

Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 127 (2001)
Heft: 9: Lawinen

Artikel: Rauchausbreitung in Tunnels: die Herausforderung im Falle eines Brandes im Tunnel
Autor: Kunsch, Jean-Paul / Zumsteg, Franz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-80127>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 08.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Rauchausbreitung in Tunnels

Die Herausforderung im Falle eines Brandes im Tunnel

Nach den Tunnelbränden der letzten Jahre mit zahlreichen Opfern wurden die aerodynamischen Massnahmen zur Ereignisbewältigung, wie die Kontrolle der Rauchgase, neu überdacht und in entsprechenden Richtlinien zusammengefasst. Wie funktioniert die Physik eines Tunnelbrandes, was gibt es für Ansätze zur Kontrolle der Rauchgase?

Fahrzeugbrände in Tunnels sind keine seltenen Ereignisse. Bei einer Gesamtlänge von rund 170 km aller Nationalstrassentunnels in der Schweiz (Stand 1. Januar 1999), einem mittleren Verkehr von 40 000 Fahrzeugen pro Tag und einer mittleren Häufigkeit von drei Bränden auf 100 Millionen Fahrzeugkilometer ist etwa alle vier Tage mit einem Fahrzeugbrand in einem Tunnel zu rechnen. Die meisten Fahrzeugbrände in Tunnels laufen jedoch glimpflich ab. Als Gründe dafür können kleine Brandlasten, eine rasche Bekämpfung durch die Fahrzeuglenker sowie ein grosses Luftvolumen im Tunnel genannt werden. Weiter sind eine ausreichende natürliche oder mechanische Lüftung, eine hohe Wärmeaufnahme durch die Tunnelwandung, aber auch ein grosser Wärmetransport durch die Luftströmung zu nennen. Und selbstverständlich verhindert das Vorhandensein von Fluchtmöglichkeiten Schäden an Leib und Leben.

Die Brandkatastrophen im Pfänder-, Tauern- und Montblanc-Tunnel machen aber deutlich, dass aus einem anfänglich kleinen Brand durch unglückliche Gegebenheiten, die teilweise nicht vorhersehbar und beeinflussbar waren, fatale Ereignisse entstehen können. Als Beispiele solcher Einflüsse, die allein oder im Zusammenwirken gefährlichste Folgen haben können, sind zu nennen:

- Brand einer Fracht mit grosser Wärmelast
- grosse Verkehrsdichte und geringer Fahrzeugabstand
- falsches Verhalten der Tunnelbenutzer durch Unterschätzen der Gefahr
- späte Branddetektion und lange Reaktionszeit der Brandprogramme
- nicht angepasste Reaktion der Lüftung
- zu geringe Kapazität der Lüftung und
- unzureichende Fluchtmöglichkeiten.

Die Brandkatastrophe im Strassentunnel unter dem Montblanc im März 1999 mit 39 Todesopfern zeigte



Tauern-tunnel am 29. 5. 1999 (Bild: Keystone)

aber auch auf dramatische Weise, dass die Sicherheitsaspekte beim Tunnelverkehr nicht losgelöst von verkehrspolitischen Überlegungen und wirtschaftlichen Zwängen behandelt werden können. Die erwähnten, erst relativ kurz zurückliegenden Brandkatastrophen brachten die Sicherheitsproblematik in Tunnels verstärkt ins Bewusstsein einer breiteren Öffentlichkeit und erhöhten den politischen Druck zu einer generellen Überprüfung der Sicherheit der bestehenden Eisenbahn- und Strassentunnels. Die beim Brand im Eisenbahntunnel unter dem Ärmelkanal im Jahr 1997 gemachten Erfahrungen beeinflussten die sicherheitstechnischen Überlegungen bei der Systemwahl der in der Schweiz geplanten langen Eisenbahntunnels der Neat [1]. Unter der Leitung des Astra wurde eine Arbeitsgruppe, die sogenannte «Tunnel Task Force», ins Leben gerufen, die das Ziel hatte, die Sicherheitsaspekte aller Strassentunnels zu überprüfen und einen Massnahmenkatalog zu erarbeiten. Dieser Massnahmenkatalog [2] zur Erhöhung der Sicherheit in Strassentunnels ist in vier Gruppen eingeteilt:

Als erstes die Massnahmen bei den Verkehrsteilnehmern: Sie umfassen grösstenteils Verhaltensregeln im Ereignisfall, die mehrfach in der Tagespresse veröffentlicht wurden. Mehrere Massnahmen zielen auf die Lastwagen und generell auf eine Kontrolle des Schwerverkehrs ab. Zudem sollen die Vorschriften für Gefahrguttransporte international verschärft werden.

Dann die Massnahmen an den Fahrzeugen: Sie betreffen sowohl Bau und Ausrüstung (z.B. Feuerlöscher bei Gefahrguttransporten, Anordnung der Treibstofftanks) als auch die Nachprüfung der Fahrzeuge (z.B. der Bremsen).

Weiter sind die Massnahmen im Betrieb zu nennen: Relevant sind dabei besonders diejenigen im Ereignisfall. Diese beinhalten u.a. die Erstellung von Einsatzkonzepten, die Überprüfung der jeweiligen Ereignismanagements und die Ausbildung von Ereignisdiensten. Schlussendlich die Infrastruktur: Hier sind die baulichen Massnahmen (Anzahl Röhren, Lüftungssysteme, Fluchtwege, Schutzräume usw.) zu erwähnen und die ausrüstungsseitigen Massnahmen, welche die Sicherheitseinrichtungen, Ereignisdetektion (Erkennen und Reagieren), Benutzerwarnung usw. umfassen.

Ansätze zur Kontrolle der Rauchgasausbreitung

Ein wesentlicher Bestandteil der Tunnelausrüstung ist die Lüftung. Die Sofortmassnahmen zielen einerseits auf eine Überprüfung und Verbesserung der bestehenden Ausrüstung und andererseits auf die Neufassung der Richtlinien für Systemwahl, Dimensionierung und Betrieb der Tunnellüftungsanlagen ab. Eine neue Richtlinie zur Lüftung der Strassentunnels [3] wurde erstellt, welche die Planung mittel- bis langfristiger Massnahmen, aber auch die Auslegung neuer Tunnelsysteme unterstützen soll. Die neue Richtlinie gibt eine klare Leitlinie für die Wahl des Lüftungssystems und formuliert Mindestanforderungen für die Dimensionierung der Lüftungsanlage, deren Steuerung und Wartung sowie für die Ausführung von Fluchtwegen.

Rauchabsaugung

Im Normalbetrieb ist der Einsatzbereich der Systeme mit Längslüftung beschränkt durch eine maximal zulässige Luftgeschwindigkeit im Fahrraum. Bei längeren Tunnels kommen Systeme mit Abluft- und Zuluftkanälen zum Einsatz. Die Zuluft wird auf Fahrbahnniveau eingeblasen. Zusammen mit einer starken Reduktion des Frischlufteintrags im Abschnitt eines Brandes wird damit eine Störung einer möglichen Rauchschichtung verhindert. Im Brandfall muss das Lüftungssystem gezielt für die Rauchabsaugung durch Öffnungen oder Klappen eingesetzt werden können. Für Längen der Absaugkanäle ab 600 m müssen die Klappen einzeln steuerbar sein, was eine brandabschnittsbezogene Rauchgasabsaugung erlaubt. Zudem muss die Absaugung rasch erfolgen, was eine rasche Ereignisdetektion voraussetzt. Damit wird eine wirksame Nutzung der entscheidenden ersten Minuten nach Brandbeginn zur Selbstrettung und zur Ergreifung weiterer Massnahmen ermöglicht. Zu erwähnen ist, dass die für die Dimensionierung der Lüftung benötigten Vorgaben heute in erster Linie durch die Absaugkapazität der Lüftung im Brandfall bestimmt werden und erst in zweiter Linie durch die Schadstoffemissionen, die mit der technischen Entwicklung der Fahrzeugmotoren mit der Zeit ständig zurückgehen.

Die physikalisch-technischen Grundlagen, auf denen die Richtlinien aufgebaut sind, entstammen häufig Brandversuchen und Messkampagnen wie den Memorial-Tests [4] und den Eureka-Versuchen [5], welche im Rahmen von EU-Forschungsprogrammen durchgeführt wurden. Die Richtlinien werden laufend aktualisiert, sowohl aufgrund des experimentellen Datenmaterials, als auch der Erfahrungen, die während des Betriebs und der Ereignisse in Tunnels gemacht werden.

Die neue Richtlinie Tunnellüftung [3] nennt zwei Dimensionierungsbrände als Normereignisse zur Auslegung der Einrichtungen und zur Festlegung der Abläufe. Es ist klar, dass die Brandlast des Dimensionierungsbrandes mit der hohen Brandleistung von 30 MW wohl die meisten, jedoch nicht alle denkbaren Brände in Tunnels abzudecken vermag. Das Ziel besteht darin, den Brand nicht unbeherrschbar werden zu lassen und den Tunnelbenutzern ausreichend Zeit zur Flucht in sichere Zonen zu bieten. Der zweite Dimensionierungsbrand mit 5 MW geht auf die Brände ein, die meist ohne schwerwiegende Folgen ablaufen. Diese Brände beinhalten jedoch aufgrund der möglichen starken Rauchentwicklung trotzdem ein beträchtliches Gefahrenpotential.

Brandversuche in realen Tunnels hatten bisher immer kleine Brandleistungen. Aus solchen Versuchen kann nicht auf das Verhalten eines Grossbrandes geschlossen werden. Brandversuche haben somit hauptsächlich die Funktion, den Einsatz der Rettungskräfte zu schulen und die Strömungsverhältnisse bei sogenannten «Kaltbränden» zu visualisieren. Als Kaltbrände werden Brände bezeichnet, deren Auftrieb nur in unmittelbarer Nähe des Brandherdes wirksam ist. Verschiedene Brandversuche haben gezeigt, dass besonders bei gerin-

gen Brandlasten der Rauch im Tunnel über sehr grosse Längen verschleppt wird.

Eine der wesentlichen Neuerungen in der Auslegung von Tunnellüftungsanlagen besteht in der Möglichkeit der örtlichen Absaugung von Brandrauch mittels steuerbarer Klappen. Dazu muss neben der Zeit des Brandausbruchs auch der Ort des Brandes möglichst genau bekannt sein. Als minimaler Volumenstrom im Brandabschnitt von 300 m werden 3 m/s multipliziert mit dem Fahrraumquerschnitt in m² gefordert. Im Vergleich zur früheren Praxis entsteht dadurch eine rund zehnmal grössere Absaugdichte (m³/s, km) im Bereich des Brandherdes. Bei der Dimensionierung der Klappen muss die Querschnittsfläche mindestens so gross bemessen sein, dass die vertikale Geschwindigkeit der Rauchgase beim Ansaugen einen Maximalwert nicht überschreitet. Damit wird sichergestellt, dass keine Frischluft durch eine eventuell vorhandene Rauchschicht mitangesaugt werden kann.

Für die Berücksichtigung des natürlichen und des brandbedingten Auftriebs bei der Lüftungsauslegung für Tunnels mit Längsneigung enthält die Richtlinie konkrete Angaben. Brandversuche haben sehr deutlich gezeigt, dass diese beiden Einflüsse nicht unterschätzt werden dürfen. Als lüftungstechnische Massnahme zum Ausgleich der Auftriebskraft wird eine erhöhte Absaugkapazität oder die Verwendung von Strahlventilatoren vorgeschlagen.

Die neuen Forderungen nach der genannten Richtlinie führen nicht in jedem Fall zu einer Erhöhung der Lüftungskapazität in Tunnels; sie stellen allerdings höhere Anforderungen an Detektion, Instrumentierung und Steuerung der Anlagen. Dies wiederum setzt einen grösseren Wartungs- und Kontrollaufwand voraus. Dabei besteht das Ziel, diesen Aufwand, z.B. zur Kontrolle der Funktion der Klappen und der Dichtheit der Absaugkanäle, soweit dies sinnvoll ist, zu automatisieren.

Im Zusammenhang mit den Eisenbahntunnels ist die geplante Ereignislüftung in den Nothaltestellen der Neat (Neue Eisenbahn-Alpentransversale) ein wichtiges Anwendungsbeispiel für eine Rauchabsaugung im Falle eines brennenden Zuges in der Nothaltestelle (NHS). Die Varianten mit punktueller Absaugung (Absaugung in der Mitte oder an der Spitze der NHS) bieten für die Passagiere gute Evakuationsmöglichkeiten aus der NHS. Die wesentlich aufwändigere Variante mit gezielter Absaugung über der Brandstelle würde noch bessere Evakuationsmöglichkeiten bieten, aber hier wird das Risiko einer falschen Steuerung der Absaugung, die zu einer markanten Verschlechterung der Evakuationsmöglichkeiten führen würde, als hoch eingeschätzt.

Die Brandkatastrophe im Montblanc-Strassentunnel im März 1999 hat gezeigt, dass eine unsachgemässe Bedienung der Installationen, insbesondere der Lüftungsanlage, im Brandfall zu einer Verschlechterung der Rettungschancen und zu einer zusätzlichen Gefährdung der Tunnelbenutzer beitragen kann. Da die Ansaugklappen im Montblanc-Tunnel nicht einzeln ansteuerbar waren, konnte die Absaugkapazität nicht auf die Brandstelle konzentriert werden. Zudem trug

die Zweckentfremdung des Abluftkanals als Frischluftkanal zum Zeitpunkt des Brandes zu einer Eskalation der Katastrophe bei: Die für eine Absaugung der Rauchgase an der Decke angebrachten Absaugöffnungen verströmten nun frische Luft. Die von oben kommende Luft zerstörte die Schichtung bereits an der Quelle und die Rauchgase wurden verwirbelt. Deshalb nahm die Qualität der Atemluft auf Fahrbahnniveau drastisch ab und die Sicht wurde derart getrübt, dass eine Flucht rasch erschwert wurde.

Luftvorhänge und Wasserbarrieren

Luftvorhänge werden als weitere Möglichkeit der Kontrolle der Rauchgase diskutiert [6]. Der Luftvorhang besteht aus einem Freistrahle, der mit einem Neigungswinkel gegenüber der Vertikalen aus der Decke austritt und den Durchtritt von Wärme und Rauchgasen verhindern soll. Die Auslegung ist recht anspruchsvoll und weitere Forschung ist erforderlich, um das physikalische Verständnis zu verbessern und um die relevanten Parameter zu identifizieren und zu optimieren. Es hat sich zudem herausgestellt, dass die Aufskalierung der Daten aus Laborexperimenten auf grosse Massstäbe bei Luftvorhängen noch sehr problematisch ist und die vorhandenen Resultate aus Laborversuchen somit noch nicht allgemeingültig zu interpretieren und zu verwenden sind.

Zu erwähnen ist zudem das neue, von einer Firma in Pavia entwickelte System mit Wasserbarrieren [7]. Vertikale gesprühte Wasserwände werden von Spritzdüsen erzeugt, die an flexiblen, am Tunnelgewölbe befestigten Rohrleitungen angebracht sind. Dadurch wird der Brandherd zwischen zwei Wasserwänden, welche die gesamte Tunnelquerschnittsfläche einnehmen, eingegrenzt und ein Fluchtweg wird den Tunnelbenutzern gesichert. Sowohl die Italienischen Staatsbahnen als auch Betreiber von Strassentunnels haben ihr Interesse an diesem System bekundet.

Verdrängen von Brandrauch: Die kritische Luftgeschwindigkeit

Die Beeinflussung der Längsgeschwindigkeit stellt, nebst der raschen, brandabschnitts-bezogenen Rauchabsaugung, eine wichtige lüftungstechnische Massnahme im Brandfall in einem Strassentunnel dar. Im Gegensatz zu den Systemen mit Zwischendecke, welche die Rauchabsaugung ermöglichen, kommen bei Tunnels bis maximal 3000 m, je nach Verkehrsart, Strahlventilatoren, die eine Längsströmung erzeugen, zum Einsatz. Dieses Lüftungssystem wird als Längslüftung bezeichnet. Je nach Verkehrsart (Richtungsverkehr, Stauhäufigkeit, Gegenverkehr) und Tunnelneigung haben die Strahlventilatoren die Aufgabe, entweder den Brandrauch in den Tunnelabschnitt ohne Fahrzeuge abzutreiben (Richtungsverkehr ohne Stau), oder die Ausbreitungsgeschwindigkeit zu reduzieren (Gegenverkehr, Richtungsverkehr mit Stau). Beispielsweise können die Strahlventilatoren in einem geeigneten Tunnel mit Fahrtrichtung im Gefälle den Auftrieb der Rauchgase kompensieren, d.h. die Rauchgase nach unten treiben. Dadurch bleibt der höher gelegene

Bereich mit dem vor der Brandstelle aufgestauten Verkehr rauchfrei [3].

In besonderen Fällen kann die Längsströmung die Rauchgase bis zur Brandstelle zurückdrängen. Damit wird erreicht, dass zumindest während einer gewissen Zeit eine zur Selbstrettung erforderliche rauchfreie Zone in der Nähe des Brandherdes erhalten bleibt. Die dazu notwendige minimale Geschwindigkeit der Längsströmung wird «kritische Geschwindigkeit» genannt. Zudem trägt der Luftstrom, der zwar zur Anfackung des Feuers beitragen kann, zur kurzfristigen Kühlung und Sauerstoffversorgung der zur Selbstrettung benutzbaren rauchfreien Zone bei.

An der ETH Zürich wurde ein Modell zur Berechnung der kritischen Geschwindigkeit entwickelt [8]. In Bild 1 ist die kritische Geschwindigkeit

$$u^* = u / (g \cdot H)^{1/2}$$

in Funktion der Brandlast

$$Q^* = Q / (\rho_a \cdot c_p \cdot T_a \cdot g^{1/2} \cdot H^{5/2})$$

in dimensionsloser Form dargestellt. Dabei ist H die Höhe des Fahrtraums, g die Erdbeschleunigung, ρ_a die Dichte, T_a die Temperatur und c_p die spezifische Wärme der Frischluft.

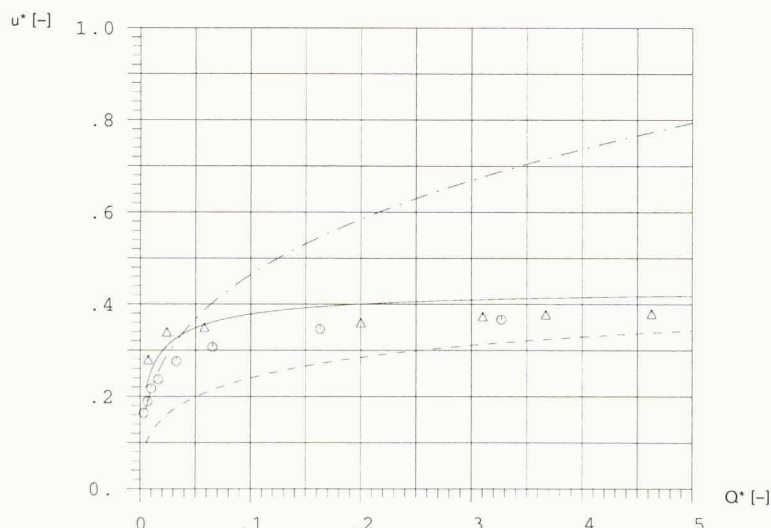
Gerade bei grossen Brandlasten mit beträchtlichem Auftrieb zeigt sich, dass die kritische Geschwindigkeit unabhängig von der jeweiligen Brandlast ist. Das Modell wurde überprüft, u.a. mit Daten aus Brandversuchen in einer 2,5 m hohen Testgalerie. Die während der Versuche in der Galerie angetroffenen Wärmeleistungen bis zu 5 MW können, mittels Ähnlichkeitsüberlegungen, auf einen realen Tunnel aufskaliert werden. Bei einer Fahrtraumhöhe von 5 m, was bei Strassentunnels mit Lüftungskanal über einer Zwischendecke üblich ist, würde dies einer Brandlast von 30 MW entsprechen.

Ein Anwendungsbeispiel für die kritische Lüftung befindet sich z.B. im Sicherheitskonzept des im Rahmen der Ausbauetappe des Flughafens Zürich erstellten Personen Transport Systems PTS [13]. Bei diesem System handelt es sich um zwei rund 40 m lange, luftkissengetragene Züge, die in zwei 900 m langen parallel verlaufenden, unterirdischen Tunnelröhren einen Pendelverkehr zwischen den Hauptterminals und dem Midfieldterminal aufrechterhalten. Das Sicherheitskonzept sieht eine Kontrolle der Rauchgase im Brandfall durch Längslüftung vor. Dabei sind die mittels kritischer Lüftung rauchfrei gehaltenen Stationen bzw. Tunnelabschnitte als Rettungswege vorgesehen.

Schlussfolgerungen

Dieser Aufsatz soll die Möglichkeiten zur Kontrolle der Rauchgase im Fall eines Tunnelbrandes aufzeigen. In der neuen Richtlinie werden verbindliche Mindestanforderungen an die Lüftungsanlage von Strassentunnels formuliert. Grosse Bedeutung kommt einer raschen, brandabschnittsbezogenen Absaugung der Rauchgase mittels steuerbarer Klappen zu. Zudem kann die Ausbreitung der Rauchgase mittels geeigneter Längslüftung gesteuert werden. Brandversuche werden auch in Zukunft für die Untersuchung des Rauchgasverhaltens bei Tunnelbränden erforderlich sein.

Jean-Paul Kunsch, PD Dr., Institut für Fluidodynamik, ETH Zentrum, 8092 Zürich, Franz Zumsteg, Dr., Ingenieurbüro für Tunnellüftung, Energie und Umwelt, Bahnhofstrasse 13, 5600 Lenzburg



Kritische Lüftungsgeschwindigkeit bei horizontalem Tunnel: Modelle und Versuchsdaten

Modell ETHZ [8]: —

Thomas [9]: - - -

Danziger & Kennedy [10]: - - - - -

Versuche: [11] Symbol Δ und [12] Symbol o (Bild: ETHZ)

Literatur

- 1 Personensicherheit beim Betrieb langer Eisenbahntunnels. Diskussion von Konzepten für die Betriebsphase. Leitg. Prof. Jörg Schneider ETHZ, Patronat Dr. M. Friedli BAV, ETHZ, 17. Oktober 1997
- 2 Bundesamt für Strassen: Bericht der «Tunnel Task Force». Schlussbericht. 23. Mai 2000, Bern
- 3 Bundesamt für Strassen: Richtlinie Systemwahl, Dimensionierung und Betrieb von Tunnellüftungsanlagen. Entwurf Dezember 2000, Bern
- 4 Massachusetts Highway Department and Federal Highway Administration: Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program. Prepared by Bechtel/Parsons Brinckerhoff, Test Report, November 1995
- 5 Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V.: Brände in Verkehrstunnels. Bericht über Versuche im Massstab 1:1. Juli 1998, Projekt 145.2 (EUREKA-Versuche), Düsseldorf
- 6 Guyonnaud L., Sollicec C., Dufresne de Virel M., Rey C.: Design of air curtains used for area confinement in tunnels. Experiments in Fluids 28 (2000) 377-384
- 7 Jung H.: Wasserwände sichern Flucht im Tunnel. VDI-Nachrichten. 17. November 2000 Nr.46
- 8 Kunsch J.P.: Critical velocity and range of a fire-gas plume in a ventilated tunnel. Atmospheric Environment 33 (1999) 13-24
- 9 Thomas P.H.: The movement of smoke in horizontal passages against an air flow. Fire Research Note 723/1968, Fire Research Station, 1968
- 10 Danziger N.H., Kennedy W.D.: Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood Canyon Tunnels. Proc. 4th Int. Symp. Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp 169-186, 1982
- 11 Bettis R.J., Daish N., Jagger S.F., Linden P.F.: Control of Smoke Movement Close to a Tunnel Fire. Second International Conference «Safety in Road and Rail Tunnels», Granada, Spain, 3.-6. April 1995
- 12 Megret O., Vauquelin O., Casale E.: An experimental study of critical velocity and the influence of source diameter. International Conference «Tunnel Fires and Escape from Tunnels», 5.-7. Mai 1999, Lyon, France
- 13 Nahke J., v. Witzleben R.: Sicherheitsbericht PTS. E500 Personentransportsystem, Tunnel und System, Flughafen Immobilien-Gesellschaft, Zürich, 17. Dezember 1999