Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 98 (1980)
Heft: 36: Der Gotthard-Strassentunnel

Artikel: Lüftungstechnische Messungen
Autor: Haerter, Alex / Baumann, Hans / Müller, Hans Peter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-74193

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: 08.10.2025

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

Conclusion

La complexité des nombreux problèmes qui se sont posés pour garantir aux usagers les meilleures conditions de sécurité a nécessité l'intervention des techniques les plus modernes. Parmi celles-ci, l'emploi d'un ordinateur de processus pour la gestion de la ventilation permet une utilisation optimale de tous les éléments de l'installation. Le tunnel du Saint-Gothard est ainsi l'un des premiers au monde à être équipé d'un système de gestion de la ventilation à commande centralisée.

Adresse de l'auteur: *J.-P. Thiéry*, ing. dipl., SIA, Bureau d'études Dr ing. G. Lombardi, 6600 Locarno

Lüftungstechnische Messungen

Von Alex Haerter, Hans Baumann, Hans Peter Müller und Ernst Graf, Zürich

Frischluftmengen

Der Frischluftbedarf wurde für eine *Verkehrsmenge von 1800 PWE/h mit 10 Prozent Diesellastwagen* bestimmt und diese Luftmenge *um 30 Prozent erhöht*, um einerseits *stockende Verkehrszustände* und anderseits einen *späteren Richtungsverkehr* (3600 PWE/h, Rückgang der Abgasemission auf 65 Prozent) ebenfalls beherrschen zu können. Dies führte auf die installierten Frischluftmengen von 189 m³/s, km auf der Nordrampe und 159 m³/s, km auf der Südrampe.

Ausgehend von den heutigen mittleren Fahrzeugemissionen und zugelassenen CO- und Rauch-Konzentrationen können damit auf der *höchsten Lüftungsstufe stündlich Verkehrsmengen bis 3000 PW und bis 400 Diesellastwagen* bei flüssigem Verkehrsablauf den Tunnel passieren [1].

Die Abluftventilation wurde nicht mit dem dreissigprozentigen Zuschlag versehen, da sie zur Abgasverdünnung nichts beiträgt.

Im Tunnel wird sich bei dichtem Verkehr ein gleichmässiger Verkehrsablauf und entsprechender Abgasanfall einstellen, so dass auch in jeder Tunnelrampe eine *gleichmässige Frischluftverteilung anzustreben* ist. Die damit in die einzelnen Lüftungsabschnitte zu befördernden Frischluftmengen sind aus Tabelle 1 ersichtlich.

Ausmessung der installierten Lüftungsanlage

Die von den Ventilatoren aufzubringenden Drücke zur Beförderung der Solluftmenge mussten im Zeitpunkt der Ventilatorsubmission *vorausberechnet* werden anhand der Baupläne über die Kanal- und Schachtabmessungen und einer Schätzung der Wandrauhigkeit, wie es das Bauverfahren beim Betonieren und Einziehen der Zwischendecke und Trennwände erwarten liess. Die Krümmerverluste und die Impulsbilanzen entlang den Verteil- und Sammelkanälen wurden aufgrund von Modellversuchen bestimmt [2].

Die vom Ventilatorlieferanten mit diesen Volumen-Druckwerten ausgelegten Ventilatoren wurden im verkleinerten Massstab als *Modellventilatoren* hergestellt und beim Hersteller auf die Einhaltung der Garantiewerte hin geprüft. Offen blieb damit noch die Frage, ob in der Anlage selbst die Ventilatoren die verlangten Luftmengen bei den vorgegebenen Leistungen erbringen. *Abweichungen sind zu erwarten*, weil die Kanal- und Schachtquerschnitte sowie die Wandrauhigkeiten und die Impulsgewinne in den Verteil- und Sammelkanälen teilweise anders ausfallen können als angenommen und die Grossausführungen der Ventilatoren etwas anders arbeiten als die Modellventilatoren.

Die Messungen im Bauwerk teilten sich auf in die Bestimmung der Gesamtluftmenge und Ventilatorleistung je Lüftungskanal, und der Mengen- und Druckverläufe längs den Verteil- und Sammelkanälen.

Luftmenge und Ventilatorleistung je Lüftungsabschnitt

In jedem Verteil- und Sammelkanal wurden 50 m ab Ventilator in einer Messebene *30 Gesamtdrucksonden* und *sechs Prandtlsonden* fest eingebaut. Die Lage der Staudrucksonden im Messquerschnitt bestimmt sich nach der *Log-Tschebyschew-Regel*, einem normierten Messverfahren [3], das auch bei ungleichmässiger Geschwindigkeitsverteilung im Vergleich zum Rohrreibungsprofil eine Messgenauigkeit von ±4 Prozent in der Mengenmessung ergibt.

Die Enden der Luftkanäle haben keine Abschlusswand, damit sich bei Druckgradienten längs des Tunnels die Verteilungen ausgleichen können und bei Ausfall eines Ventilators der Lüftungsabschnitt vom andern Ventilator her durchbelüftet werden kann. Im Abnahmeversuch liessen sich nicht alle Ventilatoren gleichzeitig in Betrieb nehmen, im Abschnittsende wurde jeweils eine provisorische Trennwand eingebaut.

In jedem Tunnelabschnitt wurde die maximale Luftmenge gemessen und eine zweite reduzierte Menge, um den Auftriebseinfluss überblicken zu können.

Die aufgenommene Motorleistung wurde mit speziellen Messgeräten ermittelt. Die abgegebene Motorleistung wurde mit der Motorcharakterisitk aus der gemessenen aufgenommenen Leistung ermittelt.

Es liegen alle Messungen des Haupttunnels vor, die Lüftung des Vortunnels wird später ausgemessen. Aus Tab. 1 sind für die neun Lüftungsabschnitte des Haupttunnels die Solluftmengen und die Ventilator-Nennleistungen bei der jeweils höchsten Lüftungsstufe ersichtlich.

Während den Abnahmemessungen waren die Ventilatorlaufschaufeln so eingestellt, dass die Ventilatorleistungen über der Motor-Nennleistung lagen. Diese gemessenen Luftmengen wurden umgerechnet auf jene, die sich bei der Motornennleistung einstellen und sind in Tab. 1 eingetragen.

Die Kapazität der Tunnellüftung liegt also in allen Lüftungsabschnitten um einige Prozent über den Sollwerten. Der Grund ist, dass die Reibungsverluste vorsichtiger angenommen wurden als sie sich nun eingestellt haben, wodurch die Ventilatoren ein grösseres Luftvolumen fördern können.

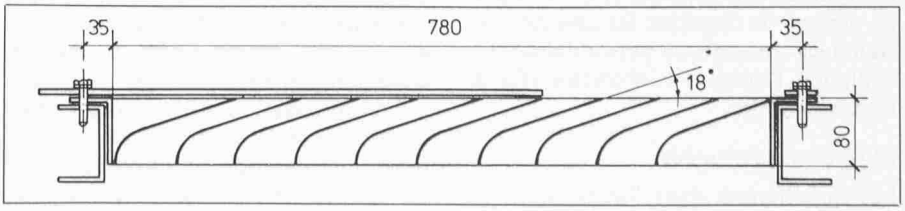

Bild 1. Abluftgitter mit Abdeckplatte und Einbaurahmen

Zu- und Abluftmengenverteilungen

Im Mittel wurde bei jeder fünften Luftöffnung eine Mengenmessung durchgeführt. Bei der Zuluft wurden im Austrittsquerschnitt des Seitenkanals an drei festen Messpunkten die Luftgeschwindigkeiten gemessen, deren Mittelwert ergibt zusammen mit der Austrittsfläche die ausströmende Menge. Die durch die Abluftgitter (Bild 1) einströmende Menge wurde aus der mit einem Prandtlrohr gemessenen Einströmgeschwindigkeit im engsten Querschnitt und der jeweils freien Gitterfläche bestimmt. Die Messvorrichtungen wurden auf Halterungen positioniert, was ein rasches Arbeiten erlaubte. Die Aufsummierung der auf alle Öffnungen bezogenen Einzelmessungen lag innerhalb weniger Prozente der Werte der Gesamtmessungen nach Tabelle 1.

In Bild 2 sind für alle Zuluft-Lüftungsabschnitte die gemessenen Luftmengen, bezogen auf den Mittelwert aller Messungen aufgetragen.

- Die meisten Messpunkte weichen weniger als ±10 Prozent vom Mittelwert ab.
- Einzelne stärkere Abweichungen ergeben sich z.B. bei Auslässen in einer Seitennische, wo im Kanal ein gestörtes Strömungsbild herrschte.
- Die meisten Mengenverteilungen tendieren zu mehr Luft gegen das Kanalende hin, weil für die aus der Druckverlaufberechnung abgeleiteten Öffnungseinstellung ein höherer Kanalverlust angenommen wurde als er sich nun eingestellt hat.

Weil im Verkehrsraum durch den Verkehr und das vorgesehene Halbquerlüftungsregime immer eine Längsströmung herrscht, werden solche Ungleichmässigkeiten vollständig ausgeglichen.

In Bild 3 sind in gleicher Weise die Abluftverteilungen aufgetragen. Die Abweichungen verlaufen in der ersten Kanalhälfte abgestuft, weil bei der Drosselung der Gitter die neun Schaufelkanäle jeweils nur von Kanal zu Kanal abgedeckt wurden. Hinzu kommt, dass die Absaugöffnungen anfänglich alle 8 m und schliesslich nur alle 16 m angeord-

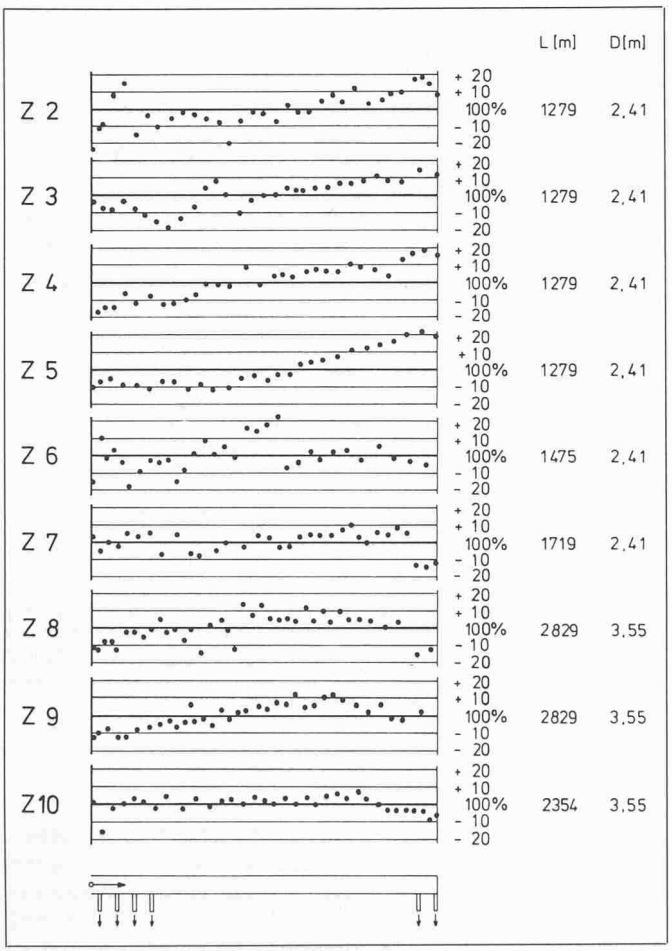

Bild 2. Relative Abweichungen in der Zuluftverteilung entlang den Lüftungsabschnitten (100% = gleichmässig)

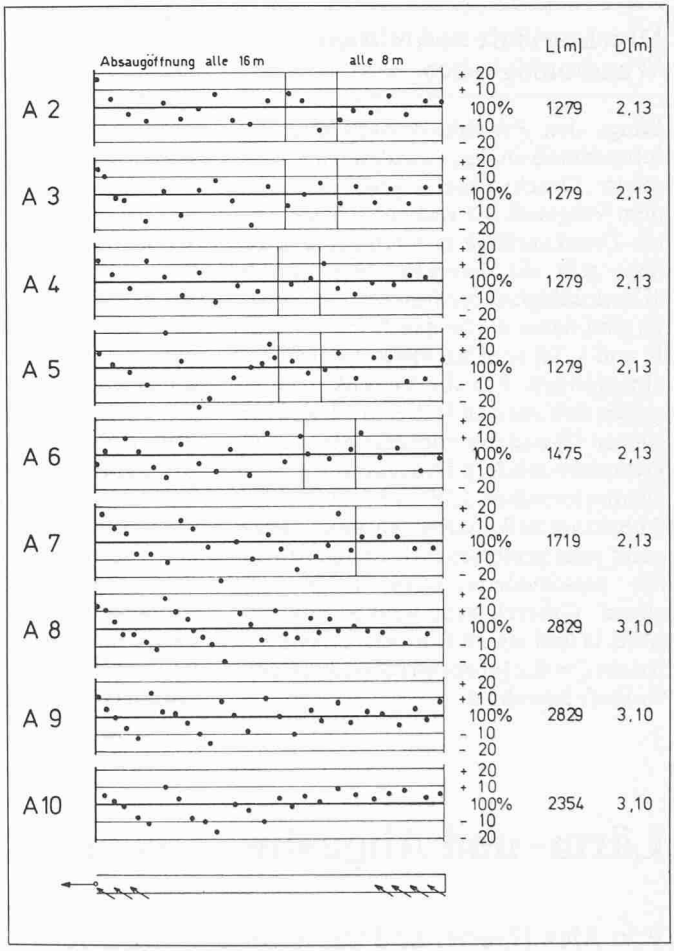

Bild3. Relative Abweichungen in der Abluftabsaugung entlang den Lüftungsabschnitten (100% = gleichmässig)

Tabelle 1. Frischluftmengen, die in die einzelnen Lüftungsabschnitte zu befördern sind

Abschnitt	Zentrale	Richtung	Zuluft (130%) Soll m³/s	Zuluft (130%) korr. Messung m³/s	Zuluft (130%) Überschuss %	Zuluft (130%) Ventilator Leistung kW	Abluft (100%) Soll m³/s	Abluft (100%) korr. Messung m³/s	Abluft (100%) Überschuss %	Abluft (100%) Ventilator Leistung kW
2	Göschenen	→ S	241	272	13	540	185	190	3	390
3	Bäzberg	→ N	241	253	5	950	185	192	4	750
4	Bäzberg	→ S	241	253	5	960	185	192	4	730
5	Hospental	→ N	241	246	2	1 025	185	192	4	745
6	Hospental	→ S	278	297	7	1 540	214	216	1	1050
7	Guspisbach	→ N	280	300	7	1 570	215	227	6	1260
8	Guspisbach	→ S	449	463	3	2 440	345	349	1	1700
9	Motto di Dentro	→ N	449	470	5	2 590	345	364	6	1920
10	Airolo	→ N	373	373	0	970	287	287	0	580
	Summen		2793	2927	5	12 585	2146	2209	3	9125

Tabelle 2. Reibungskoeffizienten und zugehörige Wandrauhigkeiten für alle Zuluft- und Abluftkanäle

Abschnitt		2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mittel
Zuluft	λ	0,013	0,013	0,011	0,011	0,011	0,010	0.011	0,010	0.012	0,15*
	δ (mm)	0,36	0,32	0,19	0,14	0,13	0,07	0,19	0,15	0,31	0,20
Abluft	λ	0,011	0,010	0,010	0,011	0,011	0,011	0,012	0,011	0,011	
	δ (mm)	0,14	0,08	0,10	0,16	0,11	0,12	0,25	0,19	0,16	0,15

*) ohne Berücksichtigung von Z2, Z3, Z10

net wurden. Da die Abluftabsaugung zur Abgasverdünnung nichts beiträgt, sind hier etwas höhere Ungleichmässigkeiten zulässig.

Druckverläufe und mittlere Wandrauhigkeiten

Längs den Frischluftverteil- und Abluftsammelkanälen wurden die statischen Druckverläufe gemessen. Aus dem Vergleich der rechnerisch ermittelten Druckverläufe mit den gemessenen lässt sich die *interessierende mittlere Wandrauhigkeit* bestimmen.

Es sind dabei die beiden Impulsgrössen k_z und k_a [4] vom Reibungsdruckverlust abzutrennen. Für die Verteilkanäle ergaben sich aus den früheren Modellversuchen [5] und der vorliegenden Kanalgeometrie mittlere Druckgewinnkoeffizienten zwischen 1,18 und 1,21. Bei den Abluftsammelkanälen wurden, ausgehend vom gemessenen Kanalenddruck, für verschiedene λ-Annahmen und einem Gittereinströmwinkel von 20° (Bild 1) und einem Eintrittsverlustkoeffizient $\zeta = 0{,}2$ [4] entsprechende Druckverläufe berechnet.

Bei der Auswertung wurden nebst den gemessenen Mengen, Dichten und Drücken auch die ausgemessenen und gemittelten Kanalquerschnitte verwendet. In Tab. 2 sind die auf dieser Basis ermittelten Reibungskoeffizienten und zugehörigen Wandrauhigkeiten für alle Zuluft- und Abluftkanäle zusammengestellt.

Für die Vorausberechnung der Druckverluste wurde von einer mittleren Wandrauhigkeit von $\delta = 0{,}5$ mm ausgegangen, was gemäss [4] als Mittelwert gedacht war für den Gewölbe- und Trennwandteil aus der Metallverschalung und dem gröberen Zementglattstrich auf der Zwischendecke. Tab. 2 zeigt nun aber mittlere Wandrauhigkeiten um 0,15 mm, wenn man von relativ hohen Werten in Z2, Z3 und Z10 absieht. Im Expertenbericht [4] wird ein δ-Bereich von 0,1–0,2 mm der eingeölten, gepflegten Metallverschalung, entfernten Brauen und einem sehr sorgfältigen Zementglattstrich zugeordnet. In der Tat wurden die Kanäle auch auf dieser Basis erstellt und entsprechend stimmen die gefundenen Rauhigkeitswerte mit der Charakterisierung des Bauvorgangs überein. Die höheren Wandrauhigkeiten in Z2, Z3, Z10 sind einerseits auf Anlaufprobleme zurückzuführen und anderseits auf Einbauten, die örtliche Druckverlusterhöhungen bewirken.

Literaturverzeichnis

[1] *Haerter, A.* et. al.: «Belüftung und Luftverschmutzung.» Technisches Komitee für Strassentunnel AIPCR XVI Weltstrassenkongress Wien, 1979

[2] *Haerter, A.* und *Feusi, H. P.*: «Strömungstechnische Modellversuche zum Gotthard-Strassentunnel.» Strasse und Verkehr 3, 1974

[3] *Richter, W.*: »Arithmetische Methode der Netzmessungen des Volumenstroms in Leitungen mit Rechteck-Querschnitt.» Heizung Lüftung Haustechnik 23, Nr. 8, 1972

[4] *Ackeret, J., Haerter, A.* und *Stahel, M.*: «Die Lüftung der Autotunnel». Mitt. Inst. für Strassenbau ETH Zürich, Nr. 10, 1961

[5] *Haerter, A.*: «Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Lüftungsanlagen von Strassentunneln». Mitt. Inst. für Aerodynamik ETH Zürich, Nr. 31, 1961

Adresse der Verfasser: Dr. *A. Haerter*, dipl. Ing. ETH, *H. Baumann, dipl. Ing. ETH, H.P. Müller*, Ing. HTL und *E. Graf*, Lüftungstechniker, Schindler Haerter AG, Beratende Ingenieure, Stockerstrasse 12, 8002 Zürich.

Lärm- und Abgasimmissionen

Von Alex Haerter und Urs Steinemann, Zürich

Aus den Ansaug- und Ausblasöffnungen der Lüftungsanlage dringen der Ventilatorlärm und die Abgase eines Tunnelabschnittes konzentriert aus einem Abluftschacht. Diese Immissionen wurden mit folgenden Massnahmen auf *harmlose Pegel* gebracht.

Lärmimmissionen

In den Frischluftansaug- und Abluftausblasquerschnitten der Zentralen Göschenen, Hospental und Airolo sind *Schalldämpferkulissen* eingebaut, für die gefordert wurde, dass sie den Lärm bei Vollastbetrieb in 100 m Distanz bei Windstille auf 45 dB(A) zu reduzieren haben.

Frischluftseitig sind sie direkt im Ansaugquerschnitt angeordnet, wo ohnehin eine kleine Strömungsgeschwindigkeit herrscht und damit geringe Druckverluste auftreten.

Abluftseitig liegen die Schalldämpfer am Ende des Ausblaskamins.

- Die Strömungsgeschwindigkeit zwischen den Schalldämpferkulissen beträgt 20 m/s, um dem Abluftstrahl den nötigen Impuls für seine Aufstiegsphase (Abschnitt 2) zu geben. Strömungsmodellversuche zeigten, dass sich die einzelnen Luftstrahlen nach dem Austritt aus dem Schalldämpferblock zu einem kompakten Strahl von 17 m/s mittlerer Steiggeschwindigkeit zusammenschliessen.
- Eine Anordnung der Schalldämpfer im Austrittsquerschnitt drängte sich auch deshalb auf, weil in den Abluftschächten Luftgeschwindigkeiten bis 40 m/s herrschen, so dass dieses Strömungsrauschen nach aussen abgedämpft werden muss.
- Die Luftgeschwindigkeit von 20 m/s zwischen den Schalldämpferkulissen erzeugt ebenfalls ein Strömungsrauschen, das jedoch bevorzugt in Richtung der Strahlausbreitung abgestrahlt wird, während seitlich zum Austrittsquerschnitt der Schalldruck über 10 dB(A) tiefer liegt als in Richtung der Strahlausbreitung.