

Marco Bettelini, Dr. sc. techn., Dipl. Masch.-Ing. ETH/SIA, Amberg Engineering, Regensdorf-Watt/CH
Samuel Rigert, Dipl. Masch.-Ing. ETH, Amberg Engineering, Regensdorf-Watt/CH

Ereignislüftung Strassentunnel

Eine Schlüsselkomponente in der Sicherheitskette

Ereignislüftungen spielen eine zentrale Rolle für die Sicherheit von Strassentunneln, indem sie im Brandfall die Selbstrettung und die Intervention mittels geeigneter Kontrolle der Rauchausbreitung ermöglichen. Eine optimale Einbettung der Lüftung in das Gesamtsystem, sowohl in der Planungs- als auch in der Betriebsphase, garantiert die optimale Funktionalität und Sicherheit des Bauwerks.

Emergency Ventilation in Road Tunnels

A Key Component in the Safety Chain

Ventilation in case of an incident is vital for the safety of road tunnels. In case of fire, the ventilation system enables self-rescue and intervention by emergency services through appropriate control of smoke propagation. Optimal integration of the ventilation into the overall system, both in the design phase and the construction phase, guarantees optimal functionality and safety of the tunnel.

1 Einleitung

Unterirdische Verkehrsanlagen sind einem breiten Spektrum von Risiken und Ereignisszenarien ausgesetzt, welche vom Verkehrsunfall bis hin zur Freisetzung von Gefahrgut reichen können. Massgebend für die Sicherheit eines Strassentunnels sind in der Regel Tunnelbrände. Grosse Rauchmengen können schon bei moderaten Brandstärken, wie zum Beispiel beim Brand eines Busses oder eines Lieferwagens, in sehr kurzer Zeit freigesetzt werden. Die Rauchausbreitung kann extrem zügig sein, eine grosse Anzahl von Verkehrsteilnehmern auf einmal gefährden und die Intervention weitgehend verunmöglichen.

In diesem Beitrag werden grundlegende Aspekte der Ereignislüftung behandelt, mit besonderem Blick auf Generalisten und Spezialisten aus anderen Fachrichtungen, die mehr an Grundlagen und Schnittstellen als an technischen Einzelheiten interessiert sind.

2 Die Ereignislüftung als Schlüsselkomponente der Sicherheitskette

Die grösste Gefährdung im Brandfall ergibt sich in den ersten Minuten nach dem Brandausbruch. Mehrere Personen befinden sich im Tunnel und müssen sich in Sicherheit begeben. Die Tunnelbenützer sind in dieser Phase auf sich selbst gestellt und müssen gute Bedingungen antreffen, um zu einem Notausgang oder ins Freie zu gelangen. Die Einsatzkräfte treffen erst nach 10 bis 20 Minuten oder später am Ereignisort ein.

1 Introduction

Underground transport infrastructures are exposed to a wide range of risks and incident scenarios, which can range from traffic accidents to the release of dangerous goods. The decisive incident for the safety of road tunnels is normally fire in the tunnel. Large quantities of smoke can be released in a short time, even from moderate fires such as a burning bus or van. Smoke propagation can be extremely rapid, which can endanger a large number of road users at once and make any intervention impossible.

This paper deals with basic aspects of ventilation in case of incidents, with a special view to the interests of generalists and specialists from other disciplines, who are more interested in basics and interfaces than technical details.

2 Incident Ventilation as a Key Component in the Safety Chain

The greatest threat in case of fire occurs in the first minutes after a fire breaks out. A considerable number of persons could be in the tunnel and have to get themselves to a point of safety. The tunnel users are on their own during this phase and have to encounter good conditions in order to reach an emergency exit or the open air. Emergency services will only arrive at the scene of the incident after 10 to 20 minutes or later. Combustion gases can affect people in the tunnel in the most varied ways. They are irritating (impairment of sight or breathing) and can very quickly lead to dramatic loss of visibility in the tunnel. Further dangers come from the high temperatures and the enormous heat radiation. Reports of experience with fires in road tun-

La ventilation des tunnels routiers en cas de sinistre

Une composante clé dans la chaîne de sécurité

Le large éventail des systèmes de ventilation permet de trouver des solutions sur mesure pour chaque ouvrage, ainsi que pour toutes les conditions d'exploitation et tous les types d'évènements. Seule une optimisation de la commande de la ventilation en fonction de la situation permet d'exploiter tout le potentiel de l'installation. Les simulations numériques y contribuent de manière significative et permettent d'obtenir un haut niveau de flexibilité et de fonctionnalité dans les ventilations en cas de sinistre. Pour l'exploitation du système et la maîtrise des sinistres, le poste de contrôle central du tunnel et les services d'urgence doivent disposer de solides connaissances du système de ventilation.

Ventilazione delle gallerie stradali in situazioni normali e di emergenza

Una componente essenziale del sistema di sicurezza

Una grande varietà di differenti sistemi di ventilazione rende possibili soluzioni adeguate a ogni tipo di opera, di condizioni di esercizio e di situazione. Il completo potenziale dell'impianto di ventilazione può venire sfruttato solamente tramite un'ottimizzazione del controllo della ventilazione, in funzione delle condizioni specifiche. Le simulazioni numeriche forniscono contributi particolarmente significativi e danno la possibilità di raggiungere un'elevata flessibilità e funzionalità della ventilazione. Per l'esercizio e la gestione degli eventi, il posto di comando e le forze di soccorso della galleria devono disporre di solide conoscenze del sistema di ventilazione.

Brandgase können die Personen im Tunnel auf unterschiedlichste Arten beeinträchtigen. Sie sind reizend (Beeinträchtigung der Sicht und der Atmung), häufig giftig und können sehr schnell zu einem dramatischen Verlust der Sichtweite im Tunnel führen. Weitere Gefährdungen resultieren aus den hohen Temperaturen und durch die enorme Wärmestrahlung. Erfahrungsberichte aus Brandereignissen in Strassentunneln zeigen, dass der Schlüsselfaktor für eine erfolgreiche Selbstrettung immer die Aufrechterhaltung ausreichender Sichtverhältnisse ist. Unzureichende Sicht führt zu Orientierungslosigkeit und Panik. Die flüchtenden Personen können die Notausgänge nicht mehr erreichen.

Rauch gefährdet die Intervention in wesentlich reduzierter Schärfe, weil die Einsatzkräfte entsprechend ausgerüstet und vorbereitet sind. Eine angemessene Rauchkontrolle ist dennoch ein entscheidender Erfolgsfaktor für die Intervention.

Verkehrsinfrastrukturen spielen aus sozialer und wirtschaftlicher Sicht eine sehr wichtige Rolle und müssen eine hohe Verfügbarkeit aufweisen. Die Sperrdauer nach einem Brandereignis muss so kurz wie möglich gehalten werden. Die Ereignislüftung kann häufig einen wesentlichen Beitrag leisten, um die Rauchausbreitung einzudämmen und somit Schäden an der Infrastruktur zu beschränken.

Die Aufgaben der Ereignislüftung in Strassentunneln können somit folgendermassen priorisiert werden:

1. Personenschutz, insbesondere während der Selbstrettungsphase;
2. Schaffung geeigneter Bedingungen für die Intervention;
3. Schutz der Infrastruktur.

nels show that the key factor to permit self-rescue is always the preservation of adequate visibility. Insufficient visibility leads to disorientation and panic. The escaping people are no longer able to reach the emergency exits. Smoke is much less dangerous for emergency service interventions since the personnel are appropriately equipped and prepared. Appropriate control of smoke is however still a decisive factor for the success of their intervention.

Transport infrastructures are very important from the social and economic points of view and have to show high availability. The duration of closure after a fire incident must be kept as short as possible. Incident ventilation can often make a significant contribution to confining smoke propagation and thus limiting damage to the infrastructure.

The tasks of incident ventilation in road tunnels can thus be prioritised as follows:

1. Protection of tunnel users, particularly during the self-rescue phase;
2. Creation of suitable conditions for intervention;
3. Protection of the infrastructure.

3 Different Ventilation Systems for Various Requirements

3.1 Selection and Design of the Road Space Ventilation

The selection of a ventilation system and the layout of the ventilation components in road tunnels are determined today almost completely by safety requirements derived from the case of fire. Different ventilation systems can influence smoke propagation in a tunnel in various ways and to various degrees. Further requirements, such as air quality in normal operation and maintenance, are normally of much less significance.

3 Unterschiedliche Lüftungen für verschiedene Anforderungen

3.1 Wahl und Gestaltung der Fahrraumlüftung

Die Wahl des Lüftungssystems und die Auslegung der Lüftungskomponenten für Strassentunnel sind heute fast ausschliesslich durch sicherheitstechnische Anforderungen bestimmt, die aus dem Brandfall resultieren. Mit unterschiedlichen Lüftungssystemen kann die Rauchausbreitung in einem Tunnel auf verschiedene Arten und zu unterschiedlichen Graden beeinflusst werden. Weitere Anforderungen, die zur Einhaltung der Luftqualität im Normalbetrieb und Unterhalt dienen, spielen meist eine stark untergeordnete Rolle.

Es lassen sich vier grundlegende Arten von Lüftungssystemen unterscheiden:

- Natürliche Lüftung,
- Mechanische Längslüftung mit Strahlventilatoren,
- Lüftungssysteme mit Rauchabsaugung,
- Querlüftung mit Rauchabsaugung und Frischluftzufuhr.

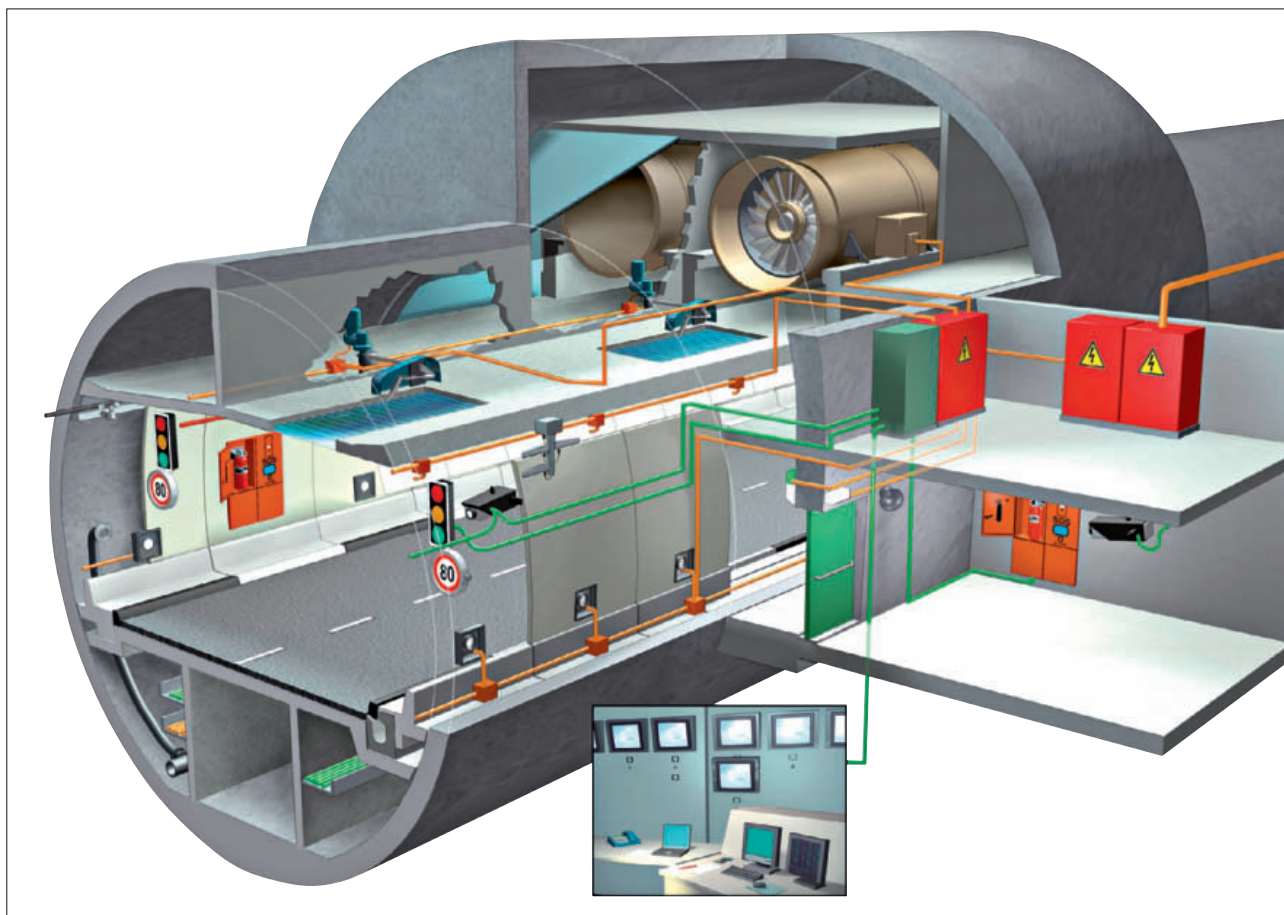
Neben den einfachen Grundformen können viele unterschiedliche Mischformen eingesetzt werden, insbesondere bei Sanierungen von bestehenden Tunneln, bei denen die Wünsche des Lüftungsingenieurs sich nicht immer vollständig realisieren lassen.

Four basic types of ventilation system can be differentiated:

- Natural ventilation,
- Mechanical longitudinal ventilation with jet fans,
- Ventilation systems with smoke extraction,
- Transverse ventilation with smoke extraction and fresh air supply.

In addition to the simple basic forms, many different mixed forms can be used, particularly for the refurbishment of existing tunnels, where the intentions of the ventilation engineer cannot always be fully achieved.

The selection of a ventilation system will be influenced by the tunnel properties (particularly the tunnel length and gradient), traffic management and traffic volume. Natural ventilation is only suitable for very short tunnels. In longer tunnels, the control of the longitudinal air velocity with jet fans is normally sufficient, and from 1 to 5 km length, depending on the tunnel properties, smoke extraction is normally necessary. Fresh air supply is usually required today from a tunnel length of about 10 km. Complex ventilation systems with smoke extraction (Fig. 1) and possibly with fresh air supply are very elaborate and expensive for constructional and equipment reasons. The implementation of ventilation ducts and ventilation stations requires significant



1 Komplexes Lüftungssystem mit Rauchabsaugung
Complex ventilation system with smoke extraction

Quelle/credit: Dätwyler Cabling Solutions AG/www.cabling.datwyler.com

Die Wahl des Lüftungssystems richtet sich an die Tunnelleigenschaften (insbesondere Tunnellänge und Längsneigung), an die Verkehrsführung und an das Verkehrsaufkommen. Natürliche Lüftungen eignen sich nur für sehr kurze Tunnel. Bei längeren Tunneln reicht eine Kontrolle der Längsgeschwindigkeit mit Strahlventilatoren, und ab 1 bis 5 km, je nach Tunnelleigenschaften, ist in der Regel eine Rauchabsaugung erforderlich. Eine Frischluftzufuhr ist heutzutage erst ab einer Tunnellänge von über 10 km notwendig. Komplexe Lüftungssysteme mit Rauchabsaugung (Bild 1) und möglicherweise Frischluftversorgung sind aus baulicher und ausrüstungstechnischer Sicht sehr aufwendig und kostenintensiv. Die Realisierung von Lüftungskanälen und Lüftungszentralen erfordert bedeutende Zusatzinvestitionen und optimale Koordination zwischen dem Bau- und dem Lüftungsingenieur.

3.2 Normative Vorgaben zur Wahl des Lüftungssystems

Die Vorgaben zur Wahl des Lüftungssystems variieren sehr stark von Land zu Land. Sogar innerhalb der EU konnte diesbezüglich keine Einigung erzielt werden, und die Europäische Richtlinie 2004/54/EG [2] überlässt den Mitgliedstaaten die Wahl des Lüftungssystems. Die in der Schweiz geltenden Vorgaben (ASTRA-Richtlinie 13001) [1] sind im Bild 2 veranschaulicht.

3.3 Risiko-orientierte Ansätze zur Wahl des Lüftungssystems

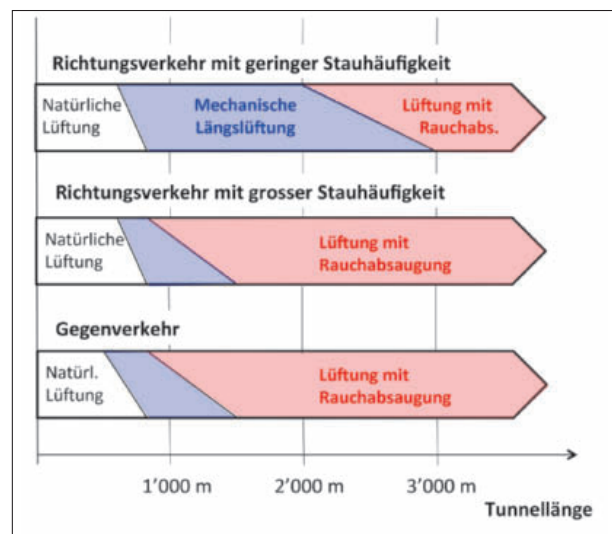
Neben rein normativen Vorgaben zur sicherheitstechnischen Ausstattung von Strassentunneln wurden in allen europäischen Ländern Vorgaben für die Analyse, Quantifizierung und Bewertung der Risiken in einem Strassentunnel festgelegt. Dies sind in der Schweiz die Richtlinie 19004 des Bundesamts für Strassen (ASTRA) und die ASTRA-Dokumentation 89005. Sie bilden eine mögliche Grundlage für die Risiko-orientierte Wahl und Auslegung der Ereignislüftung.

Risiko-orientierte Ansätze berücksichtigen alle relevanten Eigenschaften eines Bauwerks und seiner Nutzung und legen objektive Kriterien (zum Beispiel die Kostenwirksamkeit der Massnahmen) zur Festlegung der Anforderungen an die Tunnelausstattung vor. Die Mitberücksichtigung solcher Aspekte liefert einen entscheidenden Beitrag zur Erhöhung der Tunnelsicherheit und auch zur Verbesserung von Tunnellüftungen.

4 Lüftungsstrategie und Lüftungssteuerung

4.1 Längslüftung

Bei Längslüftungen ist nur eine indirekte und in der Regel unvollständige Kontrolle der Rauchausbreitung möglich. Es kann also nur auf einer Seite vom Brandort (zwischen Einfahrtportal und Brandort oder zwischen Brandort und Ausfahrtportal) verhindert werden, dass sich Rauch ausbreitet. Dies hat, abhängig von der Verkehrssituation, weitreichende Konsequenzen. Zur Erläuterung ist die Klärung einiger Begriffe erforderlich:



Quelle/credit: Marco Bettelini, Samuel Rigert

2 Wahl des Lüftungssystems nach ASTRA 13001

Selection of a ventilation system according to ASTRA 13001

additional investment and optimal coordination between the civil and ventilation engineer.

3.2 Requirements of Standards for the Selection of a Ventilation System

The requirements for the selection of a ventilation system vary widely from country to country. Even inside the EU, no agreement has been achieved and the European directive 2004/54/EC [2] leaves the selection of ventilation systems to each country. The valid regulations in Switzerland (ASTRA Guideline 13001) [1] are shown in Fig. 2.

3.3 Risk-oriented Approaches to the Selection of a Ventilation System

In addition to the requirements resulting from standards for the safety-related equipment of road tunnels, requirements have also been specified in many countries for the analysis, quantification and assessment of the risks in a road tunnel. In Switzerland, this is Guideline 19004 of the Swiss Federal Roads Office (ASTRA/FEDRO) and the ASTRA document 89005. These provide a possible basis for the risk-oriented selection and design of the incident ventilation.

Risk-oriented approaches consider all the relevant properties of the tunnel and its use and lay down objective criteria (for example the cost-effectiveness of the measures) for the specification of requirements for the tunnel equipment. The inclusion of consideration of such aspects provides a decisive contribution to improving tunnel safety and also to the improvement of the tunnel ventilation.

4 Ventilation Strategy and Ventilation Control

4.1 Longitudinal Ventilation

Longitudinal ventilation only permits indirect and normally incomplete control of smoke propagation. The propagation of smoke can only be prevented on one side of the fire loca-

Ereignislüftung Strassentunnel • Eine Schlüsselkomponente in der Sicherheitskette

- Die kritische Geschwindigkeit ist die kleinste Längsgeschwindigkeit der Luft in einem Tunnel, bei welcher sich Rauch nicht entgegen der Strömungsrichtung ausbreiten kann («Backlayering»).
- Mit Rauchschichtung wird die Ausbreitung des Rauchs im Deckenbereich des Tunnels bezeichnet, bei der im unteren Tunnelbereich noch günstige Bedingungen für die Selbstrettung herrschen (Luftqualität, Temperatur und Sichtweite). Rauchschichtung ist ein sehr empfindliches Phänomen und basiert darauf, dass heisse Rauchgase üblicherweise zum Aufsteigen tendieren. Kleinste Störungen können jedoch zu einer Durchmischung von Luft und Rauch, also zu vollständigem Schichtungsverlust, führen.

Rauchschichtung ist für die Selbstrettung und für die Rettung entscheidend. Wird eine Längslüftung mit kritischer Geschwindigkeit betrieben (typischerweise etwa 3 m/s), erfolgt ein teilweiser oder vollständiger Schichtungsverlust, der verheerende Konsequenzen haben kann. Die Haupt-Lüftungsstrategien bei mechanischen Längslüftungen sind insbesondere von der Verkehrsführung und von der Verkehrssituation abhängig (Bild 3):

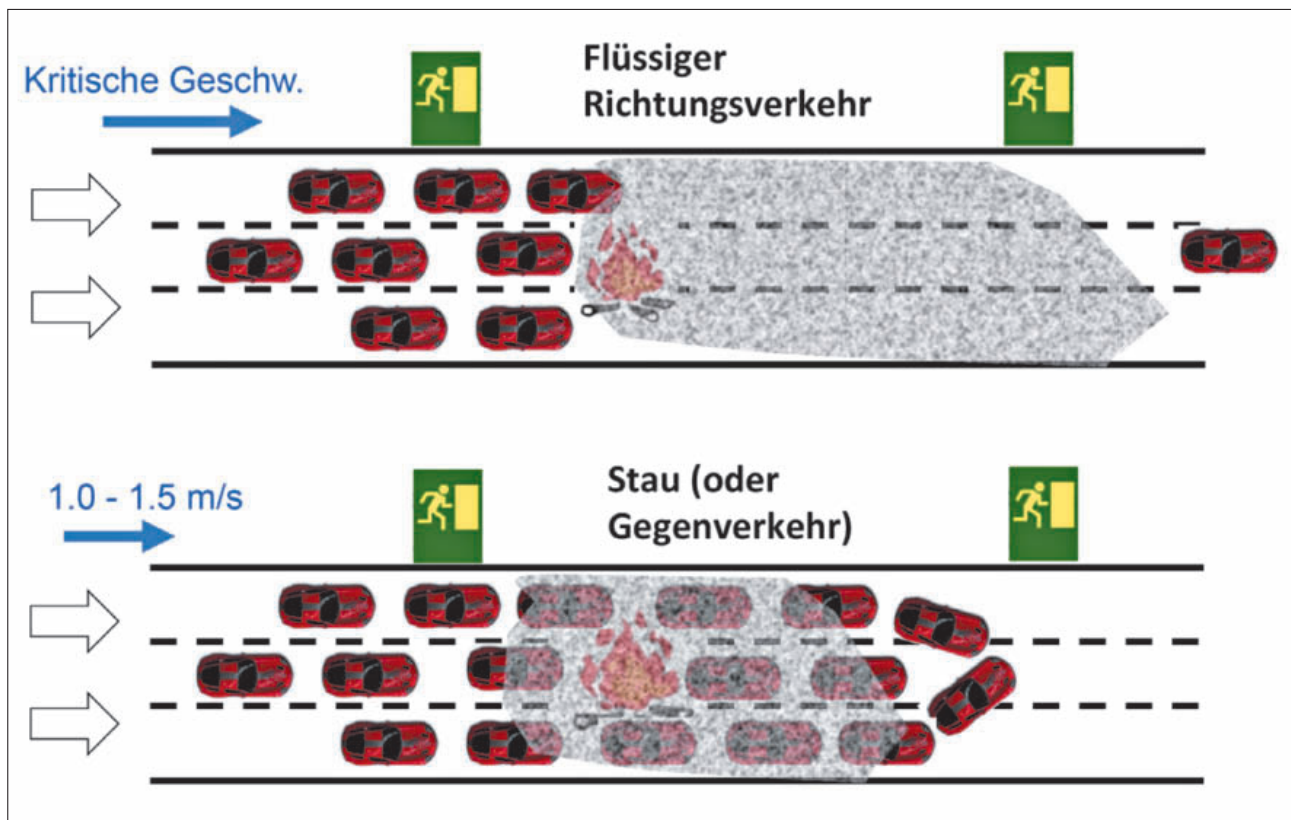
- Bei flüssigem Richtungsverkehr können die Fahrzeuge, welche den Brandort bereits passiert haben, den Tunnel ungestört verlassen. Es wird hier in der Regel mit kritischer Geschwindigkeit in Verkehrsrichtung gelüftet.
- Bei Richtungsverkehr mit Stau stromab der Brandstelle bzw. bei Gegenverkehr ist die vorherige Strategie nicht

tion (between the entry portal and the fire or between fire and exit portal). This can have extensive consequences, depending on the traffic situation. For purposes of explanation, a few terms have to be clarified:

- The critical velocity is the lowest longitudinal velocity of the air in a tunnel, at which smoke cannot propagate against the flow direction (“backlayering”).
- Smoke stratification denotes the propagation of smoke in the crown of the tunnel, with more favourable conditions usually prevailing in the lower part of the tunnel (air quality, temperature and visibility distance). Smoke stratification is a very sensitive phenomenon and is based on the fact that hot gases tend to rise. The smallest disturbances, however, can lead to mixing of smoke and air with a complete loss of stratification.

Smoke stratification is decisive for self-rescue and rescue. If a longitudinal ventilation system is operated with critical velocity (typically about 3 m/s), this leads to partial or complete loss of stratification, which can have serious consequences. The main ventilation strategies for mechanical longitudinal ventilation systems are dependent on the traffic management and the traffic situation in particular (Fig. 3):

- If there is fluid uni-directional traffic, the vehicles, which have already passed the fire location, can leave the tunnel without hindrance. The ventilation in this case is normally run at critical velocity in the direction of traffic.
- If there is uni-directional traffic with congestion downwind of the fire location, or bi-directional traffic the previous



Quelle/credit: Marco Bettelini, Samuel Rigert

3 Einfluss der Verkehrssituation auf die Lüftungsstrategie bei Längslüftung

The effect of the traffic situation on the ventilation strategy with longitudinal ventilation

zulässig, weil sie zu einer verheerenden Zerstörung der Rauchschichtung führen würde, welche die Selbstrettung eines Teils der Verkehrsteilnehmer verunmöglichen würde. Eine moderate (typischerweise 1 bis 1,5 m/s) Längsgeschwindigkeit in Strömungsrichtung ist in der Regel die beste Lösung, um die natürliche Rauchschichtung möglichst zu erhalten.

Weiterhin ist grundsätzlich wichtig, die zum Zeitpunkt der Branddetektion beobachtete Strömungsrichtung möglichst aufrechtzuerhalten. Ausnahmen sind jedoch insbesondere in den Portalbereichen häufig sinnvoll.

4.2 Lüftungssysteme mit Rauchabsaugung

Bei korrekt ausgelegten und betriebenen Lüftungssystemen mit Rauchabsaugung kann der verrauchte Tunnelbereich auf wenige 100 m um den Ereignisort herum beschränkt werden. Dazu wird eine bestimmte Anzahl Klappen (in der Regel zwischen zwei und sechs) beim Brandort geöffnet und eine grosse Menge Rauchgase, typischerweise im Bereich von 100 bis 200 m³/s, aus dem Fahrraum abgesogen. Eine geeignete Kontrolle der Längsgeschwindigkeit der Luft im Tunnel ist in der Regel erforderlich, damit kein Rauch an der Absaugstelle vorbei strömt. Normalerweise werden daher auch bei Lüftungssystemen mit Rauchabsaugung Strahlventilatoren vorgesehen.

4.3 So einfach wie möglich, so komplex wie nötig

Brandentwicklung und Rauchausbreitung in Strassentunneln können extrem rasch erfolgen. Das haben die Brände im Gotthard-Strassentunnel (2001) und im Tunnel Via Mala (2006) sehr deutlich gezeigt. Zeit ist immer ein Schlüsselfaktor, insbesondere in Bezug auf Selbstrettung. Ereignislüftungen werden in der Regel nach Ereignisdetektion vollautomatisch gestartet, auf der Basis von vordefinierten Szenarien.

Einfache, robuste und intuitive Lüftungsstrategien sind grundsätzlich anzustreben. Dieser Grundsatz kann aber nicht immer voll eingehalten werden. Moderne Lüftungssteuerungen unterstehen hohen Anforderungen und resultieren zunehmend aus vertieften Analysen. Daher die wachsende Bedeutung der Simulation, welche die zeitliche Entwicklung komplexer Ereignisszenarien veranschaulicht und die Prüfung der zugehörigen Lösungsstrategien ermöglicht. Die resultierende Anzahl Lüftungsszenarien ist aufgrund der unterschiedlichen Situationen in der Regel recht hoch und erfordert eine konsequente Schulung des Betriebspersonals und der Einsatzdienste.

5 Die Rolle der Simulation

Simulationstechniken wurden mittlerweile so weit entwickelt, dass sie umfassende und realitätsnahe Simulation von Brandereignissen erlauben. Diese spielen sowohl in der Planungs- als auch in der Betriebsphase eine zunehmende Rolle.

strategy is impermissible since it would lead to a serious destruction of the smoke stratification, making it impossible for some of the road users to escape. A moderate (typically 1 to 1.5 m/s) longitudinal velocity in the flow direction is normally the best solution in order to maintain natural smoke stratification as well as possible.

It is also generally important to maintain the flow direction observed at the time of detecting the fire as far as possible. Exceptions are however often sensible, especially near the portals.

4.2 Ventilation Systems with Smoke Extraction

With correctly designed and operated ventilation systems with smoke extraction, the smoke-affected tunnel section can be limited to a few hundreds of metres around the incident location. For this purpose, a certain number of fire dampers (normally between two and six) are opened at the fire location and a large quantity of smoke, typically in the region of 100 to 200 m³/s, is sucked out of the road space. A suitable control of the longitudinal velocity of the air in the tunnel is normally necessary in order that no smoke can flow past the extraction location. Ventilation systems with smoke extraction are thus normally provided with jet fans.

4.3 As Simple as Possible, as Complex as Necessary

Fire can break out and smoke can propagate extremely fast in road tunnels. This was shown very clearly by the fires in the Gotthard road tunnel (2001) and in the Via Mala tunnel (2006). Time is always a key factor, particularly with regard to self-rescue. Incident ventilation is normally started completely automatically after the detection of an incident, usually based on predefined scenarios.

Simple, robust and intuitive ventilation strategies are generally to be aimed at. This basic rule can however not always be obeyed. Modern ventilation control systems are subject to stringent requirements and increasingly the result of detailed analyses. This leads to the growing significance of simulation, which can model the development with time of complex incident scenarios and enables the testing of the associated solution strategies. The resulting number of ventilation scenarios is, due to the different situations, quite high and demands thorough training of the operations and the emergency services personnel.

5 The Role of Simulation

Simulation techniques have meanwhile been developed so far that they permit extensive and realistic simulations of fire events. This is of increasing significance, both in the design phase and in the operating phase.

5.1 Why Simulate Fire Scenarios?

In contrast to conventional techniques, as were essentially used in the design of tunnel ventilation systems since the middle of the last century, comprehensive fire simulations

5.1 Warum Simulation von Brandszenarien?

Im Unterschied zu konventionelleren Techniken, wie sie im Wesentlichen bereits Mitte des letzten Jahrhunderts in der Planung von Tunnellüftungen eingesetzt wurden, berücksichtigen umfassende Brandsimulationen die zeitliche Entwicklung eines Szenarios. Dies spielt insbesondere während der Selbstrettungsphase eine entscheidende Rolle. Brandsimulationen werden routinemässig im Rahmen der Projektierung eingesetzt und führen zunehmend zu deutlichen Verbesserungen in der Gestaltung, Dimensionierung und insbesondere Steuerung von Ereignislüftungen. Brandsimulationen werden zunehmend auch für im Betrieb befindliche Tunnel eingesetzt, um bestehende Brandbekämpfungsstrategien kritisch zu prüfen, neue zu entwickeln sowie Leitstellenpersonal und Einsatzkräfte zu schulen.

5.2 Eindimensionale Simulation von Brandszenarien

Gesamtszenarien spielen häufig eine zentrale Rolle im Rahmen der Optimierung der Steuerung von Ereignislüftungen sowie zur Identifikation der kritischen Szenarien, welche für die Dimensionierung massgebend sind. Eindimensionale Simulationen bieten sich aufgrund des geringen Simulationsaufwands für die Analyse vieler Ereignisszenarien optimal an.

Der Tunnel wird dabei eindimensional abgebildet und die zeitliche Variation aller massgebenden Kenngrössen nur in Abhängigkeit von der Position entlang der Tunnellängsachse analysiert. Die Tunnelaerodynamik, die Verkehrsentwicklung nach Brandausbruch und die Branddynamik (inklusive Kamineffekt) werden vollständig abgebildet. Der Selbstrettungsprozess kann aufgrund der Position der Rauchfronten detailliert analysiert werden (Bild 4). Unterschiedliche Lüftungsstrategien können verglichen und optimiert werden [3].

5.3 Dreidimensionale Simulation von Brandszenarien

Computational Fluid Dynamics (CFD) ist eine dreidimensionale Simulation (numerische Strömungsberechnung) und eignet sich optimal zur detaillierten Analyse der im Ereignisfall im Tunnel vorherrschenden Bedingungen [5]. Die relevanten Tunnelabschnitte werden mit hohem Detaillierungsgrad im Simulationsprogramm nachgebildet und analysiert (Bild 5). Diese deutlich aufwendigere Vorgehensweise liefert im Vergleich zu eindimensionalen Analysen einen weit höheren Detaillierungsgrad. Alle sicherheitsrelevanten Kenngrössen können zeitlich und örtlich korrekt nachgebildet werden. So lassen sich zum Beispiel sämtliche für die Selbstrettung und für die Intervention relevanten Bedingungen (Sichtweite auf Augenhöhe, Sauerstoffgehalt der Tunnelluft, Schadstoffkonzentration, Temperatur, Strahlungsdichte etc.) genau ermitteln.

5.4 Evakuierungssimulation

Der Selbstrettungsvorgang untersteht der komplexen Wechselwirkung von zahlreichen Einflussfaktoren. Die Tunnellüftung spielt dabei eine wesentliche Rolle, um geeignete Bedingungen zur Ermöglichung der Selbstrettung zu realisieren. Evakuierungssimulationen werden häufig eingesetzt, gekoppelt mit Simulationen der Rauchausbreitung, um die

consider the development of a scenario with time. This plays a decisive role, particularly during the self-rescue phase. Fire simulations are routinely used in the course of design work and are increasingly leading to a clear improvement of design and dimensioning and particularly of the control of incident ventilation. Fire simulations are also being increasingly used for tunnels in operation in order to critically test the existing fire fighting strategies, develop new strategies and train control centre and emergency services personnel.

5.2 One-Dimensional Simulation of Fire Scenarios

Overall scenarios are often central for the purpose of optimising the control of incident ventilation systems and identifying critical scenarios that are decisive for dimensioning. One-dimensional simulations are ideal for the analysis of many incident scenarios due to the simple simulation.

The tunnel is represented in one dimension and the variation with time of the decisive parameters is only analysed depending on the position along the longitudinal axis of the tunnel. The tunnel aerodynamics, the traffic development after the fire has broken out and the fire dynamics (including chimney effect) are completely represented. The self-rescue process can be analysed in detail from the position of the smoke fronts (Fig. 4). Different ventilation strategies can be compared and optimised [3].

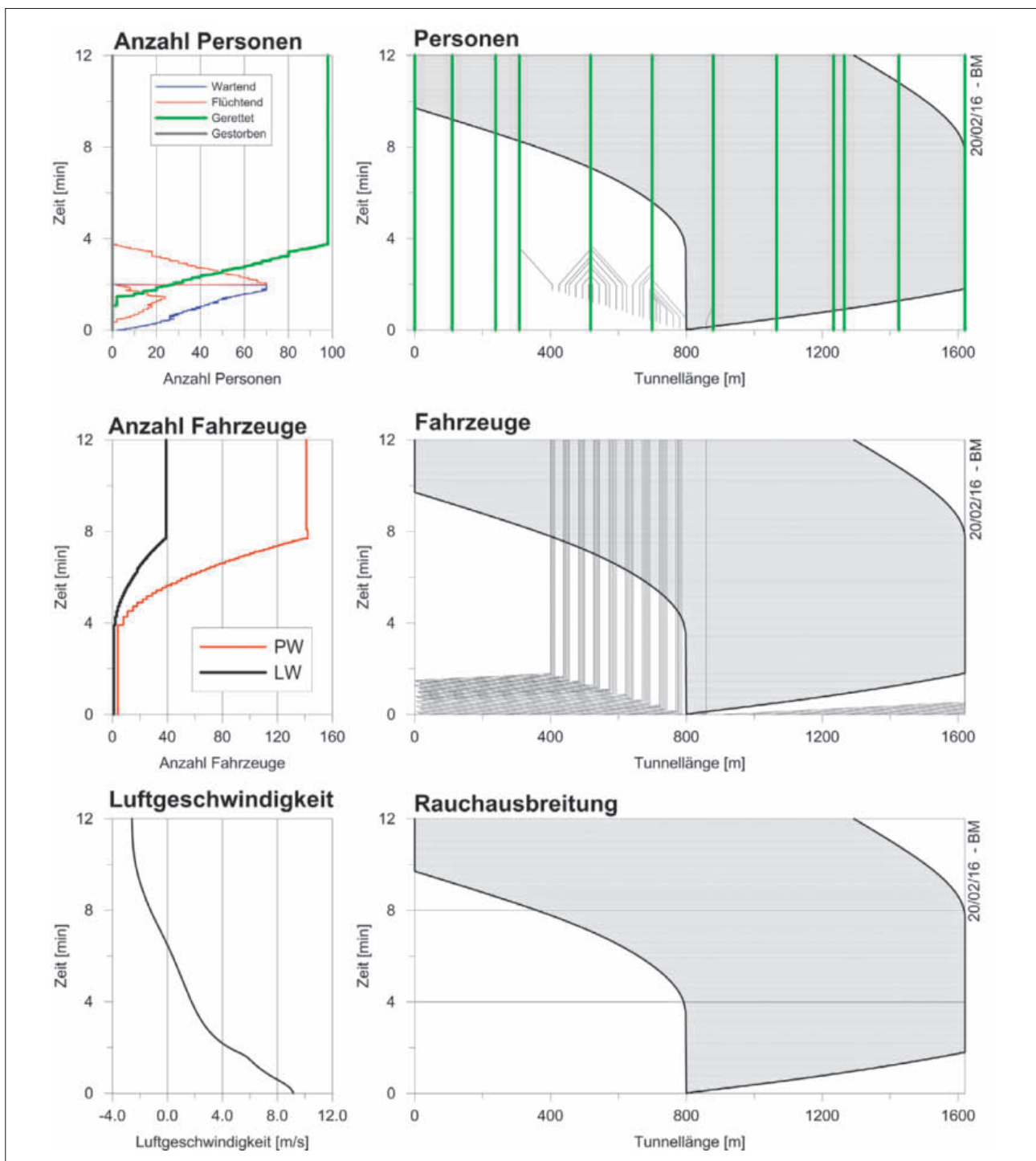
5.3 Three-Dimensional Simulation of Fire Incidents

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a three-dimensional simulation (numerical flow calculation) and is ideal for detailed analysis of the conditions prevailing in the case of an incident in a tunnel [5]. The relevant tunnel sections are represented and analysed in the simulation program with a high degree of detail (Fig. 5). This considerably more laborious procedure delivers a much better degree of detail compared to one-dimensional analyses. All safety-relevant parameters can be correctly represented with time and location. For example, all conditions that are relevant for self-rescue and for the intervention (visibility at eye level, oxygen content of the tunnel air, hazardous gas concentrations, temperature, radiation density etc.) can be determined precisely.

5.4 Evacuation Simulation

The self-rescue process is subject to a complex interaction of numerous factors. The tunnel ventilation is of decisive importance in order to provide suitable conditions to enable self-rescue. Evacuation simulations are often used, coupled with simulations of smoke propagation, in order to test the effectiveness of the safety chain with regard to self-rescue [4].

A first estimate of the self-rescue time can, for example, be undertaken from the standard 130 [6] of the National Fire Protection Association (NFPA) (Fig. 6). In the simplest case, it is only investigated whether the conditions prevailing in the tunnel during self-rescue, particularly regarding visibility, air quality and thermal exposure, are appropriate. Significantly more reliable simulations can be performed with specialised simulation programs such as Advanced Simulation of Evacuation of Real Individuals (ASERI) [7].



Quelle/credit: Marco Bettelini, Samuel Rigert

4 Eindimensionale Brandsimulation zur Optimierung der Lüftungssteuerung (flüssiger Richtungsverkehr von links nach rechts, Längslüftung mit Strahlventilatoren). Das Bild zeigt von unten nach oben: Luftgeschwindigkeit der Luft und Rauchausbreitung, Fahrzeugposition und Anzahl Fahrzeuge im Rauch, Personenbewegung und Personensituation (wartend, fliehend, gerettet, gestorben)

One-dimensional fire simulation for the optimisation of ventilation control (flowing traffic in one direction from left to right, longitudinal ventilation with jet fans). The picture shows, bottom to top: air velocity and smoke propagation, vehicle location and number of vehicles in the smoke, movement of people and situation of people (waiting, escaping, rescued, died)

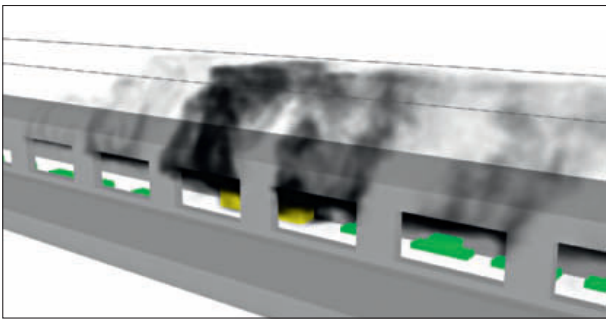
Wirksamkeit der Sicherheitskette in Bezug auf Selbstrettung zu prüfen [4].

Eine erste Schätzung der Selbstrettungszeit kann zum Beispiel auf der Basis der Norm 130 [6] der National Fire Pro-

6 Requirements and Interfaces

6.1 Construction

Depending on the ventilation and tunnel system, the ventilation can have a very great effect on construction. Although this is generally valid for the operational and safety equip-



Quelle/credit: Marco Bettelini, Samuel Rigert

5 Brand in einer Galerie – Visualisierung der Rauchausbreitung bei 3D-Brandsimulation mit FDS

Fire in a gallery – Visualisation of smoke propagation in a 3D fire simulation with FDS

tection Association (NFPA) vorgenommen werden (Bild 6). Im einfachsten Fall wird lediglich geprüft, ob die im Tunnel vorherrschenden Bedingungen während der Selbstrettung, insbesondere in Bezug auf Sicht, Luftqualität und thermische Belastung, geeignet sind. Wesentlich zuverlässigere Simulationen können mittels spezialisierter Simulationsprogramme wie der Advanced Simulation of Evacuation of Real Individuals (ASERI) [7] durchgeführt werden.

6 Anforderungen und Schnittstellen

6.1 Bau

Je nach Lüftungs- und Tunnelsystem kann die Lüftung einen sehr grossen Einfluss auf den Bau haben. Obwohl dies allgemein für die Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) Gültigkeit hat, sind zwei Schlüsselaspekte der Tunnellüftung besonders zu beachten: Der Raum- und der Leistungsbedarf kann enorm sein. Zu- und Abluftkanäle haben oft einen Querschnitt von mindestens 10 bis 15 m², Lüftungszentralen weisen selten eine Kubatur von weniger als 500 m³ auf, und die Leistung eines einzelnen Abluftventilators erreicht häufig 1 MW oder mehr. Die richtige Platzierung und Gestaltung aller Komponenten ist ebenfalls entscheidend. Es besteht in der Regel ein erhebliches Optimierungspotenzial, insbesondere bei Tunnelsanierungen, welches vom Bau- und Lüftungsingenieur gemeinsam ausgeschöpft werden muss. Die Bedeutung einer sehr engen Wechselwirkung zwischen Bau und Lüftung kann nicht überschätzt werden!

6.2 Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA)

Neben den eigentlichen Lüftungskomponenten sind Sensoren für den korrekten automatischen Lüftungsbetrieb im Ereignisfall unerlässlich. Hierzu gehören zum Beispiel die Ereignisdetektion, die Messung der Luftgeschwindigkeit im Fahrraum und die Staudetektion. Die Wechselwirkung zwischen Ereignislüftung und weiteren BSA-Komponenten ist vielschichtig und wird in der Regel im Rahmen der Projektierung relativ gut beherrscht. Eine Reflexmatrix kann alle Wechselwirkungen zwischen Lüftung und BSA systematisch für alle Betriebsbedingungen wiedergeben. Erfolgskritische Aspekte, welche die grösste Aufmerksamkeit erfordern, sind

ment, two key aspects of tunnel ventilation should particularly be noted: The space and power requirement can be enormous. Air supply and extraction ducts often have a cross-sectional area of at least 10 to 15 m², ventilation stations seldom have a volume of less than 500 m³, and the power of a single extraction fan can often reach 1 MW or more. The correct placing and design of all components is also decisive. There is normally a considerable potential for optimisation, particularly in tunnels under refurbishment, which has to be exploited by collaboration between civil and ventilation engineers. The significance of a very close interaction between construction and ventilation cannot be underestimated!

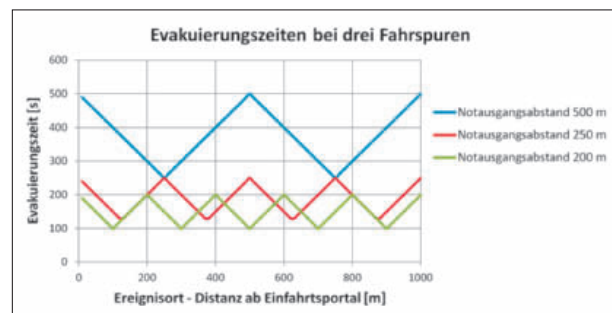
6.2 Operational and Safety Equipment

In addition to the actual ventilation components, sensors are essential for correct automatic ventilation operation in case of an incident. This includes, for example, incident detection, measurement of air velocity in the road space and traffic blockage detection. The interaction between incident ventilation and further safety equipment is many-layered and is normally kept relatively well under control during the design stage. A reflex matrix can represent all interactions between ventilation and tunnel equipment systematically for all operating conditions. Aspects that are critical for success, which demand the greatest attention, are often the implementation and commissioning of ventilation control and the correct integration of the ventilation sensors. The detection of stopped traffic is subject to different requirements and can be stated as an example here.

6.3 Operating and Incident Services

Maintenance, repair and periodic functional checks are essential in order to guarantee the required availability and reliability of incident ventilation. Such requirements grow with the complexity of the system and have to be considered at the design phase. For example the analysis of possible breakdown situations is an essential basis for the specification of the required redundancy. This allows tunnel closures due to technical breakdowns to be minimised.

From the personnel in the control room, the ventilation engineer expects detailed knowledge of the system and the



Quelle/credit: Marco Bettelini, Samuel Rigert

6 Evakuierungszeit in Abhängigkeit von Brandort und Abstand der Notausgänge

Evacuation time depending on fire location and spacing of the emergency exits

häufig die Realisierung und Inbetriebnahme der Lüftungssteuerung und die korrekte Anbindung der Lüftungssensoren. Die unterschiedlichen Anforderungen unterstehende Staudetektion kann an dieser Stelle als Beispiel aufgeführt werden.

6.3 Betrieb und Ereignisdienste

Wartung, Unterhalt und periodische Funktionskontrollen sind eine unerlässliche Grundlage, um die erforderliche Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Ereignislüftungen zu garantieren. Diesbezügliche Anforderungen steigen mit der Komplexität der Anlagen und müssen schon bei der Planung berücksichtigt werden. So stellt zum Beispiel die Analyse möglicher Ausfallsituationen eine wesentliche Grundlage dar, um die erforderlichen Redundanzen festzulegen. Dadurch können Tunnelsperrungen aufgrund von technischen Ausfällen minimiert werden.

Vom Personal im Kontrollraum erwartet der Lüftungsingenieur grundlegende Kenntnisse der Anlage und der wichtigsten Lüftungsszenarien. Dies ist erforderlich, weil vorgängig festgelegte Szenarien teilweise manuelles Eingreifen erfordern, insbesondere falls nicht alle Komponenten uneingeschränkt verfügbar sind. Manuelles Eingreifen kann weiter erforderlich sein, um die Lüftungsstrategie in Bezug auf die von der Einsatzleitung festgelegte Vorgehensweise zu optimieren.

Die Feuerwehr und teilweise auch die weiteren Blaulichtorganisationen müssen in Bezug auf Tunnellüftung und automatische Lüftungsszenarien geschult werden. Einsatzstrategien und Lüftungsbetrieb werden aneinander angepasst und optimiert. Die Einsatzdienste sind in der Lage, bei Bedarf Anpassungen des Lüftungsbetriebs anzufordern.

7 Schlusswort

Ereignislüftungen spielen eine zentrale Rolle in der Sicherheitskette eines Strassentunnels. Durch gezielte Kontrolle der Rauchbewegung können günstige Bedingungen für die Selbstrettung und für die Intervention bereitgestellt werden.

Damit die Lüftungsfunktion zuverlässig und wirksam wahrgenommen werden kann, müssen einige Voraussetzungen erfüllt werden: ausreichender Unterhalt, damit alle Komponenten des Lüftungssystems im Ereignisfall wirklich verfügbar sind, ebenso wie Verständnis der wichtigsten Lüftungsszenarien seitens der Tunnelbetreiber und der Einsatzkräfte. Simulation kann diesbezüglich eine sehr wichtige Unterstützung liefern. Dies garantiert, dass im Ereignisfall die Lüftung ihre zentrale Rolle in der Sicherheitskette voll wahrnehmen kann.

Nicht alle Probleme lassen sich mit Lüftungstechnischen Massnahmen ausreichend beherrschen. Zusätzliche, weit aufwendigere Massnahmen, wie zum Beispiel die Verdichtung der Notausgänge, sind teilweise unerlässlich.

most important ventilation scenarios. This is necessary since scenarios laid down in advance can sometimes need manual intervention, particularly if not all components are available. Manual intervention can also be necessary in order to optimise the ventilation strategy in accordance with a procedure requested by the fire chief.

The fire services and to some extent also other emergency service organisations have to be trained with regard to tunnel ventilation and automatic ventilation scenarios. Intervention strategies and ventilation operation are then adapted to suit each other and optimised. The emergency services are able to request changes to ventilation operation as required.

7 Summary

Incident ventilation is an important link in the safety chain for a road tunnel. Targeted control of smoke movement can provide favourable conditions for self-rescue and intervention.

In order that the ventilation can work reliably and effectively, several preconditions have to be fulfilled: adequate maintenance, in order that all components of the ventilation system are actually available in case of an incident, understanding of the most important ventilation scenarios on the part of the tunnel operator and the emergency services. Simulation can be of great assistance in this regard. This guarantees that in case of an incident, ventilation can play its central role in the safety chain.

Not all problems can be adequately controlled with ventilation measures. Additional, far more expensive measures such as more closely spaced emergency exits, are sometimes unavoidable.

Literatur/References

- [1] ASTRA: Lüftung der Strassentunnel. Richtlinie 13001. Ausgabe 2008 V2.01
- [2] Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network
- [3] Bettelini, M.: "Transient One-Dimensional Simulation For Optimum Road Tunnel Ventilation". ITA-AITES World Tunnel Congress, 19–25 September 2008, Agra, India
- [4] Bettelini, M.: "Coupled One-Dimensional Simulation of Smoke Propagation and Evacuation In Road Tunnels". AFTES Int. Congress 2011, 17–19 October 2011, Lyon, France
- [5] Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV), <http://firemodels.github.io/fds-smv/>
- [6] NFPA 130, Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, 2010 Edition
- [7] ASERI (Advanced Simulation of Evacuation of Real Individuals), A model to simulate evacuation and egress movement based on individual behavioural response (2004), <http://www.ist-net.de>