Temperatur- und Rauchausbreitung bei Bränden in Strassentunnels

Der grosse Einfluss der Lüftung von Strassentunnels auf die Temperatur- und Rauchausbreitung im Brandfall ist seit den Versuchen im Memorial Tunnel in den USA bekannt. Nach den neuen schweizerischen Richtlinien ausgelegte Lüftungsanlagen berücksichtigen unter anderem diese Erkenntnisse. Mit modernen Lüftungsanlagen können die bei einem Brand entstehenden Rauchgase gezielt abgetrieben und effizient abgesaugt werden. Leistungsfähige Brandlüftungen gewährleisten deshalb die Selbstrettung der Tunnelbenützer und den Einsatz der Feuerwehr bei einem Brandereignis. Der mit solchen Anlagen erzielte Sicherheitsgewinn ist gross.

Von Daniel Schuler *

Brandunfälle in Tunneln können auf Grund der eingeschränkten räumlichen Verhältnisse zu hohen Temperaturen und zu einer starken Verrauchung des Tunnelraums führen. Die Auswirkungen von Bränden in Tunneln können aus diesem Grund gravierender sein als auf offener Strecke. Interessanterweise laufen trotzdem zahlreiche Fahrzeugbrände in Tunneln auf Grund von geringen Brandlasten vergleichsweise glimpflich ab. Die Brandkatastrophen im Tauern-, Montblanc- und Gotthardtunnel zeigten jedoch, dass das Zusammentreffen von grossen Brandlasten, dem falschen Verhalten der Tunnelbenützer, unzureichenden Fluchtmöglichkeiten sowie der zu späten, nicht angepassten Reaktion und der zu geringen Leistungsfähigkeit der Lüftung verheerende Folgen haben können [6].

Bei einem Brandereignis in einem Tunnel findet im Allgemeinen ein rascher Temperaturanstieg verbunden mit einer schnellen Ausbreitung von Rauchgasen statt. Bis die Feuerwehr am Brandort eintrifft, verstreichen in den meisten Fällen mindestens zehn Minuten. Eine Intervention in den ersten Minuten eines Brandes ist unwahrscheinlich. Es ist deshalb notwendig, dass sich die Verkehrsteilnehmer bei einem Brandereignis selbst in Sicherheit bringen können. Eine schnelle Rauchausbreitung im Tunnel kann die Selbstrettung jedoch massiv erschweren oder gar verunmöglichen. Um die Rauchausbreitung wirkungsvoll zu beeinflussen und damit die Selbstrettung möglich zu machen, hat der Betrieb der Tunnellüftung eine zentrale Bedeutung.

Die Kriterien für die Auslegung von Tunnellüftungen für den Brandfall basieren unter anderem auf zahlreichen Brandversuchen, die vor rund zehn Jahren durchgeführt wurden. Vor allem das umfangreiche Versuchsprogramm im stillgelegten Memorial Tunnel in den USA zeigten den grossen Einfluss der Lüftung auf die Temperatur- und Rauchausbreitung in Tunnels auf.

Brandszenarium ist vom Fahrzeug abhängig

Die Intensität eines Fahrzeugbrandes variiert abhängig von den Fahrzeugtypen und der Ladung sehr stark. Basierend auf den EUREKA-Brandversuchen werden vom Weltstrassenverband [3] die folgenden Brandleistungen angegeben:

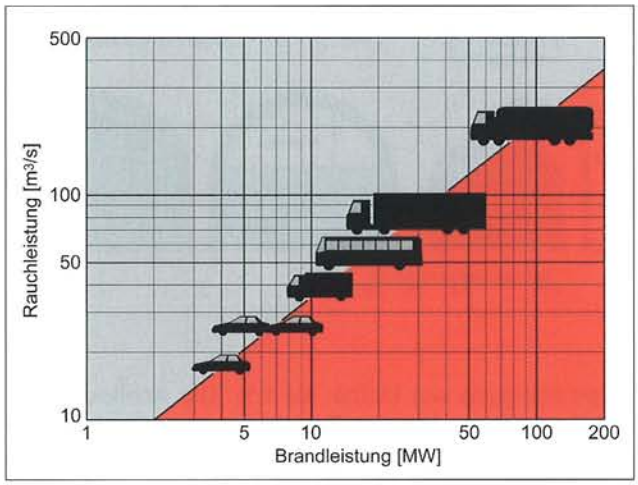
**** Daniel Schuler, dipl. Ing. FH, Bürkel Baumann Schuler Ingenieure + Planer AG, Winterthur***

Diffusion de la température et de la fumée lors d'incendies dans des tunnels routiers

La grande influence de la ventilation des tunnels routiers sur la diffusion de la température et de la fumée lors d'incendies est connue depuis les essais dans le «Memorial Tunnel» aux USA. Les nouvelles directives suisses pour les installations de ventilation tiennent compte de ces données. Les installations modernes de ventilation permettent de repousser et d'aspirer efficacement les fumées produites par un incendie. En cas d'incendie, les ventilations puissantes garantissent l'évacuation par eux-mêmes des utilisateurs d'un tunnel ainsi que l'intervention des pompiers. Le surplus de sécurité obtenu par de telles installations est considérable.

- Grosser Personenwagen 5 MW
- 2–3 Personenwagen 8 MW
- Lieferwagen 15 MW
- Bus 20 MW
- Lastwagen ohne brennbare Ladung 20–30 MW

Beim Brand eines schweren Lastfahrzeugs mit brennbarer Ladung und im Speziellen beim Brand eines Tankfahrzeugs können sehr viel höhere Brandleistungen erreicht werden. Bei den EUREKA-Brandversuchen wurden Leistungen von 120 MW gemessen, dies jedoch nur während einer kurzen Zeitspanne [3].
Die Rauchentwicklung ist wiederum von der Brandleistung abhängig. Beim Brand eines Personenwagens wird eine Rauchmenge von 20 m^3/s freigesetzt [3]. Beim typischerweise für die Dimensionierung von Lüftungsanlagen vorausgesetzten Brand eines Lastwagens ohne brennbare Ladung wird von einer Rauchleistung von 80 m^3/s ausgegangen [7].
In der Abbildung 1 sind die Brand- und die Rauchleistungen dargestellt, die bei einem Fahrzeugbrand während einer relevanten Dauer des Ereignisses zu erwarten sind.



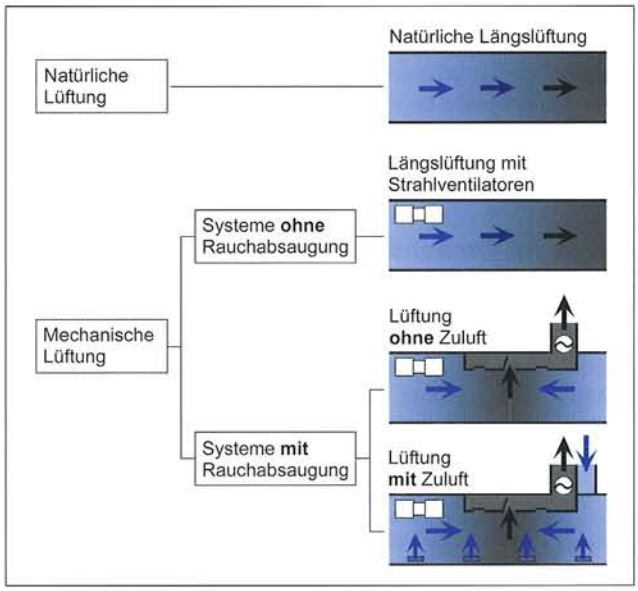
1

1: Maximale Brand- und Rauchleistung beim Brand unterschiedlicher Strassenfahrzeuge wie sie in der Wegleitung für die Intervention bei Bränden in Strassentunnels des Schweizerischen Feuerwehrverbandes dargestellt ist.

1: Potentiel incendiaire et fumigène maximum de différents véhicules routiers tel que représenté dans les instructions de la Fédération suisse des sapeurs-pompiers pour les interventions en cas d'incendie dans les tunnels routiers.

Tunnellüftungssysteme

Die Lüftungssysteme von Tunnelanlagen werden in natürliche und in mechanische Lüftungen unterteilt, wobei mechanische Lüftungen mit und ohne Rauchabsaugung unterschieden werden. Die Abbildung 2 zeigt eine Übersicht mit den heute üblichen Lüftungssystemen. Bei natürlich belüfteten Tunnels wird durch den fliessenden Verkehr, durch meteorologisch bedingte Druckunterschiede an den Portalen oder durch den in einem Brandfall schon bei einer geringen Steigung wirksamen Kamineffekt eine Längsströmung im Tunnel erzeugt. Bei einer mechanischen Lüftung, das heisst bei Tunnels mit einer Lüftungsanlage, wird die Längsströmung durch Strahlventilatoren erzeugt. Vor allem längere Tunnel verfügen auch über Lüftungssysteme, bei denen Zuluft über die gesamte Tunnellänge verteilt eingeblasen wird. Bei Lüftungsanlagen mit Rauchabsaugung besteht die Möglichkeit, grosse Rauchmengen mit Hilfe einzeln steuerbarer Abluftklappen gezielt in der Nähe des Brandes aus dem Fahrraum des Tunnels abzusaugen und über einen Abluftkanal abzuführen.



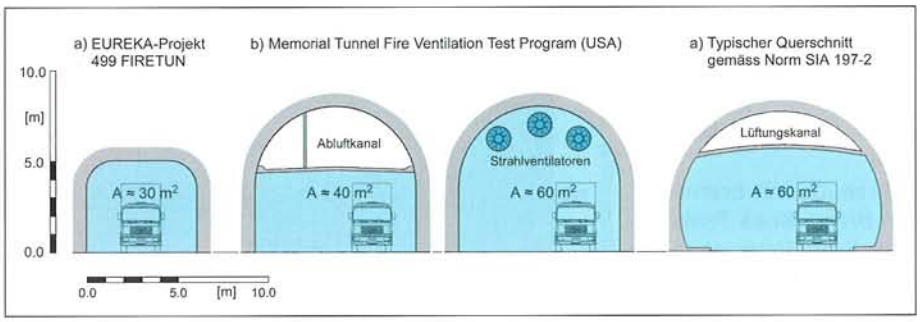
2

2: Verschiedene Tunnellüftungssysteme wie sie in der Wegleitung für die Intervention bei Bränden in Strassentunnels des Schweizerischen Feuerwehrverbandes dargestellt sind.

2: Différents systèmes de ventilation des tunnels tels que représentés dans les instructions de la Fédération suisse des sapeurs-pompiers pour les interventions en cas d'incendie dans les tunnels routiers.

Brandversuche: EUREKA-Projekt 499 Firetun

Zu Beginn der 90er-Jahre wurden in Europa und den USA verschiedene Brandversuche durchgeführt, so das EUREKA-Projekt 499 Firetun (1990–1992) und das Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (1993–1995). In der Abbildung 3 sind Tunnelquerschnitte der beiden Versuchstunnel zusammen mit dem typischen Tunnelquerschnitt eines zweistreifigen Strassentunnels gemäss SIA 197/2 [2] dargestellt. Beim europäischen Projekt «EUREKA-Projekt 499 Firetun» führten Forschungspartner aus England, Finnland, Frankreich, Italien, Norwegen Österreich, Schweden und der Schweiz zwischen 1990 und 1992 in einem ausser Betrieb genommenen Bergwerksstollen in Norwegen insgesamt 20 Brandversuche durch. Dabei wurden die Brände von vier verschiedenen Strassenfahrzeugen, von zahlreichen Schienenfahrzeugen sowie von Holz, Reifen und Kunststoffen simuliert.
Der Querschnitt des Bergwerktunnels ist mit einer Fläche von rund 30 m^2 nur etwa halb so gross, wie derjenige eines zweistreifigen Strassentunnels (Abb. 3a). Die Länge des EUREKA-Versuchstunnels betrug 2,3 km.



3

3: Tunnelquerschnitte wie sie beim EUREKA-Projekt und beim Memorial Tunnel untersucht wurden und rechts daneben, der Tunnelquerschnitt wie er in der SIA-Norm 197-2 definiert ist.

3: Sections de tunnels examinées dans le projet EUREKA et dans le «Memorial Tunnel» avec à côté à droite la section de tunnel définie dans la norme SIA 197-2.

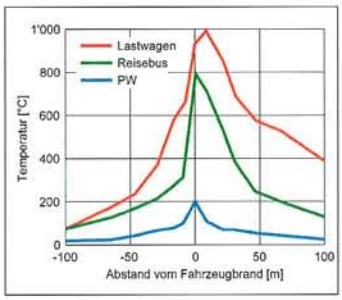
Seine Steigung war kleiner als 1 %. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die bei den Brandversuchen mit Strassenfahrzeugen gemessenen maximalen Temperaturen. Diese Temperaturmaxima wurden jeweils im Deckenbereich des Tunnels oberhalb des Brandes gemessen. Beim Lastwagenbrand erreichte die Temperatur maximal 1000 °C. Beim Brand eines Personenwagens kühlten sich die Rauchgase schnell ab, so dass die Temperatur auch über dem Brand nicht auf mehr als 200 °C anstieg. Die Maximaltemperaturen nahmen mit zunehmendem Abstand vom Brand stark ab (Abb. 4). Die Abbildung 5 zeigt die zeitabhängige Temperaturentwicklung, wie sie bei den Brandversuchen gemessen wurde. Bei allen Versuchen erfolgte der Temperaturanstieg sehr schnell, das heisst innerhalb weniger Minuten. Die Temperaturmaxima wurden während einigen Minuten gemessen. Danach wurde ein exponentieller Temperaturabfall registriert. Beim Bus- sowie beim Lastwagenbrand waren die Temperaturen im Deckenbereich über dem Brand nach einer Stunde auf rund 200 °C abgesunken.

Memorial Tunnel Brandversuche

In den Jahren 1993 bis 1995 wurden im Memorial Tunnel, einem stillgelegten Strassentunnel im US Bundesstaat West Virginia, im Rahmen eines gross angelegten Versuchsprogramms Brandversuche durchgeführt. Der Memorial Tunnel weist eine Länge von 850 m und eine Steigung von 3,2% auf. Ohne Zwischendecke entspricht sein Querschnitt mit einer Fläche von etwa 60 m² in etwa einem typischen Tunnelquerschnitt gemäss den heutigen Tunnelbaunormen in der Schweiz. In der Abbildung 3b ist der Querschnitt des Memorial Tunnels dargestellt. Mit Vergleichsbränden mit Brandleistungen von 10, 20, 50 und 100 MW wurden insgesamt 98 Versuche durchgeführt. Die hauptsächlichen Versuchsparameter neben der Brandleistung waren die Tunnelbelüftungssysteme. Versuche wurden unter anderem mit den folgenden Belüftungssystemen durchgeführt:

- Natürliche Belüftung
- Längslüftung mit Strahlventilatoren
- Querlüftung
- Halbquerlüftung
- Halbquerlüftung mit Rauchgasabsaugung

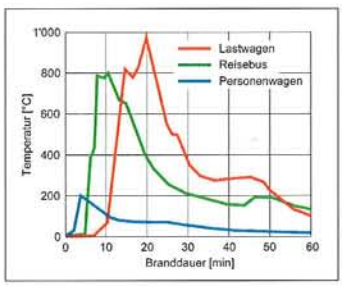
Das primäre Ziel der äusserst umfassenden Versuchsreihe war die Erforschung der Wirkung der unterschiedlichen Tunnelbelüftungsarten in Bezug auf die Temperatur- und Rauchgasausbreitung. Zu diesem Zweck wurden die Temperaturen, die Luftgeschwindigkeiten, die CO^2- und die CO-Konzentrationen sowie die Sichttrübungen im ganzen Tunnel an zahlreichen Stellen gemessen. Neben der Brandleistung wurden bei den verschiedenen Versuchen vor allem die Luftmengen und die Luftgeschwindigkeiten in Brandnähe sowie die Ansprechzeiten der Brandlüftung variiert.
Nachfolgend sind die wichtigsten Resultate und Erkenntnisse aus diesen Versuchen dargestellt. Dabei werden Versuche mit einer natürlichen Belüftung sowie die Einflüsse einer Längslüftung mit Strahlventilatoren bzw. einer Lüftung mit Rauchabsaugung dargestellt. Um die Temperatur- und Rauchausbreitung vergleichen zu können, sind in den Abbildungen 6, 7 und 8 jeweils die Ergebnisse der Versuche mit 50 MW Brandleistung dargestellt.



4

4: Die bei den EUREKA-Versuchen im Deckenbereich gemessenen Maximaltemperaturen.

4: Températures maximales mesurées au plafond lors des essais EUREKA.



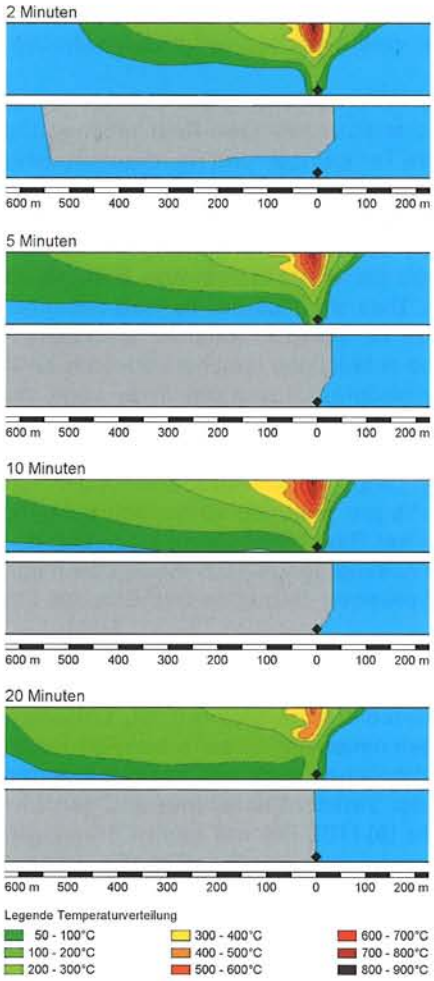
5

5: Die bei den EUREKA-Versuchen gemessenen zeitlichen Temperaturverläufe bei verschiedenen Fahrzeugbränden.

5: Variations dans le temps des températures mesurées pour différents véhicules incendiés lors des essais EUREKA.

Natürliche Lüftung

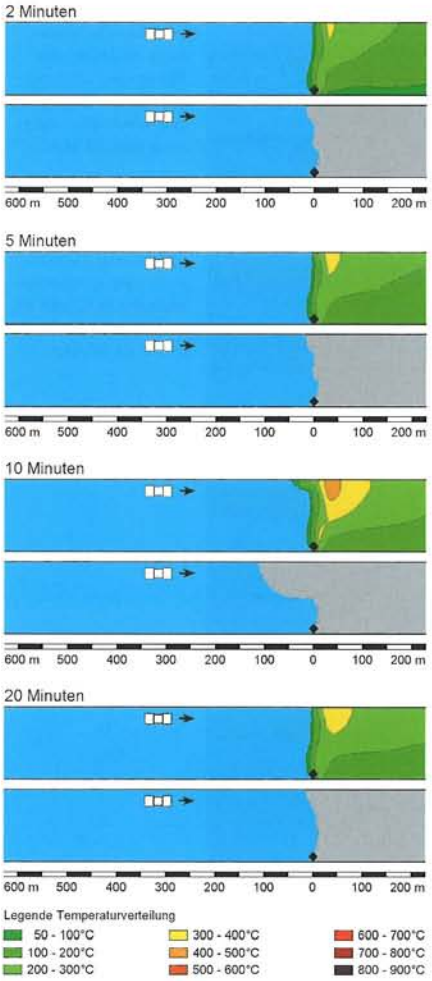
Die Abbildung 6 zeigt die Temperatur- und Rauchausbreitung bei einem 50 MW-Brand im natürlich belüfteten Tunnel. Der Rauch breitete sich mit der natürlichen Längslüftung ausserordentlich schnell aus. Wegen der Steigung des Tunnels von über 3 % und dem daraus resultierenden Kamineffekt strömten die Rauchgase in Richtung des weiter entfernten, jedoch höher gelegenen Tunnelportals. Eine Schichtung der Rauchgase wurde lediglich in den ersten zwei Minuten des Brandes festgestellt. Nach drei Minuten war der Tunnelquerschnitt auf der gesamten Länge von 650 m bis zum Portal vollständig mit Rauch gefüllt. Über dem Brand wurden Temperaturen von mehr als 800 °C erreicht. Ab einer Entfernung von 200 m vom Brandort und mehr erreichten die Temperaturen im Deckenbereich noch 100 bis 200 °C.



6

6: Die Temperatur- und Rauchausbreitung im Memorial Tunnel bei natürlicher Lüftung und einer Brandleistung von 50 MW [4].

6: Diffusion de la température et de la fumée dans le «Memorial Tunnel» avec une ventilation naturelle et une puissance incendiaire de 50 MW [4].



7

7: Die Temperatur- und Rauchausbreitung im Memorial Tunnel bei Längslüftung mit Strahlventilatoren und einer Brandleistung von 50 MW.

7: Diffusion de la température et de la fumée dans le «Memorial Tunnel» avec une ventilation longitudinale par ventilateurs axiaux et une puissance incendiaire de 50 MW.

Längslüftung

In der Abbildung 7 sind die Temperatur- und die Rauchausbreitung bei einer Längslüftung des Tunnels mit Strahlventilatoren dargestellt. Man erkennt, dass die Rauchgase mit Hilfe der Lüftung entgegen der Kaminwirkung in Richtung des tiefer liegenden Tunnelportals verdrängt wurden. Die durch die Strahlventilatoren erzeugte Längsgeschwindigkeit im Tunnel betrug etwa 5 m/s und war damit vergleichsweise hoch. Eine Rückströmung von Rauch («back-layering») wurde bei dieser Luftgeschwindigkeit nicht festgestellt. Die Lüftung lief beim dargestellten Versuch ohne Zeitverzögerung mit dem Brandbeginn an.

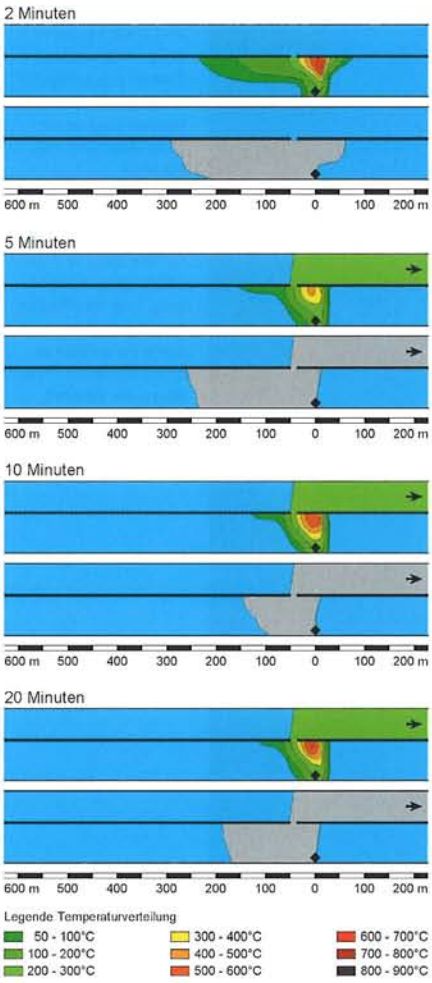
Verglichen mit den bei natürlicher Längslüftung gemessenen Temperaturen waren die Maximaltemperaturen im Deckenbereich beim Betrieb der Strahlventilatoren massgeblich kleiner. Im Bereich des Brandes erreichten sie Werte von 300 bis 400 °C. Im 250 m entfernten Portalbereich betrugen die Temperaturen noch etwa 200 °C.

Lüftung mit Rauchabsaugung (Abb. 8)

Im Rahmen des Memorial Tunnel Test Programms wurden auch zahlreiche Versuche mit Rauchabsaugungen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde im Tunnel eine Zwischendecke mit einem Abluftkanal eingebaut (Abb. 3b). Es wurden Tests mit verschieden grossen und unterschiedlich platzierten Absaugöffnungen durchgeführt. Zudem wurde die Absaugleistung und die Zeitspanne bis zum Anlaufen der Lüftung variiert. Die Abbildung 8 zeigt die Temperatur- und Rauchausbreitung beim Versuch mit einer Brandleistung von 50 MW. Die Rauchabsaugung bei diesem Versuch erfolgte über eine einzelne 18 m^2 grosse knapp 50 m vom Brandherd stromabwärts platzierte Öffnung. Die Absaugmengen bei den Versuchen mit konzentrierter Rauchabsaugung waren sehr gross. Im vorliegenden Fall betrug sie etwa 400 m^3/s. Die Rauchabsaugung bzw. Lüftung lief zwei Minuten nach Brandausbruch an. Aus den in Abbildung 8 dargestellten Messresultaten wird ersichtlich, dass die Temperatur und Rauchausbreitung durch das konzentrierte Absaugen der Rauchgase auch bei der vergleichsweise grossen Brandleistung auf eine Länge von 100 bis 200 m begrenzt werden konnte.

Erkenntnisse aus den Brandversuchen

In einem natürlich belüfteten Tunnel können sich die bei einem Brand entstehenden Rauchgase sehr schnell über eine grosse Distanz ausbreiten. Bei den Brandversuchen im Memorial Tunnel wurden Ausbreitungsgeschwindigkeiten von 4 m/s und mehr registriert. Zudem ist kaum mit einer Schichtung heisser Rauchgase zu rechnen. In den erwähnten Versuchen war drei Minuten nach dem Brandausbruch der gesamte Tunnelquerschnitt mit Rauch gefüllt. Vergleicht man die Geschwindigkeit der Rauchausbreitung mit der Fluchtgeschwindigkeit von zu



8

8: Die Temperatur- und Rauchausbreitung im Memorial Tunnel bei Lüftung mit Rauchabsaugung und einer Brandleistung von 50 MW.

8: Diffusion de la température et de la fumée dans le «Memorial Tunnel» avec une ventilation aspirant la fumée et une puissance incendiaire de 50 MW.

Fuss flüchtenden Personen von rund 1 m/s pro Sekunde wird klar, dass eine Selbstrettung der Tunnelbenützer bei solchen Bedingungen kaum möglich ist [9] [10]. Die Beeinflussung der Temperatur- und Rauchausbreitung bei einem Fahrzeugbrand im Tunnel ist darum von zentraler sicherheitstechnischer Bedeutung. Die Versuche im Memorial Tunnel zeigten deutlich, dass die Temperatur- und Rauchausbreitung im Brandfall durch die Tunnellüftung massgeblich beeinflusst wird [4]. Im Vergleich zu diesen Versuchen, sind die im Rahmen des EUREKA-Projekts [5] durchgeführten Brandversuche für Strassentunnel als weniger relevant zu beurteilen. Die Gründe dafür sind der kleine Tunnelquerschnitt sowie die Tunnellüftung, die nicht den heutigen Anlagen entsprach. Mit einer mechanischen Längslüftung kann die Temperatur- und Rauchausbreitung auch im Fall grosser Brandleistungen beherrscht werden. Mit Hilfe der Stahlventilatoren war dies bei den Versuchen im Memorial Tunnel bis zu Brandleistungen von 100 MW möglich [4]. Um den Rauch vollständig auf eine Seite zu verdrängen, das heisst ein Zurückströmen von Rauch («back-layering») zu verhindern, war beim 100 MW-Brand eine Luft- bzw. Längsgeschwindigkeit im Tunnelfahrraum von rund 3 m/s notwendig [4]. Weil der Rauch mit der Längslüftung zu einem Portal hin verdrängt wird, ist dieses Lüftungsregime bei Tunneln mit Richtungsverkehr im Allgemeinen mit einer geringen Gefährdung der Verkehrsteilnehmer verbunden [7]. Bei Gegenverkehrtunnels ist nach einem Ereignis auf beiden Seiten der Unfallstelle mit Fahrzeugen zu rechnen, weshalb der Betrieb der Längslüftung in einem solchen Fall problematischer ist.

Die Memorial Tunnel-Versuche zeigten, dass mit einer konzentrierten und leistungsfähigen Rauchabsaugung nahe beim Brand die Temperatur- und Rauchausbreitung massgeblich reduziert werden kann [4]. Gemäss den neuen schweizerischen Richtlinien zur Projektierung von Strassentunnels [1] [2] muss die Lüftungsanlage bei Gegenverkehrtunnels die Möglichkeit bieten, Brandrauch örtlich abzusaugen. Dies gilt auch bei Tunnels mit einer gewissen Länge. So konzipierte moderne Rauchabsaugungen können eine anfängliche Rauchausbreitung zwar nicht vollständig verhindern, sie sind aber in der Lage, die verrauchten Bereiche nach kurzer Zeit auf 100 bis 200 m zu begrenzen [7]. Dazu müssen in einem Brandabschnitt von ungefähr 300 m Länge jedoch Absaugleistungen von mindestens 150 m^3/s pro Sekunde vorhanden sein [7]. Die Wirksamkeit einer Rauchabsaugung ist neben der genügend grossen Absaugmenge auch massgeblich von der schnellen und präzisen Detektion des Brandes abhängig.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass bei Brandereignissen in Strassentunnels, die Lüftung das zentrale sicherheitstechnische Element ist. Lüftungsanlagen, die nach den neuen schweizerischen Richtlinien konzipiert sind, ermöglichen auch bei grossen Bränden die Selbstrettung der Verkehrsteilnehmer und den Einsatz der Feuerwehr [9] [10]. Die mit einem Brand verbundenen Risiken sind aus diesem Grund bei Tunnels mit neuen Lüftungsanlagen sehr viel kleiner als bisher. Ebenso werden auch durch Erneuerungen der Brandlüftungen in älteren Tunnels massive Sicherheitsgewinne erreicht. ■

Literatur

[1] Norm SN 531 197 Projektierung Tunnel, Grundlagen (in Vorbereitung).
[2] Norm SN 531 197/2 Projektierung Tunnel, Strassentunnel (in Vorbereitung).
[3] PIRAC, Committee on Road Tunnels: Fire and Smoke Control in Road Tunnels, AIPCR – Association Mondiale de la Route, Paris 1999.
[4] Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program – Comprehensive Test Report, Massachusetts Highway Department, Federal Highway Administration.
[5] EUREKA Project EU 499 Firetun: Fires in Transport Tunnels – Report on Full-Scale Tests, Studiengesellschaft für Stahlanwendung e.V., Düsseldorf 1995.
[6] Kunsch, J.-P., Zumsteg, F.: Rauchausbreitung in Tunnels – Die Herausforderung im Fall eines Brandes im Tunnel, tec21, Nr. 9/2001, Zürich 2001.
[7] Bettelini, M.: Frischer Wind im Tunnel – Grundlagen und aktuelle Entwicklungen für die Lüftung von Strassentunnels, tec21, Nr. 48/2003, Zürich 2003.
[8] Richter, E.: Temperatur- und Rauchausbreitung: Auswirkungen auf den baulichen Brandschutz, in: Brandschutz in Verkehrstunneln, Internationale Konferenz, Dresden 1995.
[9] Schweizerischer Feuerwehrverband, Technische Wegleitung für die Intervention bei Bränden in Strassentunneln, August 2004.
[10] Schuler, D., Bürkel, P.: Intervention bei Bränden in Strassentunneln, Forschungsauftrag ASTRA 2002/005 auf Antrag des Schweizerischen Feuerwehrverbandes, August 2004.