

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 100 (1982)  
**Heft:** 49

**Artikel:** Betriebskennlinien längsbelüfteter Stassentunnels  
**Autor:** Fekete, Kalman  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-74905>

### **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:** 01.04.2025

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

Interessenausgleich und Konsensbildung für kommende Entscheide müssen in diesem Rahmen erfolgen. Das neue Rollenverständnis für den Ingenieur in der Ortsplanung beschreibt *Stingelin* [13] wie folgt: «Er (der Planer) wird zum unbedeutenden, bescheidenen, bestenfalls anregenden Glied einer Gemeinschaft, die sich Ziele und Massnahmen selbst erarbeitet. Es bedeutet permanentes Begleiten, permanente Bereitschaft zum «Consulting» und zur Übernahme von Verantwortung. Es verlangt zudem vom Planer, Spannungsfelder zu sehen und sich mit ihnen auseinanderzusetzen.» Auch in

diesem Zusammenhang muss auf die Probleme «Sprache» und «Werbung» hingewiesen werden: «Wenn Information zur Werbung wird, so sind die den Beteiligten zunächst in den Mund gelegten Worte alsdann als substantielle Wünsche entgegenzunehmen. Diese Art des «Interessenausgleichs» ist besonders dann grotesk, wenn die «Werbesprache» eine den Beteiligten bislang unbekannte Fremdsprache ist...» [13]. Möge der intensive Kontakt zwischen Ingenieur und breiten Bevölkerungskreisen allmählich zu einer gemeinsamen Sprache und zum Abbau der Skepsis gegenüber der Technik führen!

Die Voraussetzungen zur konsequenteren öffentlichkeitsbezogenen Berufsausübung sind vorhanden; diese kommt aber erst zaghaft zur Anwendung. Die Arbeitsgruppe Kultur-Ingenieure Zürich (AKIZ) möchte hier einen Impuls zur Ausweitung des Berufsbildes des Kulturingenieurs sowie zur «Öffnung» des Kulturingenieurs gegenüber der Öffentlichkeit vermitteln.

Adresse des Verfassers: Th. Glatthard, dipl. Kultur-Ing. ETH, Arbeitsgruppe Kultur-Ingenieure Zürich, c/o Ch. Oggenfuss, Kurfirstenstrasse 29, 8002 Zürich.

## Betriebskennlinien längsbelüfteter Strassentunnels

Von Kalman Fekete, Zürich

Die Längslüftung (LL) hat einige bestechende Eigenschaften. Sie erfordert niedrige Anlagekosten, ist relativ billig im Betrieb und da sie keinen Luftkanal braucht, kann sie auch nachträglich eingebaut werden, falls es sich in einem ohne Lüftung projektierten Tunnel infolge der Zunahme der Verkehrsfrequenz als notwendig erweist. Bedingung eines nachträglichen Einbaues ist allerdings, dass für die Ventilatoren genügend Platz vorhanden ist und dass sie mit Strom versorgt werden können.

Der Anwendung der LL sind in erster Linie durch die Tunnellänge obere Grenzen gesetzt, wobei jedoch auch die Verkehrsverhältnisse mitbestimmend sind, vor allem wenn es sich um Tunnel mit Gegenverkehr handelt.

### Problemstellung

Die grundlegenden theoretischen Zusammenhänge zur Berechnung von LL sind bekannt. Trotzdem ist die Auslegung und die Steuerung dieser Lüftungsart nicht ganz problemlos da der Betrieb der LL einige *Besonderheiten* aufweist.

Als erstes ist auf die *doppelte Rolle des Verkehrs* hinzuweisen. Er kontaminiert die Tunnelluft mit *Schadstoffen* (Abgase) und er trägt durch die *Kolbenwirkung der Fahrzeuge* ( $\Delta p_k$ ) selber zur Lüftung bei, was häufig alleine ausreicht, um die Konzentration der Schadstoffe innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen zu halten. (Unglücklicherweise kann grosse Schadstoffproduktion auch mit ganz geringer Kolbenwirkung verknüpft sein, wie z. B. bei stockendem Verkehr.) Die in Frage stehenden Schadstoffe sind: *das Kohlenmonoxid (CO) der Benzinmotor-Abgase* und die die Sicht verschlechternden *Russpartikel der Dieselmotor-Abgase*. Nachfolgend wird besonders das CO betrachtet, wobei die Überlegungen sinngemäss auch für den Dieselschmutz gelten.

Eine weitere Besonderheit der LL ist, dass sie auf *meteorologische Einflüsse* (Wind) recht empfindlich ist, vor allem wenn der Tunnel von Gegenverkehr befahren wird. Ebenfalls zu erwähnen ist, dass in Tunneln mit Gegenverkehr sich die Richtung der Kolbenwirkung der Fahrzeuge ändern kann, was die Umkehrbarkeit der Blastrichtung der Strahlventilatoren erforderlich macht.

Alle diese Umstände – zusammen mit der sich ändernden Verkehrsmenge, Verkehrsaufteilung und Fahrzeuggeschwindigkeit – führen dazu, dass zur richtigen Auslegung und Steuerung der LL eine grosse Anzahl von Betriebsfällen überblickt werden muss. Es drängt sich daher der Gedanke auf, zu diesem Zweck ein *Kennlinienfeld* für längsbelüftete Tunnel, wie bei Arbeits- und Antriebsmaschinen üblich, zu erstellen.

### Aufbau des Kennlinienfeldes

Das Kennlinienfeld wird durch die Kolbenwirkung der Fahrzeuge (Gl. 1), durch

Bezeichnungen		
$M$	PWE/h	Verkehrsmenge
$N_+$	PWE/h	Anzahl der PWE im Tunnel in +Richtung fahrend
$N_-$	PWE/h	Anzahl der PWE im Tunnel in -Richtung fahrend
$V$	[km/h]	Fahrzeuggeschwindigkeit
$f_{rcf}$	-	Aequivalente Widerstandsfläche der Fahrzeuge
$v$	-	Verkehrsaufteilung
$L$	[m]	Tunnellänge
$F_v$	[m <sup>2</sup> ]	Tunnelquerschnitt
$D_h$	[m]	Hydr. Durchmesser des Tunnelquerschnittes
$\lambda$	-	Reibungskoeffizient
$\xi_e$	-	Eintrittsverlust-Koeffizient
$u$	[m/s]	Geschwindigkeit der Tunnelluft
$S$	[kp]	Schub des Strahlventilators bei $\rho_0 = 1,17 \text{ kp/m}^3$
$v_s$	[m/s]	Luftgeschwindigkeit beim Austritt aus dem Strahlventilator
$k$	-	Strahlwirkungs-Koeffizient
$n$	[Stk]	Anzahl der Strahlventilatoren
$\Delta H$	[m]	Höhenunterschied der Portale einer Röhre
$T_u$	[K <sup>0</sup> ]	Aussenlufttemperatur beim tiefer liegenden Portal
$\bar{T}_v$	[K <sup>0</sup> ]	Mittlere Tunnellufttemperatur
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Luft
$\rho_u$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Luft beim tiefer liegenden Tunnelportal
$v_w$	[m/s]	Zum Tunnelportal senkrechte Komponente der Windgeschwindigkeit
$C_{co}$	[ppm]	CO-Konzentration
$\bar{C}_{co}$	[ppm]	Mittlere CO-Konzentration im Tunnel

die Druckverluste der Luftströmung im Tunnel (Gl. 2) und durch die Druckerzeugung der Strahlventilatoren (Gl. 3) bestimmt. Hinzu kommen noch die Linien konstanter CO-Konzentration, die sich auf Grund der CO-Produktion und des im Tunnel strömenden Luftvolumens einfach bestimmen lassen. Bei der Ermittlung

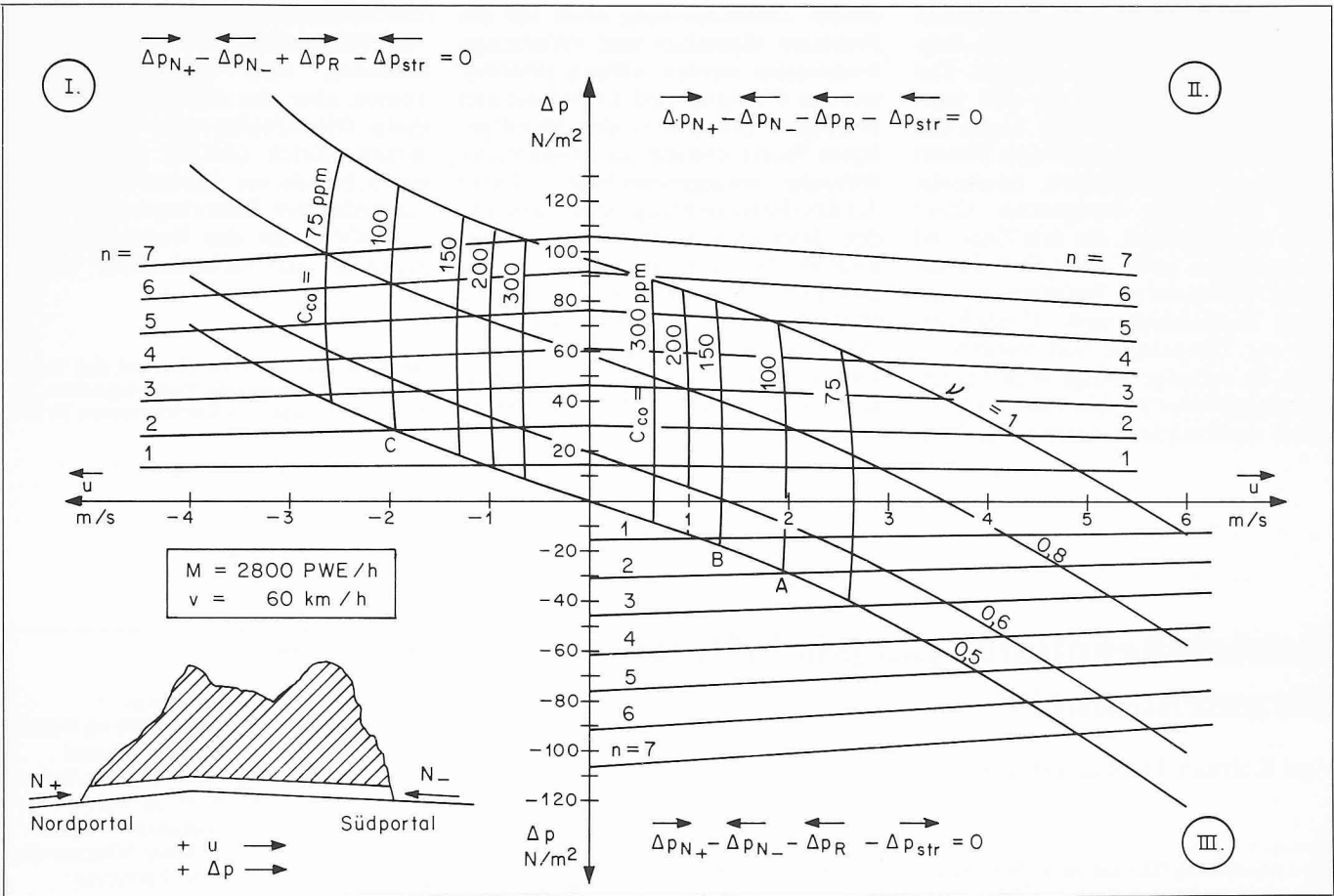
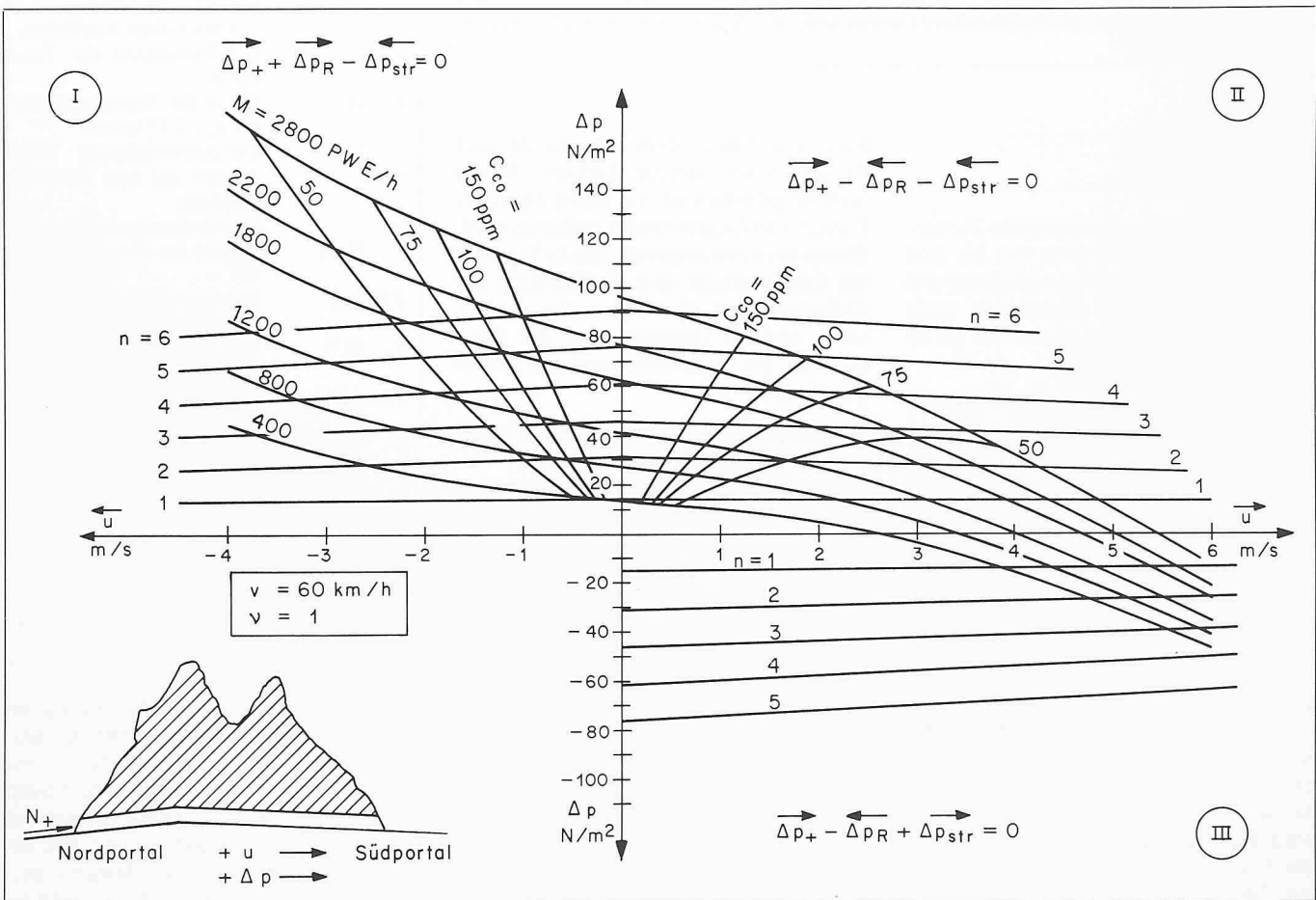


Bild 1. Kennlinienfeld eines längsbelüfteten Strassentunnels. Verkehrsart: Gegenverkehr

Bild 2. Kennlinienfeld eines längsbelüfteten Strassentunnels. Verkehrsart: Richtungsverkehr



der Lage des jeweiligen Betriebspunktes ist ausserdem noch der Winddruck  $\Delta p_w$  (Gl. 4) zu berücksichtigen. Der thermische Auftrieb kann meistens vernachlässigt werden. Ist das aber nicht der Fall, so wird  $\Delta p_{th}$  unter Beachtung des Vorzeichens zu  $\Delta p_w$  addiert.

$$(1) \Delta p_k = \Delta p_{N_+} - \Delta p_{N_-} =$$

$$\frac{f_j c_f}{F_v} \frac{\rho}{2} \left\{ N_+ (V \mp u)^2 - N_- (V \pm u)^2 \right\}$$

$$(2) \Delta p_r = \frac{\rho}{2} \left( \lambda \frac{L}{D_h} + \xi_e + 1 \right) u^2$$

$$(3) \Delta p_{str} = \frac{n \cdot s \frac{\rho}{\rho_0} \left( 1 - \frac{u}{v_s} \right)}{F_v \cdot k}$$

$$(4) \Delta p_w = \frac{\rho}{2} \cdot v_w^2$$

$$(5) \Delta p_{th} = \Delta H \rho_u \cdot \frac{\bar{T}_v - T_u}{\bar{T}_v}$$

Wie sich mit diesen Gleichungen ein Kennlinienfeld aufbauen lässt, ist für einen rund 640 m langen, nach Nord-Süd ausgerichteten und in Gegenverkehr befahrenen zweispurigen Tunnel von 53 m<sup>2</sup> lichten Querschnitt in Bild 1 gezeigt. Parameter des Kennlinienfeldes sind die Aufteilung des Verkehrs auf beide Fahrrichtungen  $v = N_+ / (N_+ + N_-)$  und die Anzahl der Strahlventilatoren  $n$ .

( $v = 1$  bzw.  $v = 0$  bedeuten Richtungsverkehr,  $0 < v < 1$  Gegenverkehr.) Die Linien  $v = \text{Konst.}$  basieren auf Gl. 1 und 2, die Linien  $n = \text{Konst.}$  auf Gl. 3.

Zur Durchführung der Berechnungen wurden ausser den bereits angegebenen Grössen noch die folgenden Tunnel- und Ventilatorparameter eingesetzt:

$$\begin{array}{ll} f_j c_f & = 1,1 & s & = 870 \text{ [N]} \\ \lambda L / D_h & = 1,086 & v_s & = 37,4 \text{ [m/s]} \\ \xi_o & = 0,5 & k & = 1,05 \\ \rho & = 1,138 \text{ [kg/m}^3\text{]} & \rho / \rho_0 & = 0,973 \end{array}$$

Strahlventilatoren mit 870 N Schubkraft gehören zu der stärksten heute erhältlichen Leistungsklasse.

Der Winddruck ( $\Delta p_w$ ) wird bei der Erstellung des Kennlinienfeldes nicht direkt berücksichtigt, da er von der Längsgeschwindigkeit der Tunnelluft ( $u$ ) unabhängig ist. Indirekt macht er sich jedoch dadurch bemerkbar, dass er die Lage des Betriebspunktes verschiebt, wie das an Hand eines Beispiels noch gezeigt wird.

Die in den Bildern 1 und 2 angegebenen  $C_{co} = \text{Konst.}$  Linien beziehen sich auf die im Tunnel vorfindbaren Höchstwerte. Sie gelten also an jener Stelle, wo die Luft den Tunnel verlässt. In stationärem Betrieb

(solcher wird in dieser Arbeit vorausgesetzt) nimmt die CO-Konzentration im Tunnel linear zu und der Mittelwert ( $\bar{C}_{co}$ ) ergibt sich als das arithmetische Mittel der CO-Konzentrationen bei den Portalen. Die CO-Konzentration der Fahrzeuge wurde nach (5) berechnet unter der Annahme, dass der Tunnel vom Norden nach Süden blickend auf 150 m Länge 0,8% Steigung und auf den restlichen 490 m 0,4% Gefälle hat.

In Bild 1 ist für die drei mit Kurven belegten Quadranten des Kennlinienfeldes angegeben, in welche Richtung die einzelnen Druckkomponenten wirken. In den Quadranten I und II blasen die Strahlventilatoren gegen den grösseren Verkehrsanteil (d. h. gegen die resultierende Kolbenwirkung der Fahrzeuge). Der Betrieb in diesen Quadranten ist aus Gründen der Wirtschaftlichkeit zu meiden, es sei denn, er werde bei abgeschalteten Ventilatoren infolge meteorologischer Einflüsse eingestellt. Durch die Umkehr der Blasrichtung der Strahlventilatoren (wovon wegen der Gefahr des Pendelns der Luftsäule im Tunnel allerdings nur beschränkt Gebrauch gemacht werden darf) kann der Betriebspunkt aus dem I. oder II. Quadranten in den III. verlegt werden, wo die Kolbenwirkung der Fahrzeuge gleichsinnig mit der Luftströmung ist und so weniger Ventilatoren zugeschaltet werden müssen.

## Praktische Anwendung

Als Beispiel nehmen wir an, dass der Verkehr in beiden Fahrrichtungen gleich gross ist ( $v = 0,5$ ) und dass zwei Ventilatoren ( $n = 2$ ) gegen Süden blasen. Der sich im III. Quadranten (Bild 1) befindende Betriebspunkt (Schnittpunkt der Linien  $v = 0,5$  und  $n = 2$ ) zeigt, dass unter den gegebenen Umständen das Maximum der CO-Konzentration im Tunnel 100 ppm beträgt (Punkt A).

Der Ausfall eines der beiden Ventilatoren ( $n = 1$ ) hätte den Anstieg der CO-Konzentration auf 180 ppm zur Folge (Punkt B).

Drückt ein Wind mit 29 N/m<sup>2</sup> auf das Südportal (d. h. gegen die Blasrichtung der zwei Ventilatoren), verschiebt sich der Betriebspunkt entlang der Linie  $v = 0,5$  (die Verkehrsaufteilung ist ja unverändert geblieben) mit 29 N/m<sup>2</sup> nach oben d. h. von A nach O. Dort ist die Längsgeschwindigkeit der Tunnelluft jedoch  $u = 0$ , weshalb die CO-Konzentration weit über das Zulässige ansteigt.

Sind trotz des Windes 100 ppm einzuhalten, müssen entweder zu den bereits laufenden zwei Ventilatoren zwei weitere zu-

geschaltet werden (diese würden den Betriebspunkt in seine ursprüngliche Lage d. h. nach Punkt A zurückbringen), oder, es können die schon laufenden zwei Ventilatoren abgestellt werden. Die Belüftung des Tunnels erfolgt dann in umgekehrter Richtung ausschliesslich durch den Wind und der Betriebspunkt befindet sich im I. Quadranten (Punkt C).

Im Kennlinienfeld lassen sich auch andere Betriebsänderungen auf einfache und anschauliche Weise verfolgen, so z. B. die Auswirkung der Änderung von  $v$  auf die CO-Konzentration bei gleichbleibender Gesamtverkehrsmenge.

Bei der Benützung des Kennlinienfeldes gilt generell, dass der Betriebspunkt zuerst unter der Annahme  $\Delta p_w = 0$  gesucht und erst nachher dem Winddruck (und dem thermischen Auftrieb) entsprechend verschoben wird.

Falls der gleiche Tunnel von Richtungsverkehr befahren wird, gilt das Kennlinienfeld in Bild 2. Hier wurde anstelle der Verkehrsaufteilung, deren Wert ja jetzt fest  $v = 1$  beträgt, die Verkehrsmenge als Parameter eingeführt.

Wie aus Bild 2 hervorgeht, kann der Tunnel die angegebenen Verkehrsmengen ohne künstliche Ventilation schlucken. In den meisten Fällen wird die Erstellung von Betriebskennlinien für mehr als eine Fahrzeuggeschwindigkeit und bei Gegenverkehr für mehr als eine Verkehrsmenge notwendig sein.

## Literaturverzeichnis

- [1] Meidinger, U.: «Längslüftung von Autotunneln mit Strahlgebläsen.» Schweiz. Bauzeitung, Heft 28, 1964
- [2] Haeter, A.: «Lüftungssysteme. Tunnel- und Stollenlüftung, Projektierung, Bau und Betrieb.» Referate der Studientagung vom 8. April 1976 in Bern
- [3] Die Lüftung der Autotunnel. Bericht der Expertenkommission für Tunnellüftung an das Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau. Mitt. Inst. für Strassenbau, ETH, Nr. 10, 1960
- [4] Reale, F.: «Fundamentals and application of induction ventilation systems of vehicle tunnels.» Internat. Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, April 1973, University of Kent at Canterbury
- [5] Haeter, A.: «Fresh Air Requirements for Road Tunnels.» Internat. Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, April 1973, University of Kent at Canterbury
- [6] Olmos-Bartual, V. und Richarts, F.: «Die Lüftung von kurzen und mittellangen Strassentunneln.» Heizung - Lüftung - Haustechnik 29 (1978) Nr. 8
- [7] Plaskowski, Z.: «Zur Möglichkeit aerodynamischer Verfeinerung von Strahlaggregaten für Tunnellüftung.» Schweiz. Bauzeitung, Heft 11, 1973

Adresse des Verfassers: Dr. Ing. K. Fekete, Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, 8022 Zürich.