Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 79 (1961)
Heft: 40

Artikel: Die Lüftung der Autobahntunnel
Autor: Schnitter, Erwin
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-65604

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: 16.07.2025

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

ORGAN DES SCHWEIZERISCHEN INGENIEUR- UND ARCHITEKTEN-VEREINS S.I.A. UND DER GESELLSCHAFT EHEMALIGER STUDIERENDER DER EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE G.E.P.

Die Lüftung der Autotunnel

DK 625.712.35:628.8

Schon 1942 hat sich Ing. *Erwin Schnitter* als Miterbauer des Maastunnels in Rotterdam hier (Bd. 119, S. 195) ausführlich über die Autotunnellüftung geäussert. Wir sind ihm daher dankbar dafür, dass er es übernommen hat, unsere Leser über das neueste einschlägige Dokument [1]) zu orientieren. Ueber Autotunnel und ihre Belüftung vgl. auch unsere Beiträge aus der Frühzeit: 1935 *E. u. G. Gruner,* Bd. 106, S. 158 ff., *C. Jegher,* Bd. 106, S. 217 ff., *Ch. Jaeger,* Bd. 106, S. 163; 1938 *O. H. Ammann,* Lincolntunnel, Bd. 111, S. 251; 1938 *C. Andreae,* Lüftung langer Autotunnel, Bd. 111, S. 225 und 1939, Bd. 114, S. 1 ff. *Red.*

*

In dem als Mitteilung Nr. 10 aus dem Institut für Strassenbau an der ETH vor kurzem veröffentlichten «Bericht der Expertenkommission für Tunnellüftung an das Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau» fassen die Berichterstatter Prof. *M. Stahel,* Vorstand des Instituts für Strassenbau an der ETH, Prof. Dr. *J. Ackeret,* Vorstand des Instituts für Aerodynamik an der ETH, und Ing. Dr. *A. Haerter* als Mitarbeiter die umfassenden, nach allen Richtungen mit hervorragender Sorgfalt geführten Studien und Forschungen der Experten und deren gemeinsame Schlussfolgerungen zusammen. Es ist hiermit ein grundlegendes Werk entstanden, das einer Notwendigkeit entspricht. Seit den Untersuchungen für den Hollandtunnel in New York, die 1927 und 1929 veröffentlicht wurden und die bisher eine Hauptgrundlage für die Bemessung der Lüftung von Autotunneln bildeten, hat die Entwicklung der Intensität und Zusammensetzung des Verkehrs, der Fahrzeugmotoren und der hygienischen Kriterien der Tunnelluft zu einer wesentlich veränderten Ausgangslage geführt.

*

Der erste, von Prof. *M. Stahel* redigierte Teil des Berichts hat zum Ziel, den Frischluftbedarf eines Autotunnels je km und Stunde zu ermitteln. Einleitend wird die Problemstellung dargelegt und die Aufgabe, Zusammensetzung und Arbeitsweise der Expertenkommission erläutert.

Der entscheidende Schritt im Bau und Betrieb von ventilierten Autotunneln ist mit dem Hollandtunnel getan worden, der den Hudson River mit zwei zweispurigen, 2580 m langen, querbelüfteten Tunnelröhren unterfährt und 1927 dem Verkehr übergeben wurde. Eine kurze Uebersicht zeigt die seither in Betracht gezogenen Systeme der Tunnelventilation.

Die Bildung der Expertenkommission nahm ihren Ausgangspunkt in einer Initiative des Eidg. Oberbauinspektorates vom Jahre 1955; 1957 legte Oberbauinspektor Dr. *R. Ruckli* die Aufgaben der inzwischen unter dem Vorsitz von Prof. *M. Stahel* konstituierten Expertenkommission wie folgt fest: Es sind die Grundlagen für die Belüftung von Autotunneln zu überprüfen, bzw. abzuklären, und es sind entsprechende Richtlinien für die Projektierung der Ventilation vorzuschlagen, wobei im Vordergrund stehen: 1. die Frage der Abgase der Verbrennungsmotoren unter verschiedenen Betriebsbedingungen; 2. die zulässige Grenzkonzentration beim Betrieb der Autotunnel; 3. der Einfluss grösserer Höhen über Meer; 4. die notwendige Frischluftmenge für alle in Betracht kommenden Situationen; 5. die aerodynamischen und ventilationstechnischen Probleme der Tunnellüftung.

Der Gehalt an Abgasen in der Luft in Volumenverhältnissen wird in diesem Bericht angegeben mit der von Medizinern und Hygienikern heute allgemein verwendeten Einheit: Anzahl Teile Gas auf 1 000 000 Teile Luft, abgekürzt ppm = parts pro million. Also wird beispielsweise die alte CO-Grenzkonzentration von 0,04 % CO = 0,4 ‰ geschrieben: 400 ppm CO (d. h. 400 Teile CO / 1 000 000 Teile Luft).

Im Kapitel «Die hygienischen Kriterien der Tunnellüftung» werden Grundlagen und Entwicklung der Auffassungen und die Erwägungen und Anträge der Expertenkommission mit klarer Präzision dargestellt. Ausgegangen wird hierbei von der toxikologischen Wirkung von Kohlenoxyd CO, die darin besteht, dass der rote Blutfarbstoff (Hämoglobin Hb) statt Sauerstoff CO aufnimmt, was zu einer Sauerstoffverarmung im Blut, d. h. zu innerer Erstickung führt. Die Abhängigkeit der CO-Hb-Bildung im Menschenblut von der eingeatmeten CO-Konzentration, der Zeit und der Tätigkeit wird durch die Kurven von *J. May* gegeben («Archiv für Gewerbepathologie und Gewerbehygiene», Berlin 1941, Bild 1). In grösseren Höhen über Meer geht die Absättigung des roten Blutfarbstoffes mit Kohlenoxyd wegen des geringeren Sauerstoffangebotes rascher vor sich und erreicht höhere Werte.

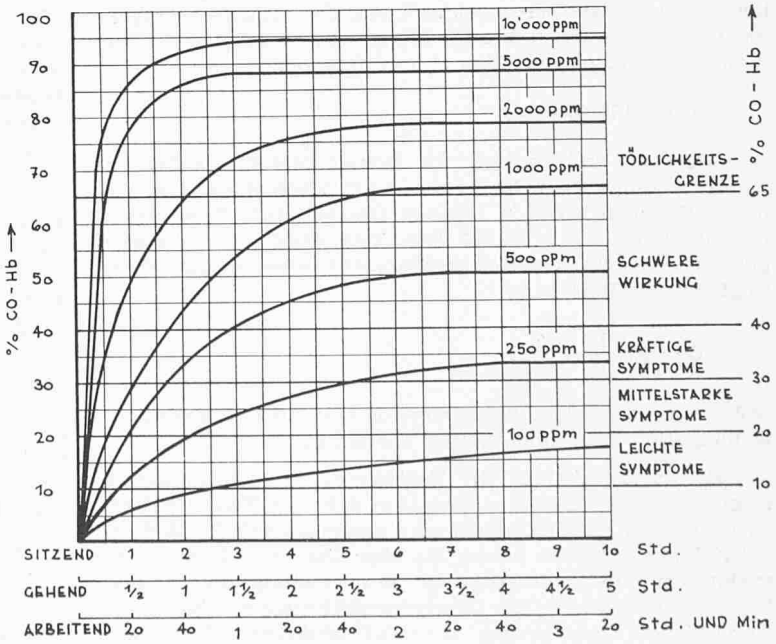

Bild 1. Abhängigkeit der CO-Hb-Bildung im Menschenblut von der eingeatmeten CO-Konzentration, der Zeit und der Tätigkeit. Nach J. May

[1]) **Die Lüftung der Autotunnel.** Bericht der Expertenkommission für Tunnellüftung an das Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau. Berichterstatter: *J. Ackeret, A. Haerter, M. Stahel.* Veröffentlicht als Mitteilung Nr. 10 aus dem Institut für Strassenbau an der ETH. 130 S. 82 Abb. Zürich 1961, Institut für Strassenbau an der ETH. Preis geb. 29 Fr.

Aus den Versuchen für die Belüftung des Hollandtunnels schloss man auf eine zulässige Grenzkonzentration von 400 ppm. Mit diesem Werte wurde die Ventilation des Hollandtunnels dimensioniert und sind seither viele weitere Strassentunnel projektiert worden. Mit der Zunahme der Dieselmotoren bei den Lastwagen, die wenig CO entwickeln, dagegen erheblich Rauch — besonders in den ansteigenden Rampen und bei stockendem Verkehr — musste die Ventilation gesteigert werden, bis man zu einer CO-Konzentration von 250 bis 200 ppm kam. Auch die Forderung nach besseren Arbeitsbedingungen für das Betriebspersonal im Tunnel und nach erhöhtem Komfort für die Tunnelbenützer hat inzwischen allgemein zur Empfehlung dieser CO-Grenzkonzentration geführt. Mit einer so bemessenen Lüftung sollen auch die Belästigungen durch Reizstoffe und die Sichtbehinderung durch Dieselrauch vermieden werden.

Die Expertenkommission wählt ebenfalls die CO-Konzentration als Masstab für die Dimensionierung und Steuerung der Ventilation und macht folgende Vorschläge für die massgebende CO-Grenzkonzentration: für Tunnel bis 1 km Länge 250 ppm, für 3 bis 7 km Länge 200 ppm bei einer Meereshöhe unter 2000 m und in der Annahme, dass die Tunneldurchfahrtszeit unter 30 Minuten liege. Dabei wird vorausgesetzt, dass dieser Grenzwert für eine nur ausnahmsweise auftretende, ungünstigste Situation gilt und im normalen Betrieb die CO-Konzentration wesentlich tiefer gehalten werde. Bei längeren Tunneln sind in angemessenen Abständen Nischen zum Ausstellen und Reparieren von Pannenwagen notwendig. Hier kommen längere Aufenthalte und körperliche Arbeit in Betracht. Diese Nischen sind deshalb so zu belüften, dass auch bei Spitzenverkehr die zulässige Arbeitsplatzkonzentration von 100 ppm nicht überschritten wird (Schweiz. Unfallversicherungsanstalt 1953, Giftschwellenwert für maximal achtstündige Arbeitszeit).

Die folgenden zwei Kapitel behandeln die «Entwicklung der Erkenntnisse über Abgas- und Rauchproduktion der Motorfahrzeuge» und «Die massgebende Abgas-, Rauch- und Wärmeproduktion; Erwägungen und Anträge der Expertenkommission». Der richtig eingestellte und gut unterhaltene Dieselmotor erzeugt praktisch kein CO. Bei der Berechnung des Treibstoffverbrauchs und der CO-Produktion der Benzinmotoren wird zunächst von den Basiswerten ausgegangen, die bei ruhiger, gleichmässiger Fahrt mit mittlerer Geschwindigkeit auf horizontaler Strecke in einer Höhe bis maximal 400 m ü. M. entstehen. Durch Zuschläge werden dann die hinzutretenden Einflüsse berücksichtigt.

Die notwendige Frischluftmenge Q_F in m³ je km Tunnellänge und Stunde berechnet sich aus der massgebenden, je km und Stunde erzeugten CO-Menge Q_{CO} in m³ und der zulässigen Grenzkonzentration C_{zul} in ppm aus

$$Q_F = 10^6 \; Q_{CO}/C_{zul}$$

Die Gas- und Luftmengen werden hierbei vorerst als Normalvolumen Q_0 in Nm³ (Normal-m³) berechnet, d. h. mit ihrem Volumen bei $B_0 = 760$ mm QS und einer Temperatur $t_0 = 0°$ C bzw. $T_0 = 273°$ K. Die Umrechnung auf die massgebenden Druck- und Temperaturverhältnisse B und T erfolgt mit der Beziehung

$$Q = Q_0 \cdot \frac{B_0}{B} \cdot \frac{T}{T_0},$$

wobei eine besonders ungünstige Druck- und Temperatur-Kombination zu Grunde gelegt werden soll.

Bei der Ermittlung der Basiswerte der CO-Produktion zeigt sich, dass die Benzinmotoren seit der Zeit der Versuche für den Hollandtunnel eine ausserordentliche Weiterentwicklung erfahren haben, die über einen um 40 bis 50 % geringeren Treibstoffverbrauch pro Leistungseinheit und bessere Beherrschung der Gemischverhältnisse zu einer ganz wesentlichen Verringerung der CO-Produktion geführt hat. Hier liegt die Erklärung dafür, dass die Ventilation der älteren Strassentunnel, die für eine CO-Grenzkonzentration von 400 ppm dimensioniert wurde, heute bei Erreichen der Spitzenverkehrsmenge für eine CO-Grenzkonzentration von 200 bis 250 ppm noch genügt.

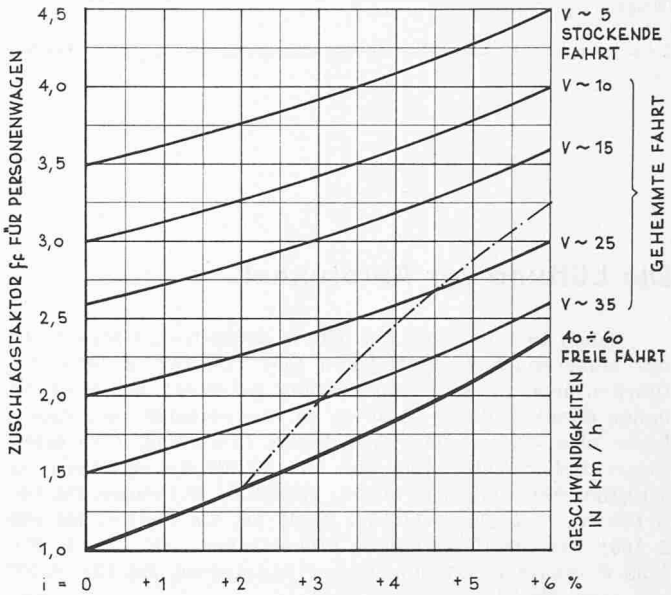

Bild 2. Beschluss der Expertenkommission: Zuschlagsfaktor f_f für Zunahme der CO-Produktion von Personenwagen bei freier, gehemmter und stockender Fahrt auf horizontalen Strecken und Steigungen. Strichpunktiert ist die Grenzlinie der Dauergeschwindigkeit von Lastwagen auf Steigungen (vgl. den bezüglichen Bericht des Institutes für Strassenbau an der ETH von 1957)

Die Kommission hat die Annahme folgender Basiswerte der CO-Produktion beschlossen:
für Personenwagen $Q_0 = 0{,}017$ Nm³/t · km, unter der Annahme von Geschwindigkeiten von 40 bis 60 km/h und eines Benzinverbrauchs von 7 l/100 t · km;
für Last- und Gesellschaftswagen mit Benzinmotor $Q_0 = 0{,}012$ Nm³/t · km, unter der Annahme von Geschwindigkeiten von 40 bis 50 km/h und eines Benzinverbrauchs von 5 l/100 t · km.

Die Untersuchung der Auswirkung der Dieselmotoren auf den Frischluftbedarf führt die Kommission zum Beschluss, die Dieselwagen in der Berechnung zu behandeln, wie wenn sie benzinbetriebene Wagen wären von gleicher Motorstärke unter Einführung eines Zuschlagsfaktors für Dieselwagen von 10 % ($f_d = 1{,}1$). Zu diesen Basiswerten werden die Höhenzuschläge f_h zufolge der Veränderung des Benzin-Luftgemisches angegeben und auch für Dieselwagen angewandt. Dieselmotoren werden in grösseren Höhen zu stärkerer Rauchentwicklung neigen. Es wird deshalb die Anwendung nur kleiner Steigungen bei hochliegenden Tunneln mit merklichem Schwerverkehr besonders empfohlen. In Sonderfällen erheblichen Schwerverkehrs ist gegebenenfalls eine Erhöhung des Dieselzuschlages f_d vorzunehmen. Weiter wird die CO-Produktion bei gehemmter Fahrt, Stillstand mit Motoren im Leerlauf und auf Steigungen untersucht, und es werden die durch die Expertenkommission beschlossenen Zuschlagfaktoren f_f für die Zunahme der CO-Produktion bei freier, gehemmter und stockender Fahrt auf horizontalen Strecken und Steigungen in je einem Diagramm für Personenwagen und für Last- und Gesellschaftswagen dargestellt (Bilder 2 und 3). Hieraus geht klar hervor, in welchem Ausmass starke Steigungen mit Schwerverkehr die erforderliche Tunnelventilation vervielfachen.

Zuschläge für Talfahrt und für schnelle Fahrt werden untersucht und schliesslich wird ein allgemeiner Reserve-Zuschlag von 10 %, d. h. $f_r = 1{,}10$ gefordert.

Weitere Untersuchungen gelten der Temperatur und der Feuchtigkeit im Tunnel, worauf «Der massgebende Verkehrszustand» in einem besonderen Kapitel analysiert wird.

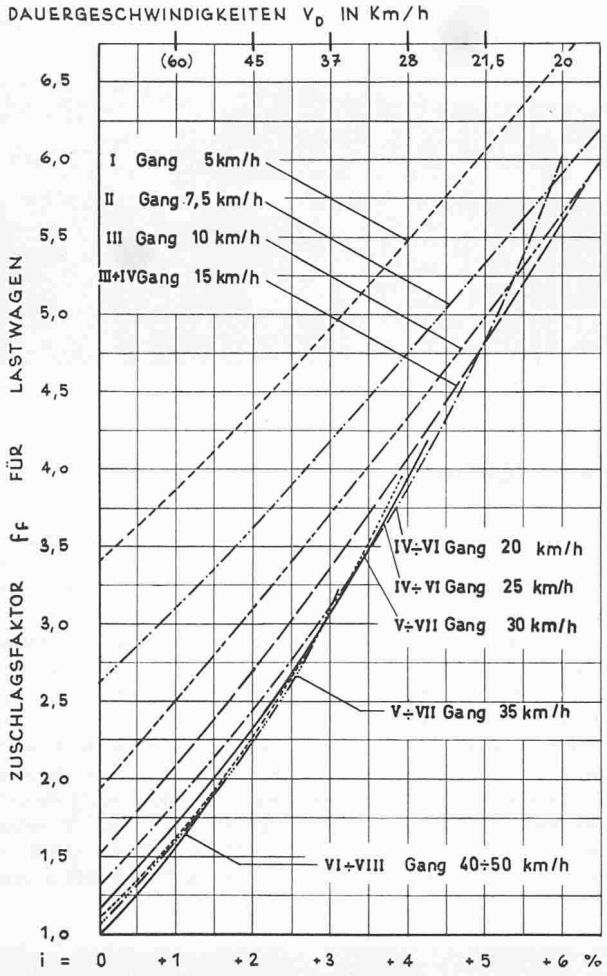

Bild 3. Beschluss der Expertenkommission: Zuschlagsfaktor f_f für Zunahme der CO-Produktion von Last- und Gesellschaftswagen bei freier, gehemmter und stockender Fahrt auf horizontalen Strecken und Steigungen

Als massgebende Verkehrsmenge vom Ventilationsstandpunkt aus wird hierbei die Zehn-Minuten-Spitze postuliert; der für die übliche Rechnung verwendete Stundenwert entspricht dem sechsfachen der Zehn-Minuten-Spitze und nicht der meist kleineren Stundenspitze.

Für die Bemessung der massgebenden Verkehrsmenge sind zwei Kategorien von Tunneln zu unterscheiden: 1. im Zuge der Autobahnen oder Ausfallstrassen grosser Städte ist mit der tatsächlichen Leistungsfähigkeit des Tunnelquerschnittes zu rechnen; 2. für Alpenstrassen- und ähnliche Tunnel ist eine umsichtige Verkehrsprognose aufzustellen, unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit der Zubringerstrecken. Um die Grössenordnung der optimalen Leistungsfähigkeit einer Fahrspur zu veranschaulichen, werden folgende Werte angegeben: 1. ideale Fahrspur, horizontal, 50 bis 60 km/h, offen, 2000 bis 2300 PW/h; 2. im gut ausgebauten Tunnel mit zwei Spuren und Ein-Richtungsbetrieb 2000 PW/h. Als mittleres Bruttogewicht ergibt die Analyse: für Personenwagen 1350 kg, für Lastwagen und Gesellschaftswagen 4500 kg; zur Berechnung besonderer Verkehrskombinationen werden die benötigten Einzelwerte angegeben.

Damit sind alle Elemente zur Berechnung der massgebenden Frischluftmenge festgelegt. In einem Kapitel «Richtwerte und Beispiele» wird der Gang der Berechnung zusammengefasst und in drei durchgerechneten Beispielen für «Alpenstrasse», «Autobahn/Expresstrasse» und «gehemmte und stockende Fahrt oder Stillstand» gezeigt.

Kurz zusammengefasst ergibt sich damit folgender Aufbau für die Berechnung der massgebenden Frischluftmenge des fahrenden Verkehrs: Man berechnet zunächst die beim betrachteten Verkehrszustand erzeugte Menge Kohlenoxyd in $Nm^3/km \cdot h$

$$Q_{CO} = M\, G\, q_{CO}\, f_h\, f_f\, f_d\, f_r$$

Dabei bezeichnen M = die Verkehrsmenge, d. h. die Anzahl Fahrzeuge pro Stunde, G das durchschnittliche Wagengewicht in t pro Fahrzeug, q_{CO} die CO-Produktion in $Nm^3/t \cdot km$, f_h den Zuschlag für die Höhe, f_f für Steigungen und gehemmte Fahrt, f_d den für Dieselfahrzeuge und f_r den Reservezuschlag.

Die Frischluftmenge in $Nm^3/km \cdot h$ ist dann

$$Q_f = 10^6\, Q_{CO}/C_{zul}$$

Diese für die Normalbedingungen $B_0 = 760$ mm Hg und $T_0 = 273°$ K sich ergebende Frischluftmenge ist noch auf die massgebenden Druck- und Temperaturverhältnisse B und T umzurechnen. Doch hier beginnt meist schon die Arbeit des Ventilationsingenieurs.

Ein Literatur- und Quellenverzeichnis schliesst diesen 1. Teil ab.

*

Im 2. Teil des Berichtes wird die Aerodynamik der Tunnellüftung durch Prof. Dr. *J. Ackeret* und Ing. Dr. *A. Haerter* dargestellt. Die Aufgabe lautet hier: Es sollen Lüftungsanlagen entworfen werden, die die Konzentration des CO und der CO-äquivalenten störenden und gefährlichen Abgase in der Verkehrsraumluft bei den verschiedenen vorkommenden Betriebszuständen an allen Stellen unter den von den Physiologen vorgeschriebenen Maximalwerten einzuhalten gestatten. Dabei soll die Lüftungsanlage hinsichtlich Bau- und Betriebskosten möglichst wirtschaftlich sein.

Die möglichen Lüftungssysteme werden in ihrem Grundschema kurz beschrieben, und im Kapitel «Berechnungsgrundlagen» werden die Elemente der Berechnung für alle auftretenden Organe und Einflüsse dargelegt und hierauf auf die einzelnen Lüftungssysteme angewandt. Hieraus werden die Elemente zur Dimensionierung der Luftwege und der Ventilator-Leistung ermittelt. Die wirkenden Einflüsse sind sehr komplex, die massgebenden Grössen ändern sich längs der Fahrbahn bzw. längs den Kanälen. Die Grundgleichungen können also nur in differenzieller Form angegeben werden und sind dann zu integrieren. Hierzu muss mancherorts auf die speziellen Forschungsergebnisse gegriffen werden, die im Literaturverzeichnis zu diesem Teil des Berichtes aufgeführt sind.

In einem Ventilationssystem wirken die Einflüsse von aussen und aus der inneren Gestaltung in derart komplexer Weise aufeinander, dass nur das durchgerechnete Ergebnis ein Urteil vermittelt. Es wird deshalb immer notwendig sein, zur Ermittlung der wirtschaftlichsten Lösung aus Bau und Betrieb verschiedene Varianten vollständig durchzurechnen.

Den Abschluss des zweiten Teiles des Berichtes bildet die explizite Durchrechnung der Belüftung in drei Beispielen: Natürliche Lüftung eines zweispurigen Tunnels von 500 m Länge im Zuge einer Alpenstrasse auf 1640 m ü. M.; Halbquerlüftung eines zweispurigen Tunels von 11,9 km Länge mit Ventilatorenstationen auf 1100 und 1400 m ü. M.; Querlüftung eines zweispurigen Tunnels von 6,5 km auf 1640 m ü. M. mit zwei Luftschächten von 560 m. Diese Rechnungsbeispiele ergeben einen ausserordentlich lehrreichen Einblick in den Gang der Berechnung mit ihrer Vielzahl von Ueberlegungen, in den Einfluss der einzelnen Faktoren und in die erforderliche Ventilatorleistung.

Es geht aus diesen Untersuchungen auch hervor, dass für eine spätere Verstärkung der Lüftung mittels des vorhandenen Kanalsystems der Leistungsbedarf mit der dritten Potenz des Luftmengenverhältnisses ansteigt; eine Erhöhung der grössten Luftmenge um z. B. 25 % verlangt rund eine Verdoppelung der Maschinenleistung.

Adresse des Verfassers: *Erwin Schnitter*, dipl. Ing., Am Itschnacherstich 1, Küsnacht ZH.