



BAST Tunnelsymposium 2015

29. April 2015

Bundesanstalt für Straßenwesen
Bergisch Gladbach

Tagungsband

Inhalt

Tunnelbetrieb in Deutschland.....	5
Änderungen in den neuen RABT 2015	11
Der Tunnel Hirschhagen im Zuge des Neubaus der A44	25
Einfluss der Tunnelausstattung auf das Reaktions- und Fluchtverhalten der Verkehrsteilnehmer	31
Nachrüstung des Tunnels Farchant	35
Untersuchungen zur Längslüftung an einem Modelltunnel.....	45
Brandkurve nach ZTV-ING - ausreichend für extreme Brände?	59
Verbesserung des konstruktiven Brandschutzes durch den Einsatz von PP- Faserbeton	67
Tunnelbemessung für Extremereignisse	77

Tunnelbetrieb in Deutschland

Martin Kostrzewa

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

1 Tunnelbestand

Der Bau von Straßentunneln in Deutschland hat aufgrund der Anforderungen an den Lärmschutz sowie dem Schutz der Umwelt weiterhin eine große Bedeutung. So nimmt die Tunnelanzahl immer noch stetig zu. Derzeit befinden sich 256 Tunnel mit einer Gesamtröhrenlänge von ca. 250 km im Bereich der Bundesfernstraßen in Baulast des Bundes, Bild 1. Die meisten Straßentunnel liegen topographisch bedingt im Süden des Landes, insbesondere in Baden-Württemberg.

Straßentunnel in Deutschland zählen mit ihrer umfangreichen Sicherheitstechnik bereits heute zu den sichersten Tunneln Europas, was auch durch die ADAC-Tunneltests regelmäßig bestätigt wird. Ältere Tunnel, die noch nicht alle aktuellen Anforderungen erfüllen, werden im Rahmen des umfangreichen Nachrüstungsprogramms an die neuesten Sicherheitsstandards angepasst, damit auch dort den Tunnelnutzern optimale Sicherheit geboten wird.

Tunnelbestand im Zuge von Bundesfernstraßen

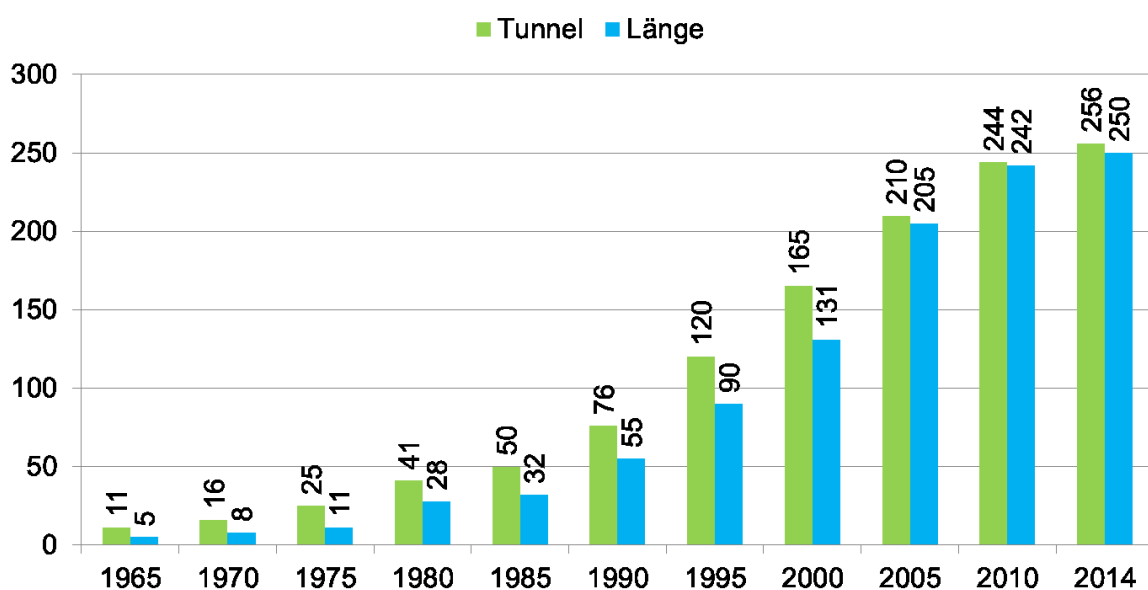


Bild 1: Tunnel der Bundesfernstraßen in Baulast des Bundes [BMVI]

Der wesentliche Anteil der Tunnel wurde in der Zeit nach 1990 gebaut, so dass das durchschnittliche Alter der Tunnel bei etwa 20 Jahren liegt. Die durchschnittliche Länge der Tunnel beträgt aktuell rund 610 m.

Aus Sicht des Tunnelbetriebes sind Tunnel ab einer Länge von 400 m von besonderer Bedeutung, da ab dieser Länge die betriebstechnische Ausstattung und damit der Aufwand für die Überwachung und Instandhaltung der Tunnel erheblich zunimmt. Hiervon befinden sich derzeit 116 Tunnel km mit einer Gesamtröhrenlänge von ca. 210 km im Bereich der Bundesfernstraßen in Baulast des Bundes. Die durchschnittliche Länge dieser Tunnel beträgt aktuell rund 1100 m.

2 Tunnelbetrieb

Aufgabe des Tunnelbetriebes ist die Sicherstellung eines störungsfreien Verkehrsflusses, die Vermeidung von kritischen Ereignissen sowie Hilfeleistung bei Notfällen im Tunnel. Hierfür sind optimal aufeinander abgestimmte technische Betriebseinrichtungen notwendig, die einer konsequenten Unterhaltung, Instandsetzung und Erneuerung, aber auch einer regelmäßigen Reinigung unterliegen. Neben der Überwachung, Steuerung und Regelung der technischen Betriebseinrichtungen und des Verkehrs im Störungs- und Notfall, sind Organisationspläne für den Notfall aufzustellen und regelmäßig zu üben.

Zur Gewährleistung eines sicheren Tunnelbetriebes sind in den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb für Straßentunnel (RABT) Organisationsformen für Tunnel ab einer Länge von 400 m zur Durchführung der verschiedenen Aufgaben des Tunnelbetriebes beschrieben. Eine Verwaltungsbehörde muss sicherstellen, dass sämtliche die Sicherheit eines Tunnels betreffenden Anforderungen eingehalten werden. Ein von der Verwaltungsbehörde bestimmter Tunnelmanager ist für das Tunnelmanagement bei Planung, Bau und Betrieb verantwortlich. Der Tunnelmanager ernennt für jeden Tunnel einen Sicherheitsbeauftragten, der sämtliche Präventiv- und Sicherungsmaßnahmen koordiniert. Inspektionen, Bewertungen und Prüfungen sind durch eine Untersuchungsstelle durchzuführen. Bei Tunneln mit einer Länge unter 400 m sind aufgrund des geringeren Ausstattungsgrades vereinfachte Organisationsformen möglich, wobei auch hier ein sicherer Tunnelbetrieb gewährleistet sein muss.

3 Nachrüstungsprogramm

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

Neben einem Sofortprogramm, bei dem sicherheitstechnische Verbesserungen wie die Fluchtwegkennzeichnungen, die Brandnotbeleuchtungen, optische Leitelemente und die Umsetzung der Alarm- und Gefahrenabwehrpläne vorgenommen wurden, war eine umfassende betriebstechnische Nachrüstung für unter anderem das Lüftungssystem, die Brandlüftung, die Branddetektion und -meldung, die Notrufeinrichtungen, die Lautsprecheranlagen und die Fluchtwegkennzeichnung in vielen Fällen erforderlich.

Das Erfordernis einer bautechnischen Nachrüstung wurde im Wesentlichen im Hinblick auf den Abstand der Notausgänge, die Anordnung von Rettungstollen und Pannenbuchten, Überfahrten an den Portalen, Entwässerungseinrichtungen, Schlitzrinnen, Feuerlöschleitung, Hydranten, die Löschwasserversorgung an den Portalen, die Rückhaltebecken für Störfälle, die Anordnung von Zwischendecken, den Einbau von Notrufkabinen und den baulichen Brandschutz der Konstruktion überprüft.

Das Tunnelnachrüstungsprogramm des Bundes mit einem Finanzvolumen von insgesamt ca. 1,2 Mrd. Euro ist in wesentlichen Teilen erfolgt. 60 % der Tunnelanlagen werden bis Ende 2015 nachgerüstet sein. Die Maßnahmen der übrigen 40 % befinden sich in der Umsetzung bzw. sind noch ausstehend und sollen bis zum Jahr 2018 abgeschlossen sein.

4 Tunnelereignisse

Seit dem Jahr 2006 erfolgt eine Dokumentation und Auswertung von Tunnelereignissen, welche zur Sperrung von Tunnelröhren führten oder bei denen Einsatzdienste tätig waren. Die Dokumentation erfolgt durch einen in Zusammenarbeit mit den Ländern entwickelten Ereignismeldebogen, welcher mit ARS 03/2008 zur bundesweiten Anwendung eingeführt wurde. Die Auswertung erfolgte durch die BASt bzw. im Rahmen von Forschungsvorhaben. Bis heute wurden ca. 17.000 Ereignisse dokumentiert. Hierbei handelt es sich um ca. 11.000 Ereignisse, welche innerhalb der Tunnel auftraten, von denen wiederum rund

25 % Unfälle und Brände waren. Bei fast 90 % der dokumentierten Unfällen und Bränden waren keine Personenschäden zu verzeichnen, Bild 2.

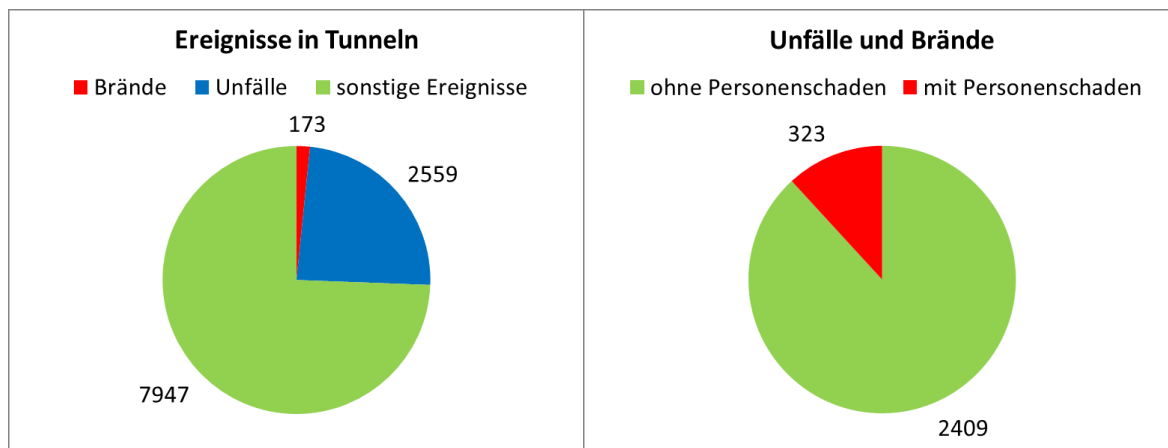


Bild 2: Ereignisse in Tunneln der Bundesfernstraßen in Baulast des Bundes [BMVI]

Neben der Erstellung des von der EU-Kommission geforderten Berichts über Brände und Unfälle in Tunneln des TERN werden Auswertungen der Tunnelereignisse in verschiedenen Forschungsvorhaben genutzt und stehen dem BMVI als Entscheidungshilfe in allen Themenbereichen zur Verfügung.

5. Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb für Straßentunnel (RABT)

Die RABT, Ausgabe 2006, befinden sich derzeit in der Endphase der Überarbeitung. Zweck der in den RABT beschriebenen Maßnahmen ist weiterhin vorrangig die Sicherstellung einer sicheren Verkehrsführung, die Vermeidung kritischer Ereignisse sowie der Schutz und die Selbstrettung der Tunnelnutzer im Notfall. Darüber hinaus dienen sie dem Schutz der Umwelt sowie der Unterstützung der Einsatzdienste bei der Hilfeleistung bei Bränden, Unfällen und Pannen.

Durch die Umsetzung des Nachrüstungsprogrammes befinden sich die bestehenden Tunnel sicherheitstechnisch auf sehr hohem Niveau, so dass eine Anwendung der Vorgaben der neuen RABT auf Bestandstunnel nicht zwingend erforderlich ist. Da die RABT jedoch weitestgehend den Stand der Technik abbilden, sind bei Änderungen, Erneuerungen und Instandsetzungen von betriebstechnischen Einrichtungen die hierfür geltenden Anforderungen auch zukünftig zu beachten.

Zweckmäßige Abweichungen, aufgrund objektspezifische Besonderheiten, die nicht in jedem Einzelfall in den RABT berücksichtigt werden können, sind, soweit eine entspre-

chende Begründung (Nachweis der Erfordernis) vorliegt, generell möglich, wobei der in den RABT beschriebene Sicherheitsstandard nicht unterschritten werden darf. Darüber hinaus kann bei Sonderbauwerke (teilabgedeckte unter- oder oberirdische Verkehrswege, oberirdische Einhausungen von Straßen, Kreuzungsbauwerke mit anderen Verkehrsweegen sowie Galeriebauwerke) aufgrund der Bauart gegebenenfalls auf sicherheitstechnische Elemente und Maßnahmen verzichtet werden. Voraussetzung hierfür ist ebenfalls die Gewährleistung des gleichen Sicherheitsstandards.

Änderungen in den neuen RABT 2015

Prof. Dr. Wolfgang Baltzer

BUNG Ingenieure AG, Heidelberg / FH-Aachen, University of Applied Science

1 Einleitung

Ziel des Betreibers eines Tunnels ist die Sicherstellung eines reibungslosen Verkehrsablaufs. Durch bauliche, technische und organisatorische Maßnahmen sollen sowohl Abweichungen vom Regelbetrieb vermieden werden als auch bei Zwischenfällen, die durch ein liegengebliebenes Fahrzeug, durch einen Unfall oder durch einen Brand verursacht sind, zum einen den Tunnelnutzern ausreichende Möglichkeiten zur Selbsthilfe bzw. Selbstrettung gegeben und zum anderen auch eine Fremdhilfe bzw. eine Fremdrettung ermöglicht werden.

Die dazu erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen sind für Deutschland in den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT) geregelt, die 1985 eingeführt und 2006 letztmalig überarbeitet worden sind.

Seit 2006 sind auch durch die systematische Auswertung der Zwischenfälle umfangreiche Erfahrungen im Betrieb von Straßentunneln gemacht worden, die zum Teil zu einem Umdenken in Fragen zur Sicherheitsphilosophie geführt und durch die zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten angestoßen worden sind. Mit der nun vorliegenden Fassung 2015 [1] werden die gewonnenen Erkenntnisse in einem neuen Regelwerk umgesetzt, wobei die Zielsetzung weniger in der Festlegung technischer Details sondern mehr in der Formulierung notwendiger Anforderungen unter Berücksichtigung der umzusetzenden Barrierefreiheit liegt. Einige der wesentlichen Änderungen für Tunnel ab 400m Länge gegenüber der zur Zeit gültigen Richtlinie werden im Folgenden aufgezeigt.

2 Sicherheitsbetrachtung

2.1 Sicherheitsbewertung

Bei Zwischenfällen, die durch ein liegengebliebenes Fahrzeug, durch einen Unfall oder durch einen Brand verursacht sind, muss zum einen der Tunnelnutzer ausreichende Möglichkeiten zur Selbstrettung haben und zum anderen auch eine Fremdrettung ohne nicht einzuschätzende Risiken erfolgen können.

Die Sicherheit wird unter anderem durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst. Hierzu zählen unter anderem die baulichen Randbedingungen, die sich aus der Querschnittswahl, der Trassierung und der Anbindung im Netz ergeben, die verkehrlichen Aspekte, die sich aus dem Verkehrsaufkommen, dem Lkw-Anteil einschließlich eines möglichen Gefahrgutaufkommens ableiten, sowie die Zugriffszeiten der Einsatzdienste.

Um entscheiden zu können, ob die sicherheitsbeeinflussenden Parameter zu einer kritischen Erhöhung des Risikos führen, muss für jeden Tunnel eine Voranalyse entsprechend des Leitfadens für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln [2] durchgeführt werden. Sollten die ermittelten Risikokenngrößen die vorgegebenen Grenzwerte überschreiten sind qualitative oder quantitative Risikoanalysen erforderlich. Für diese sind verbindliche Vorgaben über den Inhalt und die anzuwendende Methodik in die RABT aufgenommen.

Da gemäß ADR [3] Tunnel europaweit für den Transport gefährlicher Güter kategorisiert werden müssen, ist das in einem gemeinsam von den Ländern und dem Bund getragen Forschungsvorhaben entwickelte zweistufige Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007 [4] anzuwenden.

2.2 Bauen unter Verkehr

Technische Weiterentwicklungen und die begrenzte Lebensdauer der technischen Einrichtungskomponenten gegenüber den baulichen Vorkehrungen führen zu Änderungen, Erneuerungen und Instandsetzungen bestehender Tunnel. Um diese Maßnahmen durchführen zu können, sind schon in der Planungsphase Konzepte aufzustellen, wie der Verkehr abgewickelt werden kann. Folgende Fragen müssen z.B. beantwortet werden:

- Kann der Tunnel für den Verkehr gesperrt werden? Steht eine leistungsfähige Umleitungsstrecke zur Verfügung?
- Sind Arbeiten ausführbar, wenn gleichzeitig der Verkehr mit Hilfe eines reduzierten Fahrstreifenangebots in der Tunnelröhre abgewickelt wird?
- Kann bzw. ist es sinnvoll bei Richtungsverkehrstunneln einen temporären Gegenverkehrsbetrieb einzurichten?

Für diese o.a. Abweichungen vom Regelbetrieb sind vorzugsweise organisatorische und betriebliche Maßnahmen zu ergreifen, um ein gegenüber dem Regelbetrieb erhöhtes Risiko zu minimieren. Die Vorhaltung und Installation technischer Komponenten wie z. B. die Auslegung der Belüftung auf einen temporären Gegenverkehrsbetrieb, eine Gegenadaption für die Beleuchtungsanlage, beidseitige Auslegung der verkehrstechnischen Einrichtungen sind zu vermeiden.

3 Verkehrsraum Tunnel

Der Tunnelquerschnitt ist abhängig von der Verkehrsstärke und der gewählten Bauweise. Die Anzahl der Fahrstreifen richten sich nach dem prognostizierten Verkehrsaufkommen und der angestrebten Qualität des Verkehrsablaufs gemäß HBS [5]. In der Regel entspricht die Anzahl der Fahrstreifen im Tunnel derjenigen der freien Strecke.

In Analogie zu den in den RAA [6] und RAL [7] definierten Brückenquerschnitten sind Tunnelquerschnitte definiert und den Querschnitten der freien Strecke zugeordnet worden. Die Zahlen geben die Kronenbreite der zugeordneten freien Strecke an. Das Symbol t steht für Querschnitte ohne Seitenstreifen und das Symbol T für Querschnitte mit Seitenstreifen (Bild 1). Wegen der Umsetzung der Barrierefreiheit ist die Bordhöhe des Notgehwegs auf 3 cm begrenzt und die Breite darf 1,0 m nicht unterschreiten.

Für die Regelquerschnitte RQ 21, 25, 28 und 31 der freien Strecke sind zwei Sonderquerschnitte definiert. Beim RQ 31 T+ ist die befestigte Fahrfläche zwischen den Borden auf 12,0 m erweitert, so dass ein 4 + 0 Verkehr möglich ist. Der Querschnitt RQ 31 Tr weist eine „Mischverkehrsfläche“ auf. In ihr werden der Notgehweg und der Seitenstreifen zu einer Fläche zusammengefasst, um einen Innenradius für den Schildvortrieb von 11,0 m nicht zu überschreiten. Die Fläche wird im Regelbetrieb als Notgehweg benutzt, und im Fall einer Panne kann ein Fahrzeug auf dieser Fläche abgestellt werden.

4 Sicherheitseinrichtungen

4.1 Allgemeines

Im Abschnitt Sicherheitseinrichtungen sind die baulichen und technischen Sicherheitsvorkehrungen zusammengestellt. Ihr Einsatz hängt im Wesentlichen von der Tunnellänge ab. Bild 2 listet die einzelnen Komponenten auf.

Auf zwei Änderungen wird in den Abschnitten 4.2 und 4.3 eingegangen.

Regelquerschnitt	Regelquerschnitt Tunnel	Maße in m
Freie Strecke		
RQ 43,5 RQ 38,5	Querschnittsausarbeitung anhand einer Risikoanalyse nach Abschnitt 3	
RQ 36 RQ 31,5	RQ 36 t	
	RQ 36 t+ ¹⁾	
	RQ 36 T	
RQ 31 RQ 28 RQ 25 RQ 21	RQ 31 t	
	RQ 31 T	
	RQ 31 T+ ¹⁾	
	RQ 31 Tr ²⁾	
RQ 15,5 RQ 11,5+ RQ 11 RQ 9	RQ 11 t	

1) Lösung für 4+0 Führung in Arbeitsstellen

2) alternativ für Schildvortrieb, falls Pannenbuchten nicht umgesetzt werden können

Bild 1: Tunnelquerschnitte [1]

Sicherheitsanlagen		Tunnellängen				
		< 400	≥ 400 < 600	≥ 600 < 900	≥ 900 < 1800	≥ 1800
Bauliche Anlagen	Nothaltebuchten			○	●	●
	Wendebuchten ¹⁾			○	●	●
	Überfahrten im Tunnel				○	●
	Notausgänge		●	●	●	●
	Notgehwege	●	●	●	●	●
	Entwässerung	●	●	●	●	●
Kommunikationseinrichtungen	Notrufeinrichtungen	²⁾	●	●	●	●
	Videoüberwachung		●	●	●	●
	Tunnelfunk ⁶⁾	●	●	●	●	●
	Lautsprecheranlagen	⁵⁾	●	●	●	●
Brandmeldeanlagen	Manuelle Brandmeldeeinrichtungen		●	●	●	●
	Automatische Brandmeldeeinrichtungen	³⁾	●	●	●	●
Löscheinrichtungen	Handfeuerlöscher		●	●	●	●
	Löschwasserversorgung	⁴⁾	●	●	●	●
Orientierungsbeleuchtung			●	●	●	●
Fluchtwegkennzeichnung		●	●	●	●	●
Leiteinrichtungen			●	●	●	●

- Standardausstattung
- Ausstattung bei besonderer Anforderung (z.B. besondere Charakteristik durch Kombination mehrerer risikobeeinflussender Faktoren)
- ¹⁾ Bei Gegenverkehrstunneln
- ²⁾ jeweils an den Portalen nur mit Notrufsprechstellen
- ³⁾ erforderlich bei Tunneln mit mechanischer Lüftung
- ⁴⁾ Hydranten oder Löschwasserbehälter an den Portalen (je Fahrtrichtung)
- ⁵⁾ Tunnel mit Videoüberwachung
- ⁶⁾ siehe Abschnitt 5.2.3

Bild 2: Ausstattung von Tunneln mit Sicherheitsanlagen in Abhängigkeit von der Tunnellänge [1]

4.2 Notausgänge, Flucht- und Rettungswege

Fluchtwege sind von Rettungswegen brandschutztechnisch zu trennen. Die Rettungswege bilden dabei einen eigenen Brandabschnitt. Als Maßnahmen zum Schutz vor Ausbreitung von Feuer und Rauch in die Rettungswege sind vorzugsweise Schleusen anzuordnen. Schleusen werden durch zwei Türen begrenzt, die nicht gegeneinander zu verriegeln sind. Begehbare Schleusen (Bild 3) weisen eine Länge zwischen 3 und 30 m, befahrbare Schleusen eine Länge zwischen 10 bis 30 m auf. Eventuelle Rauchübertritte bei einer möglicherweise gleichzeitigen Öffnung beider Türen der Schleuse werden akzeptiert

Eine Überdruckbelüftung ist nur auszuführen, wenn die genannten Rahmenbedingungen nicht erfüllt werden können.

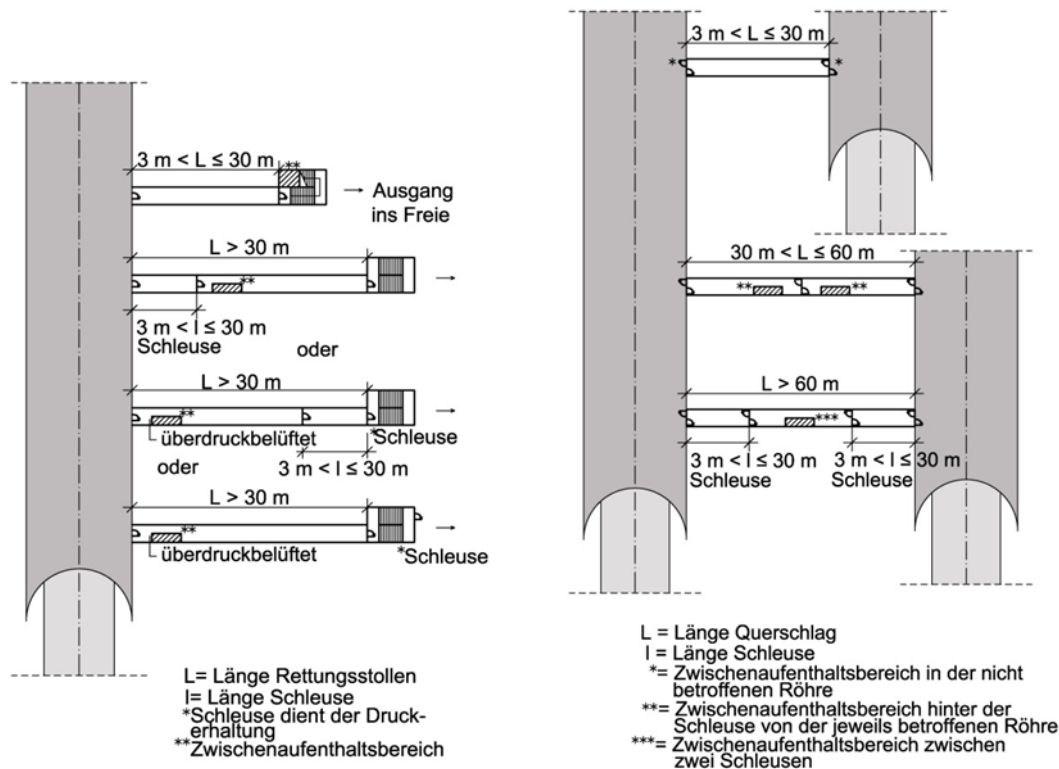


Bild 3: Ausbildung von Rettungswegen [1]

4.3 Brandbekämpfungseinrichtungen

In Ergänzung der Anlagen für die Sicherheit in Tunneln mit einer Länge von $\geq 3000\text{ m}$ (Richtungsverkehr) bzw. $\geq 1200\text{ m}$ (Gegenverkehr) und einer Bemessungsbrandleistung $\geq 100\text{ MW}$ kann neben den grundsätzlich vorzusehenden Handfeuerlöschern und Anlagen zur Löschwasserversorgung in Einzelfällen der Einsatz von stationären Brandbekämpfungsanlagen (BBA) in Erwägung gezogen werden, wenn eine Verstärkung der baulichen und betriebstechnischen Sicherheitssysteme keinen ausreichenden Nutzen bringt oder wirtschaftlich nicht vertreten werden kann. Sie werden eingesetzt, um die Brandentwicklung sowie die Brandausbreitung und damit die wirksame Brandleistung zu begrenzen.

5 Beleuchtung

Die Festlegungen in der RABT und der DIN 67524 sind weitgehend aufeinander abgestimmt worden. Maßgebend war hierbei, dass zum einen die Sehaufgabe erfüllt wird, insbesondere bei der erforderlichen Adaption im Einsichtsbereich des Tunnels, und dass zum anderen das Beleuchtungsniveau im Verhältnis zu den bisherigen Festlegungen in der RABT 2006 nicht wesentlich erhöht wird.

Der Wartungswert der Fahrbahnleuchtdichte der Einsichtsstrecke L_{th} wird aus der Leuchtdichte im Bewertungsfeld L_{20} und dem Leuchtdichteverhältnis k ermittelt:

$$L_{th} = k \times L_{20}$$

Das Leuchtdichteverhältnis k ist als Funktion der Haltesichtweite und des Anpassungsfaktors k_v tabelliert (Tabelle 1).

Tabelle 1: k-Werte in Abhängigkeit der Haltesichtweite und des Klassifizierungsfaktors k_v [1]

k_v	Haltesichtweite						
	60 m	80 m	100 m	120 m	140 m	160 m	180 m
1,00	0,023	0,027	0,033	0,038	0,040	0,045	0,048
1,20	0,028	0,032	0,038	0,042	0,044	0,047	0,049
1,30	0,030	0,035	0,040	0,044	0,047	0,050	0,052
1,56	0,037	0,042	0,047	0,052	0,057	0,062	0,067
1,69	0,040	0,045	0,050	0,056	0,063	0,070	0,078
2,03	0,050	0,053	0,060	0,070	0,083	0,100	0,120

Auf eine Vorgabe für das Leuchtmittel wird verzichtet. Eine Reduzierung der erforderlichen Leuchtdichte bei Einsatz einer Gegenstrahlbeleuchtung gegenüber einer Mischkontrastbeleuchtung wird nicht mehr vorgesehen.

6 Lüftung

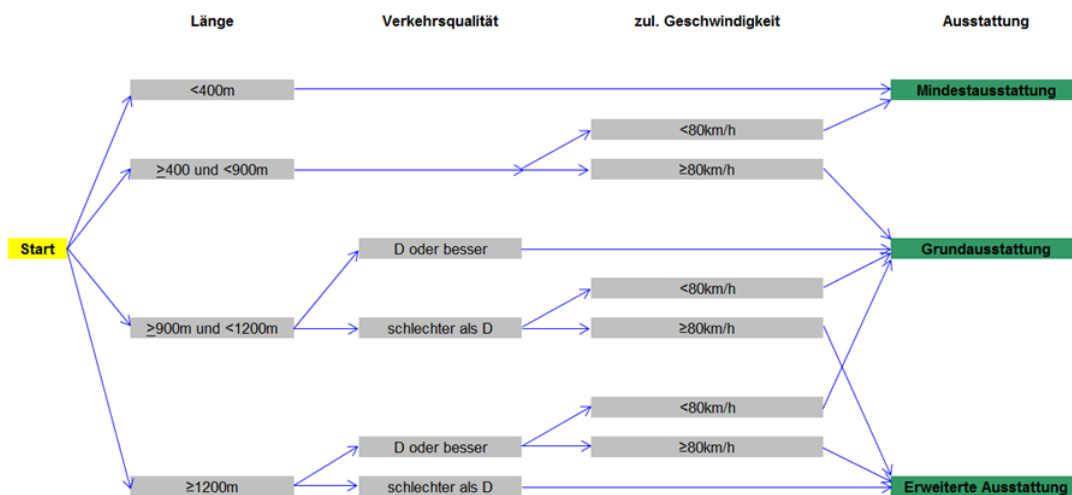
Es ist davon auszugehen, dass in den meisten Fällen, wenn eine Belüftung erforderlich wird, eine Längslüftung zum Einsatz kommt, die bei Bedarf durch eine Rauchabsaugung unterstützt wird. Von daher werden weiterhin zwei Einsatzbereiche beibehalten, nämlich für Richtungsverkehrstunnel mit der Verkehrsqualität mindestens der Stufe D und freiem Abfluss nach dem Ausfahrt und Richtungsverkehrstunnel mit der Verkehrsqualität schlechter als Stufe D bzw. Staugefahr bei der Ausfahrt sowie Gegenverkehrstunnel. Bei der letzteren Gruppe darf der Einsatz der mechanischen Längslüftung, der in der Regel auf Tunnellängen bis zu 600 m begrenzt ist, auf eine Tunnellänge von bis zu 1200 m ausgedehnt werden, wenn ein Gewölbequerschnitt vorliegt, die Längsneigung $\leq 3 \%$ ist und die Bemessungsbrandleistung ≤ 30 MW beträgt.

7 Verkehrstechnische Einrichtungen

Zur Steuerung und Sicherstellung eines sicheren Verkehrsablaufs sind drei Ausstattungsvarianten vorgesehen. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen folgendermaßen:

- Mindestausstattung: mit Wechsellichtzeichengebern (WLZ) am Tunnelportal
- Grundausrüstung: wie Mindestausstattung, jedoch zusätzlich mit Schranken
- Erweiterte Ausstattung: wie Grundausrüstung, jedoch zusätzlich mit Fahrstreifen-signalisierung

Um nun eine Ausstattungsvariante zu ermitteln, sind die Kriterien Tunnellänge, Verkehrsqualität und zulässige Geschwindigkeit zu betrachten (Bild 4).



Hinweise:

- Grundlage ist eine röhrenweise Betrachtung.

- Die Erweiterte Ausstattung ist nur bei ≥ 2 FS je Rtg. sinnvoll, soweit diese sich über das Diagramm ergibt, bei 1 FS je Rtg. ist dann die Grundausrüstung zu wählen

Bild 4: Diagramm zur Wahl der verkehrstechnischen Tunnelausstattungs-kategorie [1]

Kann sich der Verkehrsteilnehmer auf Grund der Tunnellänge keinen Überblick über das Geschehen im Tunnel machen, sind Schranken zur Sperrung des Tunnels vorzusehen (Grundausrüstung). Ist auf Grund der Verkehrsstärke mit liegengebliebenen oder verunfallten Fahrzeugen in längeren autobahnähnlichen Tunneln zu rechnen, soll zur Erhöhung der Verkehrssicherheit die Einziehung des betroffenen Fahrstreifens mittels einer dynamischen Fahrstreifensignalisierung geschehen (Erweiterte Ausstattung). Diese kann ebenfalls in langen autobahnähnlichen Tunneln zur Fahrstreifen-sperrung genutzt werden, um bei kleineren Arbeitsstellen im Tunnel (abgesichert nach RSA) die Fahrstreifenreduzierung vor das Tunnelportal zu verlagern.

8 Leit-, Automatisierungstechnik und Überwachung

8.1 Allgemeines

Die technische Ausstattung von Tunneln soll im Regelfall automatisch gesteuert, geregelt und überwacht werden. Dies bedingt ein umfangreiches Zusammenwirken aller Einrichtungen.

Es sind Systeme vorzusehen, die gewährleisten, dass alle Steuereinheiten untereinander über ein standardisiertes System kommunizieren. Schnittstellen und Programminhalte sind offenzulegen und so zu gestalten, dass herstellerunabhängig Änderungen, Ankopplungen und Zusammenschaltungen vorgenommen werden können. Es muss sichergestellt werden, dass Programme unterschiedlicher Ersteller (z. B. Lüftungssteuerung und Verkehrssteuerung) über standardisierte Datenschnittstellen gekoppelt werden können.

8.2 Systemaufbau

Der Aufbau der Leit- und Automatisierungstechnik ist hierarchisch in Ebenen gegliedert vorgesehen:

- Übergeordnete Leitebene
- Anlagenleitebene
- Automatisierungsebene
- Feldebene

Dabei müssen lokal bei einem Tunnel stets die Anlagenleit-, Automatisierungs- und Feldebene realisiert werden. Jede Ebene in der Hierarchie ab der Automatisierungsebene aufwärts muss die ihr zugeordneten Aufgaben auch autark ohne die nächsthöhere Ebene erfüllen können. In Verbindung mit der hierarchischen Gliederung des Systems nach Ebenen sind nach Gewerken einzelne Funktionsblöcke (FB) zu berücksichtigen:

- FB1: Beleuchtungsanlage
- FB2: Verkehrsanlage
- FB3: Lüftungsanlage / Belüftung der Rettungswege
- FB4: Brandmeldeanlage
- FB5: Fluchtwegkennzeichnung, Orientierungsbeleuchtung und aktive Leiteinrichtungen
- FB6: Videosystem
- FB7: Lautsprecheranlage
- FB8: Notrufsysteme

- FB9: Löschwasserversorgung
- FB10: Entwässerungsanlagen
- FB11: Tunnelfunkanlage
- FB12: Energieversorgung
- FB13: Gebäudetechnik (Raumlüftung, Einbruchmeldeanlage etc.)
- FB14: Kommunikation (Switches, Router, Netzwerkmanagement etc.)

im Bedarfsfall weitere Funktionsblöcke

Bei der Steuerung und Regelung der Funktionsblöcke sind diese autark in der Lage, die jeweilige Situation im Funktionsblock zu beherrschen. Sobald ein Funktionsblock ergänzend eine Anforderung an ein oder mehrere andere Funktionsblöcke stellt, erfolgen Maßnahmen interaktiv mit direkter Kopplung zwischen den Funktionsblöcken.

8.3 Wirkmatrix

In Abhängigkeit der beim Betrieb des Tunnels eintretenden Ereignisse sind vordefinierte Maßnahmen zu treffen. Für diese Ereignisse sind automatisch, halbautomatisch und händisch vorzunehmende Maßnahmen in einer Wirkmatrix zusammenzustellen und die Interaktion mit dem Personal der ständig besetzten Stelle darzustellen. Ein Beispiel für eine Wirkmatrix zeigt Bild 5.

8.4 Überwachung

Die Tunnelüberwachung dient der Sicherheit der Tunnelnutzer einschließlich des Betriebspersonals und der Funktion der technischen Ausstattung. Sie setzt sich aus der betriebstechnischen und der sicherheitstechnischen Überwachung zur Gefahrenabwehr zusammen. Dabei stehen die Aufgaben zur Gefahrenabwehr im Vordergrund.

Die Überwachung der Tunnelnutzung ist bei Tunneln ab 400 m Länge von einer ständig besetzten Stelle (Bild 6) durchzuführen. Hierbei sind landesrechtliche Vorgaben zu berücksichtigen. Notrufe aus dem Bereich des Tunnels sind in der ständig besetzten Stelle aufzuschalten. Für alle Tunnel ist die Entgegennahme und Behandlung von Betriebs- und Störmeldungen sicherzustellen. Eine ständig besetzte Stelle muss 7 Tage je Woche zu 24 Stunden täglich mit Personal besetzt sein und arbeitet im Ereignisfall nach vorgegebenen Handlungsanweisungen.

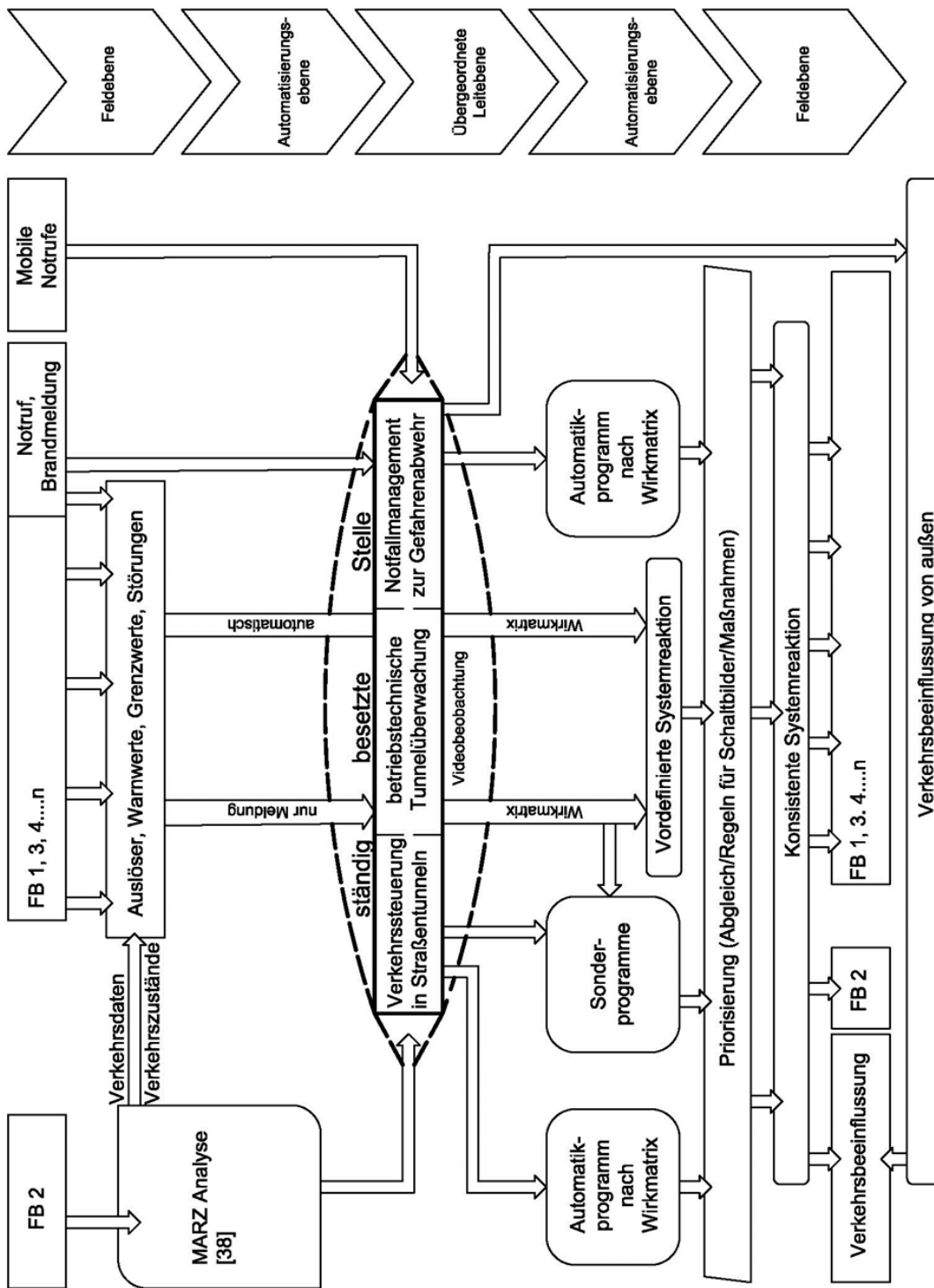


Bild 6: Überwachung des Tunnels durch die ständig besetzte Stelle

Literatur

- [1] RABT(2015): Entwurf der Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- [2] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln, 2009
- [3] Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR), BGBl II / 2013 / S. 648
- [4] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007, Oktober 2009
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), Köln 2009
- [6] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA), Köln, 2008
- [7] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL), Köln, 2012

Der Tunnel Hirschhagen im Zuge des Neubaus der A44

Reinhold Rehbein

Hessen Mobil, Kassel

1 Die Bundesautobahn A44

Der Neubau der Bundesautobahn A 44 zwischen Kassel und Herleshausen ist Bestandteil der Verkehrsprojekte Deutsche Einheit (VDE) und bildet zusammen mit dem Ausbau der Bundesautobahn A 4 zwischen Bad Hersfeld und Görlitz das VDE Projekt Nr. 15. Mit dem Neubau zwischen der A 7 bei Kassel und der A 4 bei Wommen wird die von Aachen über das Ruhrgebiet bis Kassel führende wichtige Ost-West-Verbindung auf direktem Wege weiter zur A 4 geführt.

Ziel des Projektes ist es den Lückenschluss in der europäischen Fernstraßenverbindung von den Kanalhäfen im Westen bis Polen im Osten herzustellen, sowie Kapazitätsengpässe auf den Bundesstraßen B 7, B 27 und B 400 abzubauen und Unfallgefahren zu mindern.

Der Neubauabschnitt der A 44 beginnt an der A 7 Anschlussstelle (AS) Kassel/Ost (zukünftig Autobahndreieck (AD) Lossetal) und endet an der A 4 bei Wommen (zukünftig Wommener Dreieck). Die Neubaustrecke der A 44 hat eine Gesamtlänge von ca. 63 km. Die Trasse verläuft von West nach Ost im Wesentlichen den Bundesstraßen B 7, B 27 und B 400 folgend. Neben dem Neubauabschnitt der A 44 gehört auch der 8-streifige Ausbau der A 7 zwischen der AS Kassel/Ost und dem AD Kassel/Süd zum Projekt.

Die A 44 quert einen ökologisch hochwertigen und topographisch bewegten Landschaftsraum. Trotz intensiver Minimierungs- und Vermeidungsmaßnahmen (z.B. Tunnel, Brücken und Grünbrücken) war das Projekt insbesondere bei den Naturschutzverbänden umstritten und wurde in vielen Abschnitten beklagt.

Die Gesamtstrecke der A 44 ist in 11 Planungsabschnitte (Verkehrskosteneinheiten (VKE)) einschl. des 8-streifigen Ausbaues der A 7 unterteilt. Aus Gründen des Umweltschutzes und des Lärmschutzes wurde die Linie der Autobahn geländenah trassiert.

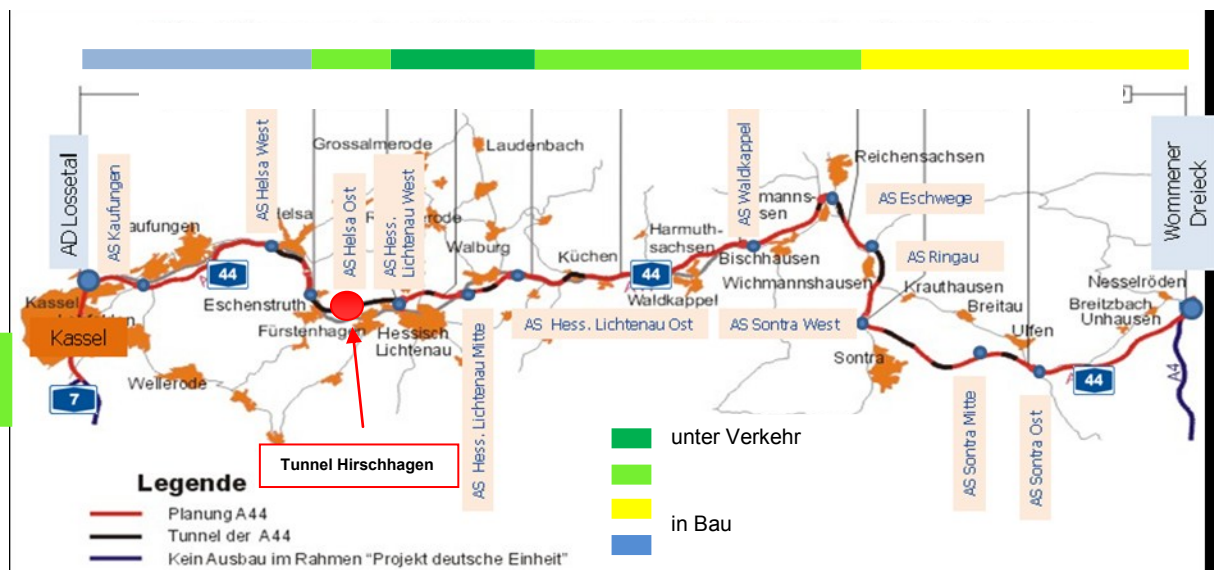


Bild 1: Linienführung und Stand der Umsetzung der A 44 [1]

Das erste Planfeststellungsverfahren wurde am 4. Januar 1999 eingeleitet. Inzwischen liegt das Baurecht für 10 von 11 Planungsabschnitten der A 44, einschl. des achtstreifigen Ausbaus der A 7 vor. Zwei Bauabschnitte wurden 2005 und 2014 dem Verkehr übergeben. An 5 weiteren Bauabschnitten wird zur Zeit gebaut. Für den ca. 11 km langen Planungsabschnitt der VKE 11 (AD Lossetal bei Kassel bis zur AS Helsa/Ost) läuft seit 2006 ein Planfeststellungsverfahren.

Die Verkehrsbelastung (Prognose 2025 [1]) der A 44 schwankt zwischen 41.900 Kfz/24h im Bereich Kassel und 19.300 Kfz/24h im Osten (Wommener Dreieck). Der Schwerverkehr liegt zwischen 8.400 und 5.700 Kfz/24h.

Die Gesamtkosten des Projektes sind aktuell mit ca. 1,8 Mrd. € veranschlagt, hiervon entfallen allein rund 0,8 Mrd. € auf die Tunnelbauwerke.

2 Die Tunnel der A 44

Aufgrund der ökologischen Wertigkeit des nordhessischen Landschaftsraumes, der bewegten Topographie und der Bebauung wurden insgesamt 13 Tunnelbauwerke mit einer Gesamtlänge von ca. 14,3 km notwendig. Die Länge der Tunnel schwankt zwischen 0,23 km und knapp 4,2 km. Von den 13 Tunnelbauwerken sind 3 Bauwerke (Walberg, Hopfenberg und Schulberg) unter Verkehr und 2 Tunnel, der Tunnel Küchen und der Tunnel Hirschhagen im Bau. Die Tunnel werden mit dem Regelquerschnitt 26 t ausgeführt, d. h. sie haben eine Fahrbahnbreite von 7,5 m und erhalten beidseitig einen Notgehweg von 1,0 m Breite. Nothaltebuchten, Überfahrten und Übergänge zwischen den beiden Röhren

werden entsprechen der Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT 2006) ausgebildet. 9 der 13 Tunnel liegen überwiegend im Buntsandstein, 2 sind im Muschelkalk und Keuper bereits aufgefahen worden. Ein Tunnel wurde ausschließlich im Muschelkalk aufgefahen.

3 Der Tunnel Hirschhagen

Der Tunnel Hirschhagen liegt im Planungsabschnitt VKE12 zwischen den Anschlussstellen Helsa/Ost und Hessisch Lichtenau/West. Dieser Abschnitt ist ca. 5,9 km lang und mit Kosten in Höhe von 327 Mio. € veranschlagt. Das größte Einzelbauwerk in diesem Abschnitt und der A 44 insgesamt ist der Tunnel Hirschhagen mit einer Länge von rd. 4.2 km, Bild 2. Die Kosten für den Streckenbau und die Rohbaukosten des Tunnels betragen ca. 250 Mio. €. Mit dem Bau wurde Anfang 2013 begonnen.

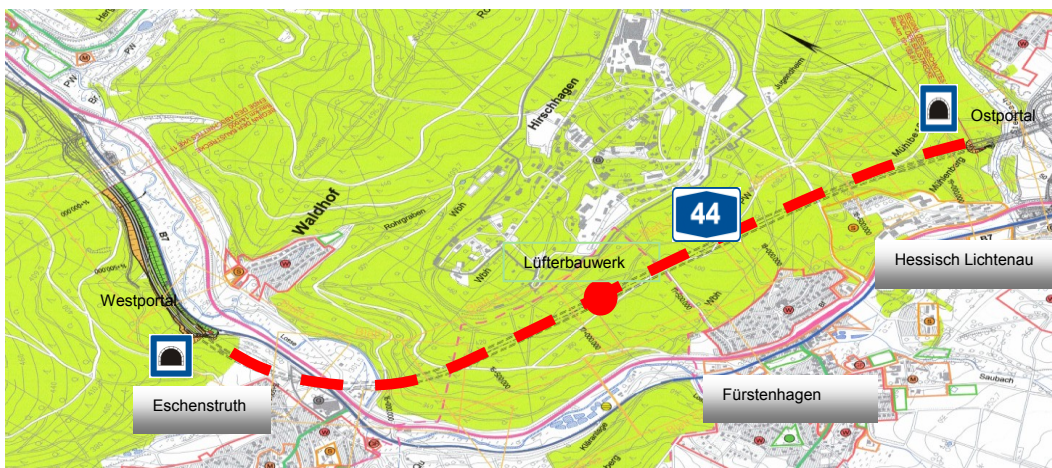


Bild 2: Lageplan Tunnel Hirschhagen [1]

Der Tunnel Hirschhagen beginnt nördlich der Ortslage Eschenstruth und schwenkt dann in Richtung Südosten ab, um die Bundesstraße 7, die Straßenbahn Kassel – Hessisch Lichtenau und das Lossetal zu unterqueren. Im Folgenden quert er den Bergrücken unterhalb des ehemaligen Munitionswerkes Hirschhagen, bevor er im Bereich des Steinbachtals bei Hessisch Lichtenau das Ostportal erreicht. Die maximale Längsneigung im Tunnel beträgt 4 %. Der Autobahntunnel wird 2-röhrig mit dem Regelquerschnitt 26 t ausgeführt.

Die Überdeckung des Tunnels schwankt zwischen ca. 10 und ca. 95 m. Die geringste Überdeckung ist im Bereich der Querung des Flüsschens Losse vorhanden, Bild 3.

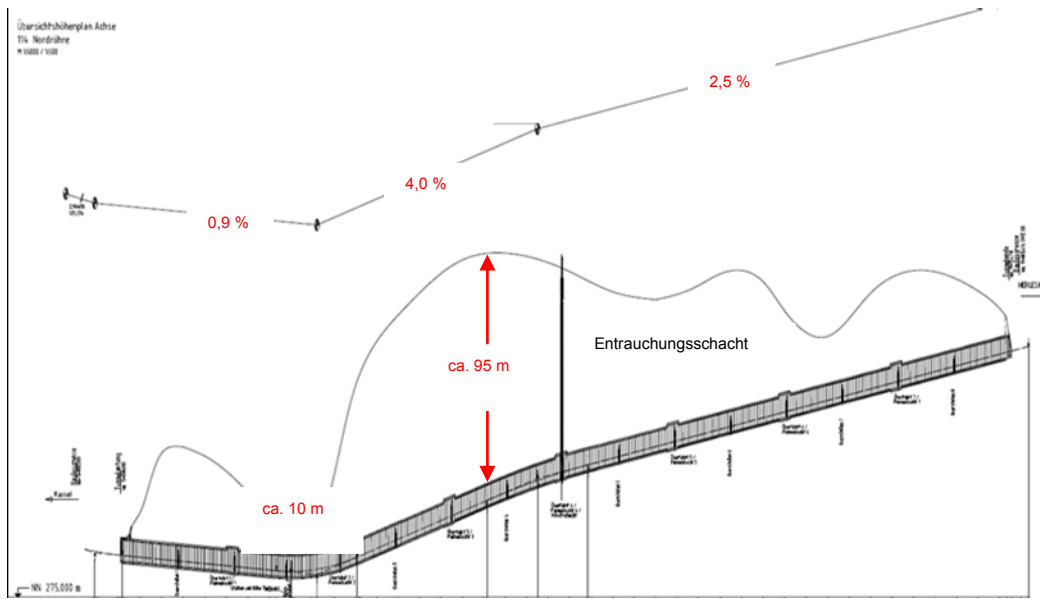


Bild 3: Längsschnitt [1]

Der Tunnel wird fast ausschließlich im Bundsandstein (Bild 4) aufgeföhren. Eine Ausnahme bildet eine Subrosionssenke bei Eschenstruth im Bereich der B 7 und der StraÙenbahn, die mit tertiärem Material gefüllt ist. Die Trasse der Autobahn durchquert diese auf ca. 150 m Länge.

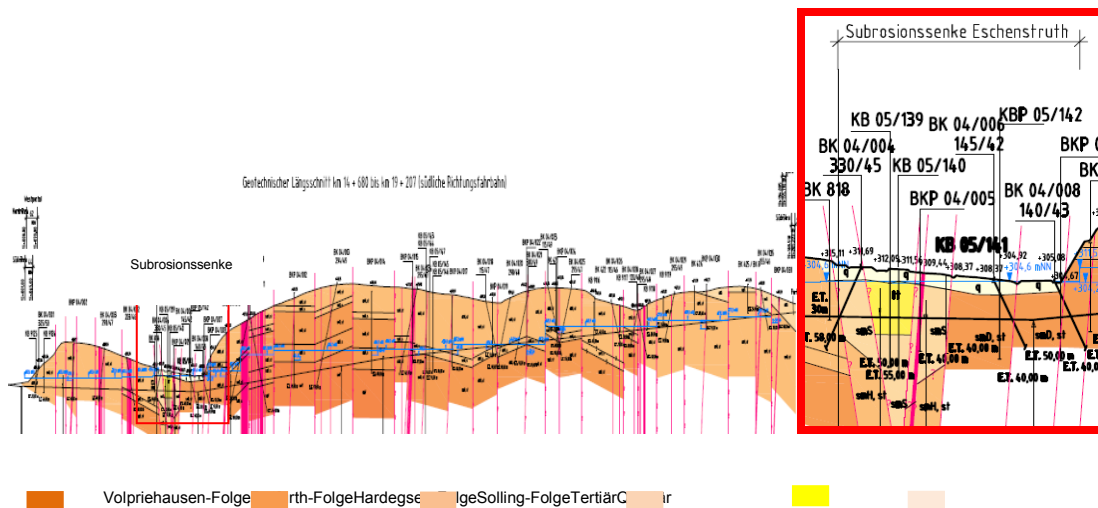


Bild 4: Geologischer Längsschnitt [2]

Der Tunnel wird in der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT) aufgeföhren. Der Vortrieb erfolgt von beiden Portalseiten aus. Aus Richtung Osten wird der Bundsandstein im Sprengvortrieb gelöst. Aus Richtung Westen erfolgt das Lösen des Ausbruchmaterials im Wesentlichen im Baggervortrieb, nur teilweise waren bisher Lockerungssprengungen notwendig.

Abweichend vom Kalottenvortrieb im Buntsandstein wurde die Subrosionssenke Eschenstruth mit einem zweihüftigen Ulmenstollen aufgefahren, Bild 5. Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse waren in der Nordröhre sehr inhomogen und bestanden aus einem Gemisch aus Ton, Schluff und Fein- und Mittelsanden sowie aus Sandsteinbrocken unterschiedlicher Größe. In Teilbereichen beinhaltete das Gemisch auch Braunkohleeinlagerungen.



Bild 5 Ulmenstollenvortrieb [3]

Die Geologie in der Südröhre war im Bereich der Subrosionssenke in einem großen Abschnitt deutlich homogener. Über ca. 80 m bestand das Gebirge aus schluffigem teilweise sandigem grauen Ton.

Um den Tunnel unter diesen geologischen Verhältnissen auffahren zu können wurde eine Vorentwässerung über Brunnen durchgeführt. Aufgrund der großen Inhomogenität war die entwässernde Wirkung der Brunnen sehr unterschiedlich; je nach dem in welchen geologischen Verhältnissen sie zum liegen kamen. Zusätzlich zu den Brunnen musste in Teilbereichen auch eine weitere Entwässerung über Schwerkraft, teilweise aber auch mit Vakuumpflanzen aus dem Tunnelquerschnitt erfolgen, um Sandlinsen trocken zu legen.

Eine Besonderheit beim Tunnel Hirschhagen stellt die partielle Verunreinigung des Untergrundes und des Grundwassers durch Rückstände der Sprengstoffproduktion eines Munitionswerkes aus dem 2. Weltkrieg dar. Das Grundwasser wird während der Bau- durchführung permanent überwacht. Sobald Grenzwertüberschreitungen festgestellt werden, wird das abgepumpte Grundwasser über Aktivkohlefilter gereinigt. Um Schadstoff-

fe durch die Grundwasserabsenkung im Bereich des Lossetales erst gar nicht in die Tunnelröhre ziehen zu lassen, wurde vorab im Bereich eines "Hot Spots" der Schadstoffbelastung das Grundwasser vor Baubeginn soweit abgesenkt, dass das belastete Erdreich in diesem Bereich nicht mehr vom Grundwasser durchströmt wird. Der Tunnel wird im Endzustand druckwasserdicht mit einer Abdichtung ausgeführt.

Der Tunnelvortrieb im Tunnel Hirschhagen war mit Stand Ende April 2015 soweit fortgeschritten, dass der Kalottenvortrieb Ost Nordröhre Tunnelmeter 2100 und der Westvortrieb Nordröhre Tunnelmeter 800 erreicht hatten. Parallel wurde dazu ab Ende April 2014 begonnen die Innenschale in der Nordröhre(Ost) einzubauen.

Der Tunnel erhält eine Längslüftung mit Strahlventilatoren. In Tunnelmitte wird ein Lüfterbauwerk zwischen den beiden Röhren zur Rauchabsaugung erstellt. Insgesamt erhält der Tunnel 8 Querstollen und 7 Überfahrten.

4 Ausblick

Bis 2019 ist geplant auch den Abschnitt zwischen der AS Helsa/Ost und der AS Hessisch/Lichtenau/West mit dem Tunnel Hirschhagen für den Verkehr frei zugeben.

Quellenverzeichnis

- [1] Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement, Wilhelmstraße 10, 65185 Wiesbaden
- [2] Geotechnisches Gutachten (Stand 28.08.2008), Neubau der BAB A 44, Kassel – Herleshausen, Planungsabschnitt VKE 12, Tunnel Hirschhagen, INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR BAUWESEN, GEOLOGIE UND UMWELTTECHNIK MBH, Dr. Spang, Witten, August 2008
- [3] Ingenieurgemeinschaft A 44 Tunnel Hirschhagen, Müller + Hereth, edr, Bung Föhrenstraße 5, 37235 Hessisch Lichtenau

Einfluss der Tunnelausstattung auf das Reaktions- und Fluchtverhalten der Verkehrsteilnehmer

Prof. Dr. Andreas Mühlberger

Lehrstuhl für Klinische Psychologie und Psychotherapie, Universität Regensburg

Prof. Dr. Paul Pauli

Lehrstuhl für Psychologie I, Universität Würzburg

Eine wesentliche Komponente der Tunnelsicherheit ist eine effiziente Selbstrettung. Sie ist die erste Phase nach einem Ereignis und das Verhalten der Tunnelnutzer entscheidet häufig über die Konsequenzen aus dem Ereignis. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist der Mont-Blanc Tunnelbrand, bei dem insgesamt 39 Personen ums Leben gekommen sind, und 27 davon ihr Auto nicht verlassen haben, die also gestorben sind, da sie sich selbst nicht in Sicherheit gebracht haben. Aus solchen Ereignissen leiten sich die Fragen ab, wie das Verhalten von Tunnelnutzern bei der Selbstrettung (1) verstanden und in Simulationen genutzt werden kann und (2) in der Interaktion mit vorhandenen Sicherheitseinrichtungen optimiert werden kann.

Um Selbstrettung von Tunnelnutzern im Ereignisfall zu verstehen, ist es notwendig, verschiedene Aspekte der menschlichen Informationsverarbeitung zu berücksichtigen. Eine zentrale Komponente ist die Wahrnehmung, da über die verschiedenen Sinneskanäle die notwendigen Informationen aufgenommen werden, die zunächst ein Verständnis der aktuellen Situation als auch die Wahrnehmung der Möglichkeiten und Ziele von Verhalten beinhalten. Wesentliche Kanäle zur Kommunikation von sicherheitsrelevanten Informationen sind der visuelle und der akustische Kanal. Neben der Wahrnehmung sind die Bewertung der Information und die Entscheidungsfindung von besonderer Bedeutung. Verschiedene Modelle versuchen die relevanten Prozesse in einem Ereignisfall zu integrieren [1, 2].

Um die Prozesse der Informationsverarbeitung zu untersuchen, bieten sich verschiedene Herangehensweisen an. In den letzten Jahren hat sich insbesondere die Möglichkeit, Untersuchungen in Virtueller Realität durchzuführen, sehr stark weiter entwickelt. Virtuelle Realität bietet die Vorteile, standardisierte Szenarien wiederholt darbieten zu können und ohne reale Gefahren Situationen zu realisieren, die in der Realität nicht möglich wären. Dadurch wird eine experimentelle Herangehensweise an verschiedene Fragestellungen

bei einem akzeptablen Aufwand möglich. Für eine Einordnung der VR siehe Überblick von Kinateder et al [3].

In dem aktuellen Beitrag sollen insbesondere Studien zur Interaktion der Selbstrettung mit Sicherheitseinrichtungen vorgestellt werden. Neben Untersuchungen zum Einfluss der optischen Gestaltung von Notausgängen, dem Einfluss von anderen Personen auf das Fluchtverhalten, der Bedeutung von Informationen und Training für das Verhalten sowie dem Einfluss des Alters auf die Selbstrettung liegt der Schwerpunkt des Beitrags auf die Interaktion einer automatischen Brandbekämpfungsanlage und dem Erleben und Verhalten von Personen im Aktivierungsbereich.

Stationäre, automatische Brandbekämpfungsanlagen (BBA) in Straßentunneln sollen dazu dienen, einen Fahrzeugbrand in einem Straßentunnel möglichst frühzeitig einzudämmen, um die Entwicklung eines Großbrandes zu verhindern. Bisher liegen keine systematischen Untersuchungen des Einflusses einer aktivierten BBA auf das Verhalten von Tunnelnutzern vor, da typischerweise eine BBA erst nach Abschluss der Selbstrettungsphase aktiviert wird. Eine möglichst frühe Aktivierung der BBA erhöht aber ihre Effizienz zur Eindämmung des Brandes deutlich. Deshalb wurden in einem ersten Ansatz im Rahmen eines von der BASt ausgeschriebenen Forschungsprojekts eine Untersuchung des Einflusses der aktivierten BBA auf die Tunnelnutzer in Virtueller Realität durchgeführt („Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln“ (15.0563/2012/ERB)). Besonders fokussiert wurden bei der Untersuchung die Effekte der BBA auf die Wahrnehmung und das Evakuierungsverhalten der Tunnelnutzer. Es wurde erwartet, dass eine aktivierte BBA die Sichtverhältnisse stark beeinträchtigt und ggf. zu einer späteren oder gar keiner Evakuierung führt, da Personen das Verlassen des Autos in die aktivierte Brandbekämpfungsanlage vermeiden.

Bei einer Untersuchung in Virtueller Realität (VR) wurden insgesamt 50 Probanden untersucht, von denen jeweils die Hälfte randomisiert einer Gruppe mit BBA Aktivierung (Wassernebel) und einer Gruppe ohne BBA Aktivierung zugeteilt wurden. Alle Probanden nahmen an einer virtuellen Tunnelfahrt teil, bei der sie als Fahrer in einen Tunnel einfuhren, und im Tunnel zu einem Unfall kamen, bei der ein LKW brannte, sich schon mehrere Autos hinter dem Unfall stauten und es zu starker Rauchentwicklung kam, die sich langsam in Richtung der Probanden ausbreitete. Nach dem Anhalten des Autos wurden die Probanden mittels einer Durchsage zur Evakuierung aufgefordert. Gemessen wurde, ob die Probanden das Auto verlassen und die Latenz bis zum Verlassen des Autos. Die Probanden hatten dann nach einer kurzen Pause die Möglichkeit, ihr Fluchtziel mittels Joystick zu erreichen. Ziel und Dauer der Flucht wurden wiederum erfasst. Durchgeführt

wurde die Untersuchung im 3D Multisensoriklabor (CAVE System) am Psychologischen Institut der Universität Würzburg.

Die in VR durchgeführte Untersuchung lieferte erste wichtige Erkenntnisse, wie sich eine BBA auf das Verhalten und Erleben von Tunnelnutzern auswirkt. Während in der durchgeführten Untersuchung die aktivierte BBA eine deutliche Auswirkung auf die visuelle Wahrnehmung der Probanden hatte, also eine deutliche Sichteinschränkung sowohl innerhalb als auch außerhalb des Autos bedeutete, hatte die Aktivierung der BBA nur geringe Auswirkungen auf das Fluchtverhalten. Sowohl die Probanden mit Aktivierung als auch die ohne Aktivierung der BBA suchten als Fluchtziele die nächstgelegenen Sicherheitseinrichtungen auf, auch wenn diese für die Probanden mit aktivierter BBA im Einflussbereich des Wassernebels lagen.

Ziel eines daran anschließenden Forschungsprojekts (Einfluss einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage (DLS) auf das Reaktions- und Fluchtverhalten der Verkehrsteilnehmer (FE 89.0299/2014)) war es, den Einfluss einer aktivierten, schaubasierten BBA auf das Verhalten und Erleben der Tunnelnutzer unter Berücksichtigung haptischer Reize wie Nässe und Kälte zu erfassen und die Ergebnisse aus den VR Untersuchungen zu validieren. Untersucht wurde in einer randomisierten, kontrollierten Probandenstudie im Tunnel Jagdberg das Fluchtverhalten der Personen innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs. Probanden fuhren mit einem PKW in den Tunnel und wurden mit einem nachgestellten Unfall mit Rauchentwicklung konfrontiert. Nachdem sie an der Unfallstelle ihr Auto angehalten haben, wurden sie mit einer Lautsprecherdurchsage zur Flucht aufgefordert. Bei der Hälfte der Probanden wurde während der Durchsage zusätzlich die BBA aktiviert. Ein besonderes Augenmerk lag auf der Analyse des Reaktions- und Fluchtverhaltens der Probanden und auf den aufgesuchten Fluchtzielen.

In Übereinstimmung zu den Ergebnissen der VR Untersuchung berichteten die Probanden, die eine BBA-Aktivierung erlebt hatten, dass die schaubasierte BBA ihre Sicht (vor allem im Auto und bei ausgeschaltetem Scheibenwischer) einschränkte. Im Unterschied zu der VR Untersuchung waren hier die Lautsprecherdurchsagen im Tunnel durch die BBA-Aktivierung weniger verständlich. Die Probanden hatten kaum Befürchtungen zu negativen Einflüssen des Schaums und berichteten keine Irritationen durch den Schaum auf den Schleimhäuten. Sie fühlten sich durch den Schaum etwas im Fluchtverhalten beeinflusst, da sie vermuteten, genauer auf ihre Schritte achten zu müssen, weil der Schaum rutschig sein könnte. Die Analysen des Verhaltens zeigen, dass die meisten Probanden auch bei aktivierter BBA ihr Fahrzeug verlassen. Die beiden Versuchsgruppen unterschieden sich nicht bedeutsam im Fluchtziel und in der Zeit, welche sie benötigten,

um das Fahrzeug zu verlassen. In beiden Gruppen suchten die meisten Probanden den nächstgelegenen Notausgang auf. Dieses Ergebnis zeigt, dass die meisten Probanden der Aufforderung der Tunneldurchsage nachkamen, in der sie aufgefordert wurden, den Tunnel zu verlassen. Einige Probanden suchten allerdings auch die Notrufstation auf und wenige andere Probanden gingen zur Unfallstelle.

Auch wenn die beiden Studien zur BBA nur einen kleinen Teil möglicher Szenarien abdeckt und reale Fluchtverhalten nur begrenzt vorhersagen können, sprechen die gefundenen Ergebnisse dafür, dass die Aktivierung einer BBA in einen Straßentunnel zwar zu einer deutlich eingeschränkten Sicht führt, aber keine maßgeblichen negativen Auswirkungen auf das Verhalten der Tunnelnutzer hat, solange Teile der Infrastruktur des Tunnels auf die Aktivierung einer BBA abgestimmt werden. Dabei ist vor allem eine gut verständliche Durchsage wichtig, damit auch Personen im direkten Einflussbereich der BBA ihr Fahrzeug verlassen. Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass auch Untersuchungen in Virtueller Realität gut geeignet sind, Verhalten von Tunnelnutzern in Ereignisfällen zu untersuchen und daraus wertvolle Erkenntnisse für die Ausstattung von Straßentunneln mit spezifischen Sicherheitseinrichtungen abzuleiten.

- [1] Kinateder, M., Ronchi, E., Nilsson, D., Kobes, M., Müller, M., Pauli, P., & Mühlberger, A. Virtual, Reality for fire evacuation research. *Proceedings of the 2014 Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, 2. 313–321, 2014.
- [2] Kuligowski, E., *The process of human behavior in fires*: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2009.
- [3] Kretz, T., Mayer, G., & Mühlberger, A. (2011). Behaviour and Perception-based Pedestrian Evacuation Simulation. In R. D. Peacock, E. D. Kuligowski & J. D. Averill (Eds.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (pp. 827-831). Boston, MA: Springer US.

Nachrüstung des Tunnels Farchant

Stephan Geuder

Autobahndirektion Südbayern, München

1 Ausgangssituation

Die unerwartet dramatisch verlaufenden Brandunfälle im Montblanc-Tunnel (1999), im Tauerntunnel (1999) und im Gotthard Tunnel (2001) mit bis zu 40 Todesopfern zeigten, dass das Ereignis „Tunnelbrand“ bei der Konzeption und dem Betrieb von Straßentunneln bis dahin nicht ausreichend berücksichtigt wurde.

Die Hauptursachen für die vielen Todesopfer wurden von der international besetzten Fachwelt wie folgt aufgezeigt:

- LKW-Brände entwickeln sich extrem schnell.
- Der Brandherd mit Temperaturen von über 1000 °C ist auch für die Rettungskräfte unzugänglich.
- Es wird eine große Menge an giftigen Brandgasen freigesetzt.

Im Ergebnis zeigt die Analyse, dass neben der Prävention zur Vermeidung von Tunnelbränden vor allem die mögliche Selbstrettung im Brandfall die oberste Priorität haben muss.

Die „EU-Tunnelrichtlinie, Ausgabe 2004“ und die darauf aufbauende nationale „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, Ausgabe 2006“ haben das Ziel die ermittelten Sicherheitsdefizite zu minimieren.

2 Umfang der Nachrüstung

Noch im Jahr 2001 wurde dem Tunnel Farchant, Bild 1, bzgl. seiner Sicherheitsstandards beim ADAC Tunneltest 2001 die Note sehr gut erteilt und der Tunnel im europaweiten Vergleich zum Testsieger gekürt.

Um weiterhin die größtmögliche Sicherheit gewährleisten zu können musste der Tunnel sowohl baulich, wie auch betriebstechnisch auf das aktuelle Sicherheitsniveau hochgerüstet werden.

Kernstück der Maßnahme war die Herstellung von vier zusätzlichen Rettungsquerschlägen zwischen den beiden Tunnelröhren. Damit halbiert sich der Flucht- und Rettungs-

wegabstand zwischen den drei bereits bestehenden Querschlägen. Sämtliche Querschläge erhielten Brandschotts und Türen, die im Brandfall die Ausbreitung von Rauch und Feuer in die nicht betroffene Röhre verhindern.



Bild 1: Tunnel Farchant, Nordportal

Eine helle Beschichtung der Tunnelwände verbessert die Sichtverhältnisse im Tunnel und erhöht die Dauerhaftigkeit der Innenschale.

Weitere Schwerpunkte waren die Erneuerung von 430 Kabelzugschachtabdeckungen und die Erneuerung der betriebstechnischen Ausstattung.

3 Bestandsbauwerk

Der rund 2,4 km lange zweiröhrige Tunnel ist Bestandteil der Ortsumfahrung Farchant im Zuge der B 2neu, die nach fünfjähriger Bauzeit im Jahr 2000 unter Verkehr genommen werden konnte.

Beide Röhren weisen zwei Fahrstreifen mit beidseitigen Notgehwegen auf. Während die nördlichen 0,6 km des Tunnels als Rechteck- bzw. Gewölbequerschnitt in offener Bauweise erstellt werden konnten weist der daran angrenzende 1,8 km lange südliche Tunnel einen Gewölbequerschnitt auf, der in bergmännischer Bauweise hergestellt wurde.

Die beiden Röhren waren ursprünglich im Abstand von ca. 600 m mit insgesamt drei Querschlägen verbunden. Gegenüber diesen Querschlägen sind an den Außenseiten Pannenbuchten angeordnet. Im Abstand von 150 m befinden sich Notrufstationen, die in den Tunnelaußenwänden integriert sind.

Die Tunnellüftung ist im Regelbetrieb als Längslüftung mittels Strahlventilatoren konzipiert. Im Brandfall erfolgt zusätzlich eine Rauchabsaugung über einen oberhalb der Zwischendecke liegenden Lüftungskanal zu einem zentralen Lüftungskamin in Tunnelmitte. Bild 2 zeigt Details des Bestandsbauwerks.



Bild 2: Bestandsbauwerk

4 Baudurchführung

Die Nachrüstarbeiten fanden in zwei Hauptbauphasen unter Aufrechterhaltung des Verkehrs statt. Lediglich punktuelle Nachtsperren waren möglich. Hierzu musste der Verkehr auf je einen Fahrstreifen pro Fahrtrichtung reduziert werden. Während der Verkehr in der einen Tunnelröhre im Gegenverkehr (Verkehrsröhre) geführt wurde, liefen in der anderen Röhre (Bauröhre) die Bauarbeiten.

Im Jahr 2013 wurden die Bauarbeiten für die neuen Rettungsquerschläge und für die Fahrtrichtung München durchgeführt. Die Bauarbeiten für die Fahrtrichtung Garmisch-Partenkirchen erfolgten im Jahr Herbst 2014.

Wichtigste Randbedingung während der gesamten Bauzeit war, die reguläre Betriebssicherheit für die Verkehrsteilnehmer in der Verkehrsröhre jederzeit zu gewährleisten. Hierzu war es u. a. erforderlich die Arbeiten in der Bauröhre ständig so zu koordinieren, dass die Bauröhre über die vorhandenen Rettungsquerschläge gleichzeitig als Flucht- und Rettungsweg für die Verkehrsröhre genutzt werden konnte.

Der Bauablauf für die unterschiedlichen Gewerke der baulichen und betriebstechnischen Nachrüstung wurde bereits in der Ausschreibungsphase detailliert aufeinander abgestimmt. Einzelheiten zum Bauablauf gehen aus Bild 3 hervor.

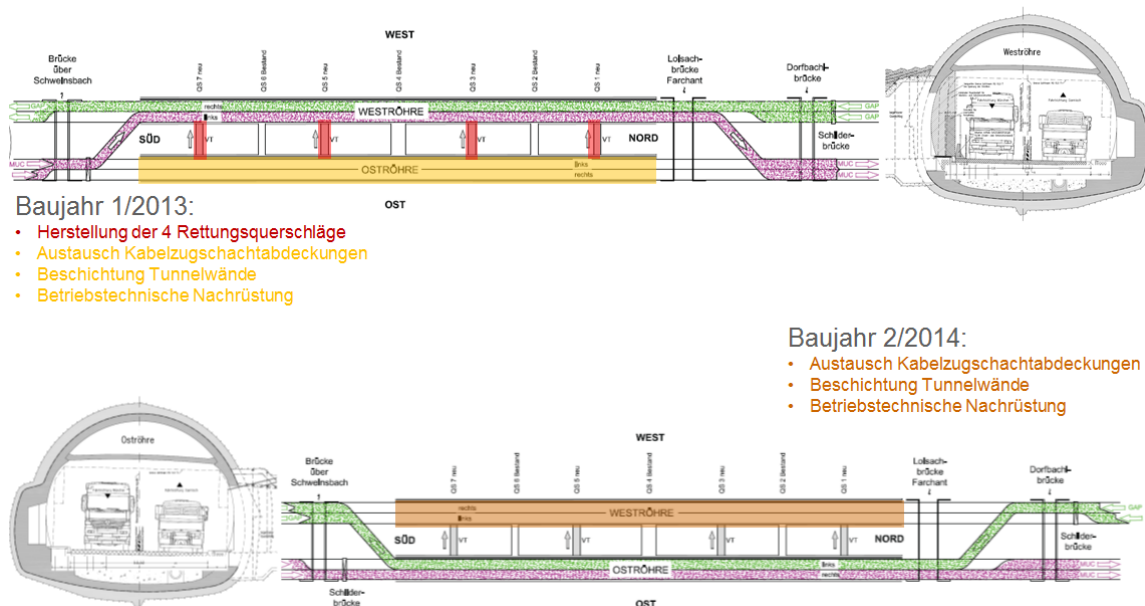


Bild 3: Bauablauf

5 Errichtung der vier zusätzlichen Rettungsverschlüsse

Die neuen 7 bis 31 m langen begehbaren Rettungsverschlüsse, vgl. Bild 4, wurden in bergmännischer Bauweise als Gewölbequerschnitt hergestellt. In einem ersten Schritt wurde die vorhandene Tunnelinnenschale provisorisch unterstützt. Zur örtlichen Absenkung des Bergwasserspiegels wurden Entwässerungsbohrungen gesetzt. Erst daran anschließend durfte die Innenschale geöffnet werden, um die Vortriebsarbeiten für den neuen Verschluss durchzuführen.

Die Randbedingungen bzgl. der Geologie, Bild 5, sind sehr unterschiedlich. Die Verschlüsse 1 und 3 wurden im Lockergestein (Auffüllung bzw. Hangschutt, Moräne) oberhalb des natürlichen Bergwasserspiegels im Baggervortrieb aufgefahren. Die Verschlüsse 5 und 7 befinden sich ca. 17 m unterhalb des höchsten Bergwasserspiegels im Bereich des kompakten Hauptdolomites und wurden weitgehend im Sprengvortrieb aufgefahren.

Während die temporäre Sicherung des nur ca. 7 m langen Verschlusses 1, Bild 6, über einen zwischen beiden Tunnelröhren durchgehenden Rohrschirm erfolgte, wurde die

Längs- und Querschnitt:

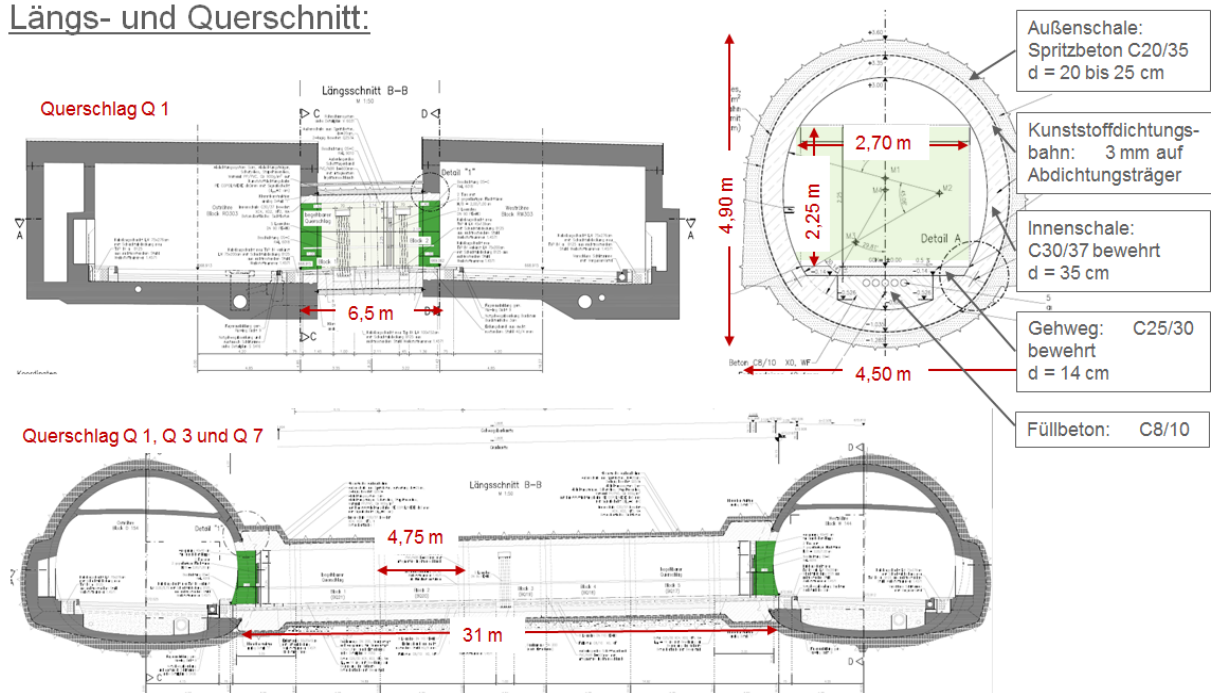


Bild 4: Querschläge

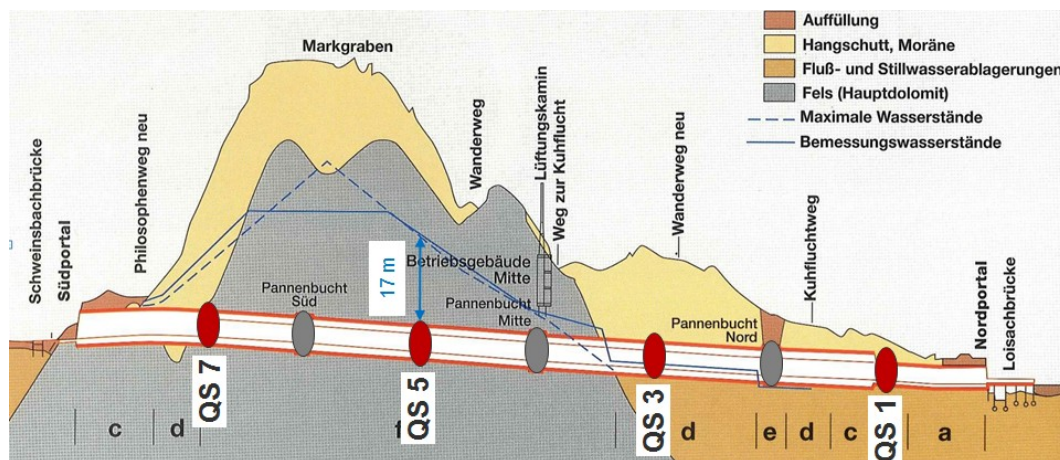


Bild 5: Geologie

Sicherung des Querschlages 3 über einen Spießschirm erreicht, Bild 7. Für die Querschläge 5 und 7 waren nur punktuelle Sicherungsmaßnahmen (Anker) erforderlich. Zusätzlich war bei allen Vortrieben eine Spritzbetonaußenschale vorgesehen, die parallel mit den Vortriebsarbeiten hergestellt wurde.

Die Vortriebsarbeiten liefen im Wesentlichen in drei Schritten ab, Ausbruch der Kalotte und der Strosse, Ausbruch der Sole und zum Schluss die Herstellung der Aufweitungen im Anschlussbereich zu den Bestandsröhren. Die Abschlaglängen betragen je nach Situation zwischen 1 bis 2 m.

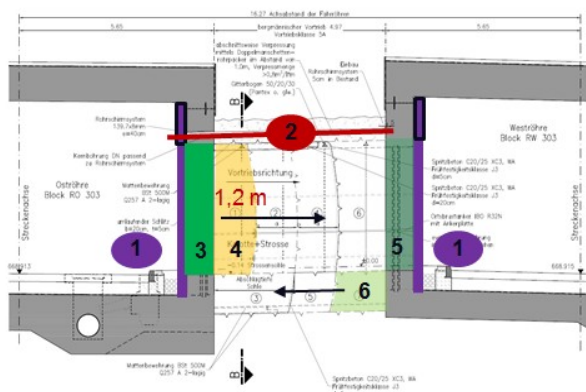


Bild 6: Vortrieb Querschlag 1

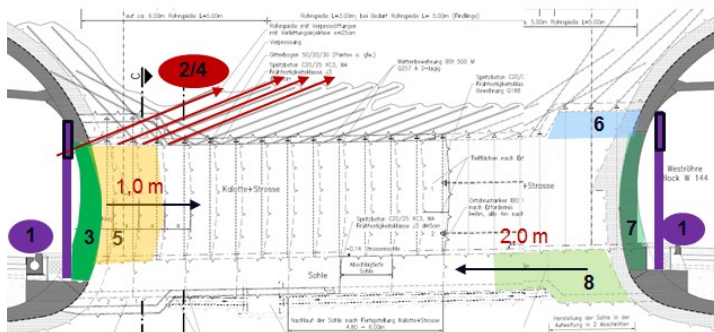


Bild 7: Vortrieb Querschlag 3

Nach Abschluss der Vortriebsarbeiten erfolgte der Einbau der Abdichtung (Kunststoffdichtungsbahn) und die Herstellung der 35 cm starken Tunnelinnenschale getrennt für Sole und Gewölbe mittels Schalwagen in Regelabschnittslängen von 4,75 m, Bild 8. Zum Schutz des Verkehrs beim Durchschlag und den Betonarbeiten waren vorab errichtete Abschaltungen in der Nachbarröhre (Verkehrsröhre) eingebaut.



Bild 8: Einbau der Abdichtung und der Innenschale

6 Beschichtung der Tunnelinnenwände

Die Tunnelinnenwände wurden bis zu einer Höhe von 3,00 m über Gehwegoberkante auf der gesamten Tunnellänge mit einem Oberflächenschutzsystem mit erhöhter Dichtigkeit (OS-C) beschichtet (Gesamtumfang ca. 30.000 m²).

In einem ersten Arbeitsgang wurde hierzu die Betonoberfläche mittels Druckwasserstrahlen maschinell aufgeraut. Die Blockfugen wurden mittels Handlanze nachbearbeitet. Anschließend erfolgte der händische Auftrag der Feinspachtelung in zwei Arbeitsgängen frisch in frisch. Zum Schutz der frischen Spachtelflächen vor frühzeitigem Austrocknen wurden diese mittels abgehängter Planen vor Zugluft geschützt. Zum Schluss konnte die Oberflächenschutzbeschichtung (Epoxidharz) maschinell in zwei Lagen aufgespritzt werden. Bei den Beschichtungsarbeiten ist neben der sicheren Einhaltung des Taupunktes an der Betonoberfläche auch eine absolute Staubfreiheit im Tunnel erforderlich. Bild 9 zeigt die einzelnen Phasen der Beschichtungsarbeiten.

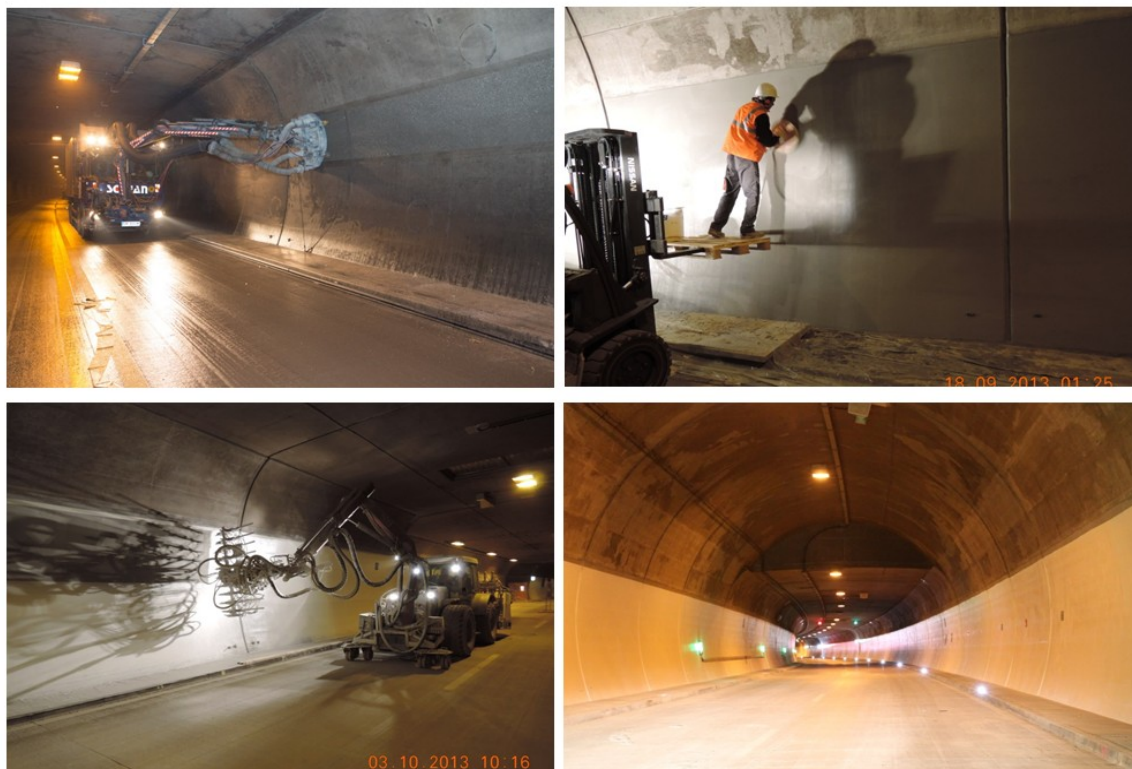


Bild 9. Beschichtung der Tunnelwände

7 Sonstige Nachrüstarbeiten

Weitere Nachrüstarbeiten waren:

- Der Austausch von 430 stark korrodierten Kabelzugschachtabdeckungen durch eine mit Beton gefüllte Wannenkonstruktion aus nicht rostendem Stahl (W.Nr. 1.4571).

- Der Einbau von Betonschutzwänden an den Stirnseiten der Pannenbuchten.
- Der Einbau von Anpralldämpfern an den Portalen.
- Der Austausch von 72 Abluftjalousien in der Zwischendecke und 3 Drehklappen im Lüftungskanal.
- Der barrierefreie Umbau der Notgehwege vor den Querschlägen.
- Der Einbau einer Orientierungsbeleuchtung und einer optischen Leiteinrichtung entlang der Notgehwege.
- Die Erneuerung der Videoüberwachung, der Tunnelfunk- und Lautsprecheranlage.
- Die Generalinstandsetzung der 32 Strahlventilatoren.
- Die Erneuerung der Tunnelverkabelung, insgesamt ca. 190 km.



Bild 10. Austausch Kabelzugschachtabdeckungen

8 Kosten

Die Gesamtkosten der Nachrüstmaßnahme beliefen sich auf ca. 13 Mio. €. Davon betragen die Kosten für die bauliche Nachrüstung ca. 8 Mio. € und für die betriebstechnische Nachrüstung ca. 5 Mio. €.



Bild 11. Betriebstechnische Nachrüstung

Untersuchungen zur Längslüftung an einem Modelltunnel

Dr. Wilhelm Jessen

Aerodynamisches Institut (AIA), RWTH Aachen

Andreas Klein

Institut für Straßenwesen (isac), RWTH Aachen

1 Einleitung

Straßentunnel sind komplexe Verkehrsbauwerke, die nicht nur in der Bauphase, sondern bereits in der Planung und im späteren Betrieb hohe Anforderungen an die technische Vorbereitung, Ausführung und Überwachung stellen. Dies liegt vor allem darin begründet, dass zur sicheren unterirdischen Führung des Verkehrs das Zusammenspiel zahlreicher Gewerke erforderlich ist und jedes Tunnelbauwerk mit seiner Ausstattung ein Unikat darstellt.

Ein wichtiges Element in der Planung und im Betrieb von Straßentunneln ist die Ausstattung mit Lüftungsanlagen, da diese eine wesentliche Rolle bei der Gewährleistung des nach Regelwerk geforderten Sicherheitsniveaus einnehmen. Sie sind anhand der maßgebenden Einflussgrößen sowohl für den Regelbetrieb als auch für den Ereignisfall (Fahrzeugbrände) auszulegen, wobei zur sachgerechten Dimensionierung die spezifische Charakteristik des Tunnels zu berücksichtigen ist.

Derzeit erfolgt die Auslegung von Tunnellüftungen anhand des technischen Regelwerks und zusätzlich durch die Anwendung ein- oder dreidimensionaler numerischer Modelle zur Strömungs- und Rauchausbreitungssimulation. Basis hierfür sind neben den grundlegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten Erfahrungswerte und Ergebnisse aus Forschungsvorhaben u. a. mit Realbrandversuchen. Diese Versuche lieferten zahlreiche Erkenntnisse u. a. zu Temperaturentwicklung, Rauchschichtung und Energiefreisetzungsraten, jedoch konnte nur eine eingeschränkte Zahl von Szenarien z. B. hinsichtlich der Tunnelgeometrie und der Konfiguration des Lüftungssystems untersucht werden, so dass eine unmittelbare Übertragung auf davon abweichende Randbedingungen in der Regel nicht möglich ist.

Aus diesem Grund wurden international verschiedene Ansätze verfolgt, experimentelle Untersuchungen im verkleinerten Maßstab an Modelltunneln durchzuführen, um z. B.

Realbrandversuche nachzustellen oder das Zusammenwirken der Einflussgrößen bei einem Tunnelbrand näher zu erfassen. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Durchführung strömungsmechanischer Untersuchungen an Modelltunneln grundsätzlich möglich und sinnvoll ist. Es existiert gegenwärtig jedoch noch kein Modelltunnel mit zugehöriger Messausrüstung, der durch eine umfangreiche Variation der verschiedenen Einflussgrößen eine große Bandbreite an Untersuchungsszenarien ermöglicht und realitätsnah modellierte Strahlventilatoren aufweist.

Ziel des diesem Kurzbericht zugrundeliegenden Forschungsvorhabens war die realitätsnahe und zugleich modellhafte Abbildung der in einem Straßentunnel herrschenden Verhältnisse zur Optimierung der Längslüftungssysteme und sonstigen betriebstechnischen Einbauten sowie der baulichen Durchbildung der Tunnelbauwerke im Hinblick auf eine weitere Erhöhung der Tunnelsicherheit. Auf Basis experimenteller Untersuchungen anhand eines Modelltunnels und einer parallelen Umsetzung in numerische Simulationen soll ein Werkzeug bereitgestellt werden, dass eine objektive und nachvollziehbare Bestimmung der Sicherheitseinrichtungen – insbesondere des Lüftungssystems – bei der Planung neuer Bauwerke und bei der Nachrüstung bestehender Tunnelbauwerke unter wirtschaftlichen, sicherheitstechnischen und bautechnischen Gesichtspunkten ermöglicht.

Zur Erreichung dieser Ziele wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens u. a. verschiedene Fragestellungen zur Rauchausbreitung in Abhängigkeit der Längsneigung, der Querschnittsausbildung und des Strahlventilatorbetriebs bearbeitet. Auftraggeber dieses Forschungsvorhabens war das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen.

2 Aufbau und Konzeption des Modelltunnels

2.1 Grundlegender Aufbau und Eigenschaften

Für den Modelltunnel wurde aus mehreren Gesichtspunkten (u. a. Vorgaben aus den zu untersuchenden Fragestellungen, verfügbare Flächen zum Aufbau, vorgesehene Messtechnik) ein Modellmaßstab von 1:18 gewählt. Um flexibel verschiedene Tunnellängen, Geometrien und Messpositionen realisieren zu können, wurden eine Modulbauweise und eine Teilung in Ober- und Unterteile gewählt. Auf diese Weise lassen sich derzeit Rechteck- und Maulprofile in den Regelquerschnitten RQ26t bzw. 10,5T nach den RABT 2006 darstellen (Bild 1). Der Aufbau erfolgt auf Untergestellen aus Aluminiumprofilen, über deren Stellfüße eine Längsneigung von bis zu 6 % eingestellt werden kann.

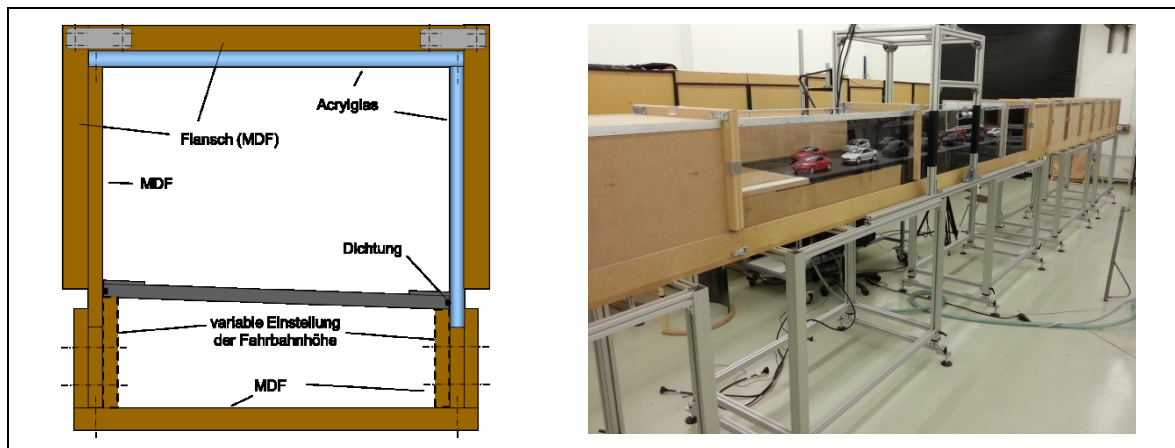


Bild 1: Rechteckquerschnitt (links) und beispielhafter Aufbau des Modelltunnels (rechts)

Die Oberteile des Modelltunnels wurden transparent aus PMMA („Acrylglas“) bzw. Polycarbonat und die Unterteile inkl. Fahrbahn aus MDF-Platten angefertigt. Hierbei wurden auch Änderungen im Querschnitt wie Pannenbuchten oder Deckenvouten und Wandnischen zur Aufnahme von Strahlventilatoren realisiert.

2.2 Modellierung von Strahlventilatoren

Zur Modellierung funktionsfähiger Strahlventilatoren unterschiedlicher Laufraddurchmesser D_L wurde auf Innenläuferventilatoren („Impeller“) aus dem Modellbaubereich zurückgegriffen. Basierend auf den Abmessungen der am Markt gängigen Strahlventilatoren wurden diese konstruktiv um die beidseitigen Schalldämpfer ergänzt, Bild 2. Ziel bei der Entwicklung war die Realisierung hoher Strahlgeschwindigkeiten, um eine Strömung im Tunnel mit möglichst hohen Reynolds-Zahlen und somit einen Turbulenzbereich ähnlich wie in realen Straßentunneln zu erzeugen.

Für die Untersuchungen im Modelltunnel wurde ein Einbau in Deckenvouten bzw. Wandnischen ($D_L = 710$ und 900 mm) und ein Einbau mittig unter der Tunneldecke ($D_L = 900$ mm) realisiert. Der Einbau erfolgte jeweils paarweise, wobei der Abstand zwischen den Strahlventilatorgruppen ausgehend vom zehnfachen hydraulischen Durchmesser variiert wurde, was dem vielfach in der Literatur empfohlenen Abstand entspricht.

2.2 Modellierung verkehrlicher Einflüsse

Da ein Brandfall im Tunnel häufig ursächlich oder in der Folge mit einem Stau einhergeht und die Fahrzeuge (insbesondere Lkw) die Rauchausbreitung beeinflussen, fanden die strömungsmechanischen Untersuchungen teilweise mit stehenden Modellfahrzeugen

statt. Für weitergehende Betrachtungen, z. B. zur Untersuchung der Kolbenwirkung durch Fahrzeuge, wurden geeignete RC-Modellfahrzeuge umgerüstet und modifiziert, Bild 3. Zusätzlich wurde der oben beschriebene Aufbau des Tunnels zu einem Rundkurs erweitert und in die Fahrbahn ein Stahldraht und ein gepolter Magnetstreifen eingelassen. Auf diese Weise konnte zum einen die Spurführung der Fahrzeuge und zum anderen durch einen fahrzeugseitigen Magnetsensor die Verortung der Fahrzeuge realisiert werden. Durch die Kommunikation der Fahrzeuge mit einem Zentralrechner über WLAN konnte eine Einzelansteuerung der Fahrzeuge und automatische Abstandshaltung umgesetzt werden.

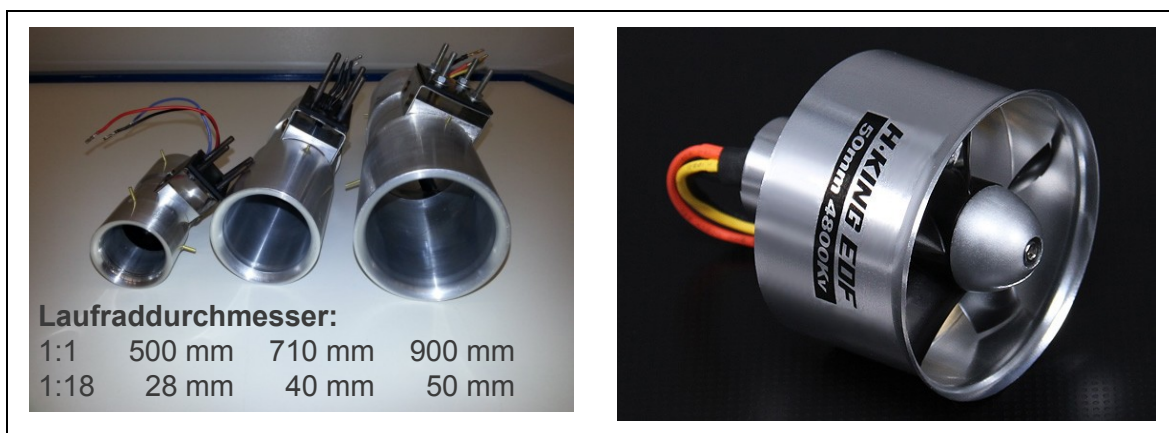


Bild 2: Modell-Strahlventilatoren (links) und Impeller mit Laufrad und Gehäuse (rechts)

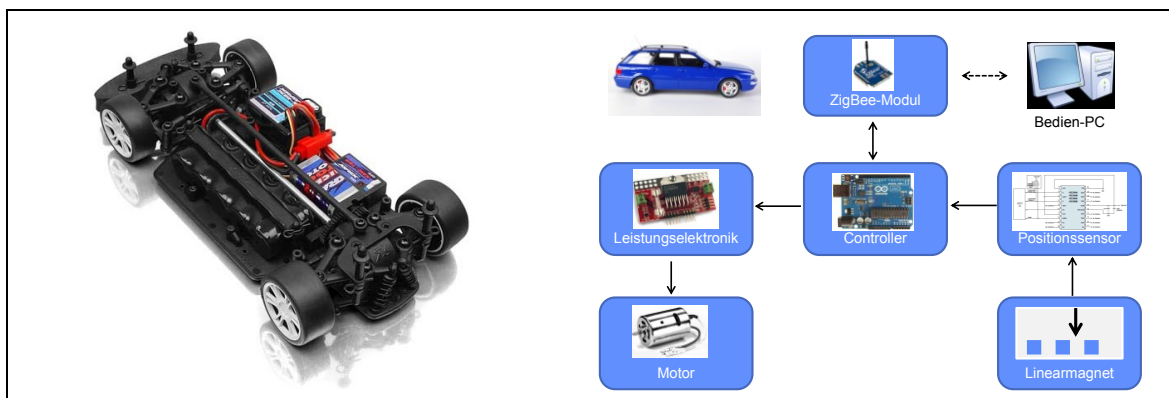


Bild 3: RC-Fahrzeug ohne Kunststoffkarosserie (links) und Bestandteile zur Abstandsregelung des bewegten Verkehrs

2.4 Modellierung des Auftriebs durch Brände

Die Modellierung von Bränden erfolgte isotherm durch die Einspeisung eines Helium-Luft-Gemisches in Anlehnung an die Untersuchungen von Vauquelin et al. ([1]-[4]). Dieser Ansatz beruht darauf, dass sich die konvektive Wärmefreisetzungsrate Q_C und der Auftrieb B aus dem Rauchvolumenstrom q_S und der Dichte- und Temperaturdifferenz zwischen Rauch und Luft ermitteln lassen (siehe Gleichungen in Bild 4). Durch die geringere

Dichte von Helium ist es durch gezielte Wahl eines Mischungsvolumenstroms und -verhältnisses mit Luft möglich, den Auftrieb eines Brandherdes und somit auch die Rauchschtung und -ausbreitung in Längsrichtung im Modell nachzubilden. Die Skalierung der Wärmefreisetzungsrates und der Geschwindigkeiten in den verkleinerten Maßstab erfolgt mit der Froude-Zahl.

$Q_C = \rho_S \cdot C_p \cdot q_S \cdot (T_S - T_{air}) \quad [W]$		$q_{hel} = \frac{Q_C}{C_p \cdot T_{air} \cdot (\rho_{air} - \rho_{hel})} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right]$
$B = g \cdot q_S \cdot \frac{\rho_{air} - \rho_S}{\rho_{air}} \quad \left[\frac{m^4}{s^3} \right]$		$q_S = \frac{Q_C}{C_p \cdot T_{air} \cdot (\rho_{air} - \rho_S)} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right]$
$Q_C = \frac{\rho_{air} \cdot C_p \cdot T_{air}}{g} \cdot B \quad [W]$		$\rho_S = \chi_{air} \cdot \rho_{air} + \chi_{hel} \cdot \rho_{hel} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

Bild 4: Ansatz nach Vauquelin zur Modellierung des Auftriebs durch Einspeisung eines Helium-Luft-Gemisches

2.5 Strömungsmechanisches Messkonzept

Die Untersuchung der Strömungszustände und der Rauchausbreitung im Modelltunnel erfordert den Einsatz verschiedener Strömungsmessverfahren. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Messtechnik der Particle Image Velocimetry (PIV), welche im Folgenden kurz beschrieben wird. Des Weiteren erfolgten Rauchvisualisierungen mit Analyse anhand von Videoaufzeichnungen, Druckmessungen sowie konventionelle Geschwindigkeitsmessungen mittels entsprechender Messsonden.

Die Particle Image Velocimetry (PIV) ist ein berührungsfreies laseroptisches Strömungsmessverfahren zur Bestimmung von Geschwindigkeitsverteilungen. Hierbei werden der zu untersuchenden Strömung kleine Tracer-Partikel ($< 10 \mu m$) zugesetzt, deren Bewegung in der Messebene mit einem gepulsten dünnen Laserlichtschnitt ausgeleuchtet und mit Hilfe einer oder mehrerer sCMOS-Kameras aufgezeichnet wird. Dabei werden zwei Bilder kurz hintereinander belichtet und anschließend mit Hilfe der Methode der Kreuzkorrelation digital ausgewertet, Bild 5. Daraus ergibt sich die momentane Geschwindigkeitsverteilung als Vektordarstellung, wobei jeder Vektor der Projektion der Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der Lichtschnittebene entspricht. Dieses Messverfahren ermöglicht eine flächige qualitative und quantitative Erfassung des Strömungsfeldes und ist somit in der Lage, Strömungszustände und Wirbelstrukturen im Modelltunnel auch zeitaufgelöst abzubilden.

In den durchgeführten Untersuchungen wurde das erzeugte Helium-Luft-Gemisch mit den Tracer-Partikeln versetzt und an einer gewählten Position in den Modelltunnel (Brandherd) eingespeist. Zusätzlich zu den dann möglichen quantitativen Untersuchungen mit-

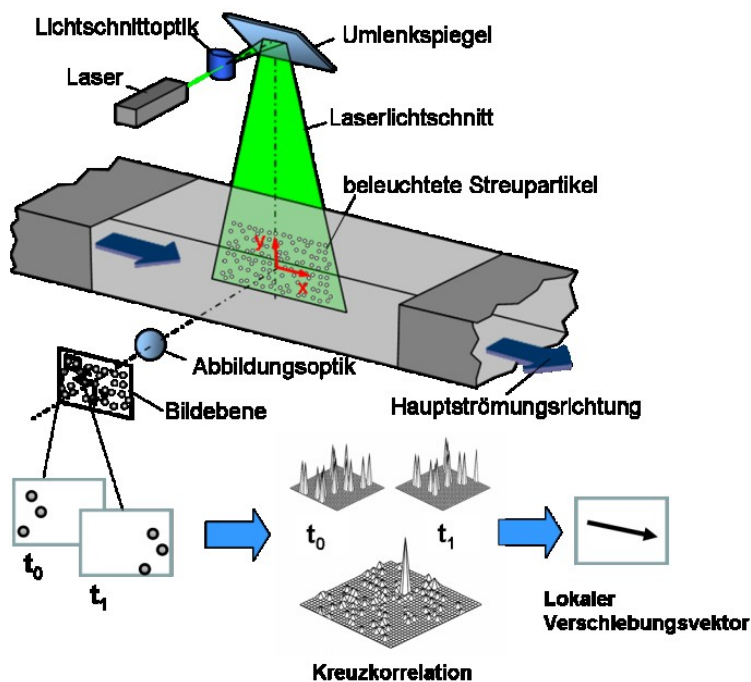


Bild 5: Prinzipskizze zur Particle Image Velocimetry

tel der PIV-Messtechnik konnten die Partikel zur Visualisierung des Gemisches verwendet werden. Zur qualitativen Analyse wurde die sich einstellende Ausbreitung und Schichtung mit mehreren Kameras aufgezeichnet. Beispiele für eine erfolgreiche Anwendung eines kalten Helium-Luft-Gemischs zur Simulation einer Rauchausbreitung in einem Modelltunnel finden sich insbesondere in den Veröffentlichungen von Vauquelin ([1]-[4]).

Die Analyse der Strömungsverluste, die während des Regelbetriebs in Straßentunneln durch Einbauten oder Querschnittsänderungen hervorgerufen werden, erfolgte parallel zur PIV-Messtechnik mittels der Druckmesstechnik. Die dabei auftretenden Druckverluste im Modelltunnel wurden über Druckmessbohrungen in der Tunnellaubung bestimmt. Die gemessenen Werte wurden durch ein Multikanal-Druckmesssystem aufgezeichnet. Die gleiche Verfahrensweise wurde zur Untersuchung der Wandreibungseinflüsse angewandt, wo die Bestimmung der Reibungsbeiwerte über den verlustbehafteten Ansatz nach Bernoulli erfolgte.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Experimentelle Untersuchungen

Die nachfolgend auszugsweise beschriebenen Versuchsreihen wurden jeweils an einem 12 m langen Modelltunnelstück mit Rechteckquerschnitt und/oder Maulprofilquerschnitt durchgeführt.

Der Einfluss eines Strahlventilatorbetriebs auf die Tunnelströmung wurde in verschiedenen Konfigurationen untersucht. Bild 6 zeigt beispielhaft einen Modelltunnelabschnitt mit einer Anordnung der Strahlventilatoren in einer Deckenvoute. Die beiden Strahlventilatoren waren bezogen auf die Ventilatorachse in einem seitlichen Abstand von 124 mm zueinander (entsprechend 2,23 m) angeordnet und wurden einzeln entsprechend ihrer Leistungskurve über die Druckdifferenz geregelt.

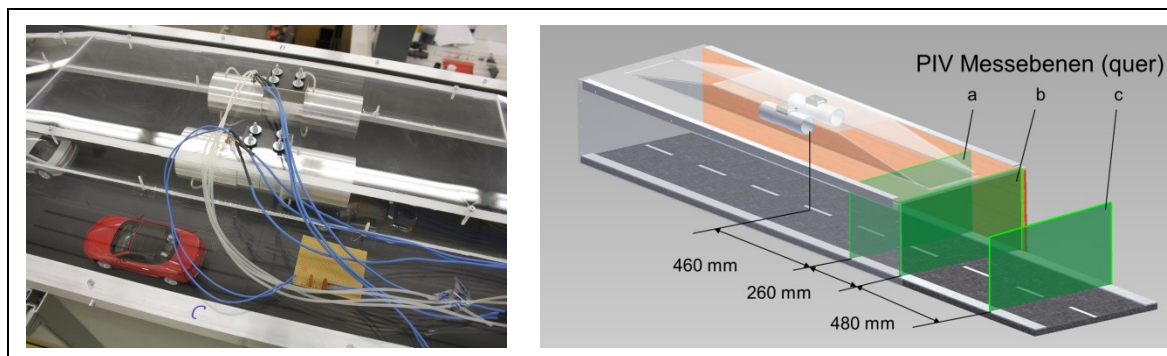


Bild 6: Deckenvoute mit Strahlventilatoren im Modelltunnel (links) und Anordnung der PIV-Messebenen quer zur Tunnelachse stromab der Deckenvoute (rechts)

Bild 7 zeigt die über 600 Bilder gemittelte vertikale Geschwindigkeitsverteilung (v -Komponente) stromabwärts der Strahlventilatoren bei einer Strahlgeschwindigkeit von $u_s = 30$ m/s mit leerem Verkehrsraum. Die Anordnung der drei Messebenen deckt die aus strömungstechnischer Sicht relevanten Bereiche im Nachlauf der Strahlventilatoren ab. In der Messebene a innerhalb der Voute ist in der Mitte ein Bereich mit ausgeprägter Abwärtsgeschwindigkeit zu erkennen. Auffällig ist, dass die laterale Ausdehnung dieses Bereichs wesentlich kleiner als die Voutenbreite ist. Zwei weitere Bereiche mit Abwärtsgeschwindigkeiten deuten sich jeweils an den seitlichen Übergängen von der Voute zur Tunneldecke an. In der Ebene b unmittelbar stromabwärts der Deckenvoute (mit 720 mm Abstand zum Ventilatoraustritt, entsprechend ca. 13 m) sind diese Strömungsphänomene stärker ausgeprägt. Deutlich erkennbar sind hier auch die zu den seitlichen Abwärtsgeschwindigkeiten korrespondierenden Aufwärtsbewegungen, die durch eine Wirbelbildung an den Voutenseitenrändern generiert werden. Die abwärts gerichtete v -Komponente in der Mitte des Tunnels erreicht Maximalwerte von $v = -3$ m/s. In der Ebene c sind aufgrund einer Entfernung zur Hinterkante der Voute von 1,20 m (entsprechend ca. 22 m) die Geschwindigkeitswerte deutlich geringer. Die noch unmittelbar stromabwärts der Deckenvoute ausgeprägten Strömungsstrukturen haben sich vermischt und über den gesamten Tunnelquerschnitt ausgebreitet. Die abwärts gerichtete Geschwindigkeit entlang der Mittelachse ist zwar schwächer geworden, dringt allerdings tiefer in den leeren Verkehrs-

raum ein. Auch die Bereiche der seitlichen Aufwärtsgeschwindigkeiten haben sich ausge dehnt.

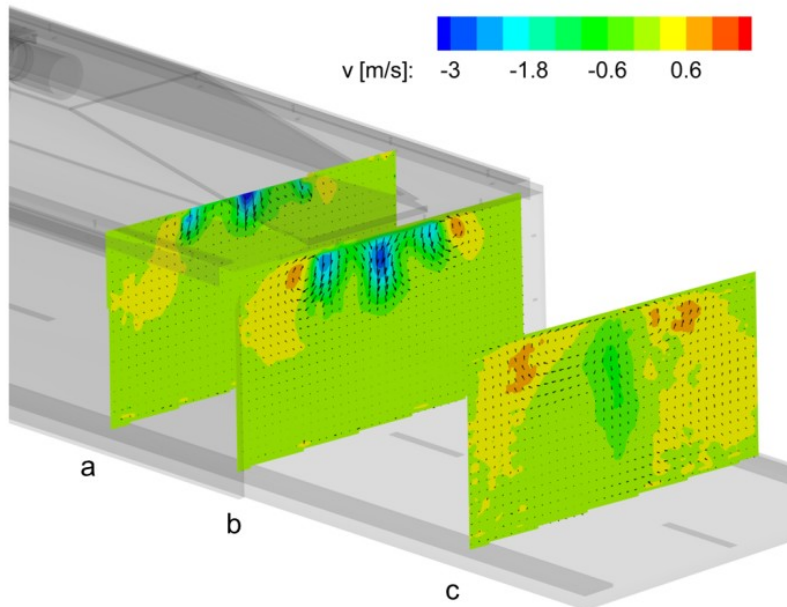


Bild 7: Gemittelte vertikale Geschwindigkeitsverteilung v in drei Ebenen quer zur Hauptströmungsrichtung für $u_s = 30$ m/s bei leerem Verkehrsraum

Der Einfluss verschiedener Ventilatorabstände auf das dazwischen liegende Strömungsfeld und somit auf den Rauchtransport im Brandfall wurde ebenfalls unter Anwendung der PIV-Messtechnik untersucht. Die hierfür gewählte Konfiguration im Modelltunnel mit Rechteckquerschnitt bestand aus zwei parallel unter der Tunneldecke angeordneten Strahlventilatoren gleicher Blasrichtung. Bei einem Laufraddurchmesser von 50 mm betrug der lichte Abstand zwischen Fahrbahn und Strahlventilatorgehäuse etwa 280 mm. Die entlang der jeweiligen Ventilatorachse ausgerichteten beiden Messebenen lagen für alle Abstände mittig zwischen den Ventilatorpaaren. Der mit der PIV-Messtechnik aufgelöste Bereich reichte so von der Fahrbahn bis zur Tunneldecke und hatte eine Breite von 0,4 m im Modell, entsprechend 7,56 m in der Realität. Die Strahlgeschwindigkeit u_s aller Ventilatoren wurde auf 15 m/s geregelt.

In Bild 8 sind die über 500 Bilder gemittelten Geschwindigkeitsverteilungen in Hauptströmungsrichtung (Tunnelachse) für je eine Messebene für 4 verschiedene Ventilatorabstände dargestellt. Für die Konfiguration A (Abstand 3,1 m) stellt sich ein für diese Ventilatoranordnung typisches Strömungsfeld mit hohen Geschwindigkeiten nahe der Tunneldecke und zur Fahrbahn hin abnehmenden Geschwindigkeiten ein. Der in Strömungsrichtung steigende Verlauf der Stromlinien im unteren Bereich bis etwa 150 mm

oberhalb der Fahrbahn wird durch das Ansaugen der folgenden Ventilatoren erzeugt. Wird der Abstand auf 3,5 m vergrößert (Konfiguration B), nimmt diese Steigung ab. Auch die Maximalgeschwindigkeit im Bereich der Tunneldecke zeigt geringere Werte. In der Konfiguration C mit auf 3,9 m erhöhtem Abstand führt dies zu einer weiteren Abnahme der Geschwindigkeit und einem nahezu parallelen Stromlinienverlauf über die gesamte Tunnelhöhe.

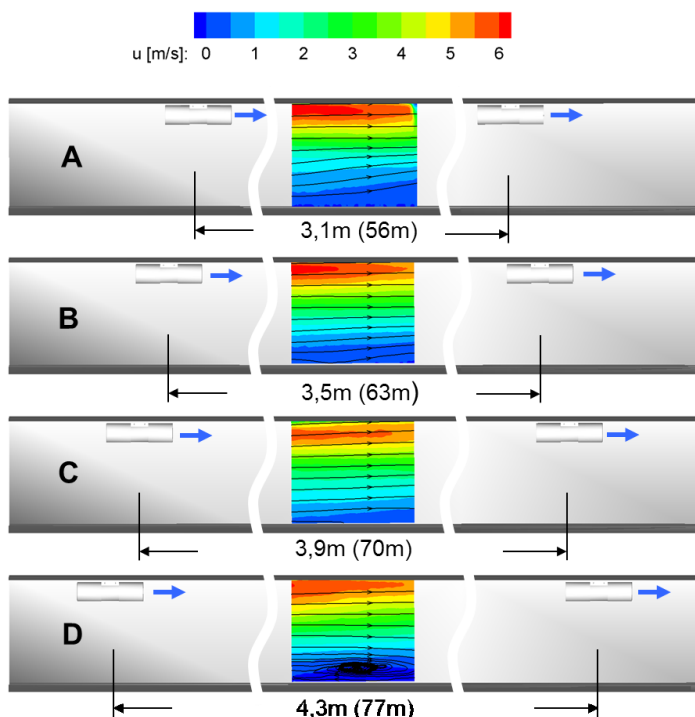


Bild 8: Gemittelte Geschwindigkeitsverteilungen u entlang einer Ventilatorachse zwischen zwei Ventilatorgruppen in verschiedenen Abständen (bei $u_s = 15$ m/s)

Die Erhöhung des Ventilatorabstandes auf 4,3 m zeigt ein deutlich verändertes Strömungsfeld: Während die Geschwindigkeiten nahe der Tunneldecke weiter abgenommen haben, beschreiben die Stromlinien im unteren Verkehrsraum einen Längswirbel mit einer Ausdehnung von etwa 350 mm. Die zugehörige Geschwindigkeitsverteilung weist in diesem Bereich entsprechend negative Geschwindigkeiten auf. Ursache hierfür ist ein zu großer Abstand zwischen den Ventilatorgruppen, so dass die Luft nicht mehr von den stromabwärts gelegenen Ventilatoren angesaugt werden kann. Ein zu großer Abstand zwischen den Ventilatoren kann je nach Position des Brandherds somit dazu führen, dass der Rauch nicht ausreichend abtransportiert bzw. durch die Wirbelbildung sogar in den Verkehrsraum hineingezogen werden kann.

In weiteren Untersuchungen wurde der Einfluss der Längsneigung auf die Rauchausbreitung infolge natürlicher Konvektion an einem 12 m langen Modelltunnel mit Maulprofil untersucht, Bild 9.

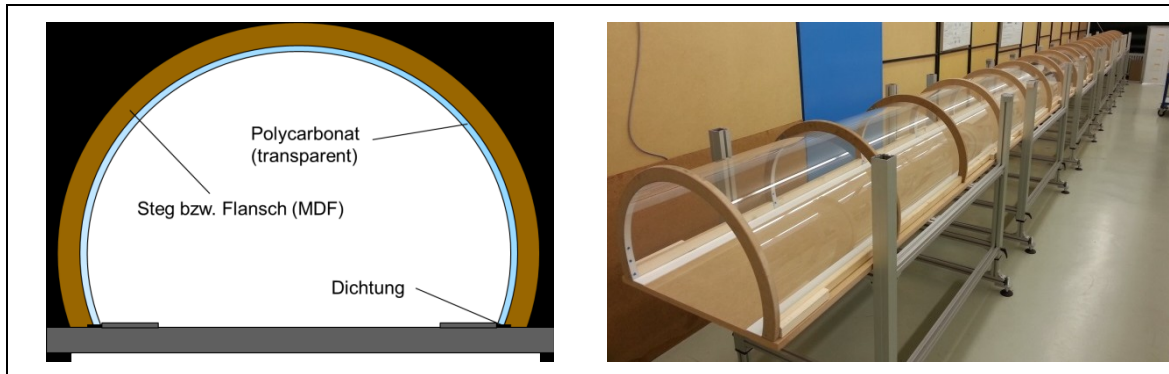


Bild 9: Maulprofilquerschnitt (links) und Aufbau des Modelltunnels mit Maulprofil (rechts)

Durch die Anwendung der PIV-Messtechnik kann im Gegensatz zu den experimentellen Untersuchungen von Vauquelin et al. ([1]-[4]) die Rauchausbreitung im Modelltunnel nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ untersucht werden. Da für diese Messung nur das in den Modelltunnel strömende Helium-Luft-Gemisch mit Seeding-Partikeln versetzt wurde, ließ sich die so simulierte Rauchausbreitung von der im Tunnel befindlichen Luft abgrenzen und die Rauchsichtung analysieren. Der Einfluss der Längsneigung auf die Schichtdicke und Ausbreitungsgeschwindigkeit des Helium-Luft-Gemischs wurde in Messebenen zu beiden Seiten der Ausblasung bestimmt. Die Messebenen waren in einem Abstand von 2 m zur Ausblasung entlang der Tunnelachse positioniert (Bild 10). Simuliert wurde zunächst ein Brand in der Tunnelmitte, der einer realen Brandleistung von 1 MW entspricht. Das Helium-Luft-Gemisch hatte analog zu den Untersuchungen von Vauquelin für diesen Fall einen Heliumanteil von 58%.

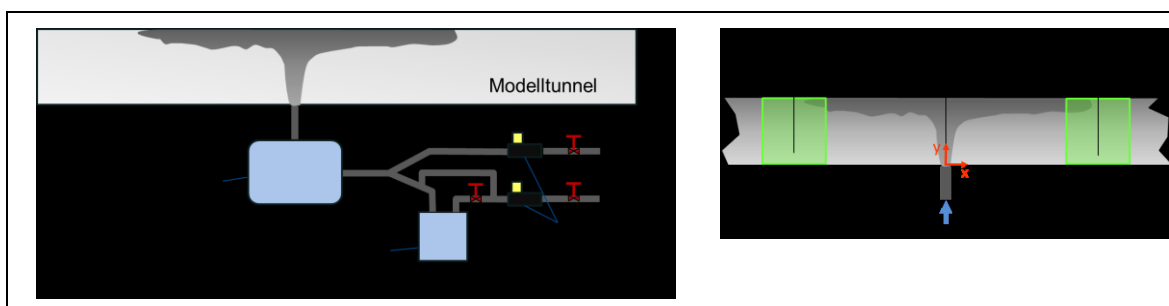


Bild 10: Skizze der Helium-Luft-Ausblasung und PIV-Messpositionen im Modelltunnel zur Untersuchung der Ausbreitung des Helium-Luft Gemischs

Bild 11 zeigt die aus den PIV-Messungen resultierenden und über 300 Bilder gemittelten Geschwindigkeitsverteilungen zu beiden Seiten der Helium-Luft-Ausblasung in den

Modelltunnel bei drei verschiedenen Längsneigungen. Die Konfiguration A beschreibt den Referenzfall ohne Neigung (0%) mit einer entsprechend gleichmäßig verteilten Rauchschiebung zu beiden Seiten der Ausblasung. Die Rauchschiebungsdicke beträgt entlang der Tunnelachse etwa 120 mm. Die zugehörigen Geschwindigkeitsverteilungen in positiver bzw. negativer x-Richtung weisen eine asymmetrische Verteilung mit einem Bereich maximaler Geschwindigkeiten auf, der sich von 310 mm bis 360 mm nahe der Tunneldecke erstreckt. Dabei werden maximale Geschwindigkeiten von 0,31 m/s bzw. -0,33 m/s erreicht.

Durch Neigung des Modelltunnels um 2 % (Konfiguration B) ändern sich die Rauchschiebungsdicken und Geschwindigkeitsverteilungen zu beiden Seiten der Ausblasung. Der Massenstrom des Helium-Luft-Gemisches in positiver x-Richtung (bergauf) hat im Vergleich zu Konfiguration A erkennbar zugenommen, was sich in der etwas größeren Schichtdicke (130 mm) und der höheren Maximalgeschwindigkeit mit Werten von bis zu 0,39 m/s ausdrückt. Hingegen hat der Massenstrom in negativer x-Richtung (bergab) deutlich abgenommen. Die Schichtdicke des Helium-Luft-Gemischs beträgt dort 90 mm und erreicht eine maximale Ausbreitungsgeschwindigkeit von etwa -0,18 m/s. Eine weitere Erhöhung der Neigung auf 4% lässt die Schichtdicke in positiver x-Richtung zwar nicht weiter anwachsen, führt aber zu deutlich gesteigerten Maximalgeschwindigkeiten von bis zu 0,65 m/s. Im Gegensatz dazu haben in negativer x-Richtung sowohl die Schichtdicke (55 mm) als auch die Maximalgeschwindigkeiten weiter abgenommen ($u_{\max} \approx -0,11$ m/s). Die Untersuchungen dokumentieren somit den signifikanten Einfluss der Längsneigung auf die natürliche Konvektion einer Rauchausbreitung im Tunnel.

3.2 Numerische Untersuchungen

Die Untersuchungen am Modelltunnel wurden parallel auch in numerische Feldmodelle (CFD) übertragen, wobei Fire Dynamics Simulator V6.1 (FDS) zur Anwendung kam. Ein Vergleich zur Validierung der numerischen Daten mit experimentellen Ergebnissen (PIV) hinsichtlich lokal auftretender Strömungs- bzw. Wirbelstrukturen wurde anhand des sich einstellenden Strömungsfeldes an der Hinterkante der oben beschriebenen Deckenvoute unter Berücksichtigung gleicher Randbedingungen (Geometrie, Strahlgeschwindigkeit etc.) durchgeführt.

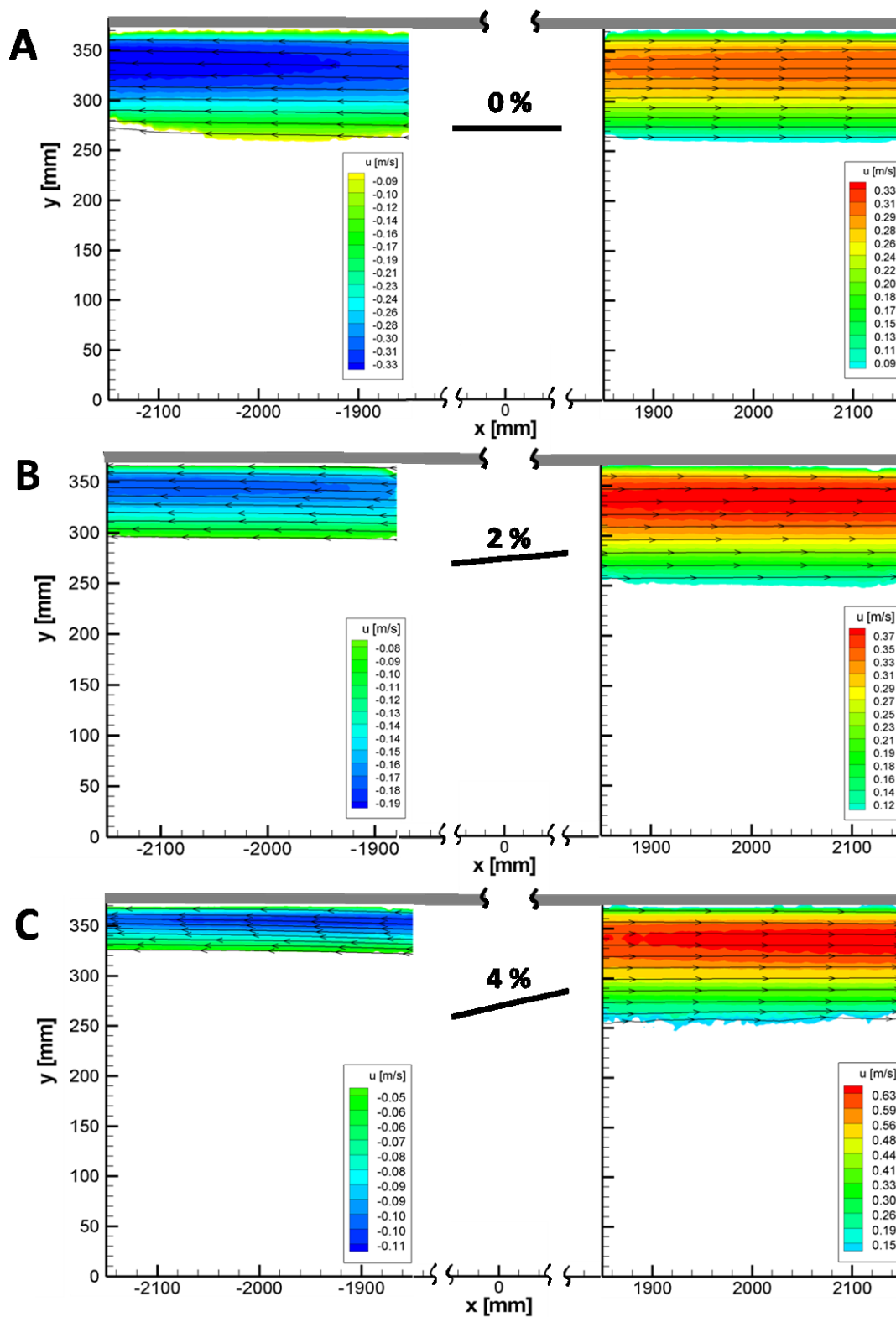


Bild 11: Gemittelte Geschwindigkeitsverteilungen u in x -Richtung einer Helium-Luft-Ausblasing zur Simulation eines 1 MW-Brandes bei verschiedenen Längsneigungen

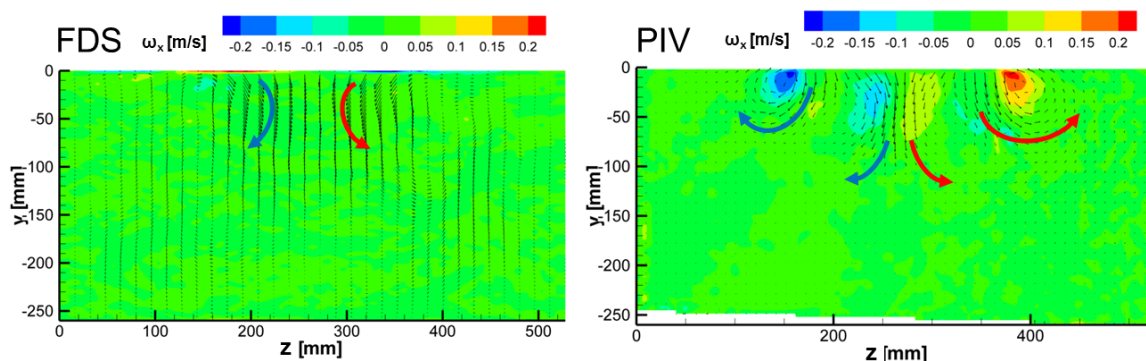


Bild 12: Gemittelte Wirbelintensität ω_x in Hauptströmungsrichtung x an der Hinterkante einer Deckenvoute aus der numerischen Simulation (links) und dem Experiment (rechts)

Bild 12 zeigt den Vergleich zwischen Numerik und Experiment für die gemittelte Wirbelintensität ω_x in Hauptströmungsrichtung x an der stromab gelegenen Hinterkante einer Deckenvoute (siehe Skizze in Bild 6). Zur besseren Übersicht sind die sich jeweils einstellenden Wirbel und deren Drehrichtung durch Pfeile markiert. Der Vergleich zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen der numerischen Simulation und den experimentellen Ergebnissen hinsichtlich der Wirbelstrukturen und -intensität. Während in der Numerik nur ein schwach ausgeprägtes gegensinnig rotierendes Wirbelpaar sichtbar ist, lassen sich im Experiment zwei gegensinnig rotierende Wirbelpaare unterschiedlicher Ausdehnung und Intensität nachweisen. Diese Wirbelpaare werden durch die Interaktion der Nachlaufwirbel der Stahlventilatoren innerhalb der Voute und der Umströmung der seitlichen Voutenkanten generiert. Im Vergleich zu den Ergebnissen der FDS-Simulation ist die Wirbelintensität in den PIV-Messungen deutlich stärker. Der Vergleich am Beispiel der umströmten Hinterkante einer Deckenvoute zeigt, dass die numerische Simulation mittels FDS Wirbelstrukturen im Nachlauf einer Längsventilation über eine Deckenvoute unzureichend abbildet.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt konnte mit den Ergebnissen der durchgeführten Versuche gezeigt werden, dass eine Untersuchung strömungsmechanischer Vorgänge im verkleinerten Maßstab sinnvoll möglich ist. So entsprachen beispielsweise die ermittelten Rauchausbreitungsgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung des Maßstabs und den zugrundeliegenden Brandlasten weitgehend den Werten, wie sie aus der Literatur zu erwarten waren. Die verwendete PIV-Messtechnik eröffnet jedoch durch flächige, quantitative Untersuchungsmethodik bisher nicht vorhandene Möglichkeiten zur Untersuchung und Auslegung von Lüftungssystemen insbesondere bei vom Regelwerk abweichenden Fällen.

Literatur

- [1] VAUQUELIN, O., MEGRET, O.: Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel. *Fire Safety Journal*, Vol. 37, pp. 525-533, 2002
- [2] VAUQUELIN, O., TELLE, D.: Definition and experimental evaluation of the smoke "confinement velocity" in tunnel fires. *Fire Safety Journal*, Vol. 40, pp. 320-330, 2005
- [3] VAUQUELIN, O., WU, Y.: Influence of tunnel width on longitudinal smoke control. *Fire Safety Journal*, Vol. 41, pp. 420-426, 2006
- [4] VAUQUELIN, O.: Experimental simulations of fire-induced smoke control in tunnels using an air-helium reduced scale model: Principle, limitations, results and future. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, pp. 171-178, 2008

Brandkurve nach ZTV-ING - ausreichend für extreme Brände?

Dr. Jörg Schmidt

Prof. Dr. Frank Dehn

MFPA für das Bauwesen Leipzig GmbH, Leipzig

1 Einleitung

Die in den vergangenen Jahren ausgewerteten Tunnelbrandereignisse (z.B. Mont Blanc Tunnel, Gotthardtunnel aber auch Tunnel Königshainer Berge) zeigen deutlich, dass die Tunnelkonstruktionen einer erheblichen Temperaturbeanspruchung ausgesetzt sind. Tunnelbrände unterscheiden sich von Bränden des allgemeinen Hochbaus durch einen sehr schnellen Temperaturanstieg und sehr hohe Temperaturen.

In zwei Forschungsvorhaben der BAST (FE 86.0093/2012 - Simulation von Großbränden in Straßentunneln sowie FE 86.0096/2014 - Untersuchungen zum Brandüberschlag in Straßentunneln) wurde untersucht, ob bei bestimmten Szenarien das in der Tunnelbemessung übliche Temperatur-Zeit-Szenario (ZTV-ING-Kurve bzw. verlängerte ZTV-ING-Kurve) so signifikant überschritten wird, dass ein Tragfähigkeitsproblem entstehen könnte. Ein solches Brandereignis ist z.B. ein mit 28 t Benzin beladener Tanklastzug, der im Tunnel in Brand gerät und dessen brennende Ladung austritt und sich im Tunnel entsprechend dessen Gefällesituation ausbreitet (sog. Flüssigkeitslachenbrände). Bei diesem Szenario ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass es zu einem Brandüberschlag auf weitere im Tunnel befindliche Fahrzeuge kommen kann.

Die Vorüberlegungen führten zu folgendem Szenario: Der Flüssigkeitsaustritt wird durch einen Unfall eines Tanklastzugs (in Bild 1 hellblau dargestellt) mit einem mit 750 Holzpaletten (Europoolpaletten) beladenen LKW (in Bild 1 türkis dargestellt) verursacht (Auffahrunfall). Aus dem Unfall resultiert eine Stausituation. Weitere Fahrzeuge, sogenannte Standard-LKW (in Bild 1 dunkelblau dargestellt) und Standard-PKW (in Bild 1 gelb dargestellt) befinden sich entsprechend der Verkehrsführung ebenfalls im Tunnel. Da jedes 7. Fahrzeug ein „Standard-LKW“ ist, ergibt sich die in Bild 1 dargestellte Situation.

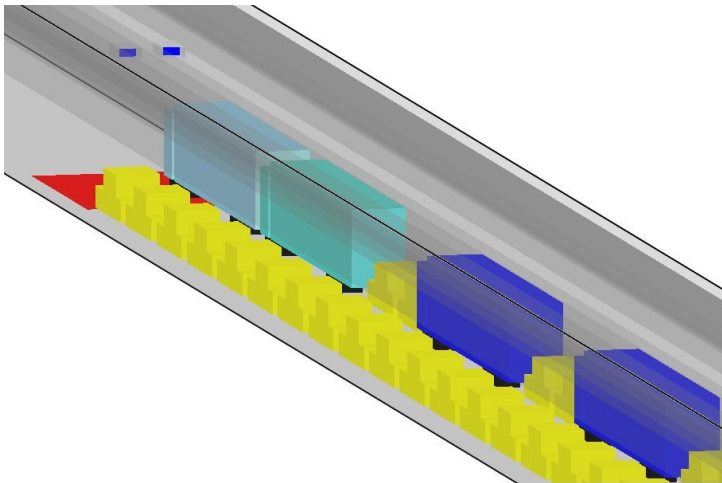


Bild 1: Verkehrsszenario am „Unfallort“ bei Richtungsverkehr

2 Untersuchungsparameter und -modelle

Für die Bestimmung der Temperatur-Zeit-Kurven aus diesem Unfallszenario wurden der zeitliche Verlauf der Energiefreisetzungsrates (HRR- Heat Release Rate), der Flüssigkeitslachegeometrie und des Durchwärmungsverhaltens der Betontunnelschale bestimmt. Im Rahmen der Forschungsvorhaben wurde ein Tunnel (Regelquerschnitt RQ 10,5) mit einer Gesamtlänge von 1200 m und insgesamt 10 Strahlventilatoren, jeweils paarweise im Abstand von 240 m mittig beginnend angeordnet, berücksichtigt (in Bild 1 in der linken oberen Bereich blau dargestellt).

Bei den Untersuchungen wurde der Einfluss der

- Querschnittsgeometrie (Rechteck- bzw. Gewölbequerschnitt; Bezeichnung: „Recht“ bzw. „Gew“),
- Tunneltopologie (konstante Neigung bzw. muldenförmiges Straßenlängsprofil; Bezeichnung: „Neig“ bzw. „Mulde“),
- Freisetzungsrates der Flüssigkeit (300 kg/s bzw. 20,6 kg/s; Bezeichnung: „300“ bzw. „20,6“) und
- Verkehrssituation (Richtungs- bzw. Gegenverkehr; Bezeichnung: „RV“ bzw. „GV“)

herausgearbeitet.

Zur Beschreibung eines Flüssigkeitslachenbrands wurde eine mehrstufige Modellierung gewählt. Im ersten Schritt wurde die Geometrie der brennenden Lache zeitpunktabhängig durch Lösung der Massengleichgewichtsbedingung

$$M_{Ausström} = M_{Brand} + M_{Abfluss} + M_{Lache} \quad (1)$$

iterativ mittels eines Newton-Raphson-Verfahrens bestimmt. Auf Basis der ermittelten zeitabhängigen Lachengeometrie wurden im zweiten Schritt CFD-Simulationen unter Verwendung von FDS durchgeführt. Die CFD-Simulation berücksichtigt auch die Einflüsse aus der Ventilation bzw. aus der Sauerstoffversorgung. Für die Berechnung des Durchwärmungsverhaltens des Betons wurde im 3. Schritt die Finite-Elemente-Methode (FEM) verwendet.

3 Berechnungsergebnisse

Ergebnisse des 1. und 2. Schritts sind auszugsweise in Tabelle 1 ausgewiesen und werden nachfolgend kurz erläutert. Die Branddauer der initialen Lache ist in guter Näherung unabhängig von der Gesamtbranddauer und wird maßgebend von der pro Zeiteinheit aus dem Tank austretenden Flüssigkeitsmenge und der, von der Lachengröße abhängigen, in die Tunnelentwässerung abfließenden Flüssigkeitsmenge beeinflusst (vgl. Tabelle 1). Die Gesamtbranddauer wird hingegen maßgeblich durch die Anzahl der im Tunnel befindlichen bzw. davon brennenden Fahrzeuge und die Sauerstoffventilation bestimmt. In allen untersuchten Szenarien kommt es zum Brandüberschlag auf den unmittelbar im Lachenbereich stehenden, mit Holzpaletten beladenen LKW. Sofern der Brandüberschlag zusätzlich auf weitere Fahrzeuge erfolgt, resultiert ein ventilationsgesteuerter Brand, infolgedessen sich die Branddauer verlängert.

Die in Tabelle 1 ausgewiesene Branddauer wird als Zeitpunkt definiert, an dem die Wärmefreisetzungsrate kleiner als 1% der Brandleistung gemäß RABT-Definition ist.

Die Ermittlung der Brandleistung gemäß RABT-Definition erfolgte nach der RABT, Abschnitt 4.3.2. Sie ist definiert als "die Leistung, die nur während einer kurzen Zeit von wenigen Minuten erreicht oder überschritten wird". In Tabelle 1 wird die Zeitangabe mit etwa 2 Minuten konkretisiert. Als weitere energetische Größe sind in Tabelle 1 Angaben zur freigesetzten Gesamtenergiemenge ausgewiesen.

Alle untersuchten Szenarien weisen sehr hohe Brandleistungen (Wärmefreisetzungsrate) von bis zu ca. 800 MW und sehr hohe Brandlasten auf.

Tabelle 1: Abgeschätzte Branddauern, repräsentative Werte für die absolute Menge und deren auf die austretende Flüssigkeit bezogenen relativen Anteil der abbrennenden und abfließenden Flüssigkeit, Anzahl brennender PKW und LKW im Fall B sowie Brandleistung nach RABT-Definition und freigesetzte Gesamtenergiemenge für die 16 untersuchten Szenarien für die Fälle A und B

Bezeichnung	Branddauer der Flüssigkeitslache sowie des Tunnelbrands in min	Abbrennende Flüssigkeitsmenge in kg und %	Abfließende Flüssigkeitsmenge in kg und %	Anzahl brennender PKW / LKW	Brandleistung nach RABT-Definition in MW	Gesamtenergiemenge in GJ
RechtNeigGV300	5 / ca. 85	3.900 / 14	24.100 / 86	133 / 19	480	2520
RechtNeigRV300	5 / >100	3.600 / 13	24.400 / 87	242 / 35	400	4310
RechtNeigGV20,6	23 / >100	9.800 / 35	18.200 / 65	65 / 11	530	1700
RechtNeigRV20,6	23 / ca. 65	9.000 / 32	19.000 / 68	3 / 1	440	690
RechtMuldeGV300	6 / >100	2.000 / 7	26.000 / 93	73 / 12	420	1610
RechtMuldeRV300	6 / ca. 65	2.000 / 8	26.000 / 92	9 / 2	350	500
RechtMuldeGV20,6	23 >100	7.300 / 26	20.700 / 74	72 / 11	500	1680
RechtMuldeRV20,6	23 / ca. 65	7.300 / 26	20.700 / 74	2 / 1	420	620
GewNeigGV300	5 / ca. 85	4.800 / 17	23.200 / 83	126 / 18	750	2430
GewNeigRV300	5 / >100	4.800 / 17	23.200 / 83	250 / 35	820	4360
GewNeigGV20,6	23 / >100	10.000 / 36	17.900 / 64	65 / 10	730	1670
GewNeigRV20,6	23 / ca. 65	9.000 / 32	19.000 / 68	3 / 1	430	690
GewMuldeGV300	6 / >100	2.500 / 9	25.500 / 91	70 / 12	440	1630
GewMuldeRV300	6 / ca. 65	3.100 / 11	24.900 / 89	9 / 1	450	460
GewMuldeGV20,6	23 / > 100	7.600 / 27	20.400 / 73	66 / 11	560	1710
GewMuldeRV20,6	23 / ca. 65	7.600 / 27	20.400 / 73	2 / 1	410	630

4 Temperaturbeanspruchung

Adiabate Temperaturen beinhalten sowohl den konvektiven Anteil als auch den Anteil der Strahlung und sind deshalb die idealen Eingangsgrößen für die Berechnung des Durchwärmungsverhaltens der Bauteile mittels numerischer Simulationen.

Signifikante Unterschiede sind zwischen den Szenarien mit ortsfester Lache (Austrittsmengen von 20,6 kg/s oder muldenförmiges Straßenlängsprofil) und den Tunneln mit konstanter Längsneigung und Austrittsgeschwindigkeiten von 300 kg/s festzustellen.

Während bei den Szenarien mit ortsfester Lache sehr große Temperaturen über der Lache und dem brennenden, mit Holzpaletten beladenen LKW und im Bereich der abziehenden Heißgase festzustellen sind, treten bei Tunneln mit konstanter Längsneigung und Austrittsgeschwindigkeiten von 300 kg/s nahezu über die gesamte Tunnellänge extrem hohe Maximaltemperaturen (vgl. Bild 2) auf. Signifikant unterscheiden sich jedoch die Temperaturen, welche bei bestimmten Zeitdauern überschritten werden. Es ist zu erkennen, dass durch den ventilationsgesteuerten Brandverlauf bei Bränden mit einer großen Anzahl brennender Fahrzeuge zwar über nahezu den gesamten Tunnel sehr hohe Temperaturen über einen längeren Zeitraum auftreten, diese aber tendenziell geringer sind als die örtlich auftretenden Temperaturen bei dem Brand der Benzinlache und des mit Holz-

paletten beladenen LKW, welcher durch eine begrenzte räumliche Ausbreitung charakterisiert ist. In Bild 2 sind rot die maximal auftretenden adiabaten Deckentemperaturen in Abhängigkeit vom Ort innerhalb des Tunnels aufgetragen. Schwarz dargestellt sind die an einem Tunnelabschnitt festgestellten mittleren adiabaten Deckentemperaturen, die bestimmte Zeitdauern vorherrschen bzw. überschritten werden.

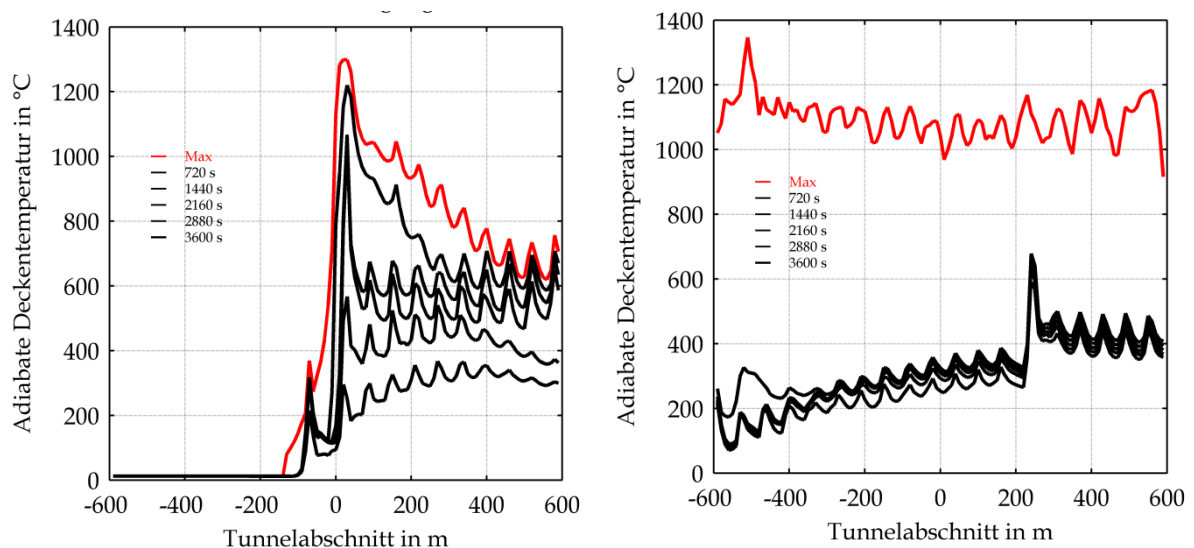


Bild 2 Adiabate Deckentemperaturen in Abhängigkeit von der Position im Tunnel und der Einwirkungsdauer am Beispiel des Tunnels mit konstanter Längsneigung, Rechteckquerschnitt und Gegenverkehr für die Austrittsgeschwindigkeit von 20,6 kg/s (links) und 300 kg/s (rechts)

Temperatur-Zeit-Verläufe charakterisieren einen Brand und die thermische Beanspruchung der Tragkonstruktion. An jedem Ort des Tunnels ist ein anderer Temperatur-Zeit-Verlauf festzustellen. Insofern muss ein repräsentativer, noch ausreichend auf der sicheren Seite liegender Verlauf bestimmt werden, der als Eingangsgröße für die Berechnung des Durchwärmungsverhaltens und damit als Eingangsparameter für die Heißbemessung dient. Für die Ermittlung des „repräsentativen“ Temperatur-Zeit-Verlaufs wurden folgende Kriterien verwendet:

- Maximum des Mittelwerts des Integrals der adiabaten Bauteiloberflächentemperatur über die Branddauer (Kriterium 1),
- Maximum der Zeitdauer, innerhalb der die über die Tunnelbreite gemittelte adiabate Bauteiloberflächentemperatur den kritischen Wert von 1200°C überschreitet (Kriterium 2),
- Maximum der Zeitdauer, innerhalb der das Integral der über die Tunnelbreite gemittelten adiabaten Bauteiloberflächentemperatur über die ausgewiesene Zeitdauer den Energieeintrag der ZTV-ING-Kurve bei gleicher Zeitdauer überschreitet (Kriterium 3).

Bei allen ermittelten Temperatur-Zeit-Kurven ist generell festzustellen, dass die Temperaturanstiege teilweise noch schneller erfolgen als bei dem ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Verlauf.

In Tabelle 2 sind jeweils der Maximalwert der adiabaten Bauteiltemperaturen von Wand und Decke bzw. Firste für den Flüssigkeitslachenbrand zusammenfassend ausgewiesen. Es ist festzustellen, dass die Maximalwerte der Bauteiloberflächentemperaturen z.T. deutlich höher sind als 1200°C. Weiterhin sind in Tabelle 2 die auf die Temperaturänderungsintegrale des ZTV-ING- und des verlängerten ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Verlaufs bezogenen Temperaturänderungsintegrale der ermittelten Temperatur-Zeit-Verläufe ausgewiesen. Aus allen untersuchten Szenarien resultieren kleinere Temperaturintegrale als aus dem ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Verlauf und damit auch generell kleinere als aus dem verlängerten ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Verlauf.

Tabelle 2: Maximalwerte der adiabaten Bauteiloberflächentemperatur, die auf den ZTV-ING- und den verlängerte ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Verlauf bezogenen Temperaturänderungsintegrale sowie Zeitpunkte für die 16 untersuchten Szenarien, bei denen die Bauteiltemperaturen in einer Tiefe von 1 cm bzw. 6 cm, gemessen von der brandbeanspruchten Oberfläche, infolge bewertetem Temperatur-Zeit-Verlauf und ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Verlauf gleich sind

Bezeichnung	Maximale adiabate Bauteiloberflächentemperatur in °C	Auf ZTV-ING-Kurve bezogenes Temperaturintegral in %	Auf verlängerte ZTV-ING-Kurve bezogenes Temperaturintegral in %	Zeitpunkt bei Temperaturgleichheit in 1 cm Tiefe in min	Zeitpunkt bei Temperaturgleichheit in 6 cm Tiefe in min
RechtNeigGV300	1300	53	39	ca. 27	ca. 43
RechtNeigRV300	1300	55	40	ca. 27	ca. 44
RechtNeigGV20,6	1350	52	38	ca. 25	ca. 54
RechtNeigRV20,6	1300	55	40	ca. 27	ca. 44
RechtMuldeGV300	1400	54	40	ca. 27	ca. 48
RechtMuldeRV300	1500	57	42	ca. 27	ca. 44
RechtMuldeGV20,6	1400	56	41	ca. 27	ca. 56
RechtMuldeRV20,6	1350	57	42	ca. 27	ca. 44
GewNeigGV300	1400	52	38	ca. 27	ca. 46
GewNeigRV300	1300	20	15	ca. 27	ca. 44
GewNeigGV20,6	1350	44	32	ca. 21	ca. 39
GewNeigRV20,6	1100	47	35	ca. 10	ca. 32
GewMuldeGV300	1400	53	39	ca. 27	ca. 45
GewMuldeRV300	1400	55	40	ca. 27	ca. 45
GewMuldeGV20,6	1400	51	37	ca. 14	ca. 37
GewMuldeRV20,6	1100	47	35	ca. 10	ca. 32

5 Durchwärmungsverhalten

Die ermittelten Temperatur-Zeit-Verläufe dienen als Eingangsgröße für die Berechnung des zeitabhängigen Durchwärmungsverhaltens. Die Berechnungen erfolgen mit Finite-Elemente-Modellen unter Verwendung einer geeigneten Diskretisierung. Die temperaturabhängigen Materialparameter sind gemäß DIN EN 1992-1-2 (2010) berücksichtigt.

Bild 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Bauteiltemperaturen in unterschiedlichen Abständen zur brandbeanspruchten Oberfläche im Vergleich zu den Bauteiltemperaturen infolge des ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Verlaufs.

Die FE-Berechnungen zeigen, dass infolge des größeren Temperaturanstiegs der untersuchten Großbrandszenarien eine schnellere Durchwärmung des Querschnitts in den ersten Minuten des Brands erfolgt. Aufgrund des Temperaturabfalls unter die 1200°C der ZTV-ING-Kurve wenige Minuten nach Brandbeginn sind jedoch keine dauerhaft höheren Temperaturen innerhalb des Betonquerschnitts zu beobachten. In Tabelle 2 sind die Zeitpunkte ausgewiesen, bei denen die Bauteiltemperaturen in 1 cm (oberflächennah) bzw. 6 cm (Lage der Bewehrung) Abstand zur brandbeanspruchten Oberfläche infolge der ermittelten Temperatur-Zeit-Verläufe für die untersuchten Brandszenarien und des ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Verlaufs gleich sind.

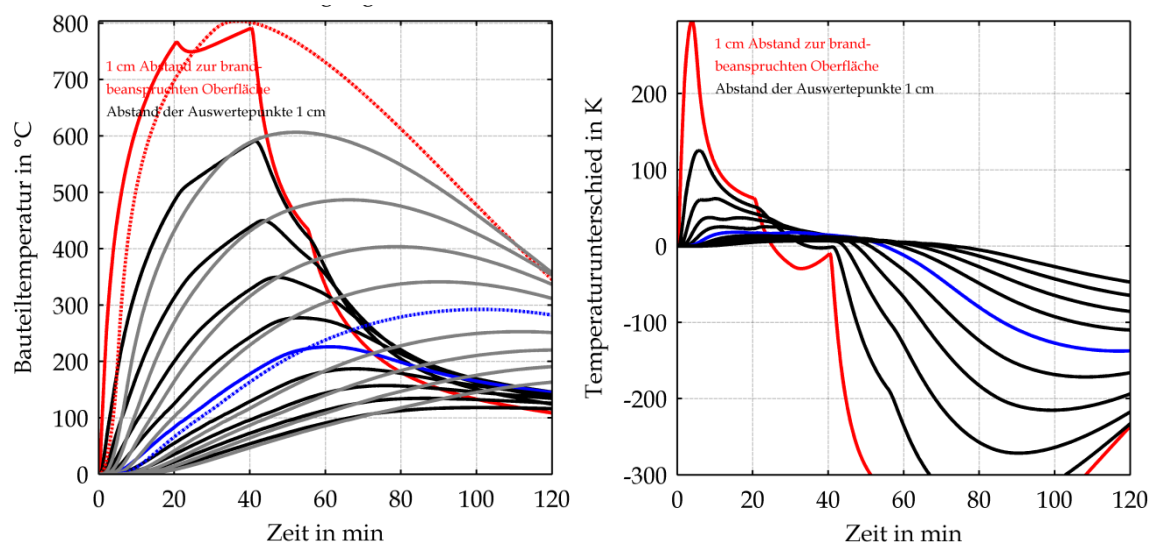


Bild 3 Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen in unterschiedlichen Abständen zur brandbeanspruchten Oberfläche (oben) infolge bewertetem Temperatur-Zeit-Verlauf (schwarz) und ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Verlauf (grau) sowie der zeitliche Verlauf der Differenz der Bauteiltemperaturen (unten) am Beispiel des Tunnels mit konstanter Längsneigung, Rechteckquerschnitt und Gegenverkehr für die Austrittsgeschwindigkeit von $20,6 \text{ kg/s}$ im Fall B

Obwohl die maximalen Gastemperaturen größer als 1200°C sein können und auch die Temperaturanstiege steiler sind als beim ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Verlauf, sind die maximalen Temperaturen im Bereich der Bewehrung nicht größer.

6 Bewertung und Zusammenfassung

Die Auswertung von Tunnelunfällen in den vergangenen 40 Jahren hat gezeigt, dass Brände in Tunneln zwar sehr selten sind, bei ihrem Auftreten aber folgenschwer sein können. Um die Auswirkungen eines initialen Lachenbrands infolge aus einem Tanklast-

fahrzeug austretenden Benzins und die damit einhergehende Gefahr des Brandüberschlags auf andere im Tunnel befindliche Fahrzeuge abschätzen zu können, wurden verschiedene Szenarien mit verschiedenen Brandüberschlagsmöglichkeiten definiert. Für diese Szenarien/Fälle wurde analysiert, welche Folgen diese Brände haben.

Die Modelle basieren auf den Erkenntnissen aus experimentellen Untersuchungen, welche teilweise auch im Rahmen von in BAST-Forschungsvorhaben durchgeführten originalmaßstäblichen Großbrandversuchen erworben wurden.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass der Austritt brennbarer Flüssigkeiten nicht nur ein erhebliches Gefahrenpotential, v.a. für die Tunnelnutzer, in sich birgt, sondern auch einen Brandüberschlag auf eine sehr große Anzahl weiterer im Tunnel befindlicher Fahrzeuge zur Folge haben kann.

Obwohl die maximalen Gastemperaturen größer als 1200 °C sein können, sind die Auswirkungen auf die Tragstruktur der hier untersuchten Fälle nicht größer als infolge eines Brands, dessen Temperatur-Zeit-Verlauf der ZTV-ING entspricht. Es sei aber angemerkt, dass aus den Szenarien unter noch ungünstigeren Bedingungen (z.B. im Falle eingeschränkt funktionsfähiger Schlitzrinnen) Auswirkungen entstehen könnten, die nur durch den verlängerten ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Verlauf abgedeckt werden, denn die Beanspruchung für das Bauwerk ist bei Szenarien mit lang andauerndem Brand am größten.

Auch das Abplatzverhalten des Betons wird nach bisherigen Erfahrungen, auch wenn die experimentelle Bestätigung noch aussteht, nicht signifikant stärker sein als bei dem ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Verlauf. Aufgrund der gewählten Randbedingungen sind die Ergebnisse auf Tunnel mit ähnlichem Querschnitt direkt übertragbar, jedoch nicht ohne weiteres auf Tunnel mit signifikant anderen Querschnitten. Gerade bei größeren Tunnelquerschnitten könnte die bessere Sauerstoffversorgung höhere Energiefreisetzungsraten, geringere Strömungsgeschwindigkeiten und höhere Temperaturen bedingen.

Verbesserung des konstruktiven Brandschutzes durch den Einsatz von PP-Faserbeton

Daniel Eickmeier

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach

1 Wirkungsweise von PP-Fasern im Beton

Um die explosionsartigen Betonabplatzungen infolge einer Brandeinwirkung zu reduzieren werden dem Beton PP-Fasern zugegeben. Die PP-Fasern verhalten sich im Beton chemisch neutral und werden weder von Säure noch von Lösungsmittel angegriffen und sind alkaliresistent. Sie schmelzen bei etwa 170°C und werden thermisch zersetzt bei etwa 330°C bis 420°C.

In den üblichen Dosierungen haben die PP-Fasern keinen Einfluss auf die Eigenschaften des Festbetons. Die Verarbeitbarkeit des Frischbetons wird jedoch maßgeblich durch die Zugabe von PP-Fasern beeinflusst. Die große Anzahl von Einzelfasern bei den gebräuchlichen Geometrien und Dosierungen führt zu einem deutlich erhöhten Wasser- bzw. Fließmittelbedarf.

Die Brandschutzwirkung des Betons mit PP-Fasern wird im Wesentlichen durch die Erhöhung der Gaspermeabilität des Betons geschaffen. Schon bei Temperaturen unter 100°C nimmt die Permeabilität infolge der feinporösen Kontaktzone zwischen Faser und Beton zu. Zwischen 200°C und 300°C bestimmen die Hohlräume der geschmolzenen PP-Fasern die Gaspermeabilität des Betons[1, 2]. Experimentell wurde von Kalifa [1] nachgewiesen, dass die bei 170°C zu einem Tropfen schmelzenden Fasern bei etwa 180°C von dem umgebenden Zementstein absorbiert werden. Bei einer Temperatur von etwa 400°C entstehen fein verteilte Mikrorisse in der Mörtelmatrix des PP-Faserbetons die die Gaspermeabilität weiter steigern.

Um ein durchgängig vernetztes System aus Faserhohlräumen, Kontaktzonen um Gesteinskörnern und Hohlräumen infolge von Mikrorissen zu schaffen ist eine ausreichende Länge und Dosierung der PP-Fasern von Nöten[1, 2].

2 Validierung und Verifizierung des Einfluss von PP-Fasern auf den konstruktiven Brandschutz von Tunnelbetonen

Um den Einfluss von PP-Fasern in Tunnelbetonen nach den geltenden Regelwerken für Bundesfernstraßen auf das Brand- und Abplatzverhalten zu verifizieren und zu validieren wurde von der BAST ein Forschungsvorhaben an die MFPA Leipzig vergeben [4]. Hierbei wurde auf Basis einer BAST-internen Grundlagenstudie [3] untersucht, welche PP-Fasergehalte und –geometrien in den Tunnelbetonen zu applizieren sind um ein explosionsartiges Abplatzen des Betons zu verhindern. Zudem galt es herauszufinden ob und wenn ja welchen Einfluss die für die offene Bauweise geforderte verzinkte Mattenbewehrung (N94) auf das Brand- und Abplatzverhalten hat.

Um die brandschutztechnische Wirksamkeit von PP-Faserbeton nachzuweisen werden in der Regel Brandversuche durchgeführt. In diesen Versuchen werden im Allgemeinen Probekörper in einem Brandofen nach einer festgelegten Temperatur-Zeit-Beanspruchung beflammt und hinsichtlich festgelegter Bewertungskriterien untersucht.

Im Rahmen des Vorhabens wurden vom Forschungsnehmer Brandversuche durchgeführt, die die speziellen Randbedingungen der Tunnelbetone nach ZTV-ING [6] (siehe Tabelle 1) berücksichtigen. Um die brandschutztechnischen Eigenschaften der PP-Fasern beurteilen zu können, wurden Betone nach ZTV-ING mit und ohne PP-Fasern untersucht. Zudem wurde hinsichtlich der Belastung der großmaßstäblichen Probekörper variiert. Die Untersuchungen erfolgten an für die offene Bauweise und für die geschlossene Bauweise repräsentativen Probekörpern.

Tabelle 1: Grenzwerte der Betonzusammensetzung für die maßgebende Expositionsklasse XF2 nach ZTV-ING

	Geschlossene Bauweise	Offene Bauweise
Max. w/z-Wert	0,50	0,50
Mindestdruckfestigkeitsklasse	C30/37	C30/37
Mindestzementgehalt [kg/m ³]	320	320
Mindestzementgehalt bei der Anrechnung von Betonzusatzstoffen [kg/m ³]	270	Keine Anrechnung zulässig

Als Bewertungskriterium für die Brandversuche wurden die zulässigen durchschnittlichen und maximalen Abplatztiefen begrenzt und die Einhaltung der maximalen Temperatur der tragenden Bewehrung von 300°C gemäß ZTV-ING kontrolliert.

Für die geschlossene als auch für die offene Bauweise konnte anhand der Brandversuche dargelegt werden, dass eine Zugabe von $2,0 \text{ kg/m}^3$ der verwendeten PP-Faser, mit einem Durchmesser von $0,018 \text{ mm}$ und einer Länge von 6 mm , zu einer deutlichen Verbesserung des Brand- und Abplatzverhaltens führt.

Es konnte nachgewiesen werden, dass durch die Verwendung der beschriebenen PP-Fasern im Tunnelbeton die in der ZTV-ING dargelegte Forderung der Begrenzung der maximalen Temperatureinwirkung auf die tragende Bewehrung von $<300^\circ\text{C}$ erreicht werden kann.

Für die offene Bauweise wurden Brandversuche skalierten Rahmenecken durchgeführt, die aufgezeigt haben, dass die verzinkte N94-Mattenbewehrung im Brandfall kein großflächiges Betonabplatzen verhindern kann.

In einer betontechnologischen Machbarkeitsstudie wurde zusätzlich untersucht und festgestellt, dass ein Beton der Konsistenzklasse F4 (sehr weich) nach DIN 1045-2, wie er für die geschlossene Bauweise zur Sicherstellung der Pumpbarkeit und Verdichtbarkeit durch Außenrüttler oftmals benötigt wird, trotz des durch die PP-Fasern gesteigerten Wasser- und Fließmittelanspruchs, zielsicher hergestellt werden kann. Jedoch wurde auch festgestellt, dass diese Betone sehr sensibel gegenüber Veränderungen in den Dosierungen der Ausgangsstoffe reagieren

3 Pilotprojekt offene Bauweise - Tunnel Bautzen

3.1 Randbedingungen

Im Zuge des Neubaus der B 96 bei Bautzen (Sachsen) wurde im Bereich der Querung mit der B 6 die Errichtung eines Tunnelbauwerks notwendig. Dem 200 m langen eigentlichen Tunnelbauwerk schließen sich an beiden Portalen jeweils 100 m lange Stahlbetontrogbauwerke an. Das in offener Bauweise erstellte Bauwerk weist einen offenen Rechteckrahmen mit einer lichten Weite von $9,50 \text{ m}$ auf. Die Stärke der Wände beträgt 80 cm . Die Rahmenriegel besitzen eine Dicke von 60 cm . Die Ecken der Rahmen sind dabei gevoutet. Die Länge der einzelnen Blöcke beträgt 10 m .

3.2 Herstellung PP-Faserbeton

Um die Ergebnisse des vorangegangenen Forschungsvorhabens validieren zu können wurde in der Ausschreibung des Projekts der Bauwerksentwurf bezüglich der betontechnischen

nologischen Belange ergänzt. Zudem wurde das Projekt von Bauherrenseite durch einen zusätzlichen Gutachter begleitet.

Es galt unter Einhaltung der betontechnologischen Vorgaben der ZTV-ING, die insbesondere den maximalen w/z-Wert von 0,5 umfassen, die PP-Fasern mit einem Durchmesser von 0,016 – 0,020 mm und einer Länge von 6 mm in einer Zugabemenge von 2,0 kg/m³ einzubauen.

Zur Berücksichtigung einer ausreichenden Dosierung wurde in der Ausschreibung festgelegt, dass die Wiederfindungsrate mit Auswaschversuchen gemäß der Richtlinie der ÖBV [5] unter Beachtung restriktiverer Grenzwerte als in der Richtlinie gefordert, ermittelt werden soll.

Gemäß der ZTV-ING T. 3 Abs. 1 sind die Einfahrtsbereiche von Tunneln den Expositionsklassen XF2 und XD2 zuzuordnen. Da der Tunnel Bautzen lediglich 200 m lang ist wurden diese Zuordnungen für den gesamten Tunnel angesetzt.

Wie bereits beschrieben verändern sich bei der Zugabe von PP-Fasern zum Beton die rheologischen Eigenschaften wie Viskosität bzw. Fließfähigkeit. Des Weiteren erhöht sich für den Beton die Gefahr des Blutens.

Der nach DIN EN 12350-5 geforderte Zielwert der Konsistenz war beim Tunnel Bautzen 480 +/- 20 mm. Dies galt es unter Beachtung des festgelegten maximalen w/z-Wertes von 0,5 durch Wahl eines Fließmittels auf Basis modifizierter Acrylate zu erreichen. Um eine homogene Verteilung der PP-Fasern im Beton sicher zu stellen wurde die Mischzeit im Vergleich zu Normalbeton verlängert. Die Trockenmischzeit betrug 30 s, die anschließende Nassmischzeit 60 s. Die zur Anwendung gekommene Zusammensetzung des Betons für den Tunnel Bautzen kann der Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Betonzusammensetzung Tunnel Bautzen

Druckfestigkeitsklasse	C35/45
CEM III/A 42,5 N	350 kg/m ³
Kalksteinmehl	50 kg/m ³
w/z-Wert	0,49
Fließmittel	Auf Basis modifizierter Acrylate
Gesteinskörnung	Sieblinie AB 16, Rundkorn, quarzitisch
Polypropylenfasern (l = 6 mm; d = 0,018 mm)	2,0 kg/m ³

Um die Praxistauglichkeit des entwickelten PP-Faserbetons zu testen wurde im Bauvertrag bereits festgesetzt, dass Probestructuren durchgeführt werden sollten. Es wurden zwei Probestructuren betoniert, die mit der tatsächlichen Bewehrung und der zukünftigen Betriebstechnik entsprechenden Einbaukörpern versehen waren. Die Abmessungen der Wände waren 3,5 m x 3,0 m x 0,8 m.

Um möglichst realitätsgetreu die Betonage durchzuführen, wurde der Beton von dem später zum Einsatz kommenden Transportbetonwerk geliefert, in die Schalung gepumpt und mit Innenrüttlern verdichtet, wie es auch während der Erstellung des Tunnels gemacht wurde. Zudem wurden die Arbeiten ebenfalls von dem späteren Baustellenpersonal durchgeführt. Die während der Probestructuren gesammelten Erfahrungen im Umgang mit PP-Faserbeton wurden in dem Qualitätssicherungsplan niedergeschrieben. Die während der Tunnelbetonage durchgeführten qualitätssichernden Maßnahmen und zugehörigen Betonkenngrößen sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Prüfumfang und Kenngrößen

Kennwert	Prüfumfang auf der Baustelle	Zielwert	Toleranz
Konsistenz nach DIN EN 12350-5	Jedes Lieferfahrzeug	480 mm	Einzelwert: ±20 mm
Fasergehalt nach ÖBV-Richtlinie „Erhöhter Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“	Bei den ersten 10 Betoniertagen: Einmal je Betoniertag Ab dem 10. Betoniertag: Jeder 3. Betoniertag	2,04 kg/m ³	Kleinster Einzelwert: 1,84 kg/m ³ Kleinster Mittelwert: 1,94 kg/m ³
Betontemperatur	Jedes Lieferfahrzeug	≥ 8°C ≤ 25°C	
Frischbetonrohddichte nach DIN EN 12350-6	Bei Prüfkörperherstellung		
28-d-Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3	3 Prüfkörper je Betoniertag	C35/45	Nach DIN 1045-3
Festbetonrohddichte DIN EN 12390-7	Bei Druckfestigkeitsprüfung		

3.3 Folgerungen (Regelwerk)

Die gemäß des Qualitätssicherungsplans abzuleistenden Prüfungen konnten während der Bauzeit durchweg zufriedenstellend durchgeführt werden, so dass als Folgerung ein Hinweisblatt zur ZTV-ING erstellt wurde, in dem der PP-Faserbeton für jedes Tunnelneu-

bauprojekt auf Bundesfernstraßen verbindlich eingesetzt werden soll um den konstruktiven Brandschutz zu verbessern.

Der im Hinweisblatt festgesetzte Umfang der PP-Faserzugabemenge und die Geometrie der zu verwendenden PP-Faser entspricht der aus dem Forschungsvorhaben und dem Pilotprojekt Tunnel Bautzen.

Weiterhin wurde allerdings eine Möglichkeit zur Abweichung hiervon geschaffen, indem durch Brandversuche eine gleichwertige Brandschutzwirkung des PP-Faserbetons mit geändertem Umfang oder anderer Geometrie der PP-Fasern dargelegt werden kann.

Im Hinweisblatt zur ZTV-ING wurde zudem die Notwendigkeit einer verzinkten Mattenbewehrung im Deckenbereich bei der offenen Bauweise aufgehoben.

4 Pilotprojekt geschlossene Bauweise – Bühlertunnel Siegen

4.1 Randbedingungen

Im Rahmen des Neubaus der B54/62n ist in Siegen der Bühlertunnel aufgefahren worden. Beim Bühlertunnel handelt es sich um einen einröhrigen Gegenverkehrstunnel mit einem Straßenquerschnitt von RQ 10,5t und einer Gesamtlänge von 525 m. 417 m des Tunnels wurden hierbei in bergmännischer Bauweise, 57 m in Deckelbauweise und 51 m in offener Bauweise hergestellt. Aufgrund der Anforderungen der RABT ist ein Notausgang erforderlich, der etwa in der Mitte des Tunnels angeordnet wird und durch einen Stollen von etwa 150 m Länge an die Geländeoberfläche führt.

Der Tunnel wurde in der Spritzbetonbauweise mit einem Kalottenvortrieb und nachfolgendem Strossen-/Sohlvortrieb aufgefahren und mit einer Regenschirmabdichtung versehen.

4.2 Herstellung PP-Faserbeton

Um die Ergebnisse aus dem experimentellen Forschungsvorhaben auch für die geschlossene Bauweise zu validieren wurden in der Ausschreibung des Bühlertunnels ebenfalls die PP-Fasern mit der bekannten Geometrie (Durchmesser 0,016 – 0,020 mm; Länge 6 mm) und Zugabemenge (2,0 kg/m³) niedergelegt. Wie jedoch in dem Hinweisblatt zur ZTV-ING zwischenzeitlich festgesetzt, wurde die Möglichkeit eingeräumt durch Brandversuche eine Gleichwertigkeit der brandschutztechnischen Wirkung von Fasern mit anderer Geometrie und/oder einer anderen Zugabemenge darzulegen.

Von dieser Möglichkeit der Abweichung machte der Auftragnehmer Gebrauch und wählte eine Faser mit einem Durchmesser von 0,0154 mm und einer Länge von 6 mm in einer geringeren Dosierung als in der Ausschreibung angegeben. Somit wurden Brandversuche zur Sicherstellung des gleichwertigen Brandschutzverhaltens des PP-Faserbetons notwendig.

Die Brandversuche wurden aufgrund von vorliegenden Erfahrungen des Gutachters an belasteten mittelskaligen Probekörpern der Größe 850 x 700 x 300 mm³ durchgeführt. Der zum Einsatz vorgesehene Betonmischung wurden für diese Brandversuche 1,2 kg/m³ der PP-Fasern mit einem Durchmesser von 0,0154 mm zugemischt. Diese Brandversuche konnten aufgrund der Nicht-Einhaltung des in der ZTV-ING hinterlegten 300°C-Kriteriums jedoch keine Gleichwertigkeit des Brand- und Abplatzverhaltens darlegen. Daher wurde der PP-Fasergehalt auf 1,4 kg/m³ angepasst und die Betonmischung entsprechend an den erhöhten Fließmittelbedarf ausgelegt. Mit diesem Fasergehalt und der angepassten Betonmischung konnten die brandschutztechnischen Anforderungen erfüllt werden. Die gewählte Betonmischung ist Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Betonzusammensetzung Bühlertunnel Siegen

Druckfestigkeitsklasse	C30/37
CEM II/A.LL 42,5 N	350 kg/m ³
Flugasche	130 kg/m ³
w/z-Wert	0,49
Fließmittel	Auf Basis Polycarboxylateter (PCE)
Gesteinskörnung	Sieblinie AB 16
Polypropylenfasern (l = 6 mm; d = 0,0154 mm)	1,4 kg/m ³

Wie auch beim Tunnel Bautzen wurde zur Sicherstellung der Verarbeitbarkeit vor der Tunnelbetonage eine Betonage einer Probewand durchgeführt. Hierbei wurde eine 4,00 x 2,20 x 1,10 m³ große Wand betoniert. Der Beton wurde hierbei wie beim späteren Schalwagen drückend über seitlich in der Schalung liegende Betonstützen eingebracht.

Bei der Betonage der Probewände konnten wichtige Erkenntnisse über die Beeinflussung der Konsistenz durch das Pumpen des Betons gewonnen werden und die systematische Einstellung der Frischbetonkonsistenz so untersucht werden.

Durch Entnahme von Bohrkernen an der betonierten Probewand konnte durch Bestimmung der Wiederfindungsraten der PP-Fasern eine gleichmäßige Verteilung dieser im Beton nachgewiesen werden.

4.3 Folgerungen

Die Begleitung der Entwicklung und Anwendung des PP-Faserbetons für den Bühlertunnel hat gezeigt, dass auch für die benötigten sehr fließfähigen Konsistenzen eine ausreichende Robustheit erreicht werden kann. Die Anforderungen gemäß der ZTV-ING konnten eingehalten werden. Jedoch bedarf der PP-Faserbeton einer umfangreicheren Qualitätssicherung als ein Normalbeton.

5 Überführung in das Regelwerk

Um die für die Ausführung eines PP-Faserbetons bei einem Tunnelneubau auf Bundesfernstraßen relevanten Anforderungen bauvertraglich abzusichern wurde der Anhang B zur ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 1 entwickelt.

Es werden Anforderungen an die PP-Fasern formuliert. Insbesondere ist zur Verwendung eine bauaufsichtliche Zulassung des DIBt von Nöten. Zudem finden sich die in dem Forschungsvorhaben entwickelten und in der Ausschreibung zu den Pilotprojekten angesetzten Anforderungen an die Geometrie (Durchmesser 0,016 - 0,020 mm; Länge 6 mm) und die Dosierung (2 kg/m³) im Anhang B wieder. Die Möglichkeit zur Abweichung der Geometrie oder Dosierung bleibt durch Brandversuche an großskaligen belasteten Probekörpern jedoch weiterhin bestehen. Die Mindestabmessungen der Probekörper und der Aufbau der Brandöfen sind nun ebenfalls definiert im Anhang B vorzufinden. Die Brandversuche müssen zudem durch einen externen Gutachter bewertet werden.

Es werden feste Intervalle festgelegt um die Konformität des tatsächlichen PP-Fasergehalt im Frischbeton nachzuweisen. Im Transportbetonwerk ist hierbei alle 200 m³ oder zwei Mal pro Produktionswoche der entsprechende Nachweis durchzuführen. Auf der Baustelle erfolgt der Nachweis alle 300 m³ oder alle drei Betoniertage .

Weiterhin sind Anforderungen an den aufzustellenden Qualitätssicherungsplan dargelegt. So ist - wie in den Pilotprojekten - eine Betonage einer Probewand vor dem Start der Tunnelbetonage auszuführen. Die Mindestmaße der Probewand betragen 4,50 x 3,00 x 0,35 m³.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der durchgeführten Forschungsvorhaben, der ausgeführten Pilotprojekte für die offene und geschlossene Bauweise und der Überführung der Erkenntnisse in bauvertraglich bindende Regelungen ist die Verwendung von PP-Faserbeton zum konstruktiven Brandschutz von Tunneln im Verlaufe von Bundesfernstraßen zum Standard für die Ausführung von Tunnelneubauten geworden.

Weitere noch offene Fragestellungen stellen sich insbesondere bezüglich der Dauerhaftigkeit des PP-Faserbetons sowie bezüglich der Möglichkeiten zur Instandsetzung der Tunnelinnenschale aus PP-Faserbeton nach einem Brandfall. Diese Fragestellungen finden in einem aktuellen Forschungsvorhaben der BAST Beachtung.

Quellenverzeichnis

- [1] Kalifa, P.; Chene, G. und Galle, C. (2001). High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres. In: Cement and concrete research, Vol. 31, Number 10, pp. 1487-1499.
- [2] Kusterle, W. and Lindlbauer, W. (2004). Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton. Schriftenreihe Straßenforschung. Heft 544. Bundesministerium für Verkehr, Innovation, und Technologie, Vienna.
- [3] Kaundinya, I. und Tauscher, F. (2008). Kunststofffaserbeton zur Verbesserung des baulichen Brandschutzes von Straßentunneln. Schlussbericht zum BAST-Forschungsprojekt F1100.2306002 (unveröffentlicht).
- [4] Dehn, F.; Nause, P.; Juknat, M.; Orgass, M. und König, A. (2010). Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln. Schriftenreihe der BAST. Heft B73. Wirtschaftsverlag NW GmbH, Bremerhaven.
- [5] Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV) (2013). Gründruck Richtlinie Erhöhter baulicher Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke. ÖBV, Wien.
- [6] Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) (2015). Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING). In: <http://www.bast.de/DE/FB-B/Publikationen/Regelwerke/Baudurchfuehrung/EC-ZTV-ING-Teil-1-10-Baudurchfuehrung.html?nn=613324>, zuletzt abgerufen am 22.04.15

Tunnelbemessung für Extremereignisse

Dr. Ingo Müllers

Schüler-Plan Ingenieurgesellschaft mbH, Düsseldorf

Tunnelbauwerke sind wichtige Elemente unserer Straßeninfrastruktur deren Ausfall oder eingeschränkte Nutzung regionale oder sogar überregionale Konsequenzen hat. Daher werden viele Tunnelbauwerke der kritischen Infrastruktur zugeordnet und sind somit besonders vor einen Ausfall zu schützen.

Zwei der möglichen Gefährdungsszenarien für Tunnel sind ein Brand oder eine Explosion im Tunnel. Während die Standsicherheit bei Tunnelbränden bereits laut Norm nachgewiesen werden muss, ist der Nachweis eines Tunnels für Explosionsszenarien eine freiwillige Entscheidung des Bauherrn.

Der Vortrag erläutert die beiden gängigen Verfahren der sogenannten Heißbemessung von Tunneln in offener Bauweise: das vereinfachte Verfahren nach ZTV-ING Teil 5 (vgl. Bild 1) und das allgemeine Verfahren nach Eurocode (vgl. Bild 2). Darüber hinaus werden Anwendungsbeispiele der Verfahren aus der Praxis erläutert und die Konsequenzen beider Verfahren für das Tragwerk miteinander verglichen (vgl. Tabelle 1). Hierbei kann gezeigt werden, dass die Anwendung des allgemeinen Verfahrens in der Regel zu einen wirtschaftlicheren Tragwerk führt.

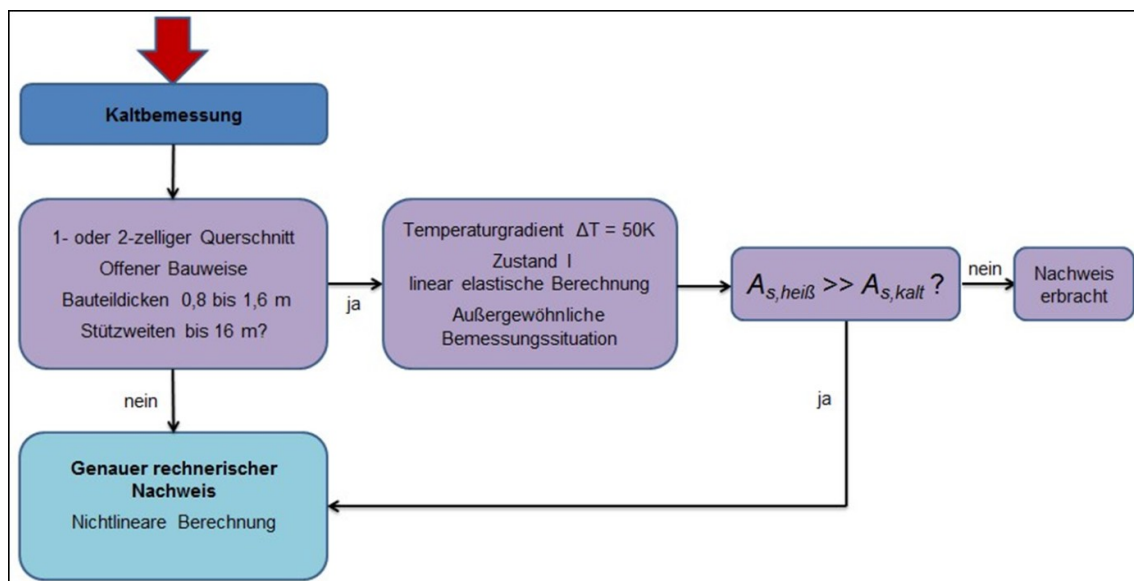


Bild 1: Berechnungsablauf für das vereinfachte Rechenverfahren im Brandfall nach ZTV-ING Teil 5

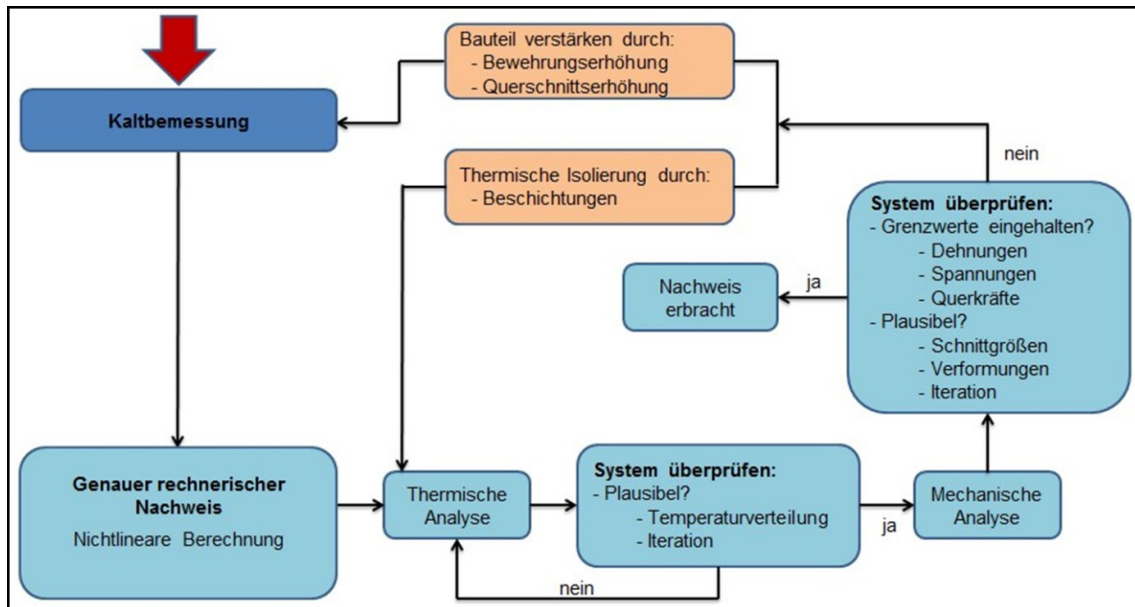


Bild 2: Berechnungsablauf für das Allgemeine Berechnungsverfahren nach Eurocode

Tabelle 1: Vergleich der erforderlichen Bewehrungsmengen für einen Tunnel in offener Bauweise bei zwei unterschiedlichen Methoden zur Heißbemessung

Querschnittsbereich	Dicke	Länge	Kaltbemessung			Vereinfachte Heißbemessung			Genauere Heißbemessung		
			$a_{s,innen}$	$a_{s,außen}$	ρ	$a_{s,innen}$	$a_{s,außen}$	ρ	$a_{s,innen}$	$a_{s,außen}$	ρ
			[cm ² /m]	[cm ² /m]	[kg/m ³]	[cm ² /m]	[cm ² /m]	[kg/m ³]	[cm ² /m]	[cm ² /m]	[kg/m ³]
Deckenfeldbereich	120	4,2	73,4	13,4	85	73,4	20,7	92	73,4	13,4	85
Deckenstützbereich	120	3,0	73,4	31,4	103	73,4	49,2	120	73,4	31,4	103
Wandstützbereich oben	80	2,0	13,4	31,4	44	13,4	49,2	61	13,4	31,4	44
Wandfeldbereich	80	3,25	25,2	24,2	48	25,2	27,1	51	25,2	24,2	48
Wandstützbereiche unten	80	2,0	13,4	24,6	37	13,4	24,6	37	13,4	24,6	37
Sohle	100	10,2	67,0	15,1	81	67,0	15,1	81	67,0	15,1	81
Bewehrungsmenge in Querrichtung			2.503	kg/m		2.736	t/m		2.503	t/m	
Bewehrungskosten			2.503	€/m		2.736	€/m		2.503	€/m	
Mehrkosten			0	€/m		233	€/m	9%	0	€/m	0%

Für die Bemessung von Tunneln gegen Explosionen wird ein mögliches und bereits erprobtes Berechnungsverfahren vorgestellt. Für das Beispiel eines Tunnels in offener Bauweise werden die Konsequenzen für das Tragwerk lokalisiert und quantifiziert und schließlich auch allgemein verständlich in einem einfachen Schema dargestellt (vgl. Bild 3). Es zeigt sich, dass bereits mit einem geringen Mehraufwand bzgl. der Bemessung und der zusätzlich erforderlichen Bewehrung Tunneltragwerke auch gegen Explosionen ausgelegt werden können.

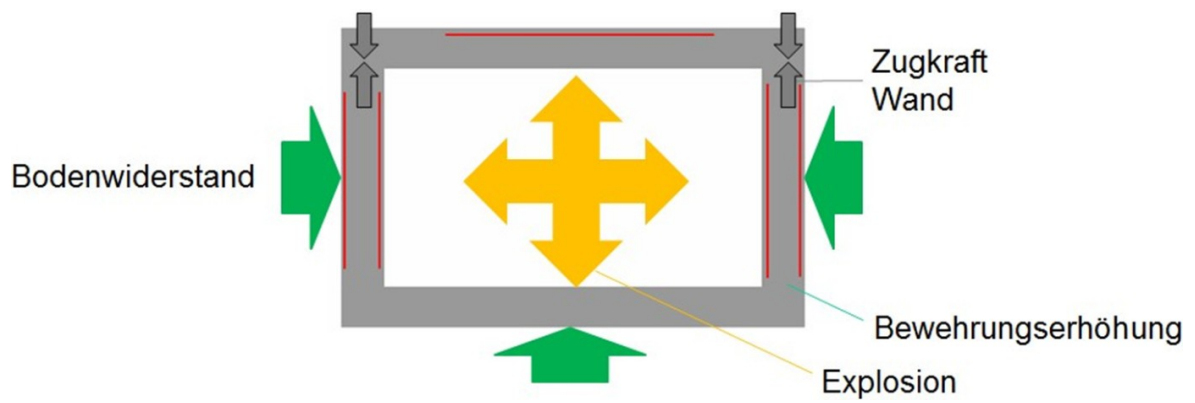


Bild 3: Auswirkung einer Explosion im Tunnel auf dessen Tragwerk (rot: Zusatzbewehrung)