

Zeitschrift:	Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber:	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band:	73 (1955)
Heft:	13
Artikel:	Verkehrs- und Lüftungsprobleme von Autotunneln dargestellt am Banjhal Tunnel in Indien
Autor:	Kress, H.H.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-61883

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: 03.02.2026

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

muss die Baumaschine als Diener und Wohltäter der Menschen bezeichnet werden.

Die Zivilisation eines Volkes wird nicht zuletzt nach seinem Strassenwesen beurteilt. Wenn auch in fast allen Bau-disziplinen heute in der Schweiz Grossartiges geleistet wird, so können wir im Rahmen dieser Betrachtungen nicht umhin, erneut auf den Rückstand im Ausbau unseres Strassen- netzes hinzuweisen. Wir wissen wohl, dass diese Bauvor- haben für Zeiten schlechterer Konjunktur aufgespart sind und dass baureife Projekte im Kostenbetrag von 1 Mld. Fr. vorliegen, aber, angenommen die gute Konjunktur dauere an und im Strassenbau geschehe nichts, so laufen wir in be- ängstigender Weise Gefahr, in einen Rückstand zu geraten,

der nicht mehr aufzuholen ist und den sich unsere ausländischen Gäste nicht gefallen lassen. Wir hoffen gerne, dass die Arbeit der jüngst gebildeten Kommission für die Planung des schweizerischen Hauptstrassennetzes unter dem Vorsitz von Ständerat Wenk baldigst Früchte tragen werde. Die Schaffung der bundesgesetzlichen Grundlage tut vor allem not. Eines ist sicher: für den Strassen- und Autobahnbau stehen Maschinen von seltener Vollkommenheit, zum schönen Teil auch schweizerischer Fabrikation, bereit, die ein sau- beres und rationelles Arbeiten gewährleisten.

Adresse des Verfassers: R. Thoma, Dipl. Ing. bei Robert Aebi & Cie. AG., Zürich.

Verkehrs- und Lüftungsprobleme von Autotunnels

dargestellt am Banihal Tunnel in Indien

Von Dr.-Ing. H. H. Kress, VDI, Beratender Ingenieur, Stuttgart

DK 625.712.35:628.8

1. Vorbemerkung

Die indische Regierung hat im Zuge der Strasse Jammu-Srinagar (Kashmir) in 2400 m Meereshöhe den Bau des 2475 m langen Banihal Autotunnels durch den 3400 m hohen Pir Panjal Range begonnen (Bild 1). Die Probleme, die sich hier stellen, gelten auch für manche andere alpine Auto-tunnel, weshalb eine Berichterstattung über die durchgeföhrt verkehrs- und lüftungstechnischen Studien hier von Interesse sein dürfte. Das bauseitige Projekt sieht eine Zweibahnrohre für gleichzeitigen Gegenverkehr mit 7 m Fahrbahnbreite und einem Fussweg, 50,81 m² Verkehrsraum und $\pm 2\%$ bis 3% Steigung vor. Querlüftung erscheint dem Bauherrn zu aufwendig; man wünscht Längslüftung nach Art des Cochemer Tunnels.

Ein nicht bauseitiger Sondervorschlag empfiehlt zwei getrennte Einbahnrohren für Richtungsbetrieb mit je 2% bzw. 3% Gefälle, die zur Vergleichswürdigkeit je 3,50 m Fahrbahnbreite und je 26,58 m² Verkehrsraum haben müssten, jedoch nur 91,43 % bzw. 93,19 % davon erreichen. Der Vorteil soll hierbei in angeblich kleineren Baukosten und in der Nutzbarkeit des Verkehrsluftzugs liegen. Diese Nutzbarkeit erscheint allerdings nur im Normalfall unter gewissen Voraussetzungen und bei starken Verkehrsdrosselungen für die Lüftung der Einbahnrohren ausreichend. Als weiterer Vorteil ist die Möglichkeit einer künstlichen Zusatzlängslüftung nach dem Beispiel des Eisenbahntunnels bei Cochem a. d. Mosel (Deutschland)¹⁾ zu nennen, die aber im Autotunnel gewisse Risiken hat. Nachteilig sind die Fahrbahnaußweitungen, die zum manuellen Hineinschieben havarierter Fahrzeuge stellenweise notwendig sind. Ihr Verkehrswert ist allerdings zweifelhaft. Ueberdies machen sie die Anordnung von Querschlä-

¹⁾ Verbesserte Saccardo-Lüftung, beschrieben in «Eisenbahntechnische Rundschau», 1952, Heft 12.

gen zwischen den Röhren für Verkehrsumleitungen nicht entbehrlich. Ebenfalls nachteilig sind ferner die verkehrshemmenden geringen Fahrbahnbreiten der Einbahnrohren.

Ein Vorschlag des Verfassers empfiehlt eine Zweibahn-Doppelpendelröhre mit 7 m Fahrbahn-, 0,90 m Fusswegbreite, 50,81 m² Verkehrsraum und $\pm 2\%$ Steigung, die nach dem neuen Gesichtspunkt des richtungsgebundenen Zweispuren-Pendelverkehrs betrieben wird, wobei sich die später erörterten wesentlichen Vorteile und Ersparnisse gegenüber den anderen Vorschlägen ergeben. Statt der bauseits unerwünschten Querlüftung und der hier zu aufwendigen Cochemer Längslüftung hat der Verfasser hierfür unter Vollausnutzung des Verkehrsluftzugs eine in der jeweiligen Verkehrsrichtung wirkende, von einer Anlage in Tunnelmitte ausgehende, zeitweilige Zusatz-Längslüftung ohne Zwischenschäfte für Spitzenbedarf nach Bild 2 entwickelt, die wirtschaftlicher als das Cochemer System ist, den Einbau direkt umkehrbar wirkender Lüfter ermöglicht und einen späteren Einbau der zweifellos besten und sichersten Querlüftung im Gegensatz zu den Einbahnrohren nicht von vornherein ausschliesst.

2. Aufgabenstellung

Zu untersuchen waren die Lüftungsprobleme der Gegenverkehr-Zweibahnrohre (Fall I) und der beiden Einbahnrohren (Fall II) unter dem Gesichtspunkt der Ausnutzung des Verkehrsluftzugs als Normallüftung nebst einer billigsten, zeitweiligen künstlichen Zusatz-Längslüftung nach Cochemer Vorbild und deren Anwendungsgrenzen einschliesslich der notwendigen Verkehrsregelung. Hieraus folgte zwangsläufig die Untersuchung der Zweibahn-Doppelpendelröhre (Fall III). Die drei Fälle und die Ergebnisse der Untersuchungen sind auf Tabelle 1 zusammengestellt.

Als Grundbedingungen wurden angegeben: grösster Anfangsverkehr 150, grösster Zukunftsverkehr 300 Fz/h und Richtung; aus besonderen Gründen jeweils in Konvois von anfangs 250, später 300 Fz/Richtung für Verkehrsmisschungen nach Tabelle 2. 10-t-Sondertransporte von 3,708 m Breite und 5,029 m Höhe sind zu beachten. Für die Lüftungsberechnung ist nur das deutsche Lademaß nach der Strassenverkehrsordnung § 7 (2,50 m breit, 4,00 m hoch) anzusetzen. Die Untersuchungen der Tabelle 2 erfolgten nach der Dissertation des Verfassers²⁾ und nach Getto³⁾.

3. Gegenverkehr-Zweibahnrohre

Nach der Sichtkurve des Verfassers⁴⁾ beträgt bei einem Verkehrsraum von 50,81 m² die für gute Sicht bei grösstem Verkehr zulässige CO-Konzentration bei Längs- und Halbquerlüftung 0,22 %, bei Querlüftung und Kombination mit Halbquerlüftung nur 0,21 %, weil dann der erforderliche Ab-

²⁾ Kress H. H.: Richtlinien für die Entwurfsbearbeitung von Autotunneln. Diss. TH Stuttgart (1936).

³⁾ Getto: Einfluss des Verkehrs auf die Längsströmung der Luft in einem Kraftfahrzeugtunnel. «Z. VDI» 1951, S. 141.

⁴⁾ Dr. Ing. Kress H. H.: Lüftungsentwurf für den Wagenburgtunnel. «Bauingenieur» 1953, Nr. 12. Stuttgart. SBZ 1953, Nr. 36, S. 524.

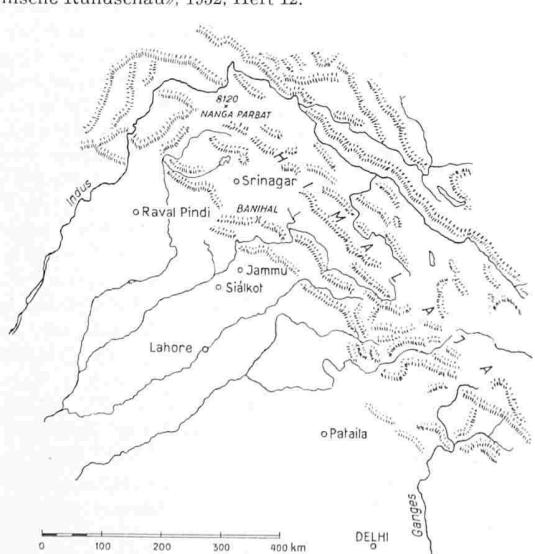
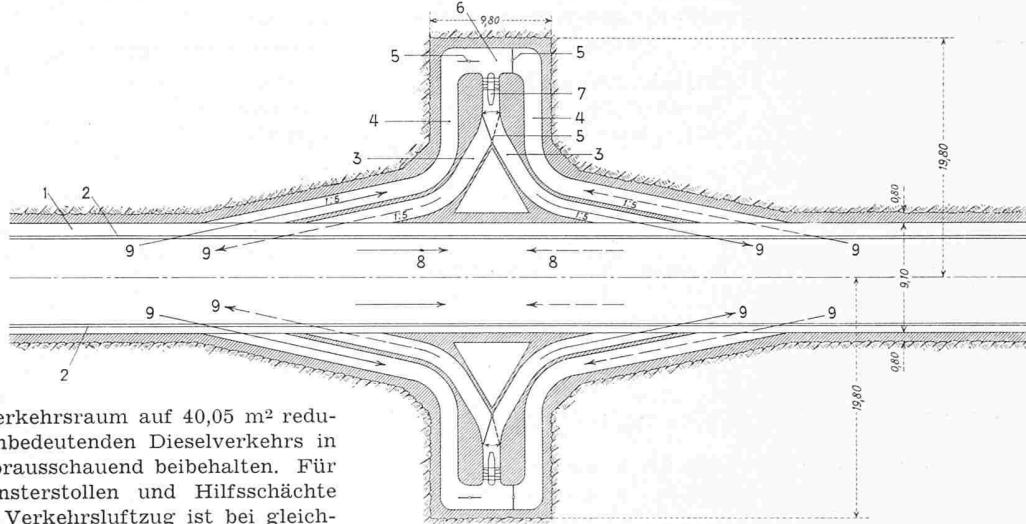


Bild 1. Lageskizze, 1: 7500000

Bild 2. Vorentwurf für Längslüftung bei zweispurigem Tunnel mit abwechselndem Pendelverkehr, Lüfter in Tunnelmitte. 1:600. 1 Bedienungssteg (auch für Fußgänger), 2 Schrammbord, 3 Druckkanäle, 4 Saugkanäle, 5 Steuerklappen, 6 Ansaugkammern, 7 Ventilatoren (mehrere, ringförmig um den Tunnel angeordnete Ventilatoren), 8 Verkehrsrichtung, 9 Luftstrom entsprechend jeweiliger Verkehrsrichtung



luftkanal von $10,76 \text{ m}^2$ den Verkehrsraum auf $40,05 \text{ m}^2$ reduziert. Trotz vorläufig noch unbedeutenden Dieselverkehrs in Indien werden diese Werte vorausschauend beibehalten. Für die Lüftung ausnutzbare Fensterstollen und Hilfsschächte sind hier ausgeschlossen. Der Verkehrsluftzug ist bei gleichzeitigem Gegenverkehr in Zweibahnrohren wegen des stets entgegenwirkenden Verkehrskolbens nicht aktivierbar, also ist die erforderliche Gesamtfrischluftmenge von $246 \text{ m}^3/\text{s}$ künstlich zu beschaffen, womit jedoch wie bei den Einbahnrohren nur die stark gedrosselte Tunnelleistung nach b) der Tabelle 2 gedeckt wird. Messungen natürlicher Luftströmungen im Liberty-Tunnel, die dortige Lüftungskatastrophe sowie gleichartige Messungen in den Autotunneln von St-Cloud und Stuttgart beweisen die Unsicherheit natürlicher, meteorologisch bedingter Luftströme in Tunneln nach Grösse, Zeitwirkung und Richtungswechsel; sie können positiv, negativ, zeitweilig gar nicht wirken; sie können den Kraftbedarf senken, erhöhen oder nicht beeinflussen, fallen also als tragende Komponente der Tunnellüftung aus. Im übrigen sei auf die entsprechenden Untersuchungen für den Fall der Einbahnrohren verwiesen.

In der Gegenverkehr-Zweibahnrohre wird auch eine Längslüftung wegen des stets entgegengerichteten Verkehrskolbens problematisch und wie der Verkehrsluftzug weitgehend ausgeschaltet. Dies ist auch der Fall, wenn die Längslüftung künstlich erzeugt wird. Niemand kann hier für den Erfolg einer dauernd laufenden Längslüftung garantieren. Druck und Leistungsaufwand sind im Vergleich zur besseren Querlüftung wirtschaftlich nicht vertretbar. Die erforderlichen grösseren, ohnehin unzulässigen Luftgeschwindigkeiten im Verkehrsraum und die daraus folgenden quadratisch ansteigenden Widerstände steigern den Leistungsaufwand und die Stromkosten schätzungsweise auf das etwa 15fache der Grössen von zwei Einbahnrohren. Selbst bei 150 m Wagenabstand wird der Gegenverkehr durch Verschleppung von Gasen und Qualm noch stark belästigt. Daher ist eine Längslüftung bei der Gegenverkehr-Zweibahnrohre ausgeschlossen. Es wird eine dauernd wirkende Querlüftung ohne Längsluftzug im Verkehrsraum, also ein Tunnelquerschnitt nach Bild 3, erforderlich. Im Brandfall ist jeder Längsluftzug infolge der Lüftung im Verkehrsraum gefährlich, weshalb Längs- und Halbquerlüftung während der Löscharbeiten abzuschalten sind. Das mag bei Verkehrsräumen von 100 m^2 (St-Cloud, Mersey) zulässig sein, bei $50,81 \text{ m}^2$ ist es aber nicht mehr der Fall. Die Gegenverkehr-Zweibahnrohre kann im Panikfall bis zum Erreichen der physiologischen CO-Grenze 8 min 30 s aus ihrem Eigenluftvolumen von $125\,755 \text{ m}^3$ ohne künstliche Luftzufuhr leben. In dieser kurzen Zeit ist jedoch keine Panik behoben. Der hier gerade noch tragbare Katastrophenfall ist bei einer erforderlichen Luftversorgung von $246 \text{ m}^3/\text{s}$ durch eine Tunnelfüllung von 118 Fz mit 42 m Wagenabstand gekennzeichnet.

Die Gegenverkehr-Zweibahnrohre ist bei permanenter Quer- oder in Kombination mit Halbquerlüftung die beste und sicherste, aber auch teuerste Lösung. Sie erfordert einen Frischluftkanal von $10,25 \text{ m}^2$, einen Abluftkanal von $10,76 \text{ m}^2$ und einen Verkehrsraum von $40,05 \text{ m}^2$, wobei die Luftgeschwindigkeiten in den Kanälen wirtschaftlich tragbar sind.

4. Zwei Einbahnrohren für Richtungsverkehr

Bei dieser Variante (Tabelle 1, Fall II) kann man eine Röhre und die Portalparkplätze zuerst, die zweite Röhre

später bauen, wobei aber die erste pendelnd befahren werden muss. Die Lüftungsuntersuchungen auf Tabelle 2 gelten also für alle Betriebsfälle der Bahn-Einbahnrohren. Verkehrs zusammensetzung und Marschgeschwindigkeit bestimmen die Lüftung. Steigender LKW-Anteil und sinkende Marschgeschwindigkeit erfordern mehr Frischluft, anderseits wächst die Frischluftversorgung durch den Verkehrsluftzug mit steigender Marschgeschwindigkeit und steigendem LKW-Anteil, besonders bei grossen LKW; sie fällt dagegen mit sinkender Fahrgeschwindigkeit und wachsendem Anteil kleiner Fz. In Anbetracht der geringen Fahrbahnbreiten der Einbahnrohren ist es zweifelhaft, ob bei 150 bzw. 300 Fz/h und Richtung die für eine Totallüftung aus Verkehrsluftzug erforderlichen mittleren Mindestfahrgeschwindigkeiten von 27 bzw. 35 km/h überhaupt erreicht oder auf $2,475 \text{ km}$ Tunnellänge durchgehalten werden können.

Nach der bereits erwähnten Sichtkurve weist ein Verkehrsraum von $26,58 \text{ m}^2$ bei grösstem Verkehr eine zulässige CO-Konzentration von $0,20 \%$ auf. Tabelle 2 liefert die Zahlen für den Gesamtluftbedarf, die Verkehrslüftung und die Dekungsspitzen durch künstliche Zusatzlüftung unter der Voraussetzung, dass Fahrzeuge, die nicht mindestens 24 km/h im Tunnel entwickeln können, vom Konvoiverkehr ausgeschlossen und nach besonderer Verkehrsregelung durch den Tunnel geschleust werden. Wegen des sonst grösseren Luftbedarfs dürfen Langsamläufer (Traktoren) mit 10 km/h nur hinter einem (schnelleren) Konvoi im Tunnel fahren, wobei zwischen Konvoi-Ende und erstem Traktor 270 m Mindestabstand und zwischen den Traktoren Abstände nach folgender Regelung einzuhalten sind:

a) bei Totalauslastung von $70 \text{ m}^3/\text{s}$ künstlicher Zusatzlüftung können gleichzeitig zehn Traktoren in 250 m gegenseitigem Mindestabstand im Tunnel fahren, wenn zufälliger Gegenwind ihren Verkehrsluftzug gerade aufhebt;

b) bei Totallüftung durch den Verkehrsluftzug der Traktoren muss der erste Traktor mindestens 270 m hinter dem

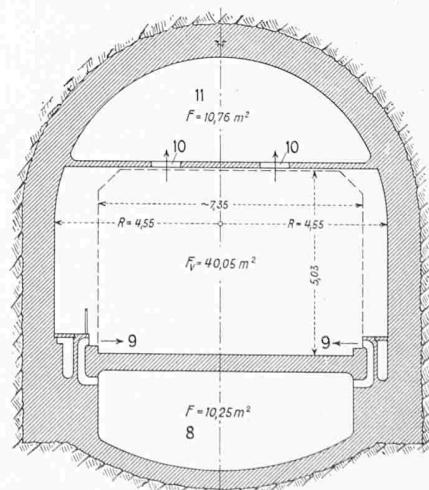
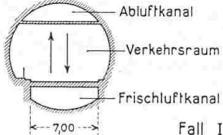
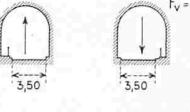
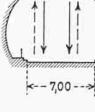


Bild 3. Normalquerschnitt für zweispurigen Tunnel mit Querlüftung, 1:200.
8 Frischluftkanal,
9 Frischlufteinblasöffnungen ($0,20/0,60 \text{ m}$, alle 5 m),
10 Abluftschlitze ($0,15/0,80 \text{ m}$, alle 5 m),
11 Abluftkanal

Tabelle 1: Tabellarischer Vergleich der untersuchten Projekte

Projekt	Zweibahn-Röhre für Gegenverkehr Fahrbahnbreite: 7,00 m	2 Einbahn-Röhren für Richtungsverkehr Fahrbahnbreite: 2 × 3,50 m	Zweibahn-Doppelpendelröhre Fahrbahnbreite: 7,00 m															
Sinnbild	<p>$F_A = 10,76 \text{ m}^2$</p> <p>$F_V = 40,05 \text{ m}^2$</p> <p>$F_F = 10,25 \text{ m}^2$</p>  <p>Fall I</p>	<p>$F_V = 26,58 \text{ m}^2$</p>  <p>Fall II</p>	<p>$F_V = 50,81 \text{ m}^2$</p>  <p>Fall III</p>															
Tunnellänge	$L = 2475 \text{ m}$	$L = 2 \times 2475 \text{ m}$	$L = 2475 \text{ m}$															
Umfang des Verkehrsraums	$U = 27 \text{ m}$	$U = 2 \times 19,80 \text{ m}$	$U = 27,40 \text{ m}$															
Tunnelsteigung	$s = \pm 2\%$ bis $\pm 3\%$	$s = -2\%$ bis -3% (Gefälle)	$s = \pm 2\%$ bis $\pm 3\%$															
Bau-massen	<table border="0"> <tr> <td rowspan="2">{</td> <td>Felsausbruch</td> <td>86,40 m^3 je lfm Tunnel</td> </tr> <tr> <td>Beton</td> <td>23,98 m^3 je lfm Tunnel</td> </tr> </table>	{	Felsausbruch	86,40 m^3 je lfm Tunnel	Beton	23,98 m^3 je lfm Tunnel	<table border="0"> <tr> <td rowspan="2">{</td> <td>Felsausbruch¹⁾</td> <td>72,28 m^3 je lfm Tunnel 2)</td> </tr> <tr> <td>Beton¹⁾</td> <td>16,02 m^3 je lfm Tunnel 2)</td> </tr> </table>	{	Felsausbruch ¹⁾	72,28 m^3 je lfm Tunnel 2)	Beton ¹⁾	16,02 m^3 je lfm Tunnel 2)	<table border="0"> <tr> <td rowspan="2">{</td> <td>Felsausbruch</td> <td>67,30 m^3 je lfm Tunnel</td> </tr> <tr> <td>Beton</td> <td>16,08 m^3 je lfm Tunnel</td> </tr> </table>	{	Felsausbruch	67,30 m^3 je lfm Tunnel	Beton	16,08 m^3 je lfm Tunnel
{	Felsausbruch		86,40 m^3 je lfm Tunnel															
	Beton	23,98 m^3 je lfm Tunnel																
{	Felsausbruch ¹⁾	72,28 m^3 je lfm Tunnel 2)																
	Beton ¹⁾	16,02 m^3 je lfm Tunnel 2)																
{	Felsausbruch	67,30 m^3 je lfm Tunnel																
	Beton	16,08 m^3 je lfm Tunnel																
des Tunnels																		
Lüftungssystem	Querlüftung	Längslüftung	Umsteuerbare Längslüftung															
Gesamtkapazität der maschinellen Lüftung	$Q_{masch} = 246 \text{ m}^3/\text{s}$ Frischluft (1,76) + 246 m^3/s Abluft	$Q_{masch} = 2 \times 70 = 140 \text{ m}^3/\text{s}$ (1,00), steigerbar auf $Q_{masch} = 2 \times 100 = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ (1,43)	$Q_{masch} = 140 \text{ m}^3/\text{s}$ (1,00)															
Im kritischen Verkehrsfall b) ₂₄ maschinell zu fördernde Luftpunktmengen	$Q_{masch} = 246 \text{ m}^3/\text{s}$ Frischluft (2,83) + 246 m^3/s Abluft	$Q_{masch} = 2 \times 59 = 118 \text{ m}^3/\text{s}$ (1,36)	$Q_{masch} = 87 \text{ m}^3/\text{s}$ (1,00)															
Anzahl der Lüfter	2 Lüfter für Frischluft 2 Lüfter für Abluft	$2 \times 5 = 10$ Lüfter	7 Lüfter															
Daten der Lüfter	<p>Vorschlag B I: Laufraddurchmesser: 2500 mm Fördermenge: Frischluft-Lüfter 123 m^3/s Abluft-Lüfter 123 m^3/s Druck: Frischluft-Lüfter 85 mm WS Abluft-Lüfter 68 mm WS Drehzahl: 700 U/min Leistungsbedarf: Frischluft-Lüfter 122 kW Abluft-Lüfter 105 kW</p>	<p>Vorschlag A II: Laufraddurchmesser: 1400 mm Fördermenge: 14 ÷ 20 m^3/s Druck: 14 ÷ 28 mm WS Drehzahl: 560 ÷ 650 U/min Leistungsbedarf: 3 ÷ 6,75 kW Vorschlag B II: Laufraddurchmesser: 1400 mm Fördermenge: 20 m^3/s Druck: 36 mm WS Drehzahl: 960 U/min Leistungsbedarf: 8,7 kW</p>	<p>Vorschlag B III: Laufraddurchmesser: 1400 mm Fördermenge: 20 m^3/s Druck: 28 mm WS Drehzahl: 960 U/min Leistungsbedarf: 7,0 kW</p>															
Gesamter Leistungsbedarf bei Inanspruchnahme der vollen Lüftungskapazität	Vorschlag B I: $N = 454 \text{ kW}$ (9,24)	Vorschlag A II: $N = 30 \text{ kW} \div 67,5 \text{ kW}$ (0,62 ÷ 1,37) Vorschlag B II: $N = 87 \text{ kW}$ (1,77)	Vorschlag B III: $N = 49 \text{ kW}$ (1,00)															
Gesamter Leistungsbedarf der Lüftung im kritischen Verkehrsfall b) ₂₄	Vorschlag B I: $N = 454 \text{ kW}$ (38,6)	Vorschlag A II: $N = 16,25 \text{ kW}$ (1,38) Vorschlag B II: $N = 17,90 \text{ kW}$ (1,52)	Vorschlag B III: $N = 11,76 \text{ kW}$ (1,00)															
Baukosten	31 550 000 DM (1,42)	25 510 000 DM (1,15)	22 260 000 DM (1,00)															
Kosten der maschinellen Einrichtung	<p>Vorschlag B I: 200 000 DM (2,35)</p> <p>Davon für Lüfter, Motoren und Getriebe 136 700 DM (3,83)</p>	<p>Vorschlag A II: 255 000 DM (3,00)</p> <p>Vorschlag B II: 125 000 DM (1,47)</p> <p>Davon für Lüfter, Motoren und Getriebe Vorschlag A II: 176 000 DM (4,93)</p> <p>Vorschlag B II: 55 500 DM (1,55)</p>	<p>Vorschlag B III: 85 000 DM (1,00)</p> <p>Davon für Lüfter, Motoren und Getriebe 35 700 DM (1,00)</p>															
Kosten der elektrischen Einrichtung	585 000 DM (1,00)	585 000 DM (1,00)	585 000 DM (1,00)															
Gesamtkosten der Anlage	Vorschlag B I: 32 335 000 DM (1,41)	Vorschlag A II: 26 350 000 DM (1,15)	Vorschlag B III: 22 930 000 DM (1,00)															
¹⁾ in standfestem Gebirge		²⁾ zwei Röhren																

¹⁾ in standfestem Gebirge²⁾ zwei Röhren

Stromkosten der Lüftung bei Inanspruchnahme der vollen Lüftungskapazität	Vorschlag B I: 113,50 DM/h (9,24)	Vorschlag A II: 7,60 DM/h \div 16,80 DM/h (0,62 \div 1,37) Vorschlag B II: 21,80 DM/h (1,77)	Vorschlag B III: 12,30 DM/h (1,00)
Stromkosten der Lüftung im kritischen Verkehrsfall b) ₂₄	Vorschlag B I: 113,50 DM/h (38,6)	Vorschlag A II: 4,06 DM/h (1,38) Vorschlag B II: 4,475 DM/h (1,52)	Vorschlag B III: 2,94 DM/h (1,00)
Stromkosten der Lüftung im kritischen Verkehrsfall b) ₂₄ je durchfahrendes Fahrzeug	Vorschlag B I: 0,19 DM/Wagen (38,6)	Vorschlag A II: 0,007 DM/Wagen (1,38) Vorschlag B II: 0,0075 DM/Wagen (1,52)	Vorschlag B III: 0,005 DM/Wagen (1,00)
Vorteile	Beste Gesamtlösung	Ausnützung des Verkehrsluftzugs; Längslüftung nur als zeitweilig arbeitende Zusatzlüftung für Verkehrsspitzen erforderlich.	Billigste und dabei trotzdem noch die zweitbeste Gesamtlösung; Spätere Einbaumöglichkeit einer Querlüftung; Sehr schnelle und sichere Verkehrsabwicklung im Tunnel; Niedrigste Stromkosten der Lüftung; Sonst wie bei II.
Nachteile	Teuerste Gesamtlösung; Ausnützung des Verkehrsluftzugs infolge gleichzeitiger Gegenwirkung der Verkehrskolben nicht möglich; Ständige Inbetriebhaltung der Lüftung bei Verkehr notwendig; 42 % höhere Gesamtkosten der Anlage als bei III; 37,60 % höhere Stromkosten der Lüftung im kritischen Verkehrsfall b) ₂₄ als bei III.	Sehr langsame und unbequeme Verkehrsabwicklung; Große Unfallgefahr im Tunnel; Weitgehende Drosselung der Tunnelleistung durch strenge Verkehrsvorschriften; 14 % bzw. 15 % höhere Gesamtkosten der Anlage als bei III; 38 % bzw. 52 % höhere Stromkosten der Lüftung im kritischen Verkehrsfall b) ₂₄ als bei III.	Sehr kleiner Nachteil durch notwendigen Pendelverkehr.

Konvoi-Ende fahren, und der Mindestabstand zwischen den Traktoren muss 1240 m (!) sein, so dass dann nur zwei (!) Traktoren gleichzeitig im Tunnel fahren dürfen. Der alsdann gerade gedeckte Gesamtluftbedarf beträgt 14 m³/s, wobei kein Gegenwind herrschen darf (!).

Fussgänger und Pferdefuhrwerke dürfen sich während des Autoverkehrs nicht in den Einbahnrohren aufhalten, weil bei 40 km/h Fahrgeschwindigkeit und 150 bzw. 300 Fz/h und Richtung der Verkehr eine Luftgeschwindigkeit von 3,20 bzw. 4,00 m/s erzeugt, während sie schon aus künstlicher Längslüftung maximal 2,60 m/s beträgt, was während 40 Minuten Fussmarschzeit im Tunnel gesundheitsgefährdend ist. Es müssen also Fahr- und Marschpläne festgelegt und vor jeder Durchfahrt an den Portalparkplätzen sinnvolle, aber lästige Umgruppierungen vorgenommen werden, was bei querbelüfteter Zweibahntröhre entfällt. Die Lüftungsberechnung nach Tabelle 2 ergab, dass bei einer Fahrgeschwindigkeit von 40 km/h und ohne Gegenwind zwei Einbahnrohren durch den Verkehrsluftzug bei 150 bis 420 Fz/h und Richtung in beschränkten Normalfällen gelüftet werden können. Jedoch reicht bei sinkender Fahrgeschwindigkeit, selbst ohne Gegenwind, der Verkehrsluftzug nicht mehr zur Lüftung bei 150 Fz/h und Richtung und weniger als 27 km/h Fahrgeschwindigkeit sowie bei 300 Fz/h und Richtung und weniger als 35 km/h Fahrgeschwindigkeit aus. Der Verkehrsluftzug genügt also nur unter folgenden Bedingungen für die Lüftung der zwei Einbahnrohren:

a) bei 150 bzw. 300 Fz/h und Richtung ist mindestens 27 bzw. 35 km/h Fahrgeschwindigkeit durchzuhalten; es dürfen höchstens 14 Fz im Mindestabstand 180 m, bzw. 21 Fz in 117 m Mindestabstand gleichzeitig im Tunnel fahren, und es darf kein Gegenwind vorhanden sein;

b) bei 40 km/h Fahrgeschwindigkeit ist die zulässige Tunnelfüllung 26 Fz im mittleren Abstand von 95 m. Die stark gedrosselte maximale Tunnelleistung ist dann 420 Fz/h und Richtung;

c) die Verkehrszusammensetzung darf nicht ungünstiger sein als auf Tabelle 2 angegeben ist.

d) Gegenwind auf dem Ausfahrtportal und entgegenlaufende Luftströmungen im Tunnel müssen unwirksam gemacht werden können, z. B. durch Anordnung einer Windfalle für Gegenwind am Ausfahrtportal, nach Bild 4.

e) für Katastrophen- und Unfälle müssen die später erörterten Sondermassnahmen vorgesehen werden.

Die Bedingungen a) bis c) sind durch Vorschriften, Betriebsanweisungen und automatische Verkehrssteuerung regelbar, die Fälle d) und e) erfordern Sondermassnahmen. Gegenwind, atmosphärische, thermische oder meteorologische Einflüsse können im Tunnel eine natürliche Längsströmung in oder entgegen der Verkehrsrichtung erzeugen und die Verkehrs- sowie die künstliche Längs-Lüftung fördern, hemmen oder ganz aufheben. Die Rechnung im kritischen Lastfall b)₂₄ ergab, dass schon eine Gegenströmung von 5 m/s = Windstärke 3 die Verkehrslüftung der beiden Einbahnrohren aufhebt. Daher sind zur Sicherung der Frischluftversorgung folgende Massnahmen notwendig:

a) Anordnung von Windfällen an den Ausfahrtportalen (Bild 4),

b) Inbetriebnahme einer künstlichen Zusatzlüftung bei ungenügender Verkehrslüftung,

c) Anordnung von Windmessern im Tunnel.

Im Grenzfall, da die Verkehrslüftung durch die natürliche Luftströmung aufgehoben wird, beträgt im Lastfall b)₂₄ (Tabelle 2) bei einer erforderlichen Frischluftmenge von 129 m³/s und einer Kapazität der künstlichen Zusatzlüftung von 70 m³/s die CO-Konzentration rund 0,4 %. Hieraus folgt, dass der normale Tunnelbetrieb einzustellen ist, wenn im Tunnel ohne Verkehr einwärts von der Windfalle eine natürliche Luftströmung gegen das Zufahrtportal von über 5 m/s durch die Windmesser im Tunnel gemessen und auf die Zentrale übertragen wird, weil dann auch eine künstliche Zusatzlüftung von 70 m³/s die notwendige Frischluftversorgung nicht mehr

Tabelle 2. Zusammenstellung der untersuchten Verkehrsfälle: CO-Anfall, Frischluftbedarf, Verkehrslüftung und maschinelle Lüftung

Last-fall	Verkehrs-teilung	Spur-leistung c Fz/h	Geschwin-digkeit V Km/h	Wagen-abstand p m	Tunnelfül-lung je Spur z Fz/Spur	Mittlere CO-Menge l/min u. Fz	CO-Anfall je Spur CO m³/s	Projekt I 2spuriger Tunnel mit Gegenverkehr (f = 0,21 %)		Projekt II Zwei 1spurige Tunnel mit Richtungsverkehr (f = 0,20 %)		Projekt III 2spuriger Tunnel m. Pendelverkehr (f = 0,22 %)		
								Frisch-luft- bedarf Qerf m³/s	Ma-schinelles Lüftung Qmasch m³/s	Frisch-luft- bedarf Qerf m³/s	Ver-kehrs- Lüftung Qverkehr m³/s	Ma-schinelles Lüftung Qmasch m³/s	Frisch-luft- kehrs- bedarf Qerf m³/s	Ver-kehrs- Lüftung Qverkehr m³/s
a) 24	60 % LKW 2-5 t	150	24	160	15	49,99	0,0125	119	119	2 × 63	2 × 56	2 × 7	114	120
a) 40	20 % LKW < 2 t	40	40	267	9	50	0,0075	72	72	2 × 38	2 × 77	—	68	169
b) 24	20 % PKW	300	24	80	31	49,99	0,0258	246	246	2 × 129	2 × 70	2 × 59	235	148 ²⁾
b) 40		40	40	133	19	50	0,0158	150	150	2 × 79	2 × 99	—	144	213
c) 24	20 % LKW > 5 t	150	24	160	15	49,47	0,0124	118	118	2 × 62	2 × 60	2 × 2	113	129
c) 40	40 % LKW 2-5 t	40	40	267	9	50	0,0075	72	72	2 × 38	2 × 85	—	68	183
d) 24	20 % LKW < 2 t	24	24	80	31	49,47	0,0255	243	243	2 × 128	2 × 75	2 × 53	232	158 ³⁾
d) 40	20 % PKW	300	40	133	19	50	0,0158	150	150	2 × 79	2 × 107	—	144	228

2) Maschinelle Lüftung 87 m³/s

3) Maschinelle Lüftung 74 m³/s

zu sichern vermag. Dann ist die Windfalle durch Klappenschott zu schliessen, und die Fahrzeuge müssen bei abgeschalteter künstlicher Zusatzlüftung in solchen Abständen und Geschwindigkeiten durch den Tunnel geschleust werden, dass ihr nur geringer Verkehrsluftzug von der viel grösseren natürlichen Luftströmung unterdrückt und in eine resultierende, der Fahrtrichtung entgegengesetzte Luftströmung umgewandelt wird. Hierbei ist eine Verkehrsregelung nötig, die die zulässige Tunnelfüllung auf Grund der Anzeige der CO-Messanlage festsetzt. Ausserdem wird hierfür ein betriebeigenes, den Konvois vorausfahrendes, mit Funkeinrichtung versehenes Leitfahrzeug pro Röhre erforderlich. Bei Querlüftung entfällt dagegen diese Notwendigkeit.

Bei Brand- und gewöhnlichen Unfällen im Tunnel sinkt der Verkehrsluftzug mit abnehmender Fahrgeschwindigkeit und wird bei Verkehrsstillstand gleich Null. Die Folgen sind rasche CO-Anreicherung und Sichtverschlechterung. Betriebs-

erfahrungen in Autotunneln lehren, dass die Fahrzeugmotoren in solchen Fällen trotz Anweisung nicht sofort oder überhaupt nicht abgestellt werden, was zur Katastrophe führen kann. Ein Zeitverlust bis zum Anlaufen der zentral gesteuerten Hilfsmassnahmen ist unvermeidlich, da das mit Selenzellen im Tunnel gekoppelte automatische Signalsystem der Zentrale zwar die Unfallstelle und den CO-Gehalt, zunächst aber nicht die Art des Unfalls anzeigt; diese kann nur fernmündlich durch die Tunnelpolizei wiederum mit Zeitverlust gemeldet werden. Man wird zwar die Zufahrt vorsorglich sofort stoppen, kann aber bei künstlicher Zusatz-Längslüftung zunächst nicht übersehen, was mit ihr geschehen muss. Im Brandfalle ist nämlich jede künstliche Längslüftung sofort abzuschalten oder darf erst gar nicht eingeschaltet werden, bis der Brand gelöscht ist — ein Nachteil, den die Querlüftung nicht hat. Selbst bei abgestellten Fahrzeugmotoren an der Unfallstelle kann bei Längslüftung der CO-Gehalt durch nachrollenden Restverkehr, dessen Verkehrsluftzug infolge Querschnittsverengung der Unfallstelle stark absinkt, über 0,4 % wachsen. Im Brandfalle bewirkt diese Querschnittsverengung an der Unfallstelle eine grössere Abflussgeschwindigkeit der Luft am Brandherd, also Feuersturmgefahr, mithin eine Steigerung des allgemeinen Gefahrenrisikos. Alle diese Nachteile weist eine mit ihrer Gesamtkapazität auf den Abschnitt der Unfallstelle konzentrierbare zusätzliche oder totale Querlüftung nicht auf, bei der außerdem die Lage der Unfallstelle im Tunnel belanglos ist, während bei künstlicher Längslüftung die Lüftungsbedingungen um so kritischer werden, je näher die Unfallstelle beim Ausfahrtportal liegt. Die CO-Konzentration steigt bei Längslüftung immer von 0 % am Zufahrtsportal auf die am Ausfahrtportal sichtbedingte zulässige Grenze gleichmässig an. Deshalb ist bei Längslüftung der Unterschied zwischen der physiologischen CO-Grenze (0,4 %) und der an einer betrachteten Tunnelstrecke vorhandenen sichtbedingten CO-Konzentration⁵⁾ das Kriterium für die Tragweite eines Unfalls im Tunnel, d. h. für die Unfallstelle selbst. Aus dem Unterschied der genannten beiden CO-Konzentrationen lässt sich die Zeit berechnen, in der an der Unfallstelle die physiologisch zulässige CO-Konzentration (0,4 %) erreicht wird.

Für den Panikfall des kritischen Lastfalles b)₂₄ (Tabelle 2) beträgt die notwendige künstliche Zusatzlüftung für die Sicherung der physiologischen CO-Grenze pro Spur 67,75 oder rund 70 m³/s, die in den Einbahnrohren bei Längslüftung eine Luftgeschwindigkeit von 2,63 m/s im unbesetzten bzw. von 4,22 m/s im besetzten Tunnelteil erzeugt. Bei Belegung des Verkehrsverbandes mit 10-t-Sondertransporten kann der Längsluftzug sogar auf 8,22 m/s ansteigen. Diese Luftgeschwindigkeiten sind im Brandfalle höchst gefährlich und für Fußgänger unzuträglich, so dass Sondervorschriften für Fußgängerverkehr ausserhalb des Autoverkehrs und Abschalten der künstlichen Zusatz-Längslüftung im Brandfall erlassen werden müssen, was bei Querlüftung nicht nötig ist. Wenn in einer Einbahnrohre im Lastfall b)₂₄ 31 Fz sich im Tunnel

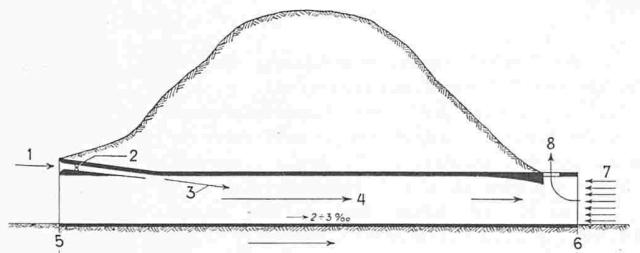


Bild 4. Systemskizze der Längslüftung bei zwei Einbahnröhren. 1 Frischluft-Ansaugung, 2 Schraubenlüfter, 3 Zusatzlüftung, 4 Verkehrsluftzug, 5 Zufahrtsportal, 6 Ausfahrtsportal, 7 Wind, 8 Windfalle

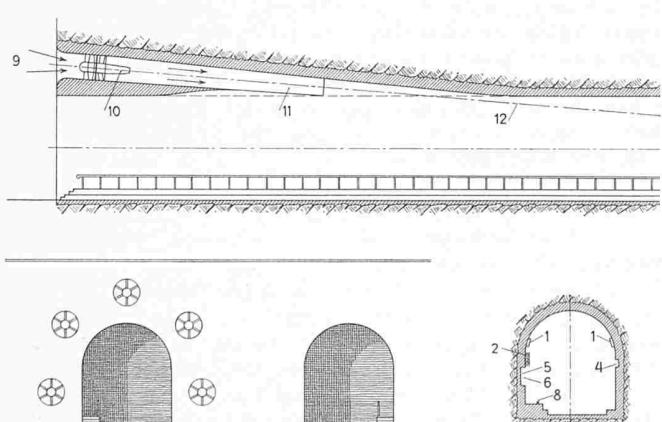


Bild 5. Tunnelportal bei Längslüftung nach Bild 4. Unten links Ansicht der beiden Portale, rechts Normalquerschnitt. 1 Beleuchtung, 2 Signallampe für Verkehrsregelung, 3 Selenzellen für Sichtmessung, hinter 2 mittig versetzt angeordnet, 4 Kabelkanal, 5 Feuermelder und Feuerlöscher, 6 Telefon, 8 Hydrant, 9 Frischluft-Eintritt, 10 Ventilator, 11 Frischluftkanal, 12 Ventilatoraxe.

⁵⁾ Dieser Unterschied beträgt (0,4 f_{vorf. Sicht}) %

befinden, an einer Unfallstelle in der Nähe des Ausfahrtsportals bis auf 10 m aneinander aufschliessen und eine Panik ausbricht, so fällt auf 310 m Tunnellänge eine CO-Menge von 0,0271 m³/s an, nachdem die Sichtgrenze von 0,20 % schon erreicht ist. Mit 8239,8 m³ Eigenluftvolumen dieser Strecke und 67,75 m³/s erforderlicher Frischluftmenge wird die physiologische CO-Grenze nach 61 s überschritten, weil bei stillgelegtem Verkehr durch diesen keine Frischluft mehr in den Tunnel gelangt und die zwischen Zufahrtsportal und Unfallstelle durchfahrene Tunnelstrecke bereits mit CO angereichert ist.

Die problematische Lüftungswirkung von Querschlägen, die von deren zufälligem Richtungsverlauf in bezug auf die Unfallstelle abhängt, muss sicherheitshalber unbeachtet bleiben. Die zum Anlaufen der Sicherheitsmassnahmen verfügbare viel zu knappe Reaktionszeit stellt überdurchschnittliche Anforderungen an die Zentrale, wobei die Seltenheit von Katastrophen und der eintönige Dienst in der Zentrale zusätzliche Hemmungen sind. Bei zwei Einbahnrohren können Hilfsfahrzeuge nur vom Ausfahrtsportal her zur Unfallstelle gelangen, wegen Tunnelverstopfung nicht durch Querschläge hinter der Unfallstelle. Eine nicht sofort abgeschaltete Längslüftung verqualmt diese Zufahrt, bringt auch Hilfsfahrzeuge in Brandgefahr und erschwert die Löscharbeiten. Alle diese Nachteile hat die Querlüftung nicht.

Das Eigenluftvolumen des Tunnels bestimmt bei Längslüftung die verfügbare Löschzeit eines Brandes. Diese beträgt im Lastfall b)₂₄ bei $p = 80$ m, $z = 31$ Fz, $f = 0,4\%$ CO in der Eingangsstrecke einer Einbahnrohre bei 62 685,5 m³ Eigenluftvolumen 15 min 25 s, indessee die CO-Konzentration von 0 % auf 0,4 % wächst. Bei reichlicher Verteilung von Schaumlöschern und Ausschluss feuer- und explosionsgefährlicher Transporte (man denke an die Explosionskatastrophe vom Jahre 1949 im Hollandtunnel!) ist diese Löschzeit ausreichend. Bei einem Brand am Ausfahrtsportal sind dagegen bei Längslüftung bereits 0,2 % CO vorhanden, und die physiologische CO-Grenze wird innerhalb 7 min 42 s überschritten, was als Löschzeit sehr knapp ist. Querlüftung vermeidet auch dieses Risiko.

Das Brandrisiko im Tunnel erfordert folgende Massnahmen: Anordnung von Feuermeldern, Feuerlöschern, Hydranten, Verkehrssignalen mit Rot- und Grünlicht sowie rotem Flackerlicht (für «Stop», «Freie Fahrt» und «Motoren abstellen») alle 35 m, von Fernsprechern und Notschaltstellen der Verkehrssignale alle 140 m im Tunnel sowie gleiche Einrichtungen an den Portalen, Einbau einer von der Zentrale und der Tunnelpolizei bedienbaren Lautsprecheranlage im Tunnel und an den Portalen für Befehlsübermittlung.

Die Untersuchungen widerlegen die Behauptung, dass man bei zwei Einbahnrohren ohne künstliche Zusatzlüftung auskommen könne. Im Gegenteil brauchen Einbahnrohren im Falle Banihal schon bei Betriebseröffnung eine künstliche Zusatzlüftung von 70 m³/s und dies trotz der Lüftungsmöglichkeit durch den Verkehrsluftzug im Normalfall ohne Gegenwind und ohne ungünstige Umstände sowie bei starker Leistungsabschwächung. Dabei muss die Luftmenge durch Winkelverstellung der Lüfterflügel auf 100 m³/s steigerbar sein, um Belastungsspitzen infolge Zusammenwirken ungünstiger Umstände und Katastrophenfälle bedienen zu können. Die beste Lösung wäre Querlüftung. Die gewünschte Längslüftung nach dem Beispiel des Cochemer Tunnels (Bild 5) ohne Zwischenschächte mit Längsdurchspülung der Luft und Blaslüftern am Zufahrtsportal setzt sorgfältigste, aber hemmende Verkehrsregelung und Manipulationsvorschriften der Lüftung voraus.

5. Zweibahn-Doppelpendelröhre (Bild 6)

Mit dieser Anordnung für richtungsgebundenen Zweispuren-Pendelverkehr erreicht man folgende Vorteile:

a) Im Vergleich zur Gegenverkehr-Zweibahnrohre kommt man infolge Nutzung des Verkehrsluftzugs mit einer geringeren künstlichen Zusatz-Luftförderung sowie mit geringeren Bau-, Installations- und Betriebskosten der Lüftung aus; die Durchführung der Längslüftung ist mit weniger Risiko verbunden. Man erreicht kürzere Durchfahrtszeiten der Konvois bei unbegrenzter Fahrgeschwindigkeit.

b) Im Vergleich zu zwei Einbahnrohren für Richtungsbetrieb ergibt sich wegen grösserer, zusammenhängender Fahrbahnbreite eine bequemere Verkehrsabwicklung, ein geringeres Unfallrisiko und eine leichtere Bewältigung von Katastrophenfällen. Durch mühelose Tunnelräumung und grösseres Eigenluftvolumen der Röhre ist das Gefahrenrisiko in kritischen Lüftungsfällen kleiner. Wegen grösseren Verkehrsluftzugs lässt sich die künstliche Zusatzlüftung für kleinere Leistung auslegen; man kommt mit weniger Lüftereinheiten und mit kleineren Bau-, Installations- und Betriebskosten der Lüftung aus. Die Risiken der künstlichen Zusatz-Längslüftung sind geringer. Durch grössere Fahrgeschwindigkeiten über 40 km/h (z. B. PKW-Spur 80 km/h, LKW-Spur 60 km/h und mehr) fallen die Durchfahrtszeiten der Konvois auf weniger als die Hälfte ab, während in engen Einbahnrohren schon 40 km/h Fahrgeschwindigkeit zweifelhaft sind; Verbilligung der Gesamtkosten durch Wahl der den Gegebenheiten des vorwiegend standfesten Gebirges anpassungsfähigeren Kernbauweise. Gesamtluftbedarf und künstlich zu deckender Spitzenbedarf sind aus Tabelle 2 ersichtlich. Bei im Vergleich zu Einbahnrohren einfacherer Verkehrsregelung genügt normalerweise der Verkehrsluftzug zur Lüftung der Zweibahn-Doppelpendelröhre, besonders bei den grossen Fahrgeschwindigkeiten, die hier zulässig sind. Die Fälle notwendiger künstlicher Zusatzlüftung sind seltener, und der Luftbedarf ist kleiner als bei zwei Einbahnrohren. Statt der Querlüftung, die auch hier die beste und sicherste Lüftungsart darstellt, kann vorläufig eine Längslüftung ohne Zwischenschächte mit weniger Risiko angewandt werden als bei zwei Einbahnrohren, jedoch kann sie nicht nach dem aufwendigen Vorbild des Cochemer Tunnels ausgeführt werden. Empfehlenswert ist eine zentrale Gebläseinrichtung in Tunnelmitte nach Bild 2 mit Luftströmung in der jeweiligen Verkehrsrichtung, was durch sinnvoll angeordnete Luftkanäle und Steuerklappen zu erreichen ist. Auch direkt umkehrbare Lüfter können vorteilhaft verwendet werden. Im kritischen Lastfall b)₂₄ brauchen zwei Einbahnrohren 118 m³/s Zusatzluft, die Zweibahnpendelröhre dagegen nur 87 m³/s (73,7 %). Die mittleren Luftgeschwindigkeiten aus belasteten und unbelasteten Strecken betragen bei Längslüftung der zwei Einbahnrohren 2,38 m/s, bei der Zweibahn-Doppelpendelröhre nur 1,85 m/s.

Der Betriebskostenvergleich (Tab. 2) zeigt, dass zwei Einbahnrohren im Katastrophenfall 140 bis 200 m³/s, im kritischen Lastfall b)₂₄ 118 m³/s Zusatzluft brauchen. Der Kraftbedarf beträgt im Katastrophenfall bei Vorschlag A II bei 140 bis 200 m³/s Luftförderung 30 kW bis 67,5 kW und bei Vorschlag B II bei 200 m³/s Luftförderung 87 kW, im Fall b)₂₄ dagegen 16,25 kW bei Vorschlag A II und 17,90 kW bei Vorschlag B II (24 % bis 54 %, bzw. 21 % der installierten Leistung)! Die Zweibahn-Doppelpendelröhre braucht im Katastrophenfall 135 m³/s Zusatzluft, also 7 Lüfter zu je 20 m³/s. Die Druckverluste wurden zu 28 mm WS, der Kraftbedarf zu 49 kW berechnet. Im Fall b)₂₄ erfordern 87 m³/s Zusatzluft 11,76 kW Kraftbedarf (24 % der installierten Leistung).

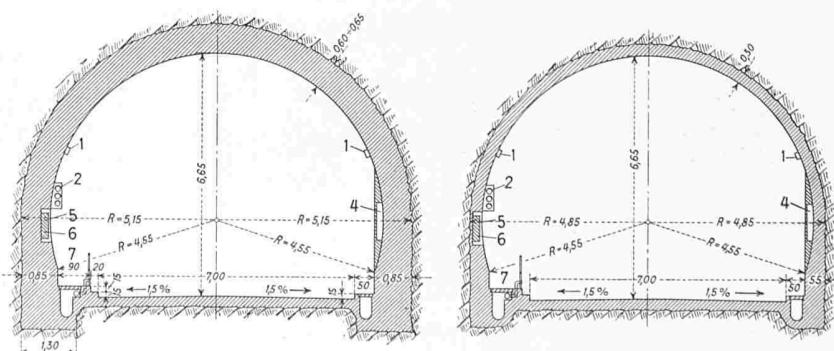


Bild 6. Normalquerschnitt bei Längslüftung, 1:200. Links bei nicht selbsttragendem Fels, Felsaushub 67,3 m³ pro lfm, Beton 16,08 m³ pro lfm. Rechts bei selbsttragendem Fels, Felsaushub 60,6 m³ pro lfm, Beton 9,36 m³ pro lfm. 1 Beleuchtung, 2 Signallampen für Verkehrsregelung, 3 Selenzellen für Sichtmessung (zu 2 mittig versetzt angeordnet), 4 Kabelkanal, 5 Feuermelder und Feuerlöscher, 6 Telefon, 7 Fußgängersteig

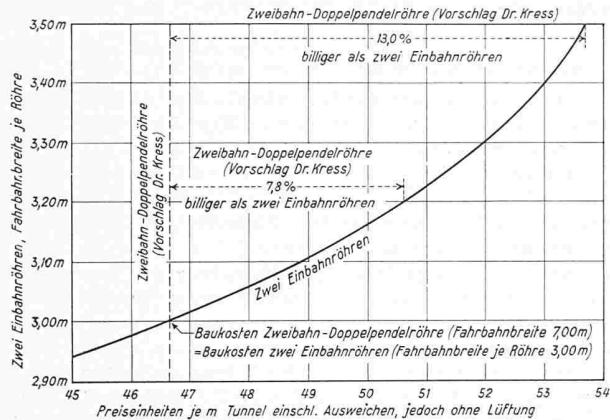


Bild 7. Baukostenvergleich von zwei Einbahnröhren mit der Zweibahn-Doppelpendelröhre in Abhängigkeit der Fahrbahnbreite pro Röhre bei zwei Einbahnröhren

stung), woraus sich eine etwa gleich grosse Sicherheitsreserve der Zweibahn-Doppelpendelröhre wie bei den Einbahnröhren ergibt. Demzufolge sind die Lüftungsstromkosten der Einbahnröhren das $16,25/11,76 = 1,38$ -fache (Vorschlag A II) bzw. das $17,90/11,76 = 1,52$ -fache (Vorschlag B II) der Zweibahn-Doppelpendelröhre.

Bei 0,20 DK/kWh kostet im Fall b)²⁴ eine Betriebsstunde der beiden Einbahnröhren zusammen $0,20 \cdot 16,25/0,80 = 4,06$ DM/h bzw. $0,20 \cdot 17,90/0,80 = 4,47$ DM/h, bei der Zweibahn-Pendelröhre dagegen nur 2,94 DM/h, mithin ist die Betriebskostensparnis der Zweibahn-Doppelpendelröhre gegenüber 2 Einbahnröhren 27,5 % bzw. 34,5 %, während im Katastrophenfall eine Betriebsstunde bei den beiden Einbahnröhren 7,60 DM/h bis 16,80 DM/h bzw. 21,80 DM/h und bei der Zweibahn-Doppelpendelröhre nur 12,30 DM/h kostet. Zwei Einbahnröhren brauchen 10 Lüfter, die Zweibahn-Doppelpendelröhre nur sieben gleichen Typs, was eine Installationskostensparnis der Zweibahn-Doppelpendelröhre um 30 % bringt.

Bei Katastrophe kann die Zweibahn-Doppelpendelröhre sogar bei nur 40 km/h Fahrgeschwindigkeit in 3 min 53 s Durchfahrtszeit reibungslos geräumt werden, während im Brandfall bei abgeschalteter Zusatzlüftung ihr Eigenluftvolumen von 12 755 m³ während 15 min 39 s ausreicht, bis der CO-Gehalt der Eingangsstrecke von 0 % auf 0,4 % steigt. Beim Ausfahrtspunkt werden unter gleichen Bedingungen 0,4 % CO in 7 min 2 s erreicht, was ungefährlich ist, weil die von selbst abrollende Tunnelräumung bei Blockierung einer Spur nur 3 min 53 s erfordert. Die Einbahnröhren mit riskant engen Fahrbahnen brauchen ein Vielfaches dieser Räumungszeit.

Ein Baukostenvergleich der Zweibahn-Doppelpendelröhre von 7 m Fahrbahn- und 0,90 m Fußwegbreite mit zwei Einbahnröhren von je 3,50 m Fahrbahnbreite ergab 13,0 % Ersparnis zu Gunsten der Zweibahn-Doppelpendelröhre (Bild 7) und Baukostengleichheit bei zwei Einbahnröhren von je nur 3 m Fahrbahnbreite. Die Unmöglichkeit so enger Fahrbahnen für Autotunnel dürfte feststehen. Der vorteilhafteste Betrieb der Zweibahn-Doppelpendelröhre ist eine Langsam(LKW)- und eine Schnell(PKW)-Spur und möglichst grosse Fahrgeschwindigkeiten. Für militärische Konvoi-Transporte bietet

die Zweibahn-Doppelpendelröhre wegen kürzerer Fahrzeiten überragende Vorteile gegenüber zwei Einbahnröhren. Die Zweibahn-Doppelpendelröhre braucht keine Geschwindigkeitsbegrenzung; bei jeder über 24 km/h liegenden Fahrgeschwindigkeit wird der Spitzluftbedarf kleiner als 87 m³/s, d. h. meistens wird keine oder wenig Zusatzlüftung zum Verkehrsluftzug benötigt, die Lüftung wird sehr billig. Ein grosser Vorteil der Zweibahn-Doppelpendelröhre ist die spätere Einbaumöglichkeit der besseren Querlüftung oder deren Kombination, was zwei Einbahnröhren nicht zulassen. Die Zweibahn-Doppelpendelröhre ist also zwei Einbahnröhren verkehrstechnisch, lüftungstechnisch, baukostenmäßig, in Wirtschaftlichkeit und Verkehrssicherheit weit überlegen.

6. Probetrieb

Bei jedem Autotunnel müssen nach Betriebseröffnung die für die Manipulation der Lüftungs- und Signalanlagen zu erlassenden Betriebsvorschriften aus dem Verkehrsablauf der ersten Monate erarbeitet und verfeinert werden. Hierzu sind laufende Verkehrszählungen und Luftmessungen unter verschiedenen Bedingungen notwendig, deren Auswertung der Verwaltung das für den Aufbau der Betriebsorganisation erforderliche Material liefert. Die Probetriebskosten sind zu den Herstellungskosten hinzuzurechnen, sie können zu rund 60 % der maschinellen Installationskosten, hier zu roh 120 000 DM geschätzt werden.

7. Verkehrsregelung

Ausser den genannten Sonderbestimmungen für einzelne Verkehrsfälle sind folgende Verkehrs vorschriften zu geben: Beim Kraftverkehr sind nur gummibereifte Motorfahrzeuge zugelassen, während Pferdefuhrwerke ausgenommen werden müssen; die maximale Ladehöhe und Ladebreite und deren Ueberstände über die äussere Radbegrenzung (0,20) sowie die seitliche Ausladung aus der Mittelachse (1,20 m) sind zu begrenzen. Schlepper mit mehr als einem Anhänger, qualmentwickelnde Wagen, Sprengstoffladungen, andere feuer- und explosionsgefährliche Ladungen sowie alle Fahrzeuge, die nach Ansicht der Tunnelpolizei die Verkehrssicherheit gefährden, sind für Zivilverkehr verboten, für Militärverkehr durch Sondervorschriften zu regeln. Als kleinster Wagenabstand ist bei zwei Einbahnröhren 80 m vorzuschreiben, bei Doppelpendel- und bei Gegenverkehr-Zweibahn röhre bedarf es keiner solchen Vorschrift. Die Höchstgeschwindigkeit ist bei Gegenverkehrstunneln und Einbahnröhren auf 50 km in der Stunde, bei Zweibahn-Doppelpendelröhre überhaupt nicht zu begrenzen. Fahrzeuge mit geringerer Leistung als 24 km/h auf der Horizontalen sind auszuschliessen, außer Traktoren (10 km/h), für welche die erwähnten Sonderbestimmungen zu erlassen sind. Einschalten von Fernlicht im Tunnel ist wegen Rückspiegelblendung, ferner das Auskuppeln der Motoren, Reparieren oder Reifenwechsel im Tunnel, Benützung von Sirenen oder Signalhörnern oder anderer lauter Signale ist mit Ausnahme der Tunnelpolizei allen Tunnelbenutzern zu untersagen. Wegwerfen von Gegenständen im Tunnel und die Einfahrt in den Tunnel mit unzureichendem Brennstoff-Vorrat sind zu verbieten. An Zu- und Ausfahrt sowie alle 35 m im Tunnel sind die erwähnten optischen Verkehrssignale anzubringen, ferner Notschaltstellen alle 140 m im Tunnel, wie auch an Zu- und Ausfahrt. An den Parkplätzen außerhalb des Tunnels sind Abschlepp- und Reparaturdienste sowie Tank-

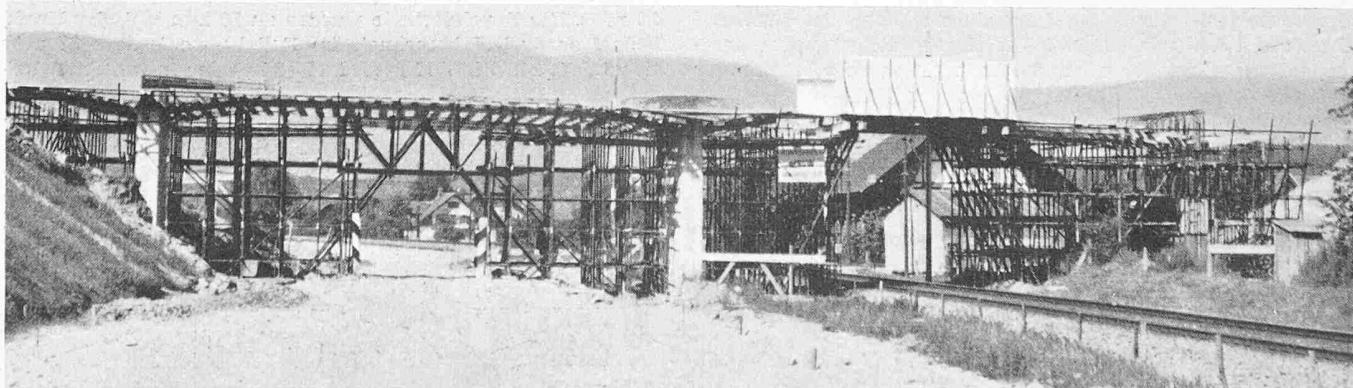


Bild 1. Lehrgerüst für Eisenbahn- und Strassenüberführung Studen-Biel



Bild 2. H-Rahmen-Fassadengerüst in Zürich

stellen einzurichten. Die Verkehrsüberwachung muss bei Gegenverkehr- und Zweibahn-Pendeltunneln durch motorisierte Tunnelpolizei (Funkstreifenwagen), bei Einbahnröhren durch Tunnelpolizei zu Fuss (sehr schwerfällig) erfolgen. Ueberholen im Tunnel ist nur bei der Zweibahn-Doppelpendelröhre zu gestatten, in allen anderen Fällen streng zu untersagen. Bei Einbahnröhren sind Fahr- und Marschpläne, bei Pendelröhren nur Fahrpläne auszuarbeiten.

Adresse des Verfassers: Dr. Ing. H. H. Kress, VDI., Ingenieurbüro für Bauwesen, Stuttgart-Ca., Daimlerstrasse 38.

Neue Methoden im Gerüst- und Schalungsbau

DK 624.057

Die heutigen Lohn- und Materialkosten zwingen jeden Bauunternehmer, jede nur mögliche Rationalisierung zur Verminderung seiner Gestehungskosten heranzuziehen. Wesentliche Kosteneinsparungen sind bei jenen Arbeitsvorgängen am ehesten zu erzielen, die sich häufig wiederholen. Als solche sind zu nennen: Gerüstbau, Abstützungen aller Art, Schalungsbau. Sei es im Hoch- oder im Tiefbau, auf allen Baustellen finden sich diese Arbeiten immer wieder in ungezählten Varianten. Um diese Arbeiten so rationell wie möglich zu gestalten, ist der Werkstoff für Gerüste, Schalungen usw. derart zu wählen, dass sich für Transport, Montage und Demontage minimale Arbeitszeiten ergeben. Besonders ist dabei auf die Operationen zu achten, die auf jeder Baustelle immer wieder neu vorgenommen werden müssen. Wo sie sich durch geeignete Konstruktionen nicht ganz vermeiden lassen, sind diese so auszubilden, dass die Arbeiten rasch, sicher und mit wenig Personal durchgeführt werden können, dass keine Teile verloren gehen und dass die einzelnen Elemente immer wieder verwendet werden können.

Die Anschaffung von Baugeräten, die dank ihrer Vorfabrikation den Grossteil der Arbeit auf der Baustelle erübrigen, macht sich in kurzer Zeit bezahlt. Solche Erwägungen führten sowohl zum Stahlrohrgerüst als auch zur Stahl-Schalung und dem Schalungsträger.

Die ursprünglichen Konstruktionen aus Stahl brachten wohl einen grossen Fortschritt. Der Ausmerzung von unnötiger Wiederholarbeit wurde aber erst in letzter Zeit die richtige Beachtung geschenkt. Damit konnte aber auch die Zeiteinsparung ganz wesentlich verbessert werden. Nach diesen Gesichtspunkten sind die im Nachfolgenden beschriebenen neuen Geräte entworfen und konstruiert. Die Resultate ihres

Einsatzes in der Schweiz hat die Richtigkeit der Gedanken-gänge vollständig bewiesen.

1. Anpassungsfähiges Rahmen-Stahlrohr-Gerüst

Die mit den bis anhin verwendeten Stahlrohr-Gerüsten gemachten Erfahrungen haben ihre praktisch unbegrenzte Wiederverwendbarkeit deutlich bewiesen. Leider lassen aber die Arbeitszeiteinsparungen infolge der grossen Zahl von Arbeitswiederholungen noch zu wünschen übrig. Die vielen verlierbaren Losteile verursachten ebenfalls grosse jährliche Materialverluste. Die radikale Abkehr von diesem Gerüst-System zu den geschweißten Rahmen-Gerüsten (z. B. Safeway und ähnliche) zeigte wohl Vorteile im erwähnten Sinne, brachte jedoch eine grosse Verminderung der Anpassungsfähigkeit mit sich, was wiederum eine Reduktion der Verwendbarkeit und der Einsatzmöglichkeiten zur Folge hatte. Die geschweißten Rahmen beanspruchen infolge ihrer Sperrigkeit mehr Lagerraum und sind der Verbiegung und Verwindung stark ausgesetzt.

Das vorliegende H-Rahmen-Patentgerüst besteht aus einfachen Elementen, die leicht zu handhaben sind; es hat den grossen Vorteil, bei vollständiger Anpassungsfähigkeit enorme Arbeitszeiteinsparungen zu ermöglichen. Häufige Wiederholarbeiten, wie Befestigung von Querriegeln, Abmessen von Gerüst-Höhe und -Breite usw. erübrigen sich. Die Verringerung der Montage-Zeit gegenüber normalen Stahlrohrgerüsten beträgt im Mittel 30 bis 60 %. Die geringe Zahl von Losteilen vermindert wesentlich die Gefahr von Materialverlusten.

Da die Querriegel auf speziellen Nocken aufliegen (automatische Höhenbestimmung), ist die Tragfähigkeit der Gerüste nur in seltenen Fällen durch die Haftfestigkeit der Kupplungen begrenzt. Die feste Verschweissung der Rahmen wurde umgangen, so dass keine Verwindungen oder innere Spannungen auftreten können. Außerdem lassen sich die Rahmen leicht zerlegen, was nicht ihre Ueberholung, sondern auch den Transport und die Einlagerung auf kleinstem Raum wesentlich erleichtert. Bilder 1 und 2 zeigen die Anwendung von H-Rahmen-Patentgerüsten in der Schweiz zu verschiedenen Zwecken.

Das höchste Wohnhaus der Schweiz mit 22 Stockwerken in La Chaux-de-Fonds (Unternehmer C. Cerutti) wird gegenwärtig mit diesem System eingerüstet. Arbeitszeiter-

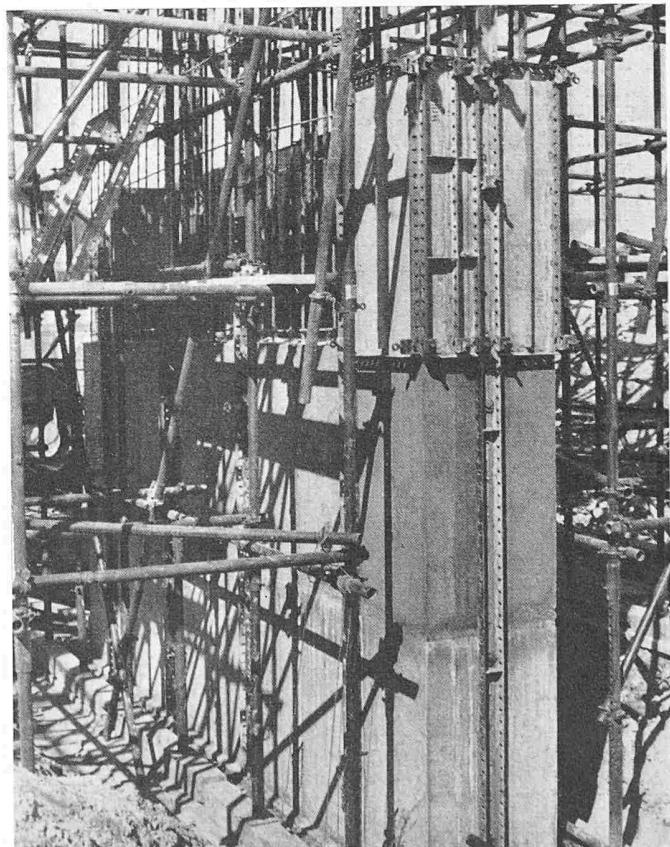


Bild 3. Wallform-Schalung als Brückenpfeiler-Kletterschalung bei der dritten Giessetappe