

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 71 (1953)
Heft: 36

Artikel: Lüftungsentwurf für den Wagenburgtunnel in Stuttgart
Autor: Kress, H.H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-60614>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.01.2025

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

Lüftungsentwurf für den Wagenburgtunnel in Stuttgart

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

I. Allgemeines

DK 625.712.35: 628.8 (43)

Seit dem Jahre 1941 baut die Stadt Stuttgart den Wagenburgtunnel für gemischten Kraftwagenverkehr, der das Stuttgarter Wirtschafts- und Güterumschlagszentrum mit den östlichen Vororten, dem 1958 in Betrieb gehenden Neckarkanalhafen Wangen und dem Hinterland auf den Fildern verbindet. Der Tunnel, der im Endzustand zwei im Richtungsbetrieb befahrene Röhren hat, vorläufig aber nur mit einer in beiden Richtungen befahrenen Röhre ausgebaut wird, durchfährt von Westen nach Osten auf 830 m Länge mit der grossen Steigung von 5,4 % einen Höhenzug im Osten der Stadt; seine östliche Anfahrt hat sogar 6 % Steigung (Bild 1). Die bei der erst 12 Jahre nach Baubeginn erfolgten Auftragserteilung für den Lüftungsentwurf im Jahre 1952 leider nicht mehr zu ändernde grosse Steigung im Tunnel verteuert die Bau- und Betriebskosten der Lüftung wesentlich.

Nach Ueberwindung geologischer und finanzieller Schwierigkeiten sind die Bauarbeiten in der zunächst fertigzustellenden Südröhre nun so weit, dass das als Dichtungsträger dienende äussere Schutzgewölbe und zu einem kleinen Teil das innere Traggewölbe mit Widerlager fertig sind (Bild 2), während der grösste Teil des Traggewölbes mit seinen Widerlagern, sowie Aushub und Betonieren des Sohlengewölbes und die gesamte Lüftungsanlage noch ausgeführt werden müssen. In der Nordröhre ist lediglich ein Sohlstollen von Portal zu Portal durchgebrochen. Die Südröhre des gänzlich im Gipskeuper mit überlagerndem Schilfsandstein verlaufenden Tunnels wurde nach der Kunzschens Bauweise gebaut, obwohl bei der Standfestigkeit dieses Gebirges die Anwendung der Kernbauweise wahrscheinlich vorteilhafter gewesen wäre. Auftretende stark gipshaltige Wässer zersetzen den Beton des äusseren Schutzgewölbes, soweit dieser nicht durch sorgfältige Verdichtung und Verwendung von Hütten-Sulfatzement eine besondere Widerstandsfähigkeit erhalten hat. Aufwärts gerichteter Sohlendruck von 20 t/m² bewirkt das Hochdrücken der noch natürlichen Tunnelsohle um wöchentlich etwa 1,5 cm, weshalb der Einbau eines Sohlengewölbes unerlässlich wird. Vermutlich handelt es sich um einen während der langen Bauzeit zur Auswirkung gekommenen Ausgleich des Ulmen-drucks nach der Sohle zu, weil zwischen Betonierung der Widerlager und Einziehen des Sohlengewölbes ein zu grosser Zeitraum verstrichen ist. Bei Anwendung der Kernbauweise

mit baldigem Nachziehen des Sohlengewölbes wäre das vermeidbar gewesen. Nach anderer Ansicht handelt es sich um Quellungserscheinungen des Gipskeupers, bei denen aber auch der Zeitfaktor eine Rolle spielt. Diese Abhandlung befasst sich nur mit dem Entwurf der Lüftungsanlage und den zugehörigen Voruntersuchungen.

Schon 1941 hatte der Verfasser auf die Notwendigkeit künstlicher Lüftung dieses Tunnels aufmerksam gemacht. Bald darauf wies auch ein Gutachten von Prof. Dr. L. v. Rabecwicz, Stockholm, übereinstimmend mit den vom Verfasser seit 1936 ergangenen Veröffentlichungen über Autotunnel die Notwendigkeit künstlicher Lüftung des Wagenburgtunnels nach. Trotzdem und obwohl der Tunnel nicht in der vorherrschenden Windrichtung liegt und nach Feststellung des Wetteramtes Stuttgart bei der steigenden Röhre nur an 65 und bei der fallenden nur an 43 Tagen im Jahr mit unterstützender Mitwirkung natürlicher Lüftung infolge günstiger Windrichtung gerechnet werden kann, glaubte man bauseits, unter Ausnutzung vermeintlich immer vorhandener Temperaturunterschiede zwischen den Portalen und der als ständig vorhanden angenommenen Schornsteinwirkung des Tunnels nur mit natürlicher Lüftung auskommen zu können. Der 1952 erfolgte Einsatz eines Dieselbaggers beim Kernaushub führte zu Leistungsausfällen der Arbeiter infolge der Wirkung von Dieselauspuffgasen und demonstrierte drastisch im Hinblick auf die beim späteren Autoverkehr im Tunnel zu erwartende weit grössere Luftverschlechterung die Notwendigkeit künstlicher Tunnellüftung. Dies führte zur Beauftragung des Verfassers mit der Ausarbeitung des Lüftungsentwurfes.

Im Tunnelquerschnitt (Bild 2) ist die 7,50 m breite Fahrbahn zweispurig, was den an neuzeitliche Autotunnel zu stellenden Anforderungen nicht mehr voll entspricht, wie die weit besseren, 4- bzw. 5-spurigen Autotunnel Croix Rousse in Lyon, St. Cloud in Paris und der Mersey-Tunnel in Liverpool klar beweisen. Die werktäglichen Verkehrsspitzen liegen nach bauseitigen Angaben zurzeit, ohne den Verkehrsanteil vom Hafen Wangen, zwischen 7 bis 8 h, 12 bis 14 h und 17 bis 19 h. Die Stuttgarter Verkehrszählungen 1952 und statistische Unterlagen über die zu erwartende jährliche Verkehrszunahme wurden bauseits zur Verfügung gestellt. Da die Lüftung von Autotunneln nicht nur von der Frequenz, sondern auch von der

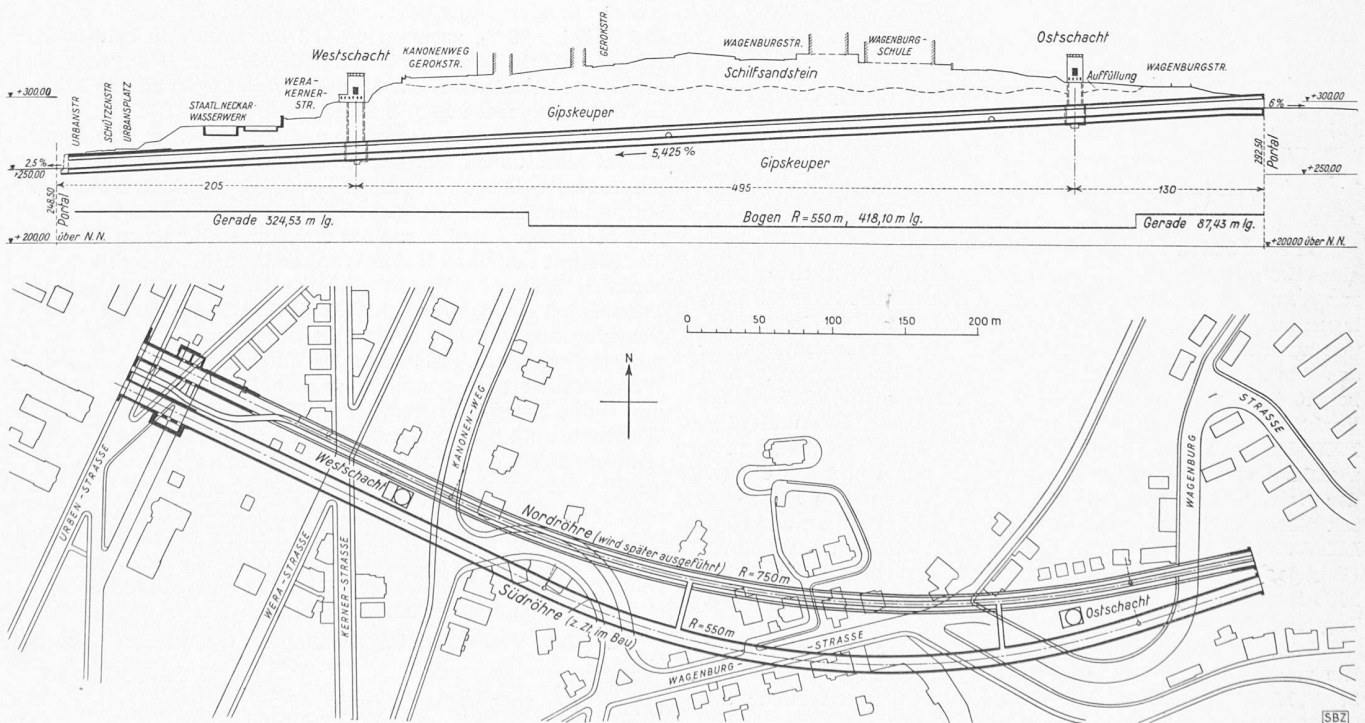


Bild 1. Längsschnitt und Lageplan des Wagenburgtunnels, 1:5000

Zusammensetzung des Verkehrs und der Leistungsfähigkeit des Tunnels abhängt, wurden vom Verfasser zunächst die Verkehrsgrundlagen und die Leistungsfähigkeit des Tunnels für die Lüftung untersucht.

II. Mutmasslicher Verkehr und Leistungsfähigkeit des Tunnels

Für die in Bau und Inbetriebnahme zeitlich weit auseinanderliegenden beiden Tunnelröhren wurden zur Bemessung der Lüftungsanlage folgende verkehrstechnische Untersuchungen aufgestellt:

1. Umfang und Art des mutmasslichen Tunnelverkehrs für die Jahre von 1955 bis 1979.
2. Leistungsfähigkeit der Tunnelstrasse
 - a) bei einer in beiden Richtungen befahrenen Röhre mit je einer Spurbreite pro Richtung,
 - b) bei zwei im Richtungsbetrieb befahrenen Röhren mit je zwei Spurbreiten pro Richtung.

Zur Ermittlung des Tunnelverkehrs wurden die näheren und weiteren Einflussgebiete und ihr auf den Tunnel entfallender Verkehrsanteil unter besonderer Beachtung des zwischen dem Güterumschlagszentrum und dem Hafen Wangen kurstrenden Verkehrs festgestellt. Dazu hat der Verfasser neben den bauseitigen Angaben auch diejenigen in der Denkschrift «Die Verkehrsplanung und die städtebauliche Neugestaltung von Stuttgart» der Professoren Dr. C. Pirath und Wetzel, Stuttgart, benützt. Die Lüftungsanlage eines Autotunnels muss im Endstadium der Leistungsfähigkeit des Tunnels genügen, wobei man im Einzelfall aus kostenmässigen Ueberlegungen die baulichen Massnahmen meistens sofort für den Endzustand bemisst, die maschinelle Anlage dagegen entsprechend der Verkehrssteigerung stufenweise erweitern kann.

Bei der Verkehrsermittlung wurden 2 Krafräder (KR) = 1 Personenkraftwagen (PKW) gesetzt. Diese Umrechnung nach der Leistungsfähigkeit ohne Berücksichtigung der verschiedenen Geschwindigkeiten erscheint gerechtfertigt, weil im Autotunnel die Höchstgeschwindigkeiten schneller Fahrzeuge aus betriebstechnischen und Sicherheitsgründen nicht ausnutzbar sind. Gegenseitiges Ueberholen im Tunnel soll grundsätzlich so lange verboten sein, als nur eine Röhre in beiden Richtungen befahren wird. Pferdefuhrwerke sind von der Benützung des Tunnels auszuschliessen. Die Umrechnung des Lastkraftwagen (LKW)- und Kraftomnibus (KOM)-Verkehrs in PKW-Werte erscheint für die Berechnung der Frischluftmengen untunlich, weil die Frischluftbedarfszahlen aus PKW- und LKW-Verkehr stark voneinander abweichen.

Der Lüftungsentwurf wurde nach den Grundsätzen aufgestellt, die der Verfasser in seiner Dissertation [1] erläutert hat. Darnach ist

- (1) die jährliche Verkehrssteigerung

$$p' = 100 \left(\sqrt[n]{V_n/V_0} - 1 \right)$$

- (2) das künftige Transportbedürfnis

$$V_n = \left(\frac{100 + p'}{100} \right)^n V_0 = p^n V_0$$

Hierin bedeuten: V_0 = Anfangsverkehr, V_n = Endverkehr eines Zeitintervalls von n Jahren. Die jährliche Verkehrssteigerung wurde nach sorgfältiger Abwägung statistischer Unterlagen zu $p' = 10\%$ angenommen. Bauseitige Verkehrszählungen aus dem Jahre 1952 ergaben für 1955, das Eröffnungsjahr des Tunnels, 7816 Fahrzeuge pro Tag und Richtung im Tunnel bei 16 Betriebsstunden. Im ersten Betriebsjahr 1955 ist die Verkehrszusammensetzung im Tunnel 29% LKW- und 71% PKW-Verkehr. Da der LKW-Anteil ständig wächst, wurde zwecks Sicherstellung guter Sicht im Tunnel und ausreichender Betriebssicherheit der Lüftung bei steigendem LKW-Anteil dieses Verhältnis innerhalb 25 Jahren geradlinig auf 65% LKW- und 35% PKW-Anteil veränderlich angenommen (Bild 3). Nach Betriebseröffnung des Hafens Wangen im Jahre 1958 kommen zusammen in beiden Richtungen 2000 LKW pro Tag = 125 LKW pro Stunde hinzu.

Bild 4 zeigt den Tunnelverkehr unter Beachtung von Bild 3. Bis zur Eröffnung des Hafens Wangen anfangs 1958 ist bei 33% LKW- und 67% PKW-Anteil der Tunnelverkehr auf 22 800 Fahrzeuge pro Tag in beiden Richtungen gewachsen, woraus sich ein mittlerer Stundenverkehr von 692 PKW + 284

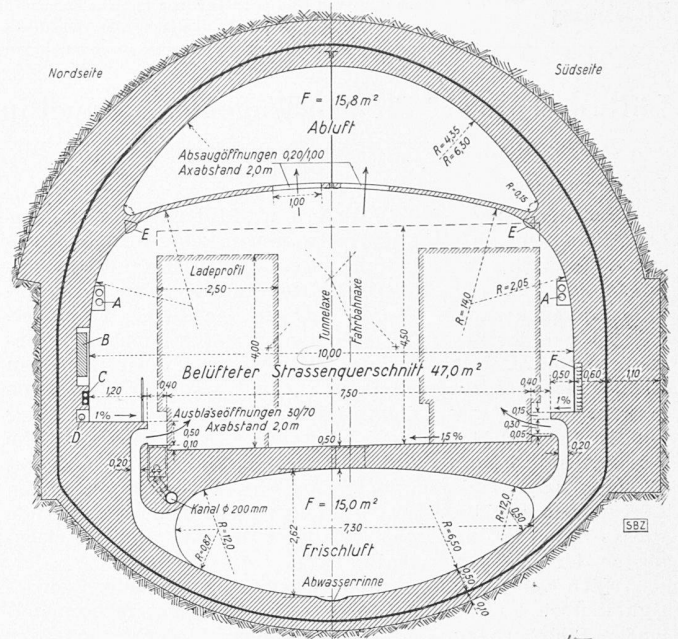


Bild 2. Querschnitt durch die Südröhre für Querlüftung, 1:100 (Entwurf Juli 1953)

- A Verkehrssignal alle 35 m; Selenzellen für Sichtmessung alle 35 m, zu den Verkehrssignalen mittig versetzt.
- B Feuerlöscher und Feuermelder alle 35 m; Telefon und Notschaltstelle für Verkehrssignale alle 140 m.
- C Zwei Starkstromkabel in Kabelformsteinen.
- D Wasserleitung 100 mm Ø
- E Beleuchtung
- F 24 Schwachstromkabel

LKW = 976 Wagen in beiden Richtungen ergibt. Die Betriebszeit der Lüftungsanlage ist auf 16 Stunden pro Tag begrenzt. Nach Betriebseröffnung des Hafens Wangen im Jahre 1958 ist im Mittel mit 870 PKW = 61% und 556 LKW = 39%, zusammen 1426 Wagen pro Stunde in beiden Richtungen zu rechnen. Die bauseitigen Verkehrszählungen aus dem Jahre 1952 ergaben für 1955 als Tunnelverkehr in jeder Richtung 12 037 PKW-Werte, wobei pro LKW und KOM 2, pro Anhänger 1,5, pro Lieferwagen 1 und pro KR 0,5 PKW-Werte gerechnet sind. Der mittlere Stundenwert ist 755 PKW-Werte, der maximale Stundenverkehr 9,6% des mittleren Tagesverkehrs = 1154 PKW-Werte pro Richtung, mithin das 1,53fache des mittleren Stundenverkehrs. Hieraus folgt im ersten Betriebsjahr 1955 ein maximaler Stundenverkehr von 1058 PKW = 71% und 435 LKW = 29%, zusammen 1493 Fahrzeuge in beiden Richtungen. Nach Betriebseröffnung des Hafens Wangen ist der maximale Stundenverkehr 1330 PKW = 61% und 650 LKW = 39%, zusammen 2180 Fahrzeuge in beiden Richtungen.

Bild 5 zeigt den maximalen Stundenverkehr, der sich bei 16 Betriebsstunden aus dem mittleren Tagesverkehr (Bild 4) durch Multiplikation mit 1,53/16 = 0,096 ergibt. Den Verkehrseinfluss des Hafens Wangen ab 1958 zeigen die Kurvengabelungen der Bilder 4 und 5, so dass die Kurven für jeden Zeitpunkt ab 1958 mit und ohne Hafen Wangen brauchbar sind. Die horizontalen Linien in Bild 4 sind die Leistungsfähigkeiten des Tunnels bei einer und zwei Röhren; ihre Schnittpunkte mit den Verkehrskurven geben die für die Lüftung massgebenden Zeitpunkte der vollen Auslastung des Tunnels mit und ohne Hafen Wangen für eine und zwei Röhren an. Bei c Wagen pro Stunde und Spur, V km/h bzw. v m/s mittlerer Fahrgeschwindigkeit, Wagenabstand p in m, Wagenlänge a in m, Abstand der Strassenkreuzungen d_m in m, Freigabezeit t_r in s und Stopzeit t_u in s an Strassenkreuzungen hat man für die von Fahrgeschwindigkeit, Fahrzeugabstand pro Spur, Wirksamkeit der Bremsen, Breite und Steigung der Strasse abhängende Leistungsfähigkeit der Tunnelstrasse, d. h. die Zahl der Fahrzeuge, die bei ausreichender Sicherheit pro Stunde einen bestimmten Punkt des Tunnels passieren kann:

- a) ohne Verkehrsunterbrechung an Querstrassen vor dem Tunnel:

$$(3) \quad c = 1000 V/p = \frac{3600 v}{a + 0,5 v + 0,166 v^2}$$

Wagen pro Stunde und Richtung

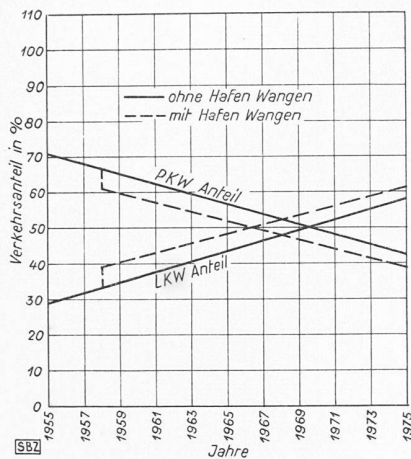


Bild 3. Verschiebung der PKW- und der LKW-Anteile am Gesamtverkehr im Lauf der Jahre (PKW/LKW-Schere)

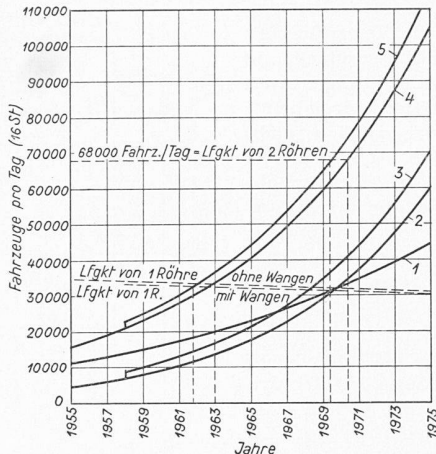


Bild 4. Entwicklung des mutmasslichen Tunnelverkehrs
 1 PKW-Verkehr
 2 LKW-Verkehr ohne Wangen
 3 LKW-Verkehr mit Wangen
 4 Gesamtverkehr ohne Wangen
 5 Gesamtverkehr mit Wangen

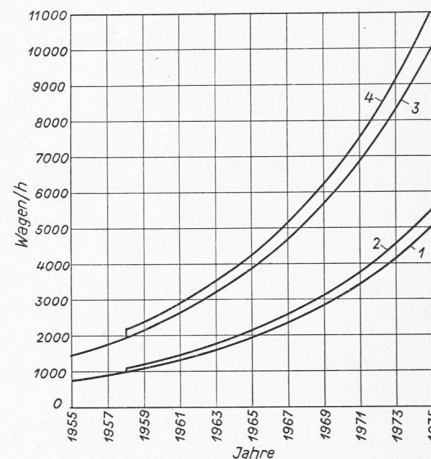


Bild 5. Entwicklung des grössten Stundenverkehrs
 1 Verkehr in einer Richtung ohne Wangen
 2 Verkehr in einer Richtung mit Wangen
 3 Verkehr in beiden Richtungen ohne Wangen
 4 Verkehr in beiden Richtungen mit Wangen

b) mit Verkehrsunterbrechung an Querstrassen vor dem Tunnel:

$$(4) \quad c = \frac{3600 \cdot d_m}{(t_r + t_u) \cdot p}$$

Wagen pro Stunde und Richtung, wobei

$$(5) \quad p = v t - 7 v^2 / 14,4 \text{ m ist.}$$

Der Tunnelverkehr kann an den Zu- und Ausfahrten durch Querverkehr gestört werden; daher hängt die Leistungsfähigkeit des Tunnels nicht nur von seinen Fahrbahnen, sondern auch von seinen Mündungen ab, die beim stärksten Verkehr eine ununterbrochene Abwicklung des Tunnelverkehrs gewährleisten müssen, damit die Leistungsfähigkeit der Tunnelbahnen ausgenutzt werden kann. Die deshalb notwendige Trennung der Zu- und Ausfahrten in verschiedene Strassen ist beim Wagenburgtunnel aus lokalen Gründen nicht möglich, jedoch sollte in den Zufahrtplätzen vor den Portalen wenigstens eine zusätzliche Spur zum Überholen ausfahrender Fahrzeuge zwecks rascherer Verkehrsabwicklung vorgesehen werden. Der Wagenabstand p muss das gegenseitige Auflaufen der Wagen auf ihren Bremsstrecken im Tunnel verhindern, wobei sicherheitshalber nur mit Zweiradbremsen gerechnet wird. Bei Wagenlänge a in m, mittlerer Fahrgeschwindigkeit V_m km/h, $t_a = 0,5$ s = Zeitunterschied zwischen der Bremswirkung aufeinanderfolgender Wagen ist der Wagenabstand

$$(6) \quad p = a + 0,278 V_m t_a + 0,00867 V_m^2$$

Amerikanische Betriebserfahrungen [2] geben 16 km/h als mittlere Verkehrsgeschwindigkeit in Autotunneln an. Bei 5,4 % Steigung des Wagenburgtunnels wurde für die Lüftung bei Normalverkehr mit 15 km/h in der LKW-Spur, 20 km/h in der PKW-Spur, 10 km/h bei Langsamverkehr und bei internationalen Sportfesten mit 30 km/h in der PKW-Spur und 20 km/h in der KOM-Spur gerechnet. Strassenbahn sollte ausgeschlossen, oder, wenn nicht anders möglich, höchstens in der LKW-Spur beim Richtungsbetrieb von zwei Tunnelröhren zugelassen werden.

Beim zweiten Betriebszustand mit zwei im Richtungsbetrieb befahrenen Röhren mit je einer PKW- und einer LKW-Spur wird eine grössere mittlere Verkehrsgeschwindigkeit erreicht. Die Leistungsfähigkeit der Tunnelstrasse wächst mit dem Quadrat der Anzahl ihrer Spuren; nach Erreichen von 20 km/h mittlerer Fahrgeschwindigkeit muss aber sicherheitshalber der Fahrzeugabstand p so vergrössert werden, dass in der einzelnen Spur die Leistungsfähigkeit nicht mehr steigt. Bei Aufteilung des PKW-Verkehrs in 70 % Kleinwagen mit 3,50 m, 25 % Mittelwagen mit 4,50 m, 5 % Grosswagen mit 6 m und des LKW-Verkehrs in 70 % mit 6 m, 10 % mit 11 m einschliesslich eines Anhängers, 5 % 16 m mit zwei Anhängern, 10 % KOM mit 12 m und 5 % Sonderfahrzeuge mit 10 m Länge ergibt sich der Wagenabstand p für 1955 bis 1957 zu rund 9,20 m, für 1958 bis 1962 zu rd. 9,70 m, für 1963 bis 1967

zu rd. 9,95 m, für 1968 bis 1972 zu rd. 10,30 m und für 1973 bis 1979 zu rd. 10,60 m bei 3,90 m mittlerer PKW- und 7,80 m mittlerer LKW-Länge und Betrieb einer Röhre. Für zwei Röhren wird bei gleichen mittleren Wagenlängen und 15 km/h in der LKW-Spur, sowie 20 km/h in der PKW-Spur $p =$ rund 11,85 m bei den LKW und $p =$ rd. 10,15 m bei den PKW. Damit ergibt sich die stündliche Leistungsfähigkeit des Tunnels für eine in beiden Richtungen befahrene Röhre für 1955 bis 1957 zu 3250 Wagen, für 1958 bis 1962 zu 3100 Wagen, für 1963 bis 1967 zu 3020 Wagen, für 1968 bis 1972 zu 2910 Wagen, für 1973 bis 1979 zu 2830 Wagen jeweils zusammen in beiden Richtungen und für zwei im Richtungsbetrieb befahrene Röhren zu 2530 LKW + 3940 PKW = 6470 Wagen pro Stunde in beiden Richtungen zusammen. Mit

$$(7) \quad n_1 = \frac{\text{mittlerer Tagesverkehr}}{\text{maximaler Stundenverkehr}} = \frac{2 \cdot 7816}{1493} = \frac{22\,800}{2180} = 10,5$$

folgt die tägliche Leistungsfähigkeit des Tunnels in beiden Richtungen zusammen aus

$$(8) \quad C_{\text{Tag}} = 2 c n_1 \text{ Wagen pro Tag}$$

mit den Bildern 3, 4 und 5 für den Betrieb einer Röhre ohne Hafen Wangen für 1955 zu 34 600 Wagen, für 1957 zu 34 100 Wagen, für 1962 zu 33 200 Wagen und mit Hafen Wangen für 1958 zu 33 300 Wagen und für Ende 1962 zu 32 600 Wagen jeweils pro Tag und in beiden Richtungen zusammen, wobei sich ergibt, dass die erste Röhre schon 1962 den Verkehr nicht mehr voll aufnehmen kann. In gleicher Weise erhält man für zwei im Richtungsbetrieb befahrene Röhren die tägliche Leistungsfähigkeit des Tunnels in beiden Richtungen zusammen zu

$$C_{\text{Tag}} = 10,5 (2530 + 3940) = 68\,000 \text{ Wagen pro Tag}$$

Die Gleichung (7) liefert für alle Zeitintervalle konstant $n_1 = 10,5$. Bild 4 zeigt die Auslastung einer Röhre mit Hafen Wangen Ende 1961 und ohne Hafen Wangen Ende 1962, die Auslastung von zwei Röhren mit Hafen Wangen ab Mitte 1969 und ohne Hafen Wangen ab Mitte 1970. Damit ist auch der Zeitpunkt festgelegt, wann die zweite Röhre erforderlich wird. Darüber hinaus ist ersichtlich, von wann ab in späteren Jahren andere Verkehrserleichterungen geschaffen werden müssen.

Die Kenntnis der Leistungsfähigkeit eines Autotunnels ist für den Entwurf der Lüftungsanlage deshalb so wichtig, weil diese letztere der Leistungsfähigkeit des Tunnelverkehrs genügen, aber nicht stärker bemessen werden muss.

III. Ventilation

Zweck der Lüftung von Autotunneln ist die Neutralisierung schädlicher Bestandteile von Auspuffgasen und die Sicherung guter Sichtverhältnisse im Tunnel, wobei die Erfüllung

der zweiten Bedingung von selbst diejenige der ersten bewirkt. Die Auspuffgase der Autos verunreinigen die Tunnelluft so stark, dass natürliche Lüftung durch Druckunterschiede an Portalen und Schächten, sowie günstige Windrichtung, ferner der vom Verkehr erzeugte Luftzug meist keine ausreichende Frischlufterneuerung sicherstellen können. Insbesondere reicht eine allenfalls zeitweilig vorhandene, jedoch nie dauernd und nie gleichmässig, oft sogar umkehrbar wirkende, natürliche Lüftung eines Autotunnels nie aus, die besonders durch Auspuffgase von Dieselmotoren gestörten Sichtverhältnisse und die allgemeinen Luftbedingungen im Tunnel einigermaßen erträglich zu gestalten. Bekanntlich verliess man sich im Liberty-Tunnel in Pittsburg USA, der aus einem 1600 m langen Zwillings-tunnel mit je einem zentralen Schacht besteht und ein normaler Bergtunnel ist, so lange auf die natürliche Lüftung, bis es am 10. Mai 1924 infolge einer Verkehrsstörung an einer Tunnelmündung zu einem völligen Verkehrsstillstand im Tunnel kam. Dies bewirkte in der Tunnelluft eine Anreicherung von CO bis 2,5 ‰, die zu Uebelkeit, Ohnmachtsanfällen und einer allgemeinen Panik im Tunnel führte [3], [4], so dass mit erheblichen Mehrkosten nachträglich eine maschinelle Lüftung ein-gebaut werden musste.

1. Grenzlänge ohne künstliche Lüftung

Beim Wagenburgtunnel wurde bauseits behauptet, dass für seine 830 m Länge bei 5,4 ‰ Steigung natürliche Lüftung genüge oder mindestens so stark sei, dass man sie voll in Rechnung setzen könne. Das ist jedoch keinesfalls zutreffend. Der 800 m lange, im übrigen dem Wagenburgtunnel beinahe identische Autotunnel unter der 179. Strasse in New York, sowie der in der vorherrschenden Windrichtung liegende 832 m lange Tunnel St. Cloud bei Paris sind künstlich belüftet, wobei im Falle St. Cloud, übrigens auch beim Wagenburgtunnel, eingehende Untersuchungen die überwiegende Unwirksamkeit natürlicher Lüftung ergaben. Da eine absolut zuverlässige Lüftung nur bei entsprechender maschineller Ausrüstung gesichert ist, müssen schon verhältnismässig kurze Autotunnel bei entsprechender Verkehrsfrequenz künstlich belüftet werden.

Bei der Bestimmung der Grenzlänge eines Autotunnels ohne künstliche Lüftung darf die nicht immer vorhandene, oft sogar umkehrbare natürliche Lüftung überhaupt nicht berücksichtigt werden. Diese Grenzlänge hängt ab vom Querschnitt und vom Luftinhalt des Verkehrsraums, von der mittleren Fahrgeschwindigkeit, der Tunnelleistung, der Tunnelfüllung, dem CO-Anfall und der zulässigen CO-Konzentration. Mit L = Tunnelänge in km, F = Verkehrsraumquerschnitt in m^2 , J = 1000 L , F = Luftinhalt des Tunnels in m^3 , V = mittlere Fahrgeschwindigkeit in km/h, p = mittlerer Wagenabstand in m (Bremsweg), t = 3600 L/V = mittlere Durchfahrzeit in s, $2c$ = 2000 V/p = stündlicher Wagenverkehr in beiden Richtungen, z = Anzahl gleichzeitig im Tunnel fahrender Wagen (Tunnelfüllung), Q' = CO-Anfall pro Wagen in l/min, f = zulässige CO-Konzentration der Tunnelluft in ‰, Q = erforderliche Frischluftmenge in m^3/s wird

$$(9) \quad z = 2c \frac{L}{V} = 2000 \frac{V}{p} \frac{L}{V} = 2000 \frac{L}{p} \text{ Wagen}$$

In der Durchfahrtszeit $t = 3600 L/V$ s erzeugt die Tunnelfüllung z die CO-Menge in m^3

$$(10) \quad CO = \frac{120 Q' L^2}{p V}$$

Hieraus folgt mit f ‰ zulässiger CO-Konzentration in der Tunnelluft ($f = 0,15$ ‰ bis $0,4$ ‰) die Grenzlänge in km eines Autotunnels ohne künstliche Lüftung zu

$$(11) \quad L = \frac{f F p V}{120 Q'}$$

Die vom amerikanischen Bureau of Mines festgesetzte zulässige physiologische Grenze von $0,4$ ‰ CO (= 4 Vol. Teile CO auf 10 000 Vol. Teile Luft) für Autotunnel ergibt sehr schlechte Sicht im Tunnel. Nach bauseitigen Plänen hat der Verkehrsraum des Wagenburgtunnels ohne Lüftung $F = 61,77$ m^2 . Der amerikanische Mittelwert $Q' = 60$ l/min und Wagen liefert für den Wagenburgtunnel bei $V = 15$ km/h und $p = 9,90$ m nach Gleichung (11) für $f = 0,22$ ‰ $L = 0,280$ km und für $f = 0,40$ ‰ $L = 0,510$ km. Beim Wagenburgtunnel beträgt der durchschnittliche CO-Anfall für die bauseits angegebenen

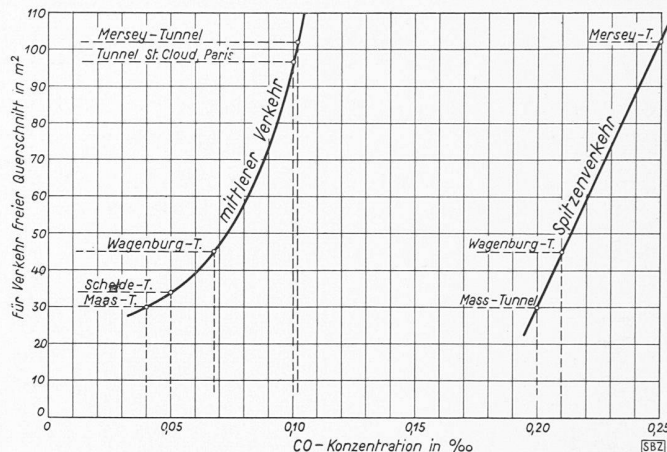


Bild 6. Beziehung zwischen belüftetem Querschnitt und CO-Konzentration bei den wichtigsten europäischen Autotunneln

Verkehrsgrundlagen 32,8 l/min und Wagen. Bild 6 zeigt die Beziehungen zwischen belüftetem Querschnitt und CO-Konzentration bei den wichtigsten europäischen Autotunneln für Dauerbetrieb und Spitzenverkehr. Für die gewählte Querlüftung des Wagenburgtunnels darf darnach im 45 m^2 grossen Verkehrsraum die CO-Konzentration bei Spitzenverkehr höchstens $0,21$ ‰ und im Dauerbetrieb wegen der Sicht höchstens $0,068$ ‰ betragen. Im Dauerbetrieb ist die Fahrgeschwindigkeit 15 km/h und der Wagenbestand rd. 15 m. Bei Halbquerlüftung wäre die zulässige CO-Konzentration im Spitzenverkehr $0,22$ ‰ und im Dauerbetrieb $0,081$ ‰, womit sich nach Gl. (11) die Grenzlänge zu rd. $0,28$ km ergibt. Also braucht der $0,83$ km lange Wagenburgtunnel künstliche Lüftung.

2. Gesichtspunkte für den Entwurf der Lüftungsanlage

Neben der richtigen Verkehrsschätzung ist die Kenntnis folgender Faktoren massgebend:

- Menge, Zusammensetzung und physiologische Wirkung der Auspuffgase,
- das erforderliche Verdünnungsverhältnis,
- Frischlufbedarf und Luftwechsel,
- die Art der Tunnellüftung,
- der den Lüftungsbedürfnissen am besten entsprechende Tunnel-Querschnitt.

Hinsichtlich Menge, Zusammensetzung und physiologischer Wirkung der Benzinauspuffgase von Autos wird auf die erwähnte Dissertation [1] und andere Veröffentlichungen des Verfassers [5], [6] verwiesen. Benzinauspuffgase bestehen hauptsächlich aus Sauerstoff (O), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Kohlensäure (CO₂), Methan (CH₄) und Kohlenmonoxyd (CO) und beruhen auf unvollständiger Verbrennung des Betriebsstoffs. CO₂, CH₄ und CO wirken je nach eingeatmeter Menge früher oder später gesundheitsschädlich und erzeugen Reizzustände im Kehlkopf, in den Augen, in schweren Fällen Kopfschmerzen, Erbrechen und Ohnmachtsanfälle. CO ist der gefährlichste Bestandteil, dessen Neutralisierung auch alle

Tabelle 1. CO-Anfall im Wagenburgtunnel auf Benzinbasis

	Geschwindigkeit	Steigung 5 ‰	Gefälle 5 ‰
	V km/h	CO l/min	CO l/min
PKW	15	43	10,80
	20	51,50	14,35
	5	35	15,20
	Anfahren	55,60	
LKW bis 2 t	15	40	12
	5	29	15
	Anfahren	32,70	
LKW 2 bis 5 t	15	74	34
	5	53,50	25
	Anfahren	60,50	
LKW über 5 t	15	90	45
	5	65	33
	Anfahren	40	

anderen Bestandteile der Auspuffgase unschädlich macht; seine tatsächliche Menge ist nur durch Messung festzustellen, da sie von verschiedenen Faktoren abhängt und sogar bei Autos gleichen Typs und gleicher Fabrikmarke schwankt. Für die Luftmengenberechnung des Wagenburgtunnels wurden die Angaben in [7] auf 5% Steigung und Gefälle für 5,15 und 20 km/h Geschwindigkeit auf die in Tabelle 1 angegebenen Grundwerte umgerechnet, wobei man bewusst nur auf 5% anstatt 5,4% Steigung ging, weil Dieselauspuff etwas weniger CO enthält als Benzinauspuff.

Bei einwandfrei arbeitenden Dieselmotoren enthalten die Abgase nur Spuren unverbrannter Kraftstoffe, da sie im Gegensatz zu Ottomotoren von Leerlauf bis Vollast mit Luftüberschuss arbeiten, weshalb hier Kraftstoffdämpfe ziemlich unberücksichtigt bleiben können. Die komplizierten Vorrichtungen für Kraftstoffförderung und -einspritzung im Dieselmotor führen jedoch häufiger zu Verbrennungsstörungen als beim Ottomotor. Die auf Veranlassung des Verfassers für den Wagenburgtunnel aufgestellten Analysen der Auspuffgase von Dieselmotorkraftfahrzeugen ergaben für vollständige und unvollständige Verbrennung die auf Tabelle 2 angegebenen Mittelwerte, wobei zur Definition schwerer, mittelschwerer und leichter Abgaseanteile die auf trockene Luft = 1 bezogene Dichte herangezogen wurde. Damit ist die äusserst wichtige Tatsache bewiesen, dass bei den Diesel-, wie übrigens bekanntlich auch bei den Benzinauspuffgasen der Autos der weit überwiegende Teil dieser Auspuffgase schon bei gleicher Temperatur leichter bis praktisch gleich schwer wie Luft ist. Infolge ihrer Temperatur sind sie aber wesentlich leichter als Luft, so dass eine intensive Strömung von unten nach oben besteht. Auch wenn diese Strömung durch den Fahrwind gestört wird, setzt sie sich wegen der höheren Temperatur der Auspuffgase trotzdem durch, und es ist daher zweckmässig, dem Luftstrom der künstlichen Lüftung die gleiche Richtung von unten nach oben zu geben.

Da bekanntlich die nur physiologisch bedingte zulässige CO-Konzentration von 0,4% keine ausreichenden Sichtverhältnisse im Tunnel gewährleistet, wurde zur Festsetzung der zwecks Sicherstellung guter Sicht betriebsmässig zulässigen CO-Konzentration im Wagenburgtunnel folgende Ueberlegung angestellt: Der Scheldetunnel Antwerpen wird bei 34,39 m² Verkehrsraumquerschnitt mit höchstens 0,15% CO, der Maas-tunnel Rotterdam bei 29,30 m² Verkehrsraumquerschnitt mit maximal 0,20% CO und der Mersey-Tunnel Liverpool bei 102,02 m² Verkehrsraumquerschnitt mit höchstens 0,25% CO betrieben, wobei im Schelde- und Mersey-Tunnel, sowie im St. Cloud-Tunnel, Paris, besondere «Sichtmesser» eingebaut sind [8]. Die Sichtverbesserung in Autotunneln erfordert besonders bei Dieselauspuffgasen so viel Frischluft, dass die rein physiologischen Gesichtspunkte eine weitrangige Rolle spielen. Der Lincoln-Tunnel New York wurde wegen schlechter Sicht nachträglich für Diesel-LKW gesperrt [8]. Die nachträgliche Verbesserung der Lüftung älterer Autotunnel zwecks Sichtverbesserung wurde notwendig, weil sich die Grundlagen der zur Festsetzung der physiologischen CO-Grenze benützten Versuche im Zuge der technischen Entwicklung bei Zusammensetzung und

Tabelle 2. Zusammensetzung von Auspuffgasen von Diesel-Kraftfahrzeugen

	Vollständige Verbrennung		Dichte Luft = 1
	Vol. %	Unvollständ. Vol. %	
Wasserdampf (H)	4 — 6 (4,65)	4,6	0,5941
Kohlenmonoxyd (CO)	0,1—0,2 (0,15)	1,25	0,9669
Methan (CH 4)	0,4	1,3	0,5545
Stickstoff (N)	77,0	74,95	0,9724
Sauerstoff (O)	10 —14 (12)	13,35	1,1053
Kohlendioxyd (CO 2)	4,3—7 (5,7)	4,20	1,5291
Schwefeldioxyd (SO 2)	0,05	0,05 +	2,3635
Schwere Kohlenwasserstoffe	0,05	0,04	rd. 3,890
Russ	—	rd. 0,26	rd. 4—6 (5)

Zusammengefasst:

Leichte und mittelschwere Gase	94,20	95,45	< 1
Schwergase	5,80	4,55	> 1

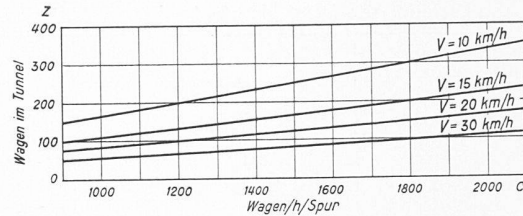


Bild 7. Tunnelfüllung bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten

Menge der Auspuffgase, Form der Fahrzeuge und der vom Verkehr erzeugten Luftströmung usw. geändert haben. Aus diesen Erkenntnissen liess sich für den Wagenburgtunnel durch Interpolation mit den Verkehrsraumquerschnitten und betriebsbedingten maximalen CO-Konzentrationen des Maas- und Merseytunnels die im Hinblick auf Sichtverhältnisse betriebsmässig zulässige CO-Konzentration bei 45 m² Verkehrsraumquerschnitt für Querlüftung auf $0,20 + 0,05 \cdot 15,7/72,72 = 0,21\%$ und auf $0,20 + 0,05 \cdot 32,47/72,72 = 0,22\%$ festsetzen, was jeweils für Maximalverkehr gilt. Für Dauerbetrieb gelten 0,068% bzw. 0,081% CO.

CO-Produktion und Frischluftbedarf hängen ab von Art und Anzahl der pro Stunde den Tunnel befahrenden Fahrzeuge und von den Steigungen, wobei der grösste Frischluftbedarf bei dicht aufgereihtem langsamem Verkehr entsteht. Das ist zum Beispiel beim Maas-Tunnel bei 10 km/h in der LKW-Spur und 30 km/h in der PKW-Spur der Fall. Dabei ist der Einfluss der Steigung auf die CO-Produktion des einzelnen Fahrzeugs beachtlich. Beim Wagenburgtunnel wurde zum Beispiel ermittelt, dass jedes einzelne durchfahrende Fahrzeug bei 5% Steigung 13% mehr CO erzeugt als bei einer Steigung von 3%. Das bedeutet, dass auch der Frischluftbedarf bei 5% Steigung und sonst gleichen Verhältnissen um 13% grösser ist als bei 3%. Die Bilder 5 und 7 zeigen für den Wagenburgtunnel den maximalen Stundenverkehr für ein und für zwei Richtungen, ferner die Tunnelfüllung z in Abhängigkeit von der mittleren Fahrgeschwindigkeit V in km/h und der Spurlast c in Wagen/Stunde/Spur. Für die angenommenen Fahrzeugstaffelungen erfolgte unter Benützung der Bilder 3 bis 7 bei Trennung in Aufwärts- und Abwärtsverkehr die Berechnung des Frischluftbedarfs beim Wagenburgtunnel für folgende fünf Fälle:

Tabelle 3. Rechnungsmässiger CO-Anfall in m³/s

Fall	Anzahl Röhren	Fahrgeschwindigkeit km/h	Bemerkung	CO-Anfall in m ³ /s	
				1955—1957	1958—1962
1	1 ¹⁾	10	Steigende Spur	0,0564	0,0739
			Fallende Spur	0,0210	0,0289
			Summe	0,0774	0,1028
			Summe LKW	0,0297	0,0533
2	1 ¹⁾	15	Steigende Spur	0,0430	0,0680
			Fallende Spur	0,0132	0,0220
			Summe	0,0562	0,0900
			Summe LKW	0,0230	0,0487
3	2 ²⁾	LKW: 15 PKW: 20	Steigende Röhre	0,1197	0,1326
			Fallende Röhre	0,0415	0,0439
			Summe	0,1612	0,1765
			Summe LKW	0,0997	0,0860
4	2 ²⁾	LKW: 10 PKW: 20	Steigende Röhre	0,1412	0,1350
			Fallende Röhre	0,0535	0,0465
			Summe	0,1947	0,1815
			Summe LKW	0,1332	0,0915
5	2 ²⁾	KOM: 20 PKW: 30	Steigende Röhre	0,1183	0,1330
			Fallende Röhre	0,0397	0,0447
			Summe	0,1580	0,1777
			Summe KOM	0,1087	0,1070

1) Zwei Verkehrsrichtungen.

2) In jeder Röhre eine Verkehrsrichtung mit je 2 Spuren.

Tabelle 4. Frischluftbedarf bei den betrachteten Lüftungsarten in m³/s

Fall	Anzahl Röhren	Fahr-geschwin-digkeit km/h	Bemerkung	Querlüftung 0,21 % CO		Querlüftung 0,4 % CO		Halbquerlüftung 0,22 % CO	
				1955—1957	1958—1962	1955—1957	1958—1962	1955—1957	1958—1962
1	1	10	↑ Steigende Spur	269,0	352,0	141,0	184,8	256,5	336,0
			○ Fallende Spur	100,0	137,4	52,5	72,3	95,5	131,5
			↓ Summe	369,0	489,4	193,5	257,1	352,0	467,5
2	1	15	↑ Steigende Spur	205,0	324,0	107,5	170,0	195,5	309,0
			○ Fallende Spur	62,9	104,8	33,1	55,0	60,0	100,0
			↓ Summe	267,9	428,8	140,6	225,0	255,5	409,0
3	2	LKW: 15 PKW: 20	↑ Steigende Röhre	1963—1967 570,0	1968—1972 631,0	1963—1967 299,0	1968—1972 332,0	1963—1967 544,0	1968—1972 602,5
			○ Fallende Röhre	198,0	209,0	104,0	109,8	189,0	199,5
			↓ Summe	768,0	840,0	403,0	441,8	733,0	802,0
4	2	LKW: 10 PKW: 20	↑ Steigende Röhre	673,0	643,0	353,0	341,0	642,5	614,0
			○ Fallende Röhre	255,0	221,5	134,0	116,2	243,0	211,5
			↓ Summe	928,0	864,5	487,0	457,2	885,5	825,5
5	2	KOM: 20 PKW: 30	↑ Steigende Röhre	564,0	633,0	296,0	337,5	539,0	605,0
			○ Fallende Röhre	189,0	213,0	99,0	112,0	180,5	203,5
			↓ Summe	753,0	846,0	395,0	449,5	719,5	808,5

- Eine in beiden Richtungen befahrene Röhre mit $V = 10$ km/h (Langsamverkehr)
 - für den Zeitraum 1955—1957 ohne Wangen;
 - für den Zeitraum 1958—1962 mit Wangen, wobei der Zeitraum 1963—1979 wegen Ueberschreitung der Leistungsfähigkeit des Tunnels ausser Betracht bleibt.
- Eine Röhre wie unter 1 mit $V = 15$ km/h, sonst a) und b) wie vor (Normalverkehr).
- Zwei im Richtungsbetrieb mit $V = 15$ km/h in der LKW-Spur und $V = 20$ km/h in der PKW-Spur befahrene Röhren (Normalverkehr)
 - für 1963—1967 und b) für 1968—1972 je mit Hafem Wangen, wobei für 1973—1979 eine sinngemässe Bemerkung wegen Ueberschreitung der Leistungsfähigkeit des Tunnels wie bei Fall 1 gilt.
- Zwei Röhren wie unter 3., jedoch mit $V = 10$ km/h in der LKW-Spur und $V = 20$ km/h in der PKW-Spur, sonst a) und b) wie unter 3a, b (Langsamverkehr), für 1973—1979 wie bei Fall 3.
- Zwei Röhren wie unter 4. bei internationalen Sportfesten mit $V = 20$ km/h in der KOM-Spur und $V = 30$ km/h in der PKW-Spur, sonst a) und b) wie 3a, b, für 1973—1979 wie Fall 3 (Sportfestverkehr).

Dabei ist:

$$(12) \quad \text{der CO-Anfall:} \quad CO = \frac{1}{6} \cdot 0,0001 Q' \cdot z \text{ m}^3/\text{s}$$

$$(13) \quad \text{der Frischluftbedarf:} \quad Q = CO \cdot 1000/f \\ = 0,01667 Q' \cdot z/f \text{ m}^3/\text{s}$$

$$(14) \quad \text{der stündl. Luftwechsel:} \quad n = \frac{3,6 Q}{L F} \text{ fach}$$

Beim Wagenburgtunnel ist bei Querlüftung $F = 45$ m²; $n =$ rund 0,096 Q fach/h und bei Halbquerlüftung $F = 61,77$ m² und $n =$ rund 0,070 Q fach/h, wenn $f = 0,21$ % bzw. 0,22 % ist. Die Tabellen 3 und 4 zeigen den CO-Anfall, den Frischluftbedarf bei Halbquerlüftung mit 0,22 % CO und bei Querlüftung mit 0,21 % CO, sowie mit der physiologischen Grenze von 0,4 % CO für den Wagenburgtunnel. Grösster Luftbedarf entsteht bei Langsamverkehr, für den die Lüftungsanlage bemessen wurde, wobei für Bedarfsspitzen des Normalverkehrs von selbst ausreichende Reserven entstehen. Gute Sicht im Tunnel ist durch die Festsetzung der zulässigen CO-Konzentration auf 0,21 % bzw. 0,22 % für Maximalverkehr und von 0,068 % bzw. 0,081 % bei Dauerbetrieb gewährleistet. Wegen etwas geringerer CO-Produktion der Diesel-LKW im Vergleich zur Benzinbasis entsteht eine kleine zusätzliche Luftreserve zu Gunsten der Sichtverbesserung, die umso erwünschter ist, als die tatsächliche Tunnelsteigung von 5,4 % um 0,4 % grösser ist als den verwendeten CO-Zahlen entspricht. Insofern bieten die für LKW bekannten CO-Zahlen der Benzinbasis einen brauchbaren Hilfsmasstab für die Berechnung des Frischluftbedarfs.

Schluss folgt

Vereinfachtes Verfahren zur Bestimmung des Tageslicht-Faktors

Von Dipl. Arch. E. WUHRMANN, S. I. A., Zürich

DK 628.921

Nach der in der Sitzung der Internationalen Beleuchtungs-Kommission im Jahre 1939 vorgeschlagenen, heute noch gültigen Definition versteht man unter dem Tageslichtfaktor in einem Punkte einer waagrecht und geneigten Arbeitsfläche im Innern eines Gebäudes das Verhältnis der in diesem Punkte gemessenen Beleuchtungsstärke zu der gleichzeitig bei bedecktem Himmel herrschenden Horizontal-Beleuchtungsstärke im Freien, die durch eine vollständige Himmels-halb-kugel mit einer über ihre ganze Fläche gleichmässig ver- teilten Leuchtdichte bewirkt wird.

Im Bericht der genannten Sitzung wurde darauf hingewiesen, dass die Messung des Tageslichtfaktors auf eine Schwierigkeit stösst insofern, als die Voraussetzung eines Himmelsgewölbes von überall gleichmässiger Leuchtdichte praktisch selten mit genügender Genauigkeit zutreffen dürfte. Es wurde ferner darin bemerkt, dass diese Unsicherheit dadurch vermindert werden kann, dass man eine gleichmässig leuchtende Himmels-halb-kugel von jener Leuchtdichte an-

nimmt, die der mittleren Leuchtdichte des Himmelsabschnittes gleichkommt, der die Beleuchtung der zu messenden Stelle im Innenraum bewirkt.

Eine Hauptschwierigkeit, die in dem genannten Bericht und auch seither nicht erwähnt wurde, liegt aber darin, dass es in der Regel praktisch unmöglich ist, die Beleuchtungsstärke unter freier Himmels-halb-kugel unmittelbar zu messen, da derartige Untersuchungen meist bei ungünstigen äusseren Bedingungen, d. h. an kleinen Plätzen, Strassen oder Höfen vorgenommen werden, die nur einen mehr oder weniger kleinen Bruchteil der Himmels-halb-kugel für Messungen offen lassen. In diesem Falle genügt also auch die gleichzeitige Ablesung zweier Photozellen in- und ausserhalb des Gebäudes nicht zur Bestimmung des Tageslichtfaktors, sondern es müsste erst die äussere Ablesung nochmals mit einer solchen unter wirklich freiem Himmelsgewölbe, etwa von einem Hausdach aus, sofern dessen Sicht nicht auch durch benachbarte Gebäude oder andere Hindernisse eingengt ist, verglichen wer-