Zeitschrift: Tec21

Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

Band: 129 (2003)

Heft: 48: Frischer Wind im Tunnel

Artikel: Frischer Wind im Tunnel: Grundlagen und aktuelle Entwicklungen für die Lüftung von Strassentunnels

Autor: Bettelini, Marco

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-108875

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: 18.02.2026

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

Marco Bettelini

Frischer Wind im Tunnel

Grundlagen und aktuelle Entwicklungen für die Lüftung von Strassentunnels

Die Lüftung eines Strassentunnels muss mehr können, als warme Luft und stinkende Abgase ins Freie zu befördern. Im Brandfall entscheiden nämlich die Effizienz der Rauchabsaugung und die schnelle Reaktion der Lüftungssteuerung darüber, ob ein Fahrzeugbrand ein lokales Ereignis bleibt oder ein katastrophales Ausmass annimmt. Simulierte Brandszenarien sind wertvolle Hilfsmittel für die Konzeption und Optimierung von Tunnellüftungen mit hohem Sicherheitsstandard.

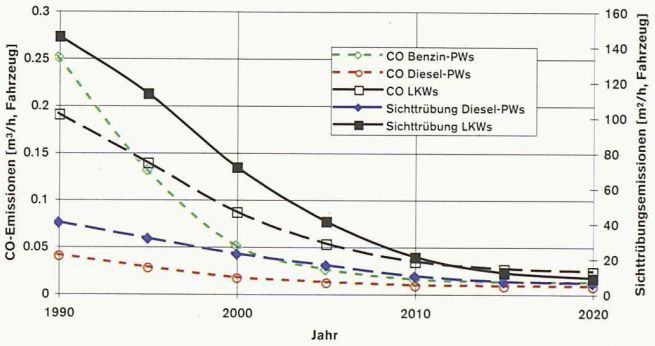
Die Lüftung eines Strassentunnels muss die folgenden Hauptfunktionen erfüllen:

- Aufrechterhaltung ausreichender Luftqualität im Normalbetrieb, um die Gesundheit der Verkehrsteilnehmer nicht zu gefährden
- Aufrechterhaltung ausreichender Sichtverhältnisse im Normalbetrieb zur Gewährleistung der Fahrsicherheit
- Gewährleistung der Sicherheit im Brandfall (Selbstrettung, Personenrettung, Brandbekämpfung)

Bezüglich der Immissionen von Luftschadstoffen in der Umgebung und des Energieverbrauchs ist die Lüftung umweltschonend auszulegen und zu betreiben.

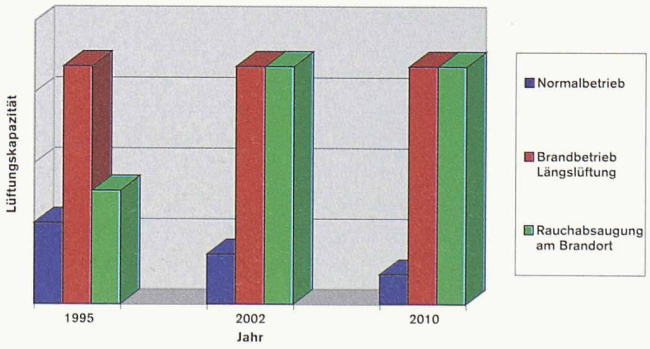
Interessant ist die Verschiebung der Auslegungsschwerpunkte von Tunnellüftungen in neuerer Zeit. Bis vor etwa 15 Jahren stand der Normalbetrieb im Vordergrund. Die Anforderungen an die Lüftungssysteme waren durch die zur Verdünnung der hohen Schadstoffkonzentration in den Rauchgasen erforderlichen Frischluftmengen bestimmt. Die erfreuliche Abnahme der Fahrzeugemissionen (Bild 1) hat trotz der Zunahme des Verkehrsaufkommens eine wesentliche Lockerung der Anforderungen für den Normalbetrieb zur Folge. Auf der anderen Seite führen die deutlich gestiegenen Sicherheitsansprüche heute oft zu Lüftungssystemen, deren Konzeption und Dimensionierung durch die Sicherheit im Brandfall geprägt wird (Bild 2), vergleiche dazu auch[1].

Die Bedeutung der Tunnellüftung im Brandfall wurde unter anderem durch die 1993–1995 im Memorial Tunnel (USA) durchgeführten Brandversuche im Grossmassstab deutlich. Dabei wurde festgestellt, dass die Rauchausbreitung ohne Lüftung ausserordentlich schnell sein kann: Nach 3–4 Minuten war der 850 m lange, eine Steigung von 3,2 % aufweisende Tunnel mit Rauch gefüllt. Unter diesen Umständen ist eine Selbstrettung der Tunnelbenützer undenkbar.



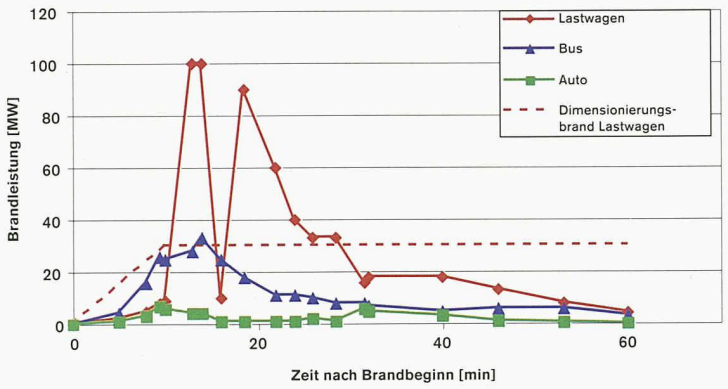
1

Entwicklung der Fahrzeugemissionen in der Schweiz an den Beispielen CO und Sichttrübung. Grundlage: Schweizerische Richtlinie Tunnellüftung (Bilder: Lombardi SA)



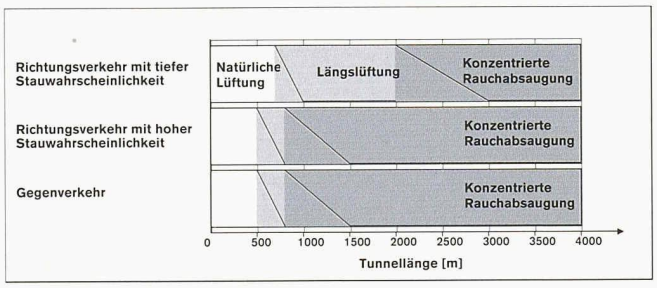
2

Schematische Darstellung der Anforderungen an Tunnellüftungen im Normalbetrieb und im Brandfall. Die Luftmengen sind vor allem von der Tunnellänge und vom Verkehrsaufkommen abhängig



3

Gemessene Brandstärken und -verläufe im Tunnel (Eureka-499-Messkampagne, 1991–1992)



4

Einsatzbereiche der Lüftungssysteme gemäss der Schweizerischen Richtlinie Tunnellüftung. In den Übergangsbereichen sind weitere Einflussfaktoren, wie die Verkehrsmenge (gesamt und Lkw-Anteil) und die Tunnelsteigung, zu berücksichtigen

Ältere Anlagen sind oft sehr grosszügig dimensioniert und werden zum Teil den neuen Sicherheitsanforderungen gerecht, obwohl sie aufgrund ganz anderer Kriterien konzipiert und ausgelegt wurden. Anderseits musste eine Reihe von Anlagen, welche in den Jahren vor dem Brand im Montblanc-Tunnel geplant wurden, aus Sicherheitsgründen verbessert werden.

Lüftungssysteme

Es kann grundsätzlich zwischen drei Lüftungsprinzipien unterschieden werden:

- Natürliche Lüftungen
- Längslüftungen
- Lüftungen mit konzentrierter Rauchabsaugung im Brandfall, mit oder ohne Frischluftzufuhr (Halbquer- oder Querlüftungen)

Sicherheitstechnisch steht die Kontrolle der Rauchausbreitung im Vordergrund. Dies erfolgt im Falle der Längslüftung in der Regel mittels Strahlventilatoren. Als Spezialfall der Längslüftung sind die Systeme mit Mittenabsaugung anzusehen. Falls eine Längslüftung nicht mehr zulässig ist, müssen komplexere Lüftungssysteme realisiert werden. Es wird hauptsächlich zwischen Querlüftungen und Halbquerlüftungen unterschieden. Bei Letzteren besteht kein Gleichgewicht zwischen verteilter Zu- und Abluft.

Anforderungen im Brandfall

Im Brandfall muss die Lüftung die Rauchausbreitung in geeigneter Weise kontrollieren, um die Evakuation der Tunnelbenützer und die Brandbekämpfung zu unterstützen. Ein untergeordnetes Ziel ist der Schutz der Infrastruktur. Die Rauchentwicklung hängt in erster Linie von der Brandleistung ab. Typischerweise wird von einem Dimensionierungsbrand von 30 MW Brandleistung mit einer Rauchentwicklung von etwa 80 m^3/s ausgegangen. Reale Brände können von diesem typischen Verlauf jedoch wesentlich abweichen, wie aus Bild 3 hervorgeht.

Längslüftungen ohne Rauchabsaugung

Die Einsatzgrenzen der Längslüftung, d.h. die maximale Tunnellänge, bei welcher eine Längslüftung noch zulässig ist, wurden früher weitgehend von energetischen und wirtschaftlichen Überlegungen bestimmt. Die erforderliche Anzahl Strahlventilatoren nahm mit zunehmender Tunnellänge aufgrund der hohen Fahrzeugemissionen überproportional zu. Diese Grenze ist heute hingegen fast ausschliesslich durch Sicherheitsanforderungen bestimmt. Sie muss deshalb normativ festgelegt werden, um einen gleichmässigen Sicherheitsstandard innerhalb des Anwendungsgebietes der Norm zu gewährleisten. Der Längenbereich, in dem Längslüftungen in der Schweiz heute als zulässig angesehen werden, ist in Bild 4 dargestellt. In den Übergangsbereichen müssen weitere Risikofaktoren, insbesondere die Verkehrsmenge (gesamt und Lkw-Anteil) und die Tunnelsteigung, berücksichtigt werden.

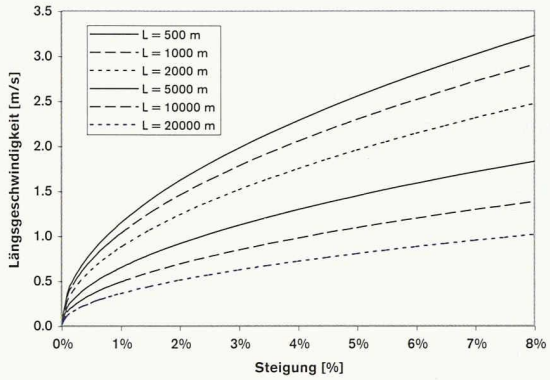
Mit einer Längslüftung kann nur die Rauchausbreitung in Längsrichtung beeinflusst werden. Diese Aufgabe ist insbesondere bei Gegenverkehrstunneln anspruchsvoll, weil im Brandfall mit Fahrzeugen auf beiden Seiten des Brandes zu rechnen ist. In diesem Fall muss die Rauchbeeinflussung besonders sorgfältig erfolgen, um die Rauchschichtung nicht übermässig zu stören.

Kontrolle der Längsgeschwindigkeit

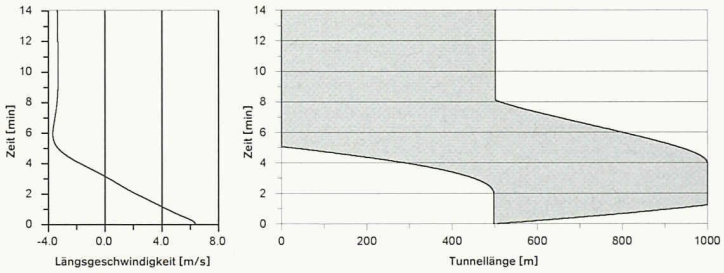
Die Kontrolle der Längsgeschwindigkeit im Brandfall spielt in der modernen Tunnellüftung eine zentrale Rolle. Die Problematik wurde während des Brandes im Montblanc-Tunnel evident, als französische Feuerwehrleute im Tunnel vom Rauch blockiert wurden und stundenlang vergeblich versucht wurde, die Strömungsrichtung im Tunnel umzukehren. Entsprechend unter-

nahm man im Vorfeld der Tunnelerneuerung die grössten Anstrengungen zur Kontrolle der Längsströmung im Tunnel.
Die Längsströmungsgeschwindigkeit kann im Normalbetrieb Werte bis zu 10 m/s und mehr erreichen. Die Haupteinflüsse auf die Längsgeschwindigkeit sind in der Regel das Lüftungssystem, der Verkehr und die meteorologischen Einflussgrössen (je nach den lokalen Bedingungen barometrische Druckunterschiede, Wind usw.). Eine bis vor kurzem nur schlecht erfasste Wirkgrösse ist der so genannte Kamineffekt: Wie in jeder Hausfeuerstelle haben die heissen Rauchgase auch im Tunnel die Tendenz aufzusteigen und dadurch Längsströmungen zu erzeugen. Wie aus Bild 5 hervorgeht, ist dieser Effekt schon ab kleinen Tunnelsteigungen von 1 bis 2 % relevant. Die Beeinflussung der Längsgeschwindigkeit erfolgt in der Regel mittels Strahlventilatoren. Die Ziele der Kontrolle der Längsgeschwindigkeit hängen von der Problemstellung ab. Häufige Zielsetzungen bei Längslüftungen sind:

- Bei Richtungsverkehr ohne Stau: Erreichen einer genügend hohen Längsgeschwindigkeit, um eine vollständige Verdrängung der Rauchgase in der ursprünglichen Verkehrsrichtung zu erzielen (siehe auch[2])
- Bei Richtungsverkehr mit hoher Stauwahrscheinlichkeit: Erreichen einer moderaten Längsströmung in Verkehrsrichtung, um die Rauchausbreitung in der Gegenrichtung weitgehend zu verhindern, ohne die empfindliche Schichtung der heissen Rauchgase zu sehr zu stören
- Bei Gegenverkehr: Die Fahrzeuge stehen in der Regel auf beiden Seiten des Brandherdes, und es gibt oft keine bevorzugte Rauchverdrängungsrichtung. In dieser Situation ist es häufig angebracht, die Längsströmung so klein wie möglich zu halten, um Störungen der Rauchschichtung zu verhindern.



5
Berechnung der durch den Kamineffekt induzierten Längsgeschwindigkeit im Brandfall (Lastwagenbrand, 30 MW) als Funktion der Tunnelsteigung für verschiedene Tunnellängen



6
Simulation der zeitlichen Entwicklung der Längsgeschwindigkeit am Brandort (links) und Rauchausbreitung (rechts) in einem Richtungsverkehrstunnel (Verkehr von links nach rechts) mit einem Gefälle von 3 %. Bei Verkehr in fallender Richtung gefährdet die natürliche Rauchausbreitung die stromaufwärts vom Brand blockierten Fahrzeuge, falls keine adäquaten lüftungstechnischen Massnahmen ergriffen werden (Simulationsprogramm TunSim 1.5, vom Autor entwickelt)

Lüftungen mit Rauchabsaugung

Die grundsätzliche Zielsetzung von Lüftungen mit Rauchabsaugung ist die Verhinderung der Ausbreitung der Rauchgase ausserhalb der Absaugzone. Dies erfordert eine geeignete Kombination von konzentrierter Absaugung und Einschränkung der Längsgeschwindigkeit im Brandbereich. Die heute installierten Absaugmengen erreichen oft 150 m^3/s oder mehr über eine Länge von 200–300 m (meist 3 Klappen im Abstand von etwa 100 m). Als älterer Standard galten bis Mitte/Ende der Neunzigerjahre Absaugmengen von lediglich etwa 80 m^3/s pro km Länge, und die Absaugung war über grössere Längen verteilt. Dies hat zwar die Absaugung des Brandrauches erlaubt, aber bei einem Lastwagenbrand mit einer Rauchentwicklung von etwa 80 m^3/s war mindestens ein Tunnelkilometer mit Rauch belegt. Moderne Brandabsaugsysteme können zwar die anfängliche Rauchausbreitung im Tunnel nicht verhindern, sind aber in der Lage, nach kurzer Einstellzeit die verrauchte Zone auf eine Länge von 100 bis 200 m zu beschränken.

Von der Lüftungsberechnung zur umfassenden Brandsimulation

Zur Erfüllung der vielseitigen Zielsetzungen lüftungstechnischer Berechnungen stehen dem Lüftungsingenieur eine Vielzahl mehr oder weniger aufwändiger Simulationstechniken zur Verfügung. Bei einzelnen Problemen reichen einfache Handrechnungen völlig aus, während für andere Problemstellungen umfassende dreidimensionale Simulationen komplexer Brandszenarien adäquat sind. Grundsätzlich können drei Simulationsstufen unterschieden werden:

- 0- oder 1-dimensionale zeitunabhängige Berechnung
- 1-dimensionale (1D) zeitabhängige Simulation
- 3-dimensionale (3D) Simulation

Die erste Stufe umfasst im Wesentlichen die klassischen

Lüftungsberechnungen, wie sie schon vor Jahren manuell durchgeführt wurden.

Eindimensionale Simulation

Ein Tunnel ist in der Regel näherungsweise «dünn». Die meisten Untersuchungen zur Tunnelaerodynamik können deshalb eindimensional durchgeführt werden. Dies reduziert den Simulationsaufwand so weit, dass bei der Projektierung einer Tunnellüftung die Analyse einer grossen Anzahl Brandszenarien durchgeführt werden kann. Dies ist besonders bei der Konzeption von Lüftungssteuerungen unentbehrlich, weil die Wechselwirkungen der zahlreichen Einflussgrössen, die im Brandfall von Bedeutung sind, kaum qualitativ zu erfassen sind.

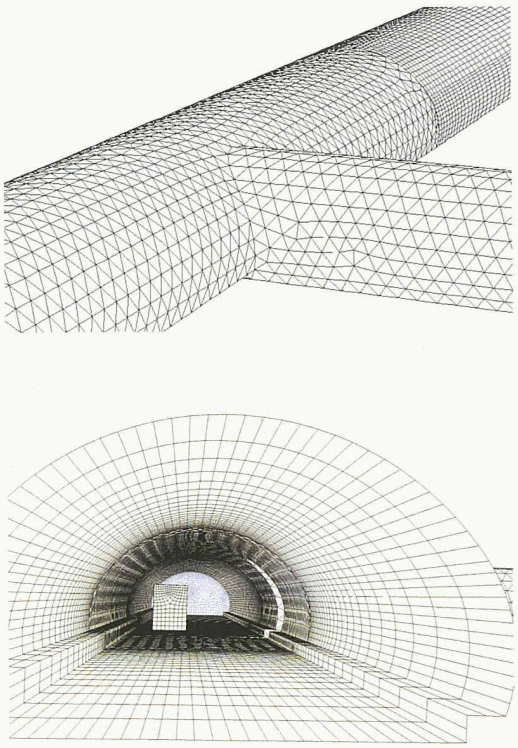
Die Grundgleichungen, die die Tunnelaerodynamik beschreiben, werden eindimensional formuliert, diskretisiert und aufgelöst. Die Modellierung muss mindestens folgende grundlegenden Elemente berücksichtigen:

- Trägheit der Luftmasse
- Luftwiderstände im Tunnel und an den Portalen
- Verkehrsdynamik mit Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung der einzelnen Fahrzeuge, der variablen Signalisation und allfälliger Behinderungen durch den entstehenden Rauch
- Thermische Effekte infolge Temperaturdifferenzen oder der lokalen Erwärmung durch den Brand (Kamineffekt)
- Portaldruckdifferenzen, die aufgrund lokaler Winde oder meteorologischer Druckdifferenzen entstehen (diese können z. B. im Montblanc- oder Gotthard-Strassentunnel Werte von 300–500 Pa erreichen)
- Lüftungsbetrieb (Zuluft, Abluft, Strahlventilatoren)
- Eigendynamik der Rauchschicht, die aufgrund der thermischen Schichtung eine grosse Rauchbewegung relativ zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit ergeben kann (Frontgeschwindigkeit des Rauches, vergleiche Bild 6)

Der letzte Punkt wurde bis vor kurzem bei der Modellierung vernachlässigt. Neuere Erfahrungen haben jedoch gezeigt, dass dies unzulässig ist.

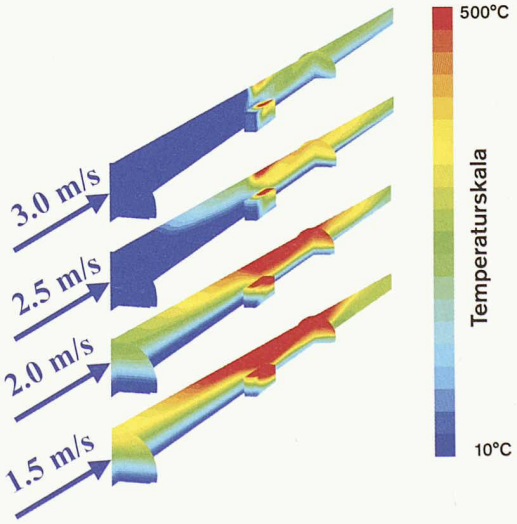
3D-Simulation – Der Brand im Computer

Die experimentelle Untersuchung von Brandszenarien ist kostenintensiv und oft durch unerwünschte Störeffekte, wie beispielsweise Massstabeffekte, beeinflusst. Eine zunehmend interessante Alternative ist die dreidimensionale Simulation. Komplexe Geometrien und Szenarien können im Computer nachgebildet und dank fortgeschrittenen Simulationsprogrammen detailliert und realitätsnah analysiert werden. Die Ergebnisse liegen in Form von zeitlichen Entwicklungen aller wesentlichen physikalischen Variablen an typischerweise einigen hunderttausend Berechnungspunkten im Tunnel vor (Bild 7). Die Ereignisse werden somit wesentlich detaillierter als in einem Experiment erfasst, wie das Beispiel in Bild 8 zeigt. Umgekehrt können geeignete Computersimulationen in der Vorbereitungsphase physikalischer Experimente wertvolle Hinweise liefern. Vieles kann in dieser Beziehung von simula-



7

3D-Oberflächengitter für die Simulation eines Lastwagenbrandes im Tunnel



8

Simulation der Rauchschichtung als Funktion der Längsgeschwindigkeit in einem Richtungsverkehrstunnel (Länge 1575 m, Gefälle von 5 % in Strömungsrichtung, von links nach rechts, 30 MW Lastwagenbrand, im Bild sichtbar). Temperaturverteilung im Tunnel, asymptotischer Zustand (Längsschnitte durch die Tunnelachse). Die Ergebnisse der Simulation bestätigen die theoretische Analyse, welche einen Wert der kritischen Längsgeschwindigkeit von etwa 2,5–3 m/s ergeben hatte

tionstechnisch höher entwickelten Ingenieurbereichen wie dem Flugzeug- und dem Gasturbinenbau übernommen werden.
An dieser Stelle ist auch eine Warnung angebracht: Aktuelle Simulationsprogramme sind sehr einfach in der Handhabung und verleiten deshalb zu voreiligen Modellierungen mit unvollständigen Ausgangsdaten. Derartige Fehler können leicht zu sicherheitstechnisch falschen Schlussfolgerungen mit gravierenden Auswirkungen führen.

Lüftungssteuerungen

Die grundlegende Bedeutung der Lüftungssteuerungen wird zunehmend erkannt. Einerseits steigen die Ansprüche, insbesondere im Brandfall, anderseits stehen heute dank moderner Leittechnik sehr vielseitige Möglichkeiten zur Verfügung. Die hauptsächliche Herausforderung besteht bei der Lüftungssteuerung darin, dass vom System «kluge» Antworten erwartet werden, die aufgrund lückenhafter oder widersprüchlicher Informationen ermittelt werden müssen. Der Steuerung stehen in der Regel beispielsweise keine aktuellen und genügend detaillierten Verkehrsdaten, die sicherheitstechnisch entscheidend sein können, zur Verfügung. Man denke beispielsweise an voll besetzte Reisebusse in unmittelbarer Brandnähe, die für die Lüftungsstrategie entscheidend wären, oder an böige Windverhältnisse bei einem Tunnelportal.
Lüftungssteuerungen werden in der Regel ausgehend von einer relativ kleinen Anzahl von Szenarien für den Normal- und Brandfall entworfen. Die Ausarbeitung solcher Szenarien beruhte traditionellerweise auf reiner Intuition. Dank eindimensionaler zeitabhängiger Simulation ist es heute möglich, eine grosse Anzahl Brandszenarien im Computer durchzuspielen und die Systemantworten zu optimieren. Die Kunst dabei liegt darin, schliesslich eine beschränkte Anzahl repräsentativer Szenarien in der Steuerung zu implementieren, aufgrund derselben in den meisten Fällen eine korrekte Systemantwort resultiert, aber auch allfällige negative Konsequenzen bei seltenen Spezialfällen in Grenzen gehalten werden.

Dr. sc. techn. Marco Bettelini, dipl. Masch.-Ing. ETH/SIA,
Lombardi SA, Ingegneri Consulenti
Via R. Simen 19, 6648 Minusio
marco.bettelini@lombardi.ch

Der vorliegende Text basiert auf der vom Verfasser im Rahmen des Nachdiplomkurses «Risiko und Sicherheit» (gemeinsam organisiert von ETH Zürich, EPF Lausanne und HSG St. Gallen) erarbeiteten Studie «Tunnel Fires – Active Risk Reduction», Zürich, September 2002.

Literatur

1 M. Bettelini: Sanierung Montblanc-Tunnel, tec21, Nr. 49-50/ 2001, 7–11.
2 J.-P. Kunsch und F. Zumsteg: Rauchausbreitung in Tunnels, tec21, Nr 9/2001, 17–20.

Tunnelimpressionen

Der Waadtländer Fotograf Maurice Schobinger ist fasziniert von der Welt unter Tage der grossen Tunnelbaustellen. In seinem Buch «Gotthard – Via Subalpina» erweist er dem Berg und den Menschen, die in seinem Inneren täglich Meter um Meter Vortrieb erarbeiten, eine eindrückliche Reverenz. Für tec21 fotografierte er die aktuellen Arbeiten am Üetlibergtunnel der N4/N20 (Westumfahrung Zürich).
m_schobinger@bluewin.ch
Maurice Schobinger: Gotthard – Via Subalpina.
éditions d'autre part, Delémont, November 2002. 180 Fotos, verschiedene Begleittexte, dreisprachig, geb., Fr. 69.–, ISBN 2-9700290-5-7.

Projektdaten Üetlibergtunnel

Der Üetlibergtunnel ist Teil der Westumfahrung Zürich N4/N20 und verbindet die Umfahrung Birmensdorf (N20.1.4) im Westen mit der bestehenden Nationalstrasse Zürich–Chur (A3) im Osten. Das Projekt umfasst zwei parallele Röhren von je rund 4,4 km Länge. Der Tunnel weist vom Ostportal her eine Steigung von 1,6 % auf.

Tunnellänge:	Zwei Röhren zu je ca. 4,4 km Länge
Ausbruch- und Aushubvolumen:	1 700 000 m^3 fest
Fahrbahn:	Pro Röhre 2 Fahrstreifen und 1 Standstreifen
Lichtraumprofil:	10,50 m breit, 4,50 m hoch
Ausbruchquerschnitt:	143–160 m^2
Rohbauzeit:	Ca. 5 1/2 Jahre

Ecktermine:

10.01.2000:	Projektgenehmigung Bundesamt für Strassen (Astra)
13.09.2000:	Vergabe der Tunnelrohbauarbeiten
Oktober 2000:	Baubeginn Hauptarbeiten
Mitte 2006:	Rohbauende
2008–2010:	Eröffnung Üetlibergtunnel

Bauvorgang

Die Molassestrecke Üetliberg wird aus der Baugrube Reppischtal (Westseite) im Anschluss an eine Lockergesteinstrecke aufgefahren. Dabei wurde zuerst mit einer Tunnelbohrmaschine (TBM) mit Durchmesser 5,00 m ein im Zentrum des Tunnelprofils angeordneter Pilotstollen auf die gesamte Länge ausgebrochen. In der aktuellen zweiten Phase wird das Pilotstollenprofil mit einer Tunnelbohrerweiterungsmaschine (TBE) mit einem variablen Ausbruchdurchmesser von 14,20 bis 14,40 m in Hinterschneidtechnik zum endgültigen Vollprofil ausgeweitet. Die Maschine wird dazu im vorgängig gefrästen Pilotstollen verspannt. Die Ausbruchsicherung besteht aus 20–30 cm netzarmiertem Spritzbeton und Ankern. In kritischen Zonen ist der Einbau von Stahlprofilen vorgesehen.

Bildlegenden zu den folgenden 4 Seiten:

1
Sohle des Vollprofils mit Spritzbeton-Ausbruchsicherung

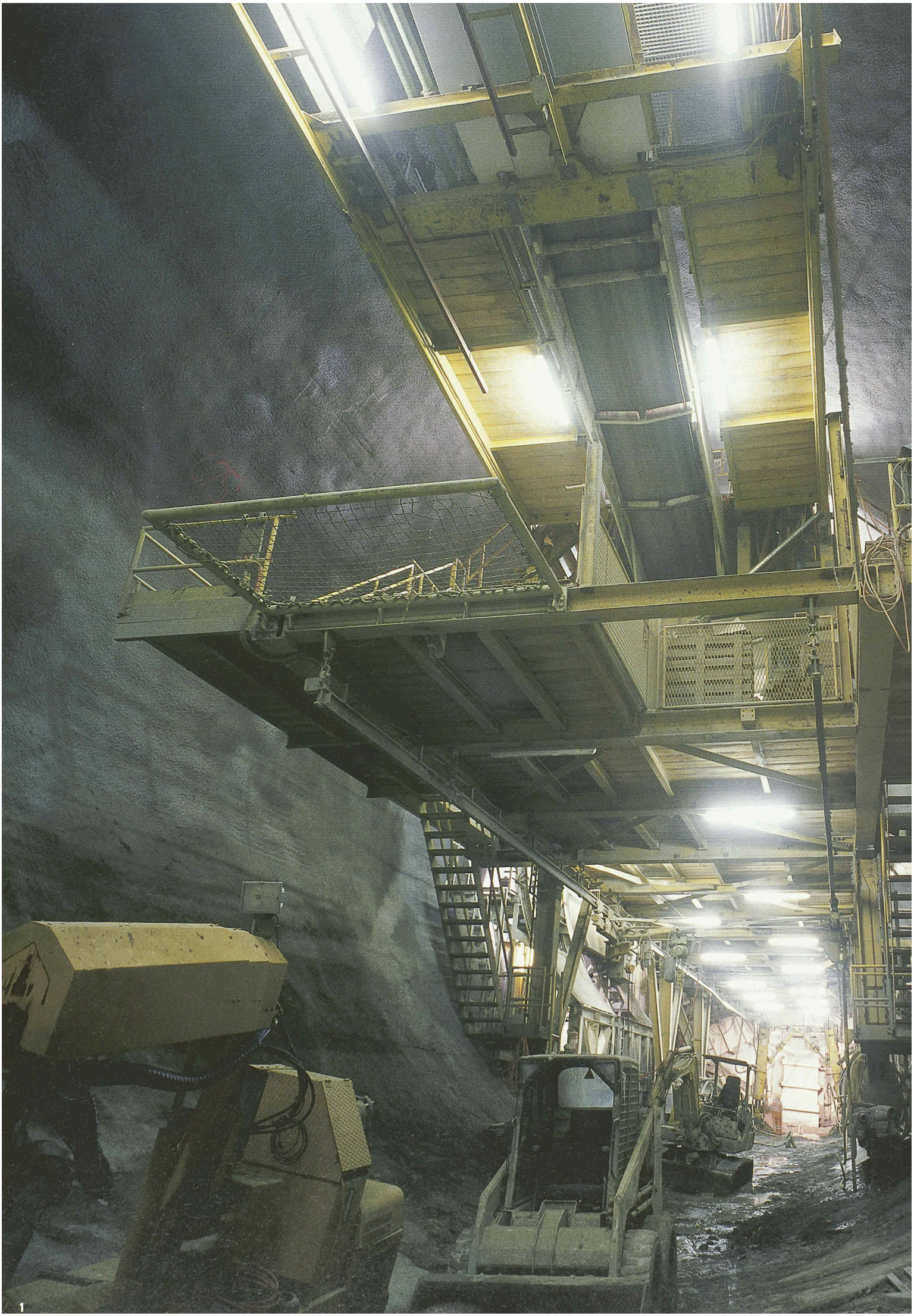
2
Aufbringen der Spritzbeton-Ausbruchsicherung

3
Bohrkopf der Tunnelbohrerweiterungsmaschine (TBE)

4
Aufbringen der Spritzbeton-Ausbruchsicherung

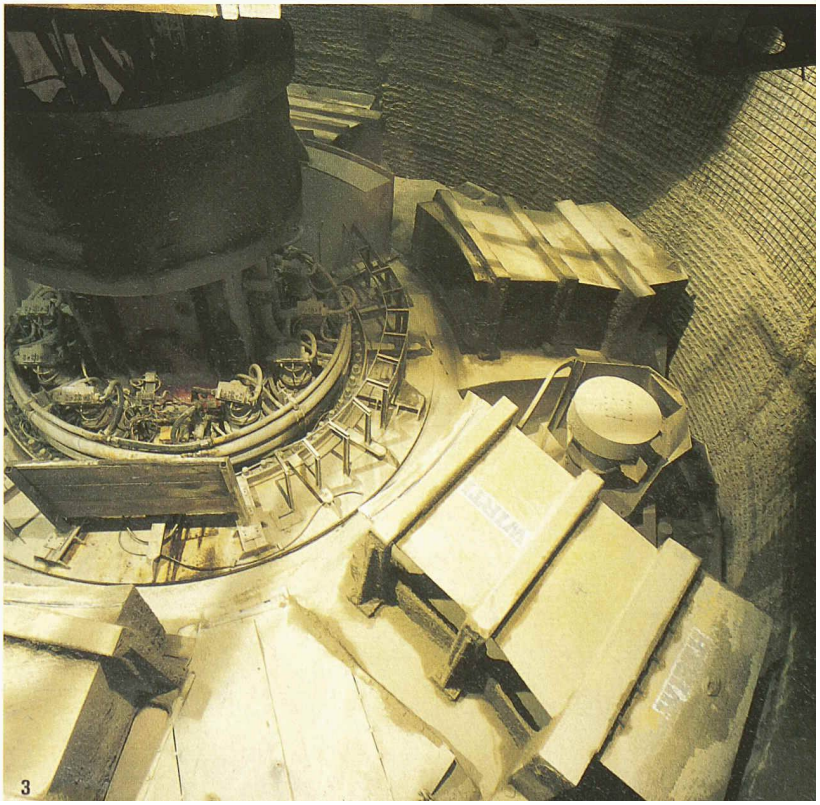
5
Blick vom Zentrum des Bohrkopfs der TBE durch die Verspanneinrichtung in den Pilotstollen Richtung Tunnelportal Seite Zürich

6
Ausbruch einer Querverbindung zwischen den Tunnelröhren



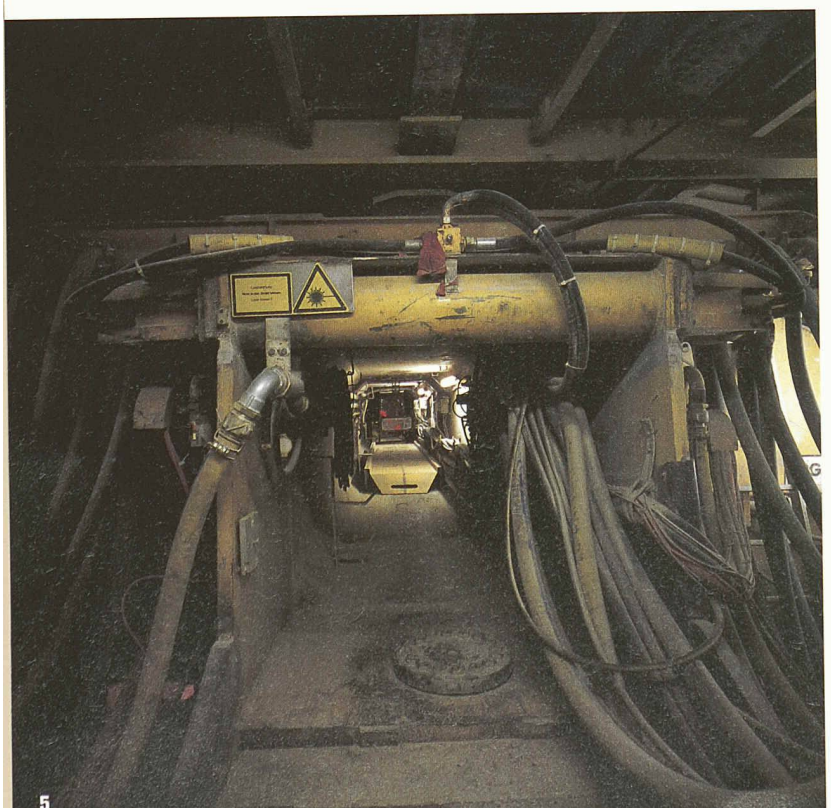
1

2

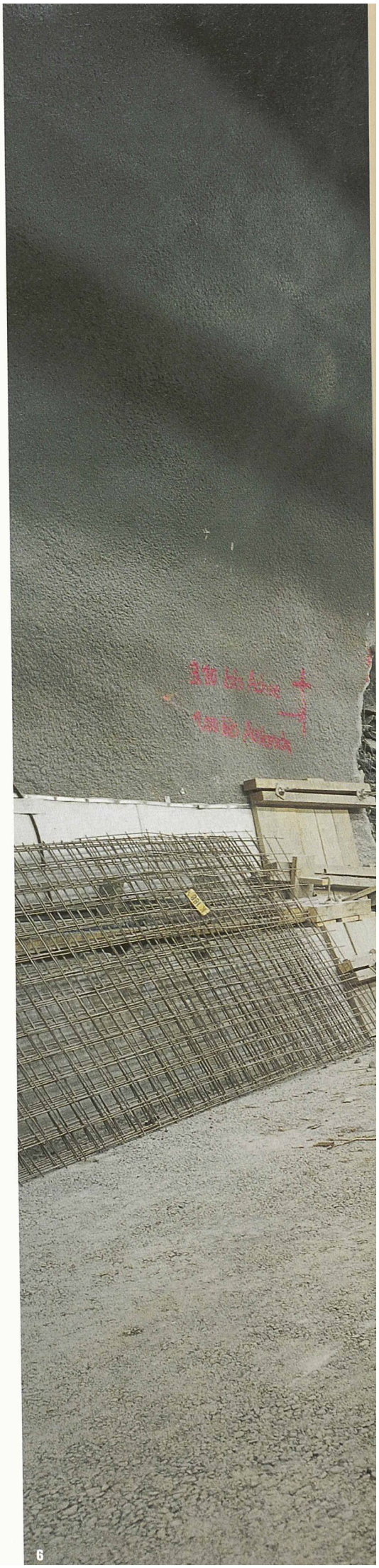


3

4



5



6