

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 71 (1953)
Heft: 37

Artikel: Lüftungsentwurf für den Wagenburgtunnel in Stuttgart
Autor: Kress, H.H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-60619>

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: 23.02.2026

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

Die im Laufe der letzten Jahre durchgeführten Kontrollnivelllements haben keinerlei Bewegung gezeigt.

4. Schlussfolgerungen

Die geschilderten beiden Beispiele erlauben die Aufstellung einiger Grundsätze zur Beurteilung der Wirksamkeit von Injektionen. Die Diskussion der Resultate wird immer auf spekulativen Schlüssen aufgebaut werden müssen, da eine direkte Kontrolle mit den in der Bautechnik üblichen Verfahren selten möglich ist. Zur Beurteilung stehen unter anderem zur Verfügung:

a) *Die eingepressten Mengen:* Die Verteilung des Injektionsgutes im Raum ergibt ein Bild über die Homogenität der erreichten Verfestigung. Es ist zu bedenken, dass bei dem Nebeneinander von durchlässigen und weniger durchlässigen Materialien nur eine korallenartige Struktur der Verfestigung erreicht werden kann. Dies ist aber in den meisten Fällen durchaus hinreichend.

b) *Die Beobachtungen beim Injektionsvorgang:* Grösse und Variation des Einpressdruckes lassen wichtige Schlüsse auf die Art der Ausbreitung des Injektionsgutes zu. Langsame und stetige Druckzunahme deutet auf eine gleichmässige Durchdränkung der behandelten Zone, sprungweise Änderungen weisen auf Ausbrüche, Strukturstörungen usw. hin.

c) *Kontrollbohrungen:* Rotationsbohrungen mit Kernenahme geben einen direkten Einblick in den behandelten Raum (Bild 7), wie das aus den Photographien der Anschliffe der Kernproben deutlich ersichtlich ist. Die Ausbeute an gut verfestigten Bohrkernen ist notwendigerweise wegen der Inhomogenität des Materials beschränkt. Zudem ist zu bedenken, dass der Abbinde- und Erhärtungsvorgang im kühlen Grundwasser ganz wesentlich längere Zeiträume erfordert.

Auch bohrtechnisch bietet die Kernenahme Schwierigkeiten. Im grobkörnigen Material sind die Abmessungen der grössten Elemente von der Ordnung des Bohrlochdurchmessers. Werden diese vom rotierenden Bohrer erfasst, so wirken sie als Mahlsteine und zertrümmern bereits aufgefangene Kernstücke.

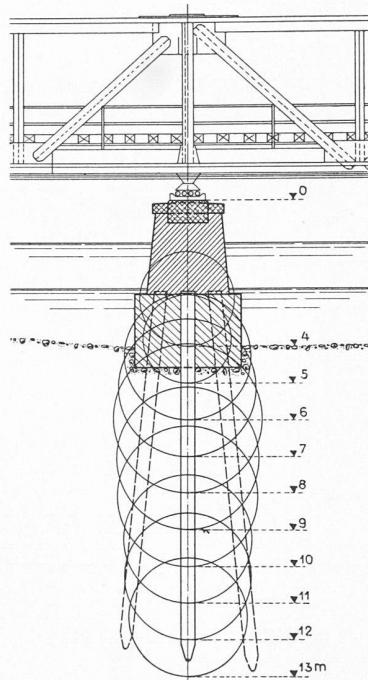


Bild 6. Mittelpfeiler Ostseite, theoretische Aktionsradien der Injektionen, 1:200

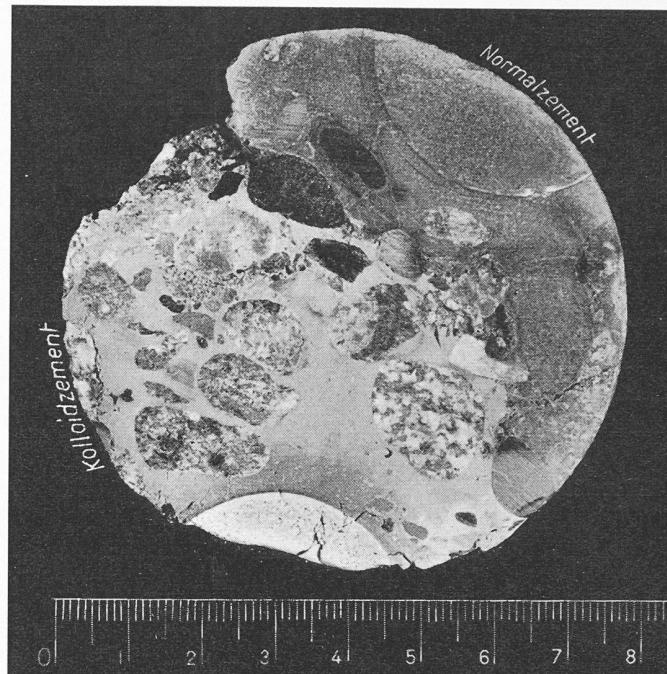


Bild 7. Anschliff eines Bohrkerns, natürliche Grösse
Obere Aarebrücke der BLS in Interlaken-Ost

Zusammenfassung

In vorstehender Arbeit werden die technischen Möglichkeiten der Injektionsverfahren skizziert, insbesondere deren Wirkung hinsichtlich Verfestigung und Dichtung untersucht. Im weiteren werden die Möglichkeiten zur Vergrösserung ihrer Aktionsradien besprochen und dann ein Verfahren angegeben, welches das Anwendungsgebiet der Zementinjektionen bedeutend vergrössert. Anhand von zwei konkreten Ausführungsbeispielen wird gezeigt, dass damit Lösungen möglich werden, die auf andere Weise nicht oder nur mit wesentlich grösserem Aufwand erreicht werden können.

Literaturverzeichnis:

- [1] Mag E.: Verfestigung und Dichtung des Baugrundes. «Hoch- und Tiefbau» 1938.
- [2] Kollbrunner C. F., Ing. Dr., Blatter Ch.: Bericht Nr. 4 der Privatgesellschaft für Bodenforschung und Erdbaumechanik, Zürich 1941, Verlag Leemann.
- [3] Kollbrunner C. F., Ing. Dr.: Fundation und Konsolidation, Band II, Zürich 1947, Schweizer Druck- und Verlagshaus.
- [4] Esenwein Dr. P.: Sedimentationsanalysen, persönliche Angaben an die Verfasser.
- [5] Haefeli R. Prof. Dr.: Drei Lockergesteine und ihre techn. Probleme. SBZ Bd. 112, S. 133* (10. Sept. 1938).
- [6] A. von Moos und F. de Quervain: Technische Gesteinskunde, Verlag Birkhäuser, Basel.
- [7] M. Ros, Dr. h. c.: Gutachten über die Konsolidierungsarbeiten Seebrücke Luzern.

Lüftungsentwurf für den Wagenburgtunnel in Stuttgart

Von Dr.-Ing. H. H. KRESS, Verein Beratender Ingenieure (VBI), Stuttgart

3. Kritische Ueberlegungen zur Frage direkter Absaugung im unteren Teil des Verkehrsraumes

Die Stuttgarter Analysen der Dieselauspuffgase widerlegen in Verbindung mit amerikanischen Analysen der Benzin- auspuffgase, wonach in beiden Fällen rund 82 Vol.-% sofort nach oben entweichen, die von anderer Seite [14] propagierte und zunächst auch in Stuttgart bauseits hartnäckig vertochte Meinung, die zweckmässigste Lüftungsart sei direkte Absaugung im unteren Teil des Verkehrsraums. Es ist einleuchtend, dass bei diesen Verhältnissen die Absaugung oben weniger Kraftaufwand erfordert als die Absaugung unten. Für den Wagenburgtunnel wurde überprüft, ob direkte Absaugung unten eine nennenswerte Senkung des Frischluftbedarfs bewirken kann. 18 Vol.-% der Abgase bleiben als Schwergase im unteren Teil des Verkehrsraums. Verschiedene Höhenlagen der Auspuffrohre von LKW, KOM und Traktoren lassen die Auspuffgase verschieden hoch ausströmen. Für die Theorie direkter Absaugung von unten werden folgende Argumente vorgebracht [14]: Die Luftströmung um den fahrenden

DK 625.712.35:628.8 (43)

Schluss von Seite 526

Wagen reisst je nach Bauart und Wagengrösse längs des Fahrzeugs ab und bildet hinter ihm Wirbel. Heisse, leichte und mittelschwere Gase strömen aufwärts in eine zwischen den Wirbeln hinter dem Wagen vorhandene Unterdruckzone, wo sie von der an der hinteren Wagenwand abwärts strömenden Luft gestaut, in ihrer Aufwärtsbewegung gehemmt und auf die Temperatur der Tunnelluft abgekühlt werden. Leichte und dichte Rauchgase sondern sich dabei ab und strömen allmählich hoch. Wenn man oberhalb besagter Unterdruckzone in verschiedener Höhenlage absauge, könne man die schweren, über der Fahrbahn liegenden Abgase durch Saugschlitze in Höhe der Auspuffrohre unmittelbar absaugen, während aufsteigende Abgase wegen des Unterdrucks von höher liegenden Saugschlitzen her zwangsläufig zu diesen fliessen und durch sie abziehen würden. Damit würden sichtverschlechternde dichte Abgase ohne vorherige Verdünnung mit Frischluft grösstenteils verschwinden. Wenn man außerdem von oben Frischluft eindrücke, also von oben nach unten querbelüfte, würde die von oben nach unten strömende Frischluft

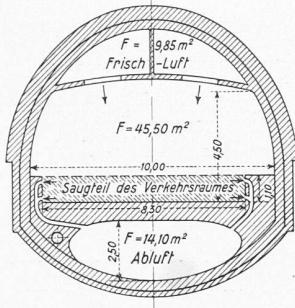


Bild 8. Tunnelquerschnitt mit Querlüftung; Frischluft einführen oben und direkte Absaugung unten, 1:300.

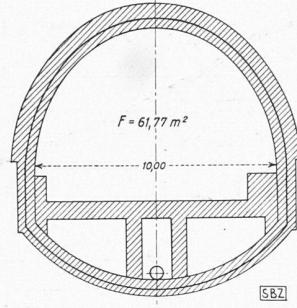


Bild 9. Tunnelquerschnitt bei Längslüftung nach dem Beispiel des Tunnels von St-Cloud, 1:300.

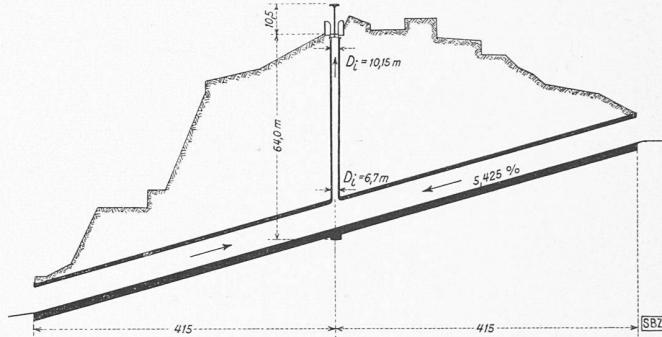


Bild 10. Prinzipieller Längsschnitt durch den Wagenburgtunnel mit Längslüftung nach dem Beispiel von St-Cloud; Längen 1:10 000, Höhen 1:2000.

diesen Vorgang beschleunigen und das im heissen Zustand schnell aufsteigende CO auf einen nicht mehr gesundheitsschädlichen Grad verdünnen.

Auf die Mängel dieser Lüftung wird später eingegangen. Im Wagenburgtunnel würden bei Anwendung dieser Theorie die schweren Gase durch Saugschlitzte über der Fahrbahn in Höhe der Auspuffrohre und die langsam aufsteigenden mittelschweren Abgase durch eine 1,10 m höher liegende Saugschlitzreihe abgesaugt werden (Bild 8). Der «Saugteil des Verkehrsraums» hat einen Luftinhalt von 9,12 m³/m. In vier Reihen sind 1664 Saugschlitzte von je 0,20 · 0,50 = 0,10 m² in 2 m Achsabstand angeordnet. Das ergibt 164,4 m² Saugfläche. Bei maximal 4 m/s Durchflussgeschwindigkeit fliessen 665 m³/s Luft ab, also bei 830 m Tunnellänge 0,802 m³/s pro m oder 0,802 · 100 / 9,12 = 8,8 % des Luftinhalts pro m im Saugteil. Da 18 Vol.% der Auspuffgase unten bleibende Schwergase sind, würden 8,8 % · 18 % = 1,584 Vol.% der gesamten Auspuffgase ohne vorherige Verdünnung mit Frischluft direkt abfliessen können. Wenn davon nur 10 % durch Wirbelbildung und Luftströmungen im Saugteil über diesen hochgerissen werden und so mit Frischluftzufuhr zu neutralisieren sind, ermässigt sich die direkt abfliessende Menge der Auspuffgase auf 1,426 Vol.%. Bei Anwendung der direkten Absaugung von unten im Wagenburgtunnel könnte also der CO-Anfall nach Tabelle 3 um 1,426 Vol.% reduziert werden, was aber wegen Geringfügigkeit im Vergleich zum Genauigkeitsgrad der Rechnung ohne praktische Bedeutung ist, zumal dadurch der im Vergleich zur Absaugung von oben viel grössere Kraftaufwand auch nicht annähernd aufgewogen wird. Zudem erweist sich der bei Absaugung unten im Tunnelquerschnitt von oben nach unten fliessende Luftstrom im Brandfalle erfahrungsgemäss als verhängnisvoll, weil dadurch Flammen und Rauch auf der Fahrbahn und im Tunnelquerschnitt ausgebreitet, die Löscharbeit stark behindert und andere Fahrzeuge erheblich gefährdet würden, während die Lüftung von unten nach oben Flammen und Rauch nach oben abzieht und rasches Löschen ermöglicht. Somit ergibt direkte Absaugung von unten keine Frischluftersparnis, aber höhere Betriebskosten und kann im Brandfalle geradezu verhängnisvoll werden.

4. Wahl der Lüftungsmethode

Über die Eigenheiten der bei Autotunnels möglichen Lüftungsarten — Längs-, Quer-, Halbquerlüftung und deren Kombinationen — wird auf andere Veröffentlichungen verwiesen [4], [5], [20], [21], [22], [23]. Für die Wahl der zweckmässigsten Lüftungsmethode des Wagenburgtunnels wurden Vergleichsentwürfe für Längs-, Quer-, Halbquerlüftung, sowie Kombinationen von Längs- und Quer-, Halbquer- und Längslüftung untersucht, ihre technischen Vor- und Nachteile gegeneinander abgewogen, ihre Bau- und Betriebskosten miteinander verglichen. Bei Längslüftung dient der Verkehrsraum dem in seiner Längsrichtung von Portal zu Portal, bzw. von den Portalen zu den Schächten fliessenden Luftstrom als Luftkanal. Dabei entsteht im Wagenburgtunnel im Falle einer Röhre ohne Zwischenschächte im 61,77 m² grossen Verkehrsraum im Zustand ohne Verkehr ein längsgerichteter Luftzug von 7,60 m/s, mit Verkehr 10 m/s und im Falle von zwei Röhren im Zustand ohne Verkehr 10 m/s, mit Verkehr 13,15 m/s, jeweils in der steigenden Röhre, was in jedem Falle für Fußgänger, Benutzer offener Wagen und bei Brand viel zu gross ist, die Brandschäden durch rasche Ausbreitung

des Feuers und Verqualmung des Tunnels sogar steigern würde. Das allmähliche Wachsen der Luftverunreinigung zwischen Lufteintritt und -austritt verursacht bei Sicherstellung guter Sicht Verschwendungen von Frischluft und Kraftaufwand in der grösseren Tunnelstrecke. Die Grösse des Verkehrsraums als Luftkanal macht Längslüftung unwirtschaftlich; von ihrer Anwendung für den Wagenburgtunnel, besonders in der Art einer Längslüftung von Portal zu Portal wurde abgeraten.

Auch die Anwendung vereinfachter Längslüftung nach dem Beispiel des Tunnels St. Cloud in Paris (Bilder 9 bis 11), die auf einem zentralen, 64 m hohen konischen Abluftschacht von 10,80 m oberem und 6,70 m unterem Durchmesser, einem zehnflügeligen horizontalen Propellerlüfter von 10,50 m Durchmesser, einer 4,10 m hohen Abluftkuppel aus Stahlbeton über Gelände mit zwei angrenzenden Maschinenhäusern beruht, konnte für den Wagenburgtunnel nicht empfohlen werden, da der Längsluftzug im Verkehrsraum bei einer Röhre ohne Verkehr 4,35 m/s, mit Verkehr 5,75 m/s und bei zwei Röhren ohne Verkehr 6,00 m/s, mit Verkehr 7,93 m/s betragen würde, was aus den oben erwähnten Gründen abzulehnen ist. Außerdem haftet dieser Lösung Unsicherheit des Maschinenbetriebs im Reparaturfall und der Nachteil der Staubaufwirbelung im Tunnel durch den Luftzug an. Auch müsste im Brandfalle zum Nachteil der Verkehrsteilnehmer die Lüftung wie in St. Cloud sofort abgeschaltet werden. An Baukosten für die Lüftungsanlage allein der ersten Röhre des Wagenburgtunnels nach dem Beispiel St. Cloud wurden veranschlagt: für den Hoch- und Tiefbau 1,65 Mio DM, für den maschinellen und elektrischen Teil 0,20 Mio DM und für aerodynamische Versuche 0,15 Mio DM, zusammen also 2 Mio DM. Für die Lüftung der späteren zweiten Röhre wären weitere hohe Bau- und Installationskosten, besonders auch für einen zweiten zentralen Schacht aufzuwenden, wodurch diese Lösung völlig aus dem Wettbewerb mit andern Lösungen ausscheidet. Außerdem ist der Querschnitt des Wagenburgtunnels für eine Längslüftung zu klein.

Die Querlüftung wurde nach Untersuchung verschiedener Varianten der Maschinenanlage zur Ausführung für den Wagenburgtunnel empfohlen (Bilder 1, 2, 12, 13, 14). Die Lage der nach wirtschaftlichen und lüftungstechnischen Gesichtspunkten erforderlichen beiden Schächte ist durch Grundeigentumsverhältnisse festgelegt; ihre bauliche Gestaltung genügt auch dem späteren Betrieb von zwei Tunnelröhren. Durch Unterteilung des Tunnels in vier Lüftungsabschnitte (Bild 12) wird die Lüftung wirtschaftlicher als bei Längslüftung. Die Frischluft gelangt aus dem unter der Fahrbahndecke liegenden, 15 m² grossen Frischluftkanal durch seitlich über den Schramm-

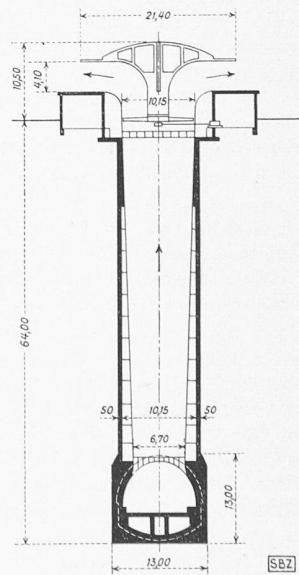


Bild 11. Zentraler Lüftungsschacht für Längslüftung nach dem Beispiel von St-Cloud, 1:10 000.

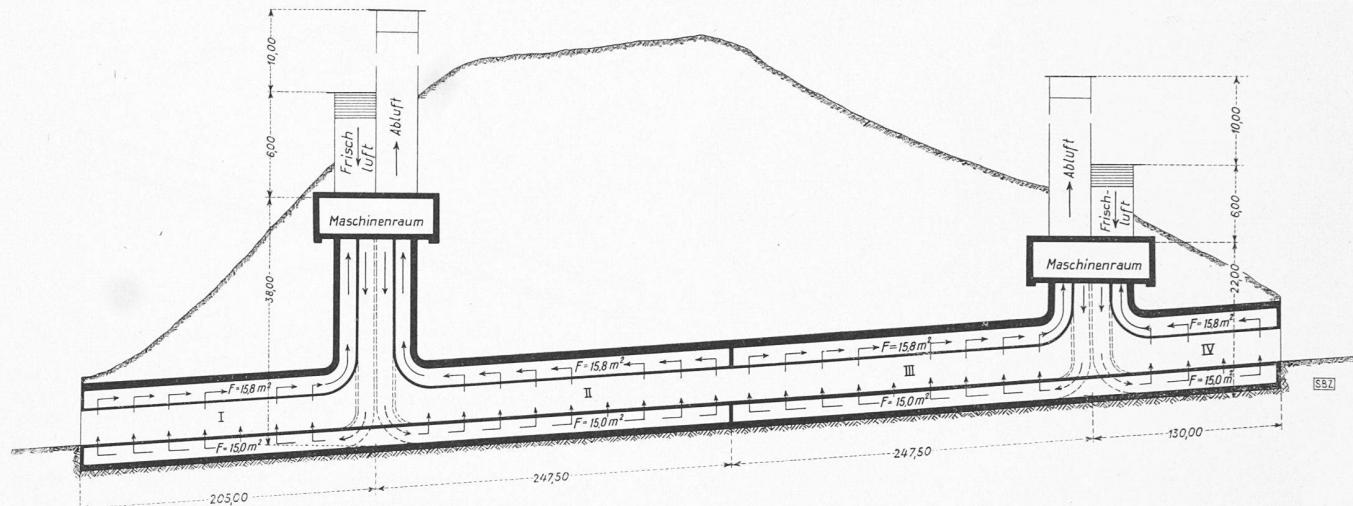


Bild 12. Prinzipschema der Querlüftung von unten nach oben

borden austretende, mit 2 Meter Axabstand auseinanderliegende Einblaseöffnungen ($0,30 \cdot 0,70 = 0,21 \text{ m}^2$ Einzelquerschnitt) in den Verkehrsraum. Die Austrittsgeschwindigkeit ist max. 4 m/s. Die Abluft wird in der Zwischendecke über der Fahrbahn durch zwei parallele Reihen Saugöffnungen mit 4 m/s maximaler Durchflussgeschwindigkeit in den $15,8 \text{ m}^2$ grossen Abluftkanal abgesaugt. Die Saugöffnungen haben einen Einzelquerschnitt von $0,20 \cdot 1,00 = 0,20 \text{ m}^2$ und einen Axabstand von 2 m; sie sind gegen die Einblaseöffnungen versetzt angeordnet. Die maximalen Luftgeschwindigkeiten im Frisch- und Abluftkanal sind 13,4 m/s bzw. 12,7 m/s oder kleiner, je nach Frischluftförderung. Zwecks Verkleinerung von Reibungsverlusten und Kraftaufwand sind die Luftkanäle unter Vermeidung nicht unbedingt notwendiger Abwinkelungen möglichst gestreckt, ausgerundet und glatt verputzt ausgebildet.

Die Vorteile dieser Lösung sind:

a) kein Luftzug in Längsrichtung ausser dem natürlichen zwischen Portalen und Schächten und dem vom Verkehr erzeugten Luftzug;

b) wirtschaftlichere Ausnutzung der Frischluft durch überall gleichmässige Luftverunreinigung, daher bei gleichen Bedingungen geringerer Frischluftbedarf als bei Längslüftung;

c) die hohen Luftgeschwindigkeiten liegen in den vom Verkehrsraum getrennten Luftkanälen; die Luftbewegung im Verkehrsraum ist senkrecht zur Längsaxe von unten nach oben und gleichmässig über die Strassenbreite verteilt, was Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit gewährleistet;

d) im Brandfall ist lokale Beschränkung von Feuer und Rauch auf den Brandherd dadurch gewährleistet, dass im Brandabschnitt durch Beschleunigung der Abluftlüfter leichte und schnelle Absaugung des Rauches an Ort und Stelle erfolgt, wobei Flammen und Rauch nach oben abziehen, anstatt wie bei Längslüftung sich im Tunnel auszubreiten oder bei umgekehrter Luftbewegung nach allen Seiten auszuschlagen. Dadurch werden bei Querlüftung die Löscharbeiten sehr erleichtert. Diesen Vorteil bietet nur die Querlüftung;

e) das System ist beweglicher und die Betriebskosten werden niedriger als bei Längslüftung, weil die Luft auf kürzestem Wege von mehreren Orten herangezogen werden kann; es ist gleichermassen anwendbar für Richtungsverkehr und Verkehr in beiden Richtungen;

f) bei Verkehrsstillstand herrscht im Verkehrsraum ausser dem natürlichen kein längsgerichteter Luftzug. Starker Verkehr dagegen erzeugt einen die Lüftung erleichternden Luftzug, dessen Geschwindigkeit von Zahl und Fahrgeschwindigkeit der Wagen im Tunnel abhängt. Dadurch verringert sich die CO-Konzentration in der bei der Einfahrt liegenden Tunnelhälfte. Anderseits wird gegen die Ausfahrt der steigenden Röhre wegen des durch die grosse Steigung von 5,4 % bedingen grösseren Anfalls an Auspuffgasen mehr Frischluft benötigt als in der Nähe der Zufahrt.

Nach den Ergebnissen einer soeben abgeschlossenen Studienreise des Verfassers zu sämtlichen europäischen Autotunneln ist die Querlüftung für belüftete Tunnelquerschnitte unter 100 m^2 immer zweckmässig.

Die Form des Tunnelquerschnitts beeinflusst die Lüftungswirkung stark. Kreis- oder angenäherte Kreisform dienen dem Verkehr und der Lüftung am besten, weil bei ausreichender Fahrbahnbreite und lichter Durchfahrthöhe segmentförmige Querschnitte für Frisch- und Abluftkanäle unter und über der Strasse anfallen. Der Querschnitt des Wagenburgtunnels nach Bild 2 entspricht diesen Bedingungen, indem bei 45 m^2 Verkehrsraum, 4,50 m Durchfahrtshöhe, 7,50 m Fahrbahnbreite und 1,20 m Gehwegbreite (für Tunnelpolizei und Notausgang) 15 bzw. $15,8 \text{ m}^2$ für Frisch- bzw. Abluftkanal übrig bleiben und die maximalen Luftgeschwindigkeiten in den Kanälen in der Nähe der wirtschaftlichen Grenze von etwa 12 m/s liegen.

Es wurde untersucht, ob die Besetzung jedes der vier Lüftungsabschnitte mit je einem oder zwei Lüfteraggregaten für Frisch- bzw. Abluft oder die Zusammenfassung von jeweils zwei Lüftungsabschnitten auf je ein dafür grösseres Frisch- bzw. Abluftaggregat zweckmässiger ist, und man hat sich zum Vorschlag der zweiten, bedeutend vorteilhafteren Lösung entschlossen. Hierbei bestehen die beiden Lüftungsschächte je aus einem oberirdischen Lüftergebäude von $16,60 \cdot 15,80 \text{ m}$ Grundfläche und 5,30 m Höhe über Gelände, einem darüber liegenden Ansaugeteil von $6,30 \cdot 5,75 \text{ m}$ Grundfläche und 5 m lichter Höhe, der vom angrenzenden, aufgehenden Abluftschacht von $6,30 \cdot 6,30 \text{ m}$ Außenquerschnitt um 10 m überragt wird (Bild 13); ferner aus einem kreisrunden Verbindungs schacht von $10,50 \text{ m}$ Innen- und $11,20 \text{ m}$ Aussendurchmesser zwischen Lüftergebäude und Tunnel für die Frisch- und Abluft kanäle, dessen tragende Wand 20 cm stark in Stahlbeton mit 25 kg/m^3 Bewehrung unter Verwendung von Hütten-Sulfat-Zement auszuführen ist. Zwecks Schalldämpfung von Lüftergeräuschen bleibt der hochgehende Abluftschacht oben offen, wobei eindringende Niederschläge nach dem Pumpensumpf im Schacht ablaufen. Außerdem ist die innere Leibung des auf gehenden Abluftschachtes entweder mit Spezial-Schallschluck platten zu verkleiden oder mit schallschluckenden wabenartigen Vertiefungen zu versehen. Die sich über drei Stockwerke verteilenden, zusätzlich anfallenden Räume über der Luftansaugung am aufgehenden Abluftschacht können als gewerbliche Bureauräume vermietet werden. Ueber die konstruktive Ausbildung der Schachtwand und der Schachthoch bauten vgl. die Ausführungen des Verfassers in «Der Bauingenieur» 1953, Nr. 11, 12.

Die Lüftergebäude enthalten die Lüfterhallen, die Transformatorenräume, den Batterieraum der Notbeleuchtung, WC, Waschräume, sonstige Dienst- und Nebenräume, Werkstätten, Betriebsbüro, sowie in einem Schacht die zentrale Steuer- und Überwachungsanlage. In jeder Lüfterhalle ist ein Montagekran von 2 t Tragkraft vorgesehen. Außerdem ist in den Lüfterhallen die gesamte elektrische Ausrüstung für Betrieb und Notbeleuchtung, sowie das Ersatzteillager untergebracht.

Die vorgeschlagenen Lüfter sind Siemens-Betz-Niederdruck-Schraubenlüfter (Bild 14). Die Lüfterräder werden über ein Untersetzungs- und Winkelgetriebe von seitlich der Luftkanäle stehenden, normalen, leicht kontrollierbaren Drehstrom-Motoren mit Schleifringläufern, wahlweise auch von pol umschaltbaren Kurzschlussläufer-Motoren angetrieben. Infolge

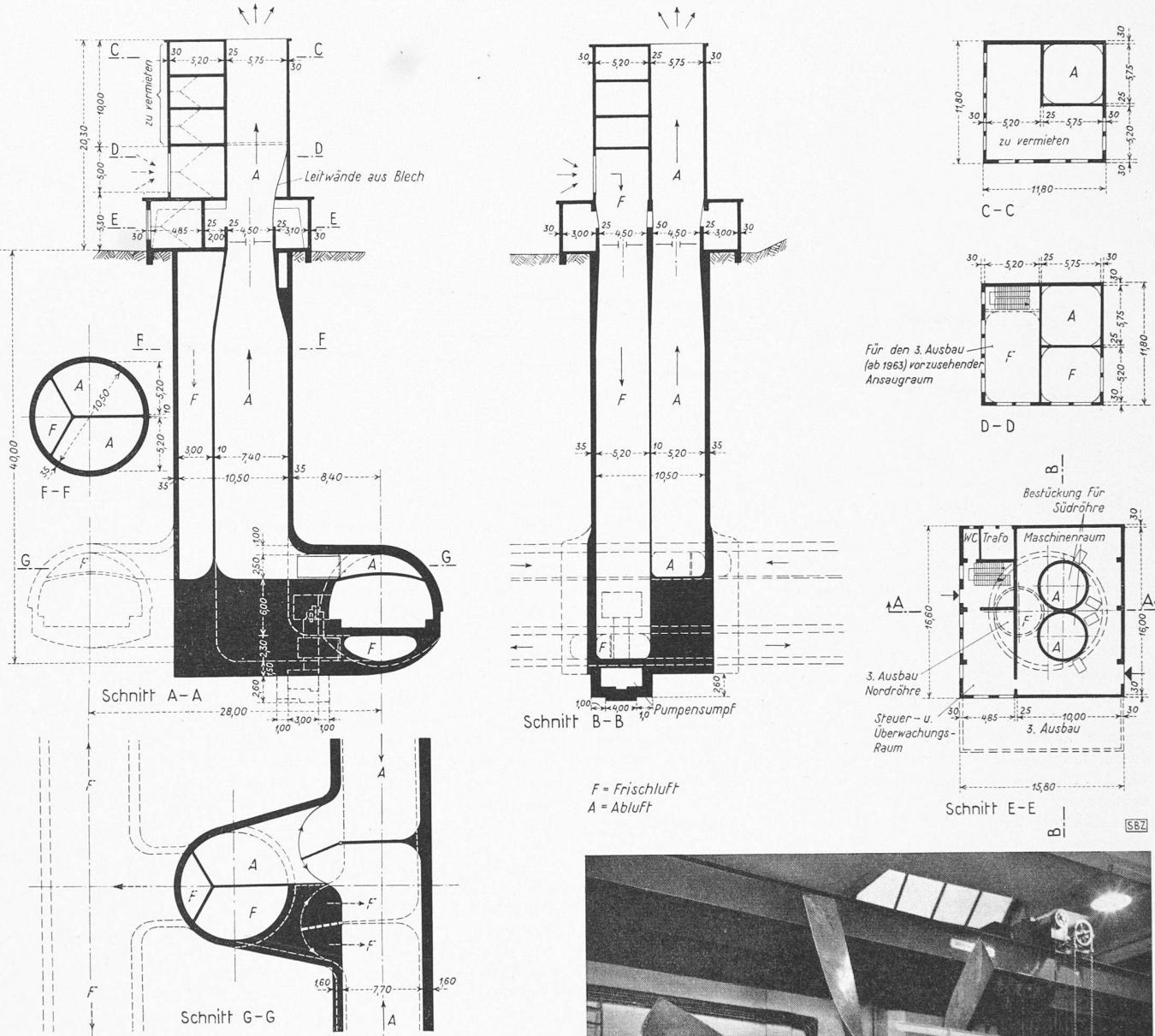


Bild 13. Lüftungsschächte für Querlüftung, 1:600 (Schnitt G-G gilt sinngemäß auch für Bild 18)

der seitlichen Aufstellung sind die Motoren als Geräuschquelle aus dem Luftstrom herausgenommen und vor Niederschlägen geschützt. Durch unmittelbaren Einbau der Lüfter in die Kanalführung entfallen störende Abwinkelungen der Luftkanäle in den Lüftergebäuden. Die Leistung der mit Leitapparat, Getriebe und Zwischenwelle versehenen Lüfter ist 201 m³/s gegen etwa 12 mm WS Gesamtdruck bei etwa 170 U/min und etwa 35 kW Kraftbedarf im Westschacht und 168 m³/s gegen etwa 10 mm WS Gesamtdruck bei etwa 170 U/min und 26 kW Kraftbedarf im Ostschacht. Durch Winkeländerung der Flügel auf die höheren Leistungen des zweiten Ausbaues erreichen die Lüfter später im West-Schacht etwa 226 m³/s gegen 20 mm WS Gesamtdruck bei etwa 170 U/min und etwa 65 kW Kraftbedarf und im Ost-Schacht 223 m³/s gegen 17 mm WS Gesamtdruck bei 170 U/min und etwa 52 kW Kraftbedarf. Jeder Lüfter hat ein Flügelrad mit einzeln angebrachten Schaufeln, die in einem bestimmten Winkel verstellbar sind und einen mit einem Mantel in die Betonkonstruktion eingebauten Leitapparat, der in seiner Nabe das Winkeluntersetzungsgetriebe aufnimmt. Diese Getriebe tragen am austretenden Wellenstumpf unmittelbar fliegend das Flügelrad von 4,50 m Ø und untersetzen die Drehzahl des vierpoligen Antriebsmotors auf etwa 170 U/min; sie werden so ausgebildet, dass ihre Uebertragungsleistung für die später zu wählende höhere Winkeleinstellung ausreicht. Die vom Getriebe des Lüfters zum Motor führende Zwischenwelle liegt horizontal. Die Drehzahlreglung der Drehstrom-

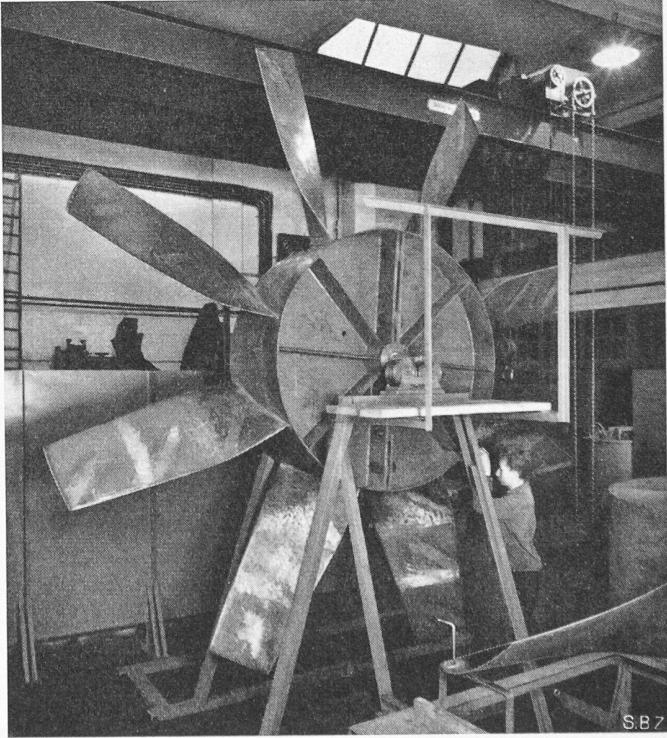


Bild 14. Niederdruck-Schraubenlüfter von Siemens-Betz

Motoren mit Schleifringläufern gestattet weitgehende Mengenregelung bei wechselnder Verkehrsbelastung. Bei quadratisch fallendem Moment des Lüfterantriebs dürfte dies trotz der elektrischen Verluste im Regelwiderstand die betriebsgünstigste Lösung sein, da Reihenschlussmotoren oder andere Regelverfahren wesentlich aufwendiger sind. Wahlweise in Frage kommende polumschaltbare Kurzschlussläufer-Motoren

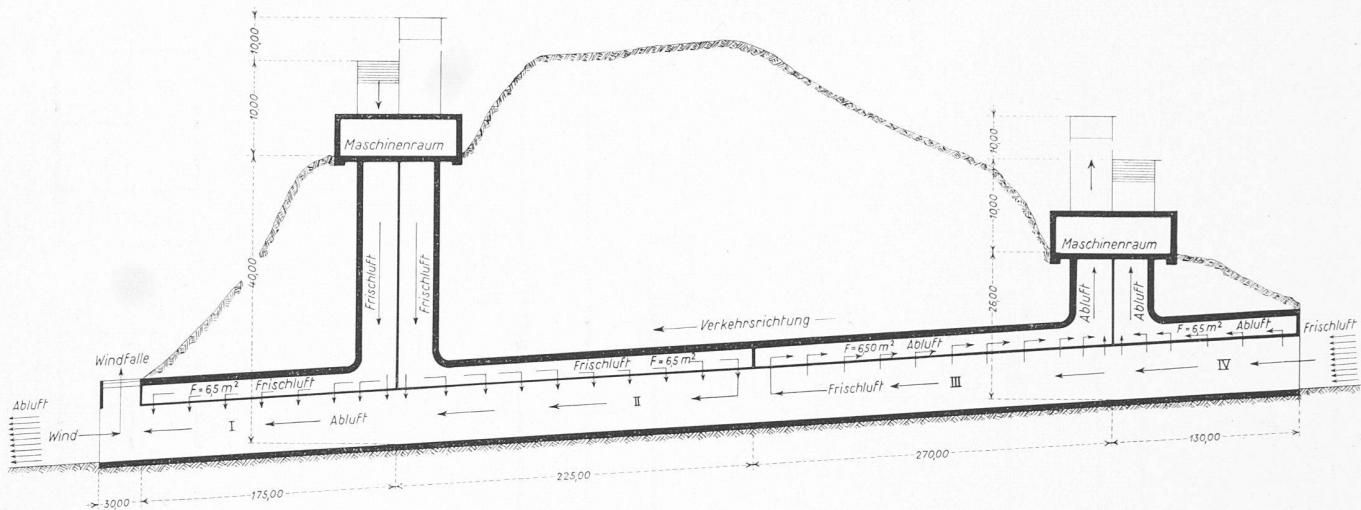


Bild 15. Prinzipschema für kombinierte Längs- und Querlüftung

in 4-, 6- und 8-poliger Ausführung mit Drehzahlen von 1440, 960 und 750 U/min gestalten eine Mengenregelung im Verhältnis 1:0,7:0,5. Diese Regelart lässt sich ohne Widerstandsregler durch eine Schützkombination bequem fernsteuern und würde so zur weiteren Erhöhung der Betriebssicherheit und Verminderung der Wartung beitragen.

Bei Betrieb einer Tunnelröhre bis 1962 genügt für jeden Lüftungsschacht je ein Lüfteraggregat für Frisch- und Abluft, weil die Lüfter durch Betätigung von Steuerklappen in den Luftkanälen zwischen den einzelnen Lüftungsabschnitten wechselseitig auf benachbarte Abschnitte geschaltet werden können. Dabei werden ab 1958 die erhöhten Luftmengen bei ausreichender Reserve durch Vergrösserung der Anstellwinkel der Lüfterflügel erreicht. Zur Deckung des erhöhten Kraftbedarfs wird pro Lüfter ein zweiter Motor gleicher Leistung zugeschaltet, der auf einen zweiten, bereits von Anfang an vorgesehenen Wellenstumpf wirkt. Beim Richtungsbetrieb zweier Tunnelröhren ab 1963 wird der Luftbedarf der steigenden Röhre durch Drehzahlerhöhung der Zu- und Abluftlüfter um etwa 60 % sichergestellt, wobei die von der Ausbaustufe bis 1962 bereits vorhandenen Motoren und einige Getriebezähnräder ausgewechselt werden.

Die steigende Röhre wird wie seither querbelüftet, während die fallende Röhre auf Anregung von Abt. Präs. i. R. Prof. Hartmann, Stuttgart, eine kombinierte Quer- und Längslüftung nach Beispiel des Squirrel Hill Tunnels erhalten kann, wobei pro Schacht ein weiteres Lüfteraggregat für Frisch- bzw. Abluft der fallenden Röhre erforderlich wird. Diese in den

Bildern 15 bis 18 dargestellte Lösung ist wegen geringen Luftbedarfs der fallenden Röhre möglich, wobei in Fahrtrichtung des längsbelüfteten Tunnelteils ein Luftzug von 1,5 m/s auftritt, der gerade noch tragbar erscheint.

Der am Ausfahrtportal auf der Ostseite an etwa 65 Tagen im Jahr auftretende Gegenwind wird durch eine 30 m lange, wie ein Schornstein wirkende Windfalle zusammen mit der Abluft nach oben abgelenkt. Den grösseren Luftmengen an den Portalen wird durch entsprechende Vergrösserung des Tunnelquerschnitts Rechnung getragen, die vom West-Portal bis West-Schacht und vom Ost-Portal bis 34 m jenseits des Ost-Schachtes gegen das Tunnelinnere ausgeglichen wird. Dieses System beruht auf dem Prinzip, dass vom Zufahrtsportal bis Tunnelmitte Frischluft vom Verkehr eingedrückt und Abluft oben abgesaugt, also querbelüftet wird. Von Tunnelmitte bis Ausfahrtportal wird Frischluft oben zugeführt und Abluft vom Verkehr nach aussen gedrückt, also längsbelüftet (Bild 15). Die Frisch- und Abluftkanalquerschnitte im First des Verkehrsraums sind an den Portalen am kleinsten und in Tunnelmitte am grössten; dazwischen erfolgt allmählicher Übergang. Durch Umstellklappen in den Luftkanälen können Zu- und Ablüfter auf das jeweils gegenteilige Kanalsystem geschaltet werden, so dass im Brandfall in der von oben nach unten belüfteten Strecke der Luftstrom auf Richtung von unten nach oben umgelenkt werden kann. Wegen Wegfall des unteren Kanals sinken die Baukosten der fallenden Röhre um etwa 0,75 Mio DM. In beiden Schächten werden wegen vereinfachter Ersatzteilhaltung gleiche Lüfteraggregate vorgesehen. Der stufenweise Ausbau der maschinellen Anlage soll wie folgt erfolgen:

1. Bauabschnitt: bis 1957 (1. Röhre): West-Schacht ein Zulüfter $201 \text{ m}^3/\text{s}$, 170 U/min, 35 kW; Ost-Schacht ein Zulüfter

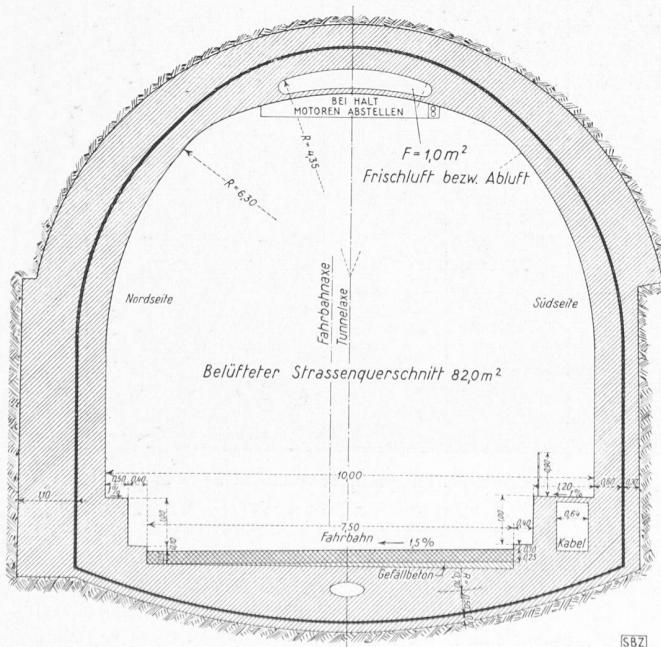


Bild 16. Portalquerschnitt der Nordröhre für kombinierte Längs- und Querlüftung, 1:150

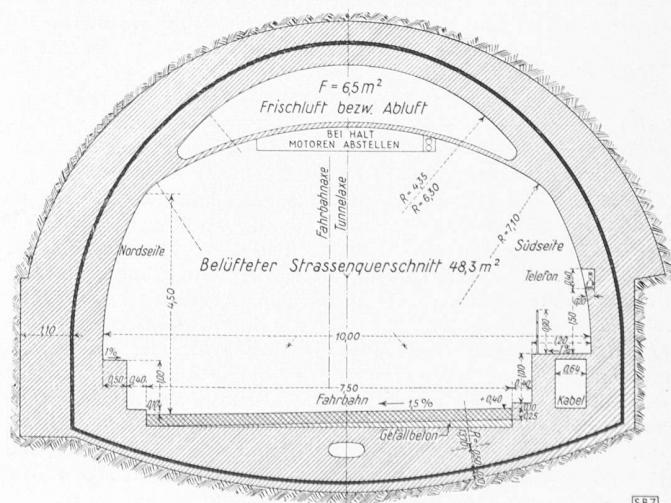


Bild 17. Tunnelquerschnitt der Nordröhre für kombinierte Längs- und Querlüftung, 1:150

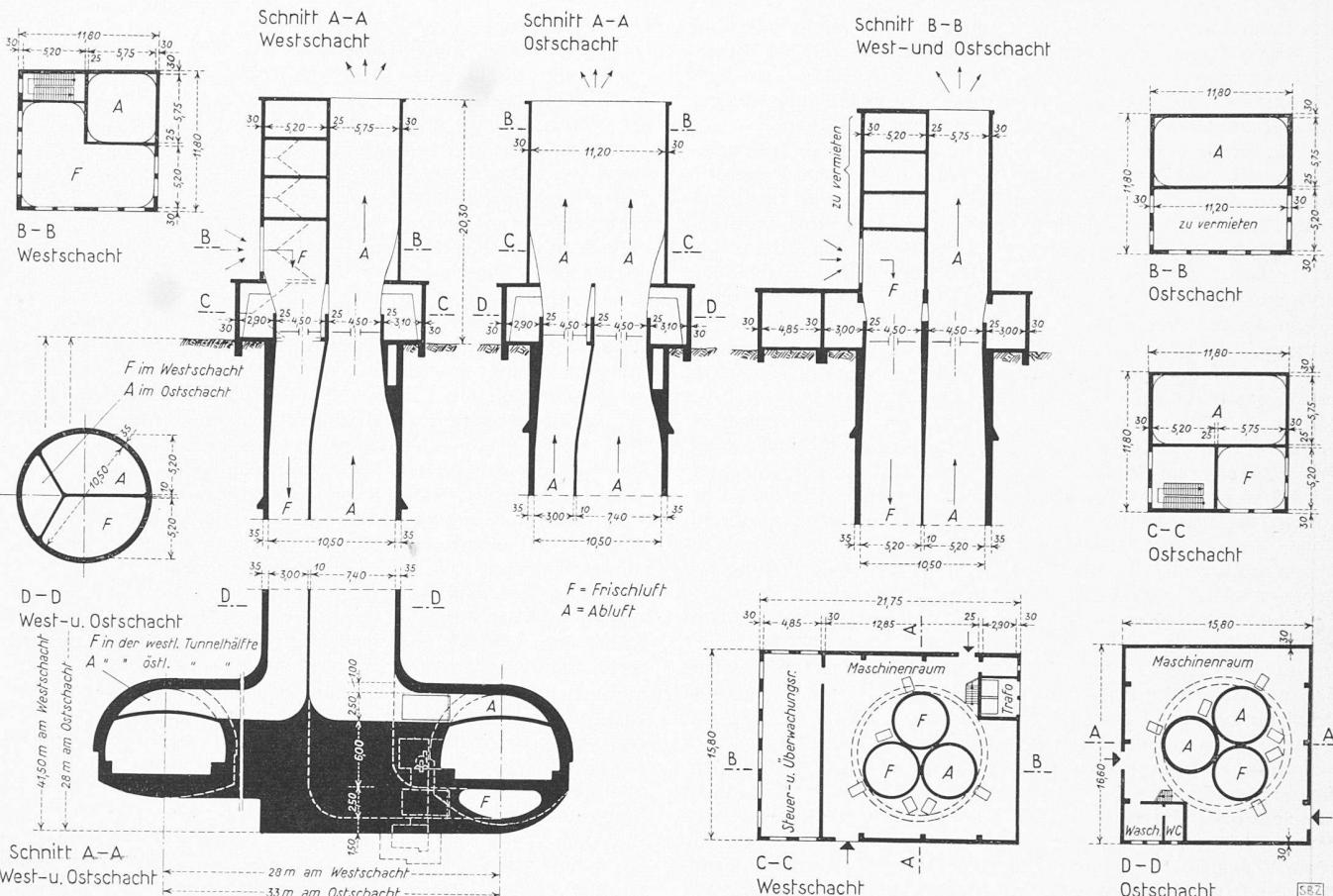


Bild 18. Lüftungsschacht für Querlüftung der Südröhre und kombinierte Längs- und Querlüftung der Nordröhre, 1:600 (für den Horizontalschnitt auf Tunnelhöhe siehe Bild 13, Schnitt G-G)

168 m³/s, 170 U/min, 26 kW, zusammen 1 328 000 m³/h. Abluft ebenso. Insgesamt 4 Aggregate in zwei Schächten.

2. Bauabschnitt 1958—1962 (1. Röhre): Durch Winkelverstellung der Lüfterflügel der vorhandenen Aggregate wird die Förderleistung um 30 % auf 1 746 000 m³/h gesteigert; der erhöhte Kraftbedarf der Lüfter wird durch Zuschalten je eines weiteren, gleichen Motors gedeckt. West-Schacht 226 m³/s, 170 U/min, 65 kW; Ost-Schacht 223 m³/s, 170 U/min, 52 kW. Abluft ebenso: Insgesamt 4 Aggregate in 2 Schächten.

3. Bauabschnitt 1963—1967 (2 Röhren): Durch Drehzahlerhöhung um 60 % der vorhandenen Lüfter bei konstantem Einstellwinkel der Flügel in der steigenden Röhre erreicht. Antriebsmotoren und Getriebezahnräder werden ausgewechselt. Für fallende Röhre erhält West-Schacht ein Zuluftaggregat 128 m³/s und Ost-Schacht ein Abluftaggregat 127 m³/s. Es sind also 4 alte und 2 neue = 6 Lüfteraggregate in 2 Schächten vorhanden. Diese Ausbaustufe muss im einzelnen den seinerzeitigen Verkehrsbedingungen näher angepasst werden.

4. Bauabschnitt 1968—1979 (2 Röhren): Bei sinkendem Luftbedarf durch angenommene Verschiebung der LKW-PKW-Anteile kann der Kraftaufwand durch Verkleinerung der Einstellwinkel der Lüfterflügel entsprechend reduziert werden.

In der zentralen Steuer- und Überwachungsanlage werden die zahlreichen motorischen Antriebe der gesamten Lüftungsanlage gesteuert und überwacht. Durch Signallampen, die zu einem Leuchtbild vereinigt sind, und verschiedene ferngesteuerte Messinstrumente für CO-Gehalt und Sicht im Tunnel erhält das Bedienungspersonal jederzeit genaue Kenntnis über alle Veränderungen oder Störungen, die sich im Betrieb abspielen. Das Leuchtbild gibt in anschaulicher Weise den Zusammenhang wieder zwischen der elektrischen Energieversorgung, dem Betrieb der Motoren, der Luftzusammensetzung, Temperatur, Verkehrssignale, Sichtverhältnisse, Tunnelfüllung usw. Bild 19 zeigt einen Teil des Kommandoraumes zum Scheldetunnel in Antwerpen.

Das Steuerpult enthält die Apparate für alle betriebsmäßig auszuführenden Schalthandlungen durch zwei Perso-

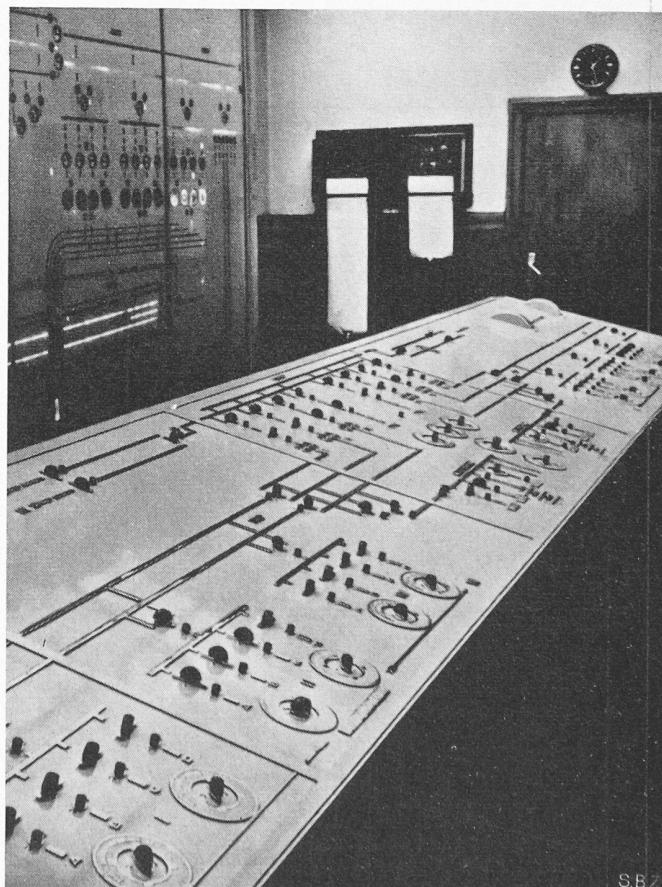


Bild 19. Steuerpult, Teil des Leuchtbildes und CO-Schreiber im Kommandoraum des Scheldetunnels in Antwerpen

nen, von denen stets eine anwesend sein muss. Alle wichtigen Betriebsgrößen werden durch selbsttätige Registrierinstrumente aufgezeichnet. Eine vom Kraftnetz unabhängige Fern-

sprechanlage sichert bei Störungen die Verbindung mit allen wichtigen Stellen des Tunnels. Um Lüftungsausfall bei Stromunterbrechung auszuschliessen, wurde der Anschluss an zwei von einander unabhängige Stromquellen vorgeschlagen, die von der Schaltzentrale aus eingeschaltet werden können.

Es wurde auch die Anwendungsmöglichkeit der Halbquerlüftung für den Wagenburgtunnel untersucht, wobei Frischluft von dem unter Fahrbahn liegenden 15,0 m² grossen Luftkanal in den 61,77 m² grossen Verkehrsraum geführt wird, während die Abluft durch Ablüfter in den Schächten abgesaugt wird und ohne besonderen Kanal im Tunnelfirst abzieht. Die Zwischendecke im Verkehrsraum entfällt. Dabei muss unter jedem Schacht wie beim Mersey-Tunnel im First des Verkehrsraumes auf eine gewisse Länge eine Diffusondecke angeordnet werden, um die Sog- und Luftzugwirkung im Verkehrsraum abzumindern und den Luftstrom zwangsläufig in den oberen Teil des Verkehrsraumes abzudrängen. Drei Zwischenschächte und ein Hilfsschacht am Westportal sind notwendig. Der Längsluftzug im Verkehrsraum im Zustand ohne Verkehr wird 2,18 m/s, mit Verkehr ein Vielfaches mehr. Für die 7 Lüftungsabschnitte sind 14 Frisch- und 14 Abluftlüfter zu installieren. Die auf 2,04 Mio DM veranschlagten Baukosten sind, bezogen auf eine Röhre, um 23,5 % höher als bei Querlüftung mit grossen Lüftern, die Betriebskosten sind etwa gleich gross. Die Luftgeschwindigkeit von 2,18 m/s im Verkehrsraum ist im Hinblick auf Brandgefahr und Fussgänger zu gross. In Anbetracht der grossen technischen Ueberlegenheit der Querlüftung wurde von der Anwendung der Halbquerlüftung abgeraten. Das selbe trifft zu auf eine bauseitige Variante der Halbquerlüftung mit zwei 30 m von den Portalen einwärts in vorhandene Luftschutzkammern zu legenden Schächten, die bei zwar nur 41,7 % Baukostenaufwand der Querlüftung jedoch im Mittel 201 % ihrer Betriebskosten erfordert und außerdem grosse technische Mängel hätte. Der Luftzug im Verkehrsraum wäre im Zustand ohne Verkehr 5,55 m/s, mit Verkehr 7,34 m/s, mithin im Brandfalle und für Fussgänger, sowie offen Fahrende viel zu gross. Die Baukosten und die jährlichen Betriebskosten sind für die verschiedenen Varianten in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5. Bau- und jährliche Betriebskosten der verschiedenen Varianten in DM

	Variante	1. Ausbau 1955—57 eine Röhre	2. Ausbau 1958—62 eine Röhre	3. Ausbau ab 1963 2 Röhren
Baukosten	a	<i>Querlüftung</i> grosse Lüfter	1 627 000 ¹⁾ (= 1,00)	1 657 000 ¹⁾ (= 1,00)
	b	kleine Lüfter	1 700 000 ¹⁾ (= 1,05)	1 951 000 ¹⁾ (= 1,18)
	c	Portalbelüftung ^{1) 2)}	—	1 977 000 ¹⁾ (= 1,20)
	d	<i>Halbquerlüftung</i> kleine Lüfter ¹⁾	—	2 040 000 ¹⁾ (= 1,24)
	e	aus bestehenden Kammern ^{1) 3)}	—	685 000 ¹⁾ (0,417)
	f	<i>Längslüftung</i> ¹⁾	—	2 000 000 (= 1,21)
	g	Komb. Längs- und Halbquerlüftung	1 610 500 ¹⁾ (= 0,98)	1 655 500 ¹⁾ (= 1,00)
Jährl. Betriebskosten	a	<i>Querlüftung</i> grosse Lüfter	108 500 (= 1,00)	159 420 (= 1,00)
	b	kleine Lüfter	117 400 (= 1,08)	173 300 (= 1,09)
	d	<i>Halbquerlüftung</i>	145 000 (= 1,33)	166 590 (= 1,05)
	e	aus bestehenden Kammern ³⁾	282 000 (= 2,60)	282 000 (= 1,77)
			(Mittel = 2,01)	

1) Mit technischen Mängeln behaftet.

2) Portalbelüftung der Aussenstrecken.

3) Belüftungsanlage in bestehende Luftschutzkammern eingebaut, die sich 30 m von den Portalen einwärts befinden.

4) Zu diesen Beträgen kommen noch 1 400 000 DM für den Frischluftkanal, der aus Gründen der Mittelbewilligung unter dem Titel «Tunnelbau» verrechnet wurde.

IV. Schlusswort

Die Untersuchungen ergaben, dass für den Wagenburgtunnel Querlüftung die technisch beste und auf weite Sicht auch wirtschaftlichste Lösung ist. Selbst bei der technisch schlechten Lösung der Verwendung vorhandener Luftschutzkammern für eine Halbquerlüftung werden bei angemessener Verzinsung die eingesparten Baukosten schon innerhalb eines Jahrzehnts durch die Verteuerung der Betriebskosten aufgezehrt. Die beim geringen Luftbedarf der fallenden Röhre mögliche Kombination der Quer- und Längslüftung bietet für die speziellen Baukosten dieser Röhre und ihrer Lüftung beachtliche Verbilligungen. Die natürliche Lüftung genügt nicht, weil sie nicht immer wirkt, der Tunnel nicht in vorherrschender Windrichtung liegt, mit thermischen Differenzen an den Portalen nicht immer gerechnet werden kann und weil sie, wenn sie gelegentlich wirkt, schwankend, umkehrbar und zu schwach ist, um die erforderlichen Frischluftmengen zu fördern; außerdem wird sie vom Gegenverkehr aufgezehrt. Gegen die bei Querlüftung erforderliche Zwischendecke im Tunnel wurde bauseits eingewendet, dass sie die architektonische Wirkung des Tunnelgewölbes zerstört. Diesem Einwand wird mit dem Hinweis auf die zahlreichen Ausführungen querbelüfteter Autotunnel begegnet, wo durch die Zwischendecke eine Verbesserung der Gesamtwirkung des Tunnels und der Beleuchtungseffekte im Verkehrsraum bewirkt wurde. Dem bauseitigen Einwand, dass Querlüftung vornehmlich bei Unterwassertunneln, nicht aber bei Bergtunneln angebracht sei, werden die Tunnel in Lyon und unter der 179. und der 178. Strasse in New York entgegen gehalten. Auch ein aus den Professoren Dr.-Ing. Dr. rer. pol. h. c. Pirath und Abt. Präs. i. R. Hartmann, Stuttgart, sowie Abt. Präs. i. R. Buddenberg, Berlin, gebildetes Gutachterkollegium kam bis jetzt in der Lüftungsfrage Wagenburgtunnel zu keinen wesentl. abweichenden Schlussfolgerungen.

Dem Gutachterkollegium, den Siemens-Schuckertwerken, Erlangen, sowie Direktor van Haren vom Scheldetunnel Antwerpen (IMALSO) und den Verwaltungen des Maastunnels Rotterdam, des Mersey-Tunnels Liverpool, des Tunnels St. Cloud, Paris, und des Tunnels La Croix Rousse, Lyon, sowie den Mitarbeitern des Verfassers sei an dieser Stelle herzlicher Dank für Mitarbeit, zahlreiche Anregungen und reichlich zur Verfügung gestelltes Material gesagt.

Literaturverzeichnis

- [1] H. H. Kress: Richtlinien für die Entwurfsbearbeitung von Autotunneln. Diss. Technische Hochschule Stuttgart 1936, Omnitypie-Gesellschaft, L. Zechnall.
- [2] «Engineering News Record» vom 10. März 1927, S. 392.
- [3] «Engineering News Record» vom 21. August 1924 und 7. Mai 1925.
- [4] H. H. Kress: Autotunnel als Hilfsmittel grossstädt. Verkehrs-entwicklung. «Der Bauingenieur» 1937, Nr. 17 und 18.
- [5] H. H. Kress: Ueber die Lüftung langer Autotunnel. «Der Strassenbau» 1937, Nr. 13, 15, 19 und 20.
- [6] «Schweiz. Bauzeitung» Bd. 119, S. 195* (23. April 1942), Tabellen 1 und 2 (E. Schnitter: Lüftung Maastunnel Rotterdam).
- [7] Pirath/Wetzl: Die Verkehrsplanung und die städtebauliche Neugestaltung von Stuttgart. Denkschrift 1941.
- [8] New Ventilating System Designed for Penn-Lincoln Parkway Tunnel (Squirrel Hill Tunnel). «Engineering News Records» vom 16. 11. 1944, S. 82.
- [9] Hartmann F.: Tunnelbau. Handbuch für Eisenbetonbau, 4. Auflage 1937, Berlin, Ernst & Sohn.
- [10] Kravath: Lüfter, Lüfterantriebe und ihre Steuerung bei der Belüftung von Fahrzeugtunneln. «Heating and Ventilating», November 1941, S. 38.
- [11] H. H. Kress: Autotunnel unter dem Hudson in New York (Lincoln Tunnel). «Bauing.» 1937, Nr. 47 und 48, S. 761.
- [12] H. H. Kress: Zur Bemessung der eisernen Auskleidung kreisförmiger Unterwassertunnelns. «Bautechnik» 1940, Nr. 42, S. 477.
- [13] Ole Singstad: Bau von Unterwassertunneln in den Vereinigten Staaten von Amerika. «Zeitschrift VDI» vom 11. 3. 1933, S. 265 bis 270.
- [14] A. Bartholomäi: Zur Frage der Lüftung langer Autotunnel (Titlis-Projekt). SBZ Bd. 112, S. 84* (20. Aug. 1938).
- [15] Getto: Einfluss des Verkehrs auf die Längsströmung der Luft in einem Kraftfahrzeug-Tunnel. «Zeitschrift VDI» Bd. 93, Nr. 6 vom 21. 2. 1951, S. 141.
- [16] Visser: Mechanische Installaties c. a. van de Maastunnel te Rotterdam. Sonderdruck aus «De Ingenieur» 1940, Nr. 29.
- [17] Proetel: Die neuen Unterwassertunneln unter dem Mersey-Fluss bei Liverpool und unter der Maas bei Rotterdam. «Zeitschrift VDI» Bd. 84, Nr. 48 vom 30. 11. 1940, S. 932.
- [18] Hauwaert: Les tunnels sous l'Escaut à Anvers. Sonderdruck aus «La Technique des Travaux», Juni, Juli, Sept., Dez. 1932, Jan. 1933, Febr., März 1934.
- [19] Le Tunnel de St-Cloud: «Annales des Ponts et Chaussées» 1941, VII—VIII, S. 58.
- [20] E. und G. Gruner: Grosse Autotunnel. «Schweiz. Bauztg.» Bd. 106, S. 158* und 167* (1935).
- [21] C. Andreea: Zur Frage der Lüftung langer Autotunnel. «Schweiz. Bauztg.» Bd. 111, S. 225* und 249 (1938).
- [22] C. Andreea: Zum Problem der Autostrassentunnel. «Schweiz. Bauztg.» Bd. 114, S. 1* und 20 (1939).
- [23] P. Jaray und C. Andreea: Zur Frage der Autotunnelbelüftung. «Schweiz. Bauztg.» Bd. 114, S. 175* und 235 (1939).