und die Priorisierung der Modernisierung im Rahmen der Erhaltungsplanung die gleichzeitige Durchführung von Maßnahmen an mehreren Bauwerken im Teilnetz begünstigt sowie
- die Berücksichtigung der aufgrund der verkehrlichen Abhängigkeiten auftretenden nicht-additiven Nutzenkomponenten. Mit nicht-additiven Nutzenkomponenten ist zum Beispiel gemeint, dass die Mehrreisezeiten bei einer gleichzeitigen maßnahmenbedingten Sperrung zweier Brücken höher liegen können als die Summe der Mehrreisezeiten bei Sperrung der Brücken nacheinander.

Die Berechnung erfolgt mittels eines auf dem sogenannten Tabu-Search-Verfahren basierenden Optimierungsansatzes [4]. Dabei handelt es sich um ein Meta-Verfahren, welches eine lokale Suche (Nachbarschaftssuche) mit einem Ansatz zum Verlassen lokaler Optima (Umsetzung mittels Tabuliste) verbindet. Konkret wird in jedem Iterationsschritt versucht, durch Änderung der gewählten Alternative an genau einem Bauwerk einen möglichst guten neuen Plan zu erzeugen. Dabei wird durch die Tabuliste verhindert, dass bereits untersuchte Kombinationen ein zweites Mal geprüft werden, sodass auch Verschlechterungen des aktuellen Plans in Kauf genommen werden. Können aufgrund der Tabuisierung in einer Nachbarschaft keine neuen Lösungen gefunden werden, so wird ein neuer, zufälliger Plan erzeugt und somit nachfolgend ein anderer Bereich des Lösungsraums durchsucht.

6 Praxisanwendung und Ausblick

Das Optimierungsverfahren wurde in einem auf Microsoft Excel und VBA sowie der Verkehrsplanungssoftware PTV-Visum basierenden Prototyp implementiert. In diesem wurden alle beschriebenen Verfahrensschritte abgebildet und anschließend auf ein Beispiel mit 16 Brücken in Nordrhein-Westfalen – darunter vier wichtige Rheinquerungen – angewendet. Dadurch konnte der Nachweis für die Durchgängigkeit und die Anwendbarkeit des Verfahrens erbracht werden. Tabelle 1 zeigt den optimierten Modernisierungsplan auf einer strategischen Ebene für einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren. Selbstverständlich werden sich in diesem Zeitraum Abänderungen der Planung ergeben. Das Verfahren gibt den verantwortlichen Institutionen aber zu einem sehr frühen Planungsstand eine verlässliche Richtschnur für ihre Arbeiten.

Mit der Entwicklung und Anwendung des dargestellten strategischen Planungstools ist ein entscheidender Schritt für eine Planung getan worden, die sich gleichermaßen an der Verfügbarkeit für den Nutzer und der Erhaltung der Substanz der Bauwerke von Straßennetzen orientiert. Der allgemeine Ansatz des Verfahrens ist bis auf die bauliche Vorselektion gleichermaßen für Brücken und Tunnel anwendbar. Jetzt gilt es, mit diesem Instrumentarium eine konkrete Planungsaufgabe für ein Teilnetz des Fernstraßennetzes des Bundes durchzuführen und es somit in die Praxis zu überführen.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung – BMVBS (2011): „Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand“. Berlin. Ausgabe 05/2011
- [2] DAHL, A.; FLÉCHON, C.: Ermittlung der regionalen verkehrlichen Auswirkungen im Falle der Nichtverfügbarkeit von zwei verschiedenen Tunneln in Bayern, Schlussbericht, Karlsruhe/Bergisch Gladbach, 2020
- [3] Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Hrsg., Richtlinien für

Bauwerk	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048
Wupper																														
Dhünnbrücke							TS																							
Leverkusen-Hochstraße B										TS	TS	TS	TS	TS																
Rheinbrücke Leverkusen	TS 1	TS 1	TS 1	TS 2	TS 2	TS 2																								
AK Köln-Ost							TS																							
AS Bergisch-Gladbach Bensberg																														
Sulz und Anschlussarme																														
Holzbachalbrücke																														
Frankfurter Straße																														
AK Köln Gremberg								TS 1	TS 2																					
Rheinbrücke Rodenkirchen																														
Rheinbrücke Bonn-Nord																														
Tausendfüßler																														
Lindenstraße/Oberkasseler Straße																														
Rheinbrücke Bonn-Süd																														
AS Bonn Rheinaue																														

Tab. 1: Beispielhafter Modernisierungsplan für ein Kollektiv der Rheinbrücken zwischen Duisburg und Bonn (TS = Teilsperrung)

die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), 2016

- [4] GLOVER, F.; LAGUNA, M.: Tabu Search. Kluwer Academic Publishers, 1997
- [5] KINDL, A.; STADLER, A.; WALTHER, C.; FREITAG, N.: FE 15.0616/2015/NRB: Entwicklung einer Methodik für eine optimierte Planung von Ertüchtigungen und/oder Ersatz wichtiger Brücken der Bundesfernstraßen – Schlussbericht, Karlsruhe/Berlin/Leipzig, 2016
- [6] KINDL, A.; STADLER, A.; WALTHER, C.; FREITAG, N.; BORNMANN, M.: FE 15.0645/2017/NRB: Entwicklung einer Methodik einschließlich Prototyp für eine optimierte Planung von Ertüchtigung und/oder Ersatz wichtiger Brücken der Bundesfernstraßen – Schlussbericht, Karlsruhe/Berlin/Leipzig, 2019
- [7] MARZAHN, G. (2017): Brückenmodernisierung in Deutschland – Anforderungen und Chancen. Vortrag beim VSVI-Seminar „Brücken für die Zukunft“. Friedberg, 24.05.2017
- [8] PTV AG et al. (2016): FE-Projekt-Nr.: 97.358/2015 Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030. Karlsruhe, Berlin, Waldkirch, München. Link: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/BVWP/bvwp-methodenhandbuch.pdf?__blob=publicationFile; zuletzt abgerufen am 30.06.2020
- [9] SeRoN consortium: SeRoN – Security of Road Transport Networks, Deliverable 400, Importance of the structures for the traffic network, 2011
- [10] SKRIBT-Konsortium: Verbundprojekt SKRIBT – Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen, Verkehrsbezogene Objektanalyse, 2013
- [11] SKRIBTPlus-Konsortium: Verbundprojekt SKRIBTPlus – Schutz kritischer Brücken und Tunnel, Bericht zum Modellsystem Wirksamkeiten – Kritikalitätsverfahren, 2015

Kohl, Bernhard, Dipl.-Ing.
Kammerer, Harald, Dipl.-Ing.
Klampfer, Bernhard, Dipl.-Ing.

ILF Consulting Engineers Austria, Linz,
Österreich

Leitfaden zur Steigerung der Resilienz von Straßentunneln

Kurzfassung

Aufgrund hoher Erwartungen unserer mobilen Gesellschaft an eine zuverlässige Verkehrsinfrastruktur tragen Betreiber von Straßentunneln große Verantwortung die Verfügbarkeit des Verkehrsnetzes aufrechtzuerhalten. Dabei werden sie durch extreme Ereignisse und komplexer werdende Systeme vor wachsende Herausforderungen gestellt. Die Reduktion bzw. der Verlust der Verfügbarkeit eines Tunnels führt rasch zu erheblichen verkehrlichen Einschränkungen und gesamtwirtschaftlichen Kosten.

Die Aufgabe im Umgang mit disruptiven Ereignissen besteht vorrangig in der Aufrechterhaltung der Funktionalität bzw. der raschen Rückkehr zum Normalbetrieb. Das übergeordnete Ziel ist die Steigerung der Resilienz. Dazu wurde eine methodische Vorgehensweise entwickelt, welche die Auswirkungen von Schäden auf den Tunnelbetrieb und den Verkehr untersucht. Zudem wurden Maßnahmen identifiziert und deren Wirkung bewertet. Die erzielten Ergebnisse werden in Form eines praxistauglichen Leitfadens zur Verfügung gestellt.

1 Einleitung

Als wesentlicher Bestandteil des deutschen Verkehrsnetzes tragen die Bundesfernstraßen dazu bei, individuelle Mobilität und die zuverlässige Versorgung privater Haushalte sowie der Wirtschaft sicherzustellen. Die 270 bestehenden Tunnel stellen aufgrund ihres unmittelbaren Einflusses auf die Verfügbarkeit der Netze besonders kritische Systeme hoher Relevanz dar. Der Ausfall einzelner Objekte führt häufig zu gravierenden verkehrlichen Beeinträchtigungen im lokalen aber auch regionalen Umfeld. Die Anforderungen an deren Zuverlässigkeit sind daher besonders hoch.

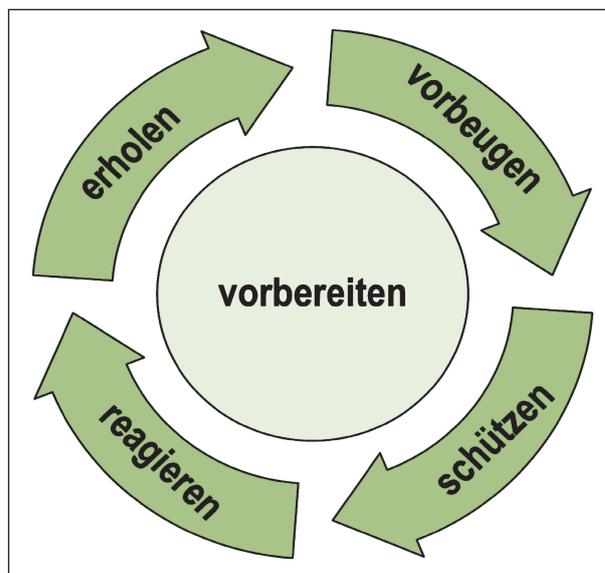


Bild 1: Resilienzzyklus, in Anlehnung an [1]

Hier kommt das Konzept der Resilienz zum Tragen, welches den Umgang mit disruptiven Ereignissen ganzheitlich betrachtet. Resilienz bezeichnet die Fähigkeit, disruptive Ereignisse bzw. daraus folgende Schäden zu verkraften und eine schnelle Wiederinbetriebnahme zu ermöglichen. Bestehende Methoden der Risikoanalyse werden erweitert hin zu einer vollständigen Auseinandersetzung mit disruptiven Ereignissen. Der Fokus liegt bislang vorrangig darauf, Vorfälle zu vermeiden bzw. Tunnelnutzer, Bauwerk und Ausstattung im Ereignisfall zu schützen. Die angemessene Reaktion auf disruptive Ereignisse und die Rückkehr zum ursprünglichen Zustand wird im Gegensatz dazu vergleichsweise nur untergeordnet repräsentiert.

Dieser ganzheitliche Ansatz wird im Resilienzzyklus grafisch dargestellt (siehe Bild 1). In einem iterativen Prozess laufen die Schritte der Resilienzphasen „vorbeugen, schützen, reagieren und erholen“ in chronologischer Reihenfolge ab. Die zentral angeordnete Phase vorbereiten hingegen kann als übergeordnet und zeitlich entkoppelt angesehen werden. Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz werden diesen Phasen zugeordnet.

2 Identifizierung potenzieller Bedrohungen und Schadensszenarien

Basis der Untersuchungen stellt eine umfassende dem All-Hazard-Ansatz folgende Bedrohungsanaly-

se dar. Sämtliche für deutsche Straßentunnel aktuell bekannte Bedrohungen für die Funktionalität wurden identifiziert. Dabei erfolgte eine Kategorisierung in natürliche und vom Menschen ausgehende Bedrohungen, welche potenziell Schäden hervorrufen können. Besonderes Augenmerk liegt bei außergewöhnlichen Ereignissen, welche in bestehenden Regelwerken nicht bzw. in nur geringem Ausmaß Berücksichtigung finden.

Bedrohungen führen in der Praxis zu tatsächlichen Schadensszenarien verschiedener Art: Bauliche Schadensszenarien beschreiben Schäden direkt am Tunnelbauwerk bzw. betriebstechnische Schadensszenarien Schäden an der Ausstattung des Tunnels. Im Gegensatz dazu tritt bei versperrenden Schadensszenarien kein unmittelbarer struktureller Schaden auf, sondern lediglich eine Blockade einer oder mehrerer Fahrstreifen.

Im Zuge der Erstellung des Leitfadens wurden die komplexen und sehr individuellen Zusammenhänge zwischen Bedrohungen und den daraus folgenden Schäden hergestellt und dokumentiert. Die weiteren Betrachtungen, ausschließlich auf Ebene der Schadensszenarien, ermöglichen zusätzlich die Berücksichtigung bislang noch nicht bekannter Ereignisse, wodurch sich Anwender des Leitfadens neben dem Erwartbaren insbesondere auch auf neuartige Szenarien vorbereiten können.

3 Auswirkungen von Schadensszenarien auf den Tunnelbetrieb

Grundsätzlich bestehen sehr hohe Ansprüche an die Zuverlässigkeit sämtlicher im Tunnel zum Einsatz kommender Systeme und Bauteile. Der Umgang mit disruptiven Ereignissen und den resultierenden Ausfällen bzw. Schäden geht mit dem Treffen von Entscheidungen im Hinblick auf den Tunnelbetrieb einher. Betreiber von Straßentunneln werden dabei vor die Aufgabe gestellt, auftretende Risiken abzuschätzen und rasch darauf zu reagieren. Bislang bestehen für den Fall eingeschränkter Funktionalitäten von sicherheitstechnischer Ausstattung jedoch keine Vorgaben. Die fundierte Betrachtung solch folgenschwerer Abläufe erfordert die Berücksichtigung einer Vielzahl an Parametern. Die Abläufe nach dem Eintreten eines disruptiven Ereignisses laufen nach geltenden Regel-

werken, insbesondere den RABT/EABT, in erster Linie ereignisorientiert ab. So ist beispielsweise in den je Tunnel zu erstellenden Alarm- und Gefahrenabwehrplänen das Vorgehen bei bestimmten vordefinierten Szenarien beschrieben. Wie in weiterer Folge nach der Bewältigung des Ereignisses an sich mit entstandenen Schäden in Bezug auf den Tunnelbetrieb umzugehen ist, bleibt in vielen Fällen eine sehr individuelle Entscheidung, die meist von den zuständigen Tunnelmanagern zu treffen ist.

Mit dem Ziel hier größere Handlungssicherheit für Entscheidungsträger zu schaffen, wurden minimale Betriebsbedingungen für Straßentunnel nach disruptiven Ereignissen erarbeitet und im Leitfaden dokumentiert. Dabei wird definiert, ob und unter welchen Bedingungen ein Straßentunnel nach dem Eintritt eines Schadensszenarios weiterhin betrieben werden darf. Unter Zuhilfenahme eventueller risikoreduzierender Kompensationsmaßnahmen wird so unter Einhaltung des geforderten Sicherheitsniveaus die Verfügbarkeit von Straßentunneln gegebenenfalls mit Einschränkungen aufrechterhalten. Das frühzeitige Durchspielen bestimmter Szenarien und Vorabaufstellen minimaler Betriebsbedingungen hilft in der Phase „reagieren“. Somit wurde dieser Ansatz als eine ganz wesentliche Resilienzmaßnahme im Sinne des Business Continuity Management (BCM) für die Phase Erholung untersucht.

Die Definition der minimalen Betriebsbedingungen infolge von sicherheitstechnischen Schadensszenarien erfolgte unter Anwendung von qualitativen und quantitativen Risikobewertungsmethoden. Diese sind zwar nicht allgemein gültig und spiegelbildlich für jeden Straßentunnel anzuwenden, bieten jedoch gemeinsam mit der dahinterliegenden Methodik eine strukturierte und transparente Herangehensweise. Zusätzlich wurde die Anwendung der entwickelten Risikobewertungsmethodik anhand von realen Straßentunneln (Tunnel Pfaffenstein, Tunnel Bayreuth) beispielhaft aufgezeigt.

Die Problemstellung bei der Definition minimaler Betriebsbedingungen liegt im Setzen von Grenzen akzeptabler Risiken (siehe Bild 2). Das Mindestsicherheitsniveau stellt die im Normalbetrieb mindestens zu gewährleistende Sicherheit und zugleich die Obergrenze des Akzeptanzbereichs gemäß allgemein gültigen Richtlinien und Regelwerken (z. B. RABT) dar. Der Toleranzbereich ist ein Bereich, in dem das Risiko aufgrund eines Scha-

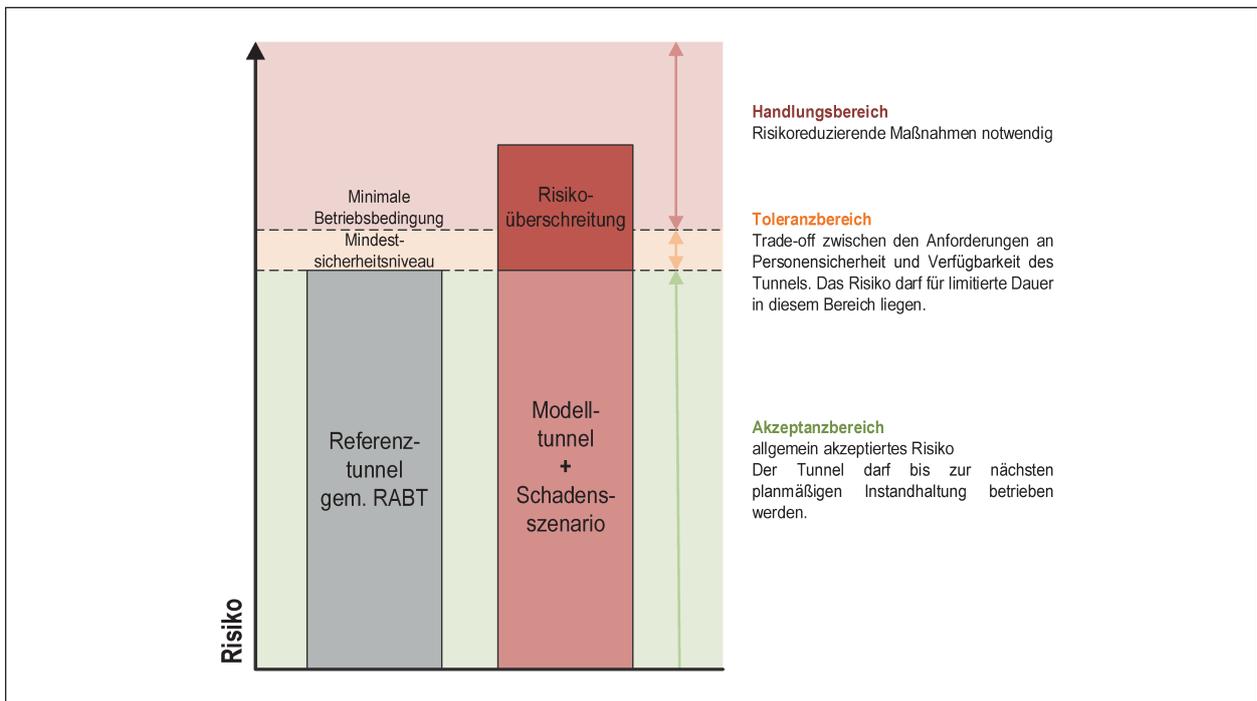


Bild 2: Schwellenwerte des Risikos zur Definition des Akzeptanz-, Toleranz- und Handlungsbereichs

denzenzenarios für eine limitierte Dauer liegen darf. Die Dauer sowie die Bandbreite kann von Entscheidungsträgern situativ festgelegt werden, in Abhängigkeit von Anforderungen an die Personensicherheit auf der einen Seite, und an die Verfügbarkeit des Tunnels auf der anderen Seite. Der Handlungsbereich ist ein Bereich des unzumutbaren Risikos, in dem eine Kompensation der Risikoerhöhung aufgrund eines Schadensszenarios zwangsläufig ohne zeitliche Verzögerungen erfolgen muss, um die minimale Betriebsbedingung zu gewährleisten.

Die risikoanalytische Bewertung von Schadensszenarien erfordert die Berücksichtigung einer Vielzahl an Parametern, weshalb klar strukturierte und nachvollziehbare Arbeitsschritte von besonderer Bedeutung sind. Hierfür wurde folgender methodischer Ablauf entwickelt (siehe Bild 3):

- Die Risikobewertung erfolgt durch Bewertung der Sicherheitsrelevanz und Sicherheitssignifikanz. Sicherheitsrelevant sind alle Schadensszenarien, die durch ihr Auftreten relevante Auswirkungen auf die Sicherheit von Personen verursachen können. Sicherheitssignifikant sind alle Schadensszenarien, die eine Risikoüberschreitung des Toleranzbereichs aufweisen und zum Erreichen des Handlungsbereichs führen.
- Eine Risikoreduktion der durch ein Schadensszenario erhöhten Risiken kann durch funktiona-

le und sicherheitstechnische Kompensation erfolgen. Durch funktionale Kompensation kann der Schaden einer Komponente durch vorhandene Redundanzen oder durch andere Systeme vollständig oder teilweise kompensiert werden. Kann keine ausreichende Reduktion des Risikos durch funktionale Kompensation erreicht werden, muss durch zusätzliche sicherheitstechnische Maßnahmen entgegengewirkt werden.

- Organisatorische Maßnahmen zur sicherheitstechnischen Kompensation haben keinen Einfluss auf den Verkehrsfluss, demnach kann hier in einen vorläufigen Normalbetrieb übergegangen werden. Sind jedoch verkehrliche Maßnahmen notwendig, ziehen diese ein eingeschränktes verkehrliches Betriebsszenario nach sich.
- Technische Maßnahmen wie beispielsweise Videodetektion, Thermoscanner oder automatische Brandbekämpfungsanlagen, die nicht zur in den RABT geforderten Ausstattung gehören, können ebenso dazu beitragen, Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß von Unfall und Brand zu reduzieren.

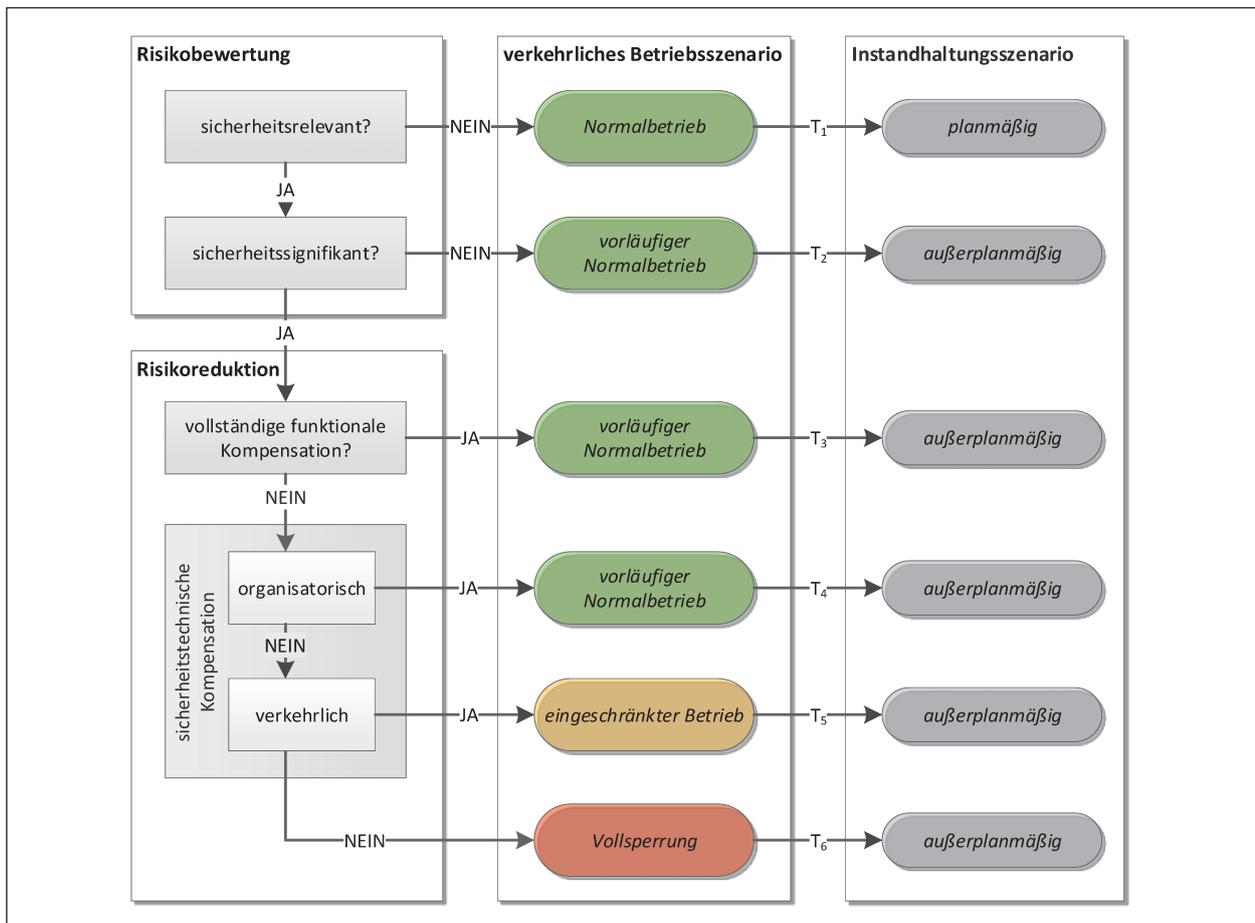


Bild 3: Methodischer Ablauf zur Bewertung von Schadensszenarien

4 Auswirkungen von Schadensszenarien auf den Verkehr

Im Sinne der Resilienz von besonderem Interesse sind in weiterer Folge die Auswirkungen des eingeschränkten Tunnelbetriebs auf den Verkehr, welche sich in erster Linie über die verkehrliche Leistungsfähigkeit definiert.

Mithilfe mikroskopischer Verkehrssimulationen wurde die Kapazität in Abhängigkeit der verkehrlichen Betriebsszenarien als Anteil des Normalbetriebs ermittelt, um so die verbleibende Verfügbarkeit eines Straßentunnels zu quantifizieren. Dies wurde für den Großteil repräsentativer Straßentunnel, welche in Deutschland auf Bundesfernstraßen vorkommen, durchgeführt. Grundlage dafür lieferte eine umfassende statistische Auswertung von Tunneln am hochrangigen Straßennetz.

Anhand der beiden Beispieldunnel wurden in einem nächsten Schritt die verkehrlichen Auswirkungen auf regionaler Ebene untersucht. Dabei wur-

den Effekte auf das Unfallgeschehen, Luftschadstoff- und Klimagasemissionen, Reise- und Transportzeiten sowie erhöhte Betriebskosten berücksichtigt. Durch die monetäre Bewertung dieser Parameter in Abhängigkeit der Dauer des eingeschränkten Betriebs konnten tunnelspezifisch gesamtwirtschaftliche Kosten von Tunnelausfällen quantitativ dargestellt werden.

5 Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz

Zur effektiven Steigerung der Resilienz wurden unter Rücksprache mit Experten der Tunnelplanung, Tunnelsicherheit und des Tunnelbetriebs 76 unterschiedliche Maßnahmen identifiziert und im Leitfaden im Rahmen von Maßnahmen-Factsheets einzeln dokumentiert. Die Strukturierung erfolgt in Abhängigkeit des Zeitpunkts ihrer Wirkungsentfaltung gem. Resilienzkreislauf:

- Vorbeugende Maßnahmen wirken vor einem Ereignis, um die Eintrittswahrscheinlichkeit von disruptiven Ereignissen zu reduzieren.
- Schützende Maßnahmen sind passive Maßnahmen, die nach Eintreten eines disruptiven Ereignisses bis zu dessen Bewältigung wirken, um bestimmte Schadensszenarien zu verhindern oder abzumildern.
- Reaktive Maßnahmen sind aktive Maßnahmen, die nach dem Erkennen eines disruptiven Ereignisses eingeleitet werden und bis zu dessen Bewältigung wirken, um bestimmte Schadensszenarien zu verhindern oder abzumildern.
- Erholende Maßnahmen wirken nach Bewältigung eines disruptiven Ereignisses, um eine schnellstmögliche Rückkehr zur ursprünglichen Funktionalität zu ermöglichen.
- Vorbereitende Maßnahmen und Lernen sind kontinuierlich betriebene Maßnahmen, die ihre Wirksamkeit über alle Phasen hinweg entfalten und bekannte sowie neue Schwachstellen härten.

Zur Priorisierung von Maßnahmen und der zielgerichteten Auswahl dieser in der Praxis, wurde eine Bewertungsmethodik für Resilienzmaßnahmen entwickelt. Fokus dabei war, diese möglichst einfach und anwenderfreundlich zu gestalten. Die Parameter zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen sind in Bild 5 übersichtlich dargestellt.

Grundsätzlich erfolgte die Bewertung der Maßnahmen anhand der präventiven bzw. mitigativen Wir-

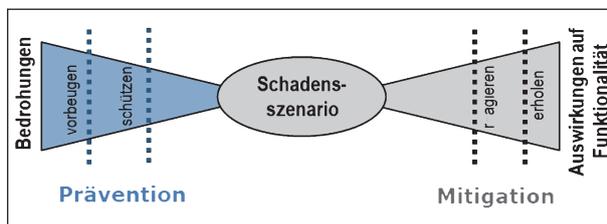


Bild 4: Einteilung nach Prävention und Mitigation von Schadensszenarien

kung auf Schadensszenarien (Resilienzbewertung). Resilienzmaßnahmen zeigen häufig auch positive Effekte auf die Personensicherheit. Zum Teil resultieren aber auch negative Wirkungen, welche bei der Maßnahmenumsetzung zu berücksichtigen sind. Zudem können beim Einsatz von Resilienzmaßnahmen neben den Auswirkungen am Tunnel selbst auf Objektebene auch Effekte am umliegenden Straßennetz, sowie an mehreren Tunnelbauwerken gleichzeitig erzielt werden. Weiters wird dargestellt, ob eine Maßnahme ihre Wirkung spezifisch für eine Bedrohung, oder aber bedrohungsübergreifend entfaltet. Die o. g. Wechselwirkungen sind im Zuge der Kosten-Wirksamkeitsbetrachtung der einzelnen Maßnahmen zu berücksichtigen.

In Abhängigkeit davon, ob ein Bestands- oder Neubaustunnel betrachtet wird, erfolgt weiters die Bewertung der Realisierbarkeit und der Kosten einer Maßnahme. Beides ist individuell aufgrund der örtlichen Gegebenheiten eines Tunnels zu bewerten. Abschließend wird das Zusammenwirken der Bewertungsparameter anhand der spezifischen Anforderungen beurteilt. Die Methodik stellt eine Hilfestellung zur Auswahl geeigneter Maßnahmen dar, um gezielt und effizient eine Steigerung der Resilienz zu erreichen.

6 Fazit und Ausblick

Die Durchführung einer Demonstration der entwickelten Methoden anhand zweier Beispieltunnel in Bayern durch die entsprechenden Autobahndirektionen zeigen bereits jetzt die Praxistauglichkeit und Anwendbarkeit für die Tunnelbetreiber.

Der erarbeitete Leitfaden bietet die Möglichkeit, das ganzheitliche Konzept der Resilienz mithilfe einfacher Handlungshilfen umzusetzen und damit das bestehende Potenzial besser auszuschöpfen. So wird mit einer Erweiterung bestehender Ansätze die Verfügbarkeit verstärkt in den Fokus gerückt und gleichzeitig die Einhaltung des geforderten Sicher-

Resilienz-bewertung		Wechselwirkungen				Bestand			Neubau		
Prävention	Mitigation	Sicherheit	objekt-über-greifend	tunnel-über-greifend	bedrohungs-über-greifend	Realisier-barkeit	Kosten	empfohlen	Realisier-barkeit	Kosten	empfohlen
● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	J / N	J / N	J / N	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	J / N	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	J / N

Bild 5: Übersicht der Parameter zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen

heitsniveaus auch im Falle eingeschränkter Funktionalitäten sichergestellt.

Literatur

- [1] THOMA (2014): Resilience-by-Design: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen, acatech STUDIE
- [2] Verbundprojekt RITUN, Leitfaden zur Verbesserung der Resilienz von Straßentunneln, verfügbar unter www.bast.de/ritun

Gey, Markus, Dipl.-Ing. (FH)

Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg,
Stuttgart, Deutschland

Ertüchtigung des A 81 Engelbergbasistunnels unter Aufrechterhaltung des Verkehrs

Kurzfassung

Der rund 2.500 m lange Engelbergbasistunnel westlich von Stuttgart hat eine große regionale und überregionale Bedeutung. Geologisch erweist sich die Lage des im Jahr 1999 dem Verkehr übergebenen zweiröhrigen Tunnels mit jeweils 3 Fahrstreifen und einen Seitenstreifen in anstehendem Gipskeuper als herausfordernd (Bild 1). So führte Wasserzutritt bereits in der Bauphase zur Bildung von Anhydrit, verbunden mit einer Volumenzunahme und hohen Quelldrücken, die abschnittsweise einen Wechsel des Bauprinzips erforderlich machten. In den Folgejahren kam es auf einer Länge von rund 180 m in beiden Tunnelröhren zu Deformationen und Schädigungen der Innenschale, die eine grundlegende Betrachtung der Anhydritproblematik erforderlich machten. Im Vortrag wird auf die geologischen Rahmenbedingungen sowie auf die beabsichtigten bautechnischen und betriebstechnischen Maßnahmen zur Ertüchtigung des Tunnels unter Aufrechterhaltung des Verkehrs während der Bauarbeiten eingegangen.

1 Bauliche und betriebstechnische Ertüchtigung des Engelbergbasistunnels

Der rund 2.500 m lange Engelbergbasistunnel westlich von Stuttgart hat aufgrund seiner zentralen Lage im Verknüpfungsbereich der BAB A 81 und BAB A 8 mit einem DTV von 120.000 Kfz/24h eine sehr hohe verkehrliche Bedeutung für die Region Stuttgart und darüber hinaus für den gesamten Südwesten Deutschlands. 1999 wurde der Tunnel dem Verkehr übergeben. Der zweiröhrige Tunnel verfügt über je 3 Fahrstreifen und einen Seitenstreifen.

1.1 Geologie

Die geologische Situation ist gekennzeichnet durch die unterschiedlichen Abfolgen innerhalb des im südwestdeutschen Raum anstehenden Gipskeupers. Im Ausgangszustand stehen die im unausgelaugten Gipskeuper vorhandenen Sulfatanteile überwiegend als Anhydrit an. Mit der Aufnahme von Wasser wandelt sich Anhydrit jedoch in Gips um. Bei einer vollständigen Umwandlung nimmt das Feststoffvolumen des Anhydrits um etwa 60 % zu. Wird diese Volumenzunahme behindert, beispielsweise durch den Einbau einer Tunnelauskleidung, so entstehen in Abhängigkeit von der Wasseraufnahme des Gebirges sehr hohe Quelldrücke. In Kenntnis dieser geologischen Verhältnisse wurde der Tunnel in der rund 450 m langen Anhydritstrecke im Widerstandsprinzip mit einer im Bereich der Sohle 3 m mächtigen Innenschale geplant. Während des Auffahrens des Tunnels kam es dort zu Wasserzutritten. Die einsetzenden starken Quellprozesse machten auf einer Länge von 270 m eine



Bild 1: Nordportal Engelbergbasistunnel mit Zu- und Abluftbauwerk im Hintergrund

Abkehr vom Widerstandsprinzip hin zum Ausweichprinzip erforderlich, um die Innenschale oberhalb einer druckmindernden Knautschzone überhaupt einbauen zu können. Der Ausbruchsquerschnitt betrug rund 330 m².

1.2 Ist-Zustand

Nach der Fertigstellung kam es in den Folgejahren auf einer Länge von rund 180 m in beiden Tunnelröhren zu Deformationen und Schädigungen der Innenschale. Das zunehmende Schadensausmaß machte es erforderlich, eine grundlegende Betrachtung der Anhydritproblemstellung beim Engelbergbasistunnel mittels eines international besetzten Expertenkreises durchzuführen. Dabei flossen neben den Erkenntnissen aus anderen betroffenen Tunneln in Süddeutschland auch Beurteilungen der in der Nordschweiz geschädigten Tunnelbauwerke mit ein. Die durchgeführten Messungen und Untersuchungen wiesen auf eine maßgebliche horizontale Druckbelastung der Tunnelinnenschale hin. Es kam zur Ovalisierung des Tunnelquerschnitts. Während die Ulmen beidseitig zur Tunnelachse konvergieren, wanderte die Firste nach oben. Des Weiteren wurde festgestellt, dass eine horizontale Konvergenz des Tunnelprofils auf Höhe der Fahrbahn vorhanden war und es horizontale Risse in den Seitenwänden des Gewölbes sowie schalenparallele Risse im Gewölbe im Fahrbahnbereich und im oberen Kämpferbereich gab (Bild 2).

1.3 Ertüchtigung

Nach der Klärung der Schadensursache und Erarbeitung des zugehörigen Lastmodells galt es nun ein Bauverfahren zu entwickeln, das die Vorgabe, die vorhandene Anzahl der Fahrstreifen in den

Hauptverkehrszeiten aufrechtzuerhalten, gewährleistet. Parallel hierzu wurden auch Maßnahmen zur Ertüchtigung des Tunnels durch Eingriffe ins umliegende Gebirge untersucht. Nach einem umfangreichen Abwägungsprozess wurde der Bauwerksentwurf für den rund 180 m langen Ertüchtigungsbereich erstellt. Es ist vorgesehen, die Fahrbahnplatte über den Abluft- und den Medienkanälen zu verstärken. Im Bereich der Notgehwege werden die Leitungen in die Kanäle nach unten verlegt und ein Stahlbetonsockel als Rahmenecke zwischen Fahrbahnplatte und neuer Vorsatzschale erstellt. Die 40 cm starke Vorsatzschale wird mit geschweißten doppel-T-förmigen Trägern bewehrt. Zur Aufnahme der späteren Zwischendecke werden oberhalb des Lichtraumprofils Konsolen als Widerlager ausgebildet. Die Zwischendecke wird nach Herstellung der Vorsatzschale aus 2,50 m breiten Fertigteilen erstellt. Die Fertigteile sind 2-teilig und in der Mitte mittels Stahlbauteilen gelenkig verbunden. Anschließend werden Druckstützen zwischen der

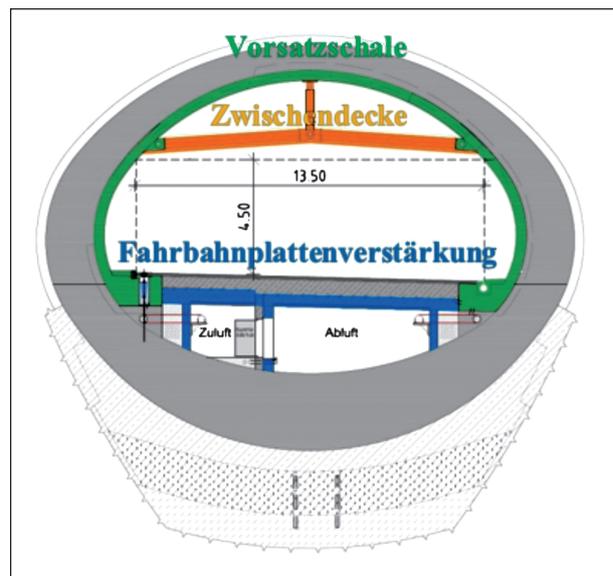


Bild 3: Maßnahmen zur Ertüchtigung



Bild 2: Schadensbilder, Risse in den Ulmen, Schalenparallele Risse, Verformung der Fahrbahn



Bild 4: Vorversuch Zwischendeckenelement

Firste und den Mittelgelenken eingebaut. Somit kann die Zwischendecke als horizontale Aussteifung wirken. Die Herstellbarkeit der Vorsatzschale und der Fertigteile wurde im Rahmen der Erstellung der Vergabeunterlagen in Vorversuchen belegt (Bild 4). Ein umfangreiches dauerhaftes Monitoring wird eingerichtet, um die Belastungsverläufe zu messen und gegebenenfalls mitgeplante Entlastungsschritte einzuleiten.

1.4 Betriebstechnik

Das Tunnelbauwerk sowie die betriebstechnische Ausstattung des Tunnels wurde gemäß den damals gültigen Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT) geplant und im September 1998 im Gegenverkehr dem Verkehr übergeben und im August 1999 im Endzustand im Richtungsverkehr dem Verkehr übergeben.

Die Betriebstechnik stammt noch aus der Tunnelerstausrüstung und ist in einem alterstypischen Zustand. Um die betriebstechnische Ausstattung auf den aktuellen Stand der Technik zu bringen, wird neben der baulichen Ertüchtigung des Tunnels, parallel auch eine betriebstechnische Ertüchtigung durchgeführt.

Im Zuge dieser betriebstechnischen Ertüchtigung werden nahezu alle Anlagenteile erneuert.

So werden beispielsweise die vorhandenen 4 Abluftventilatoren mit je 210 kW durch 4 Abluftventilatoren mit 1.000 kW ersetzt. Die bestehenden Strahlventilatoren werden durch leistungsfähigere Strahlventilatoren ersetzt und die Anzahl von 18 auf 36 Stück verdoppelt. Die bestehende Tunnelbeleuchtung mit ca. 1.250 NAV-Leuchten wird ersetzt durch ≥ 2.500 moderne LED-Leuchten. Die Videokameras werden von aktuell ca. 75 Kameras auf ca. 150 modernere Kameras mit Pannenfahrzeug- und Brand-

detektion verdoppelt. Außerdem werden die Lautsprecheranlage mit 225 Lautsprechern, die USV- und die Niederspannungsanlage, das Netzwerk, die Telefonanlage und die Brandmeldeanlage erneuert, sowie sonstige Kleingewerke erneuert oder umgebaut. Insgesamt werden für die betriebstechnische Ertüchtigung insgesamt ca. 500 km Energie-/Signal- und Brandmeldekabel verlegt sowie über 100 Verteilerschränke in den Betriebsgebäuden hergestellt oder umgebaut.

Da alle Arbeiten unter Aufrechterhaltung des Verkehrs stattfinden, muss dabei auch der aktuelle Sicherheitszustand gewährleistet werden. Um dies zu bewerkstelligen werden die neuen Ausstattungselemente unter Aufrechterhaltung der alten Ausstattung hergestellt und getestet. Bestandsausstattungen werden erst nach Inbetriebnahme der neuen Ausstattungen rückgebaut. Aufgrund des Bau- und Verkehrskonzeptes können nicht alle Gewerke gleichzeitig und die einzelnen Gewerke auch nicht am Stück erneuert werden. Dies erfordert einen Parallelbetrieb alter und neuer Ausstattungselemente und bedingt einen komplexen Umbau der Tunnelsteuerung und der Leittechnik.

Der durch den betriebstechnischen Parallelumbau erforderliche zusätzliche Platzbedarf wurde zum einen im Zuge von Vorabmaßnahmen (Kapitel 1.5) durch die Auslagerung der Mittelspannungsanlagen aus den Betriebsgebäuden (BG) Nord und Süd in neue Mittelspannungsgebäude geschaffen. Damit ist in beiden BG jeweils ein Raum für die Umbaumaßnahmen im Zuge der Hauptbaumaßnahme freigeworden. Durch die Verlagerung der gesamten Lüftersteuerung im Zuge der Hauptbaumaßnahme in neue Räume an den ehemaligen Standorten der entfallenen Zuluftventilatoren wird weiterer Raum für die Umbauten in den Betriebsgebäuden geschaffen. Erst die Gesamtheit des zusätzlich geschaffenen Raums ermöglicht einen Parallelaufbau und -betrieb.

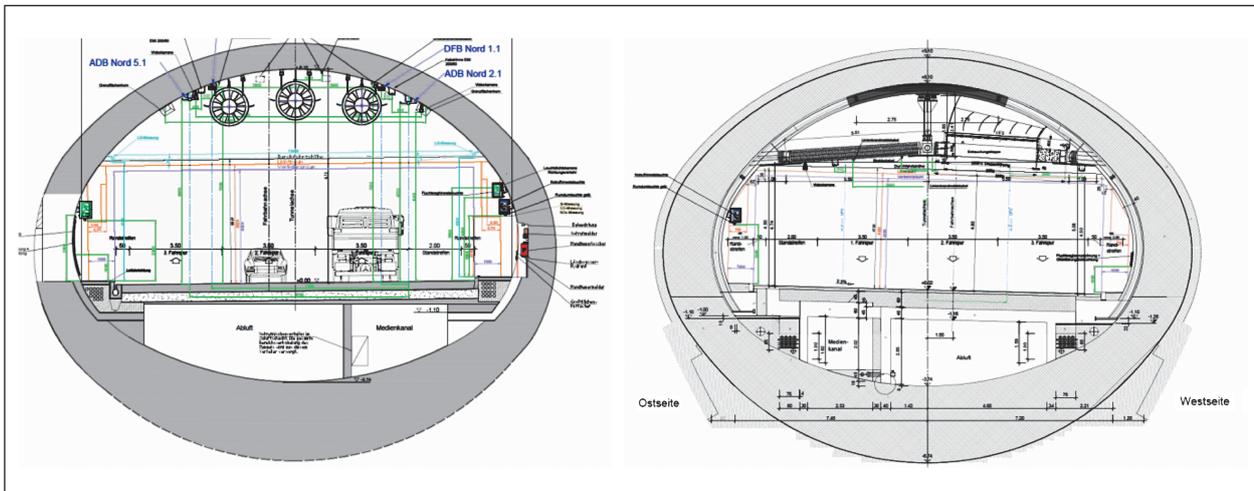


Bild 5: Regelquerschnitte mit betriebstechnischer Ausstattung

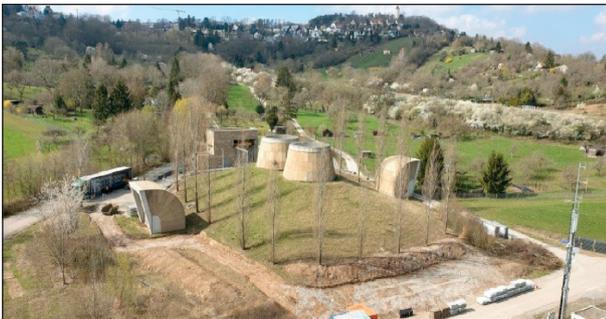


Bild 6: Einbringebauwerk mit Lüftungsbauwerken



Bild 7: Vorbereitung zur Umverlegung der Kabel in die Zu- und Abluftkanäle

Um die Gesamtfunktion mit den einzelnen ineinandergreifenden Gewerken auch in der Umbauphase zu gewährleisten, wird die neue Tunnelsteuerung schrittweise aufgebaut, die bestehende Tunnelsteuerung schrittweise rückgebaut und beide Steuerungen gleichzeitig umgebaut, um das Zusammenwirken der alten und der neuen Anlagenkomponenten sicherzustellen.

1.5 Baudurchführung

Vorabmaßnahmen

Mit den umfangreichen Vorabmaßnahmen wurde Mitte 2016 begonnen. Sie dienen zur Verbesserung der Flucht- und Rettungswegsituation sowie zur Gewährleistung von mehr Baufreiheit und der geplanten Verkehrsführungen. Die Baukosten belaufen sich auf rund 25 Mio. Euro. Die Bauzeit betrug ca. 3 Jahre.

Sie gliedern sich in:

- Los 1: Erweiterung Betriebsgebäude (Neubau Einbringeschacht mit Treppenhaus, Lastenaufzug und Lastenkran),
- Los 2: Rohbauarbeiten (Schließen der Querschläge, Erweiterung Fluchttüren in den Zu- und Abluftkanälen),
- Los 3: Umbau Betriebstechnik (Erweiterung Tunnelfunk und Neubau Personennotfallanlage in den Zu- und Abluftkanälen, Umbau Mittelspannungsanlage),
- Los 4: Erneuerung Verkehrstechnik mit Tunnelsperranlage,
- Los 5: Umverlegung der Kabel aus den Notgehwegen im Ertüchtigungsbereich in die Zu- und Abluftkanäle,
- Los 6: Verlegung der Löschwasserleitungen aus dem Verkehrsraum in die Zuluftkanäle,

- Los 7: Bauliche Umsetzung Sicherheitskonzept (Neubau Rettungskanäle im Bereich der Zu- und Abflutkanäle),
- Los 8: Neubau Baustellenzufahrten,
- Los 9: Neubau Höhenkontrolle,
- Los 10: Neubau Reisezeitanlage und Stauwarnanlage.

Hauptbaumaßnahme

Die Umsetzung der Maßnahmen erfolgt unter Aufrechterhaltung der Anzahl der vorhandenen Fahrstreifen. Lediglich zwischen 22.00 Uhr und 05:00 Uhr kann eine Reduzierung der Fahrstreifenanzahl erfolgen. Als Verkehrsführung während der Arbeiten im Verkehrsraum ist geplant, in der Verkehrsröhre eine 3+1-Verkehrsführung einzurichten. Die verbleibenden 2 Fahrstreifen werden in der Bauröhre geführt. Die Herstellung der Vorsatzschale erfolgt dann in 3 Bauphasen. Der Einbau der Fertigteile findet nachts unter Vollsperrung der Bauröhre statt. Neben der Ertüchtigung des Tunnels ist auch die Erneuerung der gesamten Betriebstechnik erforderlich. Eine Herausforderung dabei ist der parallele Betrieb von alten und neuen Anlagenteilen um das bestehende Sicherheitsniveau im Bau beizubehalten. Die Schwierigkeit ist nicht nur die Erneuerung neben der oben genannten Aufrechterhaltung des Verkehrs, sondern auch die abschnittsweise Herstellung der Vorsatzschale. Die Kosten der fünf Jah-

re dauernden Hauptbaumaßnahme betragen rund 130 Mio. Euro.

Die Hauptbaumaßnahme gliedert sich in folgende Bauphasen:

- Bauphase 0: Verstärkung der Fahrbahnplatten über den Medien- und Abflutkanälen (keine Eingriffe in den Verkehr),
- Bauphase 1: Rechte Ulme, Weströhre (Einbau Rahmensockel und Innenschale) (3+1 u. 2-Verkehr am Tag und Sperrung der Weströhre in der Nacht),
- Bauphase 2: Linke Ulme, Weströhre (Einbau Rahmensockel und Innenschale) (3+1 u. 2-Verkehr am Tag und Sperrung der Weströhre in der Nacht),
- Bauphase 3: Firste, Weströhre (Einbau Fertigteile) unter nächtlicher Vollsperrung,
- Bauphase 4: Rechte Ulme, Oströhre (Einbau Rahmensockel und Innenschale) (3+1 u. 2-Verkehr am Tag und Sperrung der Oströhre in der Nacht),
- Bauphase 5: Linke Ulme, Oströhre (Einbau Rahmensockel und Innenschale) (3+1 u. 2-Verkehr am Tag und Sperrung der Oströhre in der Nacht),
- Bauphase 6: Firste, Oströhre (Einbau Fertigteile) unter nächtlicher Vollsperrung.

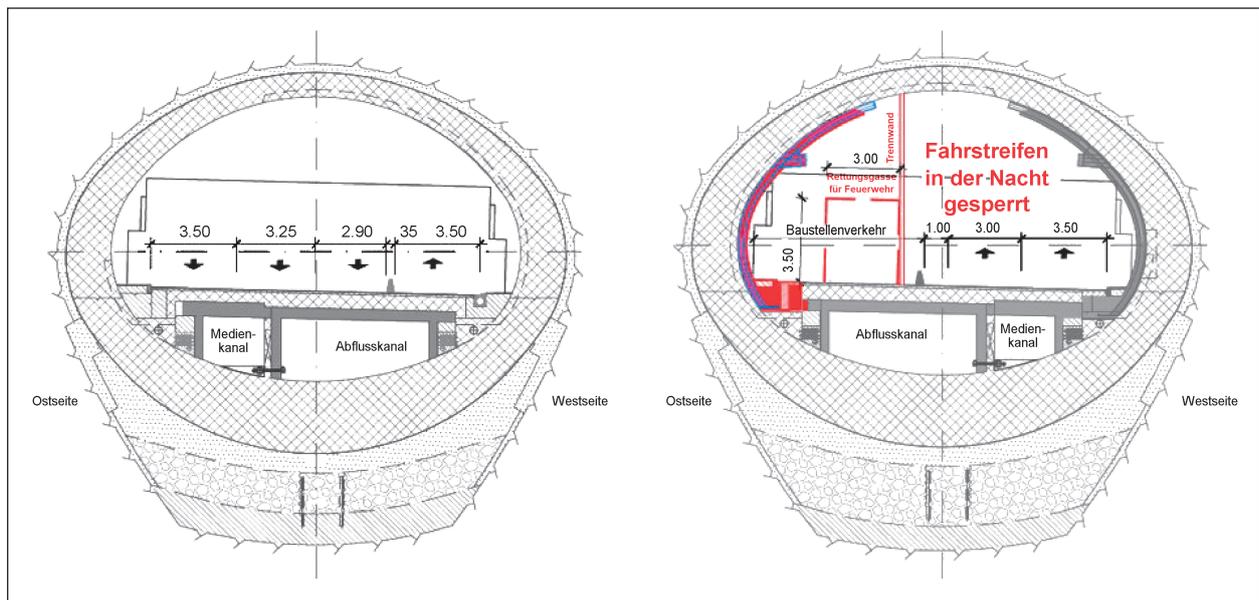


Bild 8: Bauphase 2

2 Tunnelsimulator

Der Tunnelsimulator wurde im Rahmen des 8. BASt-Tunnelsymposiums am 6. Juni 2018 in Bergisch Gladbach vorgestellt. Das Grundkonzept des Pilotprojekts Tunnelsimulator sieht vor, neben dem vorhandenen „Produktivsystem“ ein „Spiegelsystem“ für die Software auf Basis simulierter Außenanlagen einzurichten, um dort die Software des Produktivsystems zu testen und simulierte Schaltungen durchführen zu können. Durch die Simulation im Spiegelsystem kann neu zu installierende Software vor der Installation im Produktivsystem getestet werden. Dadurch lässt sich die Dauer der Inbetriebnahme vor Ort um 4/5 reduzieren. Des Weiteren wird höchstmögliche Tunnelsicherheit durch die Testmöglichkeit aller Datenpunkte im Zusammenspiel mit den Ereignislisten des Alarm- und Gefahrenabwehrplans gewährleistet. Der Eingriff bei betriebstechnischer Nachrüstung unter Aufrechterhaltung des Verkehrs wird minimiert und die sichere Bedienbarkeit des Tunnels bereits im Simulationsmodus erprobt. Im Zuge der Ertüchtigung des Engelbergbasistunnels wurde in einer ersten Phase die Brandlüftung simuliert. Die Ergebnisse konnten direkt für die Vorarbeiten genutzt werden. Nach diesen positiven Erfahrungen wurde auch die Verkehrsprogramme einschließlich der kommenden Verkehrsführungen simuliert. Im Ergebnis soll der Tunnelsimulator über die gesamte Bauzeit eingesetzt werden, um die einzelnen Bauphasen zu simulieren. Derzeit beinhaltet der Tunnelsimulator ein Strömungsmodell, eine Visualisierung, eine Verkehrssimulation und eine Beleuchtungssimulation. Bislang wurden rund 540 Programme erfolgreich getestet.

Lange, Dirk, Dipl.-Ing.
Schmitz, Stephanie, Dipl.-Ing.
Weber, Nikolai, Dipl.-Ing.

Landesbetrieb Straßenbau NRW
Gelsenkirchen, Deutschland

L 530 Rathaustunnel Lüdenscheid – Gesamtinstandsetzung unter erschwerten Bedingungen

Kurzfassung

Die Übernahme des Rathaustunnels in Lüdenscheid in die Baulast des Landes NRW bedingte die vertiefte Auseinandersetzung mit dem Zustand eines Bauwerkes aus dem Jahr 1972. Der in offener Bauweise erstellte, 2-zellige Rahmen ohne Sohle mit jeweils zwei Fahrsteifen pro Richtung wurde auf seinen baulichen Zustand und seine betriebstechnische Ausstattung hin untersucht. Hauptprüfung nach DIN 1076, Sicherheitsdokumentation nach RABT, objektbezogene Schadensanalyse, Baugrundgutachten und eine brandtechnische Berechnung bildeten die Grundlage für umfangreiche bauliche Maßnahmen. Chloridsanierung, Rissverpressung, eine neue Längsentwässerung und Brandschutzputz sind die wichtigsten von ihnen. Die Betriebstechnik muss entsprechend den Vorgaben der RABT vollständig erneuert werden. Erschwerend für die anstehenden Arbeiten unter laufendem Verkehr kam der Fund von Asbest in einigen seinerzeit verbauten Bauprodukten hinzu. Der dadurch verursachte Baustillstand führt zu einer Verlängerung der Bauzeit und zu steigenden Baukosten.

1 Allgemeines

Der vorliegende Beitrag beschreibt die Umstände und Herausforderungen der grundhaften Instandsetzung eines Tunnelbauwerkes aus den 1970er Jahren.

1.1 Veranlassung

Als Folge des Zensus 2011 (Volkszählung) in Nordrhein-Westfalen ergab sich ein Baulastträgerwechsel im Stadtgebiet Lüdenscheid. Neben anderen Streckenabschnitten wurde auch der Rathaustunnel zum 01.01.2014 in die Baulast des Landes NRW überführt.

Schon im Laufe des Jahres 2013 wurde klar, dass der Tunnel dem geltenden Regelwerk nicht entspricht und deshalb grundhaft instand gesetzt werden müsste [1].

1.2 Lage im Netz

Die L 530 verbindet großräumig die Bundesstraße B 236 im nördlich gelegenen Altena mit der B 229 im Süden der Stadt Lüdenscheid. Im betroffenen Streckenabschnitt unterquert sie als 4-streifig ausgebaute innerstädtische Straße den erweiterten Stadtkern der Stadt Lüdenscheid und unterfährt insgesamt fünf Straßen. Des Weiteren wurde der Tunnel später mit drei mehrgeschossigen Gebäuden überbaut. Auf beiden Seiten befinden sich Kreuzungen mit Lichtsignalanlagen. Die Verkehrsbedeutung des Tunnels ist für die Stadt immens, verlaufen doch fast alle Linien des Busverkehrs der Stadt durch den Tunnel. Der DTV beträgt zurzeit ca. 22.000 Kfz/d.

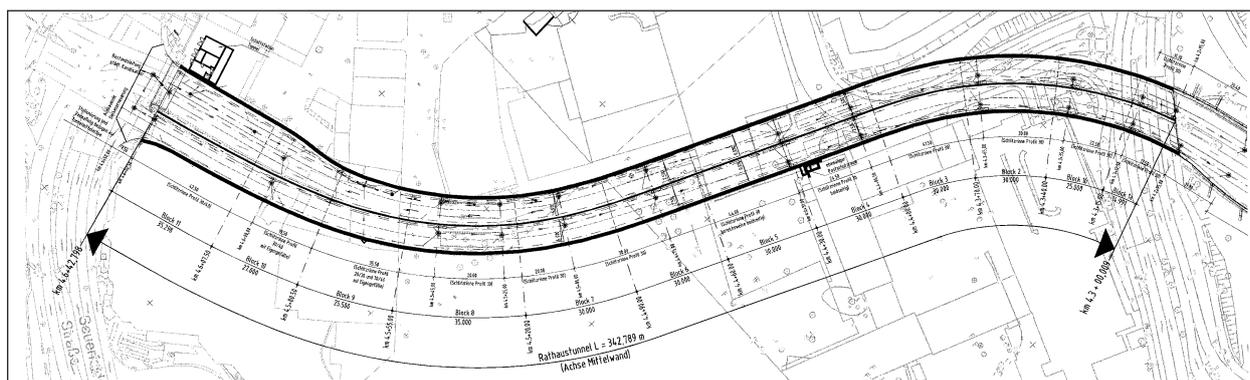


Bild 1: Lageplan Tunnel

2 Beschreibung des Bauwerks

Beim Rathaustunnel handelt es sich um ein ca. 342 m langes Tunnelbauwerk, das als 2-zelliger Rechteckrahmen mit offener Sohle aus Stahlbeton errichtet wurde. Gegründet ist das Bauwerk auf den anstehenden devonischen Felsformationen. Das Tunnelbauwerk besteht aus 11 bzw. 12 Blöcken mit Längen zwischen 15,10 m und 35,30 m. Die Regelblocklänge beträgt 30,00 m. Im Wesentlichen wurden ein Beton B300 und Betonstahl IIIb/IVb verbaut. Die vorgegebene Betondeckung beträgt 3 cm.

Der Regelquerschnitt verfügt über 0,90 m dicke Außenwände und eine 0,50 m dicke Mittelwand. Die Wände werden über 0,80 m dicke Streifenfunda-

mente auf dem anstehenden Fels gegründet. Der Lastabtrag der aufgehenden Gebäude erfolgt durch diese Wände. Die Breite der Streifenfundamente beträgt bei den Außenwänden 1,50 m und bei der Mittelwand 1,70 m. Die Dicke der Tunneldecke beträgt zwischen 0,80 m (Außenwände) und 1,00 m an der Mittelwand.

Die vorhandene lichte Weite des Regelquerschnitts beträgt je Fahrtrichtung 9,20 m.

Der Abstand zwischen OK-Straße (Fahrbahnmitte) und Tunneldecke 4,95 m.

Für die Versorgung der betriebstechnischen Ausstattung sind Kabelleerrohre in Tunnellängsrichtung in den Außenwänden und in der Mittelwand eingebaut worden. Für den Kabelzug gibt es verschiedene Arten von Wandnischen. Aus den Wandnischen gibt es zudem Kabelleerrohre zur Tunneldecke (z. B. zum Anschluss der Tunnelbeleuchtung).

Nahezu die gesamte Betonoberfläche im Tunnel wurde mit einem Oberflächenschutzsystem versehen.

Das Bauwerk wurde mit einer außenliegenden Abdichtung ausgeführt. Zusätzlich finden sich auf den Außenseiten der Wände erdseitig Drainagerohre, welche an die Längsentwässerung angeschlossen sind.

Etwa in Tunnelmitte befinden sich im Ursprungszustand Deckenvouten mit jeweils zwei Längslüftern.



Bild 2: Ansicht Westportal

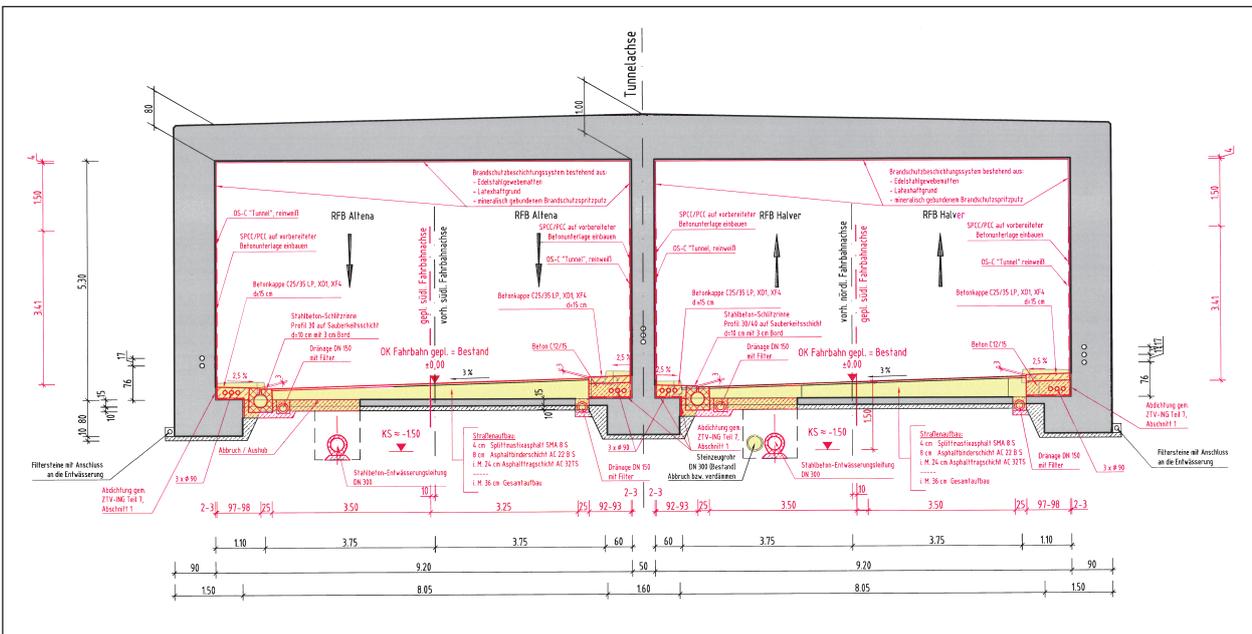


Bild 3: Tunnelquerschnitt

3 Untersuchungen am Bauwerk

Nach den ersten Begehungen des Bauwerks und des Betriebsgebäudes zeigte sich, dass vor einer Instandsetzung des Bauwerks und der betriebstechnischen Ausstattung eine gründliche Zustandserhebung notwendig sein würde. Diese Untersuchungen begannen im Jahr 2013 und wurden im Zuge der Instandsetzungsplanungen immer wieder verfeinert.

3.1 Hauptprüfung nach DIN 1076

Die Hauptprüfung [3] ergab eine Zustandsnote von 3,3 (max S = 1; max V = 3, max D = 4).

Trotz der alles überdeckenden Beschichtungen der Wände und Decken wurden neben dem für Betonbauwerke üblichen Rissbildern vereinzelt feuchte Risse, Abplatzungen und freilegende Bewehrung vorgefunden.

Es wurden folgende Empfehlungen ausgesprochen:

- Reinigung der Entwässerungseinrichtungen (sofort umgesetzt),
- Rissinstandsetzung im Tunnel,
- Fugeninstandsetzung im Tunnel,
- Instandsetzung Geländer/Brüstung am Ostportal.

Im Zuge Kamerabefahrung der Entwässerung stellte sich heraus, dass die häusliche Entwässerung der aufgehenden Bebauung in die Tunnellängsentwässerung mündete.

3.2 Sicherheitsdokumentation/ Sicherheitsbewertung

Eine durchgeführte Sicherheitsdokumentation [4] und eine Sicherheitsbewertung gemäß RABT 2006 ergaben erhebliche Defizite in der betrieblichen Ausstattung des Tunnels. Die Ausstattung aus dem Jahr 1972 wurde den fortschreitenden Ansprüchen der RABT nicht nachgeführt.



Bild 4: Zustand Lüfter



Bild 5: Zustand Tunneldecke



Bild 6: Zustand Betriebsgebäude

Neben den durchgeführten Analysen und Bewertungen konnten den beiden Dokumenten u. a. folgende Empfehlungen entnommen werden:

- Veranlassung einer Nachrechnung des Tunnelbauwerks im Brandfall unter Berücksichtigung der darüber liegenden Bebauung,
- Geschwindigkeitsreduzierung von 50 km/h auf 40 km/h,
- Erneuerung der BTA gemäß RABT,
- Installation einer Brandmeldeanlage,
- Herstellung von Sperranlagen vor den Tunnelleinfahrten für den Ereignisfall,
- Ggf. Ertüchtigung/Neubau einer Fluchttür in der Mittelwand.

3.3 Objektbezogene Schadensanalyse

Im Rahmen einer objektbezogenen Schadensanalyse [5] wurden insgesamt 135 Bohrmehlproben entnommen und hinsichtlich ihres Chloridgehaltes überprüft. Im Weiteren erfolgte eine Messung der Betondeckung, eine Entnahme und Beprobung von 5 Bohrkernen und die Entfernung des Wandstrichs an Probeflächen durch Sandstrahlen.

Als Ergebnis der verschiedenen Untersuchungen ist festzuhalten:

- Im Spritzwasserbereich sind Chloride vorzufinden, die aufgrund der ermittelten Menge/Konzentration im Beton zu Bewehrungskorrosion führen können. Dieser Bereich ist auf einen ca. 30 cm hohen Streifen im Bereich des Notgehweges einzugrenzen (20 cm über dem Gehweg und 10 cm unterhalb des Gehweges). Begünstigt wird der Chloridtransport im Beton durch die poröse und teilweise minderfeste Betonrandzone. Bei punktuellen Kontrollen der Bewehrung konnte keine chloridinduzierte Korrosion an Bewehrungsseisen festgestellt werden.
- Aufgrund der hohen Chloridkonzentration im unteren Wandbereich nach über 70 m im Tunnelinneren ist davon auszugehen, dass im Tunnel durchgehend der Streuvorgang nicht unterbrochen wurde.
- Die übrigen Bereiche (Wände und Decken) weisen, wenn überhaupt, nur unwesentliche Chloridgehalte über dem Grundwert auf.

- Ganzflächig ist von einer minderfesten Betonrandzone auszugehen. Durch das Entfernen der alten Beschichtung (einschl. darunterliegender Feinspachtelung) wird die ursprüngliche Betonoberfläche geöffnet. Infolge der Porosität der Betonrandzone entsteht eine inhomogene Oberfläche mit ausgeprägt unterschiedlichen Rautiefen.
- Durch die offene Fuge zwischen Wand und Gehwegplatten versickert tausalzhaltiges Wasser, welches von den beschichteten Wänden herunterläuft. Daher kann eine hohe Chloridkonzentration im Konstruktionsbeton der Tunnelwände unterhalb OK Gehweg nicht ausgeschlossen werden.

3.4 Baugrundgutachten und Umwelttechnisches Gutachten

Da mögliche Arbeiten im Bereich der Tunnelsohle zu erwarten waren (Erneuerung der Entwässerung, Erneuerung der Notgehwege), wurde eine zuvor abgestimmte Erkundung des Baugrundes [6] durchgeführt. Bei dieser Erkundung wurden folgende Punkte untersucht:

- Straßenaufbau,
- Aufbau der Tunnelsohle,
- Untergrundbeschaffenheit im und außerhalb des Tunnels,
- OS-System an den Tunnelwänden,
- Chloriduntersuchung Streifenfundament/Tunnelsohle.

3.5 Nachrechnung des Tunnels für den Brandfall

Aufgrund der besonderen örtlichen Randbedingungen über dem Tunnelbauwerk (Überbauung und Nutzung als öffentliche Verkehrsfläche/Fußgängerzone) wurde die Standsicherheit des Tunnelbauwerks im Brandfall untersucht [7].

Als Ergebnis der Nachrechnung wird festgehalten, dass die Standsicherheit in der heutigen Bestandsituation unter dem Ansatz der ZTV-ING Brandkurve nicht gewährleistet ist. Es bestand Handlungsbedarf.

4 Geplante Maßnahmen

Die oben genannten Untersuchungen, sowie weitere Recherchen von Straßen NRW führten zu dem Bild eines in offener Bauweise hergestellten Tunnelbauwerks mit einigen, teils tunneluntypischen Besonderheiten:

- Hausentwässerung in der Tunnellängsentwässerung,
- Überbauung des fertigen Bauwerks mit Gebäuden,
- betriebstechnische Ausstattung aus den 1970er Jahren,
- Fluchtweg einer Bunkeranlage endet in einer Tunnelröhre,
- ausgeprägtes Rissbild in Decke und Wänden,
- schadhafte Fugeneinlagen,
- hoher Chlorideintrag in den Wänden; auch unterhalb des Notgehweges.

Aus den genannten Besonderheiten ergab sich die Herausforderung, einen Bestandstunnel unter Verkehr auf den gültigen Stand der Technik umzubauen. Dazu sollte jeweils ein Jahr lang eine Röhre gesperrt und ertüchtigt werden. Die Gegenröhre sollte in dieser Zeit im Einrichtungsverkehr betrieben werden. So sollten der öffentliche und private Verkehr in Lüdenscheid aufrechterhalten werden.

4.1 Konstruktion

Aus den Untersuchungen ergab sich, dass der Fahrbahnaufbau, die Notgehwege und die Tunnelentwässerung neu aufgebaut werden mussten. Im Hinblick auf die Zugänglichkeit der gesamten Betonkonstruktion sollte ihre Instandsetzung nach Rückbau des bituminösen Fahrbahnaufbaus und der Notgehwege erfolgen. Außerdem waren umfangreiche Maßnahmen der Betoninstandsetzung durchzuführen.

4.1.1 Decke und Wände

Die vorhandenen Risse an Decke und Wänden werden gemäß ZTV-ING Teil 3 Abschnitt 4 „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ und Abschnitt 5 „Füllen von Rissen und Hohlräumen in Be-

tonbauteilen“ verpresst. Da es sich bei den erkundeten Rissen augenscheinlich um Zwangsrisse handelt und sowohl eine temperaturbedingte Rissbewegung als auch eine Wasserführung nicht ausgeschlossen werden können, wurde als Injektionsmaterial ein Polyurethanharz PUR-I vorgesehen.

Es war vorgesehen, den Zustand der Bewehrung im Bereich der Risse in ausgewählten Bereichen zunächst stichpunktartig zu begutachten. Es gibt eine erhöhte Wahrscheinlichkeit einer Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung und durch erhöhte Chloridgehalte im Bereich der Trennrisse, insbesondere in den unteren Wandbereichen. Die Begutachtung sollte durch Inaugenscheinnahme nach Freilegen der Bewehrung im Rahmen der Oberflächenvorbereitung während der Baudurchführung erfolgen. Auf eine Potenzialfeldmessung zur flächenhaften Abbildung der Korrosionswahrscheinlichkeit und zur Detektion von Extremstellen wurde zunächst verzichtet.

Im oberflächennahen Beton der Streifenfundamente wurde eine erhöhte Chloridkonzentration erkundet. Es war vorgesehen, den oberflächennahen Beton erschütterungsarm abzutragen und eine Realkalisierung durch einen mindestens 2 cm starken Betonersatz PCC I auszuführen. Im Anschluss sollen die Streifenfundamente eine Abdichtung in Anlehnung an ZTV-ING Teil 7 Abschnitt 1 „Brückenbeläge aus Beton mit einer Dichtungsschicht aus einer Bitumenschweißbahn“ erhalten.

Im unteren Bereich der Wände (Sohle bis 1,50 m unter UK Decke) sollte das vorhandene Oberflächenschutzsystem sowie minderfeste Betonrandzone erschütterungsarm abgetragen werden. Die Realkalisierung soll durch einen mindestens 2 cm starken Betonersatz SPCC/PCCII erfolgen. Der Betonersatz erhält eine Egalisierung und einen Anstrich (RAL 9010 reinweiß). Als Egalisierung und Anstrich ist ein OS-C (Beschichtung mit erhöhter Dichtigkeit für nicht begeh- und befahrbare Flächen) mit zusätzlichen Anforderungen an den Anstrich bezüglich Nassabriebfestigkeit, Glanzwert und Entflammbarkeit (ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 1 Ziffer 11.2 (4)) vorgesehen.

Im oberen Bereich der Wände (ab 1,50 m von UK Decke bis Decke) und der Decke sollen das vorhandene Oberflächenschutzsystem sowie die minderfeste Betonrandzone erschütterungsarm abgetragen werden. Die oberen Wandflächen und die Decke sollen einen konstruktiven Brandschutz, beste-

hend aus einer 4,0 cm dicken Schicht Brandschutz-Leichtspritzmörtel erhalten. Zur Verbesserung des Haftverbundes zwischen dem Brandschutz-Leichtspritzmörtel und dem Alt-Beton wird eine Haftbrücke verwendet. Im Weiteren wird als zusätzliche konstruktive Maßnahme ein profiliertes Edelstahlgewebe, das am Alt-Beton verankert wird, vorgesehen. Dieses Gewebe verhindert bei einem partiellen Versagen des Haftverbundes ein plötzliches Herunterfallen des Putzes.

Das Verbindungsbauwerk zum Bunker wird nicht mehr benötigt und fachgerecht verfüllt. Der Abfluss zur Tunneldrainage im Zugangsbereich darf nicht beschädigt bzw. verfüllt werden. Folglich verbleibt eine Wandnische, die mit einer Feuerschutztür T90 aus Edelstahl verschlossen wird.

Die maroden Nischentüren werden komplett ausgetauscht.

Die vorhandene Tür in der Mittelwand bleibt als Rettungsweg für die Feuerwehr bestehen und wird erneuert.

4.1.2 Entwässerung

Die Aufnahme der Entwässerung im Tunnel ergab folgendes Bild:

- Abfluss von Tunnelwässern über Abläufe ohne Siphon,
- das Wasser aus der Tunneldrainage wurde in die Längsentwässerung abgeschlagen,
- Hausanschlüsse an die Längsentwässerung,
- Einleitung der Längsentwässerung in die städtische Kanalisation.

Dieser Zustand entspricht nicht den Vorgaben der ZTV-ING und RABT. Es wurde beschlossen, die Entwässerung zu entflechten und so einen normgerechten Zustand für alle im Tunnel anfallenden Wasser zu schaffen.

Die Fassung der Wässer auf der Fahrbahn erfolgt in Zukunft über Schlitzrinnen mit Siphon. Von dort gelangt die Flüssigkeit in die nur für diesen Zweck eingebaute Längsentwässerung. Diese nimmt auch weiterhin das anfallende Drainagewasser auf und führt alle Wässer gemeinsam in den städtischen Kanal. Die Hausabwässer werden über die Bestandsleitung zur Kläranlage geführt.

4.1.3 Straßenbau

Durch die Notwendigkeit einer neuen Tunnelentwässerung ergab es sich zwangsläufig, die bituminöse Fahrbahn vollständig zu erneuern. Dazu mussten die Vorgaben der RStO zum Straßenaufbau den vorhandenen Gegebenheiten angepasst werden.

Die Notgehwege mussten aufgrund der Chloridsanierung der Wände vollständig abgebrochen werden. Ihre Erneuerung wurde aufgrund der vorhandenen Querschnittsbreiten an der einen oder anderen Stelle den Gegebenheiten angepasst.

4.2 Ausstattung

Die für einen sicheren Tunnelbetrieb geplante Ausstattung orientiert sich ohne Ausnahme an den Vorgaben der RABT 2006 [2]. Das Tunnelbauwerk wird so ausgestattet, dass der Betrieb des Tunnels vollautomatisch erfolgen kann und die Überwachung, der Zugriff bzw. der Eingriff in die Betriebs- und Verkehrstechnische Tunnelausstattung durch die Tunnelleitzentrale jederzeit möglich ist. Aufgrund der umfangreichen baulichen Maßnahmen und dem Alter der Anlagenteile konnte kein Teil der Ausstattung weiter verwendet werden. Das gilt auch für die im Betriebsgebäude verbauten Komponenten.

Die wichtigsten Bauteile der Ausstattung sind:

- die Beleuchtungsanlage für den Tunnel mit Natriumdampfhochdrucklampen, Leuchtdichtkameras für den Außenbereich und die Einsichtsstrecken, sowie Beleuchtungsstärkesensoren,
- Sichttrübbemessleinrichtungen zur Branddetektion,
- die Verkehrstechnische Ausstattung in der Mindestausstattung zzgl. Wechselverkehrszeichen an den Lichtsignalanlagen im Zufahrtbereich,
- die Steuerungseinheit Verkehrstechnik inkl. Anwendersoftware,
- die Streckenstationen gem. TLS,
- ferngesteuerte Sperrschranken an den Portalen mit Schleifen, Videoüberwachung und Lautsprechern,
- die Fluchtwegkennzeichnungsleuchten,

- die Notrufstationen und Notrufsäulen an den Portalen,
- die Videoüberwachung der Tunnelportale,
- die Tunnelfunkanlage zur Versorgung des Tunnels mit UKW, Straßenmeisterei- und BOS-Funk,
- eine Tunnellautsprecheranlage mit Portallautsprechern,
- die Brandmeldeanlage mit automatischen und manuellen Brandmeldeeinrichtungen,
- Brandmeldezentrale, Feuerwehrbedienfeld und Feuerwehranzeigetableau,
- den Löschwasserentnahmestellen an den Portalen,
- eine Mittelspannungsschaltanlage inkl. Trafo,
- eine Niederspannungsschaltanlage zur Versorgung der Verbraucher im Tunnel, Tunnelvorfeld, Betriebsgebäude etc.,
- eine USV-Anlage inkl. Batterien,
- die zentrale Leittechnik inkl. Leit- und Bedienrechner, Prozessvisualisierung etc. auch zur Anbindung an Tunnelleitzentrale und
- die Feuerwehr- Bedientableaus an den Tunnelportalen und ein Bedientableau im Betriebsgebäude.

5 Asbestfund

Die Vergabe der Bauarbeiten erfolgte im August 2018. Die beauftragte ARGE nahm die Arbeiten an der Südröhre auf.

Nach Hinweisen der ausführenden Firma wurden im April 2019 in Proben des von den Wänden und der Decke abgeschrämmten Materials Asbestfasern der Gruppe Chrysotil nachgewiesen. Daraufhin wurden die Arbeiten sofort eingestellt und die Tunnelportale mit Folien abgedichtet. Nach Rücksprache mit Sachverständigen, Laboren, der Bezirksregierung Arnsberg und der Berufsgenossenschaft Bau wurden mögliche Asbestquellen, auch im Betriebsgebäude, benannt und dort entnommene Proben untersucht. Alle Arbeiten am Tunnel wurden eingestellt, ein Zutrittsverbot für Tunnel und Be-



Bild 7: Schrämmarbeiten in der Südröhre



Bild 8: Erdarbeiten in der Südröhre

triebsgebäude ausgesprochen. Die Untersuchungen ergaben Asbestfasern in folgenden Bauprodukten:

- Blockfugenfüllung (10 % Chrysotil),
- Asbestzement-Platten-„Streifen“ (6-8 % Chrysotil),
- Beschichtung der Tunnelwand (2-4 % Chrysotil),
- Stäube im BG.

Nach Rücksprache mit der Bezirksregierung Arnsberg erarbeitete eine Sachverständige Sanierungskonzepte für Tunnel und Betriebsgebäude [8]. Diese sahen unter anderem eine Probesanierung für den Tunnel vor. Dort sollten verschiedene Verfahren zur Beseitigung der vorgefundenen Materialien erprobt werden.

Nach Abschluss und Auswertung der Probesanierung Anfang 2020 wurde ein endgültiges Sanie-

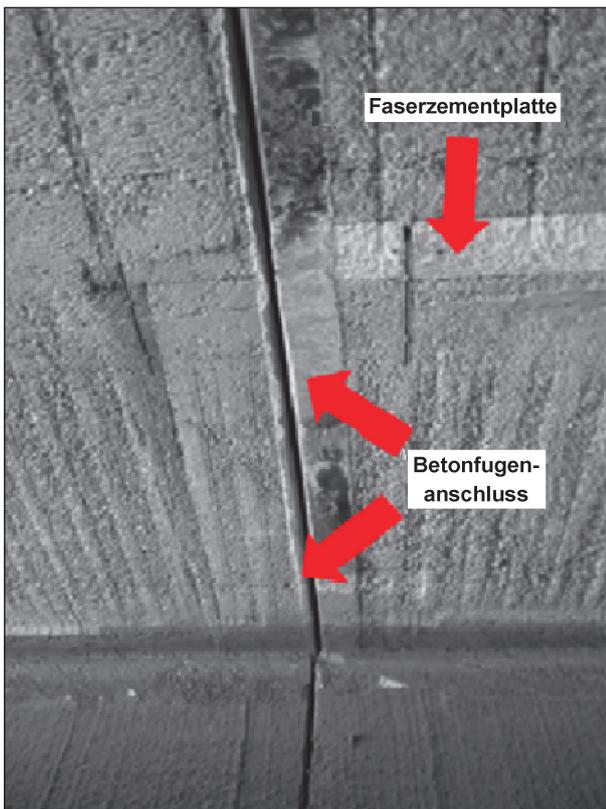


Bild 9: Blockfugen



Bild 10: Decke mit verlorener Schalung

rungskonzept erarbeitet und von der BG Bau und der Bezirksregierung Arnsberg genehmigt. Es sieht vor, die Asbestzement-Plattenstreifen im Stemmverfahren zu entfernen und verbliebene Reste mittel Höchstdruckwasserstrahl zu entfernen. Dabei müssen die Fugenbänder in den Blockfugen vor Beschädigung geschützt werden. Die Beschichtungen der Tunnelwände und -decke sollen mit dem Eiswürfel-Strahlverfahren entfernt werden. Alle anfallenden Materialien werden in luftdichte Behälter verladen und verlassen den Tunnel über eine



Bild 11: Probesanierung

Schleuse. Für den Arbeitsschutz der Mitarbeiter und der Bauüberwachung gelten die Regeln der einschlägigen Gesetze und Verordnungen. Die Dauer für die Sanierung einer Röhre wird mit etwa einem Jahr angesetzt.

Die Asbeststäube im Betriebsgebäude wurden mittlerweile entfernt, sodass das Gebäude wieder betreten werden darf.

6 Ausblick

Die Instandsetzung eines Tunnelbauwerks aus den 1970er Jahren unter laufendem Verkehr ist an und für sich schon eine Herausforderung. Durch die sich während der Bauzeit ergebende Asbestproblematik wurden sämtliche Bauablauf- und Zeitpläne obsolet. Auftragnehmer und Auftraggeber sahen sich mit einer ungewohnten Fragestellung konfrontiert. Nur durch enge Zusammenarbeit, besonders auch mit den Aufsichtsbehörden, konnte die Herausforderung gemeistert werden.

Literatur

- [1] Bauwerksentwurf Rathaustunnel Lüdenscheid, Erläuterungsbericht; IMM Maidl & Maidl Beratende Ingenieure, Bochum; unveröffentlicht
- [2] Erläuterungsbericht zur Entwurfsplanung- betriebstechnische Tunnelausstattung, Stredich und Partner, Bochum; unveröffentlicht
- [3] Prüfbericht 2013 H, Ahlenberg Ingenieure, Herdecke; unveröffentlicht

- [4] Sicherheitsdokumentation, Gruner AG Ingenieure und Planer, Basel; unveröffentlicht
- [5] Chloriduntersuchungen an den Portalwänden des Rathaustunnels in Lüdenscheid, Straßen NRW Prüfcenter; unveröffentlicht
- [6] Rathaustunnel Lüdenscheid Baugrundgutachten und umwelttechnisches Gutachten, Ingenieurbüro Dr. Spang, Witten; unveröffentlicht
- [7] Überprüfung der Standsicherheit des Rathaustunnels in Lüdenscheid für den Brandfall, IMM Maidl & Maidl Beratende Ingenieure, Bochum; unveröffentlicht
- [8] Konzept zur Sanierung des Rathaustunnels Lüdenscheid, MAASJOST Sachverständigen GmbH & Co. KG, Siegen; unveröffentlicht

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

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 <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 114: Intelligente Bauwerke – Anforderungen an die Aufbereitung von Messgrößen und ihrer Darstellungsform

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

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

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

B 131: Pilotstudie zum Bewertungsverfahren Nachhaltigkeit von Straßenbrücken im Lebenszyklus

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

B 134: Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Erüchtigungskonzepte von Straßenbrücken

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

2019

B 147: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen

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

2020

B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden

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

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

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

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

Keßler, Gehlen € 16,00

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

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheufler, Zilch, Tecusan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

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

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

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

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

B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

B 154: Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern

Friedrich € 9,00

B 155: Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken

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

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

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 157: 9. BAST-Tunnelsymposium – Tagungsband € 16,00

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

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

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.