

Verkehrs- und Lüftungsprobleme von Autotunneln dargestellt am Banihal Tunnel in Indien

Autor(en): **Kress, H.H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **73 (1955)**

Heft 13

PDF erstellt am: **22.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-61883>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

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 Bauvorhaben 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 sauberes und rationelles Arbeiten gewährleisten.

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

Verkehrs- und Lüftungsprobleme von Autotunneln

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 durchgeführten verkehrs- und Lüftungstechnischen Studien hier von Interesse sein dürfte. Das bauseitige Projekt sieht eine Zwei-bahn-röhre für gleichzeitigen Gegenverkehr mit 7 m Fahrbahn-breite 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 Einbahn-röhren für Richtungsbetrieb mit je 2% bzw. 3% Gefälle, die zur Vergleichswürdigkeit je 3,50 m Fahrbahn-breite 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 Nutz-barkeit des Verkehrsluftzugs liegen. Diese Nutzbarkeit er-scheint allerdings nur im Normalfall unter gewissen Voraus-setzungen und bei starken Verkehrsdrosselungen für die Lüf-tung der Einbahn-röhren 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 Fahrbahnausweitungen, die zum manuellen Hineinschieben havariierter Fahrzeuge stellen-weise notwendig sind. Ihr Verkehrswert ist allerdings zwei-felhaft. Ueberdies machen sie die Anordnung von Querschlä-

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

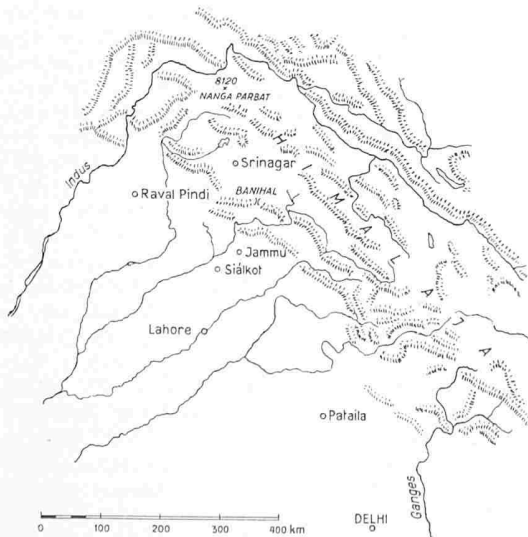


Bild 1. Lageskizze, 1:750000

gen zwischen den Röhren für Verkehrsumleitungen nicht ent-behrlich. Ebenfalls nachteilig sind ferner die verkehrshem-menden geringen Fahrbahnbreiten der Einbahn-röhren.

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 erör-terten wesentlichen Vorteile und Ersparnisse gegenüber den an-deren Vorschlägen ergeben. Statt der bauseits unerwünschten Querlüftung und der hier zu aufwendigen Cochemer Längs-lüftung hat der Verfasser hierfür unter Vollaussnutzung des Verkehrsluftzugs eine in der jeweiligen Verkehrsrichtung wirkende, von einer Anlage in Tunnelmitte ausgehende, zeit-weilige Zusatz-Längslüftung ohne Zwischenschächte für Spitzenbedarf nach Bild 2 entwickelt, die wirtschaftlicher als das Cochemer System ist, den Einbau direkt umkehrbar wir-kender Lüfter ermöglicht und einen späteren Einbau der zweifellos besten und sichersten Querlüftung im Gegensatz zu den Einbahn-röhren nicht von vornherein ausschliesst.

2. Aufgabenstellung

Zu untersuchen waren die Lüftungsprobleme der Gegen-verkehr-Zweibahn-röhre (Fall I) und der beiden Einbahn-röhren (Fall II) unter dem Gesichtspunkt der Ausnutzung des Verkehrsluftzugs als Normallüftung nebst einer billigs-ten, zeitweiligen künstlichen Zusatz-Längslüftung nach Co-chemer Vorbild und deren Anwendungsgrenzen einschliesslich der notwendigen Verkehrsregelung. Hieraus folgte zwangs-läufig die Untersuchung der Zweibahn-Doppelpendelröhre (Fall III). Die drei Fälle und die Ergebnisse der Unter-suchungen sind auf Tabelle 1 zusammengestellt.

Als Grundbedingungen wurden angegeben: grösster An-fangsverkehr 150, grösster Zukunftsverkehr 300 Fz/h und Richtung; aus besonderen Gründen jeweils in Konvois von an-fangs 250, später 300 Fz/Richtung für Verkehrsmischungen 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 Strassenverkehrs-ordnung § 7 (2,50 m breit, 4,00 m hoch) anzusetzen. Die Unter-suchungen der Tabelle 2 erfolgten nach der Dissertation des Verfassers²⁾ und nach Getto³⁾.

3. Gegenverkehr-Zweibahn-röhre

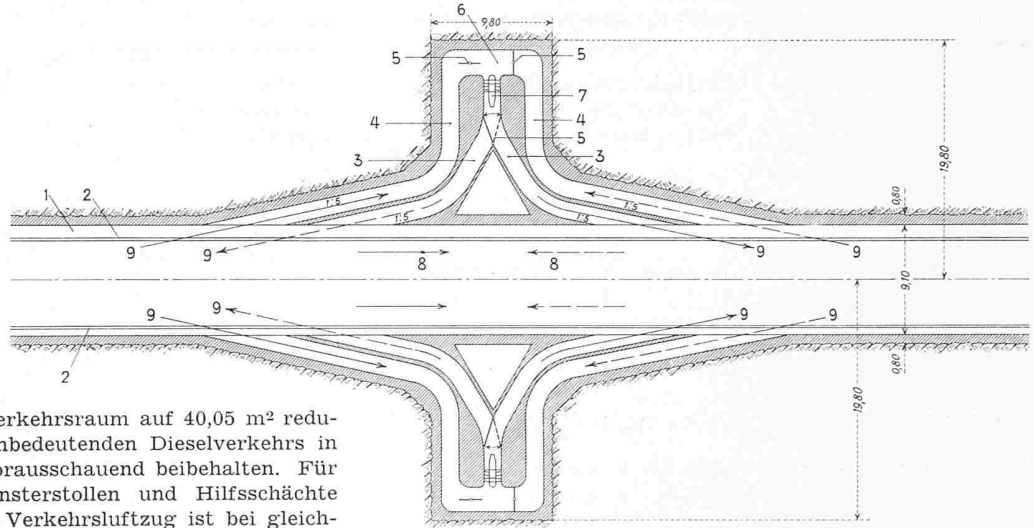
Nach der Sichtkurve des Verfassers⁴⁾ beträgt bei einem Verkehrsraum von 50,81 m² die für gute Sicht bei grösstem Verkehr zulässige CO-Konzentration bei Längs- und Halb-querlüftung 0,22 ‰, bei Querlüftung und Kombination mit Halbquerlüftung nur 0,21 ‰, weil dann der erforderliche Ab-

2) Kress H. H.: Richtlinien für die Entwurfsbearbeitung von Auto-tunneln. 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 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 m² den Verkehrsraum auf 40,05 m² reduziert. Trotz vorläufig noch unbedeutenden Dieserverkehrs 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 Gesamtfrischlufthmenge von 246 m³/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 m² (St-Cloud, Mersey) zulässig sein, bei 50,81 m² 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 m³ 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 m³/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 m², einen Abluftkanal von 10,76 m² und einen Verkehrsraum von 40,05 m², 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 Banihal-Einbahnrohren. Verkehrszusammensetzung und Marschgeschwindigkeit bestimmen die Lüftung. Steigender LKW-Anteil und sinkende Marschgeschwindigkeit erfordern mehr Frischluft, andererseits 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 km Tunnellänge durchgehalten werden können.

Nach der bereits erwähnten Sichtkurve weist ein Verkehrsraum von 26,58 m² bei grosstem 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 m³/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

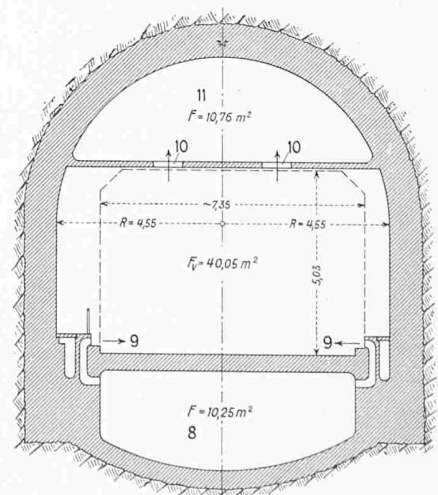
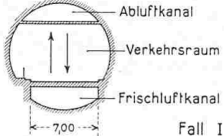
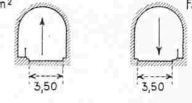
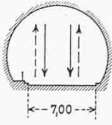


Bild 3. Normalquerschnitt für zweispurigen Tunnel mit Querlüftung. 1:200. 8 Frischluftkanal, 9 Frischlufteinblaseöffnungen (0,20/0,60 m, alle 5 m), 10 Abluftschlitze (0,15/0,80 m, alle 5 m), 11 Abluftkanal

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	$F_A = 10,76 \text{ m}^2$ $F_V = 40,05 \text{ m}^2$ $F_F = 10,25 \text{ m}^2$  <p style="text-align: center;">Fall I</p>	$F_V = 26,58 \text{ m}^2$ $F_V = 26,58 \text{ m}^2$  <p style="text-align: center;">Fall II</p>	$F_V = 50,81 \text{ m}^2$  <p style="text-align: center;">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	$s = \pm 2 \text{‰}$ bis $\pm 3 \text{‰}$	$s = -2 \text{‰}$ bis -3‰ (Gefälle)	$s = \pm 2 \text{‰}$ bis $\pm 3 \text{‰}$	
Bau- massen des Tunnels	Felsausbruch Beton Felsausbruch ¹⁾ Beton ¹⁾	$86,40 \text{ m}^3$ je lfm Tunnel $23,98 \text{ m}^3$ je lfm Tunnel	$72,28 \text{ m}^3$ je lfm Tunnel ²⁾ $16,02 \text{ m}^3$ je lfm Tunnel ²⁾	$67,30 \text{ m}^3$ je lfm Tunnel $16,08 \text{ m}^3$ je lfm Tunnel $60,59 \text{ m}^3$ je lfm Tunnel ¹⁾ $9,36 \text{ m}^3$ je lfm Tunnel ¹⁾
Lüftungssystem	Querlüftung	Längslüftung	Umsteuerbare Längslüftung	
Gesamtkapazität der maschinellen Lüftung	$Q_{\text{masch}} = 246 \text{ m}^3/\text{s}$ Frischluft (1,76) $+ 246 \text{ m}^3/\text{s}$ Abluft	$Q_{\text{masch}} = 2 \times 70 = 140 \text{ m}^3/\text{s}$ (1,00), steigerbar auf $Q_{\text{masch}} = 2 \times 100 = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ (1,43)	$Q_{\text{masch}} = 140 \text{ m}^3/\text{s}$ (1,00)	
Im kritischen Verkehrsfall b) ₂₄ maschinell zu fördernde Luftmengen	$Q_{\text{masch}} = 246 \text{ m}^3/\text{s}$ Frischluft (2,83) $+ 246 \text{ m}^3/\text{s}$ Abluft	$Q_{\text{masch}} = 2 \times 59 = 118 \text{ m}^3/\text{s}$ (1,36)	$Q_{\text{masch}} = 87 \text{ m}^3/\text{s}$ (1,00)	
Anzahl der Lüfter	2 Lüfter für Frischluft 2 Lüfter für Abluft	$2 \times 5 = 10$ Lüfter	7 Lüfter	
Daten der Lüfter	Vorschlag B I: Laufraddurchmesser: 2500 mm Fördermenge: Frischluft-Lüfter $123 \text{ m}^3/\text{s}$ Abluft-Lüfter $123 \text{ m}^3/\text{s}$ Druck: Frischluft-Lüfter 85 mm WS Abluft-Lüfter 68 m WS Drehzahl: 700 U/min Leistungsbedarf: Frischluft-Lüfter 122 kW Abluft-Lüfter 105 kW	Vorschlag A II: Laufraddurchmesser: 1400 mm Fördermenge: $14 \div 20 \text{ m}^3/\text{s}$ Druck: $14 \div 28 \text{ mm WS}$ Drehzahl: $560 \div 650 \text{ U/min}$ Leistungsbedarf: $3 \div 6,75 \text{ kW}$ Vorschlag B II: Laufraddurchmesser: 1400 mm Fördermenge: $20 \text{ m}^3/\text{s}$ Druck: 36 mm WS Drehzahl: 960 U/min Leistungsbedarf: 8,7 kW	Vorschlag B III: Laufraddurchmesser: 1400 mm Fördermenge: $20 \text{ m}^3/\text{s}$ Druck: 28 mm WS Drehzahl: 960 U/min Leistungsbedarf: 7,0 kW	
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	Vorschlag B I: $200 000 \text{ DM}$ (2,35) Davon für Lüfter, Motoren und Getriebe $136 700 \text{ DM}$ (3,83)	Vorschlag A II: $255 000 \text{ DM}$ (3,00) Vorschlag B II: $125 000 \text{ DM}$ (1,47) Davon für Lüfter, Motoren und Getriebe Vorschlag A II: $176 000 \text{ DM}$ (4,93) Vorschlag B II: $55 500 \text{ DM}$ (1,55)	Vorschlag B III: $85 000 \text{ DM}$ (1,00) Davon für Lüfter, Motoren und Getriebe $35 700 \text{ DM}$ (1,00)	
Kosten der elektrischen Einrichtung	$585 000 \text{ DM}$ (1,00)	$585 000 \text{ DM}$ (1,00)	$585 000 \text{ DM}$ (1,00)	
Gesamtkosten der Anlage	Vorschlag B I: $32 335 000 \text{ DM}$ (1,41)	Vorschlag A II: $26 350 000 \text{ DM}$ (1,15) Vorschlag B II: $26 220 000 \text{ DM}$ (1,14)	Vorschlag B III: $22 930 000 \text{ DM}$ (1,00)	

1) in standfestem Gebirge

2) 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 ÷ 16,80 DM/h (0,62 ÷ 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 Einbahröhren 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 Zweibahnöhre entfällt. Die Lüftungsberechnung nach Tabelle 2 ergab, dass bei einer Fahrgeschwindigkeit von 40 km/h und ohne Gegenwind zwei Einbahröhren durch den Verkehrsflugzug bei 150 bis 420 Fz/h und Richtung in beschränkten Normalfällen gelüftet werden können. Jedoch reicht bei sinkender Fahrgeschwindigkeit, selbst ohne Gegenwind, der Verkehrsflugzug 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 Verkehrsflugzug genügt also nur unter folgenden Bedingungen für die Lüftung der zwei Einbahröhren:

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 Ausfahrportal und entgegelaufende Luftströmungen im Tunnel müssen unwirksam gemacht werden können, z. B. durch Anordnung einer Windfalle für Gegenwind am Ausfahrportal, 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 Verkehrs- und die künstliche Längs-Lüftung der beiden Einbahröhren aufhebt. Daher sind zur Sicherung der Frischluftversorgung folgende Massnahmen notwendig:

a) Anordnung von Windfallen an den Ausfahrportalen (Bild 4),

b) Inbetriebnahme einer künstlichen Zusatzlüftung bei ungenügender Verkehrs- und Zusatzlüftung,

c) Anordnung von Windmessern im Tunnel.

Im Grenzfall, da die Verkehrs- und Zusatzlüftung 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 Zufahrtsportal 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

Lastfall	Verkehrsteilung	Spurleistung c Fz/h	Geschwindigkeit V Km/h	Wagenabstand p m	Tunnelfüllung je Spur z Fz/Spur	Mittlere CO-Menge Q l/min u. Fz	Projekt I			Projekt II			Projekt III	
							CO-Anfall je Spur CO m³/s	2spuriger Tunnel mit Gegenverkehr (f = 0,21 ‰)		Zwei 1spurige Tunnel mit Richtungsverkehr (f = 0,20 ‰)		2spuriger Tunnel m. Pendelverkehr (f = 0,22 ‰)		
								Frischluftbedarf Q _{erf} m³/s	Maschinelle Lüftung Q _{masch} m³/s	Frischluftbedarf Q _{erf} m³/s	Verkehrslüftung Q _{verkehr} m³/s	Maschinelle Lüftung Q _{masch} m³/s	Frischluftbedarf Q _{erf} m³/s	Verkehrslüftung Q _{verkehr} 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	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	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	267	9	50	0,0075	72	72	2 × 38	2 × 85	—	68	183
d) 24	20 % LKW < 2 t	300	24	80	31	49,47	0,0255	243	243	2 × 128	2 × 75	2 × 53	232	158 ³⁾
d) 40	20 % PKW		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 Klappschott zu schliessen, und die Fahrzeuge müssen bei abgeschalteter künstlicher Zusatzlüftung in solchen Abständen und Geschwindigkeiten durch den Tunnel geschleust werden, dass ihr geringer Verkehrsfluss 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 betriebseigenes, den Konvois vorausfahrendes, mit Funkeinrichtung versehenes Leitfahrzeug pro Röhre erforderlich. Bei Querverlüftung entfällt dagegen diese Notwendigkeit.

Bei Brand- und gewöhnlichen Unfällen im Tunnel sinkt der Verkehrsfluss mit abnehmender Fahrgeschwindigkeit und wird bei Verkehrstillstand 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 gekuppelte 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 Querverlüftung nicht hat. Selbst bei abgestellten Fahrzeugmotoren an der Unfallstelle kann bei Längslüftung der CO-Gehalt durch nachrollenden Restverkehr, dessen Verkehrsfluss 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 Querverlüftung 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 Ausfahrtsportal liegt. Die CO-Konzentration steigt bei Längslüftung immer von 0 ‰ am Zufahrtsportal auf die am Ausfahrtsportal sichtbedingte zulässige Grenze gleichmässig an. Deshalb ist bei Längslüftung der Unterschied zwischen der physiologischen CO-Grenze (0,4 ‰) und der an einer betrachteten Tunnelstrecke vorhandene sichtbedingte 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 Längsfluss sogar auf 8,22 m/s ansteigen. Diese Luftgeschwindigkeiten sind im Brandfalle höchst gefährlich und für Fussgänger unzutraglich, so dass Sondervorschriften für Fussgängerverkehr ausserhalb des Autoverkehrs und Abschalten der künstlichen Zusatz-Längslüftung im Brandfalle erlassen werden müssen, was bei Querverlüftung nicht nötig ist. Wenn in einer Einbahnrohre im Lastfall b)24 31 Fz sich im Tunnel

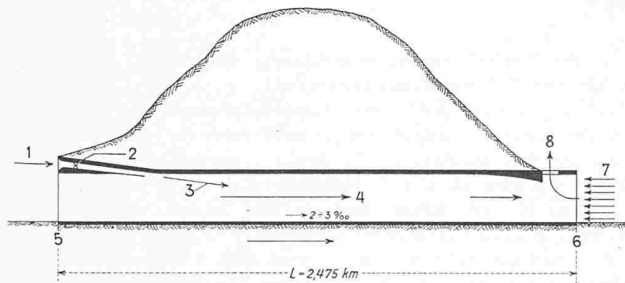


Bild 4. Systemskizze der Längslüftung bei zwei Einbahnrohren. 1 Frischluft-Ansaugung, 2 Schraubenlüfter, 3 Zusatzlüftung, 4 Verkehrsluftzug, 5 Zufahrtsportal, 6 Ausfahrtsportal, 7 Wind, 8 Windfalle

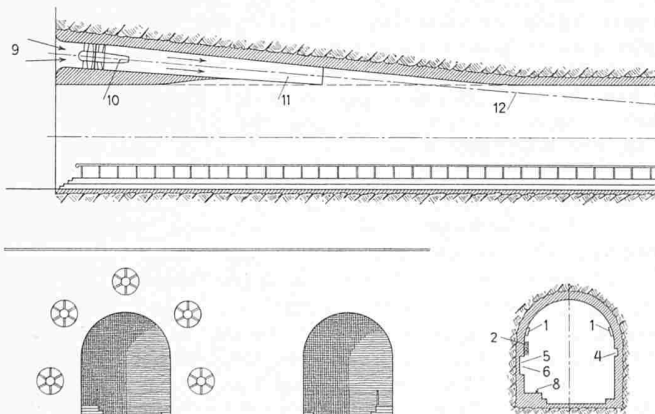


Bild 5. Tunnelportal bei Längslüftung nach Bild 4. Unten links Ansicht der beiden Portale, rechts Normalquerschnitt. 1 Beleuchtung, 2 Signallampe für Verkehrsregelung, 3 Selenzellen für Sichtmessung, hinter 2 mittig versetzt angeordnet, 4 Kabelkanal, 5 Feuermelder und Feuerlöscher, 6 Telefon, 8 Hydrant,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

5) Dieser Unterschied beträgt (0,4 f_{vorh. 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 durchgefahrene 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 Einbahnröhren 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 Einbahnröhre bei 62 685,5 m³ Eigenluftvolumen 15 min 25 s, indessen 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 Einbahnröhren ohne künstliche Zusatzlüftung auskommen könne. Im Gegenteil brauchen Einbahnröhren 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 Leistungsdrosselung. 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-Zweibahnröhre* 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 Einbahnröhren 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 Einbahnröhren 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 Einbahnröhren 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 Einbahnröhren. 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 Einbahnröhren, 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 Einbahnröhren 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 Einbahnröhren 2,38 m/s, bei der Zweibahn-Doppelpendelröhre nur 1,85 m/s.

Der Betriebskostenvergleich (Tab. 2) zeigt, dass zwei Einbahnröhren 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 Lei-

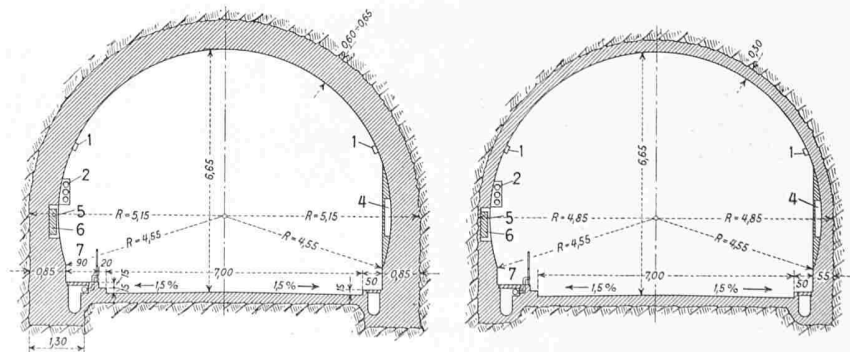


Bild 6. Normalquerschnitt bei Längslüftung, 1:200. Links bei nicht selbsttragendem Fels, Felsaushub 67,3 m³ pro lfm, Beton 16,08 m³ pro lfm. Rechts bei selbsttragendem Fels, Felsaushub 60,6 m³ pro lfm, Beton 9,36 m³ pro lfm. 1 Beleuchtung, 2 Signalanlagen für Verkehrsregelung, 3 Selenzellen für Sichtmessung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

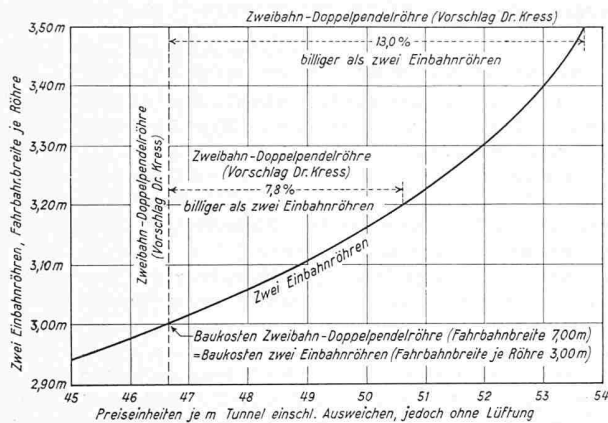


Bild 7. Baukostenvergleich von zwei Einbahnröhren mit der Zweibahn-Doppelpendelröhre in Abhängigkeit der Fahrbahnbreite pro Röhre bei zwei Einbahnröhren

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) $2,4$ 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 Eingangstrecke von 0% auf $0,4\%$ steigt. Beim Ausfahrtsportal 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 Spitzenluftbedarf kleiner als 87 m³/s, d. h. meistens wird keine oder wenig Zusatzlüftung zum Verkehrs-luftzug 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 verschiedensten 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 Verkehrsvorschriften 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-Zweibahnröhre 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 Tunnelbenützern 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-

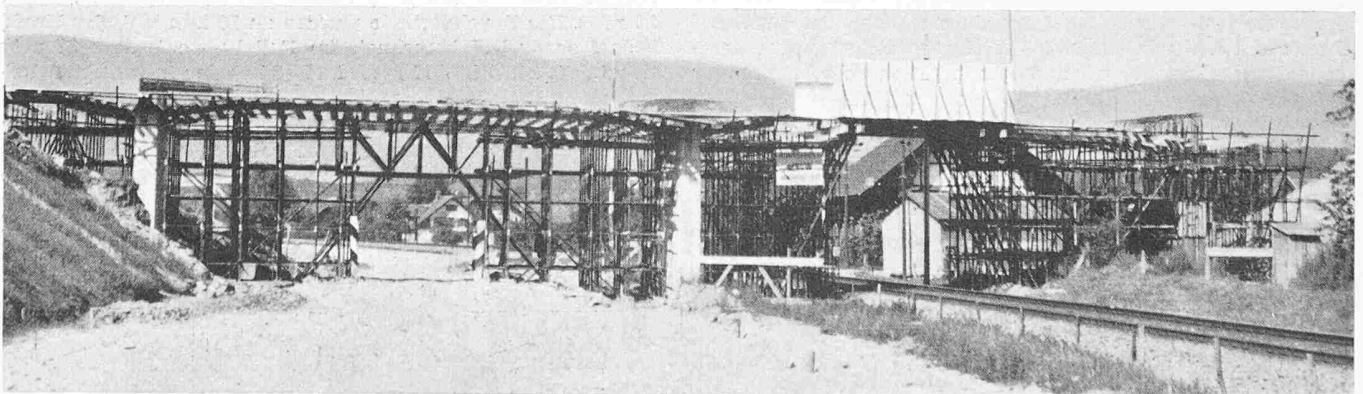


Bild 1. Lehrgerüst für Eisenbahn- und Strassenüberführung Studen-Biel



Bild 2. H-Rahmen-Fassadengerüst in Zürich

stellen einzurichten. Die Verkehrsüberwachung muss bei Gegenverkehr- und Zweibahn-Pendeltunneln durch motorisierte Tunnelpolizei (Funkstreifenwagen), bei Einbahnrohren 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 Einbahnrohren sind Fahr- und Marschpläne, bei Pendelrohren nur Fahrpläne auszuarbeiten.

Adresse des Verfassers: Dr. Ing. H. H. Kress, VDI., Ingenieurbureau 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 nur 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 Ausmerzungen 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 Gedankengänge 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. Safe-way 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-

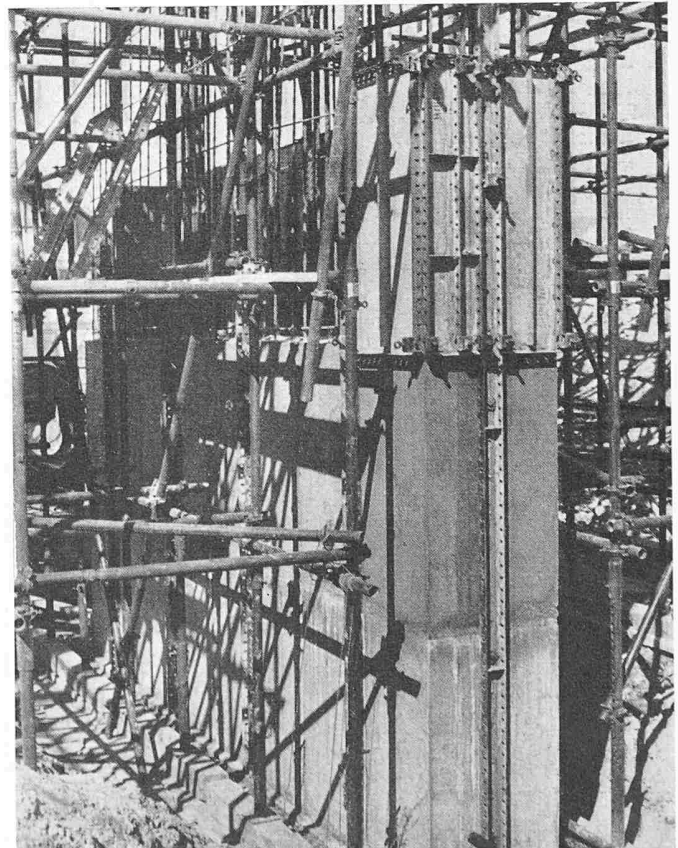


Bild 3. Wallform-Schalung als Brückenpfeiler-Kletterschalung bei der dritten Giessetappe