



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunnel durch flexible Vorrichtungen**

**Reduction of the consequences of fire incidents in road  
tunnels by means of flexible devices**

**Réduction des conséquences des incendies dans les  
tunnels routiers par dispositifs flexible**

**Amberg Engineering AG  
Dr. Marco Bettelini  
Samuel Rigert  
Dr. Nikolaus Seifert**

**Albrecht J.E. AG  
Joachim Albrecht**

**Risk Engineering GmbH  
Hugues Lüdi**

**Forschungsauftrag VSS 2010/202\_OBF auf Antrag des  
Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute  
(VSS)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunnel durch flexible Vorrichtungen**

**Reduction of the consequences of fire incidents in road  
tunnels by means of flexible devices**

**Réduction des conséquences des incendies dans les  
tunnels routiers par dispositifs flexible**

**Amberg Engineering AG**  
**Dr. Marco Bettelini**  
**Samuel Rigert**  
**Dr. Nikolaus Seifert**

**Albrecht J.E. AG**  
**Joachim Albrecht**

**Risk Engineering GmbH**  
**Hugues Lüdi**

**Forschungsauftrag VSS 2010/202\_OBF auf Antrag des  
Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute  
(VSS)**

## Impressum

### Forschungsstelle und Projektteam

#### Projektleitung

Dr. Marco Bettelini

#### Mitglieder

Samuel Rigert

Dr. Nikolaus Seifert

Joachim Albrecht

Hugues Lüdi

### Federführende Fachkommission

Fachkommission 2: Tunnel

### Begleitkommission

#### Präsident

Urs Welte

#### Mitglieder

Christian Gammeter

Werner Hufschmid

Hans Mundwiler

Maximilian Wietek

Robert Willi

Dr. Franz Zumsteg

### Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

### Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
	<b>Résumé</b> .....	<b>9</b>
	<b>Summary</b> .....	<b>11</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>13</b>
1.1	Zielsetzung der Forschung.....	13
1.2	Hintergrund, Ausgangslage und Abgrenzung .....	13
1.3	Methodisches Vorgehen .....	15
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>16</b>
2.1	Zielsetzung und Informationsquellen .....	16
2.2	Tunnelaerodynamik und Tunnellüftung.....	16
2.3	Brandschutz in Gebäuden.....	17
2.4	Flexible Feuer- und Rauchschutzvorrichtungen .....	20
2.4.1	Übersicht .....	20
2.4.2	Rauchschutzvorrichtungen.....	21
2.4.3	Feuerschutzvorrichtung.....	22
2.5	Erfahrungen mit flexiblen Feuer- und Rauchschutzvorrichtungen in Tunnel .....	24
2.5.1	Einleitung.....	24
2.5.2	Streifenvorrichtung .....	24
2.5.3	UPTUN – Aufblasbare Vorrichtung .....	26
2.5.4	Abschnittsbildung mit fester Vorrichtung.....	27
2.5.5	Aufblasbare Vorrichtung für U-Bahntunnel .....	28
2.5.6	Resilient Tunnel Plug – aufblasbare Vorrichtung für U-Bahntunnel .....	28
<b>3</b>	<b>Anforderungen</b> .....	<b>29</b>
3.1	Ereignisphasen .....	29
3.2	Selbstrettung .....	29
3.3	Intervention.....	33
3.4	Übersicht Selbstrettung und Intervention .....	34
3.5	Fazit.....	35
<b>4</b>	<b>Voruntersuchungen</b> .....	<b>36</b>
4.1	Einleitung und Zielsetzung .....	36
4.2	Selektionsverfahren .....	36
4.2.1	Physikalische Wirkprinzipien.....	36
4.2.2	Eignung der Strassentunnel für den Einsatz flexibler Vorrichtungen.....	37
4.2.3	Tunnelstatistik / Tunnelcharakteristik .....	39
4.2.4	Ergebnisse des Selektionsverfahrens.....	39
4.3	Ergebnisse der Voruntersuchung.....	40
4.3.1	Streifenvorrichtungen – Durchlässig .....	40
4.3.2	Schürzenvorrichtungen – Teilschliessend .....	41
4.3.3	Rauchschutz- / Brandschutzvorrichtung – Vollschiessend .....	44
4.4	Bewertungsverfahren .....	47
<b>5</b>	<b>Hauptuntersuchung Sicherheitsgewinn</b> .....	<b>48</b>
5.1	Grundlagen zur Hauptuntersuchung .....	48
5.2	Natürlich belüftete Tunnel mit grosser Längsneigung .....	51
5.2.1	Referenztunnel ohne Vorrichtung .....	51
5.2.2	Streifenvorrichtungen .....	52
5.2.3	Rauchschutzvorrichtungen – Voll-Abschluss.....	57
5.3	Längsbelüftete Tunnel.....	59
5.3.1	Referenztunnel ohne Vorrichtung .....	59
5.3.2	Tunnel mit Schürzenvorrichtungen .....	60
5.4	Bewertung von Selbstrettung und Intervention gegenüber Tunnel ohne flexible Vorrichtungen.....	66
5.4.1	Selbstrettungsbereiche .....	66
5.4.2	Qualitative Bewertung Intervention .....	68
5.5	Erkenntnisse und Folgerungen .....	69
<b>6</b>	<b>Hauptuntersuchung der Sekundärkriterien</b> .....	<b>71</b>

6.1	Technische Machbarkeit .....	71
6.2	Konsequenzen von Fehlauflösung.....	71
6.3	Schutz von Sachwerten .....	72
6.4	Investitionskosten .....	72
6.5	Betriebs- und Unterhaltskosten .....	73
<b>7</b>	<b>Fallstudie .....</b>	<b>74</b>
7.1	Einleitung .....	74
7.2	Ausgangssituation.....	74
7.3	Szenarien .....	75
7.4	Ergebnisse .....	76
7.5	Schlussfolgerungen .....	77
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....</b>	<b>78</b>
8.1	Rückblick und Erkenntnisse aus der Untersuchung .....	78
8.2	Geeignete Vorrichtungen .....	78
8.2.1	Übersicht.....	78
8.3	Entwicklungsstand und weitere Anforderungen .....	83
8.4	Empfehlungen zum weiteren Vorgehen.....	83
	<b>Anhänge.....</b>	<b>86</b>
	<b>Abkürzungen .....</b>	<b>97</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>99</b>
	<b>Projektabschluss .....</b>	<b>101</b>
	<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen .....</b>	<b>104</b>

## Zusammenfassung

### Zielsetzung

Flexible Vorrichtungen gehören in Gebäuden längst zu den Standardmassnahmen, um die Auswirkungen von Rauch und Hitze bei Bränden in Grenzen zu halten. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes „Reduktion der Unfallfolgen bei Bränden durch flexible Vorrichtungen“ wurde untersucht, inwieweit flexible Vorrichtungen auch in Strassentunneln zur Anwendung kommen könnten, wo mit ganz anderen Randbedingungen und Anforderungen zu rechnen ist.

### Vorgehensweise

In einem ersten Schritt wurden die auf dem Markt vorhandenen Systeme analysiert, unter besonderer Berücksichtigung der physikalischen Wirkweise. Das ermöglichte die Evaluation von Vorrichtungen entsprechend ihrer Wirkung in Tunneln verschiedener Kategorien (natürlich belüftete Tunnel, längsbelüftete Tunnel, Tunnel mit Rauchabsaugung) sowie eine vertiefte Untersuchung der Vorrichtungen hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten.

Für die vertiefte Untersuchung wurden schliesslich drei Vorrichtungsarten betrachtet:

- Streifenvorrichtung für natürlich belüftete Tunnel
- Vollständig schliessende Vorrichtung für natürlich belüftete Tunnel
- Schürzenvorrichtung für längsbelüftete Tunnel.

Mittels CFD-Berechnungen wurde die Rauchausbreitung im Brandfall für verschiedene Tunnelkonfigurationen (Längsneigung, Tunnelprofil) mit und ohne Vorrichtung berechnet. Die Auswertung der Modellierungen wurde basierend auf der Entwicklung der Sichtweite (Rauchdichte) sowie den zeitlichen Randbedingungen für die Selbstrettung vorgenommen. Ob Vorrichtungen zu einer Verbesserung der Situation führen, kann durch einfache Vergleiche der Situationen mit und ohne Vorrichtung erfasst werden.

### Ergebnisse

#### **Streifenvorrichtung für natürlich belüftete Tunnel**

Streifenvorrichtungen führen zu einer Reduktion der Längsgeschwindigkeit der Tunnelluft in natürlich belüfteten Tunneln. Dadurch werden auch die Rauchausbreitung verzögert und die Bedingungen während der Selbstrettungsphase verbessert. Damit Streifenvorrichtungen eine gute Wirkung zeigen, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Tunnel hat eine Längsneigung von über 3%
- Tunnel hat eine Länge von mehr als 500 m
- Vorrichtungen können maximal 2 Minuten nach Brandausbruch aktiviert werden.

Bei Streifenvorrichtungen sind noch gewisse Sicherheitsbedenken vorhanden, weil die Vorrichtung über den gesamten Tunnelquerschnitt ausgebreitet wird und somit als Hindernis wahrgenommen werden kann. Streifenvorrichtungen sind zwar grundsätzlich so konstruiert, dass sie sowohl zu Fuss als auch mit Fahrzeugen passiert werden können. Die Reaktionen der Tunnelbenutzer beim Antreffen einer ausgefahrenen Streifenvorrichtung sind aber nicht abschätzbar und sollten weiter untersucht werden.

#### **Vollständig schliessende Vorrichtung für natürlich belüftete Tunnel**

Wirkung und Einsatz von vollständig schliessende Vorrichtungen ist gleich wie bei Streifenvorrichtungen, jedoch ist die Bremswirkung auf Längsströmungen viel stärker. Das Einsatzgebiet von vollständig schliessenden Vorrichtungen sind daher Tunnel mit hoher Geschwindigkeit der Längsströmung, wo Streifenvorrichtungen nicht mehr effizient zur Reduktion der Längsströmung eingesetzt werden können. Die Voraussetzungen können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Tunnel mit hoher Längsneigung und/oder starkem Portalwind
- Tunnel mit einer Länge von mehr als 500 m

- Vorrichtungen können maximal 2 Minuten nach Brandausbruch aktiviert werden.

Vollständig schliessende Vorrichtungen können mit Fahrzeugen nicht passiert werden. Die Sicherheitsbedenken sind darum grösser als bei Streifenvorrichtungen. Zusätzlich ergeben sich Einschränkungen bezüglich Einsatzkonzept der Interventionskräfte.

Aerodynamisch betrachtet sind vollständig schliessende Vorrichtungen sinnvoll und können das Schadenspotenzial durch Rauchausbreitung reduzieren. Die Vorbehalte gegen einen Einbau sind aber angesichts der unmöglichen Durchfahrt hoch und müssten vor einer Realisierung durch vertiefte Untersuchungen entschärft werden können.

### **Schürzenvorrichtung für längsbelüftete Tunnel**

Die Schürzenvorrichtungen haben in längsbelüfteten Tunneln mit Gegenverkehr oder mit Richtungsverkehr und hoher Stauwahrscheinlichkeit grosses Potenzial, die Sicherheit von Personen im Ereignisfall zu erhöhen. Sie unterbinden Rückströmung des Rauches gegen die Lüftungsrichtung auch bei sehr tiefer Geschwindigkeit der Tunnel längsströmung. Gegenüber konventioneller Längslüftung kann so die Rauchausbreitung stark verzögert werden, was die Zeit für die Selbstrettung erhöht. Folgende Voraussetzungen müssen für einen Einbau erfüllt sein:

- Tunnel mit Längslüftung
- Verkehrsregime „Gegenverkehr“ oder „Richtungsverkehr mit hoher Stauwahrscheinlichkeit“
- Ausfahren der Rauchschürzen maximal 2 Minuten nach Brandausbruch
- Genaue Lokalisation der Brandquelle notwendig
- Schürze muss durchfahrbar konstruiert werden

Diese Vorrichtung führt grundsätzlich nicht zu Problemen bezüglich Durchfahrt, da die Vorrichtung nahe des Ereignisortes (Abstand < ca. 100 m) aktiviert wird und der Verkehr bis zur Aktivierung (1 – 2 Minuten) der Schürzenvorrichtung aufgrund des Brandes zum Stillstand gekommen ist.

Die in dieser Untersuchung erzielten Ergebnisse basieren rein auf 3D-CFD Simulationen. Vor Realisation sollten diese neuartigen Ergebnisse mittels realen Experimenten, evtl. an einer Modellanlage bestätigt werden, und exakte Vorgaben zur Dimensionierung der Vorrichtung liefern.

### **Schlussfolgerungen**

Bei gegebenen Voraussetzungen kann mittels flexibler Vorrichtung die Selbstrettungsphase in Strassentunneln im Brandfall verlängert werden. Flexible Vorrichtungen führen also zu höherer Sicherheit. Die Resultate der vorliegenden Arbeit müssen aber weiter vertieft werden. Da es sich bei den Vorrichtungen um neuartige Elemente im Strassenverkehr handelt, muss der Aspekt des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer bei der Anwendung der Vorrichtungen untersucht werden. Ein weiteres Thema betrifft die Auswahl optimaler Hilfsmittel, um Verkehrsteilnehmer zu informieren und ihr Verhalten zu steuern. Erfahrungen können diesbezüglich z.B. über Versuche mit Probanden an einem Simulator gewonnen werden.

## Résumé

### Objectif

Des dispositifs flexibles font déjà partie des mesures standard dans les bâtiments pour limiter les conséquences de la fumée et la chaleur en cas d'incendies. Dans le cadre du présent projet de recherche „Réduction des conséquences des incendies par dispositifs flexibles“, il a été analysé jusqu'à quel point ces dispositifs peuvent être appliqués dans des tunnels routiers où des conditions cadres et des exigences complètement différent règnent.

### Approche

Dans une première étape, les systèmes qui sont disponibles sur le marché ont été analysés en considérant leur mode d'action physique. Cela permettait d'évaluer des dispositifs selon leur modes d'action dans des tunnels des différentes catégories (tunnels avec ventilation naturelle, tunnels avec ventilation longitudinale, tunnels avec extraction de fumée) ainsi qu'une analyse approfondie des dispositifs concernant leur champs d'applications.

Pour l'analyse approfondie, trois types de dispositifs ont été considérés:

- Rideaux perméables pour des tunnels avec ventilation naturelle
- Rideaux complets pour des tunnels avec ventilation naturelle
- Rideaux partiels pour des tunnels avec ventilation longitudinale.

À l'aide des calculs CFD, la propagation de fumée en cas d'incendie a été calculée pour des différentes configurations de tunnel (inclination longitudinale, profil du tunnel) avec et sans des dispositifs. L'évaluation des modélisations a été effectuée sur la base du développement de la visibilité (densité de la fumée) ainsi que des conditions cadres pour l'autosauvetage. Si ces dispositifs pourraient améliorer la situation peut être relevé à l'aide d'une comparaison simple des situations avec et sans des dispositifs.

### Résultats

#### Rideaux perméables pour des tunnels avec ventilation naturelle

Des rideaux perméables réduisent la vélocité longitudinale des flux d'air dans des tunnels avec ventilation naturelle. Cela aide aussi à ralentir la propagation de fumée et à améliorer les conditions pendant la phase d'autosauvetage. Afin que les rideaux perméables puissent être efficaces, les conditions suivantes doivent être réunies:

- Le tunnel a une inclination longitudinale de plus de 3%
- Le tunnel a une longueur de plus de 500 m
- Le dispositif peut être activé au plus tard 2 minutes après le déclenchement de l'incendie

Des scrupules concernant les rideaux perméables persistent parce que ce dispositif s'étend à travers le profil entier du tunnel et, pour cette raison, peut être aperçu comme une barrière. En générale, les rideaux perméables sont construits de sorte qu'ils peuvent être traversé à pied ainsi qu'avec de véhicules, mais les réactions des usagers des tunnels à l'encontre de ce dispositif ne peuvent pas être estimées. Celles-ci devraient faire l'objet d'une investigation.

#### Rideaux complet pour des tunnels avec ventilation naturelle

L'effet et l'application des rideaux complet sont les mêmes comme chez les rideaux perméables, mais l'action du frein sur les flux longitudinaux d'air est plus forte. Pour cette raison, ce dispositif est appliqué dans des tunnels où les flux longitudinaux d'air atteignent une grande vitesse et des rideaux perméables ne pourraient plus réduire ces flux de manière efficace. Les conditions peuvent être résumées comme suit:

- Des tunnels avec une grande inclination longitudinale et/ou des vents fort provenant du débouché du tunnel

- Des tunnels avec une longueur de plus de 500 m
- Le dispositif peut être activé au plus tard 2 minutes après le déclenchement de l'incendie

Les rideaux complets ne peuvent pas être traversés par des véhicules. Pour cette raison, les objections de sécurité sont plus considérables que pour les rideaux perméables. En plus, des restrictions concernant le plan des troupes d'intervention résultent de ce dispositif.

Dans la perspective de l'aérodynamique, les rideaux complets sont raisonnable et peuvent réduire le potentiel de dommage causé par la propagation de fumée. Pourtant, les objections contre une application sont graves, vu que les véhicules ne peuvent pas traverser le dispositif, et devraient être réfutées à l'aide des investigations approfondies avant une éventuelle réalisation.

### **Rideaux partiels dans des tunnels avec ventilation longitudinale**

Les rideaux partiels peuvent augmenter la sécurité des personnes en cas d'incendies dans des tunnels ventilés longitudinalement avec circulation à double sens ou à sens unique avec haute probabilité de bouchon. Ils empêchent que les fumées puissent circuler contre la direction de la ventilation même si les flux longitudinaux d'air sont très lents. Face à la ventilation longitudinale traditionnelle, la propagation de fumée peut être ralentie considérablement, ce qu'augmente le temps pour l'autosauvetage. Les conditions suivantes doivent être réunies pour une installation:

- Tunnel avec ventilation longitudinale
- Régime de circulation „à double sens“ ou „à sens unique avec une haute probabilité de bouchon“
- Le dispositif peut être activé au plus tard 2 minutes après le déclenchement de l'incendie
- Localisation exacte de la source de l'incendie est nécessaire
- Les rideaux doivent être construits de sorte que des véhicules peuvent traverser

En général, ce dispositif n'engendre pas des problèmes concernant le passage vu qu'il est activé proche du lieu de l'incident (distance < env. 100 m) et le trafic a arrêté à cause de l'incendie avant que le dispositif ait été activé (1 – 2 minutes).

Les résultats qui ressortent de cette analyse s'appuient uniquement sur des simulations CFD en 3D. Avant une réalisation, ces nouveaux résultats doivent être confirmés à l'aide des expériences réelles, par exemple en utilisant une installation d'essai, et ainsi livrer des informations exactes pour le dimensionnement du dispositif.

### **Conclusions**

Si les conditions sont réunies, les dispositifs flexibles aident à prolonger la phase d'autosauvetage en cas d'incendies dans les tunnels routiers. Ils peuvent ainsi augmenter la sécurité. Cependant, les résultats du présent rapport doivent faire l'objet d'une analyse approfondie. Vu que les dispositifs flexibles constituent des éléments nouveaux dans la circulation routière, le comportement des usagers de la route au regard de l'application du dispositif doit être analysé. Un autre sujet touche le choix des moyens utilisés pour informer les usagers de la route et piloter leur comportement. De l'expérience à ce sujet peut être gagnée par exemple en conduisant des tests avec des participants qui pilotent un simulateur.

## Summary

### Objective

Flexible devices are commonly used in buildings as a standard measure to keep the consequences of smoke and heat in the event of a fire as low as possible. Within the scope of the present research project „Reduction of the consequences of fire incidents in road tunnels by flexible devices“, it was investigated to what extent such devices can be used in road tunnels, where completely different boundary conditions and requirements apply.

### Approach

In a first step, available systems were analysed paying special attention to their physical mode of action. This enabled an evaluation of the devices according to their mode of action in various types of tunnels (tunnels with natural ventilation, tunnels with longitudinal ventilation, tunnels with a smoke extraction system) as well as an in-depth analysis of the devices regarding their fields of application.

For the in-depth analysis, three types of devices were considered:

- Permeable curtains for naturally ventilated tunnels
- Fully closing curtains for naturally ventilated tunnels
- Partially closing curtains for tunnels with longitudinal ventilation.

By means of CFD calculations, the smoke propagation in the event of a fire was calculated for various tunnel configurations (longitudinal inclination, tunnel profile) both with and without devices. The evaluation of the models took place based on the development of visibility (smoke density) as well as the temporal boundary conditions for self-rescue. Whether devices lead to an improvement of the situation can be determined by simply comparing the situations where devices are applied with the situations where no devices are applied.

### Results

#### Permeable curtains for naturally ventilated tunnels

Permeable curtains reduce the longitudinal velocity of the tunnel air in naturally ventilated tunnels. This in turn delays the smoke propagation and improves the conditions during self-rescue. In order for permeable curtains to be efficient, the following requirements have to be met:

- Tunnel has a longitudinal inclination of over 3%
- Tunnel has a length of more than 500 m
- Devices can be activated 2 minutes after the outbreak of a fire at the latest.

There are some safety concerns regarding permeable curtains, as the device covers the complete tunnel cross-section and can, therefore, be perceived as a barrier. Generally, permeable curtains are designed in a way that they can be crossed on foot as well as with vehicles. However, how tunnel users react when they face the curtains cannot be predicted and has to be further investigated.

#### Fully closing devices for naturally ventilated tunnels

The effect and application of fully closing devices are similar to permeable curtains, but the breaking effect on the longitudinal air flows is much stronger. Fully closing devices are therefore applied in tunnels where the longitudinal flow reaches a high velocity and permeable curtains cannot reduce the longitudinal flow in an efficient manner anymore. The requirements are the following:

- Tunnel with a high longitudinal inclination and/or strong wind from the portals
- Tunnel with a length of more than 500 m
- Devices can be activated 2 minutes after the outbreak of a fire at the latest.

Fully closing devices cannot be crossed by vehicles. Therefore, the safety concerns are even greater than for permeable curtains. In addition, they restrict the emergency concept of the rescue forces.

From an aerodynamical point of view, the application of fully closing devices makes sense as they can limit the potential for damage caused by smoke propagation. However, due to the fact that vehicles cannot drive past the devices, the reservations against their application are high and would have to be refuted by more detailed investigations before implementation.

#### **Partially closing curtains in tunnels with longitudinal ventilation**

In longitudinally ventilated tunnels with two-way traffic or one-way traffic and high probability of traffic jams, partially closing curtains have great potential to increase the safety of people in the event of a fire. They prevent the smoke from flowing back against the direction of the ventilation even in case of a very slow longitudinal air flow. Compared to conventional longitudinal ventilation, the smoke propagation can be considerably delayed which in turn increases the time for self-rescue. The following requirements have to be fulfilled for an installation.

- Tunnel with longitudinal ventilation
- Tunnel with two-way traffic or one-way traffic with high probability of traffic jams
- Activation of the curtains 2 minutes after the outbreak of the fire at the latest
- Exact localisation of the source of the fire is necessary
- Curtain has to be designed so that vehicles can drive through

This device does generally not entail any difficulties for the passing through of vehicles, because it is activated close to the place of the incident (distance < approx. 100 m) and the traffic will have come to a halt due to the fire before the curtains have been activated (1 – 2 minutes).

The results that are gained from this analysis are based on 3D CFD simulations only. Before implementation, these innovative results are to be confirmed by means of real experiments, e.g. in a testing facility, which will provide exact guidelines for the dimensioning of the devices.

#### **Conclusions**

If the corresponding requirements are fulfilled, flexible devices can help to prolong the self-rescue phase in road tunnels in the event of a fire. This means that they can lead to increased safety. However, the results of the present project have to be analysed in more detail. As the flexible devices are not commonly used in road traffic, the aspect of road user's reaction to the application of such devices has to be investigated. Another issue is the selection of the appropriate means used to inform the traffic users and to guide their behaviour. Experience in this area can be gained e.g. in experiments with test persons using a simulator.

# 1 Einleitung

## 1.1 Zielsetzung der Forschung

Der Einsatz flexibler Vorrichtungen zwecks Minderung der Auswirkungen von Bränden hat sich in grossen Gebäuden seit geraumer Zeit etabliert. In einem Strassentunnel herrschen jedoch ganz andere Rahmenbedingungen als in einem Gebäude. Das vorliegende Forschungsprojekt widmet sich den Anwendungsmöglichkeiten flexibler Vorrichtungen im Tunnel und geht von folgender Fragestellung aus:

*„Lassen sich im Fall von Bränden in Strassentunneln die Schadensfolgen an Menschenleben, Gesundheit und Sachwerten durch den Einsatz flexibler Vorrichtungen und mittels Abschnittbildung reduzieren, wenn ja, in welcher Form und in welchem Mass?“*

Um im Rahmen der Forschung eine wegweisende Antwort auf diese Frage zu finden, wurden im Forschungsantrag nachstehende Ziele definiert.

1. Verringerung der Schadensfolgen und ihrer Kosten durch Brände in Strassentunneln mittels Abschnittbildung
  - auf Leib und Leben der Tunnelbenutzer, der Rettungs- und Brandbekämpfungskräfte,
  - der Sachmittel am Tunnelobjekt und seiner Infrastruktur,
  - der volkswirtschaftlichen Auswirkungen durch Nichtverfügbarkeit und auf die Umwelt.
2. Überprüfung der Machbarkeit der Abschnittbildung mit flexiblen, mechanischen Vorrichtungen unter Berücksichtigung folgender Aspekte:
  - Volks- und betriebswirtschaftlicher Nutzen
  - Rettungsszenarien und Fluchtmöglichkeiten
  - Anforderungen an technische Ausrüstungen und bauliche Massnahmen
  - Betrieblichen Anforderungen
  - Nachhaltigkeit
  - Lebenszykluskosten.
3. Entscheidungsmatrix von Einsatzschwerpunkten der machbaren Varianten nach Tunneltypen.
4. Aufzeigen weiterer sinnvoller Entwicklungsschritte.

Diese Ziele waren im Zuge der Erkenntnisse der Forschungsarbeit anzupassen. Entsprechend zeigte sich bereits bald, dass der Bildung von vollständig geschlossenen Abschnitten – im Sinne der einleitenden Fragestellung – nicht oberste Priorität zukommen kann. Die Hauptbedeutung erlangte die Verminderung der Längsströmung durch den Widerstand teilgeschlossener Vorrichtungen.

Der mögliche Einsatz flexibler Vorrichtungen wurde daraufhin in zwei Hauptphasen gegliedert, gemäss dem Ablauf von Brandereignissen in Tunnel nach FKS (Abb. 3.1):

1. Unterstützung der Selbstrettung der Tunnelbenutzer während der ca. ersten 5-10 Minuten nach Eintreten des Ereignisses.
2. Unterstützung der Intervention zur Rettung und Bergung von Personen, der Sicherung des Löscheinsatzes und der Begrenzung von Infrastrukturschäden und Umweltauswirkungen.

## 1.2 Hintergrund, Ausgangslage und Abgrenzung

### Ausgangslage und Begründung

Die verheerenden Brandunglücke in Strassentunneln Ende des letzten und Anfang dieses Jahrhunderts – Mont Blanc, Tauern, Gotthard, Viamala – mit vielen Todesopfern ha-

ben weltweit die Frage aufgeworfen, wie sich solche katastrophalen Auswirkungen verhindern lassen.



Abb. 1.1: Brandkatastrophen im Gotthardstrassentunnel (links) und Mont Blanc-Tunnel (rechts) führen zu grossen Schäden, die verhindert bzw. eingegrenzt werden sollen.

Seitdem wurden national und international viele erfolgreiche Massnahmen zur Erhöhung der aktiven und passiven Sicherheit in Strassentunneln umgesetzt. Neben den Schäden an Leib und Leben haben solche Brände auch erhebliche Sachschäden an den Tunnelobjekten zur Folge, sowie erhebliche Auswirkungen auf die Volkswirtschaft, durch den Ausfall des Tunnels sowie Umleitungsfahrten, und damit auch direkt auf die Umwelt. Es bleibt deshalb ein permanentes Ziel, die Tunnelbenutzer durch sinnvolle und wirtschaftliche Sicherheitsmassnahmen vor den Folgen grosser Brände zu schützen und die Folgekosten auf ein unvermeidliches Minimum zu reduzieren.

In diesem Zusammenhang wurde für Strassentunnel auch die Abschnittsbildung im Brandfall zur Minimierung der Ausbreitung der Rauchgase als prüfenswert angesehen.

Im Schiffsbau und im Hochbau sind Abschnittsbildungen seit langem „state-of-the-art“. Im Hochbau werden starre Brandtore zunehmend durch flexible Vorhangsysteme ersetzt, vor allem bei grossen Hallen, Spitälern, Schulen und öffentlichen Gebäuden. Der Markt bietet dazu ganz unterschiedliche Systeme, von einfachen Rauchgashemmnissen bis zu komplexen doppelwandigen, inwendig mit Wasser gekühlten Feuervorhängen an.

Ausgehend von den positiven Erfahrungen in diesen Bereichen lag die Frage nahe, ob sich solche Systeme in direkter oder abgewandelter Form auch für Strassentunnel eignen. Die Frage gründete auf dem Grundsatz:

- Brandherd isolieren, ohne Menschen zu gefährden, und
- Menschen retten.

### **Gegenstand der Forschung und Nutzen**

Tunnel sind komplexe Gebilde mit unterschiedlichen Charakteristiken wie: Geometrie, Anzahl Röhren, Länge, Längsneigung, Verzweigungen, Fluchtwegen, Nutzungsart, Verkehrsaufkommen, Belüftungssystemen, Ausbaustandard usw. Daraus resultieren vielschichtige Anforderungen an Konzepte für mögliche Abschnittsbildungen im Brandfall durch Systeme und Vorrichtungen.

In der vorliegenden Forschungsarbeit wird ermittelt, ob unter den gegebenen Rahmenbedingungen ähnliche Systeme, Technologien und/oder Vorrichtungen zur Abschnittsbildung auch bei Strassentunneln eingesetzt werden könnten. Es wurde untersucht, in welchen Fällen und unter welchen Voraussetzungen welche Systeme der Rauchgas-Rückhaltung, Abgrenzung und Abschnittsbildung für welche Art von Tunneln sinnvoll und wirtschaftlich sind. Zu den Untersuchten Konfigurationen zählten beispielsweise von ein- oder beidseitigen Vorrichtungen an den Tunneleingängen, über unterschiedliche Formen von aerodynamischen Bremsen zur Minderung der Luftströmung (Kamineffekt) bis zu geschlossenen Brandabschnitten mit flexiblen Vorrichtungen, die in bestimmten Abständen installiert sind.

Der Nutzen der Abschnittsbildung mit Feuer- bzw. Rauchhemmnissen in Strassentunneln ergibt sich, wenn die Entwicklung des Brandes sowie die Ausbreitung der giftigen Rauch-

gase erschwert oder verhindert werden. Dadurch können die Schadensfolgen von Bränden für die Tunnelbenutzer, Sachwerte (insbesondere die Tunnelinfrastruktur), die Umwelt und die Volkswirtschaft reduziert werden.

### **Abgrenzung des Forschungsrahmens**

Die vorliegende Forschung beschränkt sich auf flexible Vorrichtungen wie z.B. Vorhangsysteme zur Rauchrückhaltung. Andere denkbare Ansätze, mit flüssigen und gasförmigen Medien oder mit starren Hemmnissen im inneren des Tunnels, wurden von vornherein bewusst ausgeschlossen. Solche Systeme beruhen auf anderen physikalischen Prinzipien und werfen bei der praktischen Anwendung ganz andere sicherheits- und installationstechnische Fragen auf. Ihre Überprüfung würde ein separates Forschungsvorhaben bedingen.

## **1.3 Methodisches Vorgehen**

### **Inhalt der Forschung**

In der vorliegenden Forschung werden aufgrund der möglichen Verfahren und Vorrichtungen zur Abschnittsbegrenzung Modellvarianten skizziert und deren Einsatzbereiche anhand festgelegter Tunneltypen eingeteilt. Daraus werden die Machbarkeit und der mögliche Nutzen (Schadensminderungen an Menschen, Umwelt, Sachen und Volkswirtschaft) von Abschnittsbildungen unter Berücksichtigung der sicherheitsrelevanten, technischen, baulichen, logistischen und wirtschaftlichen Anforderungen abgeleitet. Das Ergebnis wird in Form einer Klassierung der Tunnel dargestellt, die aufzeigt bei welchen Tunnelcharakteristiken eine Abschnittsbildung machbar und sinnvoll ist, unter Berücksichtigung möglicher technischer Ausführungen.

### **Methodischer Ansatz**

Die Forschung selbst bildet eine Grundlagenanalyse basierend auf:

- Aktuellen Sicherheits-, Lüftungs- und Baukonzepten von Strassentunneln
- Erfahrungen der Abschnittsbildung mit flexiblen Vorrichtungen aus anderen Bereichen (Hochbau u.a.)
- Literaturstudien und Erfahrungen mit verwandten Ansätzen im Tunnelbau
- Detaillierter CFD-Berechnungen sowie grobe Schätzungen mittels bewährten Ingenieurmethoden.

Berücksichtigt werden vor allem folgende Kriterien: Systeme der Abschnittsbildung, Formen der Trennvorrichtungen und/oder Hemmnisse, Einbaumöglichkeit bauseitig, Anforderung an die technischen Ausrüstungen und deren Betriebsweise – vor allem: Lüftung, gefahrlose Fluchtmöglichkeit der betroffenen Personen, ungehinderter Zugang für die Rettungs- und Brandbekämpfungskräfte, Einfluss auf Sekundärurfälle (z.B. Auffahrt auf Hindernisse), Lebenszykluskosten (Investitionen, Betriebskosten, Einsparungen), Sicherheits- und Nachhaltigkeitskriterien.

Der Ablauf ist in vier Phasen gegliedert:

Phase I – Grundlagen - Rahmenbedingungen zur Abschnittsbildung

Phase II – Systemrelevanz - Selektion nach nicht-monetären Kriterien

Phase III – Masterportfolios - Clusterung mit gesamtwirtschaftlichem Nutzen

Phase IV – Abschluss - Fallbeispiel und Empfehlungen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Zielsetzung und Informationsquellen

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik zum Einsatz von flexiblen Vorrichtungen zur Kontrolle der Rauchausbreitung in Gebäuden und in Strassentunnel vorgestellt.

Die Ermittlung des Standes der Technik basiert insbesondere auf:

- Den von den Autoren der vorliegenden Studie bekannten Informationen
- Den von den Mitglieder der Begleitkommission zur Verfügung gestellten Informationen
- Expertenbefragung
- Veröffentlichungen der wichtigsten internationalen Organisationen (AIPCR/PIARC, UNECE, ITA COSUF etc.)
- Ergebnisse von internationalen Forschungsprojekten (UPTUN, FIT, LSURF, SOLIT etc.)
- Berichterstattungen der wichtigsten relevanten internationalen Konferenzen (BHR ISAVFT, Graz – Tunnel Safety and Ventilation, ITC, ISTSS)
- Einige führende Fachzeitschriften
- Internetrecherchen.

Um den Stand der Technik zu ermitteln wurde auf das Wissen von führenden Experten auf dem Gebiet der Sicherheit und Lüftung von Tunneln aus der ganzen Welt zurückgegriffen. Folgende Spezialisten wurden ausgewählt und per Brief kontaktiert:

- Arthur G. Bendelius (USA)
- John Day (Grossbritannien/Schweiz)
- Ignacio Del Rey (Spanien)
- Vincenzo Ferro (Italien)
- Christian Gammeter (Schweiz)
- Alfred Haack (Deutschland)
- Didier Lacroix (Frankreich)
- Yoshikazu Ota (Japan)
- Conrad Stacey (Australien)
- Peter Sturm (Österreich)
- Franz Zumsteg (Schweiz).

Der ermittelte Stand der Technik ist in Bezug auf den Einsatz von flexiblen Vorrichtungen in Tunnel zur Kontrolle der Rauchausbreitung als abschliessend zu betrachten.

### 2.2 Tunnelaerodynamik und Tunnellüftung

Die Rauchausbreitung im Ereignisfall wird heute in Tunnel vorwiegend mittels geeigneter Lüftungssysteme beschränkt. Je nach Tunnel- und Verkehrseigenschaften werden unterschiedliche Lüftungssysteme eingesetzt, welche auf drei Grundtypen aufgebaut sind: Natürliche Lüftung, Längslüftung mit Strahlventilatoren und Halbquer/Querlüftung ([8], [12] und [13]). Die erfolgreiche Kontrolle der Rauchausbreitung erfordert immer eine angemessene Kontrolle der Längsgeschwindigkeit der Luft im Tunnel, deren Zielsetzung vom Tunneltyp und von der Verkehrssituation abhängig ist. Nebst dem Verkehr (Kolbeneffekt aufgrund des aerodynamischen Widerstandes der bewegten Fahrzeugen im Tunnel) und brandunabhängigen Einflussfaktoren (Temperaturdifferenzen zwischen Tunnel und Umgebung, Portalwinde, barometrische Druckdifferenzen zwischen den beiden Tunnelenden usw.) können thermische Effekte im Brandfall bei steilen Tunnel („Kamineffekt“) grosse Längsgeschwindigkeiten hervorrufen. Die mangelhafte Beherrschung dieser Faktoren kann im Brandfall zu einer unkontrollierten Rauchausbreitung mit verheerenden Konse-

quenzen führen. Eine Übersicht wird z.B. in [14] für lange Tunnel und in [15] [16] [17] für kurze Tunnel gegeben.

Lüftungstechnische Massnahmen zur Kontrolle der Rauchausbreitung können aus unterschiedlichen Gründen in einigen Situationen problematisch sein:

- Nach der Alarmierung vergeht immer eine gewisse Zeit, bis die Lüftungssysteme wirksam werden. Dabei können sie die delikate Rauchsichtung auch ungünstig beeinflussen.
- Der Installationsaufwand für Lüftungskomponenten ist zum Teil, insbesondere im Bereich der Bauwerkserhaltung, unverhältnismässig hoch.
- Eine Schlussfolgerung aus Bettelini & Seifert (2010) [15] ist, dass die Lüftung in kurzen, steilen Strassentunneln kaum einsetzbar ist.

Verfahren zur Kontrolle der Längsgeschwindigkeit werden im Forschungsprojekt ASTRA 2007/002\_OBF „Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall“ [1] untersucht.

## 2.3 Brandschutz in Gebäuden

### 2.3.1 Grundlagen

Vorbeugender Brandschutz ist der Überbegriff für alle Massnahmen, die im Voraus die Entstehung, Ausbreitung und Auswirkung von Bränden verhindern beziehungsweise einschränken und gliedert sich in die Teilbereiche:

- bautechnischer Brandschutz
- gebäudetechnischer Brandschutz
- organisatorischer Brandschutz.

Generell hat Brandschutz sechs fundamentale Ziele:

- der Entstehung eines Brandes vorbeugen
- im Brandfall Mensch und Tier die Flucht ermöglichen und
- die Ausbreitung von Feuer und Rauch verhindern
- die Bergung und Rettung von Menschen und Tieren ermöglichen
- wirksame Löscharbeiten ermöglichen
- Sachwerte und die Umwelt schützen sowie die öffentliche Sicherheit gewährleisten.

Um diese Ziele zu gewährleisten, bestehen national und international eine Vielzahl von Gesetzen, Normen, Richtlinien und privatrechtlichen Vereinbarungen. Die zentrale Schweizer Norm für Gebäude ist die „Brandschutznorm“ in der Fassung vom 20.10.2008 [18] der Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF). Diese Norm richtet sich nicht an unterirdische Anlagen und wird nur im Sinn verwendet, bzw. herangezogen.

### 2.3.2 Baulicher Brandschutz

Bauliche Massnahmen müssen vor allem folgende Aspekte berücksichtigen:

- das Brandverhalten der verwendeten Baustoffe
- den Feuerwiderstand der Bauteile
- die Aufteilung der Gebäude in Brandabschnitte
- die Fluchtwegplanung
- die aktive Brandbekämpfung durch Löschanlagen bzw. Löscheinrichtungen.

Dazu kommen vor allem Einrichtungen und Kennzeichnungen zur Alarmierung, Kommunikation, Notbeleuchtung und Signalisierung von Fluchtwegen.

Das Brandverhalten der eingesetzten Baustoffe wird in der europäischen Norm EN 13501-1 geregelt. Sie löst in Zukunft die deutsche Normreihe DIN 4102-ff ab, die jedoch bis auf weiteres gültig bleibt. Die Baustoffklassen sind mit den Buchstaben von A (nicht

brennbar) bis F (leicht entflammbar) gekennzeichnet. Ergänzt werden die Kennzeichnungen der Baustoffe durch Hinweise auf die Rauchentwicklung (Kurzzeichen „s“ für „smoke“) und das Abtropfen (Kurzzeichen „d“ für „droplets“).

<i>Kurzzeichen</i>	<i>Anforderung</i>
s1	keine / kaum Rauchentwicklung
s2	begrenzte Rauchentwicklung
s3	unbeschränkte Rauchentwicklung
d0	kein Abtropfen / Abfallen
d1	begrenzt Abtropfen / Abfallen
d2	starkes Abtropfen / Abfallen

Tab. 2.1: Unterteilungen der Baustoffklassen gemäss EN 13501-1.

In der Schweiz sind die EN-klassifizierten Baustoffe im Brandschutzmerkblatt 20001-11de der VKF festgehalten. Wie bereits erwähnt, sind Vorgaben der VKF in Tunnel nicht gültig.

Wand- und Deckenverkleidungen müssen in der Regel schwerentflammbar nach EN 1365-2 bzw. DIN 4102 sein. In Rettungswegen, wie Fluren und Treppenträumen, ist nur nichtbrennbares Material nach DIN 4102 zulässig. Diese Grundsätze sind auch auf mögliche Vorhangsysteme in Tunneln zu übertragen.

Der Feuerwiderstand gibt Auskunft über die Dauer, die ein Bauteil dem Feuer widerstehen muss, ohne seine Funktionsfähigkeit zu verlieren (Tab. 2.2). Die Kurzbezeichnungen werden mit Objektklassenbezogenen Buchstaben zusätzlich gekennzeichnet. So steht beispielsweise T für Türen, Tore, Klappen und F für Trennwände, Verglasungen usw. Übliche Feuerwiderstandsklassen (zum Teil auch als Brandschutzklassen bezeichnet) nach DIN 4102 sind:

<i>Feuerwiderstandsklasse</i> <i>Kurzbezeichnung</i>	<i>Funktionserhalt</i> <i>über</i>	<i>deutsche bauaufsichtliche</i> <i>Benennung</i>
F30	30 Minuten	feuerhemmend
F60	60 Minuten	hochfeuerhemmend
F90	90 Minuten	feuerbeständig
F120	120 Minuten	hochfeuerbeständig
F180	180 Minuten	höchstfeuerbeständig

Tab. 2.2: Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102.

Bei der vorgesehenen Harmonisierung der Prüfvorschriften für brandschutztechnisch wirksame Bauteile in Europa wird das deutsche Normensystem DIN 4102 abgelöst durch Europäische Normen. Die Klassifizierungskriterien der Feuerwiderstandsfähigkeit nach DIN EN 13501-2 sind unabhängig von seiner speziellen Funktion im Bauwerk:

- R („Résistance“): Tragfähigkeit
- E („Étanchéité“): Raumabschluss
- I („Isolation“): Wärmedämmung unter Brandeinwirkung

- W („Radiation“): Begrenzung des Strahlungsdurchtritt
- M („Mechanical“): Mechanische Einwirkung auf Wände (Stossbeanspruchung)

Die Leistungszeit wird für jedes Kriterium mit einer der folgenden Zahlen (= Zeit in Minuten) angegeben: 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360. So wird zum Beispiel eine nichttragende Innenwand, die den Raumabschluss und die Wärmedämmung unter Brandeinwirkung für mind. 30 Minuten gewährleisten muss, als „EI 30“ bezeichnet.

### 2.3.3 Brandabschnitte

Gemäss VKF-Brandschutznorm [18] gelten in der Schweiz nachfolgende Definitionen und Festlegungen:

- „Brandabschnitte sind Bereiche von Bauten und Anlagen, die durch brandabschnittsbildende Bauteile voneinander getrennt sind“.
- „Brandabschnittsbildende Bauteile sind raumabschliessende Bauteile wie Brandmauern, brandabschnittsbildende Wände und Decken, Brandschutzabschlüsse und Abschottungen“.
- „Die Brandabschnittsbildung in Bauten und Anlagen richtet sich nach deren Bauart, Lage, Ausdehnung und Nutzung“.
- „Der Feuerwiderstand von brandabschnittsbildenden Bauteilen ist so festzulegen, dass die Ausbreitung von Bränden auf andere Brandabschnitte verhindert wird“.

Die Brandausbreitung auf die angrenzenden Abschnitte wird durch feuerbeständige Bauteile verhindert. Diese können sowohl als vertikale (Wände, Türen, Fenster) oder als horizontale (Decken, Fussböden) ausgebildet sein. Die genauen Anforderungen an die Brandabschnitte – insbesondere hinsichtlich der einzugrenzenden Flächen - werden in entsprechenden Bauordnungen festgelegt. Dabei bestehen Unterschiede die sowohl von den sicherheitstechnischen Ausrüstungen des Brandabschnittes (Brandwand, Sprinkleranlage usw.) abhängen, wie auch von unterschiedlichen Richtlinien der verschiedenen Länder.

Der Feuerwiderstand brandabschnittsbildender Bauteile beträgt in der Schweiz mindestens 30 Minuten [18].

### 2.3.4 Feuerschutztür

Für die vorliegende Forschung empfiehlt sich ein vergleichender Blick auf die Feuerschutztüren. Feuer- bzw. Brandschutztüren sind bei Brandabschnitten in Gebäuden zwangsläufig die schwächsten Glieder. Sie haben die Aufgabe, Wandöffnungen in Feuer hemmenden oder feuerbeständigen Wänden gegen das Durchdringen von Feuer zu sichern. Die Anforderungen an solche Türen werden durch Brandprüfungen gemäss der europäischen Norm EN 1634-1 und EN 1634-3 (bzw. DIN 4102 oder ÖNORM B 3850) mit Feuerwiderstandsklassen von EI30 bis EI180 geregelt.

Die Zahl hinter dem EI (E steht für die Fähigkeit, einer Brandbeanspruchung von einer Seite zu widerstehen, I bezeichnet die Wärmedämmungseigenschaft des Bauteils) gibt die Dauer in Minuten an, welche die Tür den Durchtritt des Feuers verhindern muss. Welche Feuerwiderstandsklasse für eine Tür erforderlich ist, richtet sich nach der Gebäudenutzung und den Anforderungen an die Wand, in die sie eingebaut wird. Eine Brandschutztür ist nicht zwangsläufig auch rauchdicht. Wird neben dem Feuerwiderstand auch Rauchdichtigkeit gefordert, muss diese durch eine mindestens dreiseitig umlaufende Dichtung gewährleistet sein. Eine Tür der Feuerwiderstandsklasse EI90 mit Rauchschutzfunktion nach DIN 18095 nennt sich dann EI90-CS.

### 2.3.5 Massgebende Normen

EN 1363-1; 1999-10; Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung

EN 1363-1; 1999-10; Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 2: Ergänzende Verfahren; Deutsche Fassung

EN 1365-2. 2000-02. Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile - Teil 2: Decken und Dächer; Deutsche Fassung EN 1365-2:1999

EN 1366-3; Juli 2009. Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen - Teil 3: Abschottungen; Deutsche Fassung EN 1366-3:2009

EN 1634-1; 2009-01; Feuerwiderstandsprüfungen und Rauchschutzprüfungen für Türen, Tore, Abschlüsse, Fenster und Baubeschläge – Teil 1: Feuerwiderstandsprüfungen für Türen, Tore, Abschlüsse und Fenster; Deutsche Fassung 2008

EN 13501-1; 2010-01; Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten; Deutsche Fassung EN 13501-1:2007+A1:2009

EN 14600; 2006-03; Tore, Türen und zu öffnende Fenster- und/oder Rauchschutzeigenschaften – Anforderungen und Klassifizierung; Deutsche Fassung EN 14600:2005

EN 12101-1; 2006-06; Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 1: Bestimmungen für Rauchschürzen; Deutsche Fassung EN 12101-1:2005+A1:2006

DIN 4102-ff; Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Diverse Teilnormen.

## **2.4 Flexible Feuer- und Rauchschutzvorrichtungen**

### **2.4.1 Übersicht**

Textile Brandvorhänge sind seit vielen Jahrzehnten aus dem Bühnenbereich (Theater) bekannt. Bei diesen handelte es sich jedoch meist um Textilien die nur für einen zeitlich sehr begrenzten Zeitraum feuerfest waren und daher eher eine „Sofortmassnahme“ bei Brandfällen – vor allem im Bühnenbereich – darstellten. Für eine breite Anwendung waren diese Vorhänge nicht geeignet.

Die technologische Entwicklung von Geweben hat in den letzten Jahrzehnten eine intensive Entwicklung genommen und zunehmend feuerfeste Gewebematerialien mit unterschiedlichem Feuerwiderstandswert auf den Markt gebracht. Dabei wurde ein Entwicklungsgrad erreicht, der es ermöglichte Brandabschnitte anstelle von festen Wänden oder Türen durch flexible, textile Vorrichtungen zu ersetzen. Dadurch eröffneten sich vorher ungeahnte Möglichkeiten der Raumgestaltung und Raumnutzung. Ebenfalls wurde Objektschutz in Bereichen möglich, die durch feste Feuerschutztüren, Klappen und ähnlichem nur schwierig zu lösen waren.

Seit mehreren Jahren ist in vielen baulichen Bereichen eine stete Zunahme von textilen Feuer- und Rauchschutzvorrichtungen zu verzeichnen. Ausgehend von grossräumigen Hallen in Industrie, Lagern, Messen/Ausstellungen, Hangars und ähnlichen hat sich der Einsatz der Feuer- und Rauchschutzvorrichtungen mittlerweile auf nahezu sämtliche Gebäudetypen erweitert, besonders auf kritische Gebäude mit hohem Personenverkehr wie Spitäler, Schulen, Sport- und Kulturstätten, Einkaufszentren, Geschäfts- und Amtshäuser. Der Gedanke, diesen Einsatz auch in unterirdischen Räumlichkeiten wie Tunneln zu überprüfen, ist naheliegend.

Der Markt umfasst heute bereits ein breites Angebot von Feuer- und Rauchschutzabschlüssen aller Art, mit unterschiedlichsten Einsatzzielen und verschiedensten Qualitäten. Mehrere Anbieter konzentrieren sich auf eine beschränkte Anzahl von Herstellern in Europa, vor allem in Deutschland, England und Frankreich.

Es gibt heute grundsätzlich zwei Arten von Vorrichtungen: Rauchschutzvorrichtungen, die zur Rauchrückhaltung und Einschränkung der Rauchausbreitung dienen, und Feuerschutzvorrichtungen. Der Unterschied zwischen Feuerschutzvorrichtungen und Rauchschutzvorrichtungen besteht primär in der Materialwahl der Vorrichtungen, zudem sind Feuerschutzvorrichtungen in der Regel vollschliessend, was bei Rauchschutzvorrichtungen nicht zwangsweise der Fall sein muss.

## 2.4.2 Rauchschutzvorrichtungen

Die Vorrichtungen zur Rauchrückhaltung können grob in drei Kategorien unterteilt werden:

- durchlässige Vorrichtungen bestehend aus Streifen oder Modulen
- teilschliessende Vorrichtungen die nur einen bestimmten Bereich abdecken
- vollschliessende Vorrichtungen die ähnlich einer Tür den Durchgang komplett verschliessen.

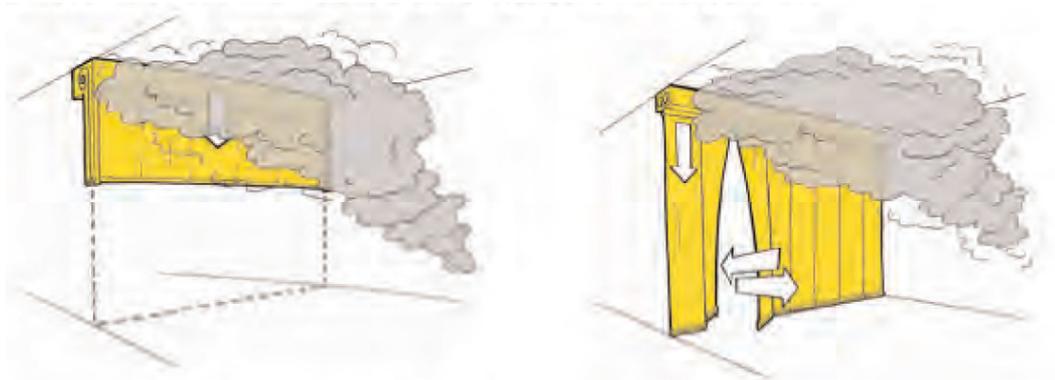


Abb. 2.1: Skizze einer teilschliessenden Schürzenvorrichtung (links) und einer Streifenvorrichtung (rechts).

Nach der Norm EN 12101-1 werden Rauchschürzen als Teil einer Anlage zur Rauchfreiheit definiert, die die Bewegung von Brandgasen innerhalb eines Bauwerks im Brandfall einschränkt.

Mit den Schürzenvorrichtungen werden folgende Schutzziele angestrebt:

- Schaffung von Rauchabschnitten zur Begrenzung der Verrauchung auf definierte Zonen
- Sichere Fluchtwege durch raucharme Zonen
- Sichere Rauchlenkung zu Abzugsvorrichtungen und Ableitung noch brennbarer Rauchgase
- Freier, gefahrloser Zugang für Löschmannschaften
- Reduktion der Brand- und Rauchfolgeschäden an Bauteilen und Sachwerten.



Abb. 2.2: Beispiel einer Streifenvorrichtung.



Abb. 2.3: Beispiel einer Schürzenvorrichtung (links) und eines Rauchschutzvorrichtung während des Schliessvorgangs (rechts).

Vollschliessende Rauchschutzvorrichtungen behindern – gemäss Definition in der EN 1634-3 - im geschlossenen Zustand den Durchtritt von Rauch in der Brandentstehungsphase, so dass während eines Brandfalls im dahinter liegenden Raum für die Rettung von Menschen und Tieren sowie für die Bergung von Sachwerten auch ohne Atemschutz ausreichend Zeit bleibt.

Das erfordert eine rundum dicht schliessende Abschottung. Dies wird durch seitliche Führung der Vorhangbahnen mit speziellen, umlaufenden Dichtungssystemen erzielt. Die unteren Schliesskanten sind dabei flexibel ausgestaltet, so dass sie Bodenunebenheiten ausgleichen können. Dagegen können sie ihr Ziel nicht erreichen, wenn sich im Absenkbereich Gegenstände befinden.

Vollschliessende Rauchschutzvorrichtungen werden beispielsweise von der deutschen Bauordnung in allen grösseren Geschossflächen – auch im Wohnbereich – und bei Gängen von mehr als 30 m Länge gefordert.

### 2.4.3 Feuerschutzvorrichtung

Mit der entsprechenden Auswahl der im Vorhangsystem eingesetzten Gewebetypen lassen sich die vollschliessenden Rauchschutzvorrichtungen zu Feuerschutzvorrichtungen erweitern. Unter Wegfall brennbarer Dichtungsmaterialien resultiert dann ein flexibler Einsatz sowohl als rauchdichter Abschluss nach EN 1634-3 oder auch als rauchdichter Feuerschutzabschluss nach EN 13501. Je nach Materialwahl des Gewebes lassen sich Schutzziele mit oder ohne Begrenzung des Strahlungsdurchtritts erzielen. Spezielle Abschlussleisten für den sicheren und verwerfungsfreien Verschluss am Boden lassen dabei auch extrem hohe Temperaturen zu. Die führenden Hersteller erreichen dabei mit ihren Vorrichtungen gemäss Prüfungen nach EN 1363-1, EN 1634-1 und von Dauerfunktionsprüfungen nach EN 14600 Feuerwiderstandsklassen bis E180, in Einzelfällen sogar bis E240. Unter Einsatz ein- oder beidseitiger Wasserbeaufschlagung beispielsweise durch Sprinkler lassen sich die Feuerwiderstandswerte weiter verbessern.



Abb. 2.4: Anpassungsfähigkeit von doppelwandigen Vorrichtungen.

Einwandige Feuerschutzvorrichtungen können trotz ihrer speziellen Abschlussleisten nur geringe Bodenunebenheiten ausgleichen. Im Gegensatz dazu legen sich doppelwandige Vorrichtungen auf Grund der weichen und flexiblen Unterseite bis zu einem gewissen Umfang um Gegenstände die sich im Absenkbereich befinden – beispielsweise stehende

Autos in Tunnel – herum.

Für ausserordentliche Anwendungen wie zum Beispiel sehr grossen Messehallen, werden doppelwandige Systeme mit inwendiger oder feuerseitiger Wasserkühlung eingesetzt. Die nachfolgenden Bilder zeigen Anwendung, System und Funktion solcher Anlagen.

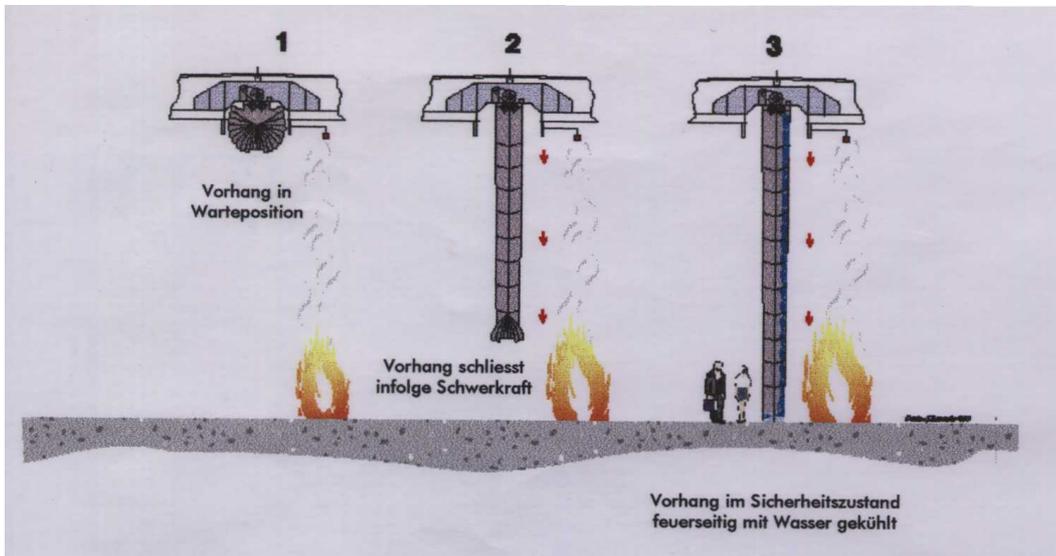


Abb. 2.5: Doppelwandige Feuerschutzvorrichtung mit Wasserkühlung.

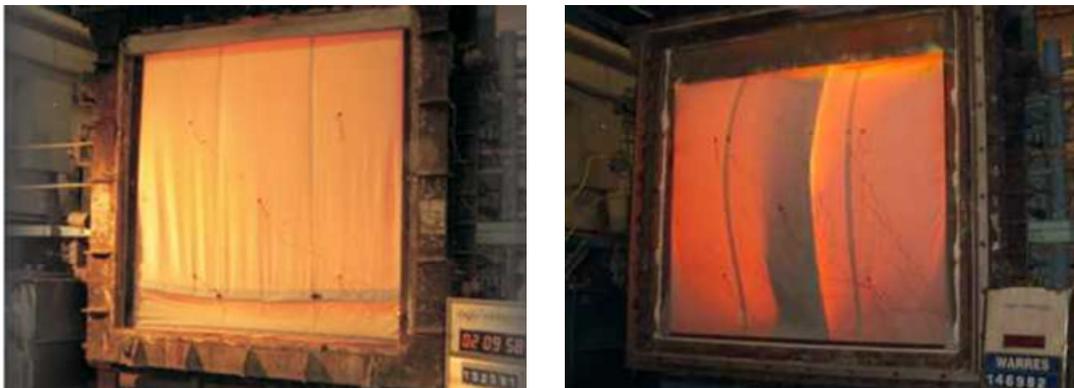


Abb. 2.6: Beispiele (links: <http://fireblindsystems.com/fbs1.php>; rechts: <http://www.blegroup.co.uk/curtains/product/insulation>).



Abb. 2.7: Doppelwandige Feuerschutzvorrichtung im eingezogenen (links) und ausgefahrenen Zustand (rechts).

## 2.5 Erfahrungen mit flexiblen Feuer- und Rauchschutzvorrichtungen in Tunnel

### 2.5.1 Einleitung

Bei Tunnelbauwerken hat der Brandschutz aufgrund der dramatischen Tunnelbrände in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. In der Praxis liegen dagegen erst sehr wenige modellhafte oder gar praktische Erfahrungen mit Feuerschutzvorrichtungen bzw. Rauchschutzvorrichtungen oder anderen flexiblen Vorrichtungen zur Verhinderung der Feuer- bzw. Rauchausbreitung in Tunnel vor. Somit begibt man sich beim Thema „flexibler, mechanischer Feuer- und Rauchschutzvorrichtung in Tunnel“ noch weitgehend auf Neuland.

Über Abschnittsbildung mit abschliessenden Vorrichtungen (Vorhangsystemen), die als Idee dieser Forschung zu Grunde liegen, sind praktisch gar keine Fälle in der Praxis oder Literatur bekannt. Erste Erfahrungen auf Versuchsbasis und beim praktischen Einsatz bestehen lediglich mit Vorrichtungen in Streifenform.

Das erste bekannte, permanent installierte Vorhangsystem wurde 2009 im Autobahntunnel bei Roppen in Tirol/A installiert. Dieser Einsatz geht auf zwei strömungstechnische Versuche aus den Jahren 2001 im Katschbergtunnel (Tauernautobahn, Österreich) [3] und 2002 im Gleinalmtunnel (Pyhrnautobahn, Österreich) [4] zurück.

Daneben sind zwei Versuche im Grossmassstab mit einer aufblasbaren Sperrvorrichtung im Rahmen von UPTUN [19] und den USA [20] bekannt sowie ein Versuch mit festen Vorrichtungen zur Abschnittsbildung an einem Modelltunnel in Deutschland [6].

### 2.5.2 Streifenvorrichtung

Die beiden erwähnten strömungstechnischen Versuche im Katschberg- und Gleinalmtunnel fanden unter der Leitung des Instituts für Strömungstechnik und Thermodynamik der Universität Graz (Österreich) im Auftrag der damaligen Firma Enfortech GmbH, Mariapfarr (Österreich) statt. Die in diesem Kapitel zusammengestellten Erkenntnisse stammen alle aus den Berichten der beiden Untersuchungen [3] und [4].

Bei den beiden Versuchen sollte die Bremsung der Längsströmung im Tunnel durch ein von der Firma Enfortech entwickeltes Vorhangsystem gemessen werden. Die Längsströmung soll im Brandfall möglichst tief gehalten werden, damit die Rauchgase in konzentrierter Form durch die Rauchgasabsaugung aus dem Tunnel befördert werden können. Frischluftzufuhr erhöht die verrauchte Gasmenge und mindert dadurch die Effizienz der Rauchgasabsaugung.

Neben der Messung der Bremswirkung, bzw. der Abnahme der Luftgeschwindigkeit,

wurde auch der Luftwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit bestimmt, sowie Rauchversuche zur Dokumentation der Wirksamkeit der Vorrichtungen im Zusammenspiel mit der Rauchgasabsaugung durchgeführt.

Der Versuchsaufbau bestand aus mehreren, hintereinander installierten Streifenvorrichtungen, der Strömungsmessung und mobilen Axialventilatoren zur Erzeugung der Längsströmung.

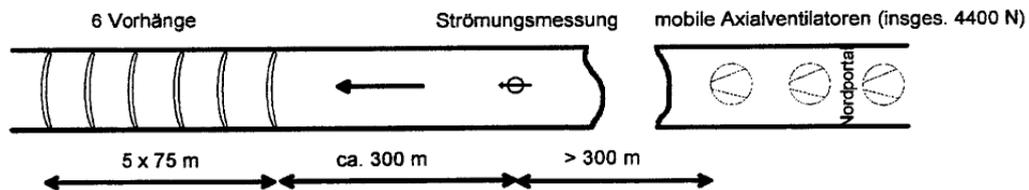


Abb. 2.8: Messaufbau für die strömungstechnischen Untersuchungen im Katschbergtunnel [3].

Die Resultate zeigen, dass sich diese flexiblen Vorrichtungen gut eignen, um die Längsströmung im Tunnel zu kontrollieren, bzw. abzubremesen. Im Folgenden eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse gemäss den Berichten [3] und [4]:

- Längsströmungen werden rasch (innerhalb von 1 – 1.5 min) auf einen Wert von ca. 1 m/s reduziert
- Der Schliessvorgang der Streifenvorrichtung dauert rund 30 s
- Die gewünschten Strömungsgeschwindigkeiten von  $\leq 1.5$  m/s. stellen sich ohne aufwendige Regelungen ein
- Derartig günstige Strömungsverhältnisse dürften sich in den meisten Fällen einstellen, da die Durchlässigkeit der Vorrichtungen immer eine gewisse Grundströmung zulässt
- Die Einfachheit der Systeme lässt eine hohe Zuverlässigkeit im Brandfall erwarten
- Für die Interventionskräfte bestehen dadurch nach Eintreffen am Brandherd sehr gute Verhältnisse für die Personenrettung und Brandbekämpfung
- Für eine optimale Wirkung wurde ein Mindestabstand zwischen den Vorrichtungen von ca. 50 m vorgeschlagen.

Der Widerstandskoeffizient konnte ebenfalls gemessen werden. Für Längsgeschwindigkeiten zwischen 1.0 und 3.5 m/s hat sich folgende Formel als gute Näherung erwiesen:

$$C_w(u) = \begin{cases} 45 & u \leq 1.3 \text{ m/s} \\ 120 \cdot e^{-0.7294 \cdot u} & u > 1.3 \text{ m/s} \end{cases}$$

Weitere Ergebnisse, ergänzt mit CFD-Berechnungen, wurden durch Öttl et al. [26] präsentiert. Zur ersten und bisher einzigen Installation in einem Strassentunnel kam es erst im September 2009 im Roppener Tunnel der Arlberg-Schnellstrasse (Österreich).

Der Roppener Tunnel besitzt zwei Röhren mit einer Länge von rund 5'100 Meter. Der Tunnel ist mit einer Halbquerlüftung ausgerüstet. In der sanierten, wie auch in der neuen Röhre (Eröffnung 2009) wurden je vier Streifenvorrichtungen installiert.

Diese Vorrichtungen wurden in einem Gehäuse aus Edelstahl an der Tunneldecke montiert, um die Vorrichtungen und deren Mechanik vor Verschmutzung zu schützen. Im Brandfall erfolgt das Öffnen des Gehäuses und das Ausfahren der Vorrichtung vollautomatisch. Erste Betriebserfahrungen aus dem Roppener Tunnel liegen vor, wurden aber bisher noch nicht publiziert.



Vorhang beim Absenken



Vorhang abgesenkt



Durchfahrt 1



Durchfahrt 2

Abb. 2.9: Installation einer Streifenvorrichtung, speziell entwickelt für Strassentunnel (Quelle: Aigner Tunnel Technology GmbH).

### 2.5.3 UPTUN – Aufblasbare Vorrichtung

Im Rahmen von UPTUN wurden Versuche mit einer aufblasbaren Vorrichtung zur Schliessung des gesamten Tunnelquerschnittes durchgeführt. Diese Versuche fanden im Virgotunnel in Bozen (ITA) statt. Die Erfahrungen sind im Forschungsbericht [19] dokumentiert.



Abb. 2.10: Aufgeblasener „Tunnel plug“ der Firma Lindstrand. Vorrichtungen wurden beidseitig des Brandherdes, im Abstand von 30 und 60 m, installiert.

Ziel der Vorrichtung war die Bildung von Brandabschnitten im Tunnel. Dadurch sollte die Rauchausbreitung minimiert werden und dem Feuer der Sauerstoff entzogen werden. Man ging davon aus, dass durch den Entzug des Sauerstoffs auch Feuer mit grosser Brandlast gelöscht werden könnten.

Die zeitliche Entwicklung des Versuches (Abb. 2.11) war wie folgt:

- 0 min Zündung
- 8 min. Plug durch die Interventionskräfte angeschnitten („Cut the plug“)
- 15 min Beginn des Löschvorganges („Start extinguish“).

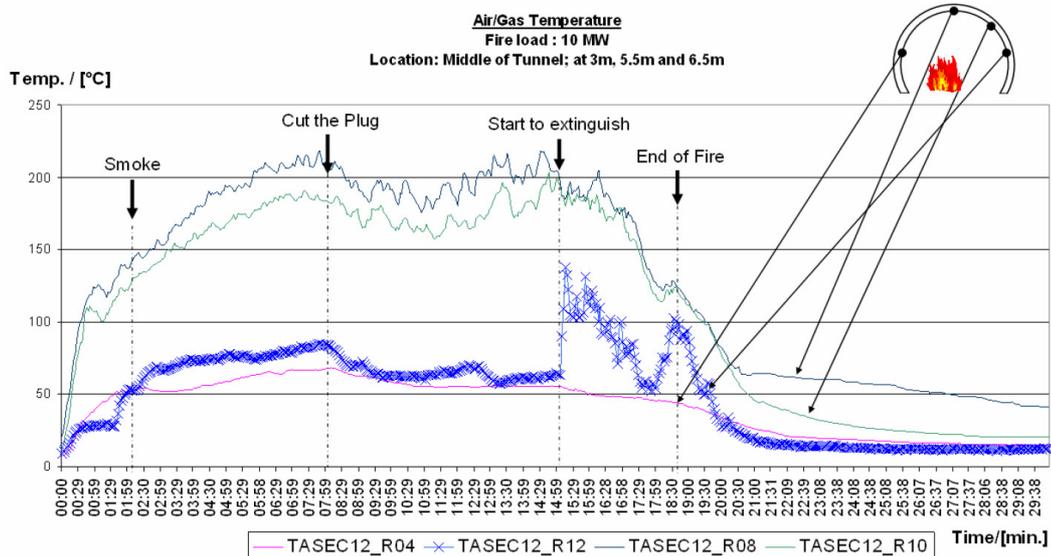


Abb. 2.11: Gemessene Gastemperaturen im Brandquerschnitt.

Die Versuche mit einem Lachenbrand von 10 MW Leistung haben nicht zu eindeutigen Resultaten geführt:

- Die Abschnittsbildung führt zu einer leichten Einschränkung der Temperaturerhöhung
- Die Vorrichtungen haben die Ausbreitung von Rauch verringert, obwohl bereits nach zwei Minuten Rauch aus dem Brandabschnitt entwichen ist
- Es wurde die Gefahr erkannt, dass durch den Entzug von Sauerstoff im Brandabschnitt ein explosives Gemisch entstehen kann
- Eine Fluchtmöglichkeit über die Vorrichtung hinweg muss unbedingt vorhanden sein.

Das Fazit der Versuche war, dass diese Vorrichtung noch verbesserungsfähig ist und im aktuellen Zustand für einen Einsatz im Tunnel nicht geeignet ist.

## 2.5.4 Abschnittsbildung mit fester Vorrichtung

Kohl beschreibt in seinem Bericht [6] Versuche zur Bildung von Brandabschnitten in einer Modellanlage. Die Modellanlage hat eine Höhe von 2.5 m und eine Länge von rund 20 m. Er verwendet feste Vorrichtungen zum Abschotten des Brandabschnittes. Er zeigt, dass das Ersticken des Feuers durch die Abschnittsbildung grundsätzlich möglich ist. Oftmals treten jedoch Probleme auf, weil die Abschottung, obwohl fest und nicht flexibel, nicht dicht ist.

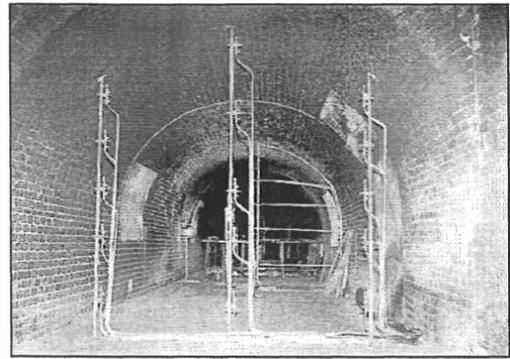
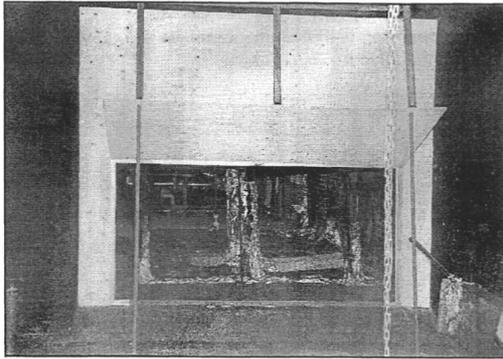


Abb. 2.12: Abschottungsvorrichtung (links) und Blick ins Innere der Modellanlage (rechts).

### 2.5.5 Aufblasbare Vorrichtung für U-Bahntunnel

Anfang der 90er Jahre wurden bei der Washington Metropolitan Area Transit Authority Versuche am Prototyp einer aufblasbaren Vorrichtung im Grossmassstab ausgeführt [20]. Mit der neuen Vorrichtung verfolgte man die Zielsetzung, die Tunnelaerodynamik in der Nähe von Rauchabsaugschächten gezielt zu beeinflussen. Zu den festen Anforderungen gehörte auch einen Personendurchgang, wie von der NFPA 130 gefordert.

Der im Grossmassstab gemessene Druckverlustbeiwert lag, bei Geschwindigkeiten von 1.0 m/s und höher, bei etwa 80-90 und war wesentlich höher bei tieferen Längsgeschwindigkeiten. Die mit offenem Personendurchgang gemessenen Druckverlustbeiwerte waren etwa halb so gross.

Es wurden aus den Pilotversuchen von durchaus positiven Erfahrungen berichtet aber die Idee wurde nicht weiterverfolgt.

### 2.5.6 Resilient Tunnel Plug – aufblasbare Vorrichtung für U-Bahntunnel

Mit dem Ziel, Metrotunnels gegen Überschwemmungen zu schützen, wird in den USA durch ILC Dover, der Universität von West Virginia und dem Department für Homeland Security eine aufblasbare Vorrichtung entwickelt. Diese soll einen Tunnel im Ereignisfall komplett abdichten und könnte auch zur Verhinderung von Rauch- oder Giftgasausbreitung eingesetzt werden. Momentan liegen vom Entwicklungsprojekt, das 2007 gestartet wurde, erste Prototypen vor.



Abb. 2.13: Prototyp des aufblasbaren Tunnel Plugs zur Verhinderung von Überschwemmungen.

## 3 Anforderungen

### 3.1 Ereignisphasen

Die Anforderungen an flexiblen Vorrichtungen variieren je nach Ereignisphase. Der Ablauf eines Ereignisses in einem Strassentunnel (wie in Abb. 3.1 dargestellt) lässt sich in die folgenden drei Phasen gliedern [11]:

1. Selbstrettung
2. Fremdrettung
3. Löscheinsatz.

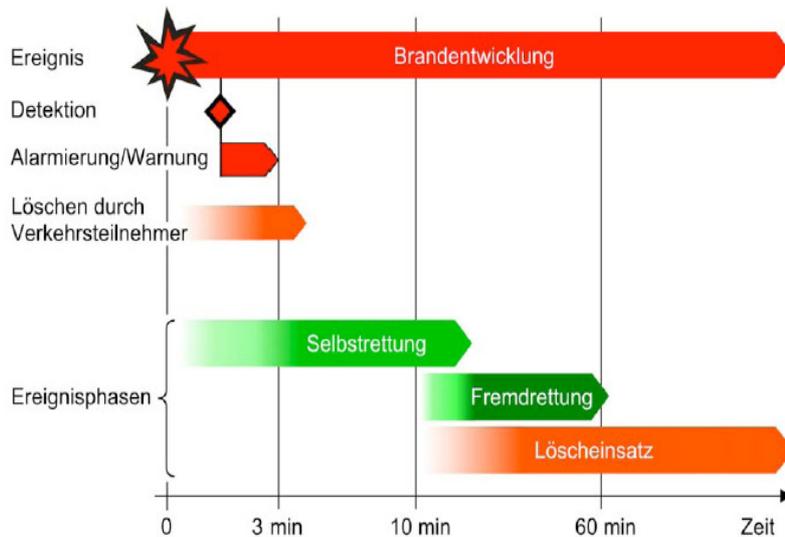


Abb. 3.1: Ereignisphasen [11].

Die Selbstrettung beginnt mit der Wahrnehmung des Ereignisses bzw. der Warnung, mit der die Verkehrsteilnehmer aufgefordert werden, die Fahrzeuge zu verlassen und sich in Sicherheit zu bringen. In dieser Phase sind noch keine Interventionskräfte vor Ort und die Tunnelbenutzer müssen sich selbstständig in Sicherheit bringen. Die Selbstrettung wird durch die Rauchausbreitung im Tunnel erschwert. Sie muss deswegen möglichst rasch erfolgen.

Bei der Fremdrettung steht das Absuchen des Tunnelraums und die Rettung von Tunnelbenutzer im Vordergrund. Abhängig von der Lage des Stützpunkts der Feuerwehr, der Länge und Lage des Tunnels, dem Brandort und vom Verkehr auf der Anfahsstrecke treffen die Ereignisdienste in der Regel frühestens etwa 10 Minuten nach der Alarmierung ein.

Der Löscheinsatz ist ein Element der Fremdrettung. Zusätzlich hat er auch zum Ziel, Schäden am Bauwerk zu verhindern bzw. diese gering zu halten.

### 3.2 Selbstrettung

Verbesserung der Selbstrettungsbedingungen bedeutet primär, die zur Selbstrettung zur Verfügung stehenden Zeit zu verlängern. Um dies zu erreichen, müssen die eingesetzten Vorrichtungen in der Lage sein, die Ausbreitung der heissen und toxischen Rauchgase zu verzögern.

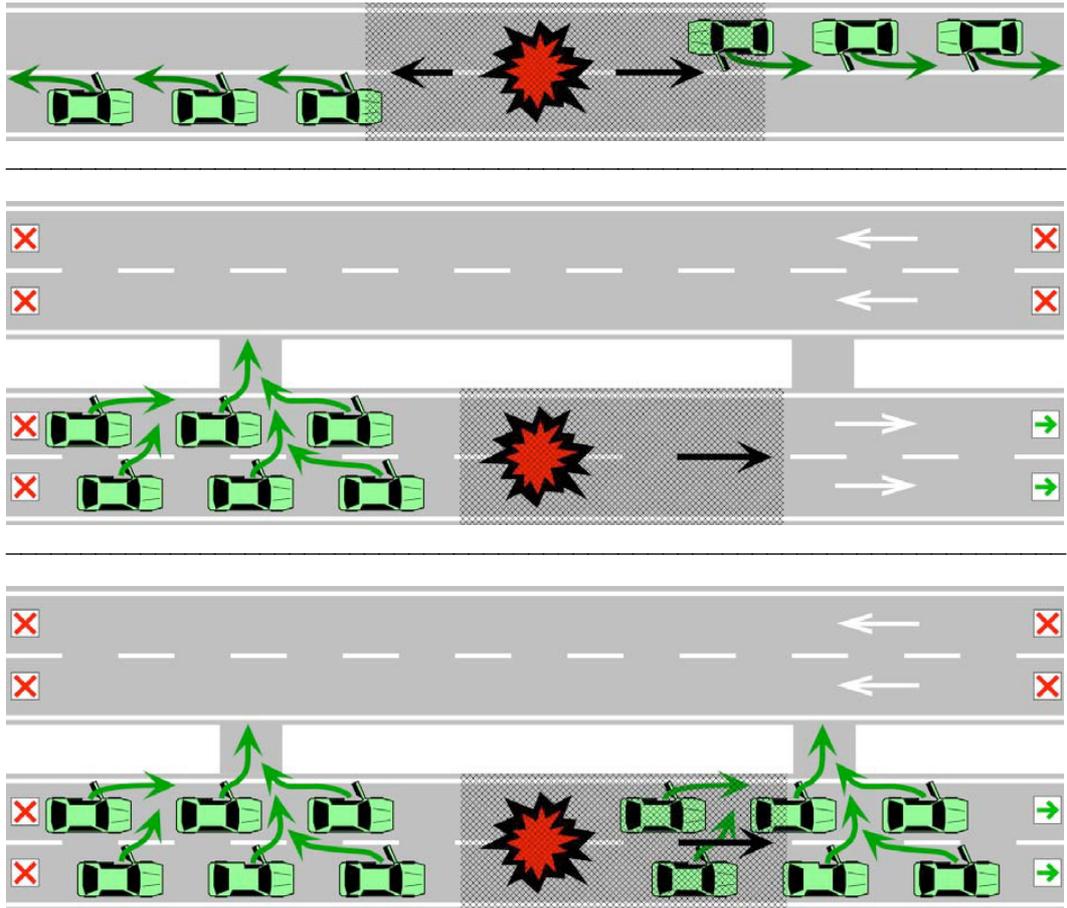


Abb. 3.2: Ablauf der Selbstrettung in Funktion der Tunnel- und Verkehrseigenschaften [11].

Der Einsatz von flexiblen Vorrichtungen zur Abschnittsbildung soll nach Möglichkeit die Verfügbarkeit der Fluchtwege möglichst wenig einschränken.

### Berechnung der Evakuierungszeit

Die gesamte Evakuierungszeit resultiert aus der Summe der anfänglichen Verzögerungszeit vor Ort und der reinen Fluchtzeit.

$$t_{ev} = t_d + t_{Al} + t_p + t_i + t_m$$

$t_{ev}$  = Gesamte Evakuierungszeit in [s]

$t_d$  = Zeitraum von der Brandentstehung bis zur Branddetektion [s]

$t_{Al}$  = Zeitraum von der Branddetektion bis zum Alarm [s]

$t_p$  = Zeitraum von der Reaktion auf die Gefahr bis zum Start der Bewegung [s]

$t_i$  = Zeitraum zur Untersuchung und Bekämpfung des Feuers [s]

$t_m$  = Zeitraum vom Start der Flucht bis zum Erreichen eines sicheren Bereiches [s]

Abb. 3.3: Bestandteile der Evakuierungszeit [21].

Die reine Fluchtzeit ( $t_m$ ) bestimmt sich aus der Fluchtweglänge und der Gehgeschwindigkeit, mit der sich Personen fortbewegen. Die Gehgeschwindigkeit von Personen wurde durch Weidmann sehr detailliert untersucht und beträgt im Schnitt 1.34 m/s [7]. Sehr viel tiefere Gehgeschwindigkeiten ergeben sich für ältere Personen (Abb. 3.4) und bei Rauch,

welcher die Sichtweite, die Orientierung und die Atmung der Betroffenen beeinflusst (Abb. 3.5).

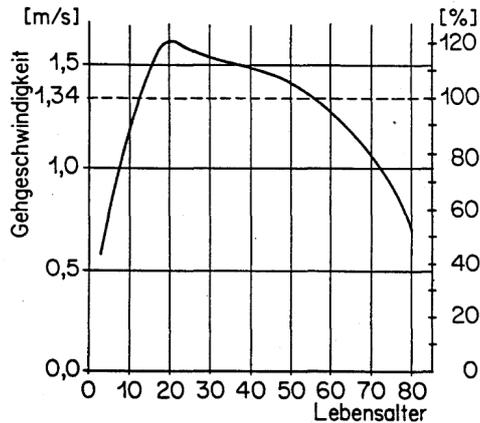


Abb. 3.4: Darstellung der Gehgeschwindigkeit nach Alter aus [7].

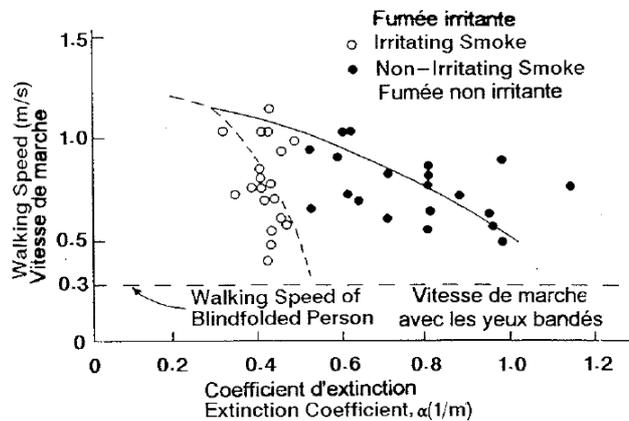


Abb. 3.5: Fluchtgeschwindigkeit als Funktion der Sichtweite bzw. Extinktionskoeffizient aus [13]. Der Extinktionskoeffizient ist ein Mass für die Minderung der Sichtweite im Rauch.

### Beurteilung der Selbstrettungschancen

Die heissen Rauchgase breiten sich anfänglich in einer Rauchsicht entlang der Tunneldecke aus. Die Schichtdicke ist abhängig von der Brandstärke und dem Verrauchungsvolumen, bzw. Tunnelprofil. Mit zunehmender Verweildauer im Tunnel, kühlen sich die Rauchgase ab und sinken in Richtung Tunnelsohle. Solange eine Rauchsicht vorhanden ist und die Unterseite der Rauchsicht höher liegt als die „Fluchthöhe“, definiert durch die Körpergrösse eines Menschen von etwa 2 m, besteht eine reale Chance der Selbstrettung. Geraten Personen auf ihrem Fluchtweg in einen Bereich, wo Rauch unterhalb der „Fluchthöhe“ vorhanden ist, nehmen die Chancen auf Selbstrettung stark ab. Abb. 3.6 illustriert diese Situation.

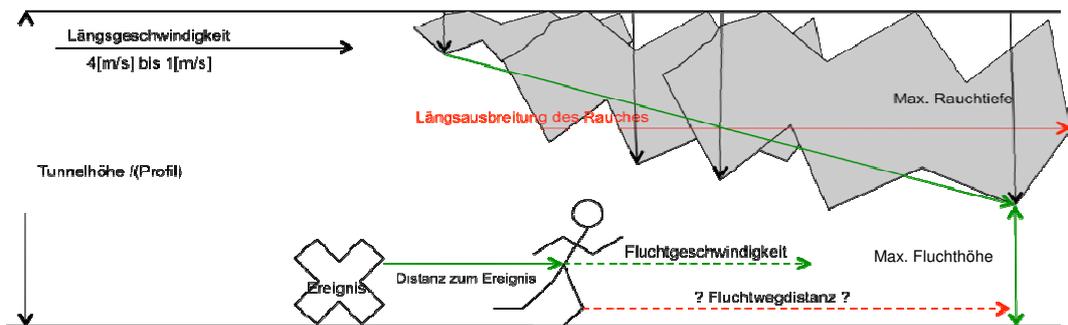


Abb. 3.6: Illustration von Rauchschicht und Fluchtvorgang.

Um die Chancen auf Selbstrettung möglichst hoch zu halten, muss also die Rauchausbreitung verzögert werden und die Rauchschichtung möglichst beibehalten werden. Flexible Vorrichtungen sind dafür grundsätzlich geeignet. Die Auswahl der richtigen Vorrichtungsgruppe (vgl. Kapitel 2.4) hängt dabei entscheidend von der gesamten Tunnelsituation und seiner Infrastruktur ab. Darauf wird in den kommenden Kapiteln eingegangen.

### Psychologische Faktoren

Schutz- und Rettungsmassnahmen sind sowohl den Umständen des Ereignisses anzupassen wie den Verhaltensweisen der Menschen und deren physischen und psychischen Möglichkeiten. Menschen können in Katastrophenfällen gemäss [22] und [23] (aus [24] zitiert) in drei Gruppen eingeteilt werden:

- Gruppe 1 (10% bis 15%): Dieser Teil der Bevölkerung reagiert sehr rational auf Ereignisse. Es gibt keine Anzeichen von aufkommender Hektik und die Übersicht wird behalten. Durch ihr klares Agieren übernehmen diese Personen meist wichtige Führungsfunktionen.
- Gruppe 2 (~70%): Dieser Teil ist von der auftretenden Situation betäubt, aber eher ruhig. Nach der ersten Phase des Schreckens reagieren diese Menschen mit aktivem Handeln, meist Hilfeleistung. Diese Gruppe kann durch klare Anordnungen sehr positiv beeinflusst werden.
- Gruppe 3 (10% bis 15%): Diese Gruppe reagiert in kritischen Situationen unberechenbar, d. h. meist mit Erstarrung, Kopflosigkeit und Flucht. Die Kopflosigkeit äussert sich oft in Form von sinnlosen Handlungen, wie blinde Flucht, Desorientiertheit, Realitätsverlust.

Panik kann zu rücksichtslosem, unberechenbarem Verhalten führen und Personen zusätzlich gefährden. Spezifische Studien [27] zeigen, dass Panik bei Brandfällen zwar vorkommt, aber verhältnismässig selten ist.

Psychologische Faktoren werden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht in die Auswertung miteinbezogen. Die angewandte Methodik zur Evaluierung der Selbstrettung (Beschreibung in Kapitel 5.4.1) geht von klar deterministischem Verhalten aus.

### Anforderungen an die Vorrichtungen aus Sicht Selbstrettung

Mechanische Vorrichtungen innerhalb des Fluchtweges stehen der Selbstrettung grundsätzlich als Hindernisse im Weg. Je nach Konstruktionsart wird die Vorrichtung als grösseres oder geringeres physisches und psychisches Hindernis wahrgenommen. Ausgefahrenere Schürzenvorrichtungen mit einer Unterkante zwischen 2.5 bis ca. 3 m über der Tunnelsohle werden dabei als geringstes Hindernis wahrgenommen. Streifenvorrichtungen ermöglichen zwar eine nahezu gefahrlose physische Durchquerung, stellen aber bereits eine psychisch-mentale Barriere dar. Bei vollschliessenden Rauchschutzvorrichtungen mit integrierten „Fluchttüren“ besteht eine physische Barriere, welche die Durchquerung erschwert. Ausserdem stellen sie für behinderte Personen, Rollstuhlfahrer und Kinderwagen ein massives Hindernis dar.

Es ist zu empfehlen, bei den beiden letzteren Gruppen, falls möglich, durchsichtigen Materialien zur Gestaltung der Vorrichtungen zu verwenden, um zumindest eine Teilsicht auf

die Situation hinter der Vorrichtung zu ermöglichen und dadurch die psychische Barriere zu verkleinern.

Zwingend ist in allen Fällen eine eindeutige und verwechslungsfreie Signalisation, die unmissverständlich verdeutlicht, wie und in welche Richtung das Hindernis zu bewältigen ist. Flexible Vorrichtungen sollen die Selbstrettung fördern und dürfen auf keinen Fall zu Fluchhindernissen werden.

### 3.3 Intervention

Die nachfolgenden Ausführungen sind zum grössten Teil der „Technischen Wegleitung für die Intervention bei Bränden in Strassentunneln“ der Feuerwehr Koordination Schweiz [11] entnommen.

Die Organisation und der Einsatz der Ereignisdienste weisen generell die nachfolgenden massgebenden Charakteristiken auf:

- Bei einröhrigen Tunneln erfolgt die Intervention in der Regel von beiden Portalen aus. Der Löscheinsatz wird soweit feuerwehrtaktisch sinnvoll, grundsätzlich von beiden Seiten durchgeführt. Bei einseitigem Rauchabtrieb übernimmt die Einheit auf der weniger verrauchten Seite zur Hauptsache die Brandbekämpfung, während die im Rauch vorrückenden Einsatzkräfte primär mit dem Absuchen und der Fremdrettung beschäftigt sind.
- Bei zweiröhrigen Tunneln erfolgt die Intervention der Feuerwehr in den Phasen Fremdrettung und Löscheinsatz in erster Priorität von der benachbarten Tunnelröhre über die am nächsten zum Unfall- bzw. Brandort gelegenen Querverbindungen.
- In zweiter und dritter Priorität rücken die Feuerwehreinheiten bei einem Ereignis in einem Tunnel mit Richtungsverkehr auch in der betroffenen Tunnelröhre vor.

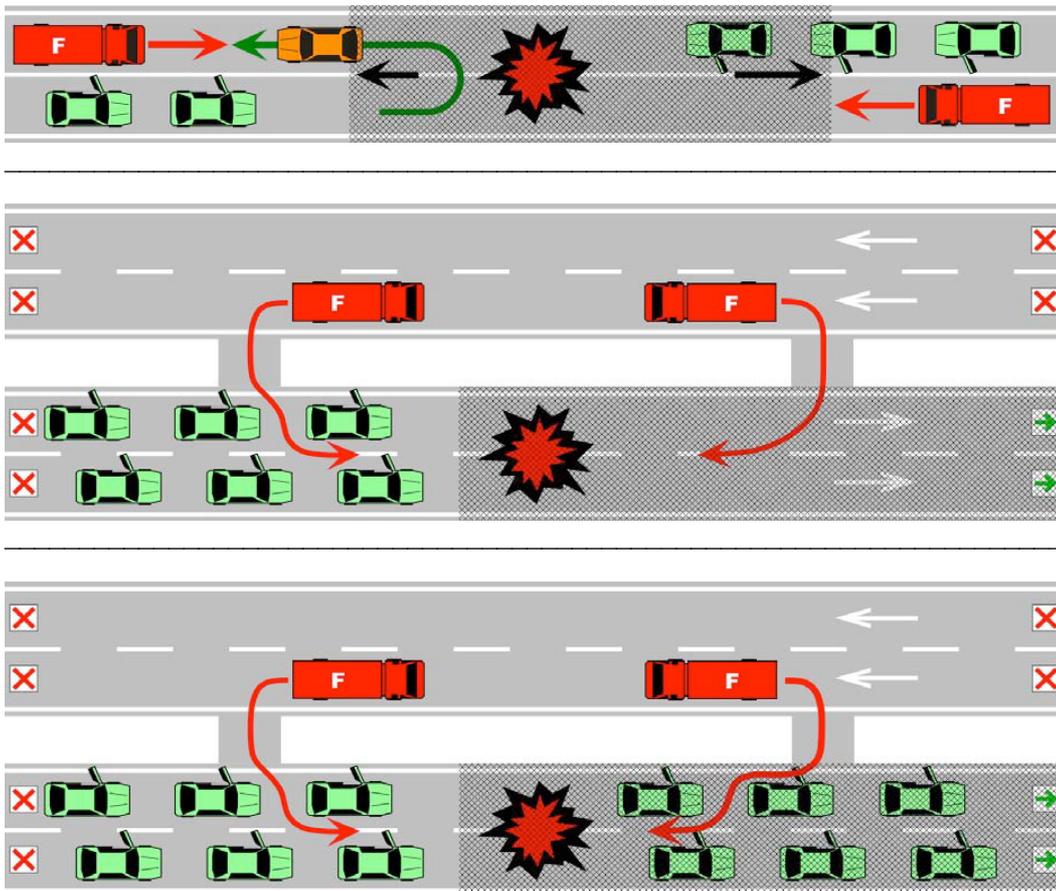


Abb. 3.7: Ablauf der Fremdrettung und des Löscheinsatzes in Funktion der Tunnel- und Verkehrseigenschaften [11].

Aus der Interventionsstrategie ergeben sich wichtige Anforderungen an den Einsatz flexibler Vorrichtungen zur Abschnittsbildung:

- Während der Interventionsphase dürfen flexible Vorrichtungen auf keinen Fall für die Rettungsdienste zu Interventionshindernissen werden.
- Falls die Vorrichtungen die Intervention stört, müssen sie leicht entfernt werden können. Nach der Entfernung sollten keine zusätzlichen Gefährdungen entstehen, wie zum Beispiel die explosionsartige Rückzündung von teilverbrannten Abgasen in einem Brandabschnitt.
- Die Massnahmen zur Selbstrettungsförderung sind auch zugleich Massnahmen, die für die Einsatzkräfte möglichst sichere Einsatzbedingungen gewährleisten und deren Einsatz effizienter gestalten sollte.
- Implizit wird dadurch auch ein Sachwertschutz für das Einsatzmaterial der Interventionen ermöglicht.

### 3.4 Übersicht Selbstrettung und Intervention

Die drei im Abschnitt 2.4 beschriebenen Klassen von Vorrichtungen werden an dieser Stelle vorgängig auf das Verhalten bei Selbstrettung und Intervention analysiert.

Tab. 3.1 zeigt einen Vergleich der Vorrichtungen bezüglich verschiedener selbstrettungsrelevanter Kriterien. Hier schneidet vor allem die Rauchschutzvorrichtung schlecht ab, weil sie nicht durchfahrbar ist und auch für Personen ein gewisses Hindernis darstellt.

Tab. 3.2 bewertet die verschiedenen Vorrichtungen bezüglich Intervention. Wiederum sind Streifenvorrichtung und Schürzenvorrichtung besser als die Rauchschutzvorrichtung, weil sie unter anderem die Durchfahrt von Fahrzeugen zulassen.

<b>Kriterien</b>	<b>Streifenvorrichtung</b>	<b>Schürzenvorrichtung</b>	<b>Rauchschutzvorrichtung</b>
<b>Raucheingrenzung</b>			
Rauchausbreitung	Wird verzögert	Unterbindet Backlayering, verzögert in Strömungsrichtung	Wird verzögert
Strömungseinflussung	Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit	Unterbindet Backlayering bei stark reduzierter Längsströmung	Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit
<b>Strahlungsschutz</b>			
Wärmestrahlung	Reduktion	Kein Einfluss	Reduktion
<b>Passierbarkeit</b>			
Fahrzeuge	durchfahrbar	durchfahrbar	Nicht durchfahrbar
Personen	durchgehbar	durchgehbar	Beschränkt, durchgehbar mit limitierter Kapazität
Psychologisch	freie Sicht versperrt	Keine Beeinträchtigung	freie Sicht versperrt
<b>Gefahrenpotenzial</b>			
Auffahrunfall	Vorhanden (Sicht eingeschränkt)	Nein (wird nur beim Brandort aktiviert, kein Verkehr)	Vorhanden (Sicht eingeschränkt)
Verletzungsgefahr durch Vorrichtung	Nein, durchgehbar	Nein, Freiraum von min. 2 m	Nein, durchgehbar

Tab. 3.1: Kriterienvergleich Selbstrettung

<b>Kriterien</b>	<b>Streifenvorrichtung</b>	<b>Schürzenvorrichtung</b>	<b>Rauchschutzvorrichtung</b>
<b>Brandgasausbreitung</b>			
	Wird verzögert	Kontrolliert, unterbindet Backlayering, verzögert in Strömungsrichtung	Wird verzögert
<b>Zugänglichkeit Feuerwehr</b>			
Durchfahrt Vorrichtungen	Relativ einfach durchfahrbar	Relativ einfach durchfahrbar	Vorrichtung durch Fw zu steuern (Vorrichtung auf / ab)
Sichtbarriere	Keine freie Sicht hinter Vorrichtung	Ev. Einschränkung für grosse Einsatzfahrzeuge, nicht für Personen	Keine freie Sicht hinter Vorrichtung
Zufahrtsdauer	Etwas länger	Tendenziell förderlich, verrauchter Abschnitt ist kleiner	Länger, durch Steuerung der Vorrichtung (auf / ab)
<b>Fremdrettung</b>			
	Situativ	Situativ	Situativ
<b>Löschangriff</b>			
Nähe zum Brandherd	Abstand situativ	Relativ nahe	Abstand situativ
Schutz Interventionskräfte	Gut hinter Vorrichtung	Wärmeschutz im oberen Bereich	Gut hinter Vorrichtung
Rückzündung	Nein	Nein	Nein
<b>Schadensauswirkung auf Objekt</b>			
	Eingegrenzt	Eingegrenzt	Eingegrenzt

Tab. 3.2: Kriterienvergleich Intervention

### 3.5 Fazit

Für die weitere Untersuchung haben diejenigen Vorrichtungsgruppen Priorität, die für Selbstrettung und Intervention je nach Tunneltyp und Tunnelverhältnissen die besten Voraussetzungen bieten. Ohne Berücksichtigung von Tunneltyp und Tunnelverhältnissen ergibt sich folgende Rangfolge:

1. Streifenvorrichtungen
2. Schürzenvorrichtungen
3. Rauchschutzvorrichtungen.

## 4 Voruntersuchungen

### 4.1 Einleitung und Zielsetzung

Flexible Vorrichtungen haben das Potenzial, dort zum Einsatz zu kommen wo die herkömmliche Sicherheitsausrüstung (Strahlventilatoren, Abluftventilatoren) nicht ausreichend vor den Folgen von Tunnelbränden schützen kann. Es können verschiedene Tunnelkategorien mit diesen Voraussetzungen identifiziert werden:

- A. Natürlich belüftete Tunnel mit grosser Steigung (> 3% Längsneigung)
- B. Längsbelüftete Tunnel mit Gegenverkehr
- C. Längsbelüftete Tunnel mit Richtungsverkehr und hoher Stauwahrscheinlichkeit
- D. Tunnel mit Rauchabsaugung und einer Länge über 6 km.

Verschiedene Kombinationen von Anwendungsprinzipien und Modellen flexibler Vorrichtungen wurden für diese unterschiedlichen Tunneltypen untersucht und deren Effizienz anhand physikalischen Eigenschaften und Wirkweise bewertet. So konnte eine Vorselektion von Vorrichtungen und deren Anwendungsprinzip getroffen werden, welche nur Varianten mit Realisierungspotenzial umfasst.

### 4.2 Selektionsverfahren

#### 4.2.1 Physikalische Wirkprinzipien

Die auf dem Markt erhältlichen flexiblen Vorrichtungen wurden aufgrund ihrer Konstruktionsart und Wirkweise in drei Kategorien zusammengefasst, welche für die weitere Untersuchung der Vorrichtungen verwendet werden:

1. Luftdurchlässige Streifenvorrichtungen
2. Teilschliessende Schürzenvorrichtungen
- 3.a Vollschliessende Rauchschutzvorrichtungen
- 3.b Vollschliessende Vorrichtungen zur Bildung von Brandabschnitten.

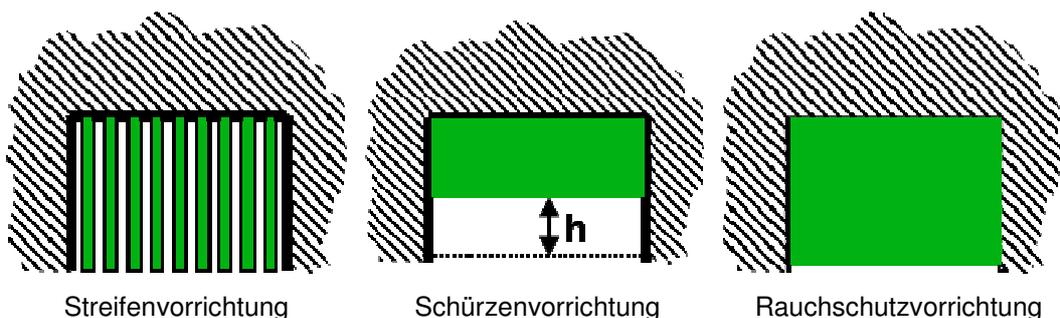


Abb. 4.1: Arten von flexiblen Vorrichtungen (Prinzipskizzen).

Je nach Konstruktionsart wird mit flexiblen Vorrichtungen eine andere Wirkung erzielt. In Tab. 4.1 sind alle Konstruktionsarten und Wirkprinzipien aufgelistet. Markiert sind nur effiziente und sinnvolle Kombinationen von Konstruktionsart und Wirkprinzip, welche in die Voruntersuchung einfließen:

- Streifenvorrichtung zum Bremsen der Längsströmung
- Schürzenvorrichtung zum Bremsen der Längsströmung
- Schürzenvorrichtung zur Absenkung von  $v_{\text{erforderlich}}$
- Rauchschutzvorrichtung zum Stoppen der Längsströmung
- Rauchschutzvorrichtung zur Bildung von Brandabschnitten

Wirkprinzip	Konstruktionsart		
	Streifenvorrichtung (Durchlässig)	Schürzenvorrichtung (Teilschliessend)	Rauchschtzvorrichtung (Vollschliessend)
Bremsen	X	X	
Stoppen			X
Abschnittsbildung		(X) <sup>1</sup>	X
Verforderlich absenken <sup>2</sup>		X	

Tab. 4.1: Konstruktionsarten von flexiblen Vorrichtungen und deren Wirkprinzipien.

Die Voruntersuchung hatte zum Ziel, Kombinationen auszusondern, welche nicht funktionieren, bzw. die Kombinationen mit dem grössten Potenzial zu identifizieren. Dafür wurden zwei Schritte durchgeführt:

1. Untersuchung, ob die Vorrichtungsart grundsätzlich die funktionellen Anforderungen erfüllt.
2. Bewertung des Potenzials der Vorrichtungsart bezüglich Einbau in einem bestimmten Tunneltyp.

#### 4.2.2 Eignung der Strassentunnel für den Einsatz flexibler Vorrichtungen

Bei gut funktionierenden Lüftungssystemen ist kein Potenzial für den Einsatz von Vorrichtungen vorhanden. Lüftungssysteme mit mechanischer Lüftung (Längslüftung und Rauchabsaugung) bieten grössere Flexibilität und bessere Kontrolle der Längsströmung und somit der Rauchausbreitung als passive Systeme wie die flexiblen Vorrichtungen. Bei Lüftungssystemen mit nicht einwandfrei funktionierendem Konzept, wurde das Potenzial der Vorrichtungen mit tief, mittel oder hoch bewertet (Abb. 4.2 bis Abb. 4.4).

Die Analyse der verschiedenen Tunneltypen zeigt, dass die derzeit üblichen Lüftungstechnologien im Brandfall nicht immer zufriedenstellend sind. Entweder weil die benötigte Ventilatorleistung nicht installiert werden kann, oder weil aufgrund der Verkehrssituation im Tunnel keine optimale Lüftungsstrategie möglich ist.

Grundsätzlich wurde gemäss [8] zwischen Tunnel mit natürlicher Lüftung (NL), Längslüftung (LL) und Rauchabsaugung (RA) unterschieden, sowie zwischen den Verkehrssituationen Richtungsverkehr mit tiefer Stauwahrscheinlichkeit (RV1), Richtungsverkehr mit hoher Stauwahrscheinlichkeit (RV2) und Gegenverkehr (GV).

Aus der Voruntersuchung resultieren nachfolgende Tunneltypen, welche sich für den Einsatz von flexiblen Vorrichtungen grundsätzlich eignen:

- NL mit Längsneigung > 2%: RV2, GV
- LL: RV2, GV
- RA: RV2, GV.

<sup>1</sup> Funktioniert nur teilweise und zeitlich beschränkt und wird deshalb nicht weiterverfolgt

<sup>2</sup> *Verforderlich* bezeichnet nötige Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel um Rückströmen des Rauches (Backlayering) zu verhindern. Ohne Einbau von Vorrichtung entspricht sie der sogenannten „kritischen Geschwindigkeit“.

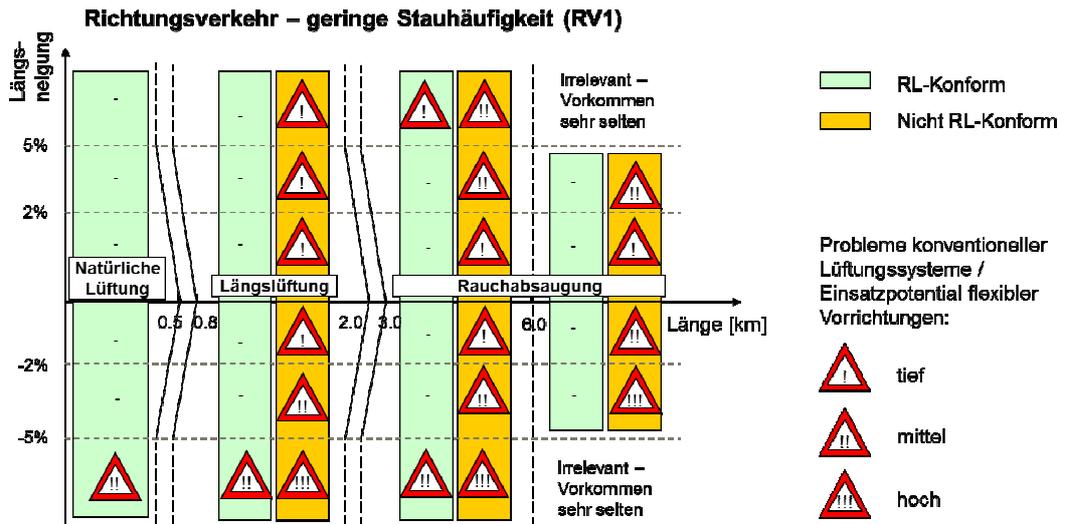


Abb. 4.2: Einsatzpotenzial bei Tunnel mit Richtungsverkehr mit geringer Stauhäufigkeit (RV1 - Stau während weniger als 50 h / Jahr).

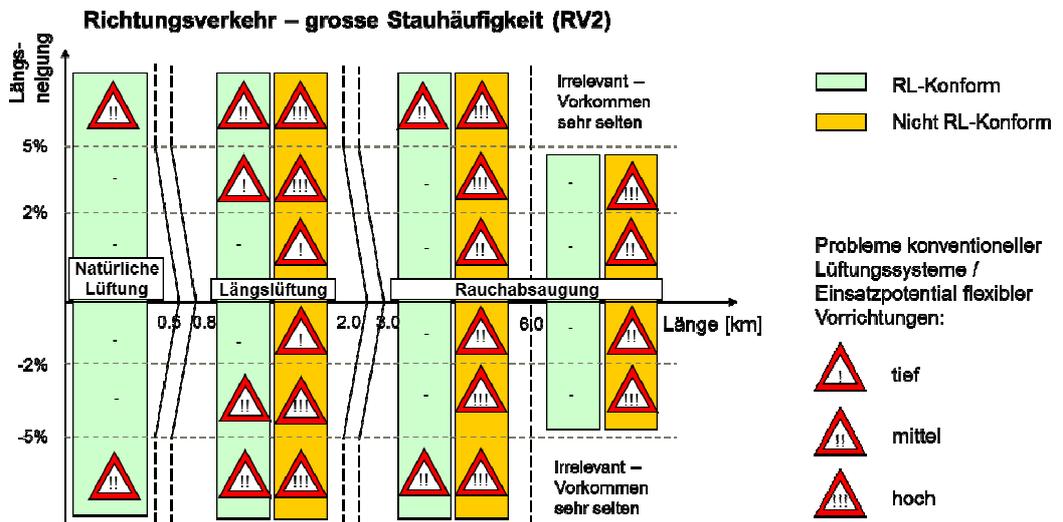


Abb. 4.3: Einsatzpotenzial bei Tunnel mit Richtungsverkehr mit grosser Stauhäufigkeit (RV2 - Stau während mehr als 50 h / Jahr).

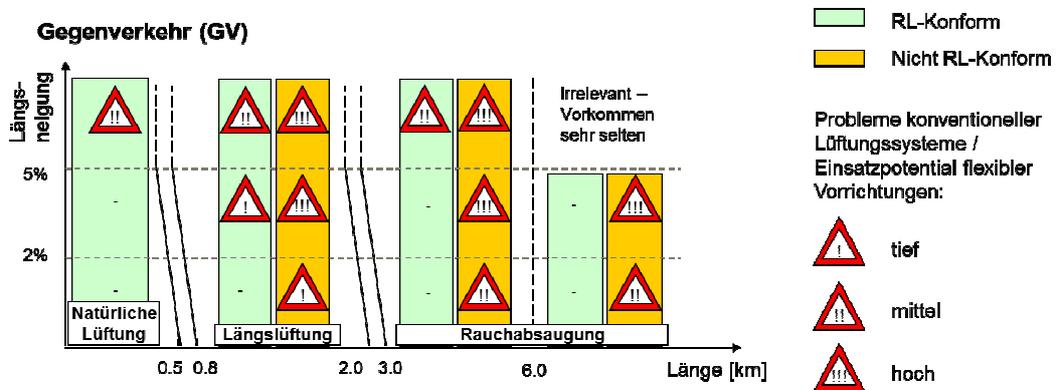


Abb. 4.4: Einsatzpotenzial bei Tunnel mit Gegenverkehr (GV).

### 4.2.3 Tunnelstatistik / Tunnelcharakteristik

Damit die Entwicklung von Vorrichtungen Sinn macht, muss der entsprechende Anwendungsbereich, also Tunneltyp in ausreichender Anzahl vorhanden sein. Abb. 4.5 zeigt, dass insbesondere die Tunnellänge, nicht aber die Anzahl Bauwerke eines Tunneltyps einen grossen Einfluss auf die gesamte vorhandene Anzahl Tunnelkilometer hat. Dies führt dazu, dass Tunnel mit Rauchabsaugung, obwohl am meisten Tunnelkilometer aufweisend, für den Einbau flexibler Vorrichtungen momentan als ungeeignet zu bewerten sind. Zum einen weisen die wenigen Tunnel in der Schweiz oftmals Eigenheiten auf, sodass eine generische Untersuchung und Aussage zum Einsatz von flexiblen Vorrichtungen schwierig ist. Zum anderen wurden Tunnel mit mangelhaften Lüftungssystemen in den letzten Jahren erneuert, sodass heute Tunnel mit Rauchabsaugung auf einem guten Stand sind und keinen Bedarf für zusätzliche Massnahmen, wie flexiblen Vorrichtungen, aufweisen.

Tunnel mit natürlicher Lüftung und Tunnel mit Längslüftung weisen aber Potenzial für den Einsatz flexibler Vorrichtungen auf. Diese beiden Tunneltypen bilden daher den Fokus der weiteren Untersuchungen.

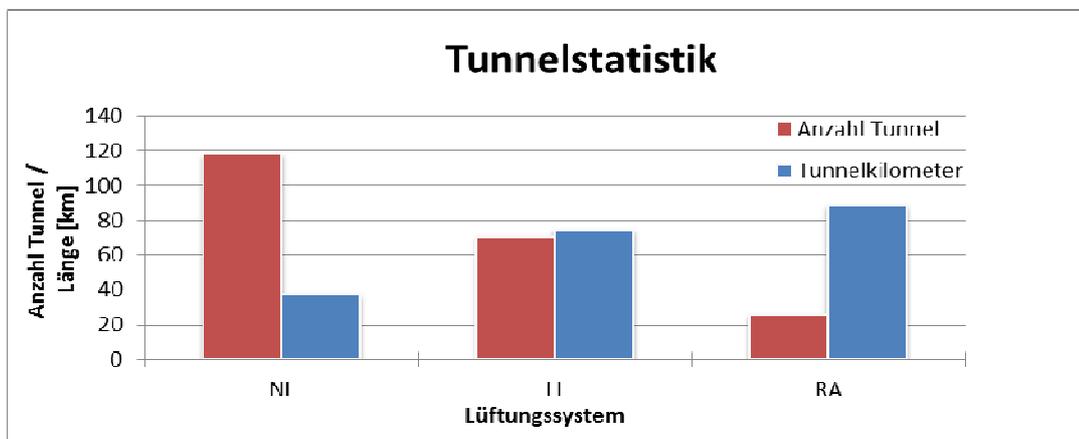


Abb. 4.5: Statistische Verteilung der Länge der Strassentunnel in der Schweiz für die Lüftungssysteme „Natürliche Lüftung“ (NL), „Längslüftung“ (LL) und „Rauchabsaugung“ (RA).

### 4.2.4 Ergebnisse des Selektionsverfahrens

Die Beurteilung, ob die Vorrichtungen die grundsätzliche funktionelle Anforderung, das Erzielen eines Sicherheitsgewinns, erfüllen, wurde mittels einfachen Berechnungen und Abschätzungen vorgenommen. Nutzlose Kombinationen von Vorrichtungstypen und Anwendungsarten konnten ausgeschlossen werden, und nur vielversprechende Varianten werden weiter untersucht:

- Streifenvorrichtung in natürlich belüfteten Tunnel (bremsen)
- Schürzenvorrichtungen in natürlich belüfteten Tunnel (bremsen)
- Schürzenvorrichtungen in längsbelüfteten Tunnel (Optimierung der erforderlichen Geschwindigkeit)
- Rauchschutzvorrichtung in natürlich belüfteten Tunnel (bremsen)
- Rauchschutzvorrichtung in natürlich oder längsbelüfteten Tunnel (Abschnittsbildung)

## 4.3 Ergebnisse der Voruntersuchung

### 4.3.1 Streifenvorrichtungen – Durchlässig

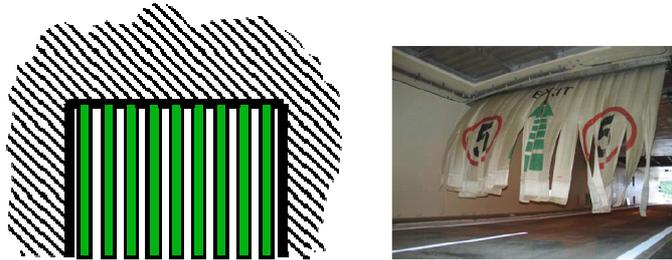


Abb. 4.6: Schematische Darstellung der Streifenvorrichtung im Tunnelquerschnitt (links) und Beispiel einer existierenden Streifenvorrichtung (rechts)

Streifenvorrichtungen wie z.B. die oben dargestellten „Fire Curtains“ der Firma Aigner sind teilweise durchlässig. Rauch kann nicht zurückgehalten werden. Sie stellen aber einen aerodynamischen Widerstand dar, welcher die Längsgeschwindigkeit der Luftströmung im Tunnel verringert. Der Widerstandskoeffizient einer Streifenvorrichtung wurde im Rahmen von [3] und [4] ermittelt. Dabei hat sich gezeigt, dass der Widerstand eine Funktion der Luftgeschwindigkeit ist. Es darf davon ausgegangen werden, dass es weitere Faktoren gibt, welche den Widerstandskoeffizient beeinflussen:

- Tunnelprofil
- Streifenbreite
- Gewicht der Streifen
- Überlappung der Streifen.

Der Einfluss dieser zusätzlichen Faktoren liegt nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit und ist nicht im Detail bekannt. Es wurde der Widerstandskoeffizient verwendet, wie er von Öttl [26] beschrieben wird (siehe 2.5.2).

Bereits eingebaut sind Streifenvorrichtungen im Tunnel Roppen (A). In diesem Tunnel, der mit einer Halbquerlüftung ausgerüstet ist, ersetzen sie im Ereignisfall Strahlventilatoren bei der Kontrolle der Längsgeschwindigkeit. Beim bereits bestehenden Tunnel war die Tunneldecke zu tief, um neue Strahlventilatoren einzubauen, damit die ehemals ungenügende Kontrolle der Längsströmung sichergestellt werden kann.

Weitere Einsatzmöglichkeiten ergeben sich für kurze steile Tunnel. In diesen Tunnel ist bei einem Brandereignis mit starkem thermischen Auftrieb zu rechnen, welcher hohe Luftgeschwindigkeiten zur Folge hat. Strahlventilatoren können aufgrund der kurzen Länge in diesen Tunnel nicht in genügender Zahl installiert werden. Die Minderung der Längsgeschwindigkeit im Ereignisfall könnte auch durch Einsatz von Streifenvorrichtungen erreicht werden.

Zur Untersuchung, ob die Bremswirkung der Streifenvorrichtungen ausreichend ist, wurde die Längsgeschwindigkeit berechnet, die sich aufgrund der Randbedingungen nach einer gewissen Zeit im Tunnel einpendeln wird. Dabei setzen sich die Randbedingungen zusammen aus dem Widerstandskoeffizienten der Schürzen und den typischen Daten eines kurzen, steilen Tunnel:

- |                                   |                   |
|-----------------------------------|-------------------|
| • Tunnellänge:                    | 500 m             |
| • Tunnelquerschnitt:              | 52 m <sup>2</sup> |
| • Längsneigung (LN):              | 0 - 5%            |
| • Portalwind:                     | 5 m/s             |
| • Temperaturerhöhung durch Brand: | 85 K.             |

Das Resultat der Berechnungen ist in Abb. 4.7 dargestellt und zeigt, dass mit zwei bis vier Vorrichtungen die Längsgeschwindigkeit wirkungsvoll auf einen Wert von unter 1 m/s reduziert werden kann. Ohne den Einbau von Vorrichtungen würde das gleiche Ereignis zu wesentlich höherer Längsgeschwindigkeit führen:

- 4.3 m/s bei 1 % LN
- 6.0 m/s bei 3 % LN
- 7.3 m/s bei 5 % LN.

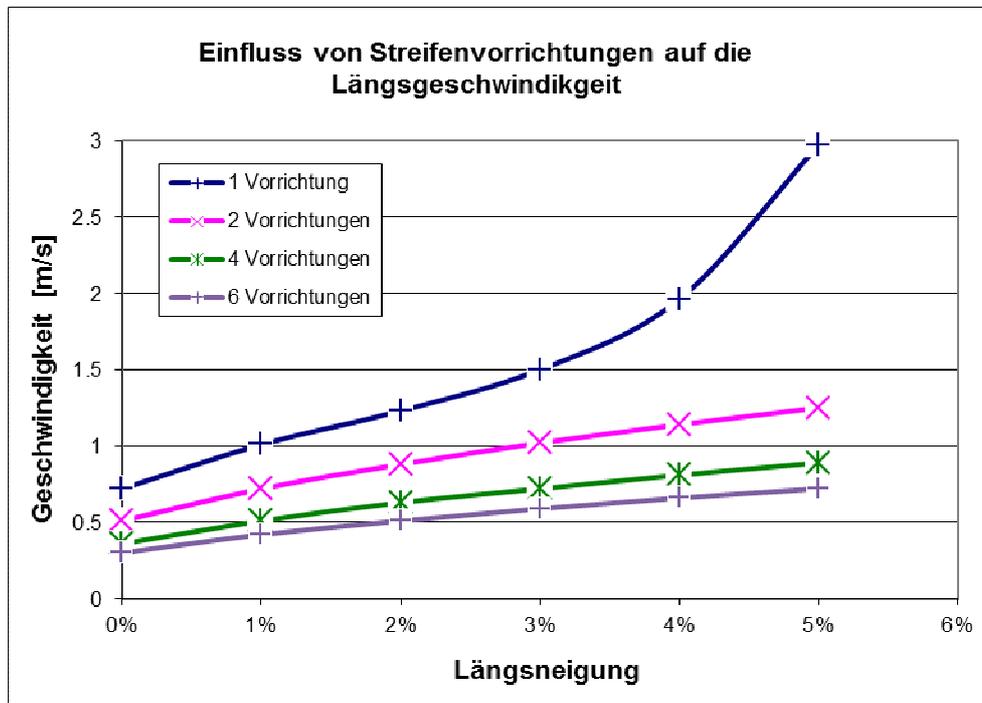


Abb. 4.7: Stationäre Längsgeschwindigkeit für unterschiedliche Längsneigungen und Anzahl Vorrichtungen im Brandfall.

#### Zusammenfassung der Ergebnisse:

Durchlässige Streifenvorrichtungen eignen sich zur

- Kontrolle der Längsgeschwindigkeit in NL Tunnel mit grosser Steigung
- Kontrolle der Längsgeschwindigkeit in Tunnel mit Rauchabsaugung.

In den detaillierteren Untersuchungen in Kapitel 5 werden dynamische Vorgänge wie z.B. der Schliessvorgang der Vorrichtung oder der Anstieg der Brandleistung betrachtet und deren Wirkung auf die Rauchausbreitung analysiert.

### 4.3.2 Schürzenvorrichtungen – Teilschliessend

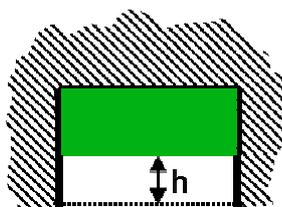


Abb. 4.8: Schematische Darstellung der Schürzenvorrichtung im Tunnelquerschnitt

Aus Gebäuden ist die Wirkweise der Schürzenvorrichtungen bereits sehr gut bekannt. Rauch, der aufgrund seiner hohen Temperatur an die Decke steigt, wird durch Schürzenvorrichtungen an der Ausbreitung gehindert. Dadurch kann in Gebäuden eine grossflä-

chige Verrauchung verhindert werden, sowie Fluchtwege (z.B. Treppen) länger rauchfrei gehalten werden.

In Strassentunneln ist normalerweise eine Luftströmung vorhanden, welche hauptsächlich durch Einflüsse der meteorologischen Bedingungen und des Verkehrs entsteht. Eine Anwendung wie in Gebäuden macht daher keinen Sinn. Rauch kann bei Vorhandensein von Luftströmungen nicht durch Schürzenvorrichtungen an der Ausbreitung gehindert werden, da er mit der Luft über die Schürzen hinweg transportiert wird. Schürzenvorrichtungen können in Strassentunneln auf zwei Arten eingesetzt werden:

- Zum Abbremsen der Längsströmung
- Zum Absenken der „erforderlichen Geschwindigkeit“

### Schürzenvorrichtungen zum Abbremsen der Längsströmung

Wie effizient Schürzenvorrichtungen zum Bremsen der Luftströmung im Tunnel sind, wurde wiederum anhand des Tunnelbeispiels untersucht, das auch für die Streifenvorrichtungen verwendet wurde (Beschreibung auf S. 40). Da die Höhe, bzw. Einfahrtiefe der Schürzenvorrichtungen in den Tunnel einen wesentlichen Einfluss auf den aerodynamischen Widerstand hat, den die Schürzen ausüben können, wurden zwei unterschiedliche Höhen betrachtet:

- Schürze mit Einfahrtiefe von 1.5 m über Fahrbahn
- Schürze mit Einfahrtiefe von 2.5 m über Fahrbahn.

Die Berechnungen zeigen, dass auch bei einer Einfahrtiefe von 1.5 m die Längsströmung im Brandfall nicht genügend abgebremst werden kann (Abb. 4.9). Eine Längsgeschwindigkeit von 1 m/s kann auch mit 6 Vorrichtungen, was bei gegebener Tunnellänge einer Vorrichtung etwa alle 100 m entspricht, bei relevanten Längsneigungen nicht erreicht werden. Folglich sind kleinere Schürzen noch wirkungsloser, was in Abb. 4.10 zu sehen ist.

Schürzen, die tiefer in den Fahrraum hinabragen und ein noch grösseres Hindernis auf dem Fluchtweg darstellen, scheinen nicht realistisch. Schürzen, mit dem Ziel die Längsströmung zu bremsen, wurden deshalb als mögliche Anwendungsform flexibler Vorrichtungen verworfen.

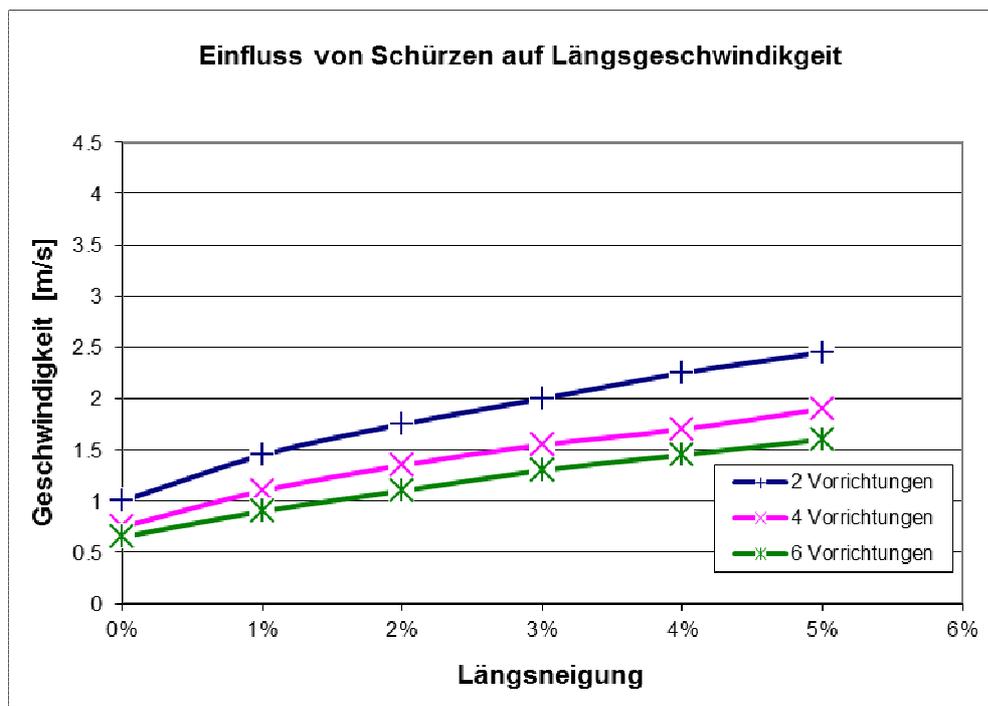


Abb. 4.9: Stationäre Längsgeschwindigkeit für unterschiedliche Längsneigungen und Anzahl Vorrichtungen – Schürzentiefe 1.5 m über Fahrbahn.

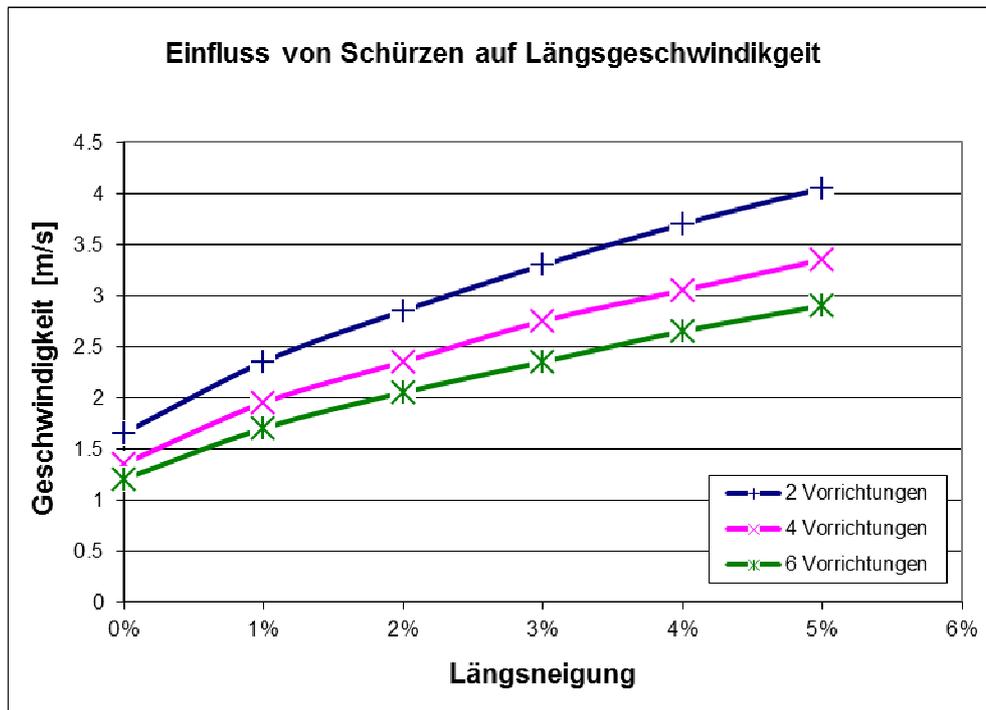


Abb. 4.10: Stationäre Längsgeschwindigkeit für unterschiedliche Längsneigungen und Anzahl Vorrichtungen – Schürzentiefe 2.5 m über Fahrbahn.

**Schürzenvorrichtungen zwecks Optimierung der “erforderlichen Geschwindigkeit”**  
Schürzenvorrichtungen verkleinern den offenen Querschnitt von Strassentunneln, was zu einer Düsenwirkung und lokalen Erhöhung der Längsgeschwindigkeit führt.

$$u_S = u_T \frac{A_T}{A_S}$$

Mit:

$u_S$	Mittlere Luftgeschwindigkeit unter der Schürze	[m/s]
$u_T$	Längsgeschwindigkeit im Tunnel	[m/s]
$A_S$	Offene Querschnittsfläche unter der Schürze	[m <sup>2</sup> ]
$A_T$	Querschnittsfläche des Tunnels	[m <sup>2</sup> ].

In Tunnel mit mechanischer Lüftung (Längslüftung oder Rauchabsaugung) kann so im Bereich der Schürzenvorrichtungen die Geschwindigkeit hoch gehalten werden, obwohl die Längsgeschwindigkeit im Rest des Tunnels deutlich tiefer liegt. Zudem blockiert die Schürze die Rauchsicht, was dazu führt, dass Backlayering (Rückströmen des Rauches) bereits mit tiefen Längsgeschwindigkeiten unterbunden werden kann. Gleichzeitig tritt aber durch die Anströmung der Rauchschräge eine Störung der Luftschicht ein. Es werden Turbulenzen induziert, welche zur Störung der Rauchschräge führen. Stromab der Schürze wird der Rauch daher über den gesamten Querschnitt verteilt. Eine eigentliche Schichtung kann nicht mehr beobachtet werden.

Schürzenvorrichtungen weisen Potenzial auf, um in längsbelüfteten Tunnel die Ausbreitung von Rauch zu beschränken. Dies ist speziell bei Tunnel mit Gegenverkehr oder bei Tunnel mit hoher Stauwahrscheinlichkeit von Vorteil. Der Fokus liegt dabei auf der Ver-

zögerung der Rauchausbreitung, bzw. Minimierung der Lüftungsgeschwindigkeit. Dass dies grundsätzlich funktioniert, wurde im Rahmen der Voruntersuchung durch Simulationen gezeigt. Die Resultate in Abb. 4.11 stellen die Situation ohne Schürzen für Längsgeschwindigkeiten von 3 m/s und 1.5 m/s sowie die Situation mit Schürzen bei 0.5 m/s Längsgeschwindigkeit dar. Während bei konventioneller Längslüftung die Rauchausbreitung nur einseitig verzögert werden kann, zeigt die Situation mit Schürzen beidseitig gute Ergebnisse.

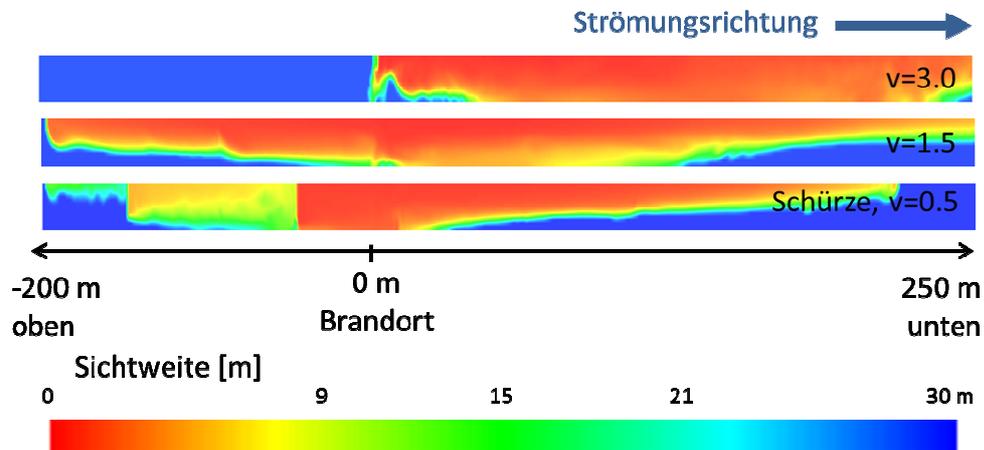


Abb. 4.11: Vergleich der Rauchausbreitung nach 4 min, ohne und mit Schürze bei unterschiedlicher Längsgeschwindigkeit.

Schürzenvorrichtungen eignen sich ebenfalls, um die erforderliche Mindestabsaugmenge in Tunnel mit Rauchabsaugung zu reduzieren. Dies könnte bei längeren Tunnel dazu führen, dass unter Umständen nur eine Lüftungszentrale erforderlich ist.

#### Zusammenfassung der Ergebnisse:

- Schürzen sind zu wenig wirksam für die Kontrolle der Längsgeschwindigkeit (bremsen).
- Schürzen zur Absenkung der „erforderlichen Längsgeschwindigkeit“ in Tunnel mit Längslüftung verzögern die Rauchausbreitung. Weiterführende Untersuchungen sind in Kapitel 5.3 zu finden.

### 4.3.3 Rauchschutz- / Brandschutzvorrichtung – Vollschiessend

#### Rauchschutz zum Stoppen der Längsströmung

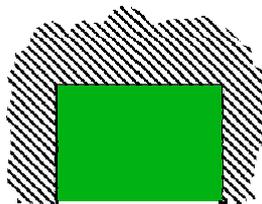


Abb. 4.12: Schematische Darstellung der Rauchschutzvorrichtung im Tunnelquerschnitt

Rauchschutzvorrichtungen erstrecken sich über den gesamten Tunnelquerschnitt. Dadurch stellen sie einen grossen Widerstand für Längsströmungen dar. Die Wirkung auf vorhandene Längsströmungen im Tunnel tritt unmittelbar nach Aktivierung bzw. Ausfahren der Rauchschutzvorrichtung ein. Dadurch kann die Längsströmung im Tunnel sehr effektiv und schnell auf ein Minimum reduziert werden. Gewisse Grenzen sind durch die mechanische Stabilität der Vorrichtung gesetzt, welche ein zu schnelles Schliessen nicht

zulässt, da Trägheitskräfte der Tunnelluft zu gross sein würden, und zu einer Zerstörung der Vorrichtung führen würden.

Rauchschutzvorrichtungen haben dort Potenzial, wo aufgrund grosser Tunnelneigung ein grosser thermischer Auftrieb im Brandfall zu erwarten ist, wie auch bei längeren Tunnel mit hohen meteorologischen Effekten.

### Brandabschnittsbildung

Ein Feuer benötigt drei Komponenten: Sauerstoff, Brandgut und Aktivierungsenergie in Form von Wärme. Das Konzept der Abschnittsbildung basiert auf dem Entzug von Sauerstoff. Dies soll erreicht werden durch Einschliessen des Feuers in einem kleinen Abschnitt mittels Vollabdichtungen. Durch die Reaktion des Feuers wird die Sauerstoffkonzentration im luftdichten Abschnitt reduziert, bis nicht mehr ausreichend Sauerstoff vorhanden ist und das Feuer erlischt.

Was bei einer solchen Abschnittsbildung berücksichtigt werden muss, ist die Erwärmung und Ausdehnung der Luft. Diese Ausdehnung führt sehr schnell zu einem Überdruck im Abschnitt, welcher eine grosse Kraft auf die Vorrichtungen des Brandabschnittes ausüben würde. Eine einfache Abschätzung ergibt folgende Zahlen:

- Tunnelquerschnitt: 50 m<sup>2</sup>
- Abschnittslänge: 50 m
- Energieeintrag bis O<sub>2</sub> auf 0 Vol% reduziert: ca. 1'230 MJ.

	<i>Adiabate Berechnung</i>	<i>Berechnung mit 40 % Wärmeverlust an Tunnelwand</i>
Temperaturerhöhung im Abschnitt	410 K	245 K
Luftdruck im Abschnitt aufgrund Temperaturerhöhung	2.4 bar	1.8 bar
Kraft auf Vorrichtung	ca. 7'000 kN	ca. 4'200 kN

Tab. 4.2: Schätzung der Kräfte die auf Vorrichtung zur Brandabschnittsbildung wirken.

Dichte Vorrichtungen zu konstruieren, welche diesen Kräften standhalten, würde einen hohen Aufwand, in konstruktiver wie finanzieller Hinsicht bedeuten. Aufgrund dieser physikalischen Gegebenheiten wurde die Bildung von Luftdichten Abschnitten verworfen und nicht mehr weiter verfolgt.

Brandabschnitte könnten jedoch auch leicht durchlässig gebaut werden. Wird ein kleiner Luftaustausch über die Vorrichtung zugelassen, kann ein Überdruck innerhalb des Abschnittes vermieden werden. Natürlich strömt dadurch frische Luft in den Abschnitt hinein, was dazu führt, dass eine komplette Brandlöschung nicht möglich ist, sondern nur eine Reduktion der Brandleistung in Abhängigkeit der Frischluftzufuhr. Eine Schätzung der maximal möglichen Brandleistung ist in Abb. 4.14 vorgestellt. Ausgehend von einem Tunnelquerschnitt von 10 m x 5 m, einer Temperaturdifferenz von 300 K, wurden die Luftströme über die Vorrichtung als Funktion der Druckdifferenz sowie der offenen Fläche berechnet.

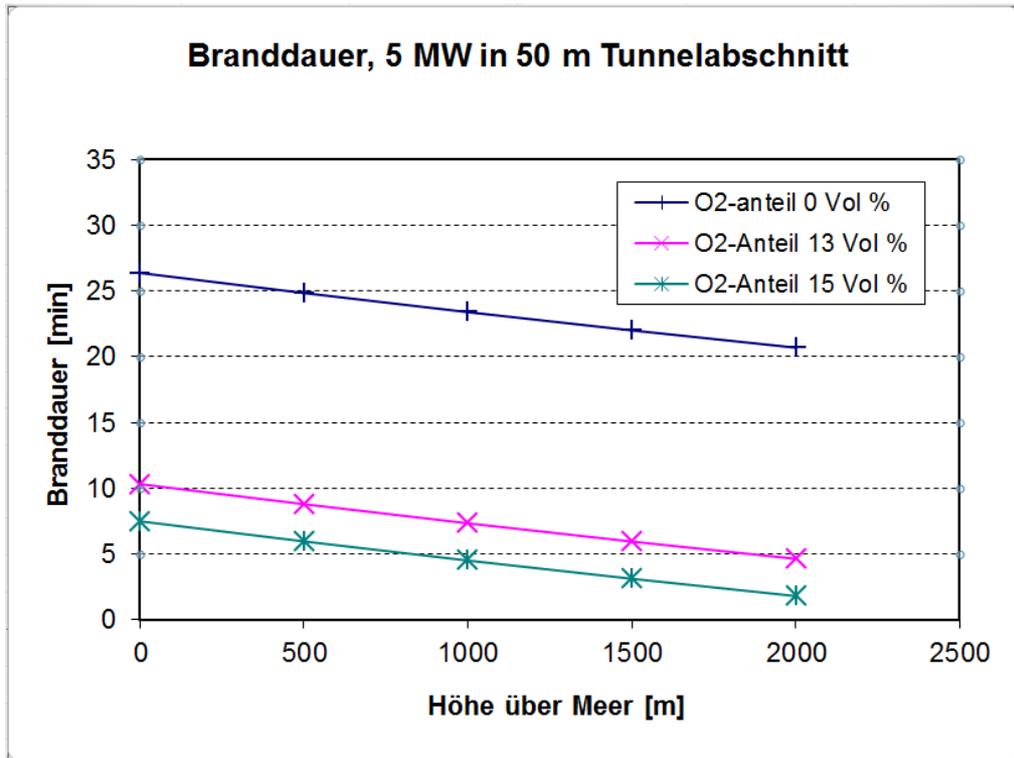


Abb. 4.13: Zeitdauer bis die Sauerstoffkonzentration bei einem 5 MW – Brand von 21 Vol% auf 0 Vol%, 13 Vol% und 15 Vol% gefallen i

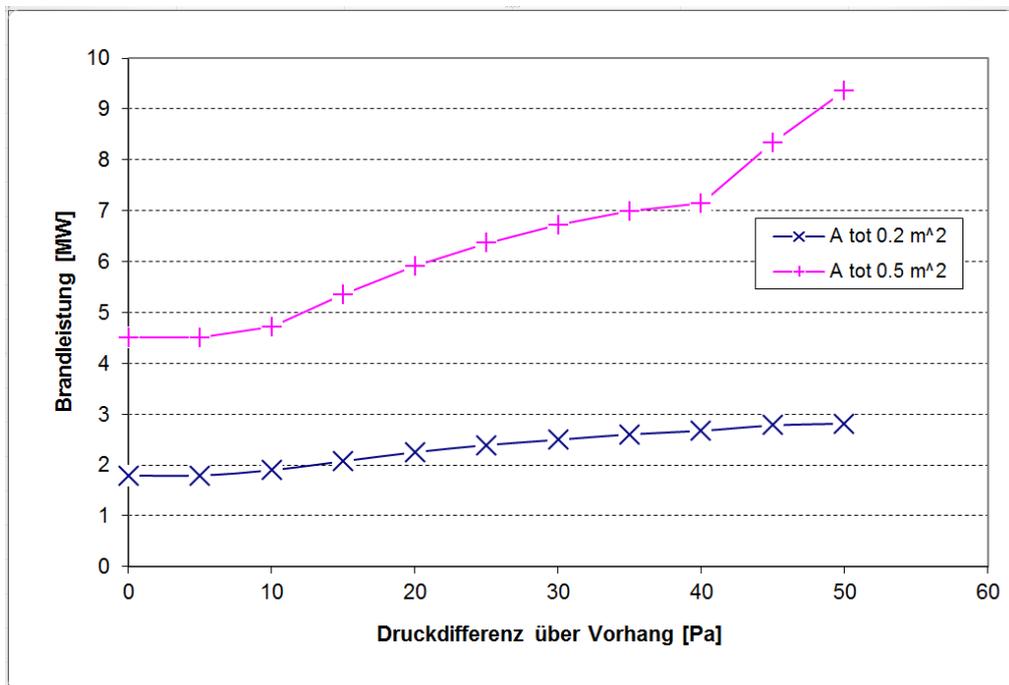


Abb. 4.14: Maximale Brandleistung in Abhängigkeit der Frischluftzufuhr.

Aufgrund der physikalischen Wirkweise kommt für diese Art flexibler Vorrichtung keine Einsatzmöglichkeit in Frage. Für die Selbstrettungsphase tritt die Wirkung zu wenig schnell ein und bringt zudem für Personen, welche sich innerhalb des Abschnittes befinden, eher Nachteile mit sich (schnelles Absinken der Rauchsicht, schnelle Erhöhung der Temperatur, Hindernis auf Fluchtweg). Zu einem späteren Zeitpunkt können grössere Brandleistungen im Abschnitt zwar verhindert werden, es entsteht aber gleichzeitig die

Gefahr von Backdraft, was insbesondere die Einsatzkräfte aber auch die Tunnelinfrastruktur gefährdet.

#### Zusammenfassung der Ergebnisse:

- Rauchschutzvorrichtung zum Bremsen / Stoppen einer Längsströmung kann unter Berücksichtigung der Luftträgheit umgesetzt werden
- Rauchschutzvorrichtung zur Abschnittsbildung muss verworfen werden und wird nicht weiter verfolgt.

## 4.4 Bewertungsverfahren

Der Einbau flexibler Vorrichtungen in einen Tunnel wirkt sich nicht nur auf die Rauchausbreitung im Ereignisfall aus, sondern kann auch weitere Auswirkungen haben, wie z.B. Blockieren der Fluchtwege oder Gefährdung von Tunnelnutzer durch ungewollte Fehlauflösung.

Die Einflussfaktoren müssen gewichtet werden, und entsprechend ihrer Wichtigkeit in die Gesamtbewertung einfließen. Dafür wird eine Multikriterienanalyse vorgeschlagen. Die Auswahl der Kriterien sowie deren Gewichtung wurden durch die Mitglieder der BK-Kommission und des Projektteams mittels einer formellen Nutzwertanalyse gemeinsam vorgenommen. Die resultierenden Kriterien und deren Gewichtung sind in Tab. 4.3 dargestellt.

Hauptkriterium	Gewichtung Hauptkriterium	Unterkriterium	Gewichtung Unterkriterium	Gewichtung Total
Sicherheitsgewinn	50.0%	Selbstrettung	80.0%	40.0%
		Fremdrettung	20.0%	10.0%
Konsequenzen Fehlalarme	33.3%	Durchgehen / -fahren	40.0%	13.3%
		Fehlbedienung	30.0%	10.0%
		Fehlalarm	30.0%	10.0%
Schutz von Sachwert	8.3%	Tunnelinfrastruktur	100.0%	8.3%
Betriebskosten	8.3%	Unterhaltskosten	100.0%	8.3%
Total	100%			100%

Tab. 4.3: Faktoren und deren Gewichtung für die Multikriterienanalyse.

Aus der Gewichtung der Kriterien geht hervor, dass die Selbstrettung mit 40% das Primärkriterium darstellt. Die anderen Kriterien sind mit je rund 10% als Sekundärkriterien zu betrachten.

Um die Selbstrettung mit Hilfe der Schürzen zu verbessern, muss also die Rauchausbreitung in der Anfangsphase des Feuers eingedämmt oder verlangsamt werden, so dass die Fluchtwege länger rauchfrei bleiben und eine ungehinderte Selbstrettung zugelassen wird.

Die Zielerreichung wird in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben und bewertet.

## 5 Hauptuntersuchung Sicherheitsgewinn

### 5.1 Grundlagen zur Hauptuntersuchung

#### Ausgangslage

Als Resultat der Voruntersuchung (grundsätzliche Anforderung sowie Bewertung der Eignung) haben sich drei Vorrichtungenarten herauskristallisiert, die jeweils in einem Tunneltyp eingesetzt werden könnten:

- Streifenvorrichtung in natürlich belüfteten Tunnel
- Rauchschutzvorrichtung (vollschliessend) in natürlich belüfteten Tunnel
- Schürzenvorrichtung in längsbelüfteten Tunnel.

Für die Beurteilung des Sicherheitsgewinns werden Untersuchungen der Rauchausbreitung im Brandfall herangezogen. Dadurch kann beurteilt werden, ob sich eine Vorrichtung positiv oder negativ auf die Selbststrettungsphase auswirkt. Die Rauchausbreitung wurde ausschliesslich anhand 3D-Strömungsberechnungen analysiert. Dabei ist jeweils der Zustand ohne und mit flexibler Vorrichtung gegenübergestellt. Durch den Vergleich lässt sich klar erkennen, ob durch das Anbringen einer Vorrichtung Vorteile erzielt werden.

Für die Strömungsberechnung wurde die 3D-CFD Software Fire Dynamic Simulator (FDS) verwendet. FDS ist eine gut validierte Software die sehr häufig verwendet wird, um Tunnelbrände zu simulieren.

Die Wirkung der Vorrichtungen auf die Selbststrettung und Intervention wird im Kapitel 5.4 behandelt und bezüglich Selbststrettung quantifiziert.

#### Szenario

Ausgangspunkt für die Simulation ist ein Brandszenario mit einem Lastwagen (LW):

- Brandleistung: 30 MW
- Brandenergie: 30.6 GJ
- Anstieg auf max. Brandleistung: in 5 min
- Brandort: Tunnelmitte.

Der zeitliche Ablauf ist folgendermassen festgelegt:

- 0 min: Brandausbruch
- 1 min: Branddetektion
- 2 min: Alarmierung und Gegenmassnahmen.

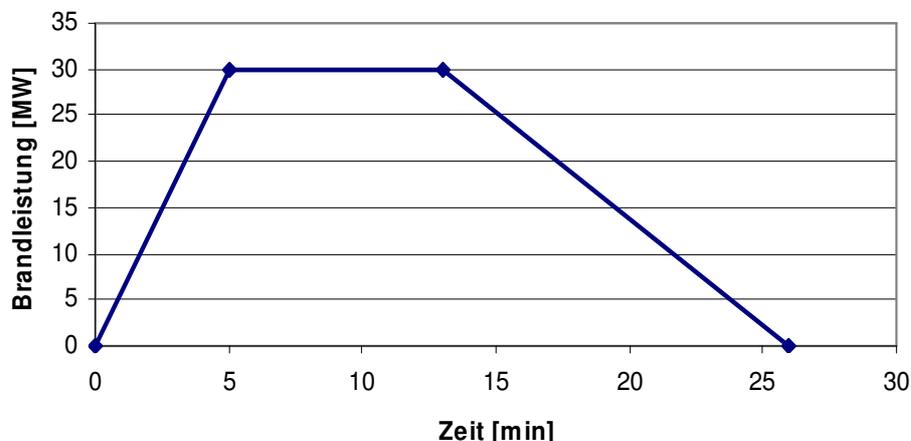


Abb. 5.1: Verlauf der verwendeten Brandkurve.

### Darstellung der Resultate

Aus der Simulation entstehen Daten über Sichtweite, Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit. Diese lassen sich als Schnittbilder durch die simulierte 3D-Geometrie darstellen oder auch als Datenfiles ausschreiben. Schnittbilder stellen jeweils die Situation zu einem ausgewählten Zeitpunkt dar. Beispiele solcher Schnittbilder sind in Abb. 5.2 bis Abb. 5.6 dargestellt.

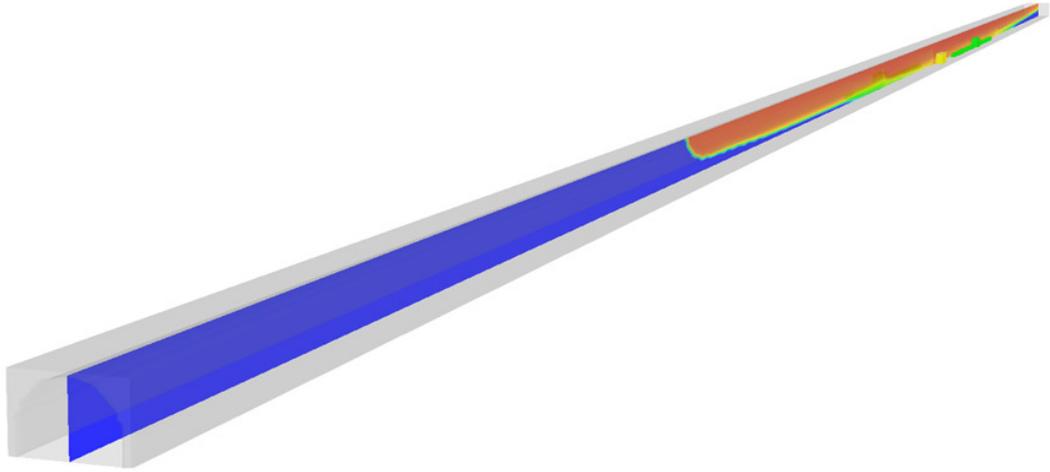


Abb. 5.2: Darstellung des Simulationsmodells mit einem Längsschnitt (Vertikalschnitt entlang der Tunnelachse), welcher die Sichtweite farblich darstellt. Nachteil dieser Art von Abbildung ist die kleine Höhe im Verhältnis zur Tunnellänge, was das Auslesen der Informationen erschwert.

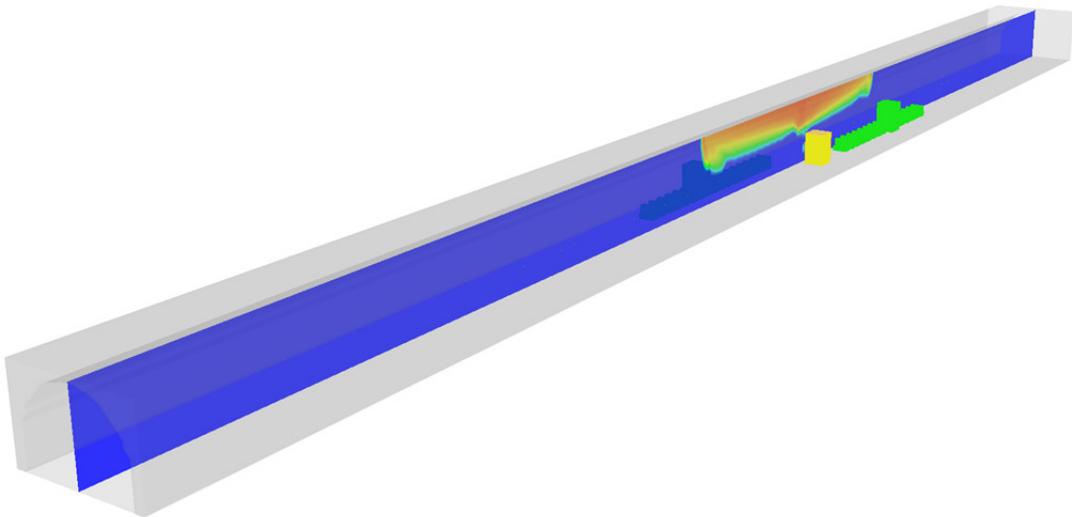


Abb. 5.3: Darstellung des Simulationsmodells gestreckt um Faktor 5 in der Höhe und in der Breite, mit einem Längsschnitt (Vertikalschnitt entlang der Tunnelachse), welcher die Sichtweite zeigt. Diese Art von Schnittbild zeigt auf kompakte Art und Weise die relevanten Informationen und wird primär für die Darstellung der Resultate verwendet.

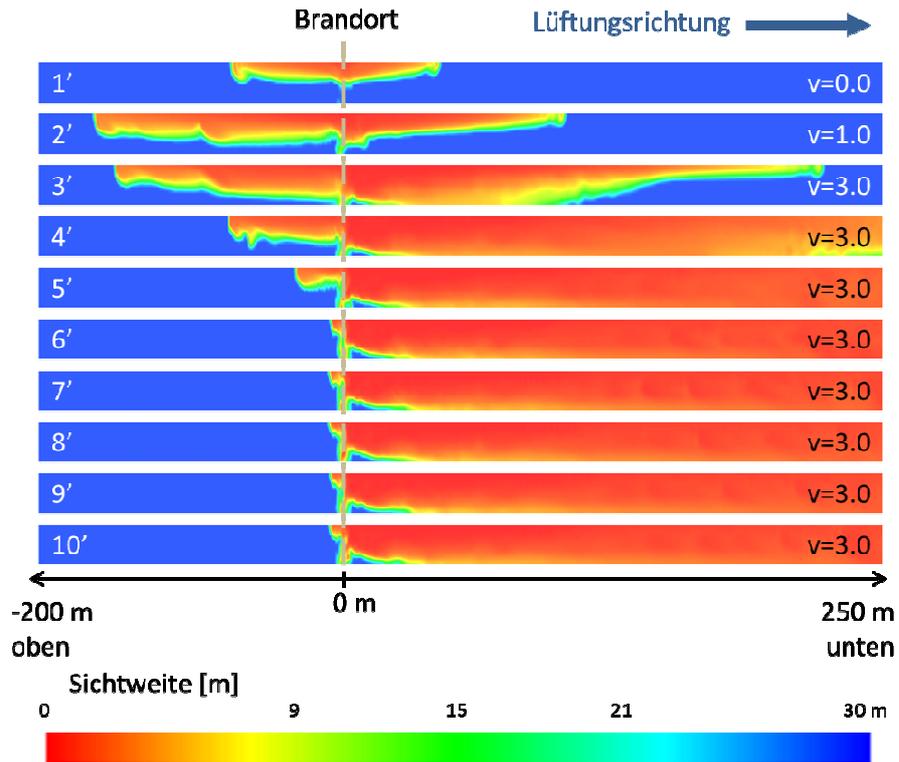


Abb. 5.4: Darstellung der Längsschnitte in einer Zeitreihenfolge mit Angabe der Minuten seit Brandbeginn auf der linken Seite und Angabe der Längsgeschwindigkeit in m/s, gemessen beim einströmenden Portal, auf der rechten Seite.

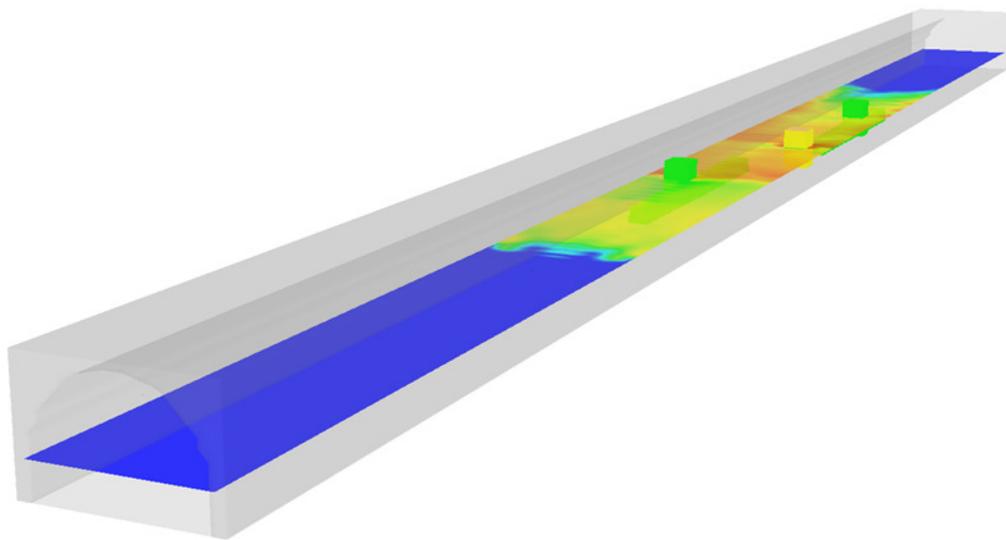


Abb. 5.5: Darstellung des Simulationsmodells gestreckt um Faktor 5 in der Höhe und in der Breite, mit einem Horizontalschnitt auf 2 m Höhe, welcher die Sichtweite zeigt. Diese Art von Horizontalschnitt ist geeignet, um Evakuierungsbedingungen genau auszuwerten. Der Informationsgehalt ist ansonsten eher tief, da in der Breite keine massgebliche Variation der Werte stattfindet.

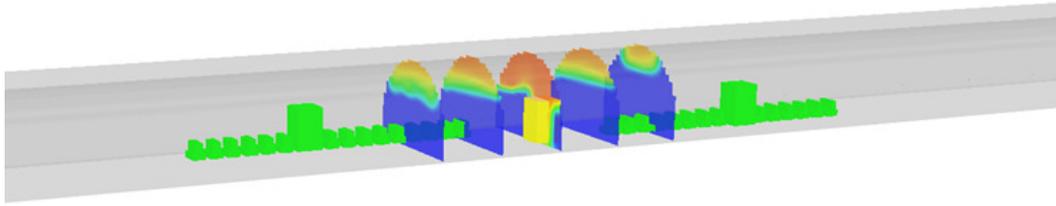


Abb. 5.6: Darstellung des Simulationsmodells gestreckt um Faktor 5 in der Höhe und in der Breite, mit Vertikalschnitten normal zur Tunnelachse, welche die Sichtweite zeigen. Vertikalschnitte normal zur Tunnelachse werden selten, und nur in Brandnähe oder bei Vorrichtungen benutzt.

## 5.2 Natürlich belüftete Tunnel mit grosser Längsneigung

### 5.2.1 Referenz tunnel ohne Vorrichtung

Für den längsbelüfteten Tunnel wurde als Testobjekt ein Referenz tunnel definiert, um daran die Wirkung der Vorrichtung zu testen.

Die Tunnelprofile des Referenz tunnels wurden in Anlehnung an die Beispielprofile für Tagbautunnel und bergmännischen Tunnel der SIA 197-2 aufgestellt. Der Tagbautunnel hat ein rechteckiges Profil mit einer gesamten Fläche von  $50 \text{ m}^2$ . Der bergmännische Tunnel hat ein sogenanntes Hufeisenprofil mit einer Querschnittsfläche von  $57 \text{ m}^2$ .

Tunnel	Bergbau-Tunnel	Tagbau-Tunnel
Querschnitt [ $\text{m}^2$ ]	57	50
Länge [m]	500	500
Steigung [%]	2-5	2-5
MSV	500	500
Anteil Schwerverkehr [%]	5	5
Verkehrsregime	Ausgeglichener Gegenverkehr	Ausgeglichener Gegenverkehr

Tab. 5.1: Eigenschaften der Referenz tunnel.

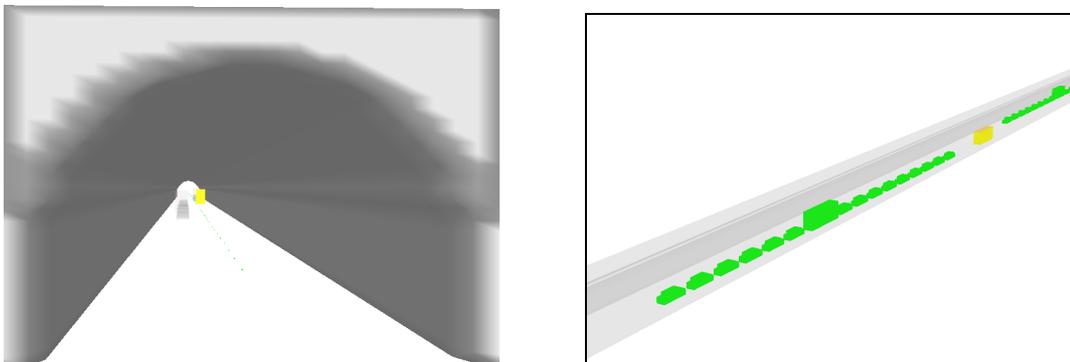


Abb. 5.7: Sicht auf Tunnelportal des Simulationsmodells des bergmännischen Tunnels (links), Fahrzeugverteilung im Tunnel mit gelben Brandfahrzeug (rechts).

## 5.2.2 Streifenvorrichtungen

Streifenvorrichtungen bewegen sich am unteren Ende frei und sind daher mit den heute zur Verfügung stehenden Simulationswerkzeugen nur schwer zu erfassen. Bekannt aus [4] und daher gut simulierbar ist aber der Widerstand, den sie im Tunnel erzeugen. Solange sie sich also nicht im Rauch befinden, und ihre Turbulenzerzeugung keinen direkten Einfluss auf die Rauchschiebung hat, können gute Resultate per Simulation erzielt werden.

Um die Auswirkungen der Streifenvorrichtungen mit der Situation ohne Vorrichtung vergleichen zu können, wurde der natürlich belüftete Tunnel ohne Vorrichtung, mit Längsneigungen von 3% und 5% gerechnet, jeweils mit Bergbau- und Tagbau-Profil. Als Beispiel sind in Abb. 5.8 die Resultate für den Bergbautunnel mit 3% Längsneigung gezeigt. Die weiteren Fälle sind im Anhang I zu finden.

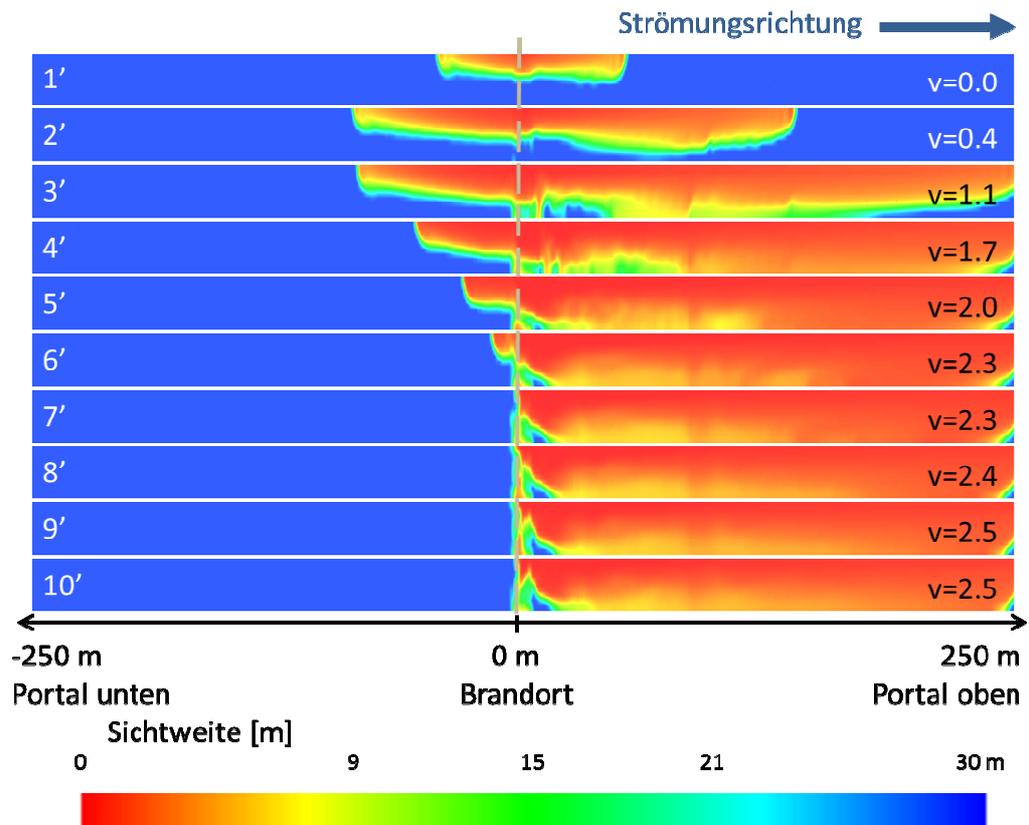


Abb. 5.8: Darstellung der Sichtweite (Längsschnitt) bei Brand im natürlich belüfteten Referenz-tunnel (3% Längsneigung, Bergbauprofil).

Die Resultate zeigen, dass sich der Rauch, wie erwartet, zu beiden Tunnelportalen hin zubewegt, wobei aber durch die Längsneigung die Ausbreitung zum oberen Portal hin verstärkt wird. Durch den Brand entsteht ein Kamineffekt, der eine Strömung zum oberen Portal induziert und somit die Rauchausbreitung zum oberen Portal zusätzlich verstärkt, bzw. die Rauchausbreitung zum unteren Portal verunmöglicht.

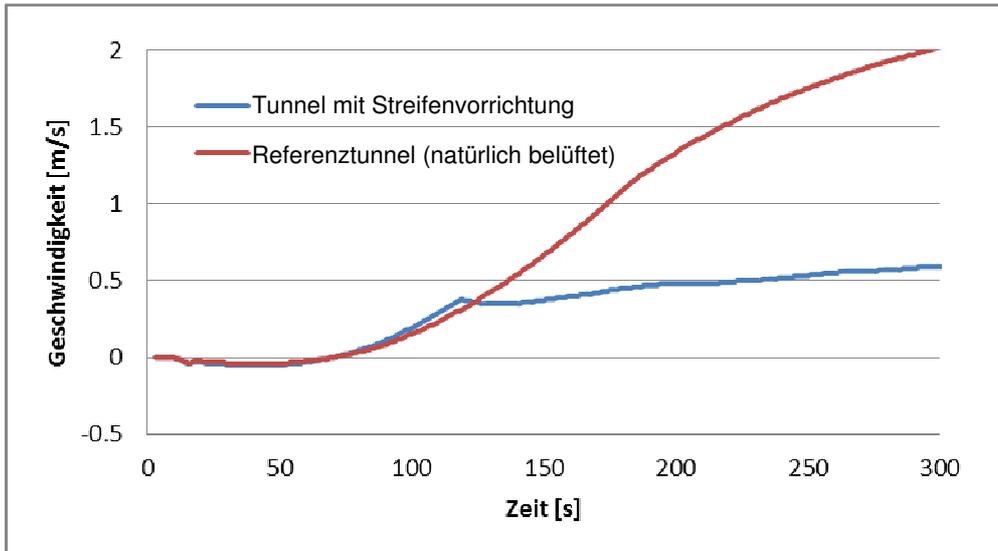


Abb. 5.9: Längsgeschwindigkeiten am tieferen Portal bei Brand im Tunnel mit 3% Längsneigung.

Durch Anbringen der Streifenvorrichtungen am unteren Portal, soll die Rauchausbreitung zum oberen Portal hin, wie sie in Abb. 5.8 zu sehen ist, verlangsamt werden. Der Einfluss der Streifenvorrichtungen auf die Längsgeschwindigkeit ist in Abb. 5.9 illustriert. Die blaue Kurve stellt die Längsgeschwindigkeit mit Vorrichtung dar. Diese werden im betrachteten Szenario bei 120 s ausgefahren und reduzieren die Längsströmung auf eine Geschwindigkeit unter 1 m/s. Streifenvorrichtungen können also effizient die Längsgeschwindigkeiten in Tunneln abbremsen.

Abb. 5.10 zeigt die Ergebnisse beim Einsatz der Streifenvorrichtungen und vergleicht sie mit dem Referenz-tunnel. Es kann festgestellt werden, dass sich die Ausbreitung der Rauchschicht in den beiden Tunnel erst ab rund 3 Minuten zu unterscheiden beginnt. Obwohl Streifenvorrichtungen effizient die Längsströmung im Tunnel reduzieren können, zeigen sie in der Anfangsphase also nur eine beschränkte Wirkung. Der Grund dafür ist die tiefe Längsströmung bzw. der Kamineffekt, der zu Beginn des Brandes noch sehr schwach ist. Zum Zeitpunkt, wo die Rauchschicht am oberen Tunnelportal ankommt, also nach ca. 150 s, ist die Längsgeschwindigkeit im Tunnel noch unter 1 m/s. Es werden Werte um ca. 0.7 m/s erreicht. Bei Geschwindigkeiten unter 1 m/s ist die Bremswirkung von Streifenvorrichtungen begrenzt, womit der geringe Unterschied erklärt werden kann.

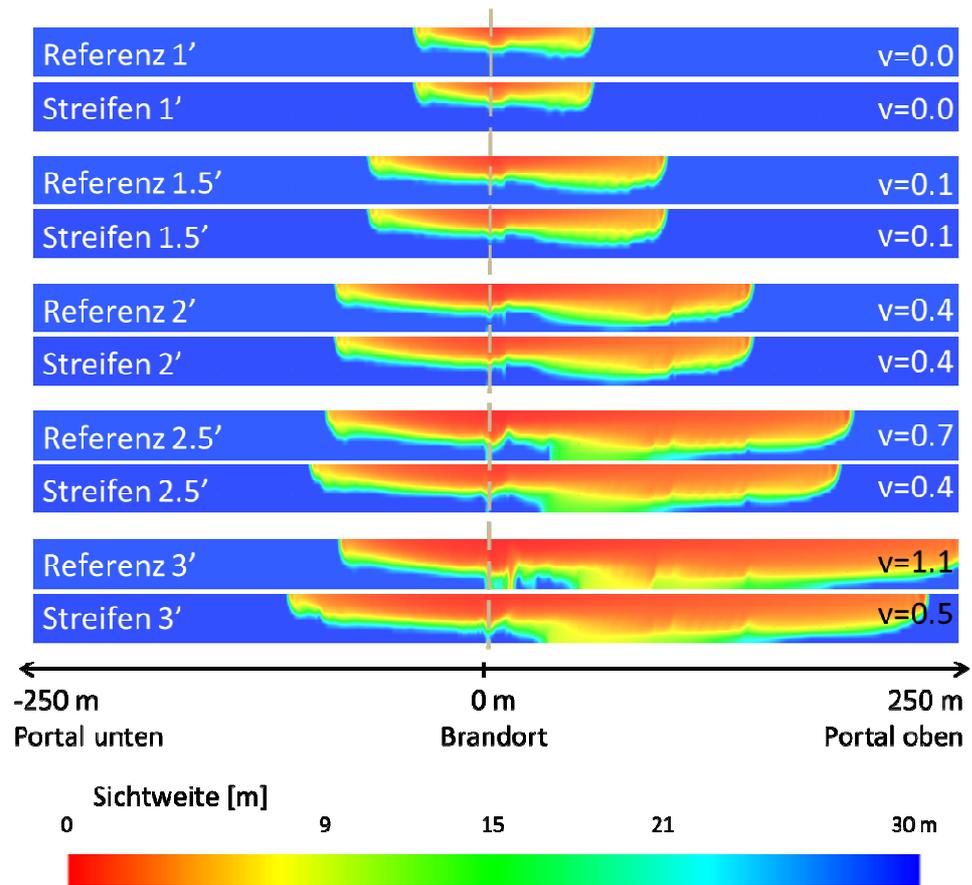


Abb. 5.10: Längsschnitt entlang Tunnelachse mit Darstellung der Sichtweite bei Brand im Referenz-tunnel und im Tunnel mit Streifen-vorrichtung am unteren Portal - Tunnel-eigen-schaften: 3% Längsneigung, Rechteckprofil, Brand in Tunnelmitte. Aktivierung Vorrich-tung bei 2'.

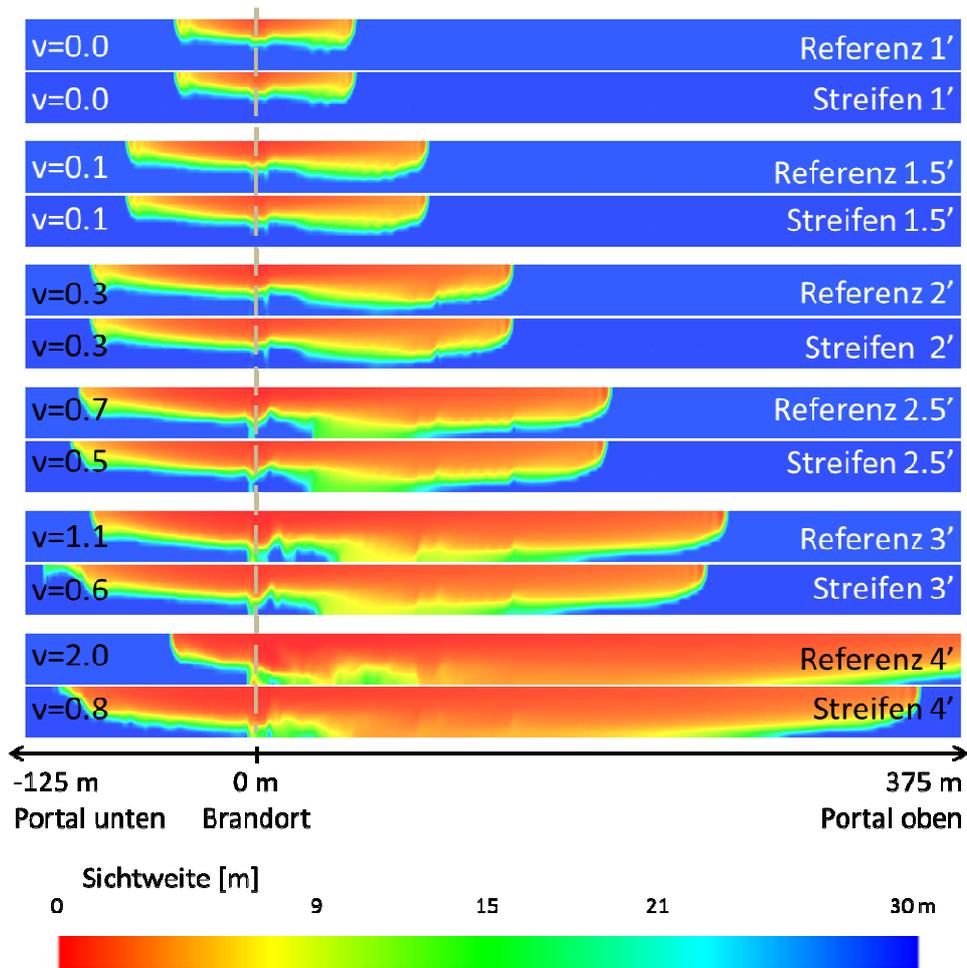


Abb. 5.11: Längsschnitt entlang Tunnelachse mit Darstellung der Sichtweite bei Brand im Referenztunnel und im Tunnel mit Streifenvorrichtung am unteren Portal - Tunneleigenschaften: 3% Längsneigung, Rechteckprofil, Brand im unteren Viertelpunkt. Aktivierung Vorrichtung bei 2'.

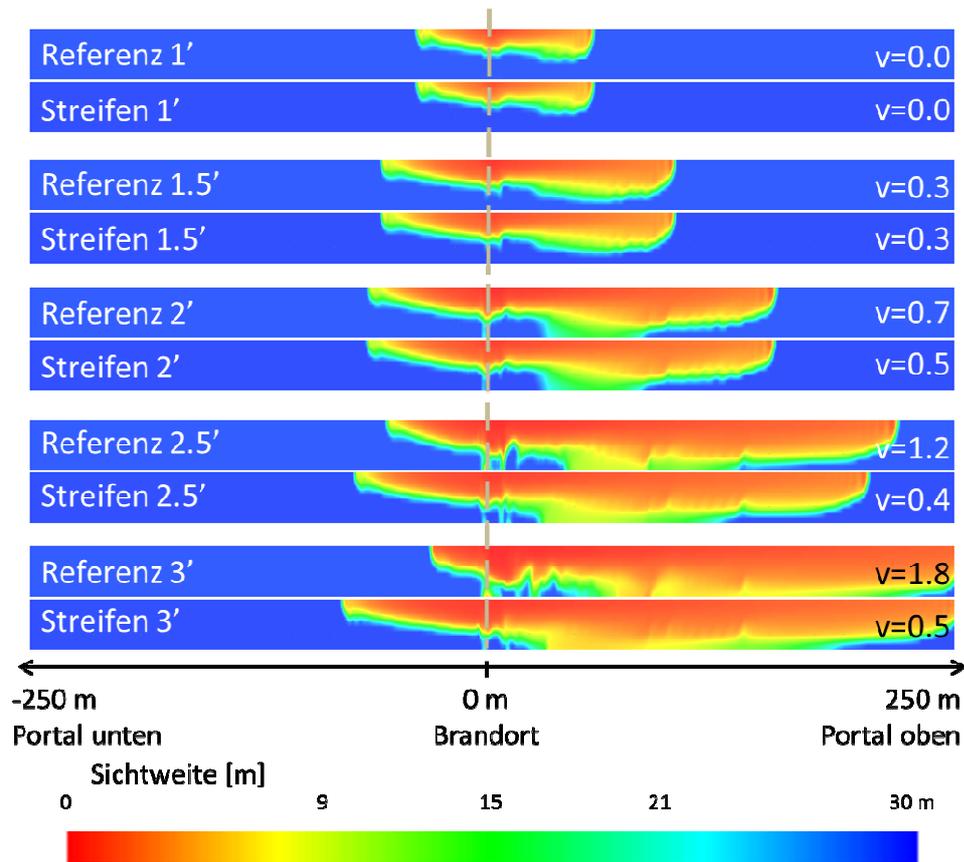


Abb. 5.12: Längsschnitt entlang Tunnelachse mit Darstellung der Sichtweite bei Brand im Referenzstunnel und im Tunnel mit Streifenvorrichtung am unteren Portal - Tunneleigenschaften: 5% Längsneigung, Rechteckprofil, Brand in Tunnelmitte. Aktivierung Vorrichtung bei 2'.

Die oben dargestellten Resultate zeigen weiter, dass die Rauchausbreitung in der Anfangsphase nicht durch den Kamineffekt, also durch eine Längsströmung verursacht wird, sondern durch das Ausbreiten der Rauchfront im ruhendem Medium. Untersuchungen über Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Rauchfronten sind bekannt von Fannelop [29]. Seine Arbeiten haben unter anderem zu einer Gleichung geführt, mit der sich die Geschwindigkeit der Rauchfront in Abhängigkeit von Temperatur der Rauchsicht und Tunnelgeometrie abschätzen lässt:

$$u_{RF} = 0.67 \cdot \sqrt{g D_n \frac{T_{RF} - T_0}{2 \cdot T_{RF}}}$$

Mit:

$u_{RF}$	Geschwindigkeit der Rauchfront	[m/s]
$T_{RF}$	Temperatur der Rauchfront	[K]
$T_0$	Umgebungstemperatur	[K]
$g$	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$D_n$	Hydraulischer Durchmesser	[m].

Einsetzen einer moderaten Rauchfronttemperatur  $T_{RF}$  von 70°C sowie der restlichen Werte führt zu einer Rauchfrontgeschwindigkeit von rund 1.45 m/s. Das heisst, dass bei ruhender Tunneluft die Rauchfront nach ca. 170 s die 250 m Distanz zum oberen Portal zurückgelegt hat. Dies deckt sich mit den Resultaten aus den Simulationen.

Obwohl ein Brand in einem natürlich belüfteten Tunnel zu erheblichen Längsgeschwindigkeiten führt, ist dies nicht die Hauptursache für die schnelle Verrauchung von natürlich belüfteten Tunneln. Es braucht einige Zeit bis der Kamineffekt voll zu wirken beginnt und sich die Tunnelluft beschleunigt hat. Zu Beginn des Brandes ist primär die Dynamik der Rauchsicht selber verantwortlich für die Rauchausbreitung. Daher wirkt sich eine Unterbindung der hohen, brandinduzierten Längsgeschwindigkeiten nicht auf die Rauchausbreitung zu Beginn des Brandes aus. Bei längeren Tunneln, bzw. bei Distanzen von über 250 m vom Brandort bis zum höheren Portal, ist ein positiver Effekt auf die Rauchausbreitung, also eine Verlangsamung jedoch deutlich erkennbar. Entsprechende Ergebnisse werden in Kapitel 7 vorgestellt.

Für den Einsatz von Streifenvorrichtungen bedeutet dies, dass eine minimale Tunnellänge von rund 500 m erforderlich ist, damit ein positiver Effekt auf die Rauchausbreitung bewirkt werden kann. Bei kürzeren Tunnellängen wäre der Tunnel aufgrund der Ausbreitung der Rauchfront verraucht, bevor sich eine Längsströmung aufgebaut hat und die Vorrichtung bremsend wirken kann.

Die Aktivierung muss schnellstmöglich nach dem Brandausbruch erfolgen. Maximal zulässig ist eine Reaktionszeit von 2 Minuten, bis die Vorrichtung geschlossen wird. Danach beginnt die Längsströmung stark zu steigen, falls nicht mit der Vorrichtung entgegengewirkt und gebremst wird.

### 5.2.3 Rauchschtzvorrichtungen – Voll-Abschluss

Die Resultate haben gezeigt, dass Rauchschtzvorrichtungen sehr effektiv die Längsströmung abbremsen. Unabhängig ob eine Längsströmung vorhanden ist, breitet sich die Rauchschtz aber trotzdem entlang der Tunneldecke aus.

Eine Positionierung des Tunnelabschlusses am höher gelegenen Portal hat daher zu einer Verschlechterung der Situation im Tunnel geführt. Rauch wird durch die Vorrichtung im Tunnel aufgestaut.

Eine Rauchschtzvorrichtung am unteren Portal bremst die Längsströmung im gleichen Masse ab, aber hat den Vorteil, dass sie nicht den steigenden Rauch blockiert. Es hat sich jedoch gezeigt, dass durch ein komplettes Stoppen der Längsströmung, was durch Aktivierung einer dichten Rauchschtzvorrichtung erreicht wird, gegenüber dem Referenz-tunnel ohne Vorrichtung kein Vorteil erzielt wird (Abb. 5.13 und Abb. 5.14).

Die optimale Situation für die Selbstrettung wird erreicht, wenn eine moderate Längsströmung von ca. 1 m/s im Tunnel vorhanden ist, vergleichbar mit längsbelüfteten Tunnel. Dies unterbindet eine massive Rauchrückströmung (Backlayering) und verhindert die schnelle Rauchausbreitung zum höheren Portal hin, wie das beim Tunnel ohne Vorrichtung der Fall ist. Die Rauchschtz darf deshalb nicht komplett schliessend sein und muss einen gewissen Luftstrom im Tunnel zulassen.

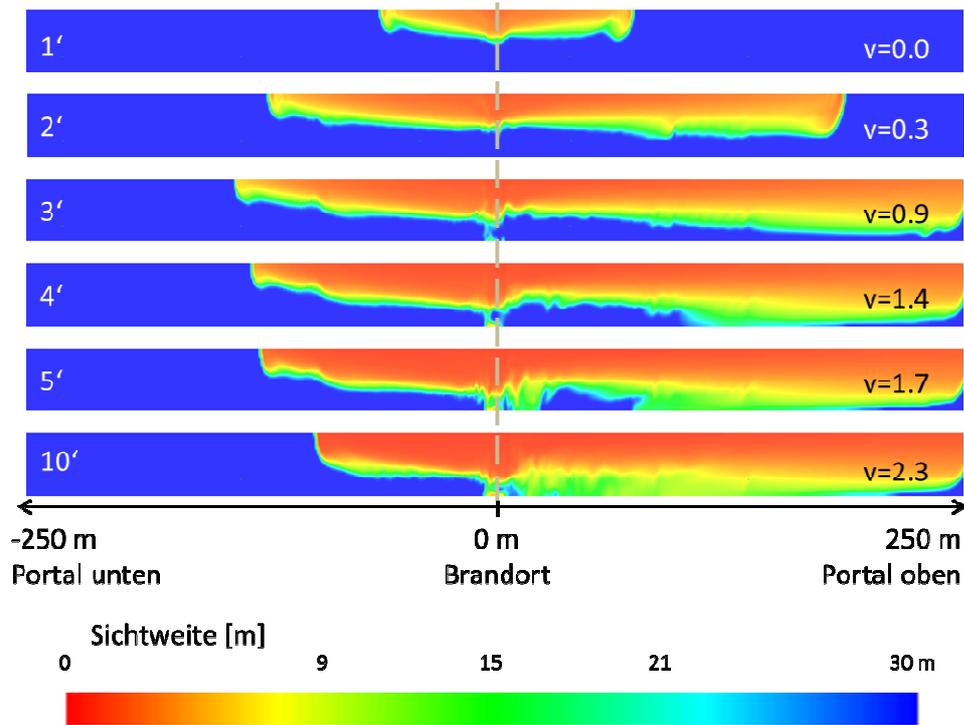


Abb. 5.13: Längsschnitt entlang Tunnelachse mit Darstellung der Sichtweite in natürlich belüftetem Tunnel - Tunneleigenschaften: 3% Längsneigung, Hufeisenprofil, Brand in Tunnelmitte.

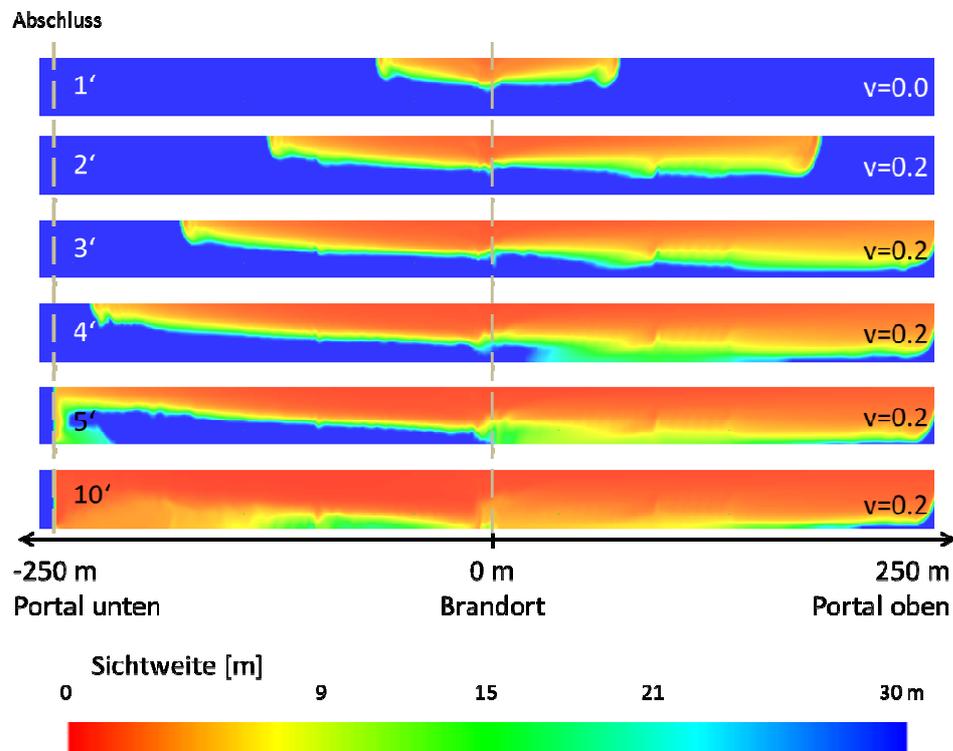


Abb. 5.14: Beeinträchtigung der Sichtweite durch Brand in natürlich belüftetem Tunnel mit Rauchschutzvorrichtung am unteren Portal der zu dicht ist und die Längsströmung zu fest abbremst – Tunneleigenschaften: 3% Längsneigung, Hufeisenprofil, Brand in Tunnelmitte. Aktivierung Vorrichtung bei 2'.

## 5.3 Längsbelüftete Tunnel

Mit FDS wurden Simulationen für verschiedene Längsneigungen sowie Tunnelquerschnitte durchgeführt. Bei den Längsneigungen wurden Steigungen von 0%, 3% und 5% betrachtet, und bei den Profilen wurden diejenigen von den natürlich belüfteten Tunnel übernommen (Tab. 5.1). Die Länge von längsbelüfteten Tunnel ist natürlich grösser, aber in den durchgeführten Simulationen wurde jeweils nur ein Abschnitt von rund 500 m betrachtet, um die Rechenzeit in einem vernünftigen Rahmen zu halten.

### 5.3.1 Referenz-tunnel ohne Vorrichtung

Das Lüftungsregime in einem gewöhnlichen längsbelüfteten Tunnel ist gemäss Schweizer Richtlinie [8] abhängig von der Verkehrsart: Richtungsverkehr (RV1), Richtungsverkehr mit hoher Stauwahrscheinlichkeit (RV2) oder Gegenverkehr (GV).

Die Schweizer Richtlinie sieht folgende Längsgeschwindigkeiten (Dimensionierungswerte) im Brandfall vor:

- RV1: 3 m/s in Fahrtrichtung
- RV2: 3 m/s in Fahrtrichtung, bzw. 1.5 m/s nach unten
- GV: 1.5 m/s nach unten.

Das Ziel der Lüftung muss sein, im Tunnel blockierte Fahrzeuge und deren Benutzer zu schützen. Bei Richtungsverkehr ohne Stau wird durch genügend starke Längslüftung ( $\geq 3$  m/s) ein einseitiges Abströmen des Rauches erzielt und somit die im Tunnel blockierten Fahrzeuginsassen geschützt (Abb. 5.15).



Abb. 5.15: Illustration aus „Technische Wegleitung für die Intervention bei Bränden in Strassentunnel“ der FKS [11] zeigt Ausbreitung des Rauches bei starker Längslüftung (Längsgeschwindigkeit von ca. 3 m/s), mit Lüftungsrichtung gemäss blauem Pfeil und Rauchausbreitung gemäss schwarzem Pfeil.

Bei RV2 und GV muss davon ausgegangen werden, dass sich auf beiden Seiten des Brandes noch Fahrzeuge befinden, welche blockiert sind und den Tunnel nicht verlassen können. Es kann in diesen Fällen nur mit reduzierter Luftgeschwindigkeit belüftet werden, da sonst Personen in Lüftungsrichtung nach dem Brandort schnell von Rauch umgeben sind und nur eine geringe Chance auf Selbstrettung haben. Dies stellt jedoch ein Kompromiss dar, denn dadurch wird Backlayering (Rückströmung des Rauches) ermöglicht und es werden auch Personen stromaufwärts durch die Rauchausbreitung gefährdet (Abb. 5.16).



Abb. 5.16: Illustration aus „Technische Wegleitung für die Intervention bei Bränden in Strassentunnel“ der FKS [11] zeigt Ausbreitung des Rauches bei reduzierter Längslüftung (ca. 1.5 m/s), mit Lüftungsrichtung gemäss blauem Pfeil und Rauchausbreitung gemäss schwarzen Pfeilen.

### 5.3.2 Tunnel mit Schürzenvorrichtungen

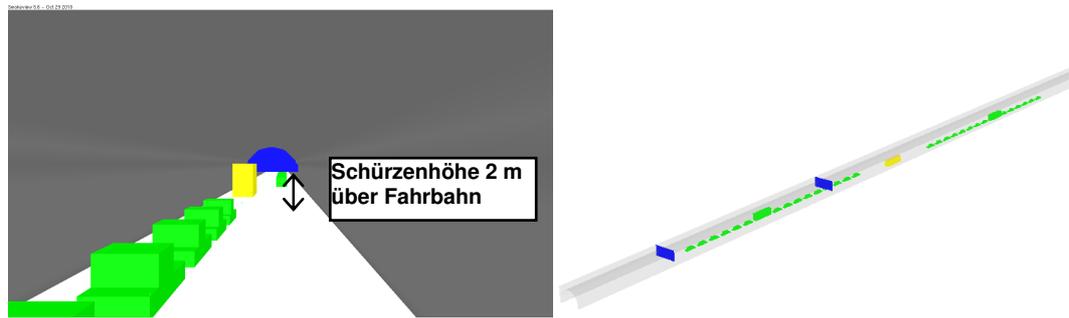


Abb. 5.17: Darstellung des Berechnungsmodells für Tunnel mit Schürzenvorrichtungen.

Schürzen stellen ein Engpass für die Luftströmung dar, wodurch es bei der Schürze zu einer Erhöhung der Luftgeschwindigkeit kommt. Die Längsströmung, bzw. die „erforderliche Geschwindigkeit kann so reduziert werden, ohne dass es zu Raucherückströmung kommt (siehe auch Kapitel 4.3.2).

Mit einer tiefen Längsgeschwindigkeit kann also die stromaufliegende Seite des Ereignisortes Rauchfrei gehalten werden, während die stromab liegende Tunnelseite dadurch von der langsameren Rauchausbreitung profitiert.

Als positive Nebenerscheinung durch die Reduktion der Längsgeschwindigkeit beim Einsatz der Schürzen, kann zusätzlich die reduzierte Anfachung des Brandes durch die Längslüftung genannt werden. Gemäss Untersuchungen von Li und Ingason [30], wirkt sich die Längsströmung primär auf den Anstieg der Brandleistung aus und sekundär auch auf die maximale Brandleistung selbst. Li und Ingason zeigten zudem, dass der Anstieg der Brandleistung linear mit der Längsgeschwindigkeit zunimmt, während sich die Brandleistung selbst maximal um einen Faktor von ca. 1.7 erhöht.

#### Wirkung von Schürzenvorrichtungen auf die Rauchausbreitung im Ereignisfall

Die Wirkung der Rauchschrürze wird deutlich, wenn die Rauchausbreitung eines konventionell belüfteten Tunnels, der Rauchausbreitung eines Tunnels mit Rauchschrürze gegenübergestellt wird. Im konventionell belüfteten Tunnel (Abb. 5.19 und Abb. 5.22) muss mit einer Längsgeschwindigkeit von rund 3 m/s belüftet werden, um Raucherückströmung zu verhindern. Dies führt zu einer viel schnelleren Rauchausbreitung in Lüftungsrichtung als beim Einsatz der Rauchschrürze (dargestellt in Abb. 5.18 und Abb. 5.19), was anhand der Situation nach 3 min gut zu erkennen ist.

Wird ein konventionell belüfteter Tunnel mit reduzierter Längsgeschwindigkeit (1.5 m/s) belüftet, so kann die Ausbreitung des Rauches entgegen der Lüftungsrichtung nicht unterbunden werden, sondern wird lediglich verlangsamt. Die Ausbreitung stromab ist aufgrund der höheren Längsgeschwindigkeit schneller als beim Einsatz von Schürzenvorrichtungen, jedoch auch geschichteter. Gegenüber einem Einsatz der Rauchschrürze schneidet also auch dieses Lüftungsregime bezüglich Rauchausbreitung schlechter ab.

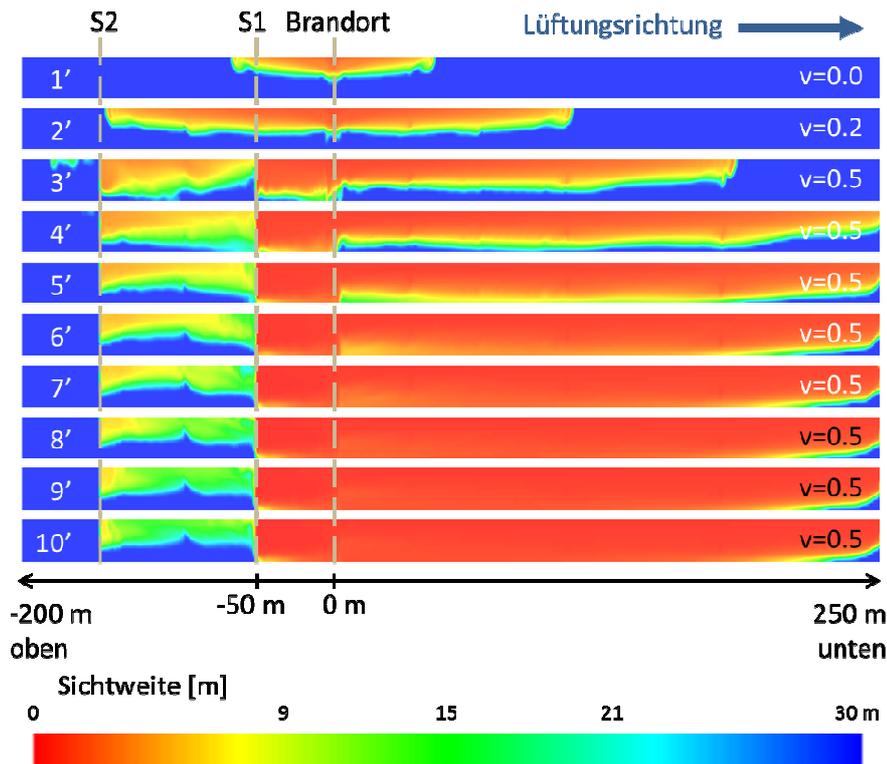


Abb. 5.18: Längsschnitt entlang Tunnelachse mit Darstellung der Sichtweite in längsbelüftetem Tunnel mit Schürzenvorrichtungen (S1 und S2), Abbildung zeigt nur ein Abschnitt des Tunnel. - Tunnelleigenschaften: 0% Längsneigung, Hufeisenprofil, Brand in 50 m Distanz zur Schürze. Aktivierung Vorrichtung bei 2'.

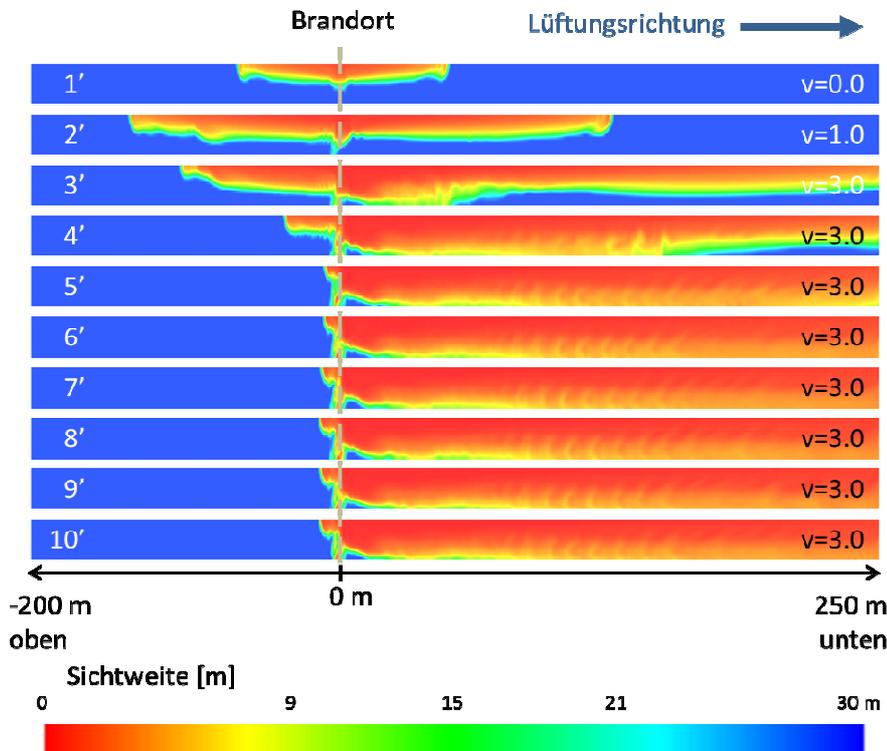


Abb. 5.19: Längsschnitt entlang Tunnelachse mit Darstellung der Sichtweite in längsbelüftetem Tunnel (konventionell mit 3 m/s), Abbildung zeigt nur ein Abschnitt des Tunnel. - Tunnelleigenschaften: 0% Längsneigung, Hufeisenprofil.

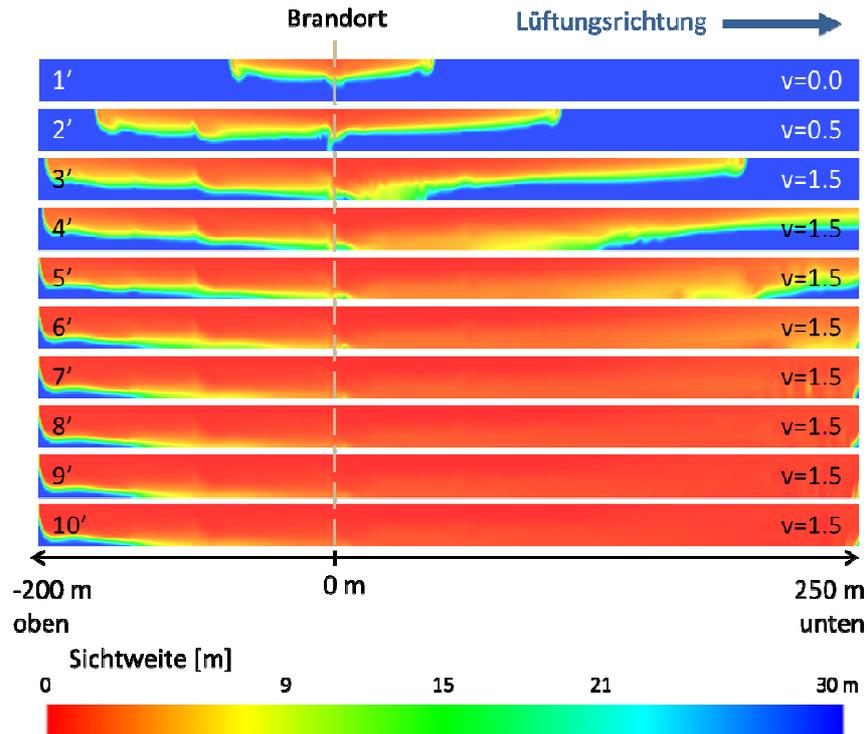


Abb. 5.20: Längsschnitt entlang Tunnelachse mit Darstellung der Sichtweite in längsbelüftetem Tunnel (konventionell mit 1.5 m/s), Abbildung zeigt nur ein Abschnitt des Tunnel. - Tunnelleigenschaften: 3% Längsneigung, Hufeisenprofil.

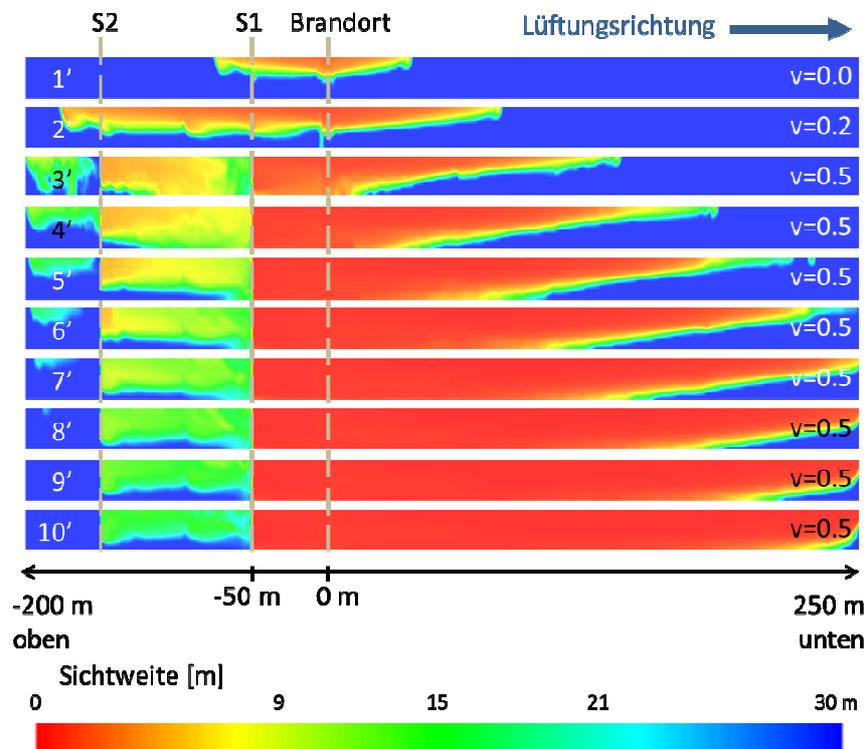


Abb. 5.21: Längsschnitt entlang Tunnelachse mit Darstellung der Sichtweite in längsbelüftetem Tunnel mit Schürzenvorrichtungen (S1 und S2), Abbildung zeigt nur ein Abschnitt des Tunnel. - Tunnelleigenschaften: 5% Längsneigung, Hufeisenprofil, Brand in 50 m Distanz zur Schürze. Aktivierung Vorrichtung bei 2'.

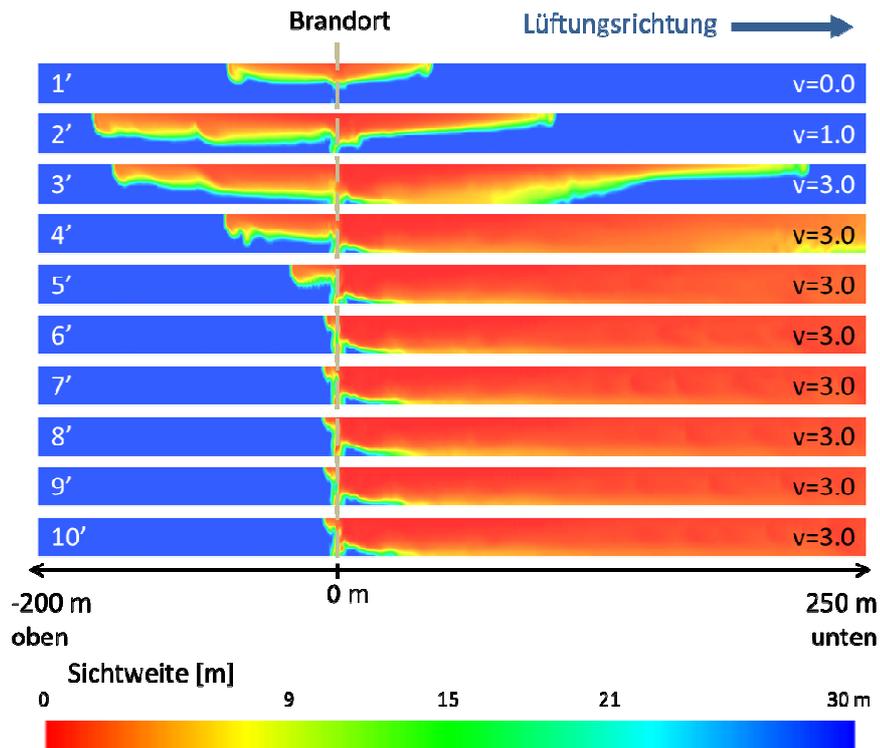


Abb. 5.22: Längsschnitt entlang Tunnelachse mit Darstellung der Sichtweite in längsbelüftetem Tunnel (konventionell mit 3 m/s), Abbildung zeigt nur ein Abschnitt des Tunnel - Tunnelleigenschaften: 5% Längsneigung, Hufeisenprofil.

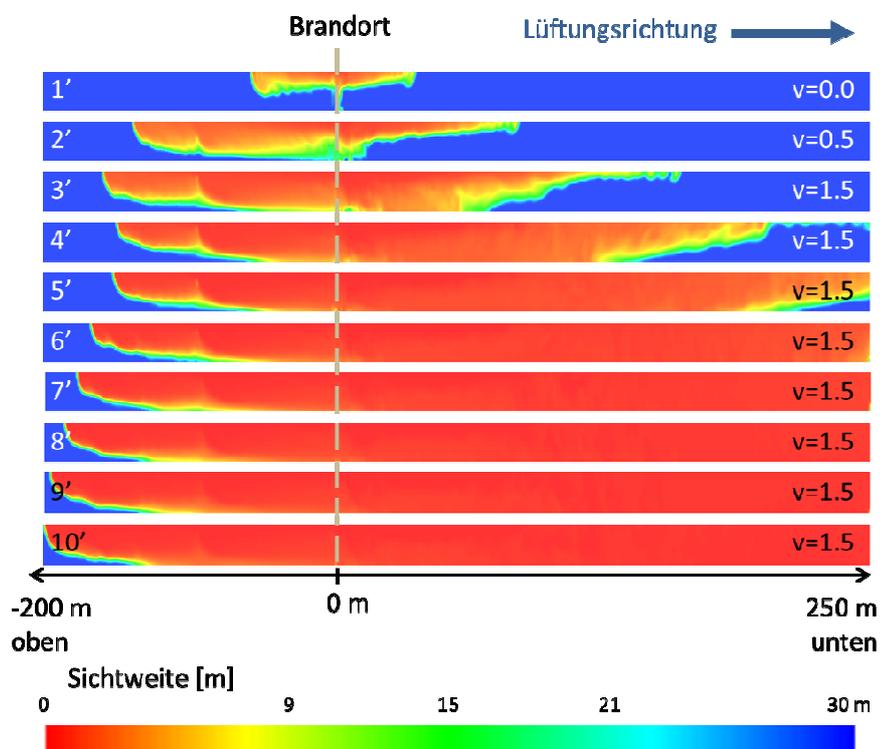


Abb. 5.23: Längsschnitt entlang Tunnelachse mit Darstellung der Sichtweite in längsbelüftetem Tunnel (konventionell mit 1.5 m/s), Abbildung zeigt nur ein Abschnitt des Tunnel - Tunnelleigenschaften: 5% Längsneigung, Hufeisenprofil.

Vergleicht man zusätzlich die Situation bei 0% (Abb. 5.18) und 5% (Abb. 5.21) Längsneigung, zeigt sich, dass Schürzen bei hohen Längsneigungen einen besonders positiven

Effekt auf die Rauchausbreitung stromabwärts haben. Die Rauchfront erreicht eine Distanz von 250 m stromab bei einer Längsneigung von 5% erst nach 8 Minuten, bei einer Längsneigung von 0% jedoch bereits nach 4 Minuten.

Die Schürzen zeigen besonders im Bereich zwischen Schürze und Brandort tendenziell eine schnellere und dichtere Verrauchung, also eine Verschlechterung der Situation im Tunnel. Gleichzeitig ist dies aber auch ein Bereich, wo mögliche Fahrzeuginsassen direkten Blickkontakt zum Feuer haben und entsprechend mit einer kurzen Reaktionszeit gerechnet werden kann.

Die Berechnungen haben gezeigt, dass unabhängig von der Längsneigung die Längsgeschwindigkeit mit einer Schürze auf 0.5 m/s reduziert werden kann, ohne dass dabei eine Rückströmung des Rauches über die Schürze befürchtet werden müsste.

### **Positionierung der Schürzenvorrichtung**

In Abbildung Abb. 5.24 ist das Verhalten der Rauchsicht bei unterschiedlichem Abstand der Schürze (25 m, 100 m und 150 m) zum Brandort dargestellt. Diese kleine Parameterstudie hat gezeigt, dass die Vorrichtung möglichst nahe beim Ereignisort liegen sollte. Die Rauchsicht, welche durch den Brand entsteht, breitet sich an der Decke entlang aus, bis sie auf die Rauchsicht trifft. An der Rauchsicht wird die Schicht zu Boden geworfen. Das hat zur Folge, dass Personen, die sich zwischen Schürze und Brandort befinden durch Rauch eingeschlossen werden. Dies sollte durch einen möglichst geringen Abstand Schürze-Brandort vermieden werden. Andererseits ist die Montage von vielen Vorrichtungen aufwendig und teuer. Ein Abstand von 100 m bis 150 m zwischen den Vorrichtungen scheint vernünftig zu sein.

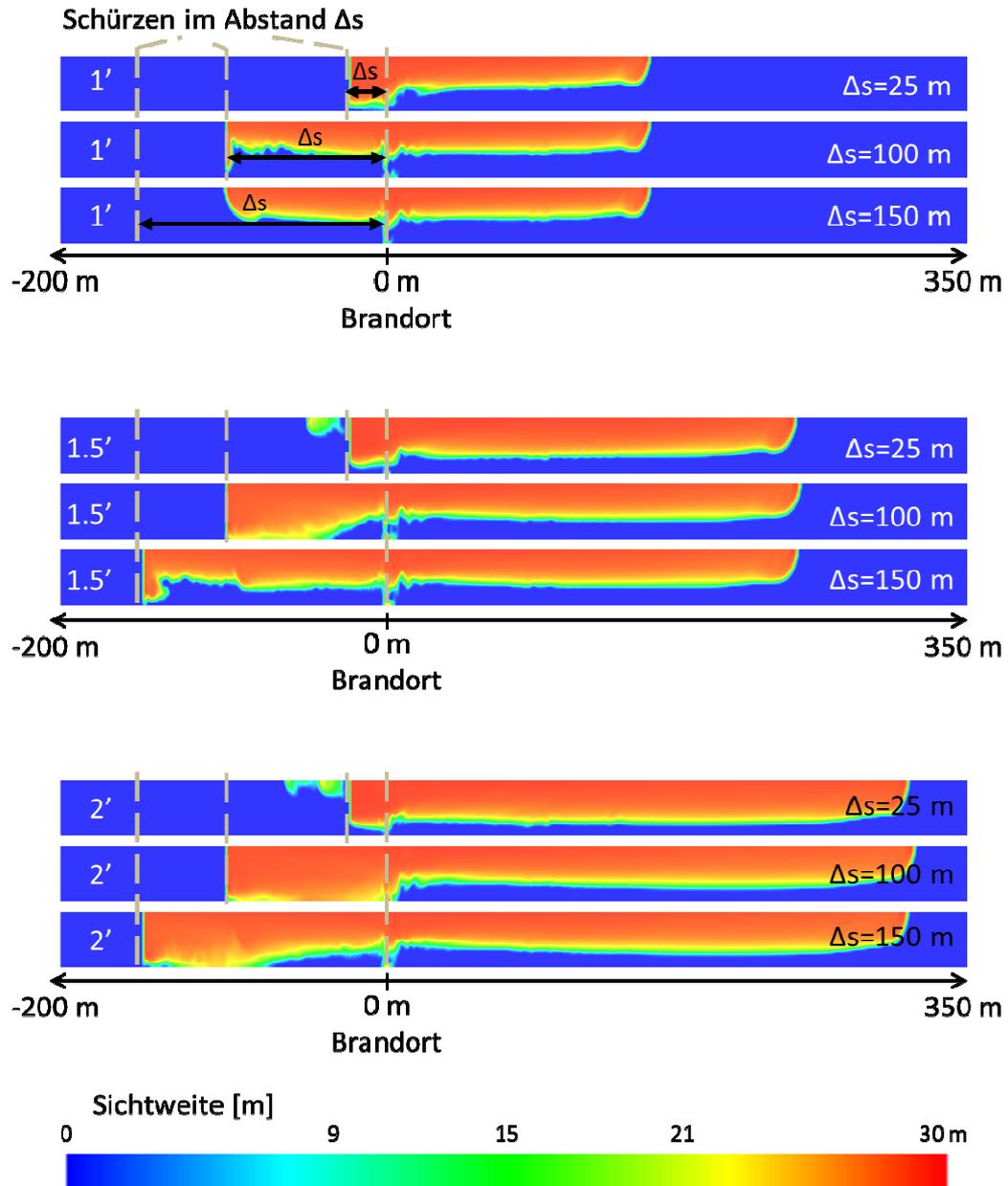


Abb. 5.24: Parameterstudie zum Abstand der Schürzen vom Brandort mit Darstellung der Sichtweiten für unterschiedliche Schürzenabstände (25 m, 100 m und 150 m) vom Brandort. Gezeigt werden Längsschnitte entlang der Tunnelachse. Für die Parameterstudie wurde von einer konstanten Brandleistung ausgegangen und die Schürzen waren schon bei Beginn der Simulation ausgefahren.

Bei Hufeisenprofilen ist die Konstruktion der Schürze etwas aufwendiger, als beim rechteckigen Profil. Ein einfacher Lösungsansatz wäre natürlich, den oberen, runden Teil des Tunnelprofils durch eine festmontierte Vorrichtung zu versperren. Simulationen haben aber gezeigt, dass dies die Rauchschichtung stromab des Brandes erheblich stören würde und die Selbstrettungsbedingungen verschlechtert. Die Schürze muss also für Hufeisenprofile so konstruiert werden, dass sie den oberen, runden Teil des Tunnelprofils offen lässt, wenn sie nicht ausgefahren ist.

## 5.4 Bewertung von Selbstrettung und Intervention gegenüber Tunnel ohne flexible Vorrichtungen

### 5.4.1 Selbstrettungsbereiche

#### Beschreibung der Evaluierungsmethodik

Als tolerable Bedingungen für die Selbstrettung gelten für die Sichtweite Werte von 10 m und mehr. Bei tieferen Sichtweiten nimmt die Gehgeschwindigkeit wie auch das Orientierungsvermögen stark ab. Darauf basierend können gemäss Mayer [32] drei Bereiche unterschieden werden, was auch durch die BAST-Methodik [31] aufgenommen wird:

- Selbstrettung
- Bedingte Selbstrettung
- Keine Selbstrettung.

Personen die sich im Bereich „keine Selbstrettung“ befinden, werden auf ihrem Weg zum nächstgelegenen sicheren Bereich von dichtem Rauch eingeholt, der eine Sichtweite von unter 10 m<sup>3</sup> aufweist. Personen die sich bei Brandbeginn in diesem Bereich aufhalten haben keine Chance zu überleben.

Personen die sich bei Brandbeginn im Bereich „bedingte Selbstrettung befinden“, erreichen einen sicheren Bereich, ohne durch Rauch mit einer Sichtweite von unter 10 m gehen zu müssen, wenn sie sich sofort nach Brandbeginn, also vor der Alarmierung, auf den Weg begeben.

Personen im Bereich „Selbstrettung“ erreichen einen sicheren Bereich, wenn sie sich bei Alarmierung auf den Weg begeben. Es wird bei diesen Personen von einer Überlebenschance von 100% ausgegangen.

Als Beispiel für die Festlegung der Selbstrettungsbereiche sind diese in Abb. 5.25 für einen natürlich belüfteten Tunnel dargestellt: Rote Abschnitte bezeichnen Bereiche ohne Chance auf Selbstrettung, orange-gelbe Abschnitte sind Orte mit bedingter Selbstrettung und Grün steht für Bereiche mit 100% Chance auf Selbstrettung.

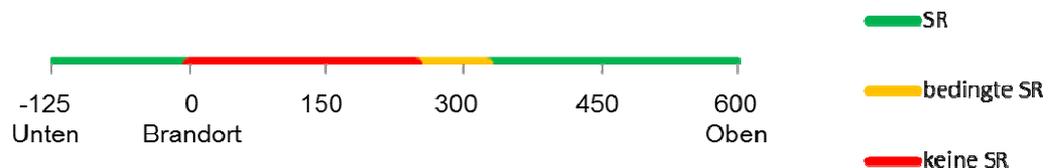


Abb. 5.25: Beispiel für die Darstellung von Selbstrettungsbereichen (Auf der Achse angegeben ist die Distanz zum Brandort in Meter).

Bei der Bestimmung der Selbstrettungsbereiche galten nur die beiden Portale als sichere Bereiche. Es gibt keine Querschläge zu einer anderen Tunnelröhre oder Ausgang an die Oberfläche. Weitere Annahmen betreffen:

- Alarmierungszeit: 1.5 Minuten nach Brandbeginn
- Gehgeschwindigkeit: 1 m/s
- Tolerierte Sichtweite 1.8 m über Fahrbahn: 10 m

#### Bewertung natürlich belüfteter Tunnel

Anhand der Selbstrettungsbereiche ist ersichtlich, dass das Anbringen von Streifenvorrichtungen am unteren Portal zu leicht besseren Bedingungen für die Selbstrettung führt. Der Bereich „keine Selbstrettung“ wird um rund 30 m verkürzt und der Bereich mit bedingter Selbstrettung fällt ebenfalls rund 25 m kürzer aus.

<sup>3</sup> Abweichend zur BAST-Methodik wird die Limite für die Sichtweite konservativ auf 10 m, anstatt 5 m gesetzt.

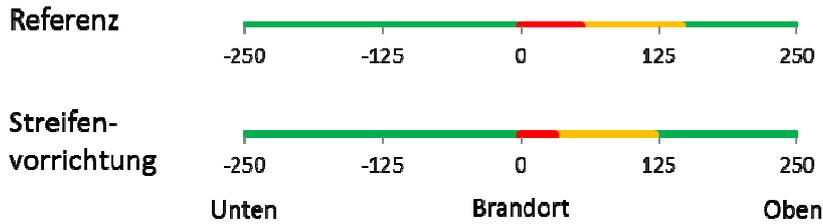


Abb. 5.26: Selbstrettungsbereiche für natürlich belüftete Tunnel mit 3% Längsneigung und Rechteckprofil (Alarmierungszeit = 1.5 min).



Abb. 5.27: Selbstrettungsbereiche für natürlich belüftete Tunnel mit 5% Längsneigung und Rechteckprofil (Alarmierungszeit = 1.5 min).

In der vorliegenden Arbeit wurde von gleichmässigem Verkehr und vernachlässigbaren Portaleinflüssen ausgegangen. Die Tunnelluft war beim Eintreten des Brandfalls also in Ruhe. Berücksichtigung einer Anfangsgeschwindigkeit hat Auswirkungen auf die Rauchausbreitung und die Selbstrettungsbereiche. Bei einer Längsströmung, die im Tunnel nach oben steigt, wird Rauch schon von Beginn des Brandes nach oben transportiert. Es muss davon ausgegangen werden, dass Bereiche ohne Selbstrettung und mit bedingter Selbstrettung dadurch grösser ausfallen werden, als bei ruhender Tunnelluft. Tendenziell sind die Benefits durch die Vorrichtung bei vorhandener Längsströmung aber grösser, weil die Bremswirkung höher ist und dadurch die Rauchausbreitung effektiver reduziert werden sollte. Ein frühes Aktivieren der Vorrichtung könnte die Ausbreitung des Rauches massgeblich verringern und auch in diesen Fällen zu verbesserten Selbstrettungsbedingungen beitragen.

### Bewertung längsbelüfteter Tunnel

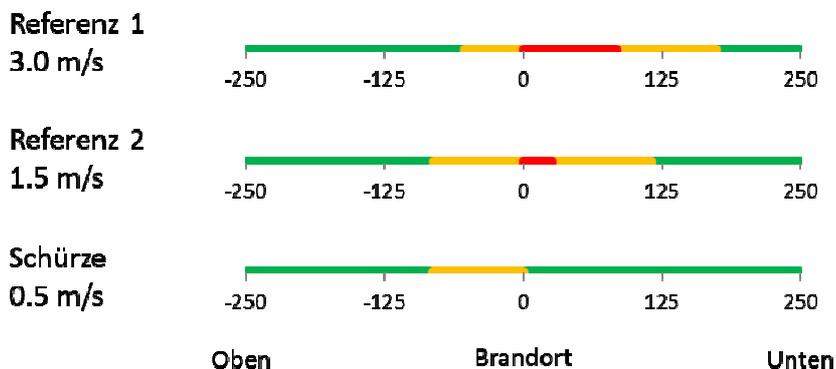


Abb. 5.28: Selbstrettungsbereiche für längsbelüftete Tunnel mit 3% Längsneigung und Rechteckprofil (Alarmierungszeit = 1.5 min).

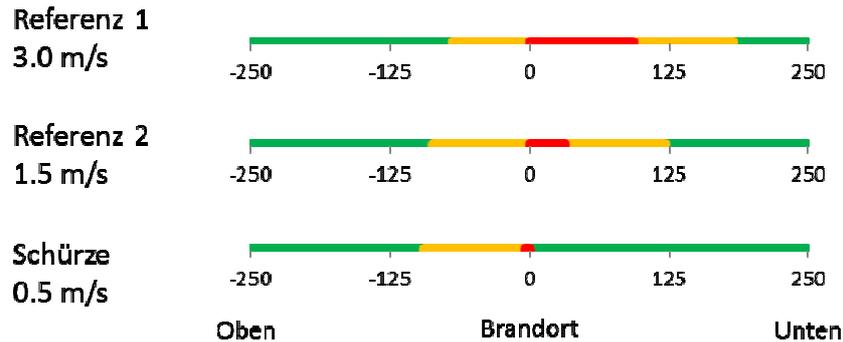


Abb. 5.29: Selbstrettungsbereiche für längsbelüftete Tunnel mit 5% Längsneigung und Rechteckprofil (Alarmierungszeit = 1.5 min).

Die Selbstrettungsbedingungen werden durch den Einsatz von Schürzen deutlich verbessert. Der Bereich, wo keine Selbstrettung möglich ist, verschwindet fast komplett. Dafür ist der Bereich mit bedingter Selbstrettung zwischen Brandort und oberem Portal tendenziell grösser. Mit rund 100 m ist er aber sehr nahe beim Brand. Personen in diesem Bereich müssten also direkte Sicht auf den Ereignisort haben und dürften entsprechend schon vor der Alarmierung gewarnt sein und einen sicheren Bereich aufsuchen.

## 5.4.2 Qualitative Bewertung Intervention

### Kriterien

Interventionskräfte müssen schnell zum Brandort gelangen können. Dazu brauchen sie freie Anfahrtswege. Vorrichtungen, welche die Sicht versperren oder nicht durchfahrbar sind, stellen dabei ein Hindernis dar, ebenso sich ausbreitender Rauch, der die Sichtweite im Tunnel reduziert.

Am Ereignisort selber ist für den Einsatz ebenfalls von Vorteil, dass eine gewisse Sichtweite vorhanden ist, die Rauchdichte also nicht zu hoch ist. Die Lufttemperatur spielt für die Einsatzbedingungen auch eine massgebliche Rolle. Hohe Temperaturen können ein Vordringen zum Brandort verunmöglichen oder aber die Einsatzdauer drastisch reduzieren.

### Streifenvorrichtung

Kurze, steile Tunnel sind das Einsatzgebiet von Streifenvorrichtungen. Dort verschlechtern sie die Einsatzbedingungen für Interventionskräfte. Durch das Abbremsen der Längsgeschwindigkeit (Kamineffekt) im Tunnel, breitet sich Rauch nicht nur zum oberen Portal hin aus, sondern vermehrt auch zum tiefer gelegen Portal (Abb. 5.12).

Die Streifenvorrichtung selbst stellt zudem ein Sichthindernis dar und kann daher nur im Schritttempo durchfahren werden.

Am Brandort ist durch den Einsatz von Streifenvorrichtungen für die Einsatzkräfte ebenfalls mit höheren Rauchdichten zu rechnen. Die Temperaturen liegen ebenfalls leicht höher, allerdings nur in der Rauchschiicht entlang der Tunneldecke. Die Wärmestrahlung durch diese Rauchschiicht führt stromabwärts bis zu einer Entfernung von rund 50 m zum Brandort zu schwacher thermischer Strahlung.

### Rauchschiichtvorrichtung

Der Anfahrtsweg zum Brandort wird durch Rauchschiichtvorrichtungen auf der unteren Seite des Tunnels versperrt. Die Zufahrt zum Brandort mit Fahrzeugen ist also nur über das obere Portal möglich oder durch Entfernen der Rauchschiichtvorrichtung über das untere Portal.

Rauchschiichtvorrichtungen sollten so konstruiert sein, dass sie die Längsgeschwindigkeit im Tunnel auf rund 1 m/s beschränken. Am Ereignisort und im Tunnel ist daher mit ziem-

lich identischen Bedingungen zu rechnen wie beim Einsatz der Streifenvorrichtungen.

### **Schürzenvorrichtung**

In längsbelüfteten Tunnel, speziell bei Gegenverkehr oder Richtungsverkehr mit hoher Stauwahrscheinlichkeit, könnten Streifenvorrichtungen zum Einsatz kommen, um mit tiefen Längsgeschwindigkeiten die Rauchausbreitung im Brandfall einseitig zu beschränken. Der Zugang zum Brandort kann durch den Schürzeneinsatz einseitig bis auf ca. 100 m rauchfrei gehalten werden, was einer deutlichen Verbesserung der Einsatzbedingungen entspricht (vgl. Rauchausbreitung bei konventionell belüftetem Tunnel in Abb. 5.20 und Abb. 5.23 mit der Rauchausbreitung bei Einsatz der Schürze in Abb. 5.18 und Abb. 5.21).

Der Einsatz von Schürzenvorrichtungen führt also auch in der Interventionsphase zu deutlich besseren Bedingungen.

## **5.5 Erkenntnisse und Folgerungen**

### **Vorrichtungen für natürlich belüftete Tunnel**

Die Simulationen haben gezeigt, dass flexible Vorrichtungen in natürlich belüfteten Tunnel einen positiven Einfluss auf die Rauchausbreitung haben. Es müssen allerdings gewisse Voraussetzungen berücksichtigt werden:

- Tunnel muss länger als 500 m sein
- Tunnel muss eine Längsneigung von mindestens 3% aufweisen
- Verkehrsführung mit Gegenverkehr, Richtungsverkehr mit hoher Stauwahrscheinlichkeit oder Richtungsverkehr bergab
- Längsströmung darf nicht komplett abgebremst werden, eine Geschwindigkeit von 0.5 bis 1 m/s sollte angestrebt werden
- Vorrichtung muss innerhalb kurzer Zeit (max. 2 Minuten) nach Beginn des Ereignisses aktiviert werden (automatische Aktivierung erforderlich).

### **Vorrichtungen für längsbelüftete Tunnel**

Schürzenvorrichtungen zeigen erhebliches Potenzial die Rauchausbreitung besser kontrollieren zu können in längsbelüfteten Tunnel mit Gegenverkehr oder Richtungsverkehr mit hoher Stauwahrscheinlichkeit. Im Vergleich mit konventioneller Längslüftung zeigen sie insbesondere bei Tunneln mit hoher Längsneigung deutlich bessere Resultate.

Für einen Einsatz von Schürzen müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Automatische Lokalisierung des Brandortes
- Individuell ansteuerbare Schürzen
- Vorrichtung darf bei Installation in bergmännisch erstellten Tunneln, den oberen Bereich (Hufeisen) nur bei Aktivierung zusperren.

### **Einsatzgebiete der Vorrichtungen nach Tunneleigenschaften**

Die Vorrichtungen für natürlich belüftete Tunnel brauchen eine Mindestlänge von 500 m um wirksam zu sein. Bei kürzeren Tunneln ist die Reaktionszeit für die Aktivierung tendenziell zu hoch und die thermischen Effekte, welche durch Brände erzeugt werden, sind kleiner. Bei der Länge sind sie auf 800 m limitiert, da für Tunnel mit einer Länge über 800 m gemäss [8] eine Längslüftung erforderlich ist.

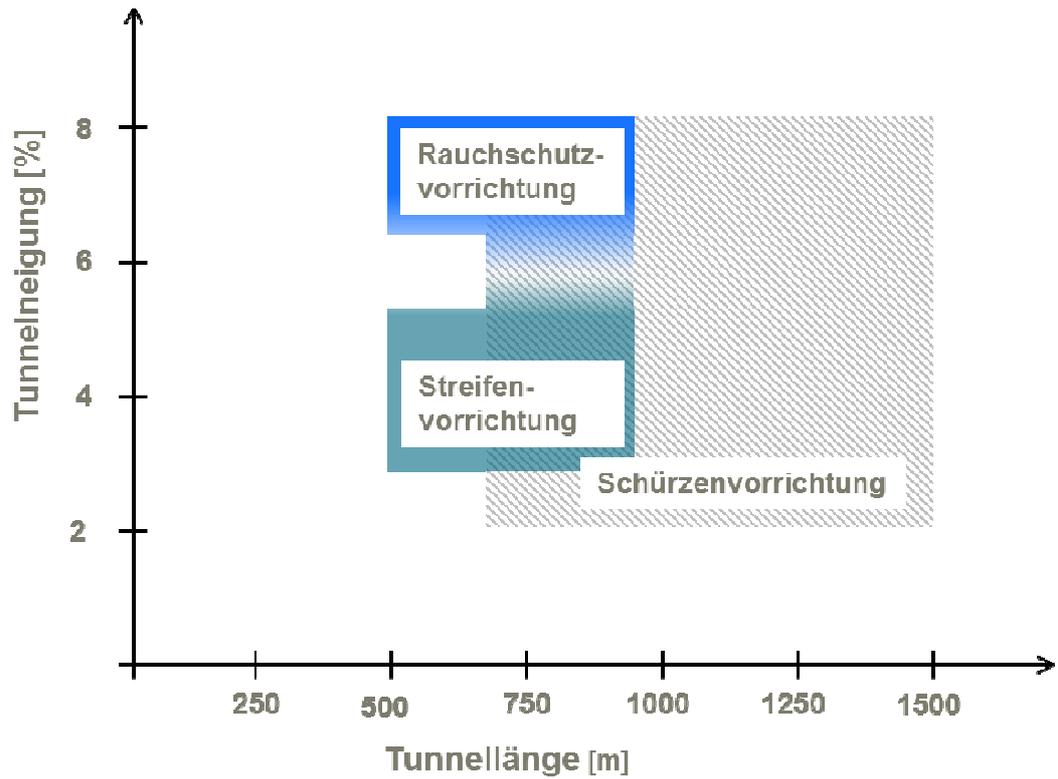


Abb. 5.30: Einsatzgebiete der Vorrichtungen nach Tunnellänge und Längsneigung.

Schürzenvorrichtungen haben ein relativ breites Einsatzgebiet, was Längsneigung und Länge des Tunnels anbelangt. Der Nutzen ist bei diesen Vorrichtungen primär durch das Verkehrsregime (Richtungsverkehr mit hoher Stauwahrscheinlichkeit oder Gegenverkehr) gegeben.

## 6 Hauptuntersuchung der Sekundärkriterien

### 6.1 Technische Machbarkeit

Im vorliegenden Forschungsbericht wurden in erster Linie die physikalische Funktionsweise und der potentielle Nutzen der Vorrichtungen untersucht. Auf dieser Basis kann die technische Machbarkeit in einem Strassentunnel ansatzweise untersucht werden.

Die Vorrichtungen können grundsätzlich in jedem Tunnel eingebaut werden. Anforderungen an den Tunnel sind nur in Bezug auf die Längsneigung, die Tunnellänge und das Verkehrsregime gegeben, damit der Nutzen der Vorrichtungen sichergestellt ist.

Je nach Tunneltyp sind gewisse Zusatzsysteme nötig. Die Vorrichtungen müssen vollautomatisch aktiviert werden, um die Reaktionszeit kurz zu halten. Dazu ist in jedem Fall eine Ereignisdetektion erforderlich, welche in natürlich belüfteten Tunnel in der Regel nicht vorhanden ist.

Zusätzlich sollten bei natürlich belüfteten Tunnel eine Warnleuchte bei der Vorrichtung sowie in einiger Entfernung ein blinkendes Achtung-Schild angebracht werden, welche zusammen mit der Vorrichtung aktiviert werden. Tunnelbenutzer sollen so gewarnt werden, um folgenschwere Reflexhandlungen oder Auffahrunfälle zu verhindern.

### 6.2 Konsequenzen von Fehlauslösung

Durch den Einbau von flexiblen Vorrichtungen bringt man auch gewisse Gefahren in den Tunnel hinein. Flexible Vorrichtungen (Streifenvorrichtung, Rauchschutzvorrichtung) stellen ein Hindernis für die Fahrzeuge dar und blockieren die freie Sicht.

Eine der Gefahren geht aus von der Blockierung / Behinderung der Durchfahrt von Fahrzeugen. Dieses Hindernis kommt gerade in einem Tunnel sehr unerwartet. Streifenvorrichtungen, wie auch Schürzenvorrichtungen, können durchfahrbar gestaltet werden. Unklar ist jedoch, wie die Fahrzeuglenker sich verhalten, wenn sie auf eine solche Vorrichtung treffen. Christ, Klemenjak und Prantl haben dies in einer kleinen, experimentellen Studie mit Streifenvorrichtungen untersucht [10]. Sie konnten zeigen, dass eine grosse Verunsicherung der Fahrzeuglenker auftritt, wenn sie vor sich die ausgefahrene Vorrichtung sehen. Es wurde beobachtet, dass die Testpersonen in der Regel zunächst stark abbremsen oder anhalten, um nach kurzem Nachdenken mit reduzierter Geschwindigkeit durch die Streifenvorrichtung hindurch zu fahren.

Beim Durchfahren mit hoher Geschwindigkeit muss davon ausgegangen werden, dass die Vorrichtung durch das Fahrzeug beschädigt oder zerstört wird. Speziell wenn dieses ein Fahrrad oder ähnliches auf dem Autodach geladen hat, könnte sich die Vorrichtung verheddern und weggerissen werden.

Eine weitere Schwierigkeit, nicht nur für flüchtende Personen, sondern auch für die Rettungs- und Interventionskräfte, stellt die Sichteinschränkung dar, die durch Streifen und vollschliessende Vorrichtungen gegeben ist. Personen oder Fahrzeuge, die sich hinter einer Vorrichtung befinden, können nicht gesehen werden. Eventuell können Vorrichtungen mit durchsichtigem Material konstruiert werden, um die Sichteinschränkungen zu verringern. Durchsichtiges Material bzw. Textilien sind auf dem Markt erhältlich, jedoch ist nichts über deren Eignung für flexible Vorrichtungen in Tunnel bekannt.

Die Eigenschaft, als Barriere wahrgenommen zu werden, hat aber auch positive Seiten. Streifenvorrichtungen sowie vollschliessende Vorrichtungen sind nur für natürlich belüftete Tunnel vorgesehen, mit einer maximalen Länge von 800 m. Am unteren Portal installiert, tragen sie zur Sperrung des Tunnels bei. Ausfahrende Fahrzeuge werden bereits durch die Unfallstelle im Tunnel blockiert und werden durch die Vorrichtung nicht behindert. In der Zeit bis die Vorrichtungen aktiviert werden (rund 1 Minute), legt ein Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 60 km/h eine Distanz von einem Kilometer zurück. Im



bei bestehenden Anlagen relativ hoch sein, da die Arbeiten aufwändig sind. Ausschlaggebend sind schlussendlich aber immer die spezifischen Tunneleigenschaften.

## 6.5 Betriebs- und Unterhaltskosten

Die Betriebskosten können in Prozent der Investitionskosten abgeschätzt werden. Aufgrund der sehr beschränkten Erfahrungen im rauen Tunnelumfeld kann vorerst von jährlichen Unterhaltskosten im Bereich von 5 bis 10% ausgegangen werden.

## 7 Fallstudie

### 7.1 Einleitung

Im vorliegenden Kapitel wird die Wirksamkeit von flexiblen Vorrichtungen am Beispiel eines typisch schweizerischen Alpentunnels untersucht. Die geometrischen Parameter werden in Anlehnung an einen existierenden Tunnel gewählt, als typischer Vertreter der im alpinen Raum relativ weit verbreiteten kurzen Gegenverkehrstunnel mit grosser Längsneigung.

Eine vorhergehende Analyse hat gezeigt, dass lüftungstechnische Massnahmen bei solchen Strassentunnel schwierig und verhältnismässig unwirksam sind [15]. An dieser Stelle geht es nun darum, zu zeigen, wie mittels flexiblen Vorrichtungen bei dieser Tunnelkategorie Abhilfe geschafft werden könnte.

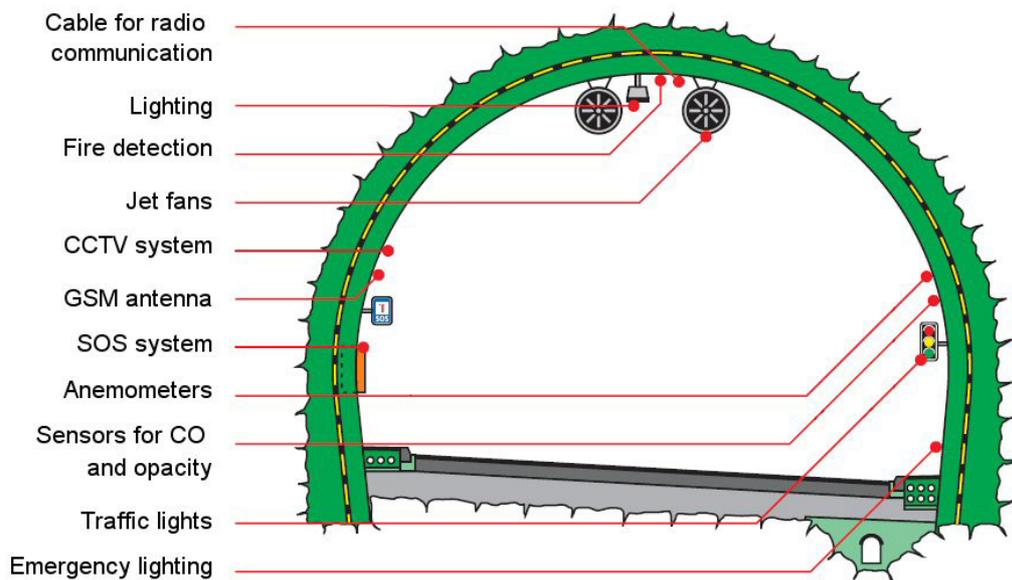


Abb. 7.1: Typische Ausstattung eines kurzen schweizerischen Gegenverkehrstunnel (Quelle TBA GR 2006 [28], modifiziert).

### 7.2 Ausgangssituation

In einem Strassentunnel kommt es durch einen Selbstunfall zu einem Fahrzeugbrand. Der betrachtete Tunnel ist einerseits rein fiktiv und weist andererseits einige typische Merkmale eines Alpentunnels auf. Die Eckdaten des Tunnels sind die Folgenden:

• Anzahl Fahrspuren	2
• Verkehrsregime	Gegenverkehr
• Länge	750 m
• Längsneigung	5 %
• Querschnittsfläche	ca. 58 m <sup>2</sup>
• Notausgänge	keine <sup>4</sup>

Das Normalprofil des Tunnels ist in Abb. 7.2 illustriert. Der Tunnel ist natürlich belüftet und verfügt nicht über Strahlventilatoren oder andere mechanische Einrichtungen zur Beeinflussung der Luftströmung im Tunnel.

<sup>4</sup> Bei Sanierung von Tunnel dieser Kategorie werden nach Möglichkeit Notausgänge eingebaut.

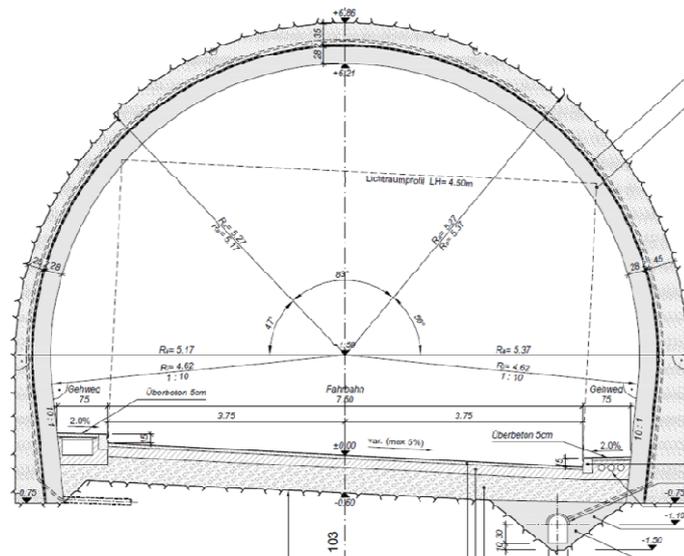


Abb. 7.2: Normalprofil des betrachteten Tunnels.

Beim Brandfahrzeug handelt es sich um einen Lastwagen. Die Brandcharakteristik ist identisch zum Brand, der für die Hauptuntersuchung (Kapitel 5) verwendet wurde. Die Brandleistung steigt also innerhalb von 5 Minuten auf 30 MW. Die entsprechende Brandkurve ist in Abb. 5.1 dargestellt.

Der Brandort liegt in einer Entfernung von 150 m zum tiefer gelegenen Portal. Im Tunnel befinden sich nur wenige weitere Fahrzeuge, welche auf der Fahrspur hinter dem Brandfahrzeug stehen bleiben. Abb. 7.3 zeigt den Tunnel von oben, wo die Verteilung der Fahrzeuge gut zu sehen ist.

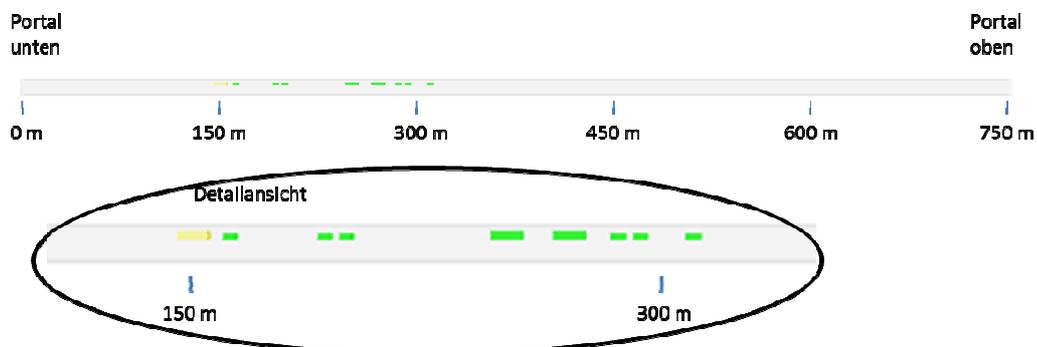


Abb. 7.3: Aufsicht auf Tunnel mit Fahrzeugen.

## 7.3 Szenarien

Insgesamt werden mit der oben vorgestellten Konfiguration drei Szenarien betrachtet und analysiert:

### Szenario „natürliche Lüftung ohne Vorrichtung“

Als Referenzfall wird der Brand ohne Vorrichtung, mit natürlicher Lüftung betrachtet. Aus den Berechnungen der Hauptuntersuchung sowie aus realen Ereignissen in ähnlichen Tunnel, z.B. Viamala, ist bekannt, dass eine sehr schnelle Rauchausbreitung zum oberen Portal hin erwartet werden kann.

### Szenario „natürliche Lüftung mit Vorrichtung“

Für einen natürlich belüfteten Tunnel mit der vorliegenden Charakteristik sind Streifenvorrichtungen geeignet. Hierfür wurden zwei Fälle untersucht:

- Streifenvorrichtung am unteren Portal
- Streifenvorrichtung in Tunnelmitte.

Im ersten Fall ist die Vorrichtung also unterhalb des Brandes (stromauf) positioniert, im zweiten Fall ist sie oberhalb (stromab) angebracht. Die Effekte dieser Positionierung werden sich in den Ergebnissen zeigen und entsprechend beurteilt werden.

## 7.4 Ergebnisse

Die Simulation der beschriebenen Szenarien hat zu eindeutigen Resultaten geführt, und zeigt die Wirkung der Vorrichtung auf die Sicherheit im Ereignisfall für Tunnel der betrachteten Art.

Aus Abb. 7.4 ist ersichtlich, dass die Rauchausbreitung durch die Installation einer Streifenvorrichtung stromab ( $S_{300\text{ m}}$ ) des Brandes am effektivsten reduziert wird. Durch das Anbringen einer solchen Vorrichtung wird zwar die Rauchschichtung erheblich gestört, im vorliegenden Fall scheint dies aber keine Rolle zu spielen, weil sich der Rauch sowieso schon über den gesamten Tunnelquerschnitt ausgebreitet hat. Da der Verlust der Schichtung auch ohne Vorrichtung bereits vorhanden ist, wirkt sich das Durchmischen der Tunnelluft sogar vorteilhaft aus. Die Temperatur der Rauchschicht wird abgesenkt und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rauchfront dadurch deutlich reduziert.

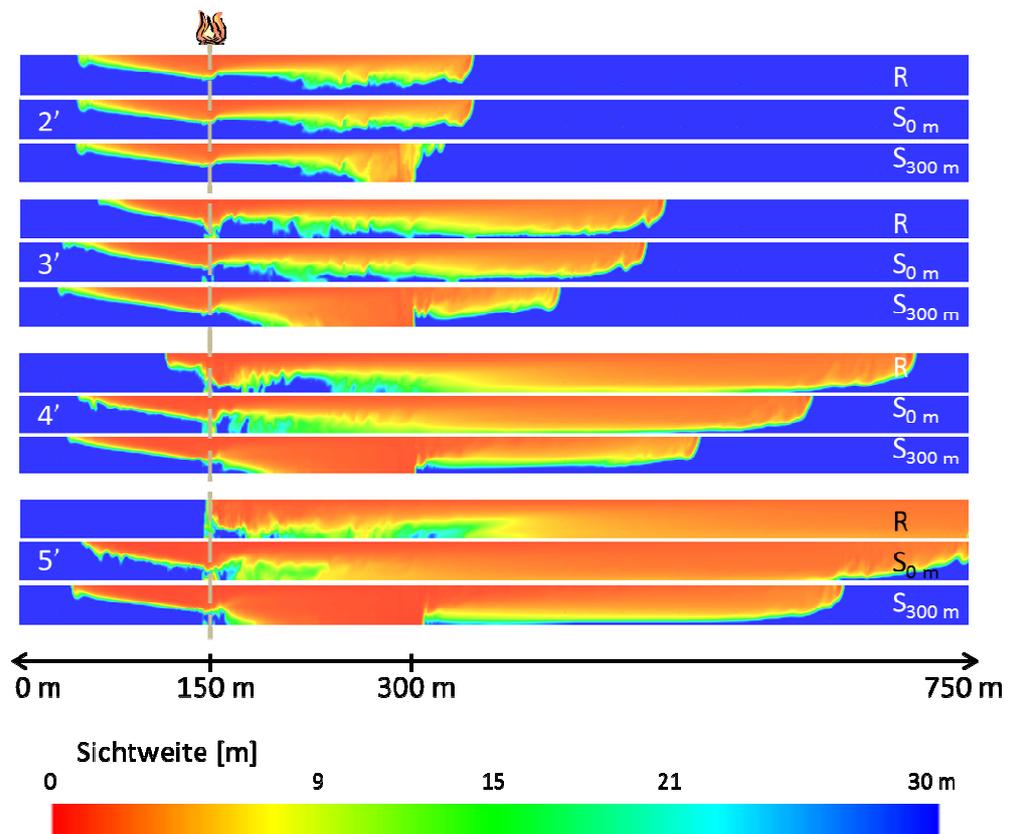


Abb. 7.4: Gegenüberstellung der Sichtweiten der drei Szenarien für Tunnel ohne Vorrichtung (R), Tunnel mit Streifenvorrichtung am unteren Portal ( $S_{0\text{ m}}$ ) und Tunnel mit Streifenvorrichtung in Tunnelmitte ( $S_{300\text{ m}}$ ).

Dass sich das Anbringen einer flexiblen Vorrichtung vorteilhaft auf die Sicherheit auswirkt, wird auch in den Selbstrettungsbereichen wiedergespiegelt (Abb. 7.5). Durch Anbringen der Streifenvorrichtungen am unteren Portal, kann der Bereich, wo die Selbstrettung fraglich ist (keine oder bedingte SR), um ca. 50 m reduziert werden, bei Befestigung in Tunnelmitte kann dieser Bereich sogar um rund 150 m verkleinert werden.

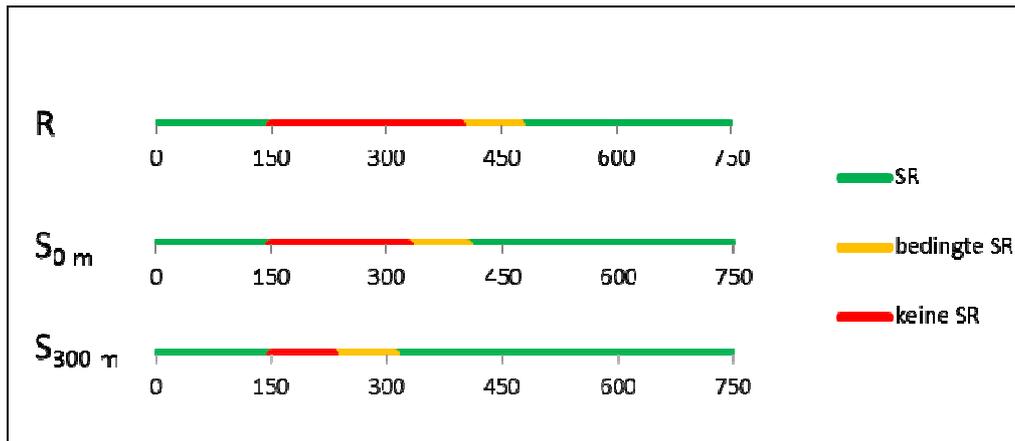


Abb. 7.5: Selbstrettungsbereiche für Tunnel ohne Vorrichtung (R), Tunnel mit Streifenvorrichtung am unteren Portal ( $S_{0\ m}$ ) und Tunnel mit Streifenvorrichtung in Tunnelmitte ( $S_{300\ m}$ ).

## 7.5 Schlussfolgerungen

Die Fallstudie zeigt, dass durch den Einsatz von Streifenvorrichtungen das Ausmass im Ereignisfall in kurzen steilen Tunnel reduziert werden kann. Dies wird erreicht, indem die Rauchausbreitung verlangsamt wird und dadurch den Tunnelbenutzern mehr Zeit für die Selbstrettung zur Verfügung steht.

Jeder Tunnel weist jedoch seine spezifischen Eigenheiten auf. Das aerodynamische Verhalten von Tunneln kann durch die Installation von Streifenvorrichtungen zwar positiv beeinflusst werden, ist aber auch abhängig von der jeweiligen Tunnelcharakteristik (wie Tunnelprofil, Querschnittsfläche, Längsneigung) sowie Randbedingungen. Die obigen Resultate und Analyse müssen deshalb nicht notwendigerweise für alle Fälle repräsentativ sein.

Weitere vertiefte Untersuchungen sind notwendig um die erzielten Ergebnissen zu bestätigen. Zudem sollten auch zusätzliche Einflussgrössen wie Portalwinde oder ungleichmässiger Verkehr (GV) in die Untersuchung miteinbezogen werden, die in dieser Studie nicht berücksichtigt wurden.

## 8 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

### 8.1 Rückblick und Erkenntnisse aus der Untersuchung

Der Ablauf der im vorliegenden Forschungsbericht dokumentierten Studie war in vier Phasen gegliedert:

Phase I – Grundlagen - Rahmenbedingungen zur Abschnittsbildung

Phase II – Systemrelevanz - Selektion nach nicht-monetären Kriterien

Phase III – Masterportfolios – Resultatbündelung inklusive wirtschaftlichen Aspekten

Phase IV – Abschluss - Fallbeispiel und Empfehlungen.

In der Phase I wurden die erforderliche Grundlagen systematisch zusammengetragen, insbesondere:

- Kritische Zusammenstellung der aktuellen sicherheitstechnischen Probleme in Strassentunnel. Dies bildete die Grundlage zur Ermittlung der potentiellen Anwendungsfällen, welche sicherheitstechnisch relevant sind.
- Zusammenstellung von Techniken und Erfahrungen zur Abschnittsbildung mit flexiblen Vorrichtungen aus anderen Bereichen (Hochbau u.a.). Dies zeigte, was der aktuelle Stand der Technik in diesem Bereich schon heute bieten kann.
- Systematische Ermittlung und Dokumentation der Erfahrungen mit verwandten Ansätzen im Tunnelbau.
- Zusammenstellung der grundlegenden sicherheitstechnischen Rahmenbedingungen für den Einsatz von flexiblen Vorrichtungen in Strassentunnel, für die Ereignisphasen Selbstrettung, Fremdrettung und Brandbekämpfung.

In der Phase II wurden diejenigen Systeme identifiziert und physikalisch untersucht, welche einen konkreten Nutzen in praktisch relevanten Situationen bieten:

- Identifikation der physikalischen Wirkprinzipien und der prinzipiellen Realisierungsmöglichkeiten in Strassentunneln.
- Voruntersuchung und Selektion der möglichen Kandidaten mittels bewährten Ingenieurmethoden und gezielten CFD-Simulationen.
- Identifikation und vertiefte Untersuchung der Wirksamkeit der restlichen Kandidaten.

In der Phase III wurden nicht-monetären Kriterien in die Untersuchung integriert und ansatzweise untersucht, insbesondere:

- Systematische Nutzwertanalyse zur Ermittlung von Bewertungskriterien für den Einsatz von flexiblen Vorrichtungen in Strassentunnel.
- Kosten/Nutzen Betrachtungen.
- Voruntersuchung der weiteren relevanten Aspekte.

In der Phase IV wurden die Schlussfolgerungen konkretisiert und dokumentiert:

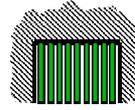
- Untersuchung eines Fallbeispiels.
- Zusammenstellung und Dokumentation der wichtigsten Erkenntnisse.

### 8.2 Geeignete Vorrichtungen

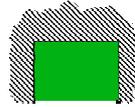
#### 8.2.1 Übersicht

Aus der Untersuchung resultierten nachfolgende Anwendungsmöglichkeiten:

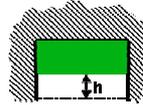
1. Streifenvorrichtung für kurze, steile Tunnel mit natürlicher Lüftung



2. Rauchschutzeinrichtung für kurze, steile Tunnel mit natürlicher Lüftung



3. Schürzenvorrichtung für Tunnel mit Längslüftung (Gegenverkehr oder RV2)



4. Streifenvorrichtung für lange Tunnel mit Rauchabsaugung (Gegenverkehr oder RV2)



Einsatzmöglichkeiten und Einschränkungen werden in den nachfolgenden Abschnitten behandelt.

## 8.2.2 Streifenvorrichtungen für kurze, steile Tunnel mit natürlicher Lüftung

Einsatzbereich:

- Kurze, steile Tunnel (Längsneigung > 2-3%)
- Tunnellänge bis ca. 800 m (Einsatzbereich der natürlichen Längslüftung)
- Bei RV1: Nur negative Längsneigung (Verkehr nach unten)
- Bei RV2 + GV: Einsatz unabhängig ob Tunnel steigend oder sinkend.
- Besonders nützlich wenn wenig oder keine Notausgänge vorhanden sind

Zweck:

- Minderung der natürlichen Längsgeschwindigkeit auf ca. 1-2 m/s.
- Verlangsamung der Rauchfrontgeschwindigkeit

Installation:

- Vorrichtung beim unteren Portal installiert
- Installationsalternative in der Tunnelmitte (Validierungsversuche notwendig)
- Max 2-3 weitere Vorrichtungen im Abstand von rund 50 m
- Ereignisdetektion erforderlich.

Betrieb:

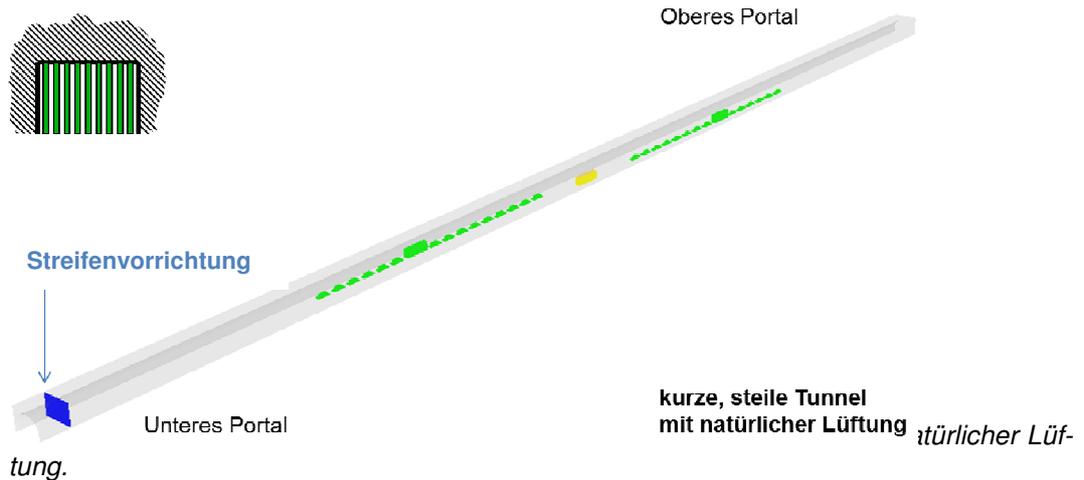
- Rasche, vollautomatische Aktivierung basierend auf Rauchdetektoren
- Warnung der Fahrzeuglenker durch Warnleuchte und Portalsignalisation bei Aktivierung.

Bewertung:

- Sehr wirksam
- Bei starker natürlicher Längsströmung, benötigte Anzahl Vorrichtungen zu hoch
- Betrieblich eher unproblematisch.

Offene Punkte:

- Menschliches Verhalten.



### 8.2.3 “Rauchschutzvorrichtung” für kurze, steile Tunnel mit natürlicher Lüftung

Einsatzbereich:

- Kurze, steile Tunnel (Längsneigung > 2-3%)
- Tunnellänge bis ca. 800 m (Einsatzbereich der natürlichen Längslüftung)
- Bei RV1: Nur negative Längsneigung (Verkehr nach unten)
- Bei RV2 + GV: Einsatz unabhängig ob Tunnel steigend oder sinkend.

Zweck:

- Minderung der natürlichen Längsgeschwindigkeit auf ca. 1-2 m/s.

Installation:

- Abschluss am unteren Portal
- Ereignisdetektion erforderlich.

Betrieb:

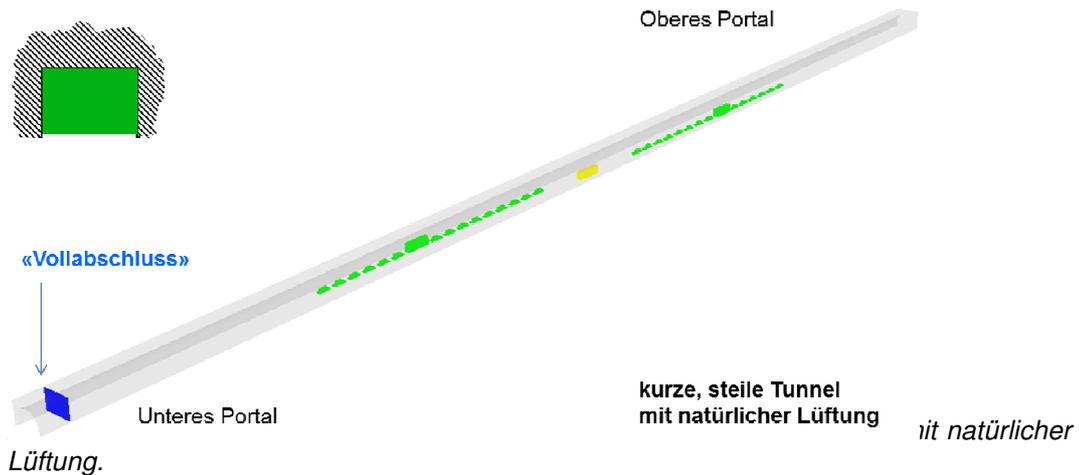
- Rasche, vollautomatische Aktivierung basierend auf Rauchdetektoren
- Bei Aktivierung Warnung der Fahrzeuglenker durch Warnleuchte und Portalsignalisation.
- Einsatzkonzept mit Feuerwehr abzustimmen.

Bewertung:

- Sehr wirksam
- Selbstrettung und Intervention nur zu Fuss möglich.

Offene Punkte:

- Akzeptanz und Bewilligungsfähigkeit
- Einsatzkonzept (Schliesszeit usw.)
- Interventionsstrategie
- Menschliches Verhalten
- Behinderung der Selbstrettung durch Reduktion der Fluchtwegkapazität.



## 8.2.4 Schürzenvorrichtungen für Tunnel mit Längslüftung

Einsatzbereich:

- Längslüftung
- Verkehrstypen RV2 und GV
- Tunnellänge ca. 500-3'000 m (Einsatzbereich von Längslüftungen).

Zweck:

- Minderung der kritischen Geschwindigkeit auf ca. 0.5 m/s
- Möglichkeit zur Kontrolle der Rauchausbreitung mit geringerer Störung der natürlichen Rauchschichtung als bei reiner Längslüftung (3 m/s).

Installation:

- Ganze Tunnellänge, im Abstand von rund 150 m
- Portalbereiche in der Regel frei (Platz zur Installation von Strahlventilatoren).

Betrieb:

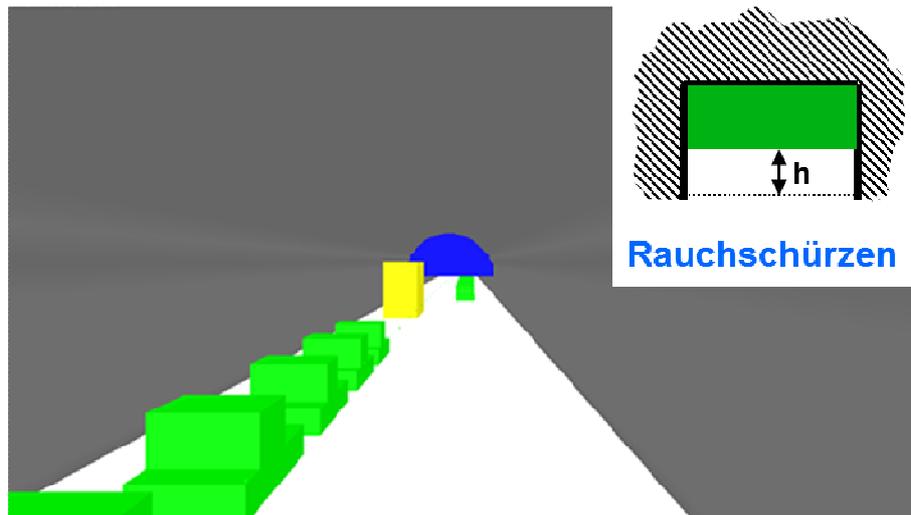
- Vollautomatische Aktivierung von 2 Vorrichtungen stromauf des Brandortes basierend auf rascher Brandlokalisierung.

Bewertung:

- Sehr wirksam
- Schichtungsverlust möglich, aber weniger gravierend als bei Lüftung mit kritischer Geschwindigkeit
- Betrieblich unbedenklich (Schürze flexibel gestaltet, freie LW Durchfahrt)

Offene Punkte:

- Validierung der CFD Resultate durch Versuche
- Mindesthöhe der Schürze für verschiedene Tunnelprofile ist zu optimieren.



### 8.2.5 Streifenvorrichtungen für Tunnel mit Rauchabsaugung

Einsatzbereich:

- Lüftungssysteme mit Rauchabsaugung
- Verkehrstypen RV2 + GV
- Eignet sich sehr gut zur Nachrüstung von langen Tunneln mit Rauchabsaugung, bei welchen keine ausreichende Kontrolle der Längsgeschwindigkeit möglich ist.

Zweck:

- Längsgeschwindigkeit mindern
- Effiziente Rauchabsaugung ermöglichen.

Installation:

- Anzahl je nach Anforderungen
- Mindestabstand 50 m.

Betrieb:

- Vollautomatisch (alle Vorrichtungen sofort langsam absenken).

Urteil:

- Sehr wirksam
- Betrieblich eher unbedenklich.

Offene Punkte:

- Menschliches Verhalten.

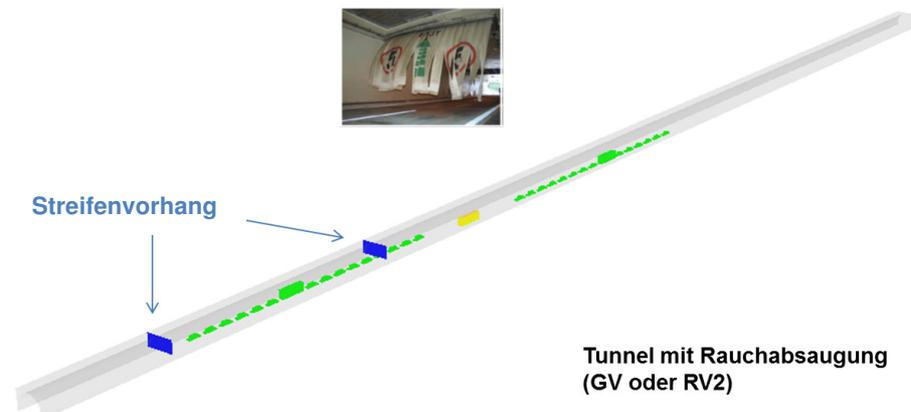


Abb. 8.4: Einsatzprinzip Streifenvorrichtungen für Tunnel mit Rauchabsaugung.

### 8.3 Entwicklungsstand und weitere Anforderungen

Der Stand der im Vorliegenden System untersuchten Systeme in Bezug auf den praktischen Einsatz kann folgendermassen beurteilt werden:

#### **Streifenvorrichtungen für kurze, steile Tunnel mit natürlicher Lüftung**

- Aus technischer Sicht für den Einsatz bereit
- Einsatzstrategie und menschliches Verhalten sollten weiter untersucht werden.

#### **“Rauchschutzvorrichtung” für kurze, steile Tunnel mit natürlicher Lüftung**

- Der physikalische Funktionalitätsnachweis ist erbracht
- Das System muss noch konstruktiv gestaltet und geprüft werden
- Einsatzstrategie und menschliches Verhalten sollten weiter untersucht werden
- Eine umfassende Koordination mit den Einsatzkräften ist erforderlich.

#### **Schürzenvorrichtungen für Tunnel mit Längslüftung**

- Der physikalische Funktionalitätsnachweis ist erbracht
- Experimentelle Überprüfung (durch CFD unterstützt) notwendig
- Das System muss noch konstruktiv gestaltet und geprüft werden.

#### **Streifenvorrichtungen für Tunnel mit Rauchabsaugung**

- Wurde in Österreich sehr ausführlich untersucht
- Ist kommerziell verfügbar
- Menschliches Verhalten.

### 8.4 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Es ist aus Sicht der Autoren sehr empfehlenswert, die Studie in den nachfolgenden Stossrichtungen weiter zu führen:

#### **Streifenvorrichtungen für kurze, steile Tunnel mit natürlicher Lüftung**

- Untersuchung des menschlichen Verhaltens mittels Untersuchungen am Simulator (Abb. 8.5).
- Identifikation eines für den Einsatz geeigneten Tunnels auf dem schweizerischen Nationalstrassennetz.
- Untersuchung der Installationsmöglichkeiten auf der Machbarkeitsstufe.
- Praktische Prüfung anhand einer Pilotanlage im Vollmassstab (wichtig ist, dass die Brandleistung voll kontrolliert und in realistischem Rahmen gesetzt werden kann).

Begründung: Es gibt in der Schweiz eine Anzahl in Betrieb stehende kurze, steile Tunnel mit natürlicher oder Längslüftung, bei welchen die Kontrolle der Längsgeschwindigkeit im Ereignisfall problematisch ist. Die vorgeschlagenen Studien könnten direkt zur Erhöhung der Tunnelsicherheit in der Schweiz beitragen und hätten international eine gewisse Signalwirkung.

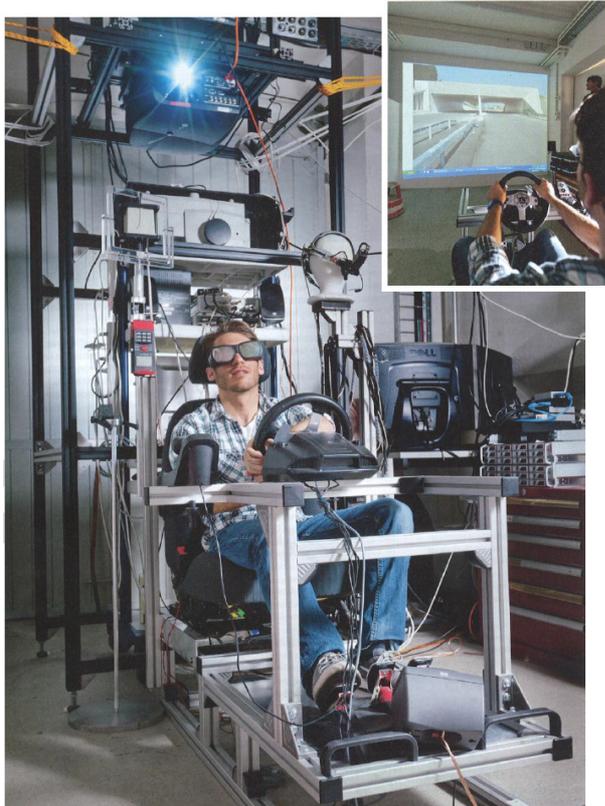


Abb. 8.5: Fahr Simulator am Institut für Innovations- und Technologiemanagement der ETH Zürich [33].

#### **Schürzenvorrichtungen für Tunnel mit Längslüftung**

- Fortführung der theoretischen Studien mit weiteren CFD-Simulationen, um den Einfluss auf die Rauchsichtung vertiefter zu untersuchen.
- Realisierung eines Versuches im Kleinmassstab (etwa 1:10), um die CFD-Ergebnisse zu validieren.

Begründung: Obwohl noch verhältnismässig weit von einer praktischen Einsatzmöglichkeit entfernt, ist der vorgeschlagene Einsatz von Schürzenvorrichtungen sehr innovativ und hat ein grosses Potenzial für entscheidende sicherheitstechnische Verbesserungen für das im alpinen Bereich sehr wichtige Segment der längsbelüfteten Tunnel mit Gegenverkehr oder Richtungsverkehr mit hoher Stauwahrscheinlichkeit. Der Einsatz von Längslüftungen stellt bei solchen Tunnelsystemen ein nicht sehr zufriedenstellender Kompromiss zwischen sicherheitstechnischen Anforderungen und Kostenoptimierung dar. Steuerungstechnisch sind solche Anlagen häufig problematisch.

#### **Rauchschutzvorrichtungen für natürlich belüftete Tunnel**

Es werden zunächst keine weiteren Untersuchungen empfohlen: Der Einsatzbereich von "Rauchschutzvorrichtungen" für kurze, steile Tunnel mit natürlicher Lüftung ist analog wie bei Streifenvorrichtungen, aber die sicherheitstechnischen Bedenken (Gefährdung der Tunnelbenutzer, Behinderung der Intervention usw.) und das für den praktischen Einsatz erforderliche Engineering sind wesentlich grösser. Diese Systeme sollen, falls erforderlich, erst nach Abschluss der Arbeiten an den Streifenvorrichtungen weiter verfolgt werden.

#### **Streifenvorrichtungen für Tunnel mit Rauchabsaugung**

Diese Vorrichtung wurde sehr ausführlich untersucht und kann bei Bedarf für spezifische Tunnel gezielt im Rahmen einer Machbarkeitsstudie und Variantenanalyse untersucht werden.

Vor einer möglichen Realisation ist zu empfehlen, das menschliche Verhalten bei antreffen der Vorrichtung im Tunnel zu untersuchen und eine wirksame Signalisation zur Erwirkung des gewünschten Verhaltens zu eruiieren.

## Anhänge

<b>I</b>	<b>Simulationsresultate .....</b>	<b>87</b>
<b>I.1</b>	<b>Natürlich belüftete Tunnel .....</b>	<b>87</b>
<b>I.2</b>	<b>Längsbelüftete Tunnel .....</b>	<b>91</b>

# I Simulationsresultate

## I.1 Natürlich belüftete Tunnel

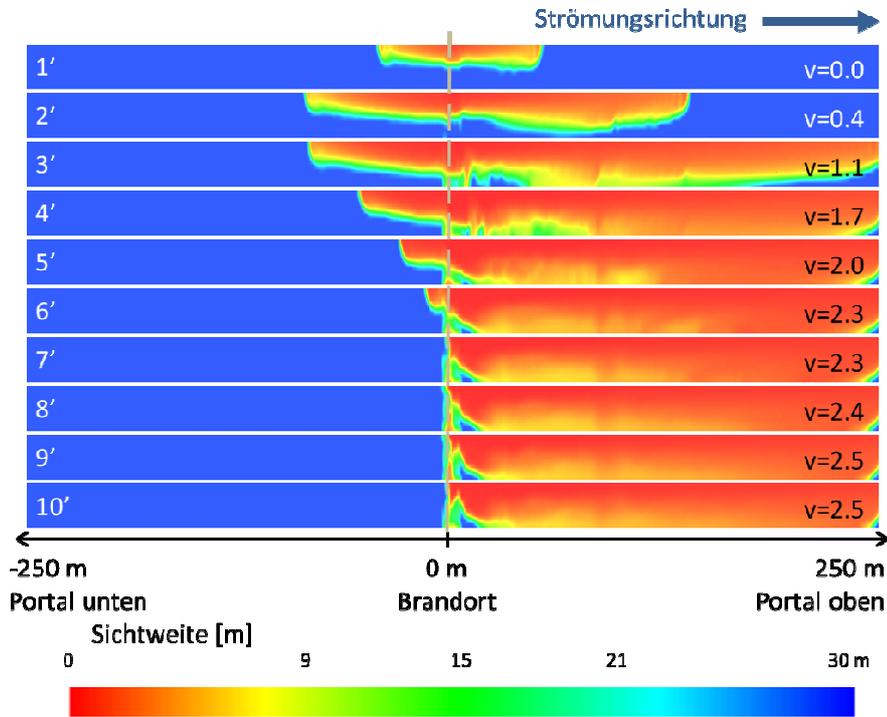


Abb. I.1 Rauchausbreitung bei Rechteckprofil mit 3% Längsneigung.

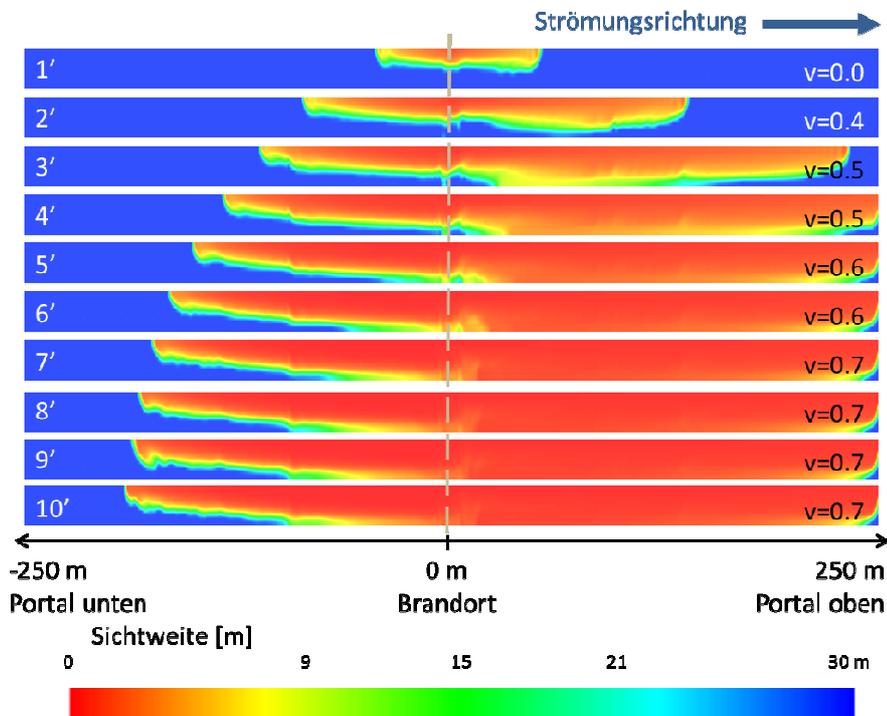


Abb. I.2 Rauchausbreitung bei Rechteckprofil mit 3% Längsneigung, Streifenvorrichtung am unteren Portal, Aktivierung der Vorrichtung bei 2'.

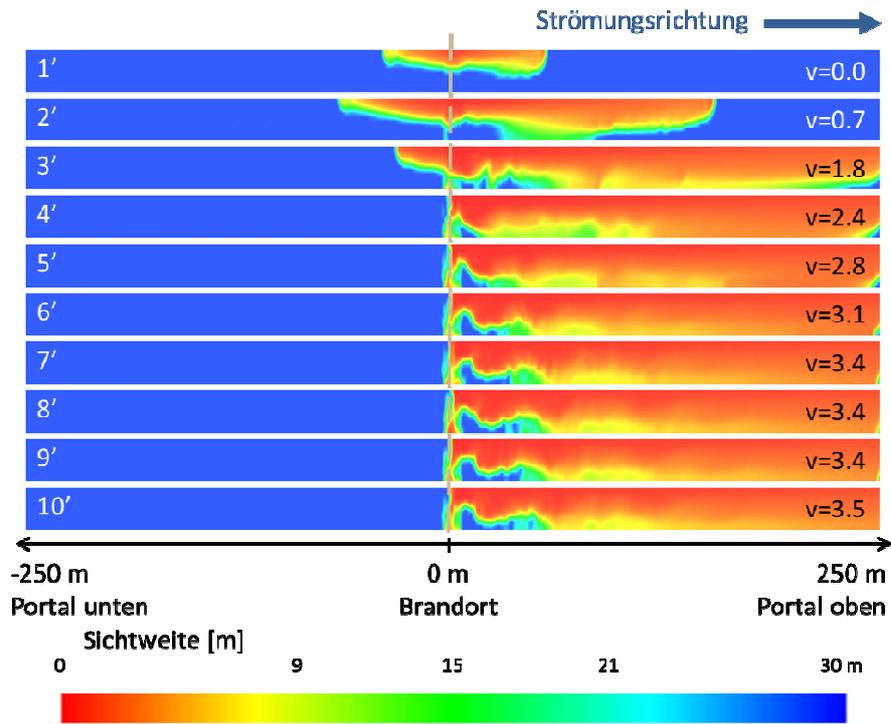


Abb. I.3 Rauchausbreitung bei Rechteckprofil mit 5% Längsneigung.

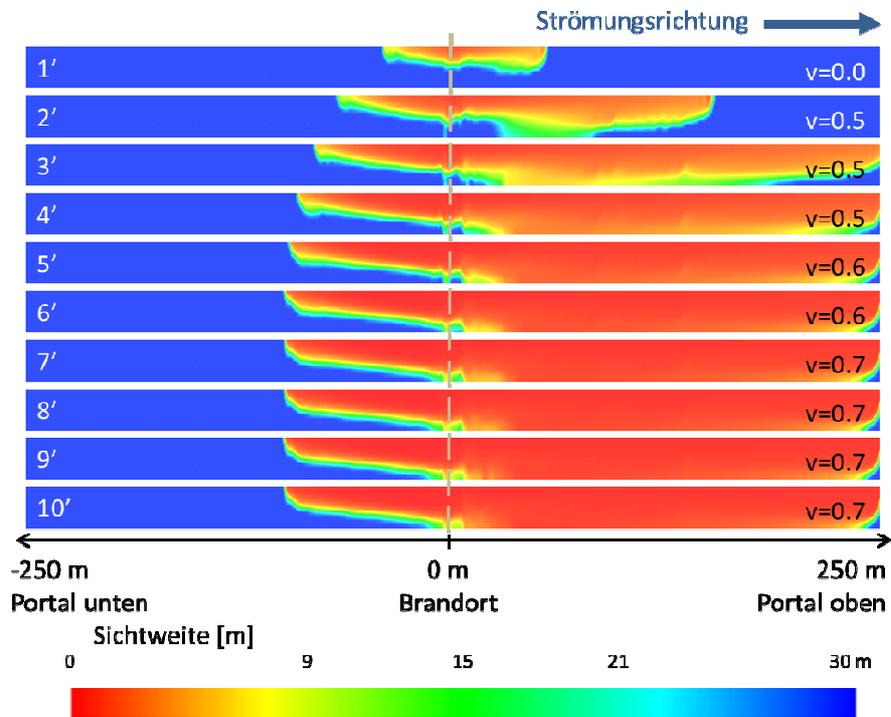


Abb. I.4 Rauchausbreitung bei Rechteckprofil mit 5% Längsneigung, Streifenverrichtung am unteren Portal, Aktivierung der Vorrichtung bei 2'.

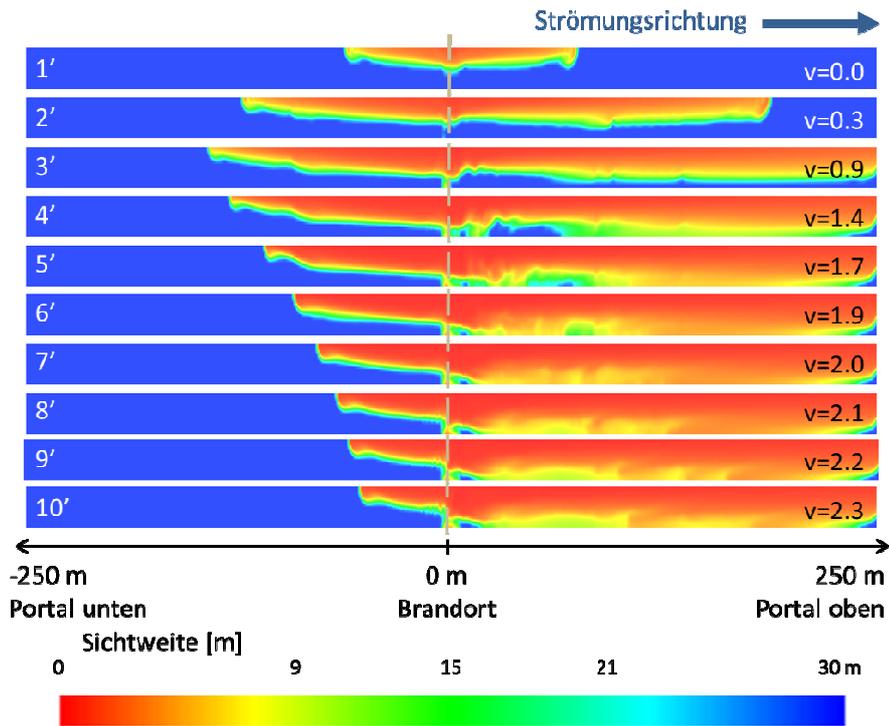


Abb. I.5 Rauchausbreitung bei Hufeisenprofil mit 3% Längsneigung.

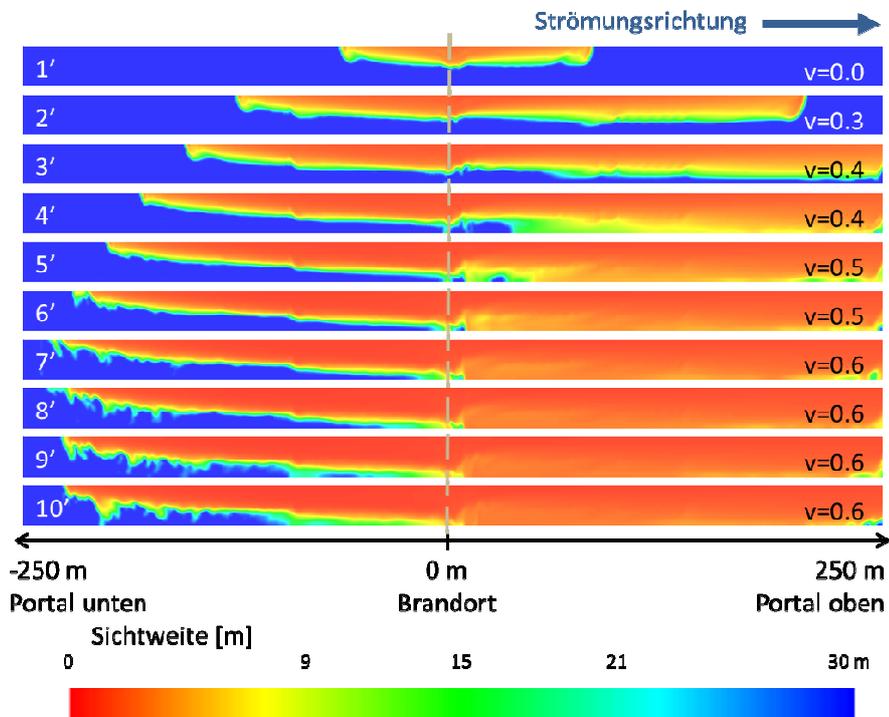


Abb. I.6 Rauchausbreitung bei Hufeisenprofil mit 3% Längsneigung, Streifenvorrichtung am unteren Portal, Aktivierung der Vorrichtung bei 2'.

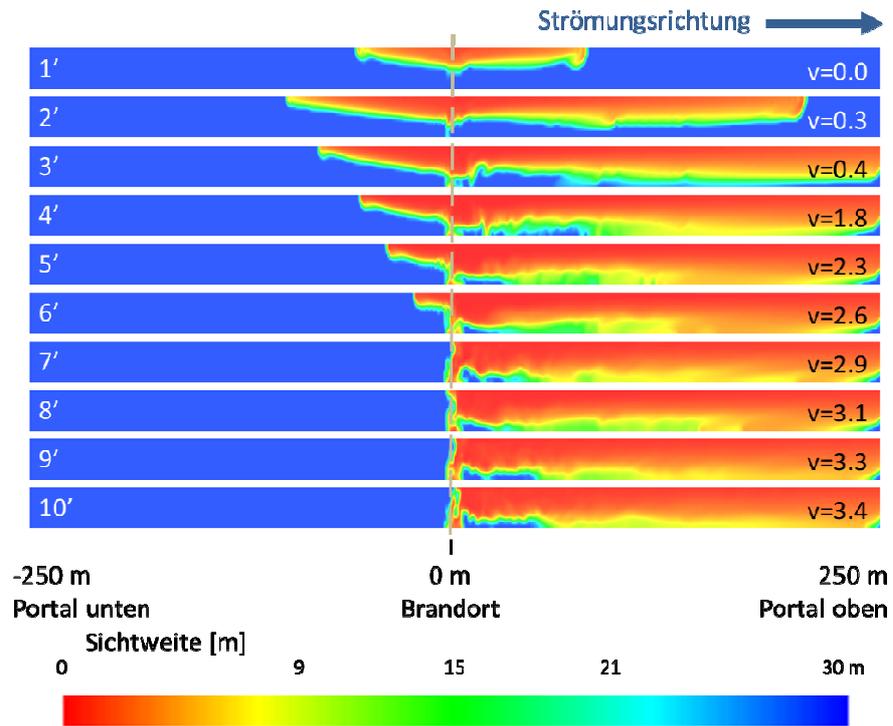


Abb. I.7 Rauchausbreitung bei Hufeisenprofil mit 5% Längsneigung.

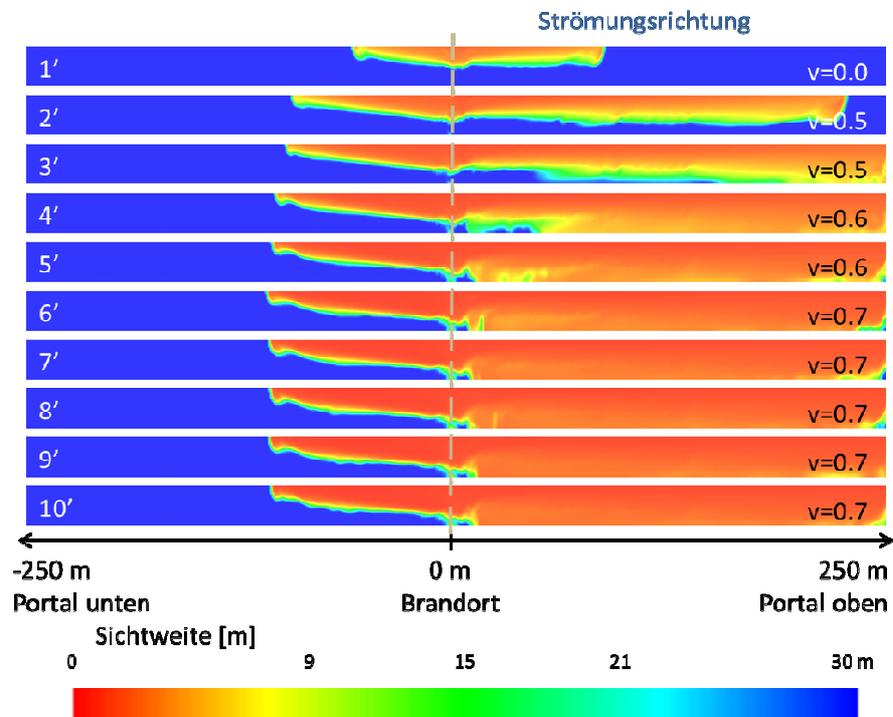


Abb. I.8 Rauchausbreitung bei Hufeisenprofil mit 5% Längsneigung, Streifenvorrichtung am unteren Portal, Aktivierung der Vorrichtung bei 2'.

## I.2 Längsbelüftete Tunnel

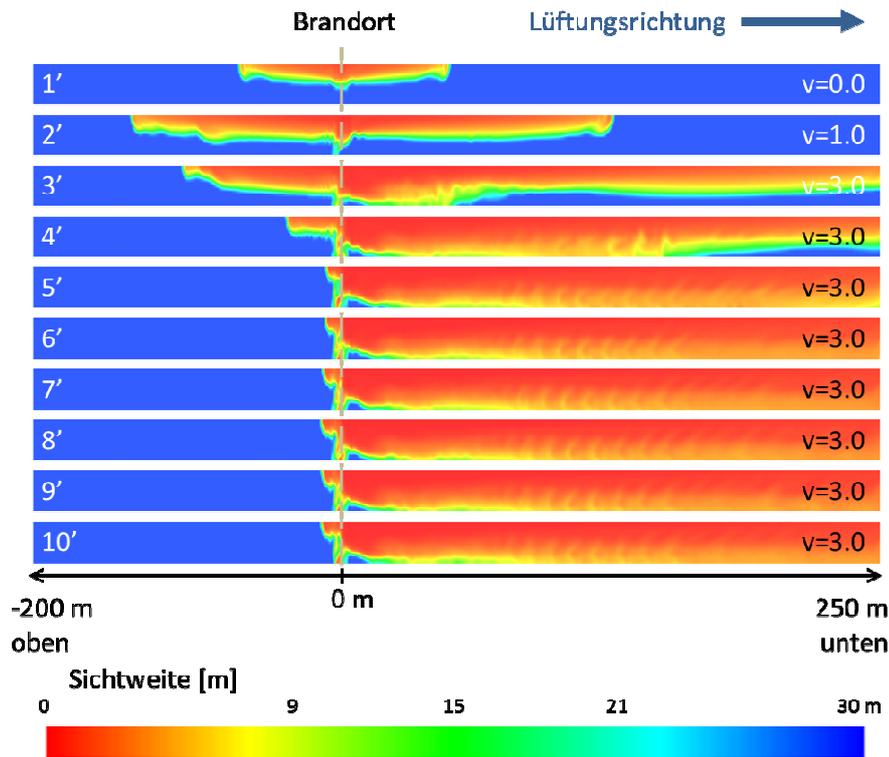


Abb. I.9 Rauchausbreitung bei Hufeisenprofil mit 0% Längsneigung – konventionelle Längslüftung mit 3 m/s.

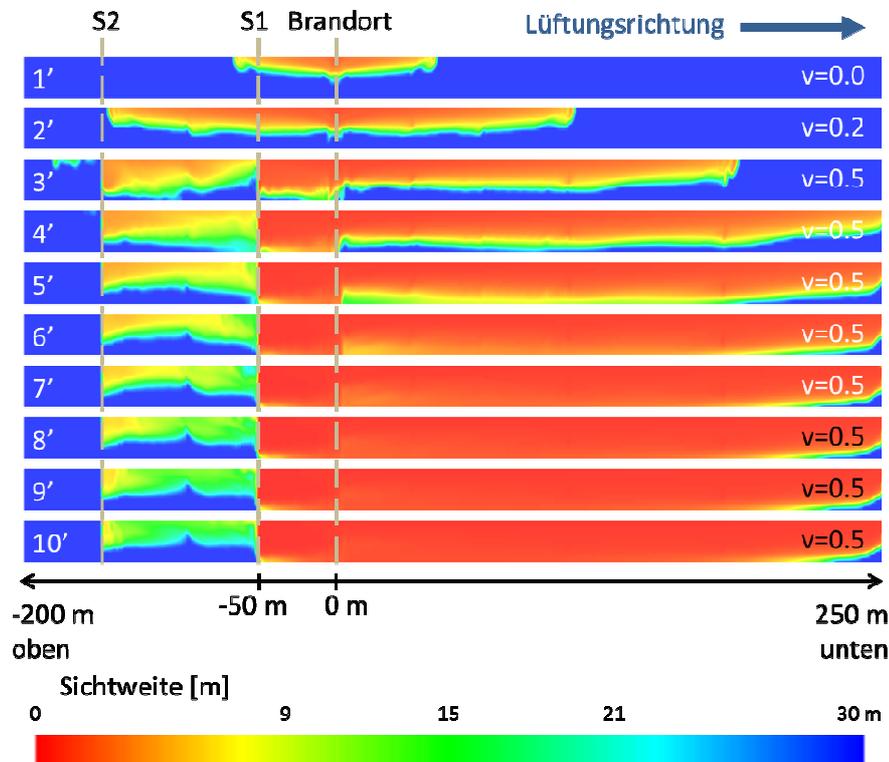


Abb. I.10 Rauchausbreitung bei Hufeisenprofil mit 0% Längsneigung – Längslüftung mit 0.5 m/s und Einsatz von Schürzenvorrichtungen (S1 und S2), Aktivierung der Vorrichtung bei 2'.

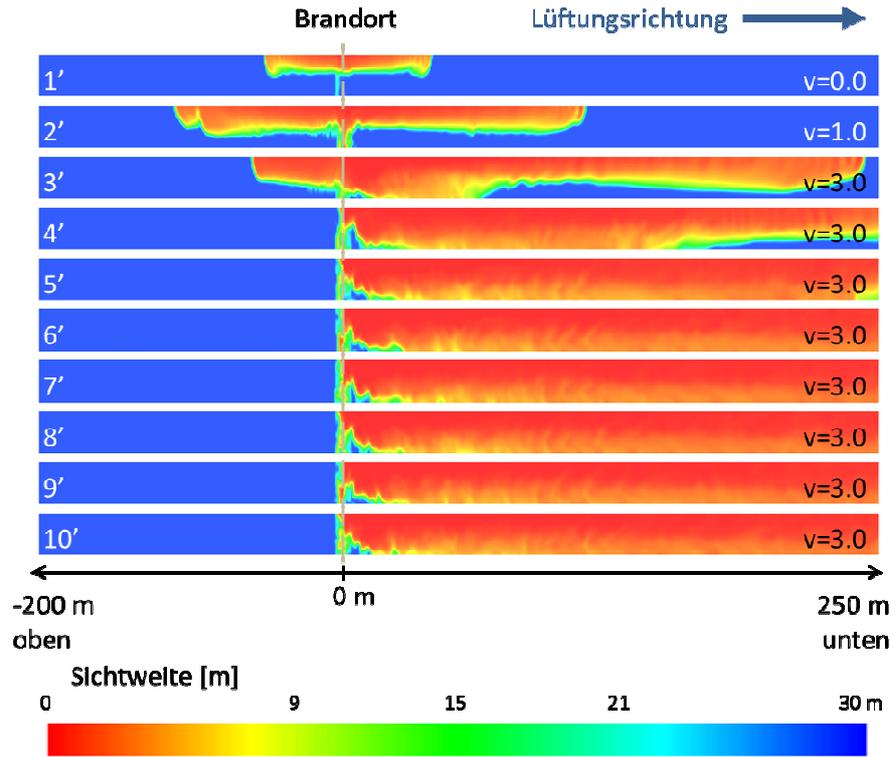


Abb. I.11 Rauchausbreitung bei Rechteckprofil mit 0% Längsneigung – konventionelle Längslüftung mit 3 m/s.

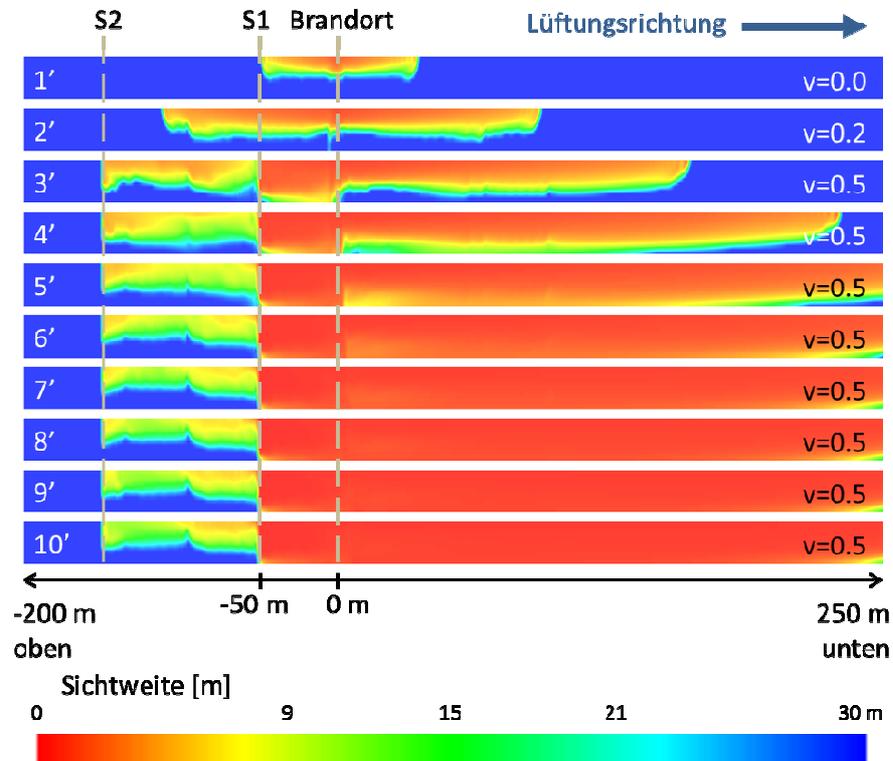


Abb. I.12 Rauchausbreitung bei Rechteckprofil mit 0% Längsneigung – Längslüftung mit 0.5 m/s und Einsatz von Schürzenvorrichtungen (S1 und S2), Aktivierung der Vorrichtung bei 2'.

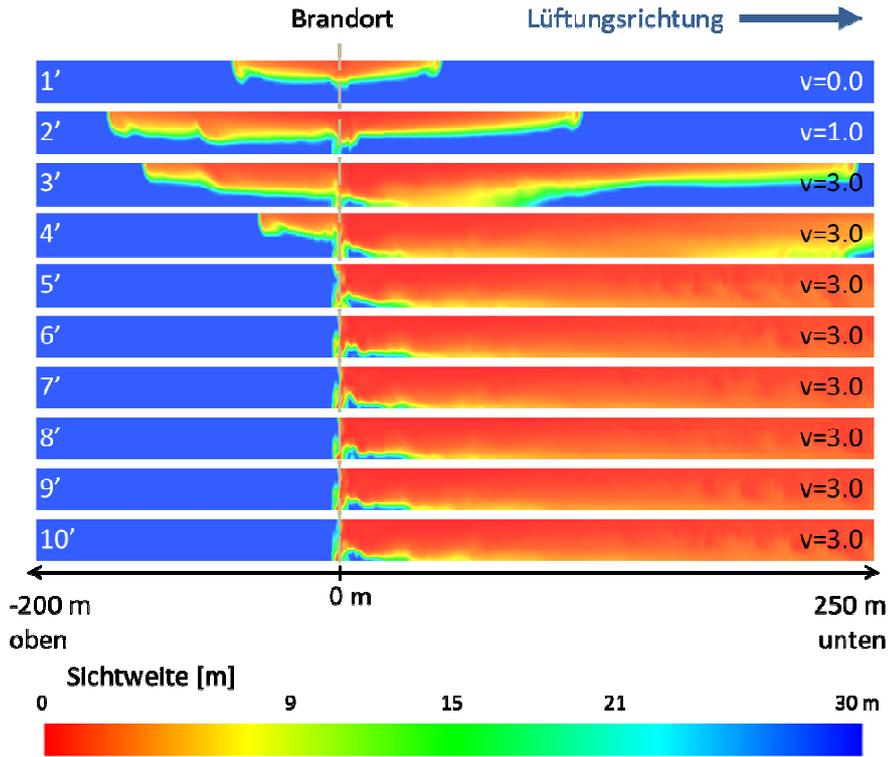


Abb. I.13 Rauchausbreitung bei Hufeisenprofil mit 3% Längsneigung – konventionelle Längslüftung mit 3 m/s.

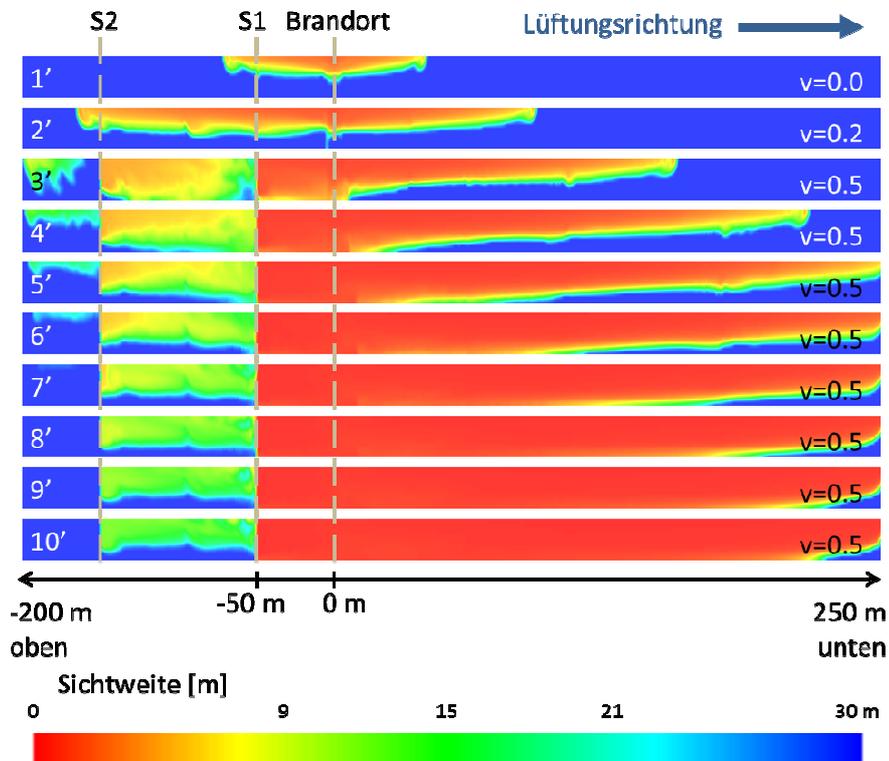


Abb. I.14 Rauchausbreitung bei Hufeisenprofil mit 3% Längsneigung – Längslüftung mit 0.5 m/s und Einsatz von Schürzenvorrichtungen (S1 und S2), Aktivierung der Vorrichtung bei 2'.

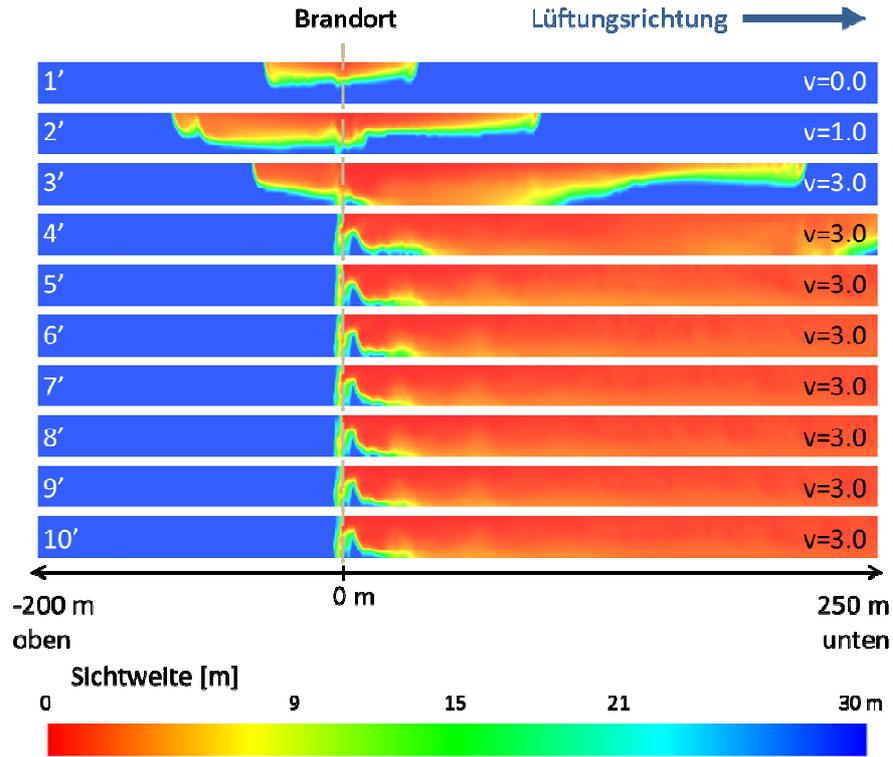


Abb. I.15 Rauchausbreitung bei Rechteckprofil mit 3% Längsneigung – konventionelle Längslüftung mit 3 m/s.

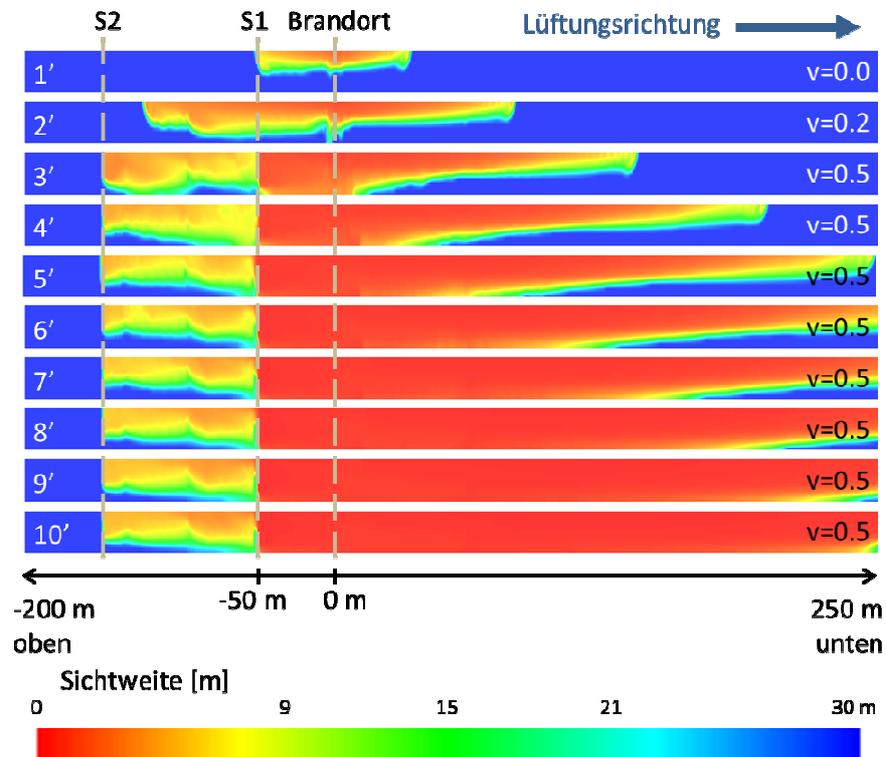


Abb. I.16 Rauchausbreitung bei Rechteckprofil mit 3% Längsneigung – Längslüftung mit 0.5 m/s und Einsatz von Schürzenvorrichtungen (S1 und S2), Aktivierung der Vorrichtung bei 2'.

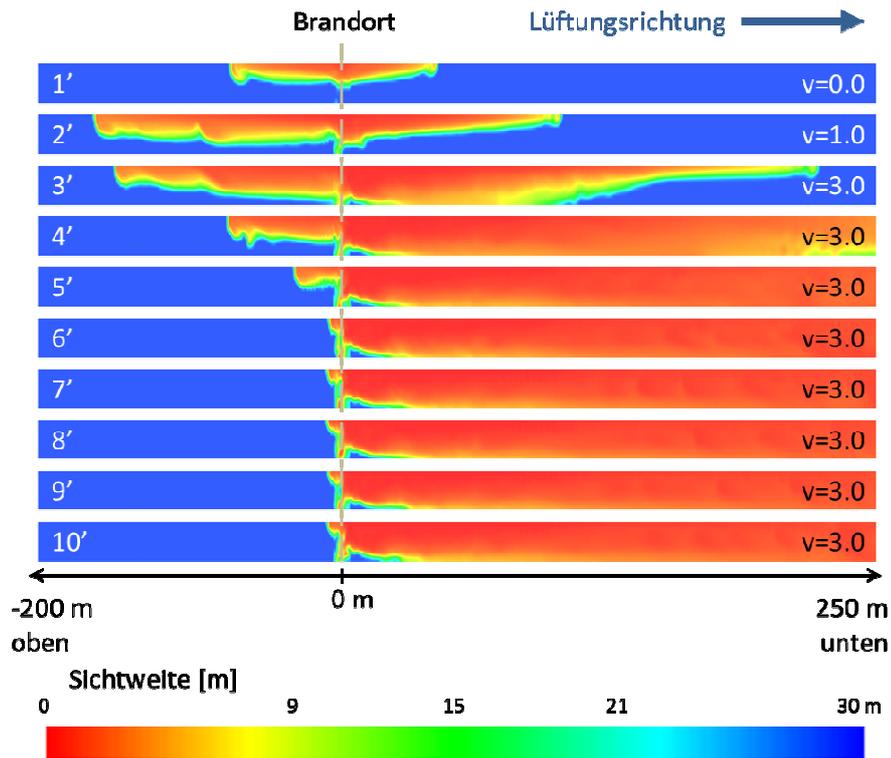


Abb. I.17 Rauchausbreitung bei Hufeisenprofil mit 5% Längsneigung – konventionelle Längslüftung mit 3 m/s.

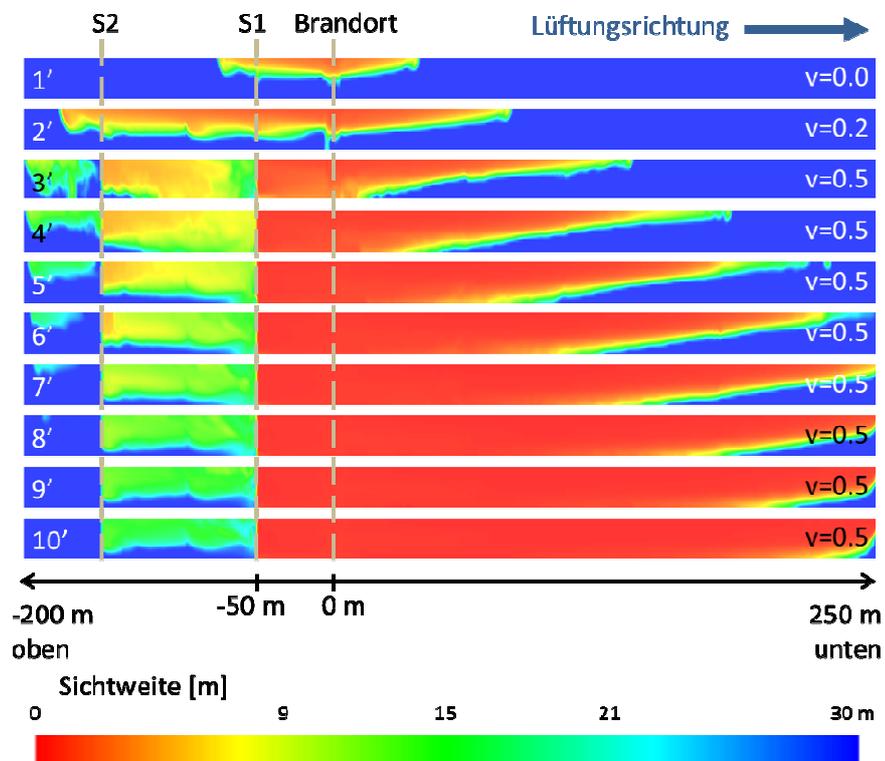


Abb. I.18 Rauchausbreitung bei Hufeisenprofil mit 5% Längsneigung – Längslüftung mit 0.5 m/s und Einsatz von Schürzenvorrichtungen (S1 und S2), Aktivierung der Vorrichtung bei 2'.

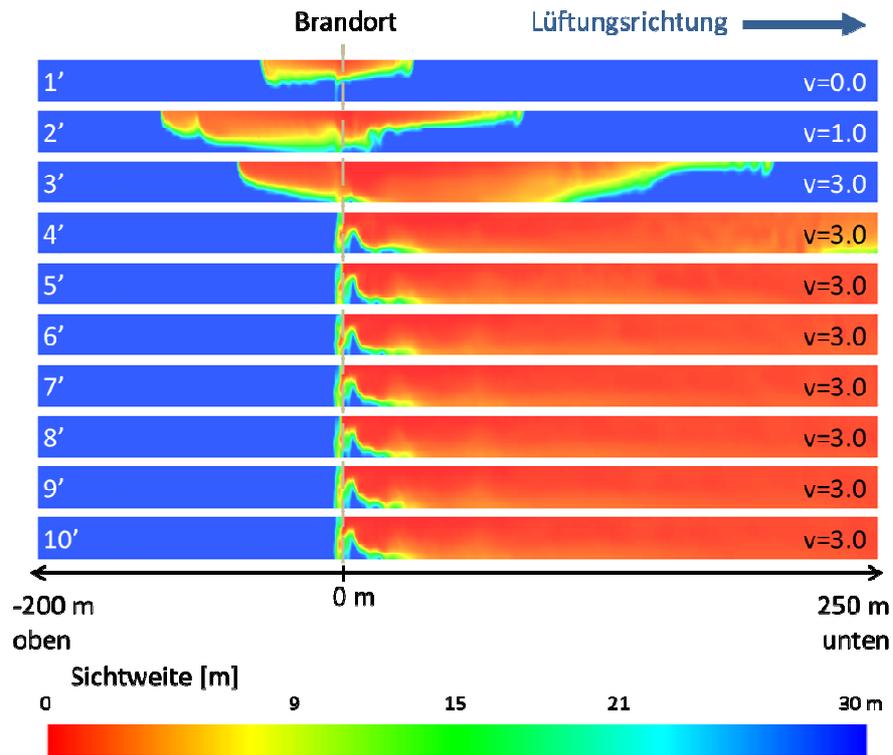


Abb. I.19 Rauchausbreitung bei Rechteckprofil mit 5% Längsneigung – konventionelle Längslüftung mit 3 m/s.

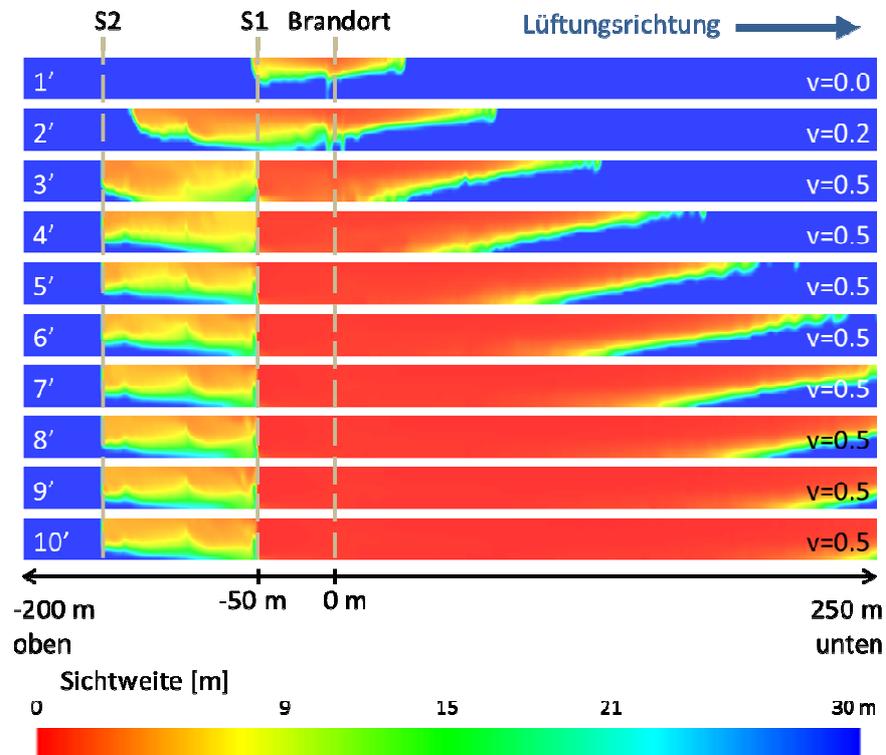


Abb. I.20 Rauchausbreitung bei Rechteckprofil mit 5% Längsneigung – Längslüftung mit 0.5 m/s und Einsatz von Schürzenvorrichtungen (S1 und S2), Aktivierung der Vorrichtung bei 2'.

## Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
1D	Eindimensional
3D	Dreidimensional
AIPCR	Association Internationale Permanente des Congrès de la Route
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BASt	Bundesanstalt für Strassenwesen
BHR ISAVFT	International Symposium on Aerodynamics, Ventilation and Fire in Tunnels
CCTV	Closed Circuit Television – Videoüberwachungsanlagen
CFD	Computational Fluid Dynamics = Numerische Strömungsberechnung
COSUF	Committee on Operational Safety of Underground Facilities
DATEC	Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
DIN	Deutsches Institut für Normung
EI	Bezeichnung für Feuerwiderstand nach EN wobei E für Raumabschluss und I für Wärmedämmung steht
EN	Europäische Norm
FDS	Fire Dynamic Simulator
FIT	Fire in Tunnels – European Thematic Network
FKS	Feuerwehrkoordination Schweiz
GSM	Global System for Mobile Communications
GV	Gegenverkehr
ISTSS	International symposium on Tunnel Safety and Security
ITA	International Tunneling and Underground Space Association
ITC	International Tunnelling Congress
LL	Längslüftung
LN	Längsneigung
LSURF	Large Scale Underground Research Facility – EU Forschungsprogramm
LW	Lastwagen
MSV	Mittlerer stündlicher Verkehr
NFPA	National Fire Protection Association
NL	Natürliche Lüftung
ÖNORM	Österreichische Norm vom Austrian Standards Institute veröffentlicht
PIARC	World Road Association
RA	Rauchabsaugung
RL	Richtlinie
RV1	Richtungsverkehr mit niedrigen Stauwahrscheinlichkeit
RV2	Richtungsverkehr mit hoher Stauwahrscheinlichkeit
SOLIT	Safety of Life in Tunnels
SR	Selbstrettung
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
UPTUN	Cost effective, sustainable and innovative UPgrading Methods for Fire Safety in existing TUNnels – EU Forschungsprojekt
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VKF/AEAI	Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen
Verf	Erforderliche Geschwindigkeit
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute



## Literaturverzeichnis

- 
- [1] Pospisil, Brandt.: Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall, Forschungsauftrag ASTRA 2007/002\_OBF, 2010
- 
- [2] Öttl et al: A new system to reduce the velocity of the air flow in the case of fire, Proceedings of the int. Conf. on Tunnel Safety and Ventilation, Graz, 2002
- 
- [3] Pischinger, Öttl, Sturm: Strömungstechnische Untersuchung textiler Vorhänge im Katschbergtunnel (Tauernautobahn), TU Graz, 2001
- 
- [4] Pischinger, Öttl, Sturm: Strömungstechnische Untersuchung textiler Vorhänge im Gleinalmtunnel (Pyhrnautobahn), TU Graz, 2002
- 
- [5] Kohl et al.: Die Wirkung von mobilen Abschottungs- und Belüftungsmassnahmen bei der Rettung und Brandbekämpfung bei Tunnelbränden – Teil 1, Brandschutzforschung der Bundesländer, Bericht 131, Heyrothsberge, 2003
- 
- [6] Kohl, Kutz, Wienecke: Die Wirkung von mobilen Abschottungs- und Belüftungsmassnahmen bei der Rettung und Brandbekämpfung bei Tunnelbränden – Teil 2, Brandschutzforschung der Bundesländer, Bericht 141, Heyrothsberge, 2005
- 
- [7] Weidmann: Transporttechnik der Fussgänger – Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (Literaturauswertung), Schriftenreihe des IVT Nr. 90, Zürich, 1993
- 
- [8] ASTRA-Richtlinie Lüftung der Strassentunnel, ASTRA 13001, 2008
- 
- [9] SIA Norm 197-2, SN 505 197/2, Projektierung Tunnel – Strassentunnel, 2004
- 
- [10] Christ, Klemenjak, Prantl: Psychologische Evaluierung von Tunnel Safety und Protection (TSP), Kuratorium für Verkehrssicherheit Wien, 2002
- 
- [11] Feuerwehrkoordination Schweiz (FKS): Technische Wegleitung für die Intervention bei Bränden in Straßentunneln, Bern, 2005
- 
- [12] Ackeret, Haerter, Stahel: Die Lüftung der Autotunnel. Bericht der Expertenkommission für Tunnellüftung an das Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau
- 
- [13] PIARC: Fires and Smoke Control in Road Tunnels, 1999
- 
- [14] Bettelini: Managing the longitudinal air velocity in long road tunnels". 13th Int. Symp. "Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels", BHR Group, New Brunswick, New Jersey, USA, 13-15 May 2009
- 
- [15] Bettelini, Seifert: On the Safety of Short Road Tunnels. Paper presented at the 5th International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation' 2010, Graz
- 
- [16] Day: Maximising safety in short road tunnels, TMI, 2005
- 
- [17] Zumsteg, Steinemann: Ventilation of short road tunnels in case of an incident; in International Conference Tunnel Safety and Ventilation, 2006, Graz
- 
- [18] VKF/AEAI: Brandschutznorm, 26.03.2003 / 1-03d (Stand 20.10.2008)
- 
- [19] Bergmeister: UPTUN, Workpackage 6 - Fire effects and tunnel performance: system response (D62). Real Scale Tunnel Fire Tests Virgl/Virgolo tunnel; Bozen/Bolzano, Italy, 2008
- 
- [20] Kennedy, Bayne, Sanchez: Safety Issues in the Design of Inflatable Barriers for the Control of Smoke in the Washington Subway. First Int. Conf. "Safety in Road and rail Tunnels", Basel, 23-25 November 1992
- 
- [21] Buschmann: Arbeitsgemeinschaft Entrauchung, Symposium 2009
- 
- [22] Ploog, Clausen: Katastrophenmedizin - Leitfaden für die ärztliche Versorgung im Katastro-
-

- 
- phenfall; Bundesamt für Zivilschutz (Hrsg.); 4. überarbeitete Auflage, Bonn, 1997
- 
- [23] Mark: Das Fluchtverhalten von Menschen in Extremsituationen; Brandverhütung 1/2001, Seiten 7-10
- 
- [24] Schneider, Oswald, Lebeda: Evakuierung bei Brandereignissen; [www.vbbd.de/filez/Publikationen/Evakuierung\\_040218.pdf](http://www.vbbd.de/filez/Publikationen/Evakuierung_040218.pdf)
- 
- [25] McConnell: An analysis of the recognition and response behaviours of evacuees of WTC 1 on 9/11, Human Behaviour in Fire Symposium, 2009
- 
- [26] Öttl, Sturm, Almbauer, Öttl, Turner, Seitlinger: A new system to reduce the velocity of the air flow in the case of fire, Proceedings of the Int. Conf. On Tunnel Safety and Ventilation, Graz, 8.-10.4.2002, 279-286
- 
- [27] Helbling, Farkas, Vicsek: Simulating Dynamical Features of Escape Panic, Nature 407 – 487, 2000
- 
- [28] Tiefbauamt Graubünden, Info Nr. 73, Sept. 2006
- 
- [29] Fannelop: Fluid Mechanics for Industrial Safety and Environmental Protection, Industrial Safety Series Vol. 3, Elsevier, 1994
- 
- [30] Li, Ingason, „The Fire Growth Rate in a Ventilated Tunnel Fire“, Fire Safety Journal 45 371-384, 2010
- 
- [31] BAST: FE 03.0378/2004/FRB Bewertung der Sicherheit von Strassentunneln, 2007
- 
- [32] Mayer: Brände in Strassentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation, Dissertation, Aachener Mitteilungen Strassenwesen, Erd und Tunnelbau, Heft 47, 2006
- 
- [33] ETH Globe Nr. 2, Juni 2011
- 
- [34] Aigner Tunnel Technology, Referenzblatt FireCurtains (Roppener Tunnel), [http://www.aignertunnel.com/upload/content/Referenzen/aigner2010\\_referenzblatt\\_roppen.pdf](http://www.aignertunnel.com/upload/content/Referenzen/aigner2010_referenzblatt_roppen.pdf)
-

# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 21.12.2012

### Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS2010\_202/OBF

Projekttitel: Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunnel durch flexible Vorrichtungen

Enddatum: 31.12.2012

### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Bei gegebenen Voraussetzungen, kann mittels flexibler Vorrichtung die Selbstrettungsphase in Strassentunneln verlängert werden. Flexible Vorrichtungen können also zu höherer Sicherheit führen. Drei Anwendungsarten flexibler Vorrichtungen haben sich als sinnvoll erwiesen und wurden mittels 3D-CFD Simulationen vertieft untersucht:

#### Streifenvorrichtung für natürlich belüftete Tunnel

Streifenvorrichtungen führen zu einer Reduktion der Längsgeschwindigkeit der Tunnel Luft in natürlich belüfteten Tunnel. Dadurch wird auch die Rauchausbreitung verzögert und die Bedingungen während der Selbstrettungsphase verbessert. Damit Streifenvorrichtungen eine gute Wirkung zeigen, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Tunnel hat eine Längsneigung von über 3%
- Tunnel hat eine Länge von mehr als etwa 500 m
- Vorrichtungen können maximal 2 Minuten nach Brandausbruch aktiviert werden.

Bei Streifenvorrichtungen sind noch gewisse Sicherheitsbedenken vorhanden, weil die Vorrichtung über den gesamten Tunnelquerschnitt ausgebreitet wird und somit als Hindernis wahrgenommen werden kann.

#### Vollschliessende Vorrichtung für natürlich belüftete Tunnel

Wirkung und Einsatz von vollschliessenden Vorrichtungen ist gleich wie bei Streifenvorrichtungen, jedoch ist die Bremswirkung auf Längsströmungen viel stärker. Einsatzgebiet von vollschliessenden Vorrichtungen liegt daher bei Tunnel mit hoher Geschwindigkeit der Längsströmung, wo Streifenvorrichtung nicht mehr effizient zur Reduktion der Längsströmung eingesetzt werden können. Die Voraussetzungen können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Tunnel mit hoher Längsneigung oder / und starkem Portalwind
- Tunnel mit einer Länge von mehr als etwa 500 m
- Vorrichtungen können maximal 2 Minuten nach Brandausbruch aktiviert werden.

Vollschliessende Vorrichtungen können von Fahrzeugen nicht durchfahren werden. Die Sicherheitsbedenken sind darum grösser als bei Streifenvorrichtungen. Zusätzlich ergeben sich Einschränkungen bezüglich Einsatzkonzept der Interventionskräfte.

#### Schürzenvorrichtung in längsbelüfteten Tunnel

Die Schürzenvorrichtungen haben grosses Potential in längsbelüfteten Tunnel mit Gegenverkehr oder mit Richtungsverkehr und hoher Stauwahrscheinlichkeit das Ausmass im Ereignisfall zu senken. Sie unterbinden die Rückströmung des Rauches gegen die Lüftungsrichtung bei sehr tiefer Geschwindigkeit der Tunnel längsströmung. Gegenüber konventioneller Längslüftung kann so die Rauchausbreitung stark verzögert werden, was die Zeit für Selbstrettung erhöht. Folgende Voraussetzungen müssen für einen Einbau erfüllt sein:

- Tunnel mit Längslüftung
- Verkehrsregime „Gegenverkehr“ oder „Richtungsverkehr mit hoher Stauwahrscheinlichkeit“
- Ausfahren der Rauchschürzen maximal 2 Minuten nach Brandausbruch
- Genaue Lokalisation der Brandquelle notwendig
- Schürze muss durchfahrbar konstruiert werden.

Diese Vorrichtung führt grundsätzlich nicht zu Problemen bezüglich Durchfahrt, da die Vorrichtung nahe des Ereignisortes (Abstand < ca. 100 m) aktiviert wird und der Verkehr bis zur Aktivierung (1 – 2 Minuten) der Schürzenvorrichtung aufgrund des Brandes zum Stillstand gekommen ist.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die Untersuchung hat gezeigt, dass der Einsatz flexibler Vorrichtungen in Strassentunneln einen Beitrag zur Steigerung der Sicherheit erbringen kann:

- Es wurde gezeigt, dass durch flexible Vorrichtungen Verringerung von Schadensfolgen infolge Brand in Strassentunnel möglich ist.
- Es wurde die optimale Anwendungsmöglichkeit für spezifische Tunnel identifiziert.
- Die Machbarkeit wurde überprüft.
- Weitere Entwicklungsschritte wurden identifiziert und vorgeschlagen.

Die Projektziele wurden somit erreicht.

Folgerungen und Empfehlungen:

Flexible Vorrichtungen können dazu beitragen, heute ungelöste Sicherheitsprobleme in Strassentunnel zu lösen. Es wird empfohlen, primär die Streifenvorrichtung für kurze, steile, natürlich belüftete Tunnel weiter zu untersuchen:

- Identifikation eines für den Einsatz geeigneten Tunnel
- Erstellen einer Pilotanlage zur Durchführung von Brandtests, um die Wirksamkeit abschliessend zu beurteilen.

Rauchschränke für Tunnel mit Längslüftung zeigen ebenfalls vielversprechende Resultate. Die Erhebung optimaler Einbaukriterien bedürfen experimenteller Untersuchungen (z.B. im Kleinmassstab).

Vollabschlüsse sind, obwohl aerodynamisch wirksam, mit hohen Sicherheitsbedenken verbunden. Diese Vorrichtungsart sollte vorerst nicht weiter verfolgt werden.

Publikationen:

Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch flexible Vorrichtungen, VSS - Bericht 2013

Flexible Devices for Smoke Control in Road Tunnel, Marco Bettelini, Samuel Rigert, Nikolaus Seifert, 6th international Conference on Tunnel Safety and Ventilation, Graz, 2012

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Bettelini

Vorname: Marco

Amt, Firma, Institut: Amberg Engineering AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Die im Antrag formulierten Projektziele wurden erreicht. Es fand ein intensiver Austausch mit der Begleitkommission statt, wobei deren Anregungen in die laufende Forschungsarbeit eingebaut und berücksichtigt wurden. Insgesamt fanden 7 Sitzungen der Begleitkommission statt.

Hervorgehend aus der allgemeinen Untersuchung flexibler Vorrichtungen, wurden drei unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten identifiziert, welche die Zielsetzung, Erhöhung der Sicherheit im Ereignisfall, erreichen.

Die ausgeführten Arbeiten sind im Forschungsbericht sehr gut dokumentiert. Der Kostenrahmen des Projektes wurde eingehalten.

##### Umsetzung:

Eine Umsetzung der Ergebnisse kann aus zwei Gründen nur projektbezogen erfolgen:

- Die Projektgruppe hat eine Besprechung mit Herstellern von flexiblen Vorrichtungen arrangiert, an der auch Mitglieder der BK teilnahmen. Bei den Herstellern ist das Know-How vorhanden, um flexible Vorrichtungen für den Tunnel zu entwickeln. Solche Entwicklungsarbeiten werden natürlich nur verfolgt, wenn die Aussicht auf Wirtschaftlichkeit besteht (minimale Anzahl Realisierungen, Festhalten in Normen).

- Die Erkenntnisse der Arbeit stützten sich zu einem grossen Teil auf CFD-Simulationen. Diese Simulationen sind grundsätzlich sehr zuverlässig, sollten aber komplettiert werden mit wenigen Validierungstests im Grossmassstab.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

Weitere Forschungsbedarf besteht in der Validierung der CFD-Resultate durch Versuche an echten Tunneln oder im Modellanlagen.

Ein weiteres Forschungsthema betrifft das menschliche Verhalten, bzw. Verhalten der Tunnelnutzer beim antreffen einer ausgefahrenen flexiblen Vorrichtung im Tunnel.

##### Einfluss auf Normenwerk:

Aus der Forschungsarbeit kann kein Einfluss auf das Normenwerk abgeleitet werden.

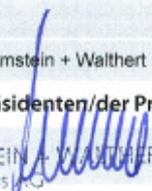
#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Weite

Vorname: Urs

Amt, Firma, Institut: Amstein + Walthert

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

  
AMSTEIN + WALTHERT  
Progress AG  
Andreassstrasse 11  
8050 ZÜRICH

## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

### Forschungsberichte seit 2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an ? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen <i>Transports de l'avenir ?</i> <i>Moteurs et carburants pour la mobilité de demain</i> <i>What drives us on ?</i> <i>Drives and fuels for the mobility of tomorrow</i>	2011
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärm mindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im labormasstab <i>Désenrobage des enrobés peu bruyants des couches de roulement sous sollicitation de roulement en la- boratoire</i> <i>Stripping of Low Noise Surface Courses during Labo- ratory Scaled Wheel Tracking</i>	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors <i>SPIN-ALP: Abschätzung des Potentials des Intermo- dalen Verkehrs auf Alpenkorridoren</i> <i>SPIN-ALP: Estimation du potentiel du transport in- termodal sur les axes transalpins</i>	2010
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts- Stras- senabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten <i>Fonctions de résistance pour des tronçons routiers urbains en dehors de la zone d'influence de carre- fours</i> <i>Capacity restraint functions for urban road sections not affected by intersection delays</i>	2010

1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-Vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes. <i>Die charakteristischen Indikatoren einer Velostadt. Evaluationsmethode der Velopolitiken anhand von 8 Indikatorgruppen für kleine und mittlere Gemeinden</i> <i>Characteristic indices of a Bike City. Method of evaluation of cycling policies in 8 indices for small and medium-sized communes</i>	2010
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology <i>Temps de parcours en réseau urbain</i> <i>Methodologie für Fahrzeitbewertung in städtischen Strassennetz</i>	2011
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit <i>Modèles d'impact d'équipements de véhicules pour améliorer la sécurité routière</i> <i>Modelling of the impact of in-vehicle equipment for the enhancement of traffic safety</i>	2009
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground <i>Entscheidungsgrundlagen und Hilfsmittel für die Planung von TBM-Vortrieben in druckhaftem Gebirge</i> <i>Critères de décision et outils pour la planification de l'avancement au tunnelier dans des conditions de roches pousantes</i>	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr <i>Basic technologies for detecting intermodal traveling passengers</i> <i>Les technologies de base pour l'enregistrement automatique des usagers de moyens de transports</i>	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr <i>L'agressivité au volant</i> <i>Aggressive Driving</i>	2011

1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS" <i>Projet initial pour le paquet de recherche "Augmentation de l'utilité pour les usagers du système d'information de la route"</i> <i>Initial project for the research package "Increasing benefits for the users of the road and transport information system"</i>	2011
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen <i>Application areas of various means of transportation in agglomerations</i> <i>Domaine d'application de different moyen de transport dans les agglomérations</i>	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren <i>Investigations of the ice-wall grow and frost heave in artificial ground freezing</i> <i>Recherches sur la formation corps gelés et du soulèvement au gel pendant la procédure de congélation</i>	2010
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges <i>Qualitätsprüfung und Überwachung elektrisch isolierter Spannglieder in Brücken</i> <i>Contrôle de la qualité et surveillance des câbles de précontrainte isolés électriquement dans les ponts</i>	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene <i>Sécurité en cas de tracés rail-route parallèles ou rapprochés</i> <i>Safety measures to manage risk of roads meeting or running close to railways</i>	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen <i>On-site runoff experiments on roads</i> <i>Essai d'écoulements pour l'évacuation des eaux des autoroutes</i>	2011

1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik <i>IT-Security pour la télématique des transports</i> <i>IT-Security for Transport and Telematics</i>	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen) <i>Passage pour piétons (les bases)</i> <i>Pedestrian crossing (basics)</i>	2011
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung <i>Quantification of the leakages into exhaust ducts in road tunnels with concentrated exhaust systems</i> <i>Quantification des fuites des canaux d'extraction dans des tunnels routiers à extraction concentrée de fumée</i>	2010
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels <i>Entwicklung einer besten Praxis-Methode zur Risikomodellierung für Strassentunnelanlagen</i> <i>Développement d'une méthode de meilleures pratiques pour l'analyse des risques dans les tunnels routiers</i>	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhand D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis <i>Essai de résistance aux sulfates selon la norme SIA 262/1, Annexe D: Applicabilité et importance pour la pratique</i> <i>Testing sulfate resistance of concrete according to SIA 262/1, appendix D: applicability and relevance for use in practice</i>	2011
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen <i>Coopération dans les gares et arrêts</i> <i>Coopération at railway stations and stops</i>	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs <i>Activity oriented analysis of induced travel demand</i> <i>Analyse orientée aux activités du trafic induit</i>	2012

1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung Approches innovantes de la gestion du stationnement Innovative approaches to parking management	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer? Driver Inattention and Distraction as Cause of Accident: How do Drivers Behave in Cars? L'inattention et la distraction: comment se comportent les gens au volant?	2012