

# Optimierung der Brandfallsteuerung der Straßentunnellüftung und höhere Bediensicherheit durch Entwicklung eines Tunnel-simulators mit Prüfprogramm

Für den Tunnel „Schwarzer Berg“ wurde in der Verkehrs- und Betriebszentrale der Autobahndirektion Nordbayern ein Tunnelsimulator zur Prüfung der automatischen Lüftersteuerung im Brandfall aufgebaut. Er simuliert die Lüftungstechnischen Eigenschaften des Tunnels und die Reaktionen der Betriebstechnik. Die Berechnung von 210 Prüfscenarien im Tunnelsimulator wurde mit einer unabhängigen Prüfsoftware verifiziert. Die Ergebnisse wurden genutzt, um die bestehende Steuerung zu optimieren. In 11 % aller geprüften Szenarien waren die Abweichungen vom geplanten Lüftungsverhalten so groß, dass bei einem realen Ereignis das Risiko für Tunnelnutzer erhöht wäre. Die Lüftersteuerung wird daher optimiert und überarbeitet, um eine Verbesserung der Sicherheit zu erreichen. Operatoren können am Tunnelsimulator mit zum Bedienplatz identischer visueller Oberfläche das Tunnelverhalten realitätsnah beobachten sowie Schaltheaktionen ohne Auswirkung auf den wirklichen Tunnel erproben und damit eine höhere Sicherheit in der Bedienung des Tunnels, insbesondere für Notfallereignisse, erreichen.

## 1 Beschreibung des Tunnels „Schwarzer Berg“

### 1.1 Geometrie und Verkehr

Der zweiröhrige Tunnel „Schwarzer Berg“ ist Bestandteil der Bundesautobahn (BAB) A 70 zwischen Würzburg und Bamberg. Er besitzt in seiner Ausrichtung von Ost nach West eine Steigung von 1 %. Die Nordröhre mit 738 m und die später erstellte Südröhre mit 722 m Länge werden auf jeweils zwei Fahrspuren ohne Standspur im Richtungsverkehr befahren. Bei Wartungsarbeiten in einer Röhre ist auch ein Gegenverkehrsbetrieb in der anderen Röhre vorgesehen. Der jährlich gemittelte durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV) beträgt für das Jahr 2015 ca. 30.000 Fahrzeuge am Tag. Der Schwerverkehrsanteil beträgt 25 % vom DTV.

### 1.2 Längslüftung mit Strahlventilatoren

In beiden Tunnelröhren ist eine Längslüftung mit Strahlventilatoren installiert (Bild 1). Aufgrund von Nachrüstungen sind in beiden Röhren je acht Strahlventilatoren mit jeweils zwei unterschiedlichen Typen installiert. In Tabelle 1 sind die Anzahl und die wesentlichen Daten der Strahlventilatoren angegeben.

## Optimizing Road Tunnel Ventilation Control Systems in the Event of Fire and greater Operating Safety by developing a Tunnel Simulator with Test Programme

A tunnel simulator for testing the automatic ventilation control in the event of fire at the “Schwarzer Berg” tunnel was installed at the operating centre of the Motorway Directorate of Northern Bavaria. It simulates the ventilation properties of the tunnel and the function of the ventilation systems. The calculation of 210 test scenarios in the tunnel simulator was verified using independent test software. The results were used for the optimisation of the existing control system. In 11 % of all cases, the deviations from the anticipated results were to such an extent that it increased the risk to tunnel users in the case of a real event. For this reason, the ventilation control system is being optimised and overhauled in order to improve safety standards. The operators can use the tunnel simulator, which has a visual user interface that is identical to the operating unit, to observe the realistic replication of the response in the tunnel and can try out control operations without affecting the actual tunnel, thereby achieving better safety levels in the operation of the tunnel, particularly in emergency situations.

### 1.3 Regelung der Luftströmungsgeschwindigkeit im Brandfall

Im Brandfall wird zwischen den Phasen der Selbstrettung und der Brandbekämpfung unterschieden. Bei flüssigem Richtungsverkehr wird in der Rettungsphase mit hoher Geschwindigkeit in Fahrtrichtung entraucht, um eine Rückströmung des Rauchs über stehende Fahrzeuge zu verhindern. Im Stauffall und bei stockendem Richtungsverkehr wird mit geringerer Geschwindigkeit ebenfalls in Fahrtrichtung entraucht, um gute Bedingungen für eine Luft-/Rauchsichtung zu schaffen, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass Rauch über stehende Fahrzeuge gelangt. Bei Gegenverkehr wird vom Brandort aus in Richtung des näher gelegenen Portals mit noch kleinerer Geschwindigkeit entraucht. Unmittelbar nach Brandmeldung wird die Tunnellüftung abhängig von Brandort und Verkehrssituation in eine definierte Grund-

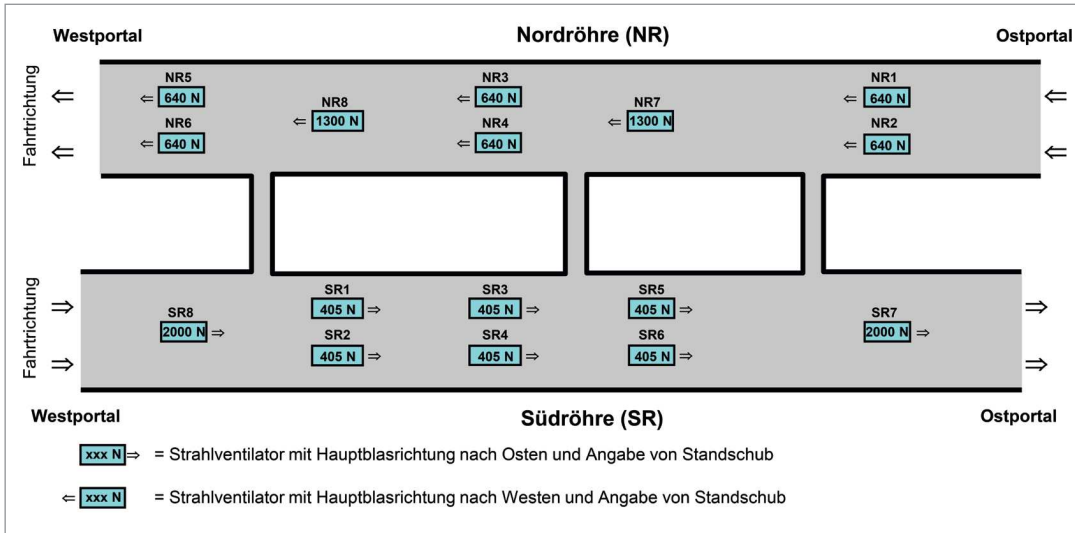


Bild 1 Überblick über die Anordnung der Strahlventilatoren und Querschläge

Nordröhre		
Anzahl Strahlventilatoren	Laufraddurchmesser	Standschub <sup>1)</sup>
6	710 mm	640 N
2	1.120 mm	1.300 N
gesamt 8	–	6.440 N gesamt

Süd- röhre		
Anzahl Strahlventilatoren	Laufraddurchmesser	Standschub <sup>1)</sup>
6	630 mm	405 N
2	1.250 mm	2.000 N
gesamt 8	–	6.430 N gesamt

<sup>1)</sup> bei einer Luftdichte von 1,2 kg/m<sup>3</sup>

Tabelle 1 Installierte Strahlventilatoren

Verkehrsbedingung	Soll-Luftströmungsgeschwindigkeit im Fahrraum
fließender Richtungsverkehr	2,5 m/s in Fahrtrichtung
Stau oder stockender Richtungsverkehr	1,5 m/s in Fahrtrichtung
Gegenverkehr	1,0 m/s in Richtung des nähergelegenen Portals

Tabelle 2 Soll-Luftströmungsgeschwindigkeit im Fahrraum im Brandfall

einstellung gebracht. Die Strahlventilatoren im betroffenen Brandabschnitt werden ausgeschaltet und für die Automatik gesperrt. Anschließend wird die Tunnelluftgeschwindigkeit auf einen situationsabhängigen Sollwert gemäß Tabelle 2 geregelt. In der nicht vom Brand betroffenen Röhre wird die Lüftung so eingestellt, dass ein Strömungskurzschluss vermieden und Überdruck aufgebaut wird. In der Brandbekämpfungsphase kann die Lüftung manuell geschaltet werden.

Der Zusammenhang zwischen dem realen Tunnel und der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) der technischen Einrichtungen (z. B. Lüftung, Beleuchtung) und des Verkehrs ist in Bild 2 (oben) schematisch dargestellt. Es sind keine Frequenzumrichter vorhanden, so dass mit einem Zeitschritt von 60 Sekunden je nach Abweichung zwischen Ist- und Sollwert der Luftströ-

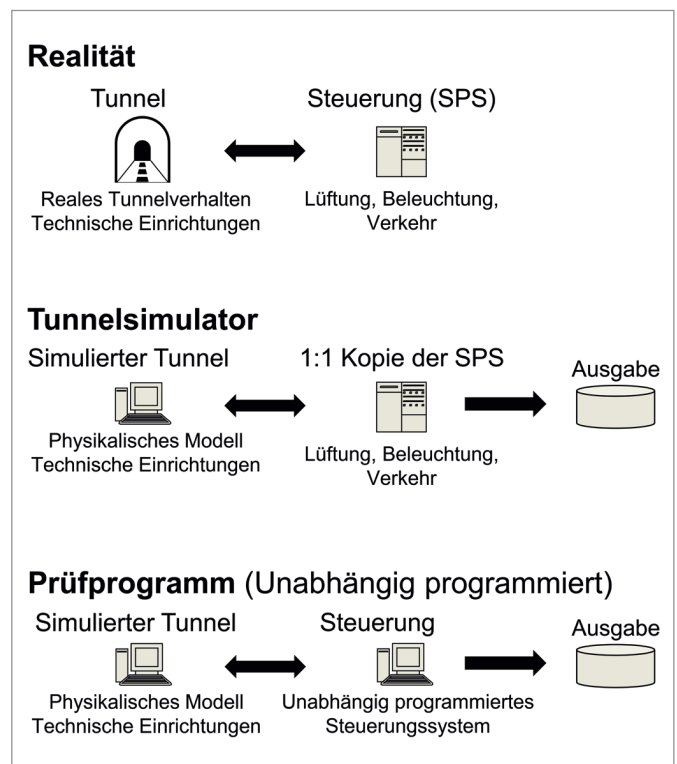


Bild 2 Zusammenhang zwischen Tunnel und Steuerung in der Realität, beim Tunnelsimulator und beim Tunnelsimulatorprüfprogramm

mungsgeschwindigkeit Strahlventilatoren zu- oder abgeschaltet werden. Die Anzahl wird in sogenannten „äquivalenten Strahlventilatoren“ (ÄV) angegeben. In der Nordröhre entspricht ein „kleiner“ Strahlventilator einem ÄV und ein „großer“ Strahlventilator zwei ÄV. In der Süd- röhre entspricht ein „kleiner“ Strahlventilator einem ÄV und ein „großer“ Strahlventilator fünf ÄV (Tabelle 3).

## 2 Tunnelsimulator, Prüfscenarien und Prüfsoftware

### 2.1 Entwicklung eines Tunnelsimulators

Um die umfangreichen Variationsmöglichkeiten bei der automatischen Steuerung der Tunnellüftung für den Brandfall zu testen

## Brandfallsteuerung Straßentunnellüftung

Nordröhre	
Schub eines Strahlventilators	entspricht Anzahl äquivalenter Strahlventilatoren
640 N	1
1.300 N	2
Südröhre	
Schub eines Strahlventilators	entspricht Anzahl äquivalenter Strahlventilatoren
405 N	1
2.000 N	5

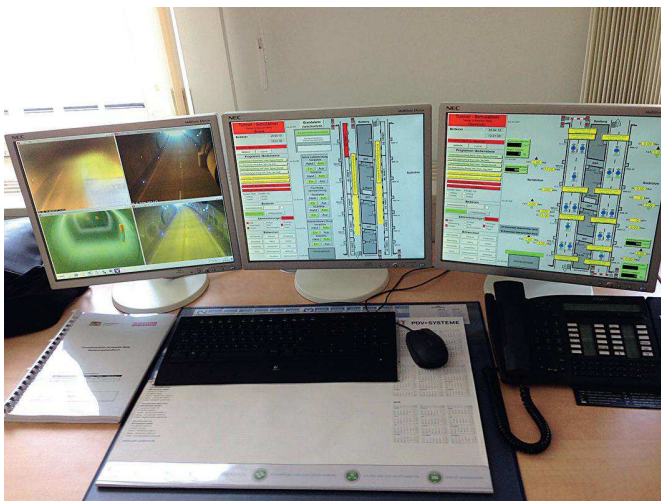
**Tabelle 3** Festlegung der äquivalenten Strahlventilatoren

und eine korrekte Funktion sicherzustellen, wurde ein Tunnelsimulator entwickelt. Dieser ist in der Verkehrs- und Betriebszentrale der Autobahndirektion Nordbayern in Nürnberg-Fischbach aufgebaut (Bild 3, aus [2]). Die Operatoren können aufgrund der mit dem realen Bedienplatz identischen visuellen Oberfläche zusätzlich das Tunnelverhalten realitätsnah beobachten und verschiedene Schalthandlungen ohne Auswirkung auf den wirklichen Tunnel erproben. Dadurch kann eine deutlich höhere Sicherheit in der Bedienung des Tunnels, insbesondere für Notfallereignisse, erreicht werden.

Der Tunnelsimulator beinhaltet ein aerodynamisches Modell, das die physikalischen Eigenschaften des Tunnels und die Reaktionen der gesamten technischen Sicherheitseinrichtungen (Beleuchtung, Video usw.) umfasst und abbildet. An den Tunnelsimulator ist eine exakte Kopie der speicherprogrammierbaren Steuerung angeschlossen, die die automatischen Reaktionen der Steuerung von Lüftung, Beleuchtung und Verkehr und die Wirkungen auf den Tunnel nachbildet (Bild 2, Mitte). Die Planung des Basissystems für den Tunnelsimulator erfolgte durch einen Elektroplaner, die Umsetzung mit Anbindung an die SPS durch eine ausführende Firma.

### 2.2 Festlegung von Prüfscenarien

Um die Vielzahl an möglichen Variationen bei der automatischen Steuerung der Tunnellüftung für den Brandfall zu testen, wurden 210 Prüfscenarien festgelegt und der Ablauf der Rettungsphase berechnet. Hierbei wurden Brandleistung/Brandort,



**Bild 3** Bedienplatz Tunnelsimulator für den Tunnel Schwarzer Berg in der VBZ Nordbayern in Nürnberg-Fischbach (aus [2])

Verkehrssituation/-belastung, Portaldruckwirkung und Einstellung der Tunnellüftung vor dem Brandereignis variiert. Für jedes Szenario wurden die davon abhängigen aerodynamischen Anfangsbedingungen bei Brandausbruch bestimmt. Nach Brandbeginn wird von folgendem Ablauf ausgegangen: Die Brandleistung steigt innerhalb von zehn Minuten linear auf ihren Maximalwert an. Die Fahrzeuge zwischen Brandort und Ausfahrtsportal verlassen bei flüssigem Verkehr den Tunnel. Die sich auf den Brandort zubewegenden Fahrzeuge stauen sich davor. Liegt bereits vor Brandbeginn ein Stau vor, finden keine Fahrzeugbewegungen mehr statt. Zwei Minuten nach Brandbeginn wird der Brand vom Brandlinienmelder automatisch erkannt, der Tunnel wird für den Verkehr gesperrt und die automatischen Brand-Lüftungsprogramme werden gestartet. Die physikalischen Größen im Tunnel wie Luftströmungsgeschwindigkeit, Kaminwirkung, Rauchausbreitung, Fahrzeugbewegungen usw. werden in einem Zeitschritt von 1 Sekunde berechnet. Die Berechnungen werden nach 15 Minuten beendet und die relevanten Daten gespeichert.

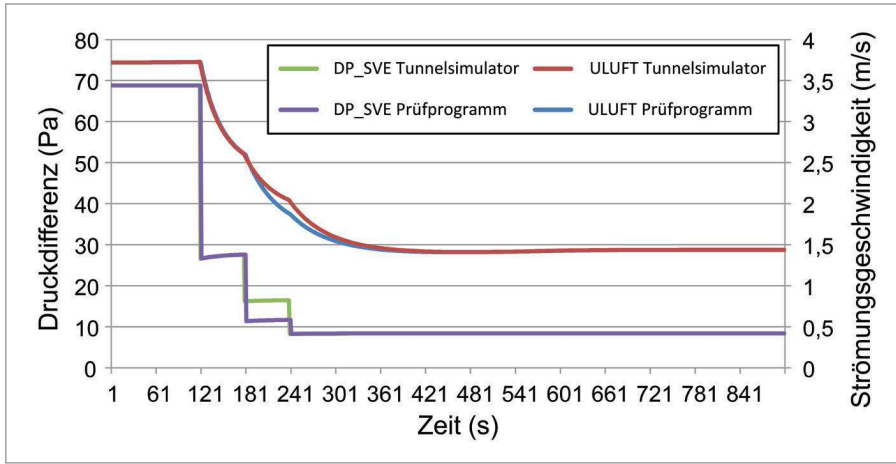
### 2.3 Unabhängige Prüfsoftware

Um die mit dem Tunnelsimulator generierten Ergebnisse der 210 Szenarien hinsichtlich der zutreffenden automatischen Reaktion der Steuerung der Tunnellüftung für den Brandfall effizient beurteilen zu können, wurde eine unabhängige Prüfsoftware entwickelt, mit deren Hilfe ebenfalls alle Prüfscenarien einschließlich der Reaktion der Lüftungssteuerung berechnet wurden. Durch Vergleich der Prüfergebnisse mit den Ergebnissen des Tunnelsimulators und der Lüftungssteuerung wird deren korrekte Funktion überprüft. Das Prüfprogramm besteht aus einem Aerodynamik- und einem Steuerungsmodul (Bild 2, unten). Das Aerodynamikmodul modelliert die zeitlichen Abläufe der physikalischen Größen wie z. B. Brandleistung, Druckdifferenz, Luftgeschwindigkeit, Rauchausbreitung, Kolbeneffekt der Fahrzeuge, aerodynamische Widerstände usw. Die mathematische Modellierung im Aerodynamikmodul wurde ebenso im Tunnelsimulator hinterlegt. Das Steuerungsmodul bildet die Reaktionen der Steuerung des Lüftungssystems sowie die zur Simulation von Brandereignissen notwendigen Rückwirkungen der Verkehrsbeeinflussungseinrichtungen ab.

Gegenüber der Programmierung in der SPS wurden im Steuerungsmodul des Prüfprogramms folgende Vereinfachungen getroffen: Die Strahlventilatoren werden in der Realität zur Vermeidung von Stromspitzen zeitlich versetzt gestartet – im Steuerungsmodul des Prüfprogramms hingegen werden alle in einem Zeitschritt angeforderten Strahlventilatoren zeitgleich gestartet. Weiterhin wurden keine Hochlaufzeiten bzw. Um- oder Abschaltzeiten modelliert, so dass während der Betriebszeit die volle Leistung der entsprechenden Strahlventilatoren zur Verfügung steht. Ein Umschalten der Blasrichtung kann ohne Wartezeit stattfinden. Gelegentlich treten in der SPS, z. B. aufgrund von internen Programmzyklen, Zeitverzögerungen von wenigen Sekunden auf, die ebenfalls nicht nachgebildet wurden. Alle Vereinfachungen waren im Vergleich der Ergebnisse einfach identifizierbar und konnten eindeutig zugeordnet werden.

## 3 Ergebnisse

Es wurden zunächst die Modellanforderungen und aerodynamischen Berechnungsgrundlagen zur Simulation der Strömungsbedingungen im Tunnelsimulator definiert. Die Modellierung im Ae-



**Bild 4** Erzeugte Druckdifferenz der Strahlventilatoren im Tunnel und Luftströmungsgeschwindigkeit im Fahrraum für Szenario Nr. 41

rodynamikmodul des Tunnelsimulators wurde mit jener im Prüfprogramm verglichen und validiert. Die Analyse aller Szenarien zeigte, dass in zahlreichen Fällen die Reaktion der automatischen Regelung der Lüftungssteuerung im Tunnel „Schwarzer Berg“ vom zu erwartenden Verhalten abwich. Nachfolgend soll jedoch ein Szenario gezeigt werden, das gut mit den Erwartungen übereinstimmte.

### 3.1 Szenario Nr. 41: Gute Übereinstimmung zwischen Tunnelsimulator und Prüfprogramm

Die Parameter von Szenario Nr. 41 sind:

- Brand in der Nordröhre.
- Richtungsverkehr mit Stausituation vor dem Brand.
- 7 Pa Wind-Portaldruck auf das Westportal.
- Brandort: 54 m vor dem Ausfahrtsportal.
- Brandleistung: 30 MW, linearer Anstieg über 10 min.
- Tunnellüftung vor Brandbeginn aktiv.

In **Bild 4** sind für Szenario Nr. 41 die zeitliche Entwicklung der von den eingeschalteten Strahlventilatoren induzierten Druckdifferenz im Tunnel und die Luftströmungsgeschwindigkeit im Fahrraum abgebildet. Brandbeginn ist zum Zeitpunkt  $t_0 = 0$  s. Aufgrund der Stausituation wird von einer aktiven Tunnellüftung vor dem Brandereignis ausgegangen. Trotz stehender Fahrzeuge beträgt daher die Luftströmungsgeschwindigkeit vor der Brandmeldung rund 3,7 m/s.

In **Tabelle 4** ist die Schaltreihenfolge in Tunnelsimulator und Prüfprogramm zusammengefasst. Bei  $t_1 = 120$  s wird der Brand von der automatischen Branderkennung detektiert und die Lüftung wird in die Grundeinstellung für diesen Brandort und diese Verkehrssituation gebracht, wobei zunächst die Ventilatoren Nr. 1, 2 und 7 aktiv sind. Zum Zeitpunkt  $t_1 = 180$  s wird die gemessene Luftgeschwindigkeit von 2,6 m/s in Fahrtrichtung mit der Soll-Geschwindigkeit für Stau von 1,5 m/s verglichen. Dies führt zu der Anforderung, zwei äquivalente Strahlventilatoren auszuschalten ( $\Delta N_{\text{AV}} = -2$ ). Der Tunnelsimulator deaktiviert den Strahlventilator NR7, das Prüfprogramm die Strahlventilatoren NR1 und NR2, was in beiden Fällen zwei äquivalenten Strahlventilatoren entspricht. Da das Schubverhältnis der unterschiedlichen Strahlventilortypen jedoch nicht exakt 2 : 1 beträgt, ist zwischen 180 und 240 s ein Unterschied in der Druckdifferenz der Strahlventilatoren erkennbar, der sich jedoch kaum auf die Luftgeschwindigkeit auswirkt (**Bild 4**).

### 3.2 Szenario Nr. 135: Abweichung zwischen Tunnelsimulator und Prüfprogramm

Im folgenden dargestellten Szenario Nr. 135 wird beispielhaft auf eine Beschränkung in der realisierten Regelung der Luftströmungsgeschwindigkeit im Brandfall eingegangen. Nach der Grundeinstellung summiert die Variable  $\Sigma \Delta N_{\text{AV}}$  die Schaltungen an äquivalenten Strahlventilatoren. In einigen Szenarien wurde festgestellt, dass weitere Schaltanforderungen in gleicher Rich-

Zeit [s]	Tunnelsimulator					Prüfprogramm				
	$\Delta N_{\text{AV}}$	Strahlventilator			$\Delta N_{\text{AUSF}}$	$\Delta N_{\text{AV}}$	Strahlventilator			$\Delta N_{\text{AUSF}}$
		NR1 (1 ÄV)	NR2 (1 ÄV)	NR7 (2 ÄV)			NR1 (1 ÄV)	NR2 (1 ÄV)	NR7 (2 ÄV)	
120	-	⇒	⇒	⇒	-	-	⇒	⇒	⇒	-
180	-2	⇒	⇒	X	-2	-2	X	X	⇒	-2
240	-1	X	⇒	X	-1	-1	X	⇒	X	-1

- $\Delta N_{\text{AV}}$  Schaltanforderung Anzahl äquivalenter Strahlventilatoren
- $\Delta N_{\text{AUSF}}$  Ausführung Schaltung Anzahl äquivalenter Strahlventilatoren
- ⇒ Strahlventilator ist eingeschaltet
- X Strahlventilator ist ausgeschaltet

**Tabelle 4** Schaltreihenfolge der Strahlventilatoren für Szenario Nr. 41

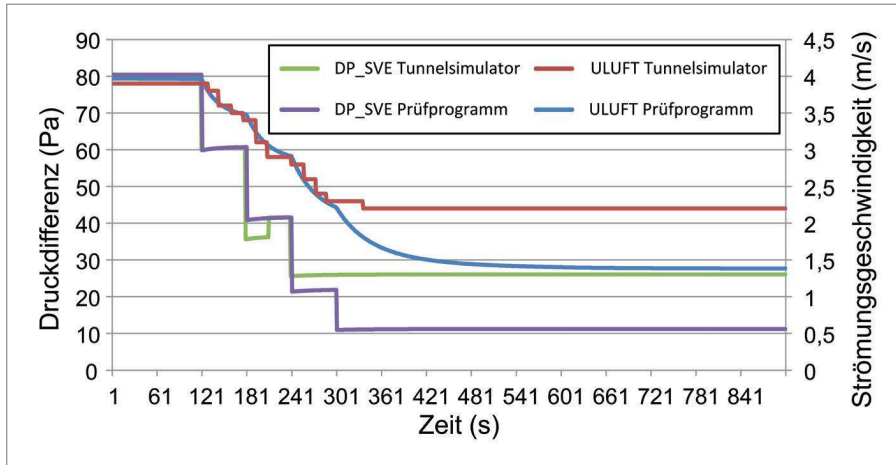


Bild 5 Erzeugte Druckdifferenz der Strahlventilatoren im Tunnel und Luftströmungsgeschwindigkeit im Fahrraum für Szenario Nr. 135

tion ignoriert werden, wenn die Variable  $\Sigma\Delta N_{\dot{A}V}$  absolut den Wert 8 überschreitet.

Die Parameter von Szenario Nr. 135 sind:

- Brand in der Südröhre.
- Richtungsverkehr mit Stausituation vor dem Brand.
- Kein Wind-Portaldruck.
- Brandort in Tunnelmitte.
- Brandleistung: 5 MW, linearer Anstieg über 10 min.
- Tunnellüftung vor Brandbeginn aktiv.

Bild 5 zeigt für Szenario Nr. 135 die zeitliche Entwicklung der Strahlventilator-Druckdifferenz und die Luftströmungsgeschwindigkeit im Fahrraum. Aufgrund der Stausituation wird angenommen, dass vor dem Brand alle Strahlventilatoren in Fahrtrichtung eingeschaltet sind. Tabelle 5 zeigt die Schaltreihenfolge in Tunnelsimulator und Prüfprogramm. Es sind zunächst 16 äquivalente Strahlventilatoren eingeschaltet. Unmittelbar nach Branderkennung ( $t_1 = 120$  s) wird die Lüftung durch Ausschalten der Ventilatoren SR3, SR4, SR5 und SR6 in die Grundeinstellung gebracht. Zu beiden Zeitpunkten  $t_2 = 180$  s und  $t_3 = 240$  s wird das Ausschalten von jeweils vier äquivalenten Strahlventilatoren ( $\Delta N_{\dot{A}V} = -4$ ) angefordert und auch ausgeführt. Die Summe der Schaltungen an äquivalenten Strahlventilatoren, die in der Variable  $\Sigma\Delta N_{\dot{A}V}$  hinterlegt ist, hat nun den Wert  $-8$  angenommen. Die folgende Schaltanforderung bei

$t_4 = 300$  s von  $\Delta N_{\dot{A}V} = -2$  wird vom Tunnelsimulator nicht ausgeführt, obwohl noch vier äquivalente Strahlventilatoren in Betrieb sind. Daraus resultiert eine Luftgeschwindigkeit, die mit rund 2,2 m/s deutlich über dem in dieser Situation angestrebten Zielwert von 1,5 m/s liegt. Damit erhöht sich das Risiko, dass eine vorhandene Luft-/Rauchschichtung zerstört wird. Das System führt keine weiteren Ausschaltanforderungen aus, während Einschaltanforderungen ausgeführt werden würden. Das Prüfprogramm reagiert bei  $t_4 = 300$  s korrekt auf die Ausschaltanforderung, so dass etwa vier Minuten nach Branderkennung der Zielwert von 1,5 m/s erreicht wird. Insgesamt zeigten 24 von 210 Szenarien im Tunnelsimulator dieses fehlerhafte Verhalten.

### 3.3 Weitere Abweichungen zwischen Tunnelsimulator und Prüfprogramm

Weitere Abweichungen vom erwarteten Verhalten der Regelung der Strömungsgeschwindigkeit werden in [1] ausführlich dokumentiert und im Folgenden kurz beschrieben.

#### 3.3.1 Überkorrektur

Die sogenannte Überkorrektur steht im Zusammenhang mit den in jeder Röhre unterschiedlichen Strahlventilortypen. Das Schalten eines „großen“ Ventilators führt in einigen Fällen zu einer Abweichung zwischen der angeforderten und der geschal-

Zeit [s]	Tunnelsimulator				Prüfprogramm		
	$\Delta N_{\dot{A}V}$	$\Delta N_{AUSF}$	$\Sigma\Delta N_{\dot{A}V}$	Anzahl aktiver äquivalenter Strahlventilatoren	$\Delta N_{\dot{A}V}$	$\Delta N_{AUSF}$	Anzahl aktiver äquivalenter Strahlventilatoren
< 120	-	-	-	16	-	-	16
120	-	-	0	12	-	-	12
180	-4	-4	-4	8	-4	-4	8
240	-4	-4	-8	4	-4	-4	4
300	-2	0	-8	4	-2	-2	2

$\Delta N_{\dot{A}V}$  Schaltanforderung Anzahl äquivalenter Strahlventilatoren  
 $\Delta N_{AUSF}$  Ausführung Schaltung Anzahl äquivalenter Strahlventilatoren  
 $\Sigma\Delta N_{\dot{A}V}$  Summe der ausgeführten Schaltung Anzahl äquivalenter Strahlventilatoren

Tabelle 5 Schaltreihenfolge der Strahlventilatoren für Szenario Nr. 135

teten Anzahl an äquivalenten Ventilatoren. Diese Abweichung wird im nächsten Zeitschritt nachträglich korrigiert. Zusätzlich geht in die Anforderung für den neuen Zeitschritt die Differenz zwischen Ist- und Soll-Wert der Geschwindigkeit ein, was zu einer Überkorrektur führt. Die Folge ist eine niedrigere Verfügbarkeit der Ventilatoren und teilweise ein verzögertes Erreichen der Zielgeschwindigkeit. Es waren 38 von 210 Szenarien von diesem Verhalten betroffen.

### 3.3.2 Keine Minimierung der Schalthäufigkeiten

Zum Teil wurde in den Schaltungen keine Minimierung der Schalthäufigkeiten erreicht. Beispielsweise wurden gleichzeitig zu notwendigen Schaltungen noch unnötigerweise zwei Ventilatoren aus- und im gleichen Zeitschritt zwei andere wieder eingeschaltet. Ein ähnliches Verhalten wurde in 15 von 210 Szenarien beobachtet.

### 3.3.3 Deaktivierung des Lüftungssystems

Unter bestimmten Umständen wurde die Lüftung von der automatischen Regelung zeitweise abgeschaltet. Dieses Verhalten stellt ein hohes Gefährdungspotenzial dar und wurde in sieben Fällen festgestellt.

## 4 Bewertung der Ergebnisse

### 4.1 Optimierung der eingesetzten Systeme und deutliche Steigerung der Sicherheit

Mittels der speziell entwickelten Tunnelsimulatorprüfsoftware konnte die korrekte Funktion des Tunnelsimulators und der angeschlossenen Steuerung der Tunnellüftung effizient nachgewiesen werden. Die von der ausführenden Firma implementierte aerodynamische Modellierung arbeitete zuverlässig und gemäß den Vorgaben korrekt. In 96 von 210 Prüfscenarien wurden unerwartete Reaktionen der Lüfterregelung festgestellt. Davon betrafen 84 Fälle ernsthafte und fehlerhafte Reaktionen, 12 Fälle fehlerhafte Reaktionen, jedoch ohne bedeutsame Wirkung auf die Bedingungen im Tunnel. In 24 Fällen aller Prüfscenarien (11 %) hätten die Abweichungen bei einem realen Ereignis ein erhöhtes Risiko für Tunnelnutzer bedeutet. Die festgestellten Fehlreaktionen waren bei der erfolgten Abnahme der Lüftersteuerung im realen Tunnel nicht erkennbar.

Als Ergebnis dieser Überprüfung wird die Regelung der Tunnellüftung im Tunnel Schwarzer Berg derzeit optimiert, überarbeitet und anschließend neben einer Abnahme im Tunnel erneut mit allen Prüfscenarien getestet. Damit ist eine deutliche Steigerung der Sicherheit der eingesetzten Systeme möglich. Zusätzlich sind Brandversuche geplant, um weitere Erfahrungen im realen Tunnel und Erkenntnisse zur Genauigkeit des eingesetzten aerodynamischen Modells zu gewinnen.

### 4.2 Durchführung von Notfallübungen am Bildschirm

Der Tunnelsimulator kann als leistungsstarkes Trainingswerkzeug für Tunneloperatoren dienen. Die Darstellung und Interaktion des Systems erfolgt analog zur Tunnelleitzentrale. Damit können alle wesentlichen betriebstechnischen Anlagen bedient und visualisiert werden. Der Operator kann Brandszenarien erzeugen und die realitätsnahe Reaktion des Systems hinsichtlich Luftgeschwindigkeit, Verkehrsströmen, Rauchausbreitung usw. in ihrer zeitlichen Entwicklung und als Folge manueller Eingriffe beobachten und sich ausführlich mit der Bedienung des Tunnels vertraut machen. Insbesondere kann das Einüben der notwendigen Handlungsabläufe bei Notfällen und Extremsituationen die Sicherheit und Schnelligkeit in der Bedienung deutlich erhöhen.

### 4.3 Erfahrungen aus der Anwendung

Aus Rückmeldungen der Tunneloperatoren zeigte sich, dass für einen größtmöglichen Nutzen zusätzlich vorgegebene, definierte Übungsvorlagen notwendig sind. Es wurde angeregt, die Anwendung einzelner Simulationen zu vereinfachen, die Datenbank mit real wirkenden Videoaufzeichnungen zu verbessern, die Auswertung der Handlungen, der Schaltreihenfolgen und der Reaktionszeiten mittels Soll-Ist-Vergleich zu bewerten und das Ergebnis ausdrucken zu können, um eine geeignete Ereignisnachbereitung zu ermöglichen.

### 4.4 Ausführliche Tests bei zukünftigen Änderungen der Betriebseinrichtungen

Zukünftige Nachrüstungen von Betriebseinrichtungen können durch die Nutzung von Tunnelsimulator und Prüfprogramm vorab und ohne negative Auswirkung auf den realen Tunnelbetrieb ausführlich getestet werden. Eventuell unentdeckte Programmierfehler werden beseitigt, was eine höhere Sicherheit der eingesetzten Systeme in einem Katastrophenfall gewährleistet. Abnahmen am realen System können aus Zeit- und Kostengründen und zur Vermeidung von Tunnelsperrungen meist nur in Stichproben erfolgen und schließen eine ausführliche Prüfung aller Variationsmöglichkeiten aus. Durch die Vorabsimulation können Sperr- und Umbauzeiten des Tunnels minimiert, Kosten eingespart und unvorhergesehene Komplikationen vermieden werden.

## Literatur

- [1] Krokos, E., Wehner, M.: Development of tunnel simulation software aiming at optimization of tunnel control operations. Sixth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Marseille, France, March 12-14, 2014.
- [2] [http://www.gbi.eu/uploads/media/Tunnelsimulator\\_Nordbayern\\_01.pdf](http://www.gbi.eu/uploads/media/Tunnelsimulator_Nordbayern_01.pdf), 2015-07-23.