

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 85 (1967)  
**Heft:** 28

**Artikel:** Experimentelle Untersuchungen des Strömungskurzschlusses zwischen einem Strassentunnel-Portal und einer Frischluft-Ansaugöffnung: ein Beitrag zur Aerodynamik der Tunnellüftung  
**Autor:** Anet, Bernhard  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-69493>

### **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:** 23.02.2026

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

## Experimentelle Untersuchung des Strömungskurzschlusses zwischen einem Strassentunnel-Portal und einer Frischluft-Ansaugöffnung

DK 697.92:624.19

### Ein Beitrag zur Aerodynamik der Tunnellüftung

Von **Bernard Anet**, dipl. Ing., Assistent am Institut für Aerodynamik, ETH, Zürich

#### 1. Einleitung

Bei Anlagen für die Lüftung von Strassentunnels müssen häufig Austritts- und Eintrittsbauwerke aus baulichen Gründen relativ nahe beieinander angeordnet werden. Dabei ist zu untersuchen, ob der im Prinzip stets vorhandene Strömungskurzschluss gefährliche Werte annehmen kann, bzw. wie weit die Öffnungen auseinanderliegen müssen, damit die Rezirkulation unerheblich wird.

In der vorliegenden Arbeit wird zunächst eine besondere Anordnung näher untersucht, die für einen Zwillingstunnel mit richtungsgetreuten Fahrbahnen bei der Projektierung der Autobahn Lausanne-St. Maurice in Frage stand. Da die Strömung naturgemäss sehr kompliziert ist, kam nur ein geeignetes *Modell-Experiment* in Betracht. Die Ergebnisse dürften auch für solche Öffnungsformen anwendbar sein, die etwas von den im Modell verwendeten abweichen. Anschliessend wird das Problem der sich bei Rezirkulation im stationären Betrieb einstellenden *Konzentration* an schädlichen Gasen (CO bzw. Rauch) rechnerisch untersucht. Bei unzureichender Anordnung der Öffnungen ergeben sich beträchtliche Erhöhungen, die unbedingt beachtet werden müssen. Auf relativ einfache Abhilfemassnahmen wird hingewiesen.

#### 2. Die Projekt-Situation

Die Projekt-Situation, die der Modellanordnung zu Grunde gelegt wurde, ist im Bild 1 angedeutet. A und B sind die Fahrbahnen, a und b die Zuluft-Öffnungen. Bei Windstille wird die Rezirkulation von B nach a unbedeutend sein gegenüber jener von B nach b. Bei Querwind könnte sie sich unter Umständen bemerkbar machen und müsste deshalb näher untersucht werden.

Im Tunnel ist das System der *Halbquerlüftung* nach Bild 2 vorgesehen. Die an den beiden Seiten angesaugte Frischluft wird regelmässig in den Tunnelraum eingeführt. Es bildet sich also beim leeren Tunnel ein symmetrisches Strömungsbild. Die Tunnelluft wird an den beiden Portalen wieder ins Freie abgeblasen. Die Verkehrsverhältnisse und die meteorologischen Einflüsse (zum Beispiel Windstau-effekte) bewirken eine Längsverschiebung der Symmetrieachse des Lüftungssystems (s. Bild 15).

#### 3. Modell-Versuchs-Prinzip und Messeinrichtung

##### 3.1. Die Messmethode

Was der Ingenieur in erster Linie wissen will, ist der rezirkulierende Luftvolumenfluss und dessen Konzentration an schädlichen Bestandteilen, wenn die Geometrie des Portals, die Gaskonzentration im Tunnel und die Lüftungsparameter gegeben sind. Diese Probleme wurden auf folgende Art untersucht: Es wurden vereinfachte Modelle des Tunnelportals und der Ansaugöffnung hergestellt. Für eine bestimmte Anordnung wurde ein gewisses Volumenflussverhältnis der Tunnel- und Zuluftkanäle eingestellt, und die Konzentration des der Tunnelluft beigefügten Testgases auf einem Schreiber registriert; unmittelbar nachher wurde dann die Konzentration der angesaugten Luft aufgenommen und somit der Rezirkulationsgrad bestimmt.

Als Versuchsgas ist nicht CO, sondern N<sub>2</sub>O gewählt worden, weil es stabil ist und in der freien Atmosphäre fehlt. Die Theorie der Vermischung zeigt, dass diese durch die Natur des Gases (N<sub>2</sub>O an Stelle von CO) sehr wenig beeinflusst wird. Die Messung der Gaskonzentration erfolgte mit Hilfe eines Infra-Rot-Gasanalytators, dessen Empfindlichkeit und Zeitkonstante (abhängig von der Filteranordnung) als sehr gut bezeichnet werden können<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Der Infra-Rot-Gasanalysator (Messbereiche 0–50, 0–500, 0–5000 ppm) wurde in entgegenkommender Weise nach unseren Wünschen von der Firma Hartmann & Braun AG, Frankfurt am Main, angepasst und zur Verfügung gestellt.

##### 3.2. Die Messeinrichtung

Bild 3 zeigt schematisch den Aufbau der Versuchsstrecke. Das gewählte Seitenverhältnis (2 : 1) der rechteckigen Versuchskanäle kommt dem praktischen Ausführungsvorschlag nahe. Es ist klar, dass die allgemeine Ähnlichkeitsbedingung, also die Gleichheit der *Re*-Zahl ( $Re = u D_h / \nu$ ), bei unseren Modellversuchen nicht erfüllt werden konnte, da die dafür notwendigen Geschwindigkeiten nicht zu verwirklichen sind. Bekanntlich sind aber die Mischungsvorgänge

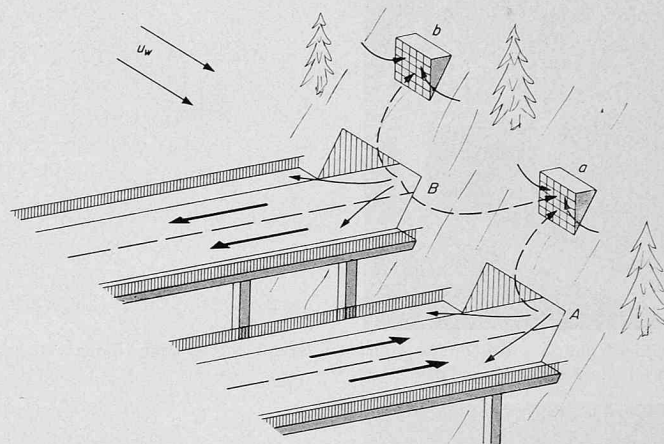


Bild 1. Schematische Darstellung der Projektsituation. Das Portal B liegt höher als das Portal A. Der Niveauunterschied zwischen der Luftfassung a und dem Portal B ist gering, was bei Querwind die diagonale Rezirkulation von B nach a begünstigt. Die Brücke vor dem Portal ist um die üblichen Pannestreifenbreite breiter als die Tunnelöffnung. Deren Kanten sind scharf, die der Ansaugöffnung abgerundet

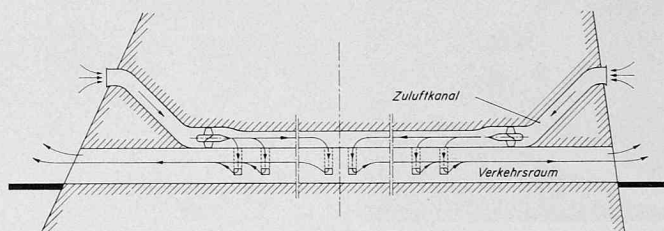


Bild 2. Prinzipschema der Halbquerlüftung. Das Bild zeigt den Fall einer symmetrischen Luftverteilung (bei Windstille und ohne Verkehr oder dann, wenn Windstau-effekte und Verkehrseinfluss sich aufheben)

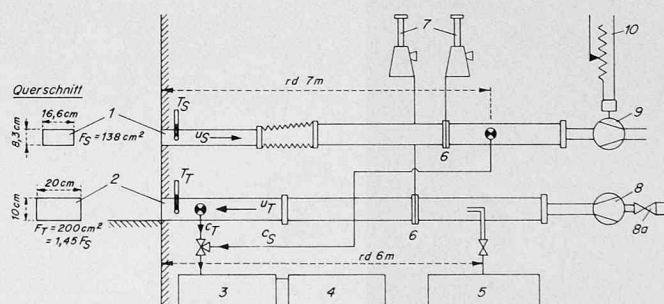
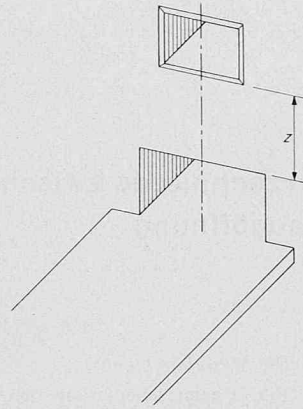
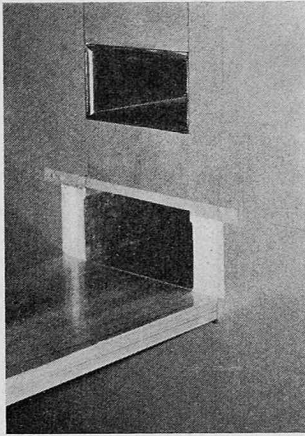
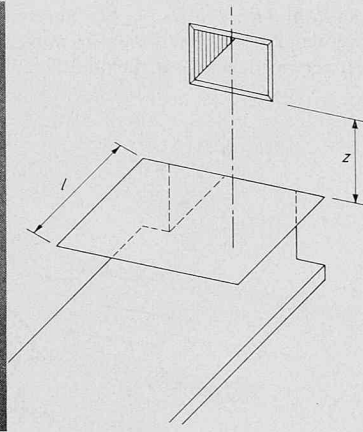
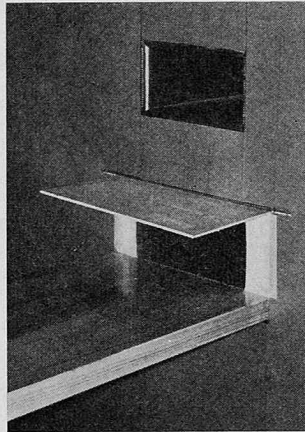


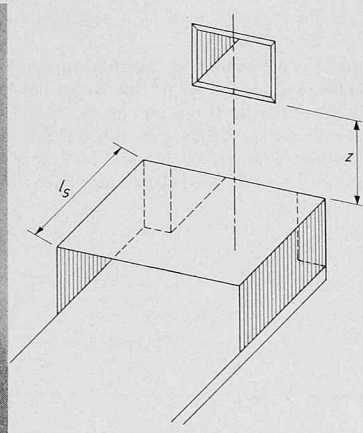
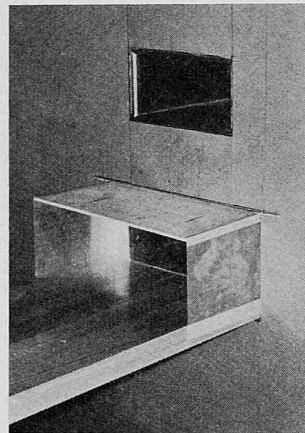
Bild 3. Versuchsordnung. 1 Ansaugöffnung, 2 Tunnelportal, 3 Glasanalysator, 4 Schreiber, 5 N<sub>2</sub>O-Dosiervorrichtung, 6 Messblende, 7 Topfmanometer, 8 Gebläse, 8a Drosselung, 9 Absaugventilator, 10 Regulierwiderstand



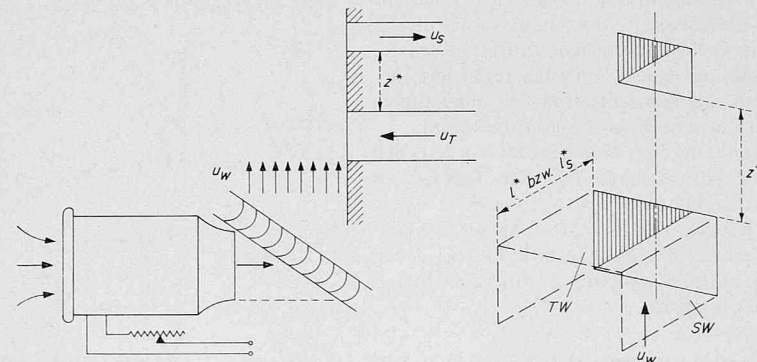
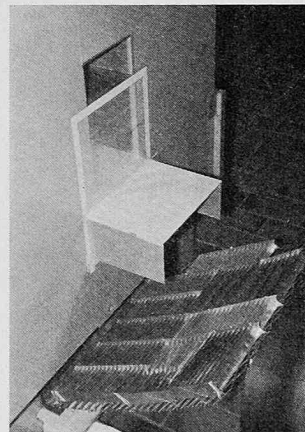
Bilder 4 und 4a. Modell zur Untersuchung der vertikalen Rezirkulation ohne Vordach



Bilder 5 und 5a. Wie Bilder 4 und 4a, jedoch mit Vordach. Dieses ist so breit wie die Brücke vor dem Portal



Bilder 6 und 6a. Wie Bilder 4 und 4a, jedoch mit Vordach und Seitenwänden



Bilder 7 und 7a. Modell zur Untersuchung der Rezirkulation bei Aufwind. TW Trennwand über dem Tunnelportal (Vordach), SW Seitenwände

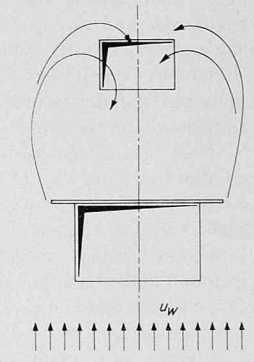


Bild 7b. Bildung stationärer Wirbel hinter der Trennwand infolge Aufwind

fast unabhängig von der Re-Zahl. Vorversuche haben diese Eigenschaft im Falle der Rezirkulation bestätigt. Die Grösse der mittleren Geschwindigkeiten der Tunnel- bzw. Zuluftkanalströmung entspricht zufällig denjenigen Werten, die bei der Grossausführung vorgesehen sind. Diese Strömungsgeschwindigkeiten wurden mittels Blendenmessungen ermittelt. Die Blenden sorgten auch dafür, dass die Vermischung des Testgases über den Messquerschnitten vollständig war.

Die Tunnelluft wurde mit dem Testgas etwa 6 Meter vor dem Modellportal durchsetzt und ihre Konzentration kurz vor dem Portal gemessen. Die Rezirkulations-Konzentration wurde in dem sorgfältig abgedichteten Ansaugrohr nach etwa 7 Metern bestimmt. Der Einfluss der Temperaturunterschiede, die zwischen der Tunnelluft und der Aussenluft vorkommen können, wurde bei unseren Modellversuchen nicht untersucht.

#### a. Die Messanordnung zur Untersuchung der vertikalen Rezirkulation ohne Windeinfluss

Diese Anordnung ist in den Bildern 4 und 4a dargestellt.

#### b. Einfluss von Tunnelvorbauten ohne Windeinfluss

Der Einfluss von Tunnelvorbauten in Form eines an der Tunneloberseite angebrachten Vordaches nach den Bildern 5 und 5a wurde untersucht, ebenso der eines Vordaches mit Seitenwänden (Vortunnel), nach den Bildern 6 und 6a.

#### c. Rezirkulationsprobleme mit Aufwind

Für die Versuche mit Aufwind ist die gleiche Anordnung, jedoch ohne Brücke benützt worden. Ein fester Abstand zwischen dem Tunnelrohr und der Ansaugstelle wurde eingestellt. Der Einfluss von Vorbauten in der Form einer Trennwand und einer Kombination von Trennwand und Seitenwänden nach den Bildern 7 und 7a hat man ebenfalls untersucht. Auf Grund dieser Untersuchungen können näherungsweise auch Rückschlüsse hinsichtlich der in Bild 1 erwähnten *diagonalen* Rezirkulation unter Querwindeinfluss gezogen werden, wenn das Niveau der Öffnung a etwa jenem des Tunnelportals B entspricht.

### 4. Bezeichnungen

Der Index  $T$  bezieht sich auf die Tunnelöffnung, der Index  $S$  auf die Ansaugöffnung. Die mit (\*) bezeichneten Grössen beziehen sich auf den Fall der Rezirkulation mit Aufwind.

#### Geometrische Bezeichnungen:

$F_T F_S$	Querschnittsfläche der Öffnungen (für den Tunnel ist der Verkehrsraum massgebend)
$S_T S_S$	Umfang der Querschnittsfläche
$D_{hT}$	hydraulischer Durchmesser des Tunnels ( $D_{hT} = 4 F_T / S_T$ )
$z$	vertikaler Abstand zwischen der Oberseite der Tunnelöffnung und der Unterseite der Ansaugöffnung (Bild 4a)
$l$	Länge des Vordaches (Bild 5a)
$l_s$	Länge des Vordaches mit Seitenwänden (Bild 6a)

#### dimensionslose Parameter:

$\zeta = z / D_{hT}$	dimensionsloser Abstand
$\tau = l / D_{hT}$	dimensionslose Vordachlänge
$\tau_s = l_s / D_{hT}$	dimensionslose Vordach- plus Seitenwändenlänge

# Aerodynamische Bezeichnungen:

$u_T, u_S$	mittlere Geschwindigkeit am Tunnelaustritt bzw. an der Ansaugöffnung
$u_W$	Aufwindgeschwindigkeit
$Q_T, Q_S$	Volumenfluss
dimensionslose Parameter:	
$\sigma = u_T/u_S$	Geschwindigkeitsverhältnis
$\delta = Q_T/Q_S$	Volumenflussverhältnis
$\sigma^* = u_W/u_T$	dimensionslose Aufwindgeschwindigkeit

# Übrige Bezeichnungen:

$\mu = c_S/c_T$	Rezirkulationsgrad (oder einfach Rezirkulation), das heisst Verhältnis der Gaskonzentrationen im Tunnel- bzw. Ansaugrohr
$\alpha = \frac{Q_S c_S}{Q_T c_T} = \frac{\mu}{\delta}$	rezirkulierender Gasvolumenfluss, bezogen auf den auströmenden Gasvolumenfluss des Tunnels

## 5. Messprogramm

Vor den Versuchen wurden die Messblenden geeicht; weiter hat man geprüft, ob sich die Konzentration des Testgases gleichmässig über die Messquerschnitte verteilt; und schliesslich ist kontrolliert worden, ob der Rezirkulationseffekt von der  $Re$ -Zahl tatsächlich unabhängig sei.

### 5.1. Die vertikale Rezirkulation ohne Windeinfluss

a. ohne Vorbauten: Bei der Anordnung gemäss Bild 4a wurde der Abstand  $z$  systematisch variiert. Um unsere Untersuchung an die verschiedenen Lüftungszustände anzupassen, wurden für jedes  $z$  verschiedene Volumenflussverhältnisse  $\delta$  eingestellt.

#### b. Vorbauten:

Vordach allein (Bild 5a). Das gleiche Messprogramm wie unter 5.1.a. wurde mit verschiedenen Vordachlängen  $l$  wiederholt.

Vordach mit Seitenwänden: Das allgemeine Messprogramm wurde mit Variationen von  $l_s$  durchgeführt.

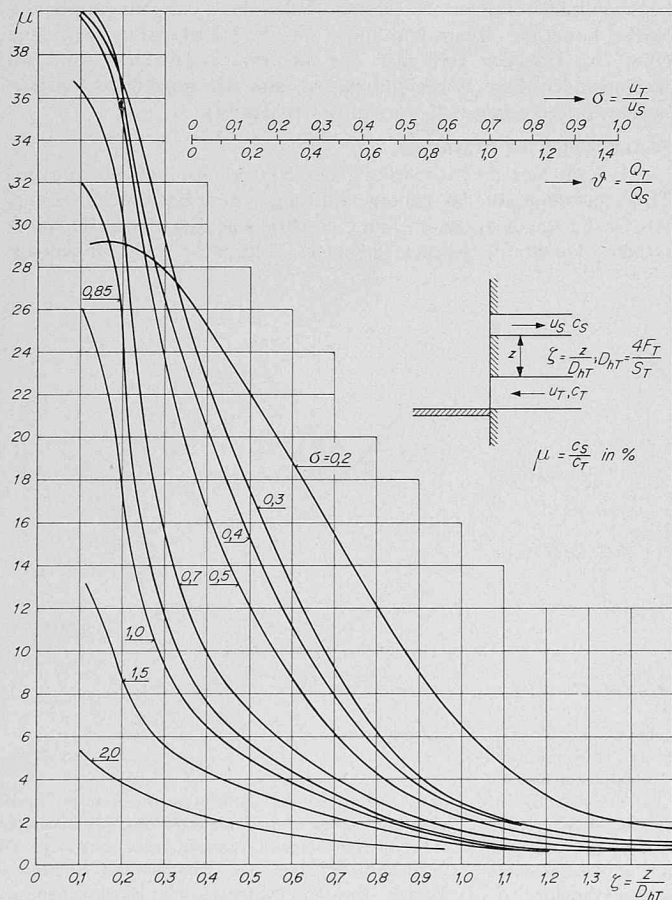


Bild 9. Wie Bild 8, jedoch in Abhängigkeit vom Abstand  $\zeta$  für verschiedene Geschwindigkeitsverhältnisse  $\sigma$  (aus Bild 8 abgeleitet)

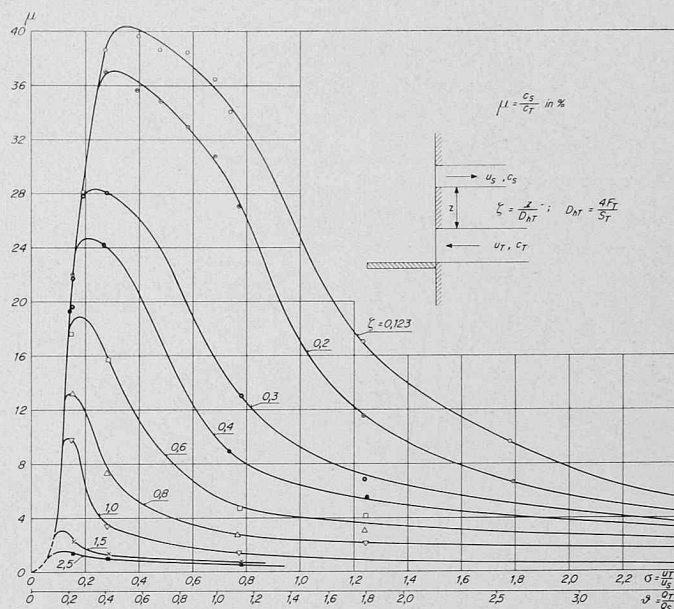


Bild 8. Rezirkulationsgrad  $\mu$  bei vertikaler Rezirkulation ohne Vorbauten in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis  $\sigma$  (bzw. Volumenflussverhältnis  $\delta$ ) für verschiedene Abstände  $\zeta$

### 5.2. Die Rezirkulation unter Aufwindeinfluss

Bei diesen Versuchen wurde der Abstand  $z^*$  (Bild 7a) konstant gehalten. Eine direkte Rezirkulation (ohne Windeinfluss) war in diesem Falle nicht zu befürchten.

#### a. ohne Vorbauten:

1. Versuch: Hier wurde der Einfluss der Aufwindstärke untersucht. Dabei wurden die ausgeblasenen und die angesaugten Volumina gleich gross gehalten, während die Aufwindgeschwindigkeit  $u_W$  variiert wurde.

2. Versuch: Es wurde der Einfluss des Volumenflussverhältnisses  $\delta$  bei konstanter Windgeschwindigkeit  $u_W$  untersucht.

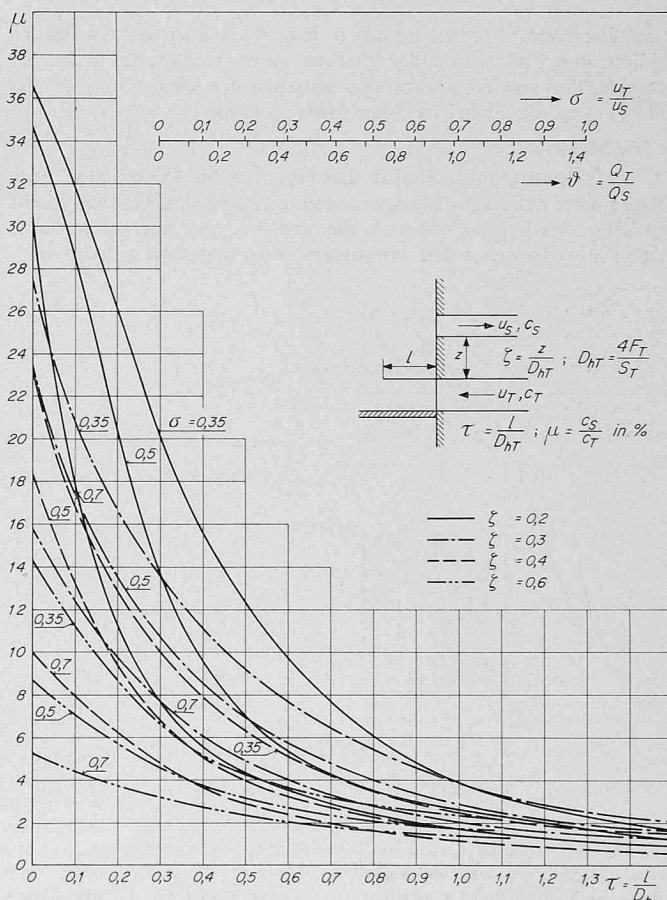


Bild 10. Rezirkulationsgrad  $\mu$  bei vertikaler Rezirkulation mit Vordach in Abhängigkeit von der Dachlänge  $\tau$  für verschiedene Werte  $\sigma$  und  $\zeta$

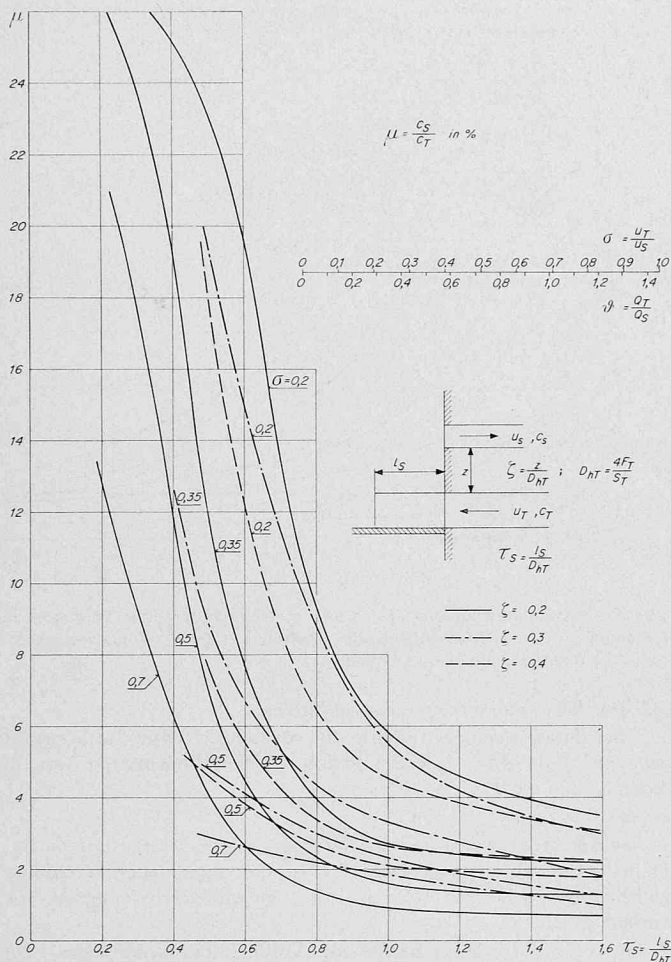


Bild 11. Wie Bild 10, jedoch mit Vordach und Seitenwänden

**b. mit Vorbauten:** Für den aus den 1. und 2. Versuchen sich ergebenden schlimmsten Fall wurde der Einfluss einer Trennwand und einer Kombination von Trennwand und Seitenwänden (Anordnung gemäss Bild 7a) geprüft. Dabei hat man  $l$  bzw.  $l_s$  variiert.

## 6. Die Messergebnisse

Die Messergebnisse sind in den Bildern 8 bis 15 enthalten. Jene Diagramme, auf denen Messpunkte eingetragen sind, beruhen direkt auf den Messungen, während die anderen, die nur ausgezogene Linien aufweisen, aus den Messdiagrammen abgeleitet worden sind.

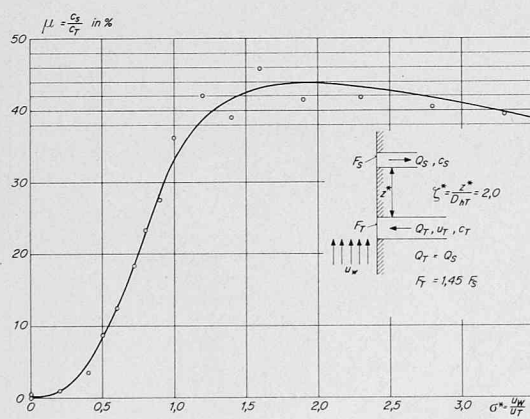


Bild 12. Rezirkulationsgrad  $\mu$  bei Aufwind ohne Trennwand in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis  $\sigma^*$ . Die ausgeblasene Menge  $Q_T$  ist gleich der angesaugten Menge  $Q_S$ . Beim gewählten Abstand  $\zeta^*$  wäre ohne Wind keine Rezirkulation zu befürchten (siehe Bild 9)

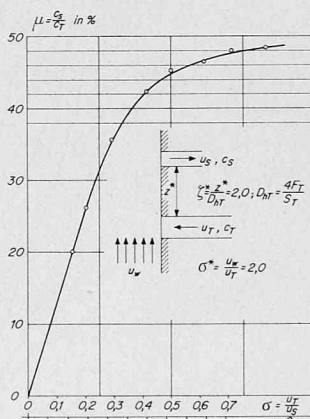


Bild 13. Ausgehend von den Ergebnissen des Bildes 12 wurde dem Parameter  $\sigma^*$  einen konstanten Wert gegeben, bei dem die Rezirkulation am grössten ist ( $\sigma^* = 2$ ). Rezirkulationsgrad  $\mu$  bei Aufwind ohne Trennwand in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis  $\sigma$  (bzw. vom Volumenflussverhältnis  $\vartheta$ )

## 6.1. Die vertikale Rezirkulation ohne Windeinfluss

a. ohne Vorbauten (Anordnung nach Bild 4a).

Wie die Diagramme 8 und 9 zeigen, kann der Rezirkulationsgrad grosse Werte annehmen, wenn der Abstand  $\zeta$  klein ist, was zu vermuten war. Ein Maximum ergibt sich bei einem Volumenflussverhältnis  $Q_T/Q_S = 0,5$ . Es ist interessant festzustellen, wie rasch die Rezirkulation mit einer Vergrösserung des Abstandes  $\zeta$  abnimmt (Bild 9). Der abfallende Verlauf der Kurven in Bild 8 bei kleinem Volumenflussverhältnis  $\vartheta$  ist dadurch zu erklären, dass die angesaugte Frischluftmenge weitgehend die fast vollständig rezirkulierende Tunnelluft überwiegt.

b. mit Vorbauten:

Die allgemeine Gesetzmässigkeit, die wir bei den Versuchen ohne Vorbauten festgestellt haben, ist wieder anzutreffen. Mit einem Vordach allein: (Anordnung nach Bild 5a) wird, wie aus Bild 10 ersichtlich, hinsichtlich der vertikalen Rezirkulation eine wesentliche Verbesserung erreicht. Schon eine geringe Vordachlänge  $l$  ist wirksam. Das Vordach mit Seitenwänden: (Bild 6a) ergibt aber keine Verbesserung der mit dem Vordach allein gewonnenen Resultate, Bild 11. Erstaunlicherweise ist die Rezirkulation  $\mu$  sogar in gewissen Bereichen grösser.

## 6.2. Die Rezirkulation unter Aufwindeinfluss

Dieser Rezirkulationsfall muss sorgfältig betrachtet werden, wenn Aufwind vorhanden ist. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass Aufwind eine Verschlimmerung hinsichtlich der Rezirkulation verursacht.

a. ohne Vorbauten: (Anordnung nach Bild 7a)

Bild 12 zeigt, dass der Rezirkulationsgrad  $\mu$  schon bei geringer Windstärke rasch ansteigt. Strömungsbeobachtungen mit Rauch und mit der Fadensonde haben die grosse Empfindlichkeit des Strahles auf äussere Wirkungen (wie z.B. Aufwind) bestätigt. Der Strahl wird sofort nach Verlassen der Öffnung in die Windrichtung gekrümmt, ähnlich wie der Rauch eines Kamins bei Wind. Dadurch lassen sich die hohen Rezirkulationswerte erklären. Ungünstigere Mengenverhältnisse verschlechtern das Phänomen, wie aus Bild 13 hervorgeht.

b. mit Vorbauten

Eine Trennwand allein ( $\tau^*$ -Verlauf in Bild 14) reduziert schon die Rezirkulation, aber nicht in genügendem Masse. Die Strömungsbeobachtungen zeigten in diesem Falle, dass sich ein stationärer Wirbel hinter der Trennwand bildet, was die Rezirkulation begünstigt (Bild 7b). Dagegen verhindert die Anordnung der Trennwand mit Seitenwänden diese Wirbelbildung, so dass sich günstigere Rezirkulationswerte ergeben ( $\tau^*$ -Verlauf des Bildes 14).

## 7. Anwendung der Ergebnisse

Es soll hier die Auswirkung des Rezirkulationseffektes an den Tunnelportalen auf das gesamte Lüftungssystem untersucht werden. Als Grundlage dient das im Bild 2 beschriebene System der *Halbquerlüftung*. Qualitativ gesehen geschieht folgendes: Eine ungünstige

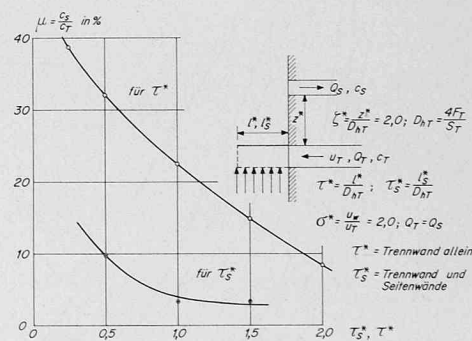
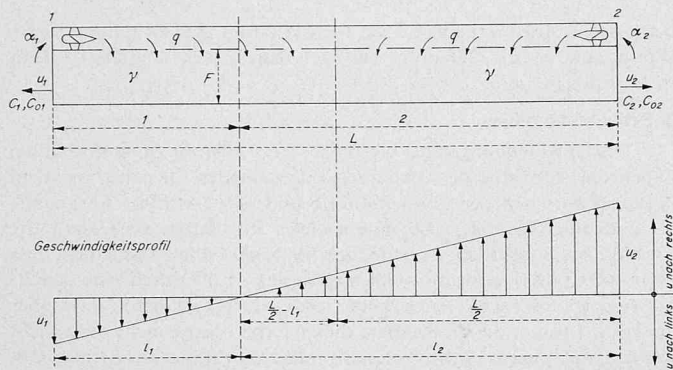


Bild 14. Rezirkulationsgrad  $\mu$  bei Aufwind mit Trennwand ( $\tau^*$ ), bzw. mit Trennwand und Seitenwänden ( $\tau_s^*$ ) in Abhängigkeit von der Trennwandlänge. Die Windstärke  $\sigma^*$  und das Volumenflussverhältnis  $\vartheta$  wurden konstant gehalten und entsprechen den Fällen mit grösstem Rezirkulationsgrad  $\mu$  der Bilder 12 und 13



Anordnung der Tunnelöffnung und der Frischluft-Ansaugöffnung hat einen gewissen Strömungskurzschluss zur Folge. Die dem Tunnelraum zugeführte Luft enthält also CO, was zusammen mit den Abgasen der sich im Verkehrsraum befindenden Fahrzeuge die CO-Konzentration im Tunnel erhöht. Dadurch wird wiederum die Konzentration der angesaugten Luft am Portal höher. Es tritt folglich ein Ansteigen der CO-Konzentration im Tunnel bis zu einem bestimmten Grenzwert ein, denn, da die Rezirkulation nicht vollständig ist, wird stets ein Anteil an frischer Luft zugeführt. Es sollen die Berechnungsformeln für diese stationären Endwerte des betrachteten Lüftungssystems angegeben werden. Dabei sei der allgemeine Fall angenommen, wo das Geschwindigkeitsprofil über der Tunnelweite durch die Verkehrsverhältnisse und durch die meteorologischen Einflüsse entsprechend Bild 15 seitlich verschoben ist.

### 7.1. Zusätzliche Bezeichnungen

- $c_1, c_2$  die CO-Konzentration an den Tunnelportalen (gesuchte Endwerte)  
 $c_{01}, c_{02}$  die CO-Konzentration an den Tunnelportalen, falls keine Rezirkulation vorhanden wäre, d.h. unter Voraussetzung eines ideal arbeitenden Lüftungssystems.  
 $q$  [m<sup>2</sup>/s] der Luftstrom, der je Meter Tunnelweite aus den Zufuhrkanälen in den Verkehrsraum tritt  
 $\gamma$  [m<sup>2</sup>/s] die sekundlich im Tunnel erzeugte Gasmenge je Meter Tunnelweite

Der rezirkulierende Tunnelluft-Volumenstrom sei  $\alpha Q_T$ ; dabei ist  $\alpha$  zunächst aus den gemessenen Werten der Modellversuche zu bestimmen. Es war

$$\alpha Q_T c_T = Q_S c_S$$

mit  $Q_T/Q_S = \vartheta$  und  $c_S/c_T = \mu$  ist  $\alpha = \mu/\vartheta$

### 7.2. Ableitung der Formeln

Unter Verwendung der im Bild 15 angeführten Bezeichnungen gelten folgende Beziehungen:

Tunnelabschnitt 1		Tunnelabschnitt 2
$q l_1 = u_1 F = Q_1$	Ausfluss	$q l_2 = u_2 F = Q_2$
$q \frac{L}{2} = Q_S$	Angesaugt am Portal	$q \frac{L}{2} = Q_S$
$\gamma l_1$	Gasproduktion	$\gamma l_2$
$\alpha_1 Q_1 c_1 \frac{l_1}{L/2}$	Rezirkulation	$\alpha_2 c_2 Q_2 + \alpha_1 c_1 Q_1 \frac{L/2 - l_1}{L/2}$

Die Bilanzen für das CO-Gas ergeben:

#### Tunnelaustritt 1

- (1) ohne Rezirkulation  $Q_1 c_{01} = \gamma l_1$   
 (2) mit Rezirkulation  $Q_1 c_1 = \gamma l_1 + \alpha_1 Q_1 c_1 \frac{l_1}{L/2}$

#### Tunnelaustritt 2

- (3) ohne Rezirkulation  $Q_2 c_{02} = \gamma l_2$

Bild 15 (links). Luftströmung bei Halbquerlüftung mit Bezeichnung der Luftgeschwindigkeiten.  
 Unten: Geschwindigkeitsprofil der Strömung im Verkehrsraum

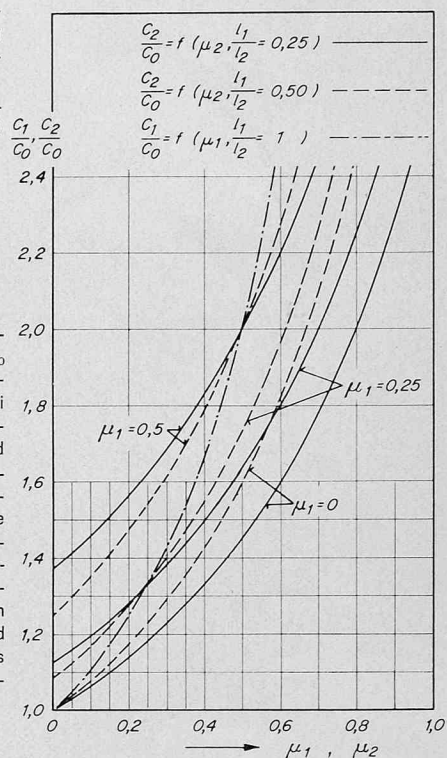


Bild 16 (rechts). Konzentrationsverhältnis  $c_2/c_0$  in Abhängigkeit vom Rezirkulationsgrad  $\mu_2$  bei verschiedenen Längenverhältnissen  $l_1/l_2$  und verschiedenen Rezirkulationsgraden  $\mu_1$  (ausgezogene und gestrichelte Kurven). Konzentrationsverhältnis  $c_1/c_0$  in Abhängigkeit vom Rezirkulationsgrad  $\mu_1$  für den Tunnelabschnitt  $l_1$  und beim Längenverhältnis  $l_1/l_2 = 1$  (stichpunktisierte Kurve)

$$(4) \text{ mit Rezirkulation } Q_2 c_2 = \gamma l_2 + \alpha_2 c_2 Q_2 + \alpha_1 Q_1 c_1 \left[ 1 - \frac{l_1}{L/2} \right]$$

Es gelten weiter  $Q_1/Q_2 = l_1/l_2$ , folglich aus (1) und (3)

$$c_{01} = c_{02} = c_0$$

Aus den Gleichungen (1) und (2) ergibt sich

$$(5) \quad \frac{c_1}{c_{01}} = \frac{1}{1 - \alpha_1 \frac{l_1}{L/2}}$$

Gleichung (5) lässt sich vereinfachen, da

$$Q_1 = q L/2 - q [L/2 - l_1] \quad Q_2 = q L/2 + q [L/2 - l_1]$$

Nach Division durch  $Q_S = q \cdot L/2$  und nach Vereinfachung folgt

$$(6) \quad \vartheta_1 = \frac{2 l_1}{L} \quad \text{und} \quad \vartheta_2 = \frac{2 l_2}{L}$$

somit

$$(7) \quad \frac{c_1}{c_0} = \frac{1}{1 - \mu_1}$$

Wir subtrahieren ferner Gleichung (3) von (4) und erhalten nach Einsetzen von Gleichung (5)

$$(8) \quad \frac{c_2}{c_0} = \frac{1 + \frac{\alpha_1}{1 - \mu_1} \frac{l_1}{L/2} \left[ 1 - \frac{l_1}{L/2} \right]}{1 - \alpha_2}$$

und nach Umformen mit (6) und (7)

$$(9) \quad \frac{c_2}{c_0} = \frac{1 + \frac{\mu_1}{1 - \mu_1} \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{l_1}{L/2} \right]}{1 - \frac{1}{2} \mu_2 \left[ 1 + \frac{l_1}{L/2} \right]} \quad \text{mit} \quad \frac{l_1}{L/2} = \frac{u_1}{u_2}$$

Einige Verläufe dieser Endwerte als Funktion der Rezirkulation an den Tunnelportalen, die sich aus den Gleichungen (7) und (9) ausrechnen lassen, sind in Bild 16 enthalten. Das rasche Ansteigen der Endwerte zeigt deutlich, dass die Rezirkulationsprobleme mit besonderer Sorgfalt betrachtet werden müssen.

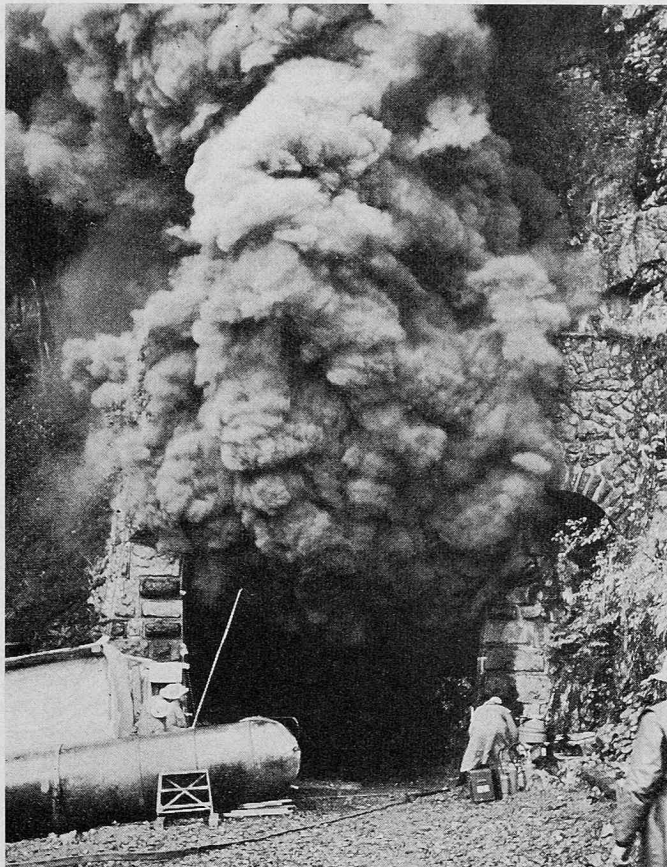


Bild 17. Rauchentwicklung am Portal des Ofenegg-Tunnels bei einem Brand im Tunnel [3]. Die Aufnahme wurde entgegenkommenderweise vom Amt für Strassen- und Flussbau in Bern zur Verfügung gestellt

### 7.3. Numerisches Beispiel

Wir betrachten einen Tunnel, dessen Geometrie der Portale jener unserer Modelle entspricht, und nehmen folgende Strömungsdaten an:

$$u_1 = 1,0 \text{ m/s}, \quad u_2 = 2,5 \text{ m/s}, \quad u_s = 2,54 \text{ m/s}$$

$$\text{daraus } l_1/l_2 = 0,4; \quad \sigma_1 = 0,394; \quad \sigma_2 = 0,985.$$

Dem Bilde 8 für  $\zeta = 0,2$  (ohne Vorbauten) entnehmen wir die Werte

$$\mu_1 = 0,365 \quad \mu_2 = 0,175.$$

Aus den Gleichungen (7) und (9) folgt

$$c_1/c_0 = 1,58 \quad \text{und} \quad c_2/c_0 = 1,34.$$

Falls die Lüftung auf eine Grenzkonzentration von z. B. 200 ppm

bemessen würde, verursachte die Rezirkulation eine Erhöhung dieses Wertes auf 316 bzw. 268 ppm, was nach dem Expertenbericht [1] nicht mehr zulässig wäre.

### 8. Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen der vertikalen Rezirkulation ohne Vorbauten haben die Abnahme des Strömungskurzschlusses mit zunehmendem Abstand zwischen der Tunnelöffnung und der Frischluft-Ansaugöffnung deutlich gezeigt. Die untersuchten Vorbauten verbessern die Verhältnisse wesentlich. Es ist jedoch für beide Fälle zu beachten, dass zwar die CO-Konzentration der angesaugten Luft durch eine zweckmässige geometrische Anordnung stark verringert wird, dass aber andere Faktoren, die im Rahmen dieser Experimente nicht untersucht wurden, auch berücksichtigt werden müssten. Zu denken ist hier z. B. an Brandfälle. Eine Verminderung der Rezirkulation auf einen Bruchteil des sonstigen Wertes könnte bei der starken Rauchentwicklung eines Brandfalles immer noch ungenügend sein, da der Rauch gemäss Erfahrungen [3] ausserordentlich dicht und gleichzeitig heiss ist, Bild 17.

Der nicht untersuchte Einfluss des thermischen Auftriebes der durch den Verkehr oder einen Brand erwärmten Tunnelnluft auf die Rezirkulation ist ein weiterer Faktor, dem bei der Anwendung der Ergebnisse Aufmerksamkeit geschenkt werden muss.

Es ergibt sich aus den Versuchen mit Aufwind, und sinngemäss auch bei Seitenwind, dass sich Gegenmassnahmen als notwendig erweisen, wenn beide Öffnungen relativ nahe beieinander liegen. Die auftretenden Schwierigkeiten lassen sich wiederum durch Vorbauten verringern.

### 9. Nachwort

Der Verfasser möchte Professor Dr. J. Ackeret, Vorsteher des Instituts für Aerodynamik der ETH, für die wertvollen Ratschläge und sein der Arbeit entgegengebrachtes Interesse herzlich danken. Sein Dank gebührt weiter den Institutsmitarbeitern Herrn Dr. H. Sprenger für seinen Vorschlag zu den Konzentrationsmessungen, sowie Fräulein K. Schlenkert und Herrn A. Berger für ihre Hilfe bei der Durchführung dieser Arbeit.

Das Problem wurde uns vom Ingenieur-Büro Bonnard & Gardel in Lausanne unterbreitet.

### Literaturverzeichnis

- [1] J. Ackeret, A. Haerter, M. Stahel: Die Lüftung der Autotunnel. Bericht der Expertenkommission für Tunnellüftung an das Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau. Mitteilung Nr. 10 aus dem Institut für Strassenbau an der ETH.
- [2] Alex Haerter: Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Lüftungsanlage von Strassentunneln. Mitteilung Nr. 29 aus dem Institut für Aerodynamik an der ETH, herausgegeben von Prof. Dr. J. Ackeret.
- [3] Bericht über die Brandversuche im Tunnel «Ofenegg» vom 17. bis 31. 5. 1965. – Kommission für Sicherheitsmassnahmen in Strassentunneln (noch unveröffentlicht).

Adresse des Verfassers: B. Anet, dipl. Ing., Schindler Haerter AG, Beratende Ingenieure, Angererstrasse 6, 8002 Zürich.

## Aus dem Papierkorb eines Architekten

Von F. Rüegsegger, Arch., Zürich

### Kleines Vorwort

Ich hatte einen Boss, und ich war sein Faktotum. Gottlieb nannte er mich. Vierzig Jahre war er mir treu und ebenso vierzig Jahre war ich ihm treu ergeben. Zu Anfang spitzte ich Bleistifte, tat Botengänge und leerte den Papierkorb. Mein Boss zeichnete Pläne, berechnete Bauten und verhandelte mit Bauherren und Ingenieuren. «Gottlieb», sagte er eines Tages, «ich merke, dass wir zwei zueinander gehören. Nicht wahr, Sie werden mich nie verlassen». Er hatte mir aus dem Herzen gesprochen; denn auch ich wollte immer in seiner Nähe bleiben, wenn auch nur als Faktotum, das zu jeder Handreichung bereit ist – und eben auch den Papierkorb leert. Ja, dieser Papierkorb hatte es mir angetan. Vierzig Jahre lang habe ich in ihn hineingestopft, was er fassen mochte. Vieles, ja vieles war Brennmaterial; aber da blieb mir auch manchmal etwas in den Händen, das mich des näheren Betrachtens wert schien. Ich legte es säuberlich beiseite, und kürzlich kam es mich an, dieses einst dem Papierkorb Anvertraute zu sichten. Wollen Sie hören, was dabei herausgekommen ist?

### Der Berg der Wahrheit 1926/27

Mein Boss reiste als junger Mann nach der Südschweiz, um bei einem anerkannten Architekten, der fliessend italienisch und deutsch sprach und grosse und schöne Aufträge in Aussicht hatte, die Stelle eines Bürochefs anzutreten. Da wir zu Beginn unseres Zusammenseins ausgemacht hatten, uns nie mehr zu trennen, reiste ich natürlich mit und war sein steter Begleiter. Es war denn auch ein herrlicher Ort. Fast durchs ganze Jahr kamen Feriengäste, um sich bei Wein, Weib und Gesang zu erholen und die berühmten Spaghetti zu essen. Ja, die Sache liess sich gut an: herrliche Landschaft, mildes Klima, erfreuliche Arbeit und nette Leute.

Eines Morgens hörte ich meinen Boss telefonieren, und hocherfreut erzählte er mir die Geschichte vom Berg der Wahrheit, der überbaut werden sollte. Das war etwas ganz Besonderes, eine Rosine im Kuchen der Arbeit für einen Architekten. Mein Boss legte sich ins Zeug, um so rasch wie möglich die Bewilligung für die entworfenen Bauten zu erhalten. Fast Tag und Nacht arbeiteten wir im Büro und