

# Abbildung des menschlichen Verhaltens in Risikomodellen für Tunnelbrände: Validierung relevanter Eingangsparameter auf Basis von Probandenversuchen

Unter bestimmten Voraussetzungen sind im Zuge der quantitativen Sicherheitsbewertung von Straßentunneln Risikoanalysen durchzuführen. Neben objekt-, verkehrs- oder ereignisspezifischen Parametern gibt es auch etliche Eingangsparameter, die fest im Risikomodell hinterlegt sind und deren Variation für gewöhnlich nicht vorgesehen ist. Dies trifft auch für Parameter des menschlichen Verhaltens zu. Im Zuge von Versuchsreihen zum Flucht- und Reaktionsverhalten der Verkehrsteilnehmer im Ereignisfall in Straßentunneln wurden verschiedene Verhaltensparameter ermittelt und analysiert, die den konventionellen Modell-Basisparametern erstmals im österreichischen Tunnelrisikomodell (TuRisMo) gegenübergestellt werden. Als Ergebnis kann auf Basis der aktuell gewonnenen Verhaltensparameter eine Senkung des Gesamtrisikos aufgezeigt werden, dessen Einordnung im folgenden Beitrag diskutiert wird.

## 1 Hintergrund, Einleitung und Zielsetzung

Wesentliches Ziel der Sicherheitsmaßnahmen in Tunneln ist die Sicherstellung der Selbstrettung im Ereignisfall. Im Zuge der betriebs- und sicherheitstechnischen Ausstattung eines Tunnels ist unter gewissen Voraussetzungen eine quantitative Sicherheitsbewertung mittels Risikoanalyse durchzuführen. Leistungsfähige Risikomodelle verfügen auch über Module, die das menschliche Verhalten abbilden. Neben objekt-, verkehrs- oder ereignisspezifischen Parametern, die systematisch variiert werden, gibt es auch etliche Eingangsparameter, die fest im Modell hinterlegt sind und deren Variation für gewöhnlich nicht vorgesehen ist. Dies trifft u. a. auf viele Parameter zur Beschreibung des menschlichen Verhaltens zu. Eine Validierung bzw. Aktualisierung der Basisparameter hat seit Einführung der Modelle vor ca. zehn Jahren nicht stattgefunden.

Im Zuge einer Versuchsreihe der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) zum Einfluss von Brandbekämpfungsanlagen (BBA) auf das Selbstrettungsverhalten wurden erstmals Probandenversuche an Tunnelnutzern durchgeführt, bei denen das Reaktions- und Fluchtverhalten qualitativ sowie quantitativ untersucht wurde [1]. Die Resultate bieten eine Grundlage, die in den Risikomodellen hinterlegten Daten zu überprüfen.

## Representation of Human Behaviour In Risk Models for Tunnel Fires: Validation of Relevant Input Parameters Based on Tests with People

Risk analyses are performed under certain preconditions in the course of the quantitative safety assessment of road tunnels. In addition to parameters related to the tunnel, traffic conditions or the incident, there are also many input parameters, which are a fixed part of the risk model and whose variation is basically not intended. This also applies to parameters related to human behaviour. As part of test series to investigate the escape and reaction behaviour of road users in the case of incidents in road tunnels, various behaviour parameters were determined and analysed, and were then for the first time compared with the conventional basic parameters in the Austrian Tunnel Risk Model (TuRisMo). As a result, a lowering of the overall risk can be demonstrated based on the obtained behaviour parameters, the classification of which is discussed in the paper.

Der Vortrag stellt erstmals neue Erkenntnisse hinsichtlich des Flucht- und Reaktionsverhaltens in Verbindung mit der möglichen Aktualisierung von Risikomodellen dar.

## 2 Evakuierungsverhalten im Tunnel

Allgemein kann man das Fluchtverhalten von Personen in mehrere Phasen untergliedern. Zu Beginn steht die Präevakuierungsphase, die alle Ereignisse vor Beginn der Flucht beinhaltet und mit der Entscheidung zur Flucht endet. Von besonderem Interesse sind hierbei die Dauer dieser Phase und welche Eigenschaften des Ereignisses dazu führen, ob und wann der Tunnelnutzer die Entscheidung zur Flucht trifft. In der darauffolgenden Evakuierungsphase kann man zwischen einer Präbewegungs- und einer Bewegungsphase unterscheiden. In der Präbewegungsphase sucht der Tunnelnutzer Informationen und wählt einen Fluchtweg aus. Die Bewegungsphase beinhaltet alle Verhaltensweisen, die während der Flucht gezeigt werden, bis der Tunnelbenutzer ein Fluchtziel erreicht hat.

Dieser Ansatz findet sich u. a. im Vier-Phasen-Modell von Kuligowski [2] wieder, wobei hier die ersten zwei Phasen der Präevakuierungsphase entsprechen, die dritte Phase der Präbewegungsphase und die vierte Phase der Bewegungsphase. In Phase 1 werden situative Hinweise wahrgenommen, die in Phase 2 interpretiert und bezüglich ihres Risikos bewertet werden. In Phase 3 wird eine Handlungsentscheidung getroffen, welche in Phase 4 durchgeführt wird. In Anlehnung an dieses Modell wird das Verhalten der Tunnelnutzer vor und während der Evakuierung im österreichischen Tunnelrisikomodell (TuRisMo) modelliert. Die Phasen 1 bis 3 werden dabei durch eine sogenannte Reaktionszeit abgebildet. Als Reaktionszeit werden das Realisieren der Situation sowie das Verarbeiten des Verstandes, und sie beinhaltet den Zeitraum ab Stillstand des Fahrzeugs in der Ereignissituation bis zu dessen Verlassen. Die Bewegungsphase wird maßgeblich durch unterschiedliche Fluchtgeschwindigkeiten modelliert und bestimmt. Die Fluchtgeschwindigkeit drückt die mittlere Geschwindigkeit aus, mit der sich der Proband seit dem Ausstieg aus seinem Fahrzeug bewegt, um in einen sicheren Bereich zu gelangen (hier: Erreichen einer Notrufstation oder des Notausgangs).

### 3 Modellierung des Fluchtverhaltens im österreichischen TuRisMo

Grundlage für die Untersuchung des Einflusses repräsentativer Verhaltensparameter auf Risikomodelle bildet das österreichische TuRisMo 2.0 gemäß [3]. Dieses beruht auf einem integrativen Ansatz, der eine detaillierte Analyse von Straßentunneln als Gesamtsystem, inklusive der Bewertung einer Vielzahl risikomindernder Maßnahmen, erlaubt. Das Modell kombiniert eine auf statistischen Auswertungen basierende Häufigkeitsanalyse mit einer quantitativen Schadensausmaßanalyse (Bild 1).

Zur Bewertung des Personenschadens im Brandfall werden Submodelle bezüglich des zeitlichen Verlaufs der Längsström-

mung, der räumlichen und zeitlichen Verteilung des Brandrauchs sowie der Selbstrettung der im Tunnel befindlichen Personen seriell angewendet und kombiniert. Eine detaillierte Beschreibung des österreichischen TuRisMo findet sich z. B. in [3], [4] und [5]; die Implementation einer BBA mit Wassernebel (WN) bzw. die Abbildung ihrer Wirksamkeit im TuRisMo ist in [6] zu finden.

Um den Einfluss von Verhaltensparametern zur Selbstrettung auf das Ergebnis der Schadensausmaßsimulation für Tunnelbrände zu diskutieren, wird das Evakuierungsmodell im Folgenden näher erläutert.

#### 3.1 Abbildung des Fluchtverhaltens im österreichischen TuRisMo

Das im TuRisMo angewendete Evakuierungsmodell beruht auf verschiedenen begründeten Annahmen:

- Im Tunnel befindliche Personen beginnen die Selbstrettung, wenn sie a) über geeignete Installationen vom Betriebspersonal dazu aufgefordert werden oder b) die Sichtweite durch die Brandrauchkonzentration einen kritischen Wert unterschreitet.
- Personen, die durch das Betriebspersonal zur Flucht aufgefordert werden, benötigen eine bestimmte Reaktionszeit, um das Fahrzeug tatsächlich zu verlassen.
- Personen flüchten mit einer statistisch verteilten Gehgeschwindigkeit zum nächstgelegenen Notausgang, aber niemals über den Brandort hinweg.
- Ein bestimmter Anteil an Personen verlässt den Standort des Fahrzeugs trotz eingeschränkter Sichtweite bzw. Aufforderung zur Selbstrettung nicht.

#### 3.2 Hinterlegte Werte im österreichischen TuRisMo

Die im österreichischen TuRisMo hinterlegten Werte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

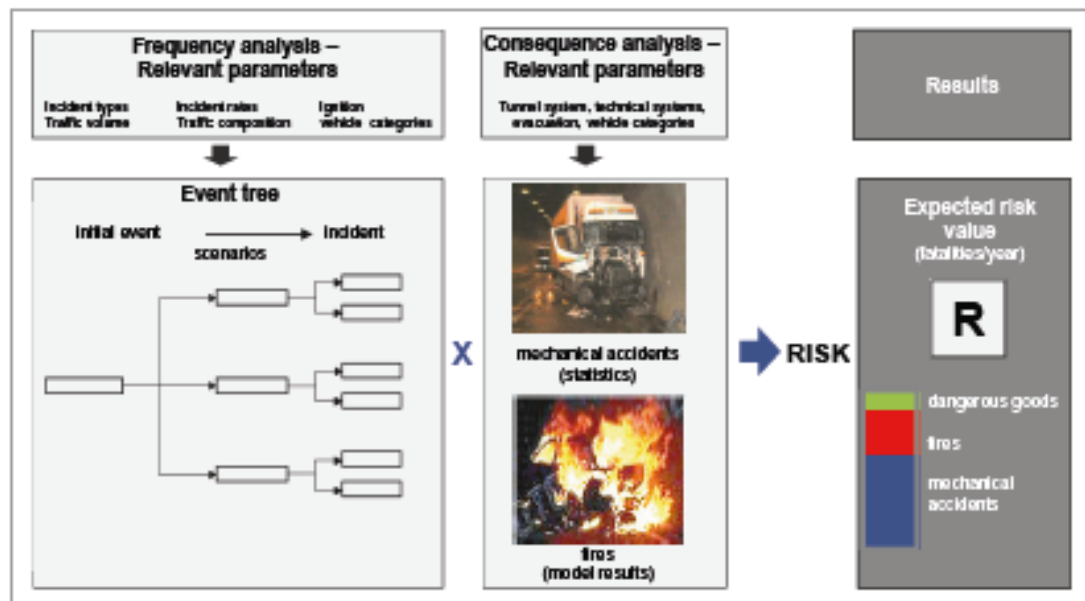


Bild 1 Basisstruktur des österreichischen TuRisMo

Parameter	Wert	Erläuterungen
Reaktionszeit	90 s	Realisieren, Verarbeiten, Entscheiden
Fluchtgeschwindigkeit	Demographische Verteilung mit einem Mittelwert von 1.15 m/s	Zur Modellierung wird eine demographische Verteilung mit einer Bandbreite von 0.75 m/s bis 1.6 m/s herangezogen
Anteil nicht flüchtender Personen	3 %	Eingeschränkte Mobilität, Verletzung, Fehlverhalten

Tabella 1 Verhaltensparameter der gegenständlichen Studie im österreichischen TuRisMo

#### 4 Probandenversuche in realen Tunneln mit automatischen BBA

Um Erkenntnisse hinsichtlich des Flucht- und Reaktionsverhaltens zu erlangen, wurden zwei reale Probandenversuche in Straßentunneln mit den Anlagentypen Hochdruckschaum (DLS) und Wassernebel (WN) durchgeführt mit dem Ziel, den Einfluss der BBA auf das Verhalten und Erleben der Verkehrsteilnehmer zu erfassen [1].

Tabella 2 gibt die Anzahl der beteiligten Probanden wieder, getrennt nach Personen, die eine Aktivierung der BBA erleben und die Anzahl derer, die als sogenannte Kontrollprobanden dienten. Untersucht wurde in einer randomisierten, kontrollierten Probandenstudie 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 Fahrzeug angehalten hatten, wurden sie mit einer Lautsprecherdurchsage zur Flucht aufgefordert. Bei den Probanden der Ereignisgruppe „mit BBA“ wurde während der Durchsage die BBA für 2 min aktiviert (Bild 2).

Die Probanden hatten ab Beginn der Durchsage 3 min Zeit zu reagieren. Der Versuch endete bei Eintreten eines der folgenden Kriterien: Versuch, einen Notruf über Handy abzusetzen; Wenden des Fahrzeugs; Erreichen bestimmter Ziele wie Notaus-

	Mit Aktivierung der BBA	Ohne Aktivierung der BBA
DLS	16	14
WN	28	26
Pärchen	3 (6)	3 (6)

Tabella 2 Anzahl der Probanden in der jeweiligen Versuchssituation

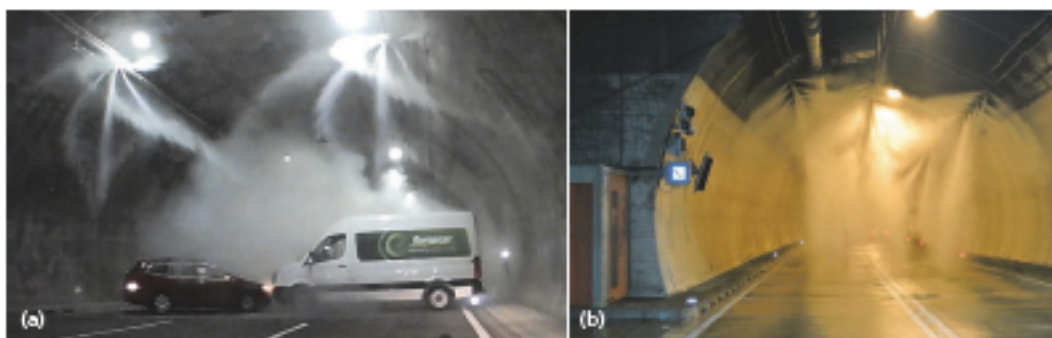


Bild 2 Situation direkt nach Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage, Typ DLS (a) und Typ WN (b)

gang, Notrufsäule; Verbleiben im Fahrzeug für 3 min; Aussteigen und Verbleiben im Szenario für 3 min. Bild 3 zeigt die Versuchsanordnung im Tunnel.

#### 5 Parametervergleich und Diskussion

##### 5.1 Ableitung der Modellparameter aus den Probandenversuchen

Die im Zuge der Probandenversuche aufgezeichneten Daten zur Selbstrettung und zum Fluchtverhalten wurden hinsichtlich der im österreichischen TuRisMo verwendeten Verhaltensparameter analysiert. Aufgrund der durchgängigen Homogenität der Datensätze ohne Aktivierung der BBA wurde die statistische Analyse für diesen Fall auf Basis des kombinierten Datensatzes bei der Tunnel durchgeführt. Bei aktivierter BBA wurden Reaktionszeiten, Fluchtgeschwindigkeiten und Anteile nicht flüchtender Personen getrennt für die beiden Tunnel mit den verschiedenen BBA-Typen untersucht, um tunnelspezifische bzw. systemspezifische Einflüsse zu erkennen. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabella 3 bzw. 4 zusammen mit den üblicherweise im österreichischen TuRisMo verwendeten Werten dargestellt.

Reaktionszeit sowie Anteil nicht flüchtender Personen gehen im Sinne eines Mittelwerts in das österreichische TuRisMo ein. Daher entsprechen die diesbezüglich dargestellten Werte in den Tabellen 3 und 4 bereits den in der Parameterstudie angewendeten Werten. Im Unterschied dazu werden die Fluchtgeschwindigkeiten über eine diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung im Risikomodell berücksichtigt. Die standardmäßig angewendete Verteilung beruht dabei auf angenommenen Fluchtgeschwindigkeiten, die nach Alter und Geschlecht differenziert werden und dem Evakuierungsmodell in [7] entnommen wurden, sowie auf der demografischen Verteilung der österreichischen Bevölkerung [8].

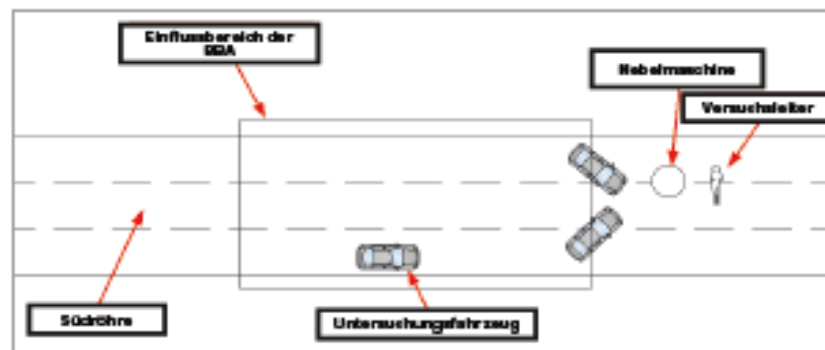


Bild 3 Versuchsanordnung im Tunnel

Parameter	Probandenversuch	TuRisMo
Reaktionszeit	30 s	90 s
mittlere Fluchtgeschwindigkeit	1.9 m/s	1.15 m/s
Anteil nicht flüchtender Personen	2 %	3 %

Tabello 3 Analyse der Probandenversuche ohne Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage

Parameter	Probandenversuch Jagdberg (DLS)	Probandenversuch Breganz (WN)
Reaktionszeit	54 s	40 s
mittlere Fluchtgeschwindigkeit	1.7 m/s	2.6 m/s
Anteil nicht flüchtender Personen	13 %	32 %

Tabello 4 Analyse der Probandenversuche mit Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage

Diese Verteilung wird im Zuge der Parameterstudie durch die diskrete tatsächliche Verteilung der Fluchtgeschwindigkeiten aus den Probandenversuchen ersetzt. Beide Verteilungen sind in Bild 4 dargestellt. Für die Parameterstudie mit aktivierter BBA wurde die Verteilung basierend auf den Probandenversuchen ohne Aktivierung der BBA verwendet, da die Datengrundlage für die Ermittlung einer eigenen Verteilung unzureichend war. Um die Mittelwerte gemäß Bild 5 zu reproduzieren, wurden die Verteilungen entsprechend verschoben.

bis zum Verlassen des Fahrzeugs beinhaltet, kann, auch ohne Vergleich mit den deutlich kürzeren Reaktionszeiten aus den Probandenversuchen, als konservativ angesehen werden. Dennoch muss festgehalten werden, dass die Probanden mit einer Versuchsanordnung konfrontiert und sich des Versuchscharakters der Situation bewusst waren. Eine gewisse Erwartungshaltung und damit eine – im Vergleich zu einer Realsituation – schnellere Reaktion ist daher anzunehmen. Die resultierenden Reaktionszeiten von 30 bis 54 s sind daher als optimistisch einzuschätzen.

## 5.2 Diskussion der Modelleingangsparameter und Allgemeingültigkeit

### 5.2.1 Reaktionszeiten

Die üblicherweise im österreichischen TuRisMo angenommene Reaktionszeit von 90 s, die die Zeitdauer vom Anhalten des Fahrzeugs und erstmaligen Abspielen der Selbstrettungsaufforderung

### 5.2.2 Fluchtgeschwindigkeiten

Die aus den beiden Studien ermittelten tatsächlichen Fluchtgeschwindigkeiten sind vergleichsweise hoch und weichen deutlich von den Standardwerten, die üblicherweise in Risikoanalysen angesetzt werden, ab. Besonders auffallend ist, dass bei stark eingeschränkter Sicht, entgegen sonstigen Annahmen [9], [10], [11],

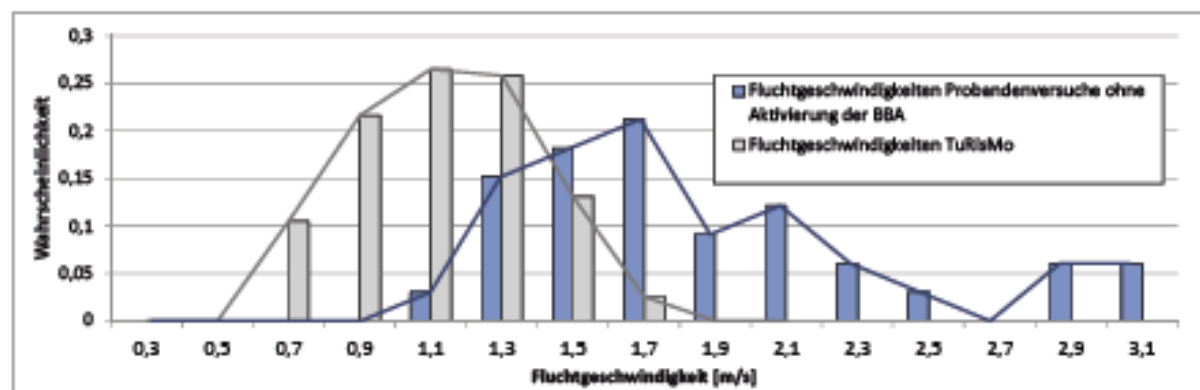


Bild 4 Verteilungen der Fluchtgeschwindigkeiten im österreichischen TuRisMo und aus den Probandenversuchen ohne Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage

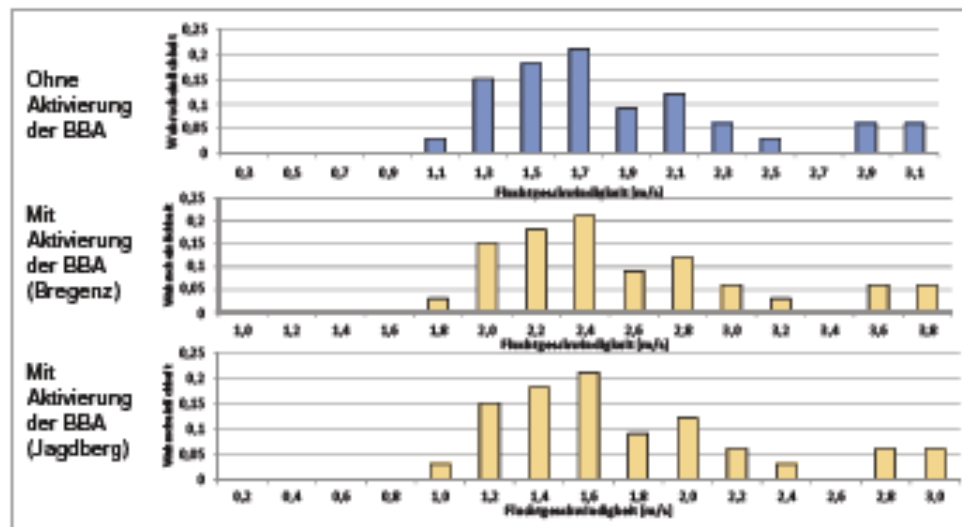


Bild 5 Verteilungen der Fluchtgeschwindigkeiten aus den Probandenversuchen ohne Aktivierung der Brandbekämpfanlage und daraus konstruierte Verteilungen der Fluchtgeschwindigkeiten bei aktivierter Brandbekämpfanlage

besonders hohe Geschwindigkeiten zu verzeichnen waren. Einige Probanden liefen regelrecht aus dem Gefahrenbereich. Zu diesem Verhalten sei angemerkt, dass der Aufenthalt im Bereich der aktivierten WN-Anlage (die hohen Gehgeschwindigkeiten traten vorwiegend bei diesem Anlagentyp auf) unangenehm ist und daher der Antrieb hoch ist, diesen Bereich rasch zu verlassen. Weiter ist zu bedenken, dass die Sicht Einschränkung und deren Auswirkung auf die Fluchtgeschwindigkeiten in der Versuchsanordnung nicht unmittelbar auf die Bedingungen eines realen Brands (Effekt der BBA kombiniert mit dichtem Brandrauch) übertragbar ist.

### 5.2.3 Anteil nicht flüchtender Personen

Die Anteile nicht flüchtender Personen von 3 % im TuRisMo und 2 % in den Probandenversuchen ohne Aktivierung der BBA, können im Hinblick auf den vergleichsweise geringen Datensatz aus den Realversuchen als gleichwertig interpretiert werden. Auffallend ist die signifikante Erhöhung des Anteils nicht flüchtender Personen bei Aktivierung der BBA auf 13 bzw. 32 %. Hierbei ist festzuhalten, dass der Probandenversuch bei fehlender Reaktion nach 180 s abgebrochen wurde und Probanden, die nicht innerhalb dieser Zeitspanne reagierten, als nicht flüchtend klassifiziert wurden. Im Unterschied dazu verbleiben nicht flüchtende Personen im österreichischen TuRisMo über die gesamte Simulationsdauer von 900 s am Standort des Fahrzeugs und sind somit über einen langen Zeitraum den Gefährdungen von Hitze und Rauchgasen ausgesetzt. Die Interpretation, alle Probanden, die innerhalb der Versuchsdauer keine Fluchtreaktion zeigten, würden auch bei einem tatsächlichen Brand über eine Zeitdauer von 900 s keine Flucht einleiten, ist damit vermutlich konservativ bzw. eine Überschätzung des Anteils nicht flüchtender Personen bei aktivierter BBA. Zusätzlich kann angenommen werden, dass der Entschluss zu flüchten und das Fahrzeug zu verlassen, durch die real wahrnehmbare Bedrohung sowie die Beobachtung anderer flüchtender Personen erleichtert wird (Gruppeneffekt).

### 5.2.4 Gruppeneffekte

Zusätzlich zu den bereits diskutierten Parametern wurden im Zuge der zweiten Studie mit der BBA vom Typ WN, Gruppen-

effekte untersucht. Die Versuchsreihe wurde um sechs Probandenpaare erweitert, um ein Indiz auf den Einfluss von sozialer Interaktion zu erhalten. Dabei stellte sich tendenziell heraus, dass soziale Interaktion das Fluchtverhalten positiv beeinflussen kann. Die Auswirkungen von Gruppeneffekten auf das Fluchtverhalten sind jedoch nicht eindeutig vorauszusagen und können auch in einen negativen Effekt münden [12] [13]. Dieser negative Effekt beschreibt die Situation, dass, sofern nicht eine Person die Initiative für eine Evakuierung ergreift, andere dies auch nicht tun.

Grundsätzlich ist das menschliche Verhalten nur schwer vorhersehbar und stellt eine sehr komplexe Komponente dar. Daher ist die Abbildung innerhalb von Evakuierungsmodellen auch immer mit bestimmten Unsicherheiten, insbesondere im Hinblick auf das Verhalten von Einzelpersonen, behaftet, und daraus resultierende Ergebnisse müssen mit Bedacht diskutiert werden.

## 6 Parameterstudie im TuRisMo

### 6.1 Modelltunnel

Um den Einfluss veränderter Verhaltensparameter auf das Ergebnis von Risikomodelle und -betrachtungen zu untersuchen, wird das österreichische TuRisMo auf einen Modelltunnel mit allgemein als signifikant einzustufendem Brandrisiko angewendet. Als Modelltunnel wurde ein 1.200 m langer Gegenverkehrstunnel gewählt, dessen Charakteristika in Tabelle 5 zusammengefasst sind.

### 6.2 Resultate

Die Parameter bezüglich des Fluchtverhaltens werden im Zuge der Anwendung des TuRisMo auf den gegenständlichen Modelltunnel sukzessive entsprechend den dargestellten Auswertungen der Probandenversuche variiert und mit dem Risikowert unter Verwendung der im Modell hinterlegten Evakuierungsparameter verglichen. Das Ergebnis der Parameterstudie ohne Aktivierung der BBA ist in Bild 6 dargestellt. Den Referenzwert bildet dabei der Risikowert aufgrund der unver-

änderten Verhaltensparameter im österreichischen TuRisMo. Wie erwartet, führen alle Parametervariationen gemäß Tabelle 1 zu einer Reduktion des Brandrisikos. Mit einer Reduktion des Gesamtrisikos von rund 17 % entfällt dabei die größte Reduktion auf die Erhöhung der Fluchtgeschwindigkeit. Eine Verkürzung der Reaktionszeit von 90 auf 30 s ist mit einer Risikoreduktion von ca. 8 % und einer Verringerung des Anteils nicht flüchtender Personen mit einer Reduktion des Gesamtrisikos von 2 % verknüpft. Die gleichzeitige Berücksichtigung aller Parameterveränderungen aus den Probandenversuchen ohne Aktivierung der BBA führt zu einem um ca. 26 % verringerten Gesamtrisiko.

Bild 7 zeigt das Ergebnis der Parameterstudie mit Aktivierung der BBA. Wiederum resultiert die größte Reduktion des Gesamtrisikos aus den erhöhten Fluchtgeschwindigkeiten. Die verkürzten Reaktionszeiten führen zu einer Risikoreduktion von rund 2 %. Im Gegensatz zur Versuchsgruppe ohne Aktivierung der BBA, war der Anteil nicht flüchtender Personen bei Aktivierung der BBA deutlich erhöht. Die damit verbundene Erhöhung des Gesamtrisikos beträgt rund 26 bzw. 9 %. Die durch verkürzte Reaktionszeiten und erhöhte Fluchtgeschwindigkeiten induzierte Risikoreduktion sowie die gegenläufige Risikoerhöhung infolge des größeren Anteils nicht flüchtender Personen führt in Kombination zu einer Gesamtrisikoreduktion von ca.

4 % im Falle der Parameterveränderung gemäß den Versuchen im Tunnel mit BBA vom Typ DLS bzw. einer Gesamtrisikoerhö-  
hung von rund 12 % im Falle der Parameterveränderung gemäß den Versuchen im Tunnel mit BBA vom Typ WN.

## 7 Diskussion und Schlussfolgerung

Die Versuchsdaten zeigen sowohl deutlich höhere Fluchtgeschwindigkeit als auch deutlich kürzere Reaktionszeiten im Vergleich zu den konventionellen Modelleingangsparametern auf. Dennoch ist hier zu berücksichtigen, dass diese guten Ergebnisse unter Umständen auch dadurch bedingt sind, dass es sich um eine Versuchssituation handelte und die Probanden sich dessen auch bewusst waren. Aufgrund der Erwartungshaltung zur Konfrontation mit einem Ereignis und der Situation, allein im Tunnel zu sein, wie auch den Anspruch daran zu haben, diese Aufgabe gut zu bewerkstelligen, sind Beeinflussungen auf das Ergebnis nicht auszuschließen. Dennoch gilt es, eine Abschätzung zwischen den grundsätzlich konservativen, konventionellen Annahmen und den doch sehr optimistischen Ergebnissen in Bezug auf Fluchtgeschwindigkeiten und Reaktionszeiten vorzunehmen. Dieser Schluss lässt sich unabhängig von der Installation bzw. Aktivierung einer BBA ziehen.

Im Unterschied dazu muss der Anteil nicht flüchtender Personen differenziert diskutiert werden. Während ohne Aktivierung der BBA der im TuRisMo hinterlegte Wert von 3 % gut mit den Auswertungen der Probandenversuche übereinstimmt, zeigt sich bei Aktivierung der BBA eine deutliche Erhöhung des Anteils nicht flüchtender Personen. Auch wenn durch gewisse Einschränkungen hinsichtlich kurzer Versuchsdauer und teilweise fehlendem Gruppeneffekt der Anteil nicht reagierender Personen vermutlich überschätzt wird, sollte zukünftig über die Berücksichtigung dieses Effekts in der Risikobewertung diskutiert und über geeignete Gegenmaßnahmen zur Kompensation der Fluchthemmung nachgedacht werden.

Zusammenfassend zeigt der Vergleich der im Modell hinterlegten und der aus den Probandenversuchen abgeleiteten Parameterwerte eine Schwankungsbreite auf, innerhalb derer sich der reale Erwartungswert befinden dürfte (nota bene: tatsächlich ist jedoch auch in der Realität mit einer im Einzelfall großen Schwankungsbreite zu rechnen [12]). Es kann festgehalten werden, dass

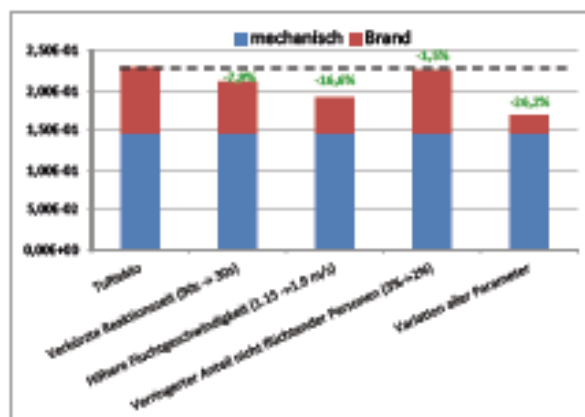


Bild 6 Parameterstudie des Risikowartungswerts ohne Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage

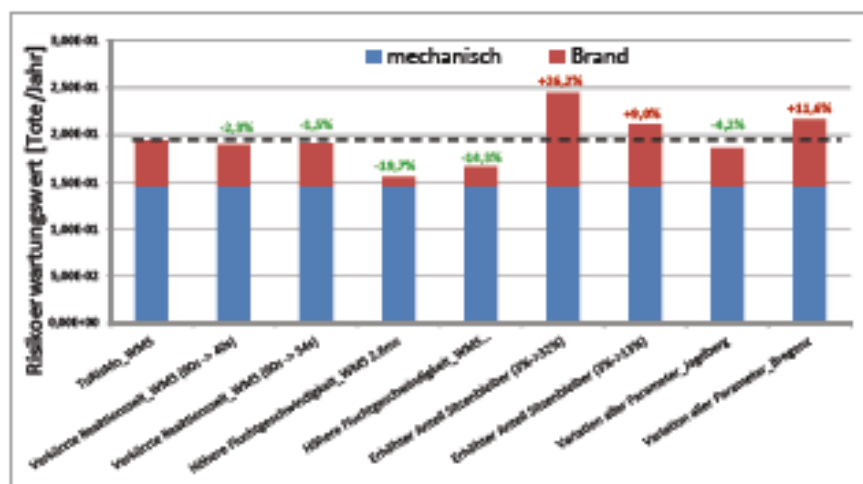


Bild 7 Parameterstudie des Risikowartungswerts mit Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage

Parameter	Probandenversuch
Länge	1.200 m
Verkehrsführung	Gegenverkehr
Längsneigung	3 %
Lüftungsart	Längsklüftung mit Strahlventilatoren
Notausgangsabstand	400 m
Verkehr	20.000 Kfz / h
	15 % SVA

Tabella 5 Eigenschaften des Modelltunnels

zum einen die Handlungsabläufe, wie sie in Risikomodellen abgebildet sind, in guter Näherung den tatsächlichen Herausforderungen entsprechen, die flüchtende Personen zu bewältigen haben. Zum anderen stimmen die wenigen Verhaltensparameter, die zur spezifischen Modellierung eingeführt und auf Basis von Plausibilitätsüberlegungen und Erfahrungsberichten abgeleitet wurden, gut mit den Auswertungen der Realversuche überein. Tendenziell sind die derzeit in der Praxis verwendeten Parameter zur Abbildung des menschlichen Verhaltens konservativ, was eine Überschätzung des Absolutwerts des Brandrisikos zur Folge hat. Da die Ergebnisse von Risikoanalysen üblicherweise mit relativen (vergleichenden) Bewertungsansätzen beurteilt werden, würde selbst eine erhebliche Überschätzung des Absolutwerts des Brandrisikos nicht zwangsläufig zu anderen Ergebnissen bezüglich der auf der Grundlage von Risikomodellen getroffenen Entscheidungen – z. B. Sicherheitsmaßnahmen – führen.

Grundsätzlich ist es erforderlich, bestehende Modelle kontinuierlich auf ihre Aktualität aller Eingangsparameter hin zu überprüfen, um gegebenenfalls Anpassungen an neue Erkenntnisse vornehmen zu können und dadurch deren Aussagequalität und Realitätsnähe zu verbessern. Dazu liefern realitätsnahe Probandenversuche in realen Tunnelanlagen – neben der Auswertung von Verhaltensmustern in realen Unfällen und Bränden – einen wertvollen Beitrag.

#### Literatur

- [1] Mühlberger, A., Plab, A., Probst, T.: Analyse des Reaktions- und Fluchtverhaltens von Tunnelnutzern bei einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage anhand von Realversuchen (FE 15.0607/2014/ERB). Unveröffentlichter Projektbericht der Universität Regensburg im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) Deutschland, 2016.
- [2] Kuligowski, E.: The process of human behavior in fires: US Department of Commerce. National Institute of Standards and Technology, 2009.
- [3] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr: RVS 09.03.11 Tunnelrisikoanalysemodell. Wien, 2015.
- [4] Forster, C., Kohl, B., Wiesholzer, S.: Methodologies for accurate risk modeling in the context of integrated quantitative risk analysis. 16th ISAVFT, BHR Group, Seattle, 2015.
- [5] Nakahori, J., Sakaguchi, T., Kohl, B., Forster, C., Vardy, A. E.: Risk assessment of zero-flow ventilation strategy for fires in bidirectional tunnel with longitudinal ventilation. 16th ISAVFT, BHR Group, Seattle, 2015.
- [6] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln (FE 15.0563/2012/ERB).
- [7] Ando, K., Ota, H., Oki, T.: Forecasting the flow of people, Railway Research Review. Vol. 45, No. 8, 1988.
- [8] Statistik Austria: Statistisches Jahrbuch 2003. Verlag Österreich, Wien, 2004.
- [9] Mayer, G.: Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation. Dissertation, Aachener Mitteilung Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47, 2006.
- [10] An, T.: Irritating effects on fire smoke on visibility. Fire Science and Technology Vol. 5 (1985), No. 1, pp. 79–90.
- [11] Galea, E. R., Lawrence, P. J., Gwynne, S., Filippidis, L., Blackshields, D., Cooney, D.: Building Exodus – The evacuation model for the building industry. Theory Manual. Fire Safety Engineering Group, University of Greenwich, London, 2017.
- [12] Martens, M. H.: Modelling Human Behaviour in Tunnels – Expectations and Reality. In: 4th International Conference Tunnel Safety and Ventilation, Graz, 2008.
- [13] Boag, L. C.: Behavior of drivers during tunnel evacuation. In: Sauer, J. (Ed.) (Re)Claiming the Underground Space. Lisse (NL), Abingdon, Exton (PA), Tokyo: Balkema, 2003 pp. 213–217.

Anzeige



**SCHLEIER- UND FLÄCHENINJEKTION**  
**CURTAIN INJECTION AND**  
**MASONRY INJECTION**



„STUWA-Expo 2017“  
**Besuchen Sie uns**  
**Halle 4, D113**  
 Visit us  
**Hall 4, D113**



**Hersteller von Injektortechnik**  
 Manufacturer of Injection Equipment

DESOL GmbH  
 Gewerbestraße 35  
 D-36340 Kalbsay/Rhön

Tel.: +49 6655 9436-0  
 Fax: +49 6655 9436-6666  
 info@desol.de | [www.desol.de](http://www.desol.de)