Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 113/114 (1939)
Heft: 1

Artikel: Zum Problem der Autostrassentunnel
Autor: Andreae, C.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-50530

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: 29.12.2025

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

INHALT: Zum Problem der Autostrassentunnel. — Die Erneuerung des Zürcher Rathauses. — Physikalische Grundlagen und Anwendungen der Wärmepumpe. — Mitteilungen: Trolleybus Winterthur-Wülflingen. Die Leistungen der SBB zur Landesausstellung. Internationale Tagung für Dokumentation 1939 in Zürich. Verkaufsautomat für Stadtpläne mit individuellem Wegaufdruck. Eine hölzerne Bogenbrücke von 85 m Spannweite. Schweiz. Wasserwirtschaftsverband. Schweiz. Verein von Gas- und Wasserfachmännern. Schweiz. Elektrotechnischer Verein. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine.

Band 114 Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich
Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet Nr. 1

Zum Problem der Autostrassentunnel

Von Prof. Dr. C. ANDREAE, Zollikon bei Zürich [1])

Angesichts der zahlreichen Projekte für Autostrassentunnel, die in den letzten Jahren in der Schweiz aufgetaucht sind, und zu denen immer wieder neue hinzukommen, sah sich im Sommer 1938 das Eidg. Oberbauinspektorat veranlasst, eine technische Experten-Kommission, bestehend aus den Ingenieuren Rothpletz & Lienhard in Aarau, Dr. C. Andreae, ehem. Professor an der E. T. H. in Zollikon, und Ch. Rochat, ehem. Strassenbahndirektor in Genf, mit der Abklärung der mit der Planung solcher Tunnel in den Alpen zusammenhängenden technischen Probleme sowie der Bau- und Betriebskosten zu beauftragen. Da die Frage der Alpendurchstiche für den Motorwagenverkehr in der Schweiz nunmehr aktuell geworden ist und heute allgemeinem Interesse begegnet, seien im Folgenden, im Einverständnis mit dem Eidg. Oberbauinspektorat und den andern Experten, die wichtigsten Punkte aus dem umfangreichen, von zahlreichen Beilagen begleiteten Gutachten in kurzem Auszug wiedergegeben.

Aufgaben der Experten-Kommission: Nach dem vom Eidg. Oberbauinspektorat aufgestellten Programm sollte ein allgemeines Gutachten erstattet werden, das ohne Bezugnahme auf ein bestimmtes Projekt die grundsätzlichen Hauptfragen der Erstellung von Alpenstrassentunneln für Autoverkehr abklären sollte. Im besondern wurde behufs Ermöglichung eines generellen Kostenvergleiches die Gegenüberstellung von künstlich belüfteten Tunneln und solchen mit mechanischem oder elektrischem Schleppdienst verlangt. Mit Rücksicht darauf, dass grössere Tunnellängen gegenwärtig kaum in Frage kommen können, waren die Untersuchungen auf Längen von 2000 bis 6000 m zu beschränken. Immerhin war aber die Untersuchung verschiedener Längen mit Rücksicht auf die Abgrenzungen der Bereiche erwünscht, in denen der eine oder andere Tunneltypus sich als vorteilhafter erweist. Dabei wurde ein Verkehr bis zu 300 schweren Lastwagen pro Stunde in *einer* Fahrrichtung oder je die Hälfte dieser Zahl in beiden Fahrrichtungen als Maximalforderung aufgestellt, wobei sowohl Benzin-, wie auch Diesel- und Holzgasmotoren in Betracht zu ziehen waren. Vorgeschrieben waren zwei seitliche Fussgängerstreifen von je 1,00 m Breite und für die belüfteten Tunnel für freie Durchfahrt ausserdem eine Strassenfahrbahnbreite von 6,50 m und eine freie Lichthöhe auf dieser Breite von 4,20 m.

Modell- oder andere Versuche sollten vorläufig nicht durchgeführt werden. Es sei aber gleich bemerkt, dass die Planung von Autotunneln für freie Durchfahrt in den Alpen, besonders wenn es sich um solche von grosser Länge, d. h. 4, 6 oder mehr km handelt, auf eine ganze Anzahl von Problemen stösst, mit denen sich die Ersteller der bestehenden Autotunnel im Tiefland nicht zu befassen hatten, und zu deren zuverlässigen Abklärung neue, eigene Versuche notwendig sein werden. Es ist im Berichte der Kommission besonders darauf hingewiesen worden.

Tunnel für mechanische oder elektrische Beförderung der Motorfahrzeuge

Die Experten-Kommission hat verschiedene Möglichkeiten der mechanischen oder elektrischen Wagenbeförderung untersucht, wie die Förderung eines, aus zusammengekuppelten Motorwagen bestehenden Wagenzuges durch einen elektrischen Traktor (Elektrobus), die Förderung durch ein endloses Drahtseil usw. Ernsthaft in Betracht kommt aber nur das Verladen auf Rollschemel, die auf Schienen fahren und elektrisch durch den Tunnel befördert werden. Dabei kann jeder Rollschemel selber als Traktor ausgebildet sein, der einzeln mit 1 bis 4 Wagen beladen durch den Tunnel fährt [2]), oder man kann leichte Traktoren bauen und an diese 1 bis 2 mit mehreren Motorwagen beladene Rollschemel anhängen, oder schliesslich auch schwere Züge mit schweren Lokomotiven bilden, je nach den Verkehrsanforderungen. Für einen Verkehr von einiger Bedeutung, besonders für einen solchen, wie in der Aufgabe vorgeschrieben, kommt nur eine doppelspurige Anlage in Betracht. Das zeigt sich ohne weiteres sobald man versucht, einen Fahrplan aufzustellen. Bei näherer Prüfung zeigt sich auch, dass bei gleichen Geleiseanlagen die Leistungsfähigkeit mit der Zahl der mit einer Zugseinheit beförderten Wagen steigt, während sie fällt, wenn diese Zahl vermindert wird; denn die Zugszahl kann bei gegebenen Geleiseanlagen nicht beliebig vermehrt werden. Ein Verkehr, wie ihn die Aufgabe vorsieht, kann nur mit schweren Zügen mit schweren Lokomotiven bewältigt werden. Mit Geleiseanlagen, wie sie in Abb. 1 vorgesehen sind, können gleichzeitig zwei Rollschemelzüge verladen und am andern Ende ebenfalls zwei ausgeladen werden. Nimmt man für das Ein- und Ausladen eines vollbesetzten Zuges von 7 Rollschemeln, die zusammen 21 schwere Lastwagen zu 13 t Bruttogewicht aufnehmen können und für das Umstellen der Lokomotiven etwa 8 min an, so können dafür die Fahrpläne 1 bis 3 (Abb. 2) aufgestellt werden. Die Länge eines solchen Zuges mit Einschluss der Lokomotive wird dabei etwa 190 m betragen, sein Gewicht etwa 525 t. Die Lokomotive allein wird dabei bei einer Tunnelneigung von 5 ‰ etwa 90 t wiegen. Aus den Fahrplänen geht hervor, dass ohne Vermehrung der Stationsgeleise bei einem Tunnel von 6 km Länge 6, bei einem solchen von 4 km 5 und bei einer Tunnellänge von 2 km 4 Rollschemelzüge eingesetzt werden können. Damit können bei allen drei Tunnellängen ungefähr 200 voll belastete, schwere Lastwagen pro Stunde befördert werden. Diese Leistung erfordert einen elektrischen Ausbau für Zugsförderung, Beleuchtung und Werkstätte usw. von etwa 7500 kW, in Hochspannung gemessen am Tunnelportal. Die Fahrgeschwindigkeit ist zu 60 km/h angenommen. Bei einer Tunnelneigung von 30 ‰ müsste die Fahrgeschwindigkeit auf der Bergfahrt vermindert werden, wodurch auch die stündliche Leistung sofort entsprechend sinken müsste.

Die Leistungsfähigkeit kann wohl durch Erweiterung der Stationsgeleise erhöht werden. Der Bau ausgedehnter Anlagen im Gebirge stösst aber in der Regel auf Schwierigkeiten und verursacht grosse Kosten. Mit Rücksicht auf die Räumungsarbeiten im Winter sowie auf die Fliegergefahr sollte zudem ein möglichst grosser Teil der Anlagen in den Tunnel selbst verlegt werden. Für die Aufbewahrung des Rollmaterials sind unterirdische Schuppen, also eigentliche Tunnelstumpen mit allen für die Reinigung und den Unterhalt nötigen Einrichtungen nötig (Abb. 1), deren Kosten sehr hoch sind. Wenn auch Fussgängerverkehr zugelassen wird, ist eine Beleuchtung erforderlich, die allerdings einfacher gehalten werden kann als bei Tunneln für freie Durchfahrt.

Wie sich aus den spätern Ausführungen ergibt, ist die Leistungsfähigkeit eines Tunnels mit elektrischer Förderung kleiner als die eines Tunnels für freie Durchfahrt, die innerhalb gewisser

[1]) Auszug aus dem im Auftrage des Eidg. Oberbauinspektorates ausgearbeiteten Gutachten Rothpletz & Lienhard, C. Andreae und Ch. Rochat. — Die im Text in [ ] gesetzten Zahlen verweisen auf das Literaturverzeichnis am Schluss.

[2]) Vgl. «SBZ» Bd. 108, Nr. 10, S. 111* (Vorschlag BBC).

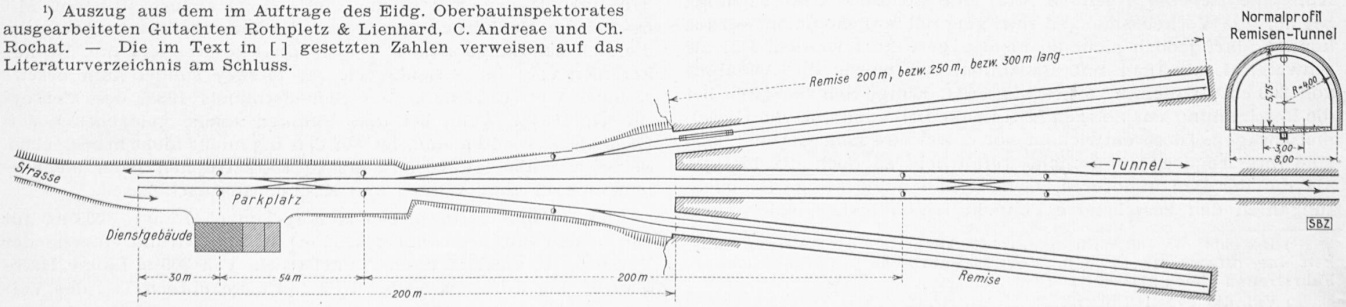


Abb. 1. Schema (1 : 2500) einer Stationsanlage eines Autostrassentunnels für elektrische Beförderung der Motorfahrzeuge auf Eisenbahnzügen

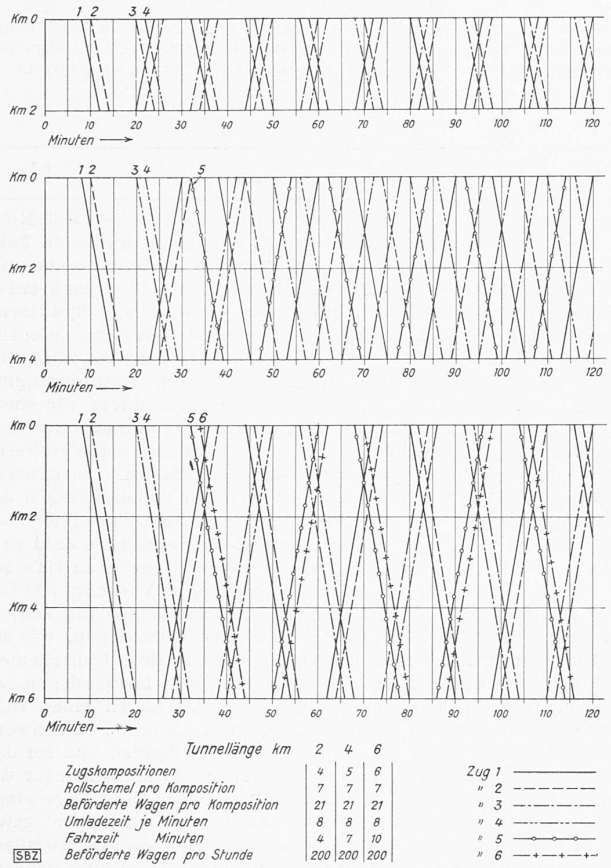


Abb. 2. Fahrpläne für schwere Militärtransporte mit mechanischer Förderung auf Geleisen bei $v = 60$ km/h

Grenzen nur vom Ausbau der Lüftungsanlage abhängt[3]). Sie sind auch — wenigstens für die betrachteten Längen — in Bau und Betrieb teurer.

Tunnel für freie Durchfahrt

1. Lüftungsbedarf. Der Verfasser hat in der «SBZ» (Bd. 111, Nr. 18) schon eingehend hierüber berichtet [16]. Die Mitarbeit am Berichte der Kommission veranlasste ihn jedoch, seine damaligen Ausführungen zu ergänzen und in einigen Punkten auch davon abzuweichen. Es erscheint daher angezeigt, hier auf die Frage der Tunnellüftung nochmals zurückzukommen.

Vor allem erscheint die damals als zulässig angenommene CO-Konzentration von 0,5 Vol ‰ als zu hoch. Im New Yorker «Hollandtunnel», sowie auch im Scheldetunnel (Antwerpen) wurde die maximale, zulässige CO-Konzentration zu 0,4 Vol. ‰ angenommen. Die dortigen Erfahrungen zeigten aber, dass schon bei einer Konzentration von 0,25 ‰ die Sicht beginnt mangelhaft zu werden. In neuern Tunneln in Kalifornien wurde deshalb die zulässige CO-Konzentration auf 0,25 ‰ festgesetzt [29]. Auch im Merseytunnel (Liverpool) wurde sie so angenommen, mit Rücksicht auf das Personal, das längere Zeit im Tunnel beschäftigt ist [22]. Die Kommission schlägt daher in ihrem Bericht ebenfalls eine CO-Konzentration von 0,25 Vol ‰ als maximal zulässig vor. Für Benzinmotoren nimmt die Kommission bei gemischtem Verkehr (d. h. bei einem Verkehr, der sowohl aus Last- wie aus Personenwagen besteht), eine CO-Menge im Auspuff von im Mittel 150 cm³ pro Wagen und m Fahrbahn an. Diese Annahme ist eher reichlich; für eine generelle Untersuchung, bei der die Verkehrsmengen nur generell angenommen werden können, darf jedoch nicht zu niedrig gerechnet werden. Für die schweren Lastwagen mit Benzinmotoren wurde die Annahme von 200 cm³/Wagen/m vorgeschlagen[4]). Einige Schwierigkeit bot die Bestimmung der nötigen Luftmenge bei Annahme von Dieselmotorwagen. Diese entwickeln normalerweise kein CO und doch sind ihre Abgase, wenn nicht gefährlich, so doch oft lästiger als die der Benzinmotoren. Genaue und zuverlässige Beobachtungen in den bestehenden Tunneln fehlen bisher leider, doch führen die Erfahrungen im Scheldetunnel, wo etwa 30 % des Verkehrs aus Dieselwagen besteht, vorläufig dazu, zu der für Benzinmotoren nach der Formel $Q = \frac{n\,a}{3{,}6\,b}$ m³/s/m berechneten Luftmenge einen Zuschlag von etwa 10 % zu machen (n = Anzahl Wagen pro Stunde, a = pro Wagen und m Fahrbahnlänge entwickelte Menge CO in m³, b = zulässige Konzentration in Vol ‰). Daraus ergibt sich für die in der Aufgabe angegebene maximale Verkehrsgrösse von 300 schweren Diesellastwagen eine benötigte Frischluftmenge von 0,073 m³/s/m Fahrbahn. Was die Verwendung von Holzgasmotoren anbelangt, sind dabei nach den von der E. M. P. A. (Prof. Dr. P. Schläpfer) durchgeführten Versuchen die Verhältnisse eher günstiger als bei Benzin; es braucht daher darauf nicht besonders Rücksicht genommen zu werden.

Sämtliche Berechnungen des Gutachtens beruhen auf einer Ausbaugrösse der Lüftungsanlagen für eine Frischluft- bzw. Abluftmenge von 73 m³/s/km Tunnellänge. Diese Zahl setzt voraus, dass sich der Verkehr von 300 Wagen/h annähernd gleichmässig verteile, d. h. dass ungefähr alle 12 s ein Wagen einfahre. Wenn die Wagen aufgeschlossen oder in aufgeschlossenen Gruppen durchfahren, wird während der Durchfahrt die CO-Konzentration innerhalb der Gruppen einen höhern Wert erreichen. Wenn sich z. B. die Wagen, mit einer mittlern Geschwindigkeit von 20 bis 25 km/h fahrend (6,25 m/s), in Abständen von 40 m von Wagenspitze zu Wagenspitze folgen, so wird bei dieser Luftmenge die CO-Konzentration auf 0,44 Vol ‰ ansteigen. Um auch in diesem Falle die Konzentration auf höchstens 0,25 ‰ ansteigen zu lassen, müsste eine Luftmenge von $\frac{73 \cdot 0{,}44}{0{,}25} = 128$ m³/s/km eingeführt werden. Von dieser Erhöhung der Luftmenge kann jedoch abgesehen werden, denn das wird ein so seltener Fall sein, dass es nicht gerechtfertigt erscheint, den Ausbau darauf abzustellen. Zudem bildet eine ganz ausnahmsweise Konzentration von 0,44 ‰ auf kurze Dauer noch keine Gefahr.

Wenn angenommen wird, dass bei grosser Verkehrsdichte in einer Richtung gleichzeitig auch Wagen in der Gegenrichtung verkehren, so sind diese für die Berechnung der Lüftung der stündlichen Wagenzahl zuzuzählen. Liegt der Tunnel in einseitiger Neigung von mehreren %, kann für die abwärts fahrenden Wagen etwa die Hälfte oder $^1/_3$ der für die aufwärts fahrenden Wagen angenommenen CO-Menge eingesetzt werden [22, 24].

*

2. Natürliche Belüftung. Bei kurzen Tunneln genügt der natürliche Luftzug für die Lüftung. Die Grenze, bis zu der dies der Fall ist, lässt sich nicht allgemein angeben. Sie hängt ab vom Verkehr, vom lichten Querschnitt des Tunnels, von den vorherrschenden meteorologischen Verhältnissen, von der Tunnelverkleidung, von Lage, Neigung und Richtung des Tunnels. In Kalifornien mussten Gebirgstunnel von nur 960 m Länge mit starkem Verkehr sehr intensive, künstliche Lüftung erhalten [29], während der etwa 3 km lange Tenda-Tunnel in Oberitalien nur natürlich belüftet ist. Bei diesem liegen aber besondere Verhältnisse vor; er hat fast genaue Süd-Nord-Richtung, das Nordportal liegt höher als das Südportal, und er liegt im Strich der vom Mittelmeer gegen die Alpen ansteigenden Winde; auch ist der Verkehr nicht sehr gross. Uebrigens sollen die Verhältnisse darin zeitweise nicht einwandfrei sein. Im allgemeinen dürfte die Grenze bei Durchschnittsverhältnissen etwa bei 1000 oder 1200 m liegen.

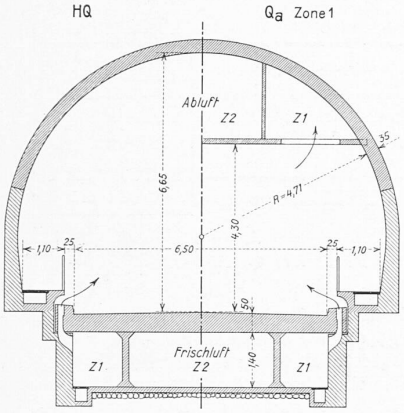
3. Systeme der künstlichen Lüftung. a) Längslüftung (künstlicher Luftzug in der Längsrichtung des Tunnels, erzeugt durch Einblasen von Frischluft oder Absaugen der Abluft durch einen Schacht): Die Kommission hat die Längslüftung mit Entschiedenheit als gefährlich und ungenügend abgelehnt. Zu den bereits früher erwähnten Gründen hierfür[5]) wurde auch auf die Erfahrungen im Hauensteinbasistunnel hingewiesen, wo bei Lüftung durch einen Schacht der erzeugte Luftzug meistens nur durch den einen Tunnelast geht und die Luft im andern stillsteht. Mit besonderm Nachdruck wurde auf die Brandgefahr hingewiesen, die sich bei Längslüftung katastrophal auswirken kann. Brände kommen vor; im Schelde- wie im Mersey-Tunnel kam bereits je einer vor (Eröffnung des Scheldetunnels 1933, des Merseytunnels 1934). Auch bei uns kommen solche gelegentlich vor. Dass sie nur selten sind, ist für den Ingenieur nicht massgebend. Seine Aufgabe ist, voraussehbare Katastrophen nach menschlichem Ermessen, Wissen und Können auszuschliessen.

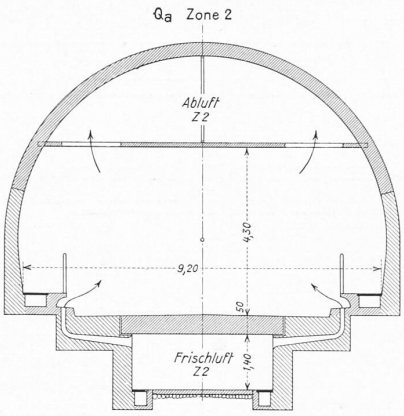
b) Halbquerlüftung. Der Mersey-Tunnel (Länge 3239 m, mit den beiden Zufahrtstunneln 4203 m) hat auf Grund eingehender Versuche in einer fertigen Tunnelstrecke von 300 m Länge Halbquerlüftung erhalten, wobei Frischluft im untern Teil des Ver-

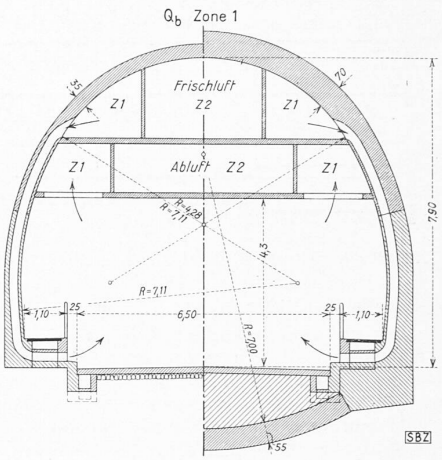
[3]) Bei entsprechender Lüftungsanlage könnte sie der Leistungsfähigkeit einer offenen Strasse, d. h. etwa 1000 Fahrzeuge pro Stunde und pro Fahrstreifen gleich gemacht werden.

[4]) Vgl. die Tabellen in «SBZ»: Bd. 111, Nr. 18, S. 225. Diese Annahmen beziehen sich nur auf horizontale oder schwach geneigte Tunnel.

[5]) Vgl. «SBZ» Bd. 111, Nr. 18, S. 227 [16].







Normalprofile für freie Durchfahrt mit künstlicher Lüftung. Masstab 1 : 175

Abb. 3. Halbquer- und Querlüftung

Abb. 4. Querlüftung in Zone 2

Abb. 5. Querlüftung in Zone 1 (alle Kanäle oben)

kehrsraumes eingeblasen wird, während die Abluft durch diesen Raum selbst streicht, bis sie einen der, in gewissen Abständen angelegten Lüftungsschächte erreicht, durch den sie ins Freie abgesaugt wird. Die grösste Entfernung zweier Lüftungs- bzw. Entlüftungsstationen beträgt dort 1360 m, wobei jede der Stationen auf je die Hälfte dieser Länge, also auf 680 m arbeitet. Der Haupttunnel hat einen lichten Querschnitt von 70 m² über der Fahrbahn, die vier Fahrstreifen hat, je zwei für jede Richtung, und einen Verkehr bis zu 4000 Wagen/h ermöglicht. Der Weg der Abluft ist also hier der selbe wie bei der Längslüftung. Grosser Verkehr und grosse Längen mit grossen Luftmengen erfordern auch hier grosse Querschnitte. Die barometrischen Druckunterschiede, die bei Wasserscheidetunneln grösser sein werden als bei städtischen Unterwassertunneln, die unregelmässigen Winde usw. werden auf die Bewegung der Abluft auch ihren Einfluss ausüben, ebenso der Verkehr selbst. Bei einem Wagenbrand werden Rauch und giftige Gase auch auf längerer Strecke durch den Verkehrsraum streichen. Die daraus entstehenden Gefahren sind aber ganz erheblich vermindert dadurch, dass auf der ganzen Länge frische Luft von unten eingeblasen wird, die nicht durch Strömungsstauungen behindert ist, und die bei einem Brande nicht wie bei der Längslüftung durch die Brandstätte strömen muss, um die leewärts befindlichen Teile zu belüften. Das ist eine grundsätzlich andere Situation. Die Halbquerlüftung ist daher der Längslüftung weit überlegen. Im Mersey-Tunnel funktioniert sie in durchaus befriedigender Weise; einzig die vielen, dort verkehrenden Dampftraktoren mit Kohlefeuerung erzeugen gelegentlich so viel Rauch, dass die Sicht vorübergehend schlecht wird und etwas stärker gelüftet werden muss. Solche Fahrzeuge verkehren aber bei uns nicht. Die warmen Auspuffgase und der Rauch steigen sofort gegen die Tunnelfirst und streichen dieser entlang bis zum nächsten Abzugsschacht. Die beiden Zufahrtstunnel haben nur zwei Fahrstreifen; ihr lichter Querschnitt ist 41 m². Sie funktionieren sehr gut, sind allerdings kurz.

Es hat sich im Mersey-Tunnel gezeigt, dass eine *Luftgeschwindigkeit im Tunnel* von 3 m/s auch für das Personal keine Nachteile hat. Für die kurze Zeit eines Verkehrs von 300 Lastwagen pro Stunde in Alpenstrassentunneln, der 73 m³ Frischluft pro s/km verlangt, könnte sie ohne Schaden vorübergehend auf 4 m/s ansteigen. Die Länge, die von einer Belüftungs-, bzw. Entlüftungsstation aus bedient werden kann, ist einerseits durch die höchste, zulässige Luftgeschwindigkeit im Tunnel von 3 bis höchstens 4 m, anderseits durch die Kosten grosser Tunnelquerschnitte beschränkt, sobald grosse Luftmengen in Betracht kommen (für die hier angenommenen Luftmengen genügen normale Tunnelquerschnitte). Wo aber die wirtschaftliche Berechnung ergibt, dass die Halbquerlüftung der vollkommeneren Querlüftung gegenüber in Bau und Betrieb eine wesentliche Ersparnis darstellt, kann sie angewendet werden[6]) (Abb. 3).

Auch hier kann das Absaugen nicht am Portal erfolgen, da statt der Abluft aus dem Tunnel Frischluft durch das Portal abgesaugt würde. Bei längern Tunneln sind hierfür Schächte im Innern notwendig, in der Regel einer mehr als bei Querlüftung. Bei tiefliegenden Tunneln kann dies unter Umständen die Kosten zu Ungunsten der Halbquerlüftung erhöhen. Bei kurzen Tunneln, etwa bis 2000 m oder wenig darüber, könnte übrigens von der Absaugung durch einen Schacht abgesehen werden. Der Ueberdruck, den die zuströmende Frischluft im Verkehrsraum erzeugt, muss die Abluft zwingen auszuströmen; auf welcher Seite sie ausströmen wird, werden die jeweiligen meteorologischen Verhältnisse bestimmen. Falls die ganze Abluft nach einer Seite hin ausströmen sollte, würde selbst bei einem lichten Querschnitt von nur 40 m² bei maximaler Lüftung mit 73 m³/s/km die Luftgeschwindigkeit nur auf 3,65 m/s ansteigen. Im Mersey-Tunnel ist jeweilen unter der Mündung der Saugschächte in der Tunnelfirst auf etwa 20 m Länge symmetrisch zur Schachtaxe eine Decke mit Schlitzen — ähnlich wie die Decke der Querlüftung — angebracht, um die Zugwirkung, die sich sonst unter den Saugschächten unangenehm fühlbar macht, zu beseitigen.

c) Querlüftung. Die Querlüftung, bei der auf der ganzen Länge Frischluft aus besondern Luftkanälen an den Verkehrsraum abgegeben und die Abluft aus diesem abgesaugt wird, ist das vollkommenste bis jetzt zur Anwendung gekommene Be- und Entlüftungssystem. Sie ist in der «SBZ» schon wiederholt beschrieben worden, sodass sich deren Darstellung erübrigt [14, 16] (Abb. 4 und 5).

Zur Richtung der Querlüftung ist folgendes zu sagen: In allen bisher mit Querlüftung gebauten Tunneln wird die Frischluft im untern Tunnelteil — meistens wenig über der Fahrbahn — eingeblasen, und die verdorbene Luft oben an der Decke abgesaugt. Diese Anordnung wurde zuerst im Hollandtunnel auf Grund der bei der Planung und beim Bau durchgeführten Versuche gewählt [24, 25]. Bei allen später gebauten Tunneln in Amerika und beim Scheldetunnel wurde diesem Beispiel gefolgt [19]. Auch der im Bau befindliche Maastunnel in Rotterdam erhält Querlüftung von unten nach oben[7]). Für den Titlistunnel wurde vorgeschlagen, um eine bessere Luftmischung bei sparsamer Belüftung zu erzielen, die Richtung der Lüftung umzukehren [17]. Die Frage ist berechtigt, ob nicht Rauch und Abgase auf kürzerem Wege als bisher aus dem Tunnel entfernt werden könnten; die bisherigen Erfahrungen aber sprechen gegen eine solche Umkehrung. In den im Literaturverzeichnis unter Nr. 24 und 25 genannten Veröffentlichungen ist erwähnt, dass bei den Versuchen für den Hollandtunnel ebenfalls solche mit Querlüftung von oben nach unten durchgeführt wurden. Diese zeigten, dass zwar beide Richtungen der Querlüftung möglich sind, die Lüftung von unten nach oben jedoch günstiger ist und namentlich für den Fall eines Brandes grössere Sicherheit gewährt. Dr. O. H. Ammann in New York, dessen Amt die dortigen Tunnel unterstehen, bestätigt in einem Schreiben, es sei bei den Versuchen beobachtet worden, dass bei Querlüftung von unten nach oben der Rauch rasch zur Decke stieg und dort allmählich durch die dortigen Absaugöffnungen verschwand, während bei Lüftung von oben nach unten der warme Rauch ebenfalls zuerst rasch gegen die Decke stieg, dort zersetzt wurde und dann erst wieder nach unten kam, den Verkehrsraum also zweimal durchquerte. Lüftung von oben nach unten brauche auch mehr Luft und daher auch grössere mechanische Leistung. In Antwerpen (Scheldetunnel)

[6]) Diese, von der in der «SBZ» Bd. 111, Nr. 18, S. 227 geäusserten Ansicht abweichende Stellungnahme ist das Ergebnis einer gründlichen Besichtigung des Mersey-Tunnels und eingehender Besprechungen mit dem Erbauer des Tunnels, D. Anderson, auf dessen Veröffentlichung bereits hingewiesen wurde, sowie mit Prof. Dr. Douglas Hay (Sheffield), der die Lüftung entwarf, die Versuche durchführte und seither die Lüftung kontrolliert und deren Ergebnisse verarbeitet, sowie mit Mr. Herbert Hamer, Stadtingenieur von Liverpool und den Betriebsingenieuren, die sich speziell mit dem Tunnel befassen. Der Verfasser.

[7]) Vgl. E. Schnitter in Bd. 113, S. 145, Abb. 3.

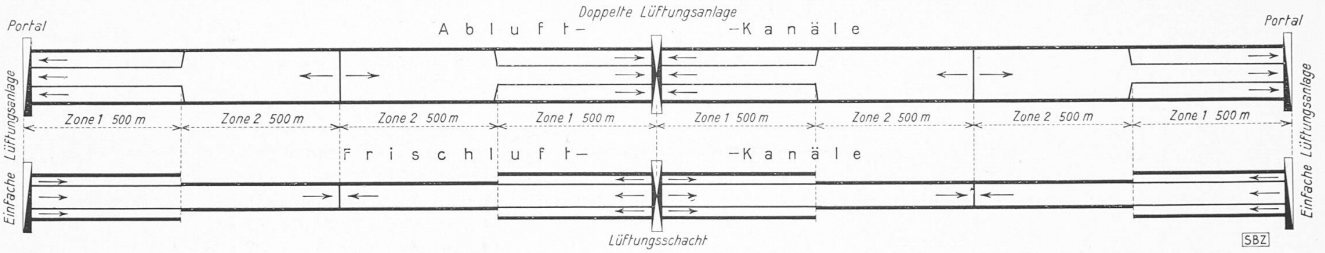


Abb. 6. Autostrassentunnel für freie Durchfahrt. Schematischer Horizontalschnitt durch die unterteilten Kanäle für Querlüftung

äusserten sich die leitenden Ingenieure des Betriebes (Direktor Thonet und Betriebsleiter Van Haren) dahin, dass nach ihrer Erfahrung die Lüftung von oben nach unten mit Rücksicht auf einen allfälligen Brand nicht zu verantworten wäre. Dabei strömen heisse Gase (Flammen) in solchen Mengen und mit solcher Vehemenz nach oben, dass sie von unten her nicht rasch genug abgesaugt werden könnten und sofort oben, auf kürzestem Wege abgesaugt werden müssen, wenn sie sich nicht auf grössere Längen verbreiten sollen, wobei Panik und Unfälle eintreten müssten. Beim Bau des Mersey-Tunnels wurde die erste fertige Strecke von 300 m Länge zu Versuchen benützt, auf Grund deren schliesslich die Halbquerlüftung gewählt wurde. Es wurden dabei auch Versuche mit Querlüftung durchgeführt, und zwar sowohl mit solcher von unten nach oben, wie mit solcher von oben nach unten. Bei der Querlüftung von oben nach unten zeigte sich, dass der Rauch bis auf Augenhöhe herabgedrückt wurde und die Sicht verdeckte, während er bei Lüftung von unten nach oben, sowohl bei Quer- wie bei Halbquerlüftung, selbst bei Brandversuchen, an die Decke ging und dieser entlang — bei Halbquerlüftung der First entlang — dem Abzugschacht zustrebte, unten die Sicht freilassend. Diese Ergebnisse wurden von Ingenieur D. Anderson veröffentlicht [22] und uns von Prof. Douglas Hay[8]) mündlich bestätigt[9]). Alle diese Erfahrungen sprechen für eine Belüftung von unten nach oben.

Das spez. Gewicht der feuchten Abgase, sowohl der Benzin- wie der Diesel- und Holzgas-Motoren, ist bei gleicher Temperatur und gleichem Druck praktisch gleich dem der Luft (es ist bei Holzgas nur um höchstens 1% höher). Bei der Temperatur aber, mit der sie ausströmen, sind diese Abgase leichter als die Luft, weshalb sie sofort aufsteigen müssen. Die Ventilation muss die natürliche Bewegung der Abgase ausnützen und unterstützen und nicht durch Entgegenwirken sie behindern. *Die Lüftung von unten nach oben ist daher physikalisch die grundsätzlich richtige.*

Ob bei Einführung der Frischluft von oben bessere Ergebnisse erzielt würden, wenn die Abluft nicht gleich über der Fahrbahn abgesaugt wird, wie dies bei den erwähnten Versuchen geschah, sondern höher, seitlich, etwa 1,00 bis 1,30 m über der Fahrbahn, wie dies gelegentlich vorgeschlagen wurde [17], ist zweifelhaft und müsste jedenfalls vorerst durch eingehende Versuche in einer Tunnelstrecke erwiesen werden. Aber selbst wenn für normale Betriebsverhältnisse die Versuche günstige Ergebnisse zeitigen sollten, hegt die Kommission mit Rücksicht auf den Fall des Brandes ernsteste Bedenken gegen jedes System, bei dem die Frischluft von oben her eingeführt wird.

d) Allgemeine Anordnung der Lüftung. Die Be- und Entlüftungskanäle dürfen nicht beliebig lang gemacht werden. Da anderseits die Zahl der Schächte bei tiefliegenden Gebirgstunneln möglichst einzuschränken ist, entsteht daraus eines der wichtigsten, den langen Passtunneln eigenen Probleme. In der «SBZ» (Bd. 112, Nr. 8) wurde darauf aufmerksam gemacht, dass im Scheldetunnel die Querlüftung tadellos funktioniere, wenn starker Verkehr herrsche, der eine grosse Luftmenge pro Zeiteinheit erfordere, dass aber bei schwachem Verkehr, d. h. wenn nur ein kleines Luftvolumen eingeblasen werde, die Frischluft nicht bis ganz an das Ende der kaum 500 m langen Kanäle gelange, sondern schon vorher durch die auf grössere Luftmengen eingestellten Luftschlitze ausströme [17]. Es wurde uns in Antwerpen bestätigt, dass dabei kurze, unvollkommen belüftete Strecken entstehen, wenn die Lüftung auf ihr Kleinstmass sinke, das dort zu 0,0083 m³/s/m angenommen ist. Bisher sind indessen daraus noch keine Nachteile erwachsen, da der Verkehr selbst stets eine Luftbewegung verursacht. Da aber schwache Lüftung bei unsern Tunneln die Regel bilden wird, mahnt diese Beobachtung doch zu einiger Vorsicht. Sie zeigt, dass die Frischluftverteilungskanäle und die Abluftsammelkanäle (bei Querlüftung) nicht beliebig lang gemacht werden dürfen, bzw. dass bei längern Lüftungsstrecken die minimale Luftmenge nicht zu niedrig angenommen werden darf. Lange Strecken, die von einer Ventilationsstation aus gespeist werden, müssen daher in Zonen unterteilt werden in der Weise, dass jeder Zone von bestimmter Länge die Luft durch geschlossene Kanäle direkt zugeführt wird. In den in den Abb. 3 bis 6 generell vorgeschlagenen Anordnungen sind die Frischluftkanäle der Zone 1 auf ihrer ganzen Länge durch kleine Querkanäle mit dem Verkehrsraum verbunden, an den sie Frischluft abgeben, während der Kanal für Zone 2 geschlossen durch Zone 1 hindurchgeht und erst beim Eintritt in die Zone 2 zum Verteilungskanal wird. Die Abluftkanäle sind in entsprechender Weise angeordnet.

Wichtig ist die Frage der zulässigen Zonenlänge. Im Merseytunnel sind die längsten Frischluftkanäle 680 m lang. Dort wurde die beim Scheldetunnel erwähnte Beobachtung nicht gemacht, allerdings sinkt dort die eingeblasene Luftmenge nie so tief hinunter. Anfänglich hatte im Merseytunnel der Druck in den Frischluftkanälen auch einen Verlauf, der etwa der in Abb. 7 punktierten Kurve entsprach. Es gelang aber durch sorgfältiges Regulieren der einzelnen Verbindungsschlitze den Druckabfall ziemlich geradlinig zu erhalten (ausgezogene Linie in Abb. 7). Bei kleinern Luftmengen ändert sich natürlich der Verlauf des Druckgefälles. Aber es ist zu beachten, dass im Scheldetunnel die maximale Luftzufuhr 0,289 m³/s/m beträgt, die minimale nur 0,0083 m³/s/m. Die Anfangsgeschwindigkeit ist im ersten Falle etwa 19 m/s, im zweiten nur etwa 0,48 ÷ 0,50 m/s. In den Alpentunneln wird bei den angenommenen Luftmengen und den von der Kommission vorgeschlagenen Kanalquerschnitten der Unterschied zwischen höchster und niedrigster Anfangsgeschwindigkeit viel geringer sein. Bei Annahme einer minimalen Luftmenge von 0,010 m³/s/m, die für einen Verkehr bis zu 60 Wagen/h ausreicht, wird dabei bei Zonenlängen von 500 m die Anfangsgeschwindigkeit 1,00 m/s, bei einer solchen von 750 m 1,50 m/s

[8]) Vgl. Fussnote 6, S. 3.

[9]) Die Betriebserfahrungen im Merseytunnel bestätigen die Versuchsergebnisse.

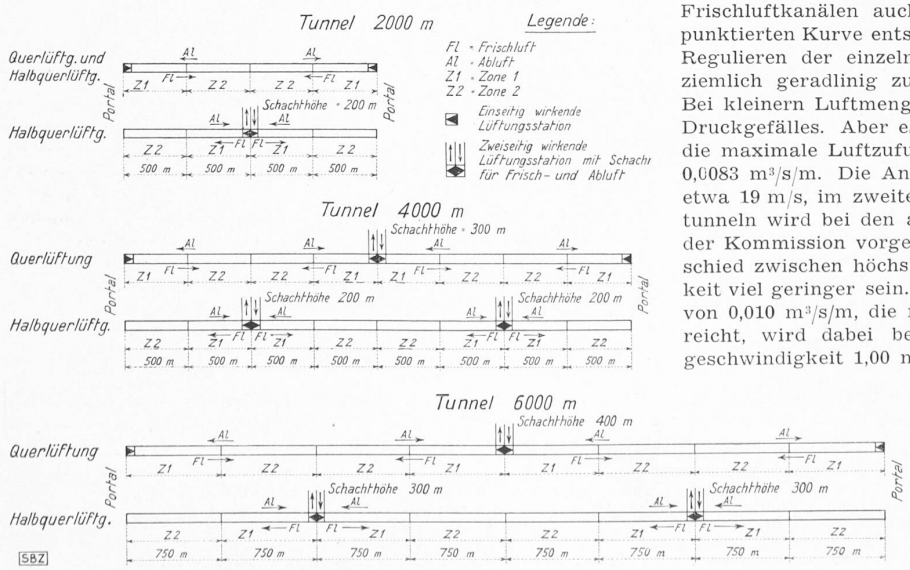


Abb. 8. Anordnung der Luftführung für unterteilte Quer- und Halbquerlüftung

Abbildung 7

betragen. Da die maximal angenommene Luftmenge nur das 7,3fache der minimalen ist, wird das Verhältnis viel günstiger und gestattet, die einzelnen Zonen länger zu machen. Die Kommission hat ihren Rechnungsbeispielen Lüftungslängen von 2×500 und 2×750 m zu Grunde gelegt (Abb. 8). Sie hat darauf hingewiesen, dass es wünschenswert wäre, durch Modellversuche das günstigste Verhältnis zwischen zulässiger Zonenlänge und minimaler Anfangsgeschwindigkeit, bzw. Unterschied zwischen grösster und kleinster Luftmenge noch genauer zu untersuchen.

Rechnungsgrundlagen. In der «SBZ» Bd. 111, S. 228 sind vom Verfasser die Rechnungsgrundlagen für die Tunnellüftung bereits angegeben worden. Dort sind für die Frischluftverteilungs- und Abluftsammelkanäle die Formeln angeführt, die O. Singstad für den Hollandtunnel aufstellte, und nach denen auch für den Scheldetunnel gerechnet wurde. Prof. Douglas Hay stellte jedoch bei den Versuchen für den Merseytunnel fest, dass die einfachere, theoretische hydraulische Formel für den Druck in einem beliebigen Punkte des Frischluftverteilungskanales in der Entfernung x von der Abschlusswand am Ende des Kanales

$$h_{dx} = \frac{\gamma v_1^2 x^2}{2 g L^2} \frac{\varrho x}{3 R} + h_0 = \frac{\gamma v_1^2 x^3 \varrho}{6 g L^2 R} + h_0 \text{ mm W. S.}$$

oder für den Anfangspunkt, wobei $x = L$

$$h_d = \frac{v_1^2 L}{6 g R} + h_0 \text{ mm W. S.},$$

Resultate lieferte, die mit den Versuchsergebnissen besser übereinstimmten als die Singstad'sche Gleichung (γ = spez. Gewicht der Luft in kg/m³, v_1 = Geschwindigkeit der Luft in m/s bei ihrem Eintritt in den Kanal, ϱ = Reibungsziffer, R = Profilradius, L = Länge des Kanales in m, $L/3$ = mittlerer Weg der einzelnen Luftteilchen, h_0 = für das Ausströmen durch die Schlitze notwendiger Ueberdruck). Die Versuche im Merseytunnel ergaben auch, dass die von Singstad angenommenen Reibungsziffern für die dortigen Querschnitte und Verhältnisse zu klein waren. Auch hierüber sollten noch Versuche durchgeführt werden, da ϱ mit der Grösse und Form des Kanalquerschnittes veränderlich ist. Vorläufig haben die Experten für ihre Berechnungen der Druckkanäle und Druckschächte $\varrho = 0{,}006$ angenommen.

Die entsprechende Gleichung für die Abluftkanäle wurde von Prof. D. Hay nicht nachgeprüft, da schon das praktische Ergebnis der Versuche zur Wahl der Halbquerlüftung führte, und für den Strömungswiderstand der Abluft im Tunnelraum die Gleichung der Hydraulik $h_z = \frac{\gamma v^2}{2 g} \left(1 + \frac{\varrho L}{R}\right)$ mm W. S. genügte (für ϱ nahm hier die Experten-Kommission 0,0065 an [6]). Die Kommission verwendete, entsprechend der Berechnung des Druckes für die Frischluftkanäle, die Gleichung

$$h_{sx} = \frac{\gamma v_1^2 x^2}{2 g L^2} \left(1{,}36 + \frac{\varrho x}{3 R}\right) + h_0 \text{ mm W. S.}$$

bzw. für den Nullpunkt der betreffenden Kanäle

$$h_s = \frac{\gamma v_1^2}{2 g} \left(1{,}36 + \frac{\varrho L}{3 R}\right) + h_0 \text{ mm W. S.}$$

wobei in Ermangelung eigener Versuche für Verluste infolge Wirbelbildung an den Saugschlitzen der Wert $0{,}36 \frac{\gamma v_1^2}{2 g}$ von Singstad übernommen wurde. Für die Absaugkanäle wurde $\varrho = 0{,}007$ angenommen, da der Reibungswiderstand bei verdünnter Luft verhältnismässig grösser ist als bei gepresster [3].

Für die Schächte kann der Widerstand nach der obigen Gleichung für h_z berechnet werden. Dabei ist noch der positive oder negative Auftrieb $h_t = \gamma H \frac{(t_1 - t_2)}{1 + \alpha t_1}$ mm W. S. zu berücksichtigen (H = Schachthöhe in m, t_1 die Innen-, t_2 die Aussentemperatur in °C, $\alpha = \frac{1}{273}$). Betr. die Schwierigkeit, t_1 vorauszubestimmen, sei auf «SBZ» Bd. 111, Nr. 18 verwiesen [16]. Da es sich hier um eine generelle Studie handelt, nahm die Kommission willkürlich

$t_1 = +10$ °C und

$t_{2\,max} = +30$ °C, $t_{2\,min} = -20$ °C an

(der Schachtquerschnitt wurde in unsern Beispielen nach Abb. 9 angenommen). Für die Druck-(Frischluft-)kanäle ist

$$h_0 = \frac{\gamma w^2}{2 g} \left(1 + \frac{\varrho L_0}{R_0}\right) \text{ mm W. S.}$$

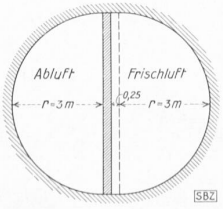


Abbildung 9

(w = Luftgeschwindigkeit im Verbindungsschlitz $= \frac{q}{f k c}$ m/s, q = durch jeden einzelnen Schlitz strömende Luftmenge in m³/s, f = Querschnittfläche des Schlitzes in m², L_0 = Länge des Schlitzes in m, R_0 = Profilradius des Schlitzes in m, k = Kontraktionskoeffizient = 0,63, c = Geschwindigkeits-Koeffizient = 0,97). Für die Absaugschlitze ist h_0 im Hollandtunnel zu 0,87 mal die Geschwindigkeitshöhe der durch den Absaugschlitz strömenden Luft festgestellt worden (Mitteilung von Dr. O. H. Ammann). Auch hierfür sollten Versuche durchgeführt werden.

Für die Regulierung der Querkanäle zwischen Verteilungskanal und Verkehrsraum soll im Merseytunnel die auf metrische Masseinheiten umgerechnete Gleichung

$$r = \frac{\text{unverengter Querschnitt}}{\text{verengter Querschnitt}} = \frac{5{,}21\, w}{\sqrt{161{,}3\, h + 3{,}73\, w^2} + 3{,}281\, w}$$

gute Resultate gegeben haben (worin w = Geschwindigkeit durch den unverengten Querschnitt in m/s, h = Ueberdruck an der betr. Stelle im Luftkanal über den für den Schlitzwiderstand notwendigen Druck, also $h = h_{dx} - h_0$). Im Merseytunnel wurden etwa 20 000 Schlitze nach dieser Formel reguliert und es soll seither keiner abgeändert worden sein.

Für die *Berechnung der Ausbaugrösse* der Ventilation sind die Druckhöhen noch um den Betrag zu vermehren, der einem maximalen Druckgefälle im Tunnel infolge der meteorologischen Verhältnisse entspricht. Auf Grund von allgemeinen Angaben der meteorologischen Zentralanstalt wurde dieser für einen 6 km langen Wasserscheidetunnel zu 35 mm W. S. angenommen, dementsprechend für eine an ihrem Ende abgeschlossene Lüftungsstrecke von 1000 m (2×500 m) zu 6 mm, für eine solche von 1500 m (2×750 m) zu 9 mm W. S.

Die zweckmässige Form der Verbindung zwischen Ventilatoren und den zur Tunnelaxe parallelen Luftkanälen sollte durch Modellversuche in jedem Einzelfall ermittelt werden. Vorläufig wurde hierfür nach Analogie des Simplontunnels für die maximale Luftmenge von 73 m³/s/m ein Zuschlag von 4 mm W. S. gemacht [7].

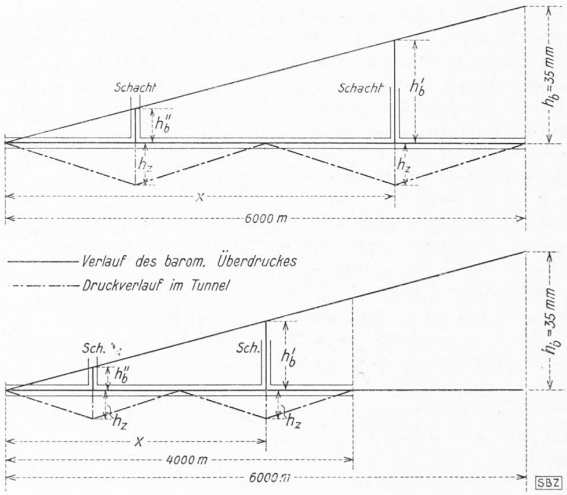


Abbildung 10

Bei der Berechnung des Luftwiderstandes im Verkehrsraum bei der *Halbquerlüftung* ist auch der Widerstand des Verkehrs zu berücksichtigen. Aus den in «SBZ» Bd. 111, S. 226 erwähnten Beobachtungen im Libertytunnel wurde dieser für einen Verkehr von 200 Wagen/h zu 1,1 mm W. S., für einen solchen von 300 Lastwagen/h zu 3 mm W. S. für die Lüftungslänge von 1500 m roh berechnet. Auch hierüber sollten Versuche genaueren Aufschluss geben. Ein Druckgefälle infolge der meteorologischen Verhältnisse im durchgehenden Tunnelraum muss ebenfalls berücksichtigt werden. Wollte man an dem Grundsatz festhalten, dass die Lüftungsanlage den Luftzug bei jeder Wetterlage vollständig beherrschen müsse, so wäre der Saugdruck (Unterdruck) der Abluftventilatoren noch um den Betrag $h'_b = \frac{35\, X}{6000}$ mm W. S. (Abb. 10) zu vermehren. Dies ist aber unseres Erachtens zu weitgehend. Es genügt den Druck der Gebläse um soviel zu erhöhen, dass sie den Luftzug so lange beherrschen, als der natürliche Luftzug nur Stauungen hervorrufen würde. Durch trompetenförmige Erweiterung der Abzugschächte nach oben könnte ein Teil der Geschwindigkeitshöhe wieder als statische Druckhöhe zurückgewonnen werden. In den Beispielen des Berichtes ist dies jedoch nicht berücksichtigt. (Schluss folgt)