

Zur Frage der Lüftung langer Autotunnel

Autor(en): **[s.n.]**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **111/112 (1938)**

Heft 8

PDF erstellt am: **18.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-49902>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

$$\frac{\partial^2 M_k}{\partial x^2} = -p_k \quad \frac{\partial^4 z_k}{\partial x^4} = +p_k$$

Zur Berechnung der Randquerkraft finden wir die erste Derivierte wieder aus den Eigenschaften des Seilpolygons (Abb. 4).

Der Winkel $\frac{\partial M_k}{\partial x}$ setzt sich nämlich zusammen

aus der Sehnenneigung $\frac{M_l}{\lambda_x}$ und dem Sehn-

Tangenten-Winkel, der bekanntlich gleich dem Auflagerdruck der M'' -Fläche in k ist. Ich ersetze die M'' -Fläche im Bereiche k bis l durch eine Gerade und erhalte:

$$v = \frac{\partial M_k}{\partial x} = \frac{M_l}{\lambda_x} - \frac{\lambda_x}{6} \left(2 \cdot \frac{\partial^2 M_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_l}{\partial x^2} \right)$$

worin $\frac{\partial^2 M_k}{\partial x^2} = -p_k$ ist. $\frac{\partial^2 M_l}{\partial x^2}$ will ich noch zur Erhöhung der Genauigkeit durch die andere partielle Ableitung ausdrücken und erhalte: $\frac{\partial^2 M_l}{\partial x^2} = -p_l - \frac{\partial^2 M_l}{\partial y^2}$. Da das zweite Glied gegenüber p_l klein ist, genügt es, den Verlauf von M über die Punkte $r-l-p$ als parabelförmig vor auszusetzen, womit

$$\frac{\partial^2 M_l}{\partial y^2} = -\frac{2 M_l - M_r - M_p}{\lambda_y^2}$$

wird, und die Rand-Scherkraft erhalte ich zu

$$v = \frac{M_l}{\lambda_x} + \frac{\lambda_x}{6} (2 p_k + p_l) - \frac{\lambda_x}{6 \lambda_y^2} (2 M_l - M_r - M_p) \quad (3)$$

Ganz entsprechend finde ich, wenn ich noch $\frac{\partial^4 z_k}{\partial x^2 \partial y^2} = 0$ beachte, die zusätzlichen Auflagerdrücke:

$$v' = -\frac{m-1}{m} \left(\frac{\partial^2 z_l}{\lambda_x \partial y^2} - \frac{\lambda_x}{6} \cdot \frac{\partial^4 z_l}{\partial x^2 \partial y^2} \right)$$

$$v' = -\frac{m-1}{m} \left[\frac{1}{\lambda_x} \cdot \frac{\partial^2 z_l}{\partial y^2} + \frac{\lambda_x}{6 \lambda_y^2} \left(2 \frac{\partial^2 z_l}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 z_r}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 z_p}{\partial x^2} \right) \right] \quad (4)$$

die Glieder z'' wurden schon bei der Momentenbestimmung berechnet.

Um die Wirksamkeit der dargelegten Methode zu belegen, untersuche ich im folgenden eine quadratische frei aufliegende Platte von der Seitenlänge l mit der konstanten Belastung p .

Ueberraschend gute Resultate ergibt schon ein Netz mit $\lambda_x = \lambda_y = \frac{l}{2}$ d. h. mit einem einzigen Netzknoten. Die Beziehungen

(2) lauten: $20 M = \frac{144 p \lambda^2}{24}$, ferner, da für den Rand $M = 0$ ist,

$$20 z = \frac{100 M \lambda^2}{24}$$

Somit folgt $z = \frac{1}{16} p \lambda^4 = \frac{1}{256} p l^4$

$$M = -\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = -\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{3}{10} p \lambda^2 = \frac{3}{40} p l^2$$

und daher ergibt sich mit $m = \infty$ (keine Querkontraktion) unter Beachtung der Symmetrie das Biegemoment in Plattenmitte zu

$$m_x = m_y = \frac{3}{80} p l^2$$

Für den Auflagerdruck in Mitte der Plattenseite erhalte ich schliesslich nach Formel (3) und (4) und in der selben Reihenfolge: $v = (0,30 + 0,50 - 0,10) p \lambda = 0,35 p l$; $v' = (0,15 + 0,05) p \lambda = 0,10 p l$
 $a = v + v' = 0,450 p l$

Ich habe die Rechnung mit $\lambda = \frac{l}{4}$ d. h. mit drei Unbekannten wiederholt. Die Resultate sind zum Vergleich mit den Werten von Marcus für $m = \frac{10}{3}$ in folgender Tafel zusammengestellt:

	$\zeta_{\max}$	$m_{\max}$	$v_{\max}$	$a_{\max}$
Genauer Wert	0,00406	0,0479	0,337	—
Netz mit $\lambda = \frac{l}{2}$	0,00391	0,0487	0,350	0,420
Netz mit $\lambda = \frac{l}{4}$	0,00406	0,0479	0,339	0,418
Nach Marcus mit $\lambda = \frac{l}{4}$	0,00403	0,0457	0,344	0,415
Nach Marcus mit $\lambda = \frac{l}{8}$	0,00406	0,0473	0,339	0,419
	$\cdot \frac{l^4}{N}$	$\cdot p l^2$	$\cdot p l$	$\cdot p l$

Es zeigt sich deutlich, dass mit einem halb so engen Netz die selbe oder noch grössere Genauigkeit (insbesondere für die Momente) erzielt wird als nach Marcus, m. a. W. die Zahl der Gleichungen und Unbekannten kann auf den dritten bis vierten Teil herabgesetzt werden.

Die guten Werte, die ich mit einem einzigen Netzknoten erhielt, veranlassten mich, Näherungsformeln für eine rechteckige Platte von der Länge l und der Breite b abzuleiten. Gleichung (2) lautet für die Plattenmitte

$$20 \left(\frac{4}{l^2} + \frac{4}{b^2} \right) M = \frac{144}{12} p \quad M = \frac{3}{20} p \frac{l^2 b^2}{l^2 + b^2}$$

und analog $20 \left(\frac{4}{l^2} + \frac{4}{b^2} \right) z = \frac{100}{12} M \quad z = \frac{1}{64} p \frac{l^4 b^4}{(l^2 + b^2)^2}$

Aus Gleichung (1) ergibt sich ferner $10 z''_l \frac{l^2}{4 \cdot 12} = -2 z$

Setze ich zudem $m = \infty$, wie es im Eisenbetonbau oft üblich ist,

so betragen die Momente $m_l = \frac{3}{20} p \frac{l^2 b^4}{(l^2 + b^2)^2}$

$$m_b = \frac{3}{20} p \frac{l^4 b^2}{(l^2 + b^2)^2}$$

Der Unterschied gegenüber der Streifenmethode zeigt sich — abgesehen vom Zahlenfaktor — darin, dass im Nenner das Doppelprodukt $2 l^2 b^2$ hinzutritt, das die Drillingssteifigkeit der Platte zum Ausdruck bringt. — Die Formeln gelten vorzüglich, solange das Seitenverhältnis der Platte den Wert 2:1 nicht wesentlich übersteigt, und zwar approximiert m_l das maximale Moment in Längsrichtung der Platte. Für $l:b = 2$ ergibt sich beispielsweise

$$\zeta = \frac{1}{100} p \frac{b^4}{N} = 0,010 \cdot p \frac{b^4}{N}$$

$$m_b = \frac{12}{125} p b^2 = 0,0960 \cdot p b^2$$

$$m_l = \frac{3}{500} p l^2 = 0,0060 \cdot p l^2$$

Die Behauptung ist jedenfalls gerechtfertigt, dass diese Werte noch genauer sind als jene, die Marcus aus einem Netz mit $\lambda = \frac{l}{4}$

findet, nämlich

$$\zeta = 0,0103 \cdot p \frac{b^4}{N}$$

$$m_b = 0,0938 \cdot p b^2$$

$$m_l \cong 0,00582 \cdot p l^2$$

wenn man sich erinnert, dass Marcus schon bei der quadratischen Platte etwas zu kleine Momente erhielt.

Zur Frage der Lüftung langer Autotunnel

Die unter diesem Titel in der «SBZ» vom 30. April 1938 erschienene Abhandlung von Prof. Dr. C. Andreae veranlasst mich, zu dieser Frage einige ergänzende und kritische Bemerkungen anzubringen.

Die Motorisierung der Landstrasse hat die Auffassung über die Anlage von Strassen — besonders im Gebirge — in den letzten Jahren geändert. Bei dem grossen Kostenaufwand, den solche Strassen heute bedingen, muss man sich fragen, ob es zweckmässig sei, sie so zu bauen, dass sie nur vier bis fünf Monate des Jahres befahrbar sind. Die Frage stellt sich sowohl vom volkswirtschaftlichen, wie auch vom militärischen Standpunkt. Diese Ueberlegung hat in jüngerer Zeit mehrere Projekte mit längeren Autotunneln entstehen lassen. Dabei sind leider auch solche aufgetaucht und der Öffentlichkeit aufgedrängt worden, die besser unterblieben wären¹⁾, da sie technisch zu wenig studiert und derart sind, dass sie einer Opposition rufen mussten, woraus dann eine zu sehr verallgemeinernde Voreingenommenheit gegen alle solche Projekte mit langen Tunneln entstand.

Wie Prof. Andreae in seiner Abhandlung ausführt, ist die Lüftung das wichtigste Problem, das bei der Projektierung langer Autotunnel abzuklären ist. Die von ihm entwickelten Grundsätze sind u. a. beim Projekt für den Gotthardtunnel («SBZ» 1935, Bd. 106, S. 171*), sowie beim hier veröffentlichten Projekt für einen Titlis-Tunnel (Verbindung des Engelberger Tales mit der im Bau begriffenen Sustenstrasse, Abb. 1 und 2) von 5,8 km Länge, bereits berücksichtigt worden. Für den Entwurf der Lüftungsanlage des zweitgenannten hat der Unterzeichnete eingehende Beobachtungen im Scheide-Tunnel in Antwerpen²⁾, und im Mersey-Tunnel in Liverpool³⁾ durchgeführt, die ihn ebenfalls zum eindeutigen Schlusse führten, dass für einen langen Autotunnel nur Querlüftung in Betracht kommen kann. Allein, die Lösungen, die bei den bereits be-

¹⁾ z. B. Simplon, vergl. «SBZ» Bd. 106, S. 174*! —

²⁾ Bd. 106, S. 158*. — ³⁾ Bd. 106, S. 160*.

(Ein * bedeutet stets, dass der betreffende Artikel illustriert ist. Red.)

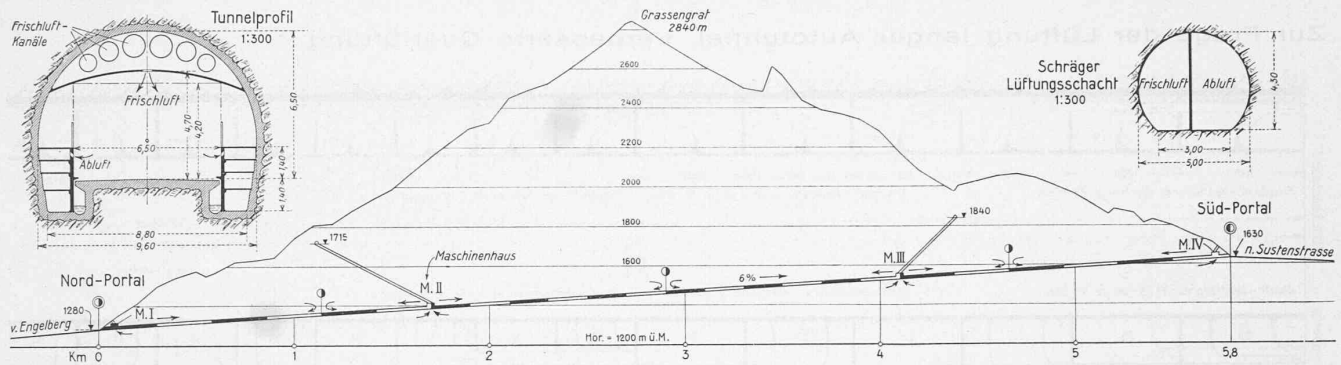


Abb. 2. Lüftungs-Vorschlag Bartolomäi für einen 5,8 km langen Titlis-Strassentunnel, einseitige Steigung 6‰, unüberhöhtes Längsenprofil 1 : 35 000

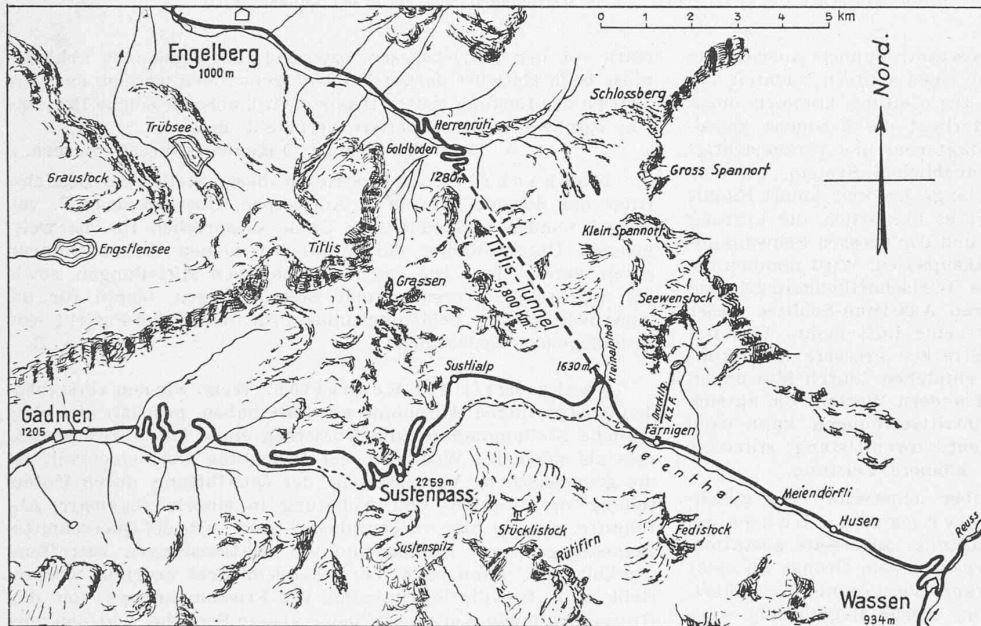


Abb. 1. Uebersichtskarte der Titlistunnelstrasse zum Anschluss an die Sustenstrasse 1 : 150 000

stehenden Autotunneln in Grosstädten gewählt wurden, können nach meinen Beobachtungen nicht ohne weiteres auf lange Alpentunnel übertragen werden.

Die seinerzeit vor dem Bau des ersten Auto-Tunnels (Holland-Tunnel, New York) durchgeführten Versuche, beschränkten sich alle mehr oder weniger auf die Bestimmung des zulässigen CO-Gehaltes, der zu etwa 0,5 ‰ gefunden wurde. Dementsprechend wurde auch die zur Lüftung notwendige Luftmenge bestimmt. Obschon nun in den meisten Fällen eine noch niedrigere Konzentration erreicht wird, befriedigen die Verhältnisse nicht restlos. Es hat sich gezeigt, dass selbst bei geringerer CO-Konzentration die Luft schlecht ist und dass namentlich die Sicht, die für einen einwandfreien Betrieb so wichtig ist, in unzulässigem Masse durch Rauch beeinträchtigt wird (im neuen Lincoln-Tunnel⁴⁾ Verbot der Diesellastwagen). Um diese üblen Nebenumstände zu beseitigen, sind bei den bestehenden Anlagen derart grosse Luftmengen erforderlich, dass die CO-Konzentration nicht mehr in vorderster Linie steht und an Bedeutung verliert. Bei kurzen Grosstadt-Tunneln mit grossem, zahlendem Verkehr ergeben sich daraus keine besondern Schwierigkeiten. Dagegen entsteht bei langen Alpentunneln mit schwächerem Verkehr die Aufgabe, diese die Sicht beeinträchtigenden, unangenehmen Erscheinungen wie Rauch und Oeldampf, mit einem minimalen, noch wirtschaftlichen Luftaufwand zu beseitigen. Diese Frage wird besonders bei der steten Entwicklung der Fahrzeug-Dieselmotoren, sowie bei der Berücksichtigung moderner Benzinzusätze und Ersatzbrennstoffe immer wichtiger. Ich möchte hier die Beobachtungen im Schelde-Tunnel erwähnen, bei denen festgestellt wurde, dass der durch den Auspuff erzeugte Rauch trotz Absaugen an der Decke nur langsam in die Höhe steigt und es längere Zeit braucht, bis der Tunnel vom Rauch wieder frei ist. Die hierüber gemachten Versuche waren sehr lehrreich und führten dazu, dass ein Instrument eingebaut

wurde, um die Sicht zu messen. Dieser Apparat alarmiert, sobald eine bestimmte Undurchsichtigkeit der Luft erreicht ist, worauf die Lüftung verstärkt wird.

Um mit kleinen, wirtschaftlichen Luftmengen auszukommen, müssen Auspuffgase, Rauch und Oeldampf, wie Prof. Andraea andeutet, raschestens, auf möglichst kurzem Weg aus dem Tunnel entfernt werden. Dies kann nur dadurch geschehen, dass man sie gleich dort entfernt, wo sie entstehen, d. h. unten, direkt über der Fahrbahn. Die Frischluft muss von oben eingeblasen werden. Bei der in den bestehenden Tunneln (Holland, Schelde u. a.) angewandten Anordnung, bei der Frischluft unten eingeblasen und die verdorbene Luft an der Decke abgesaugt wird (vergl. auch Bd. 111, S. 227*), durchziehen die Auspuffgase den Verkehrsraum von unten nach oben und verschlechtern die ganze Luft.

Die Auspuffgase scheiden sich in solche, die leichter, gleichschwer und schwerer sind als Luft. Von den leichten ist CO, das in heissem Zustande sofort nach oben steigt, gefährlich. Da es geruch- und farblos ist, verursacht es keine unangenehmen Nebenerscheinungen, wenn es raschestens durch zuströmende Frischluft verdünnt wird. Anders die schweren Bestandteile. Sie sind meistens dichter und farbig und verschlechtern deshalb die Sicht. Werden nun die schweren Bestandteile unten abgesaugt und die leichten durch von oben zuströmende Frischluft unschädlich gemacht, so muss im Tunnel eine Luftmischung entstehen, die besser sein muss, als jene, die bei dem bis heute angewandten System beobachtet wird. Aus diesem Grunde ist beim erwählten Entwurf für den Titlis-Tunnel die Zuführung der Frischluft von oben und nicht von unten vorgesehen, während das Absaugen der Abluft unten, etwa 1 m über der Fahrbahn erfolgt.

Beim bisher allgemein angewandten System der Querlüftung wird die Frischluft, die etwas schwerer ist als CO, unten eingeblasen. Sie treibt das leichte CO direkt vor sich her nach oben; zum thermischen Auftrieb kommt noch die Einblaswirkung. Es ist jedoch Tatsache, dass, wenn zwei Luftströme hintereinander herströmen, sie sich nicht so rasch und so innig vermischen, als wenn sie gegeneinanderströmen. Kommt nun, wie beim Projekt des Titlis-Tunnels vorgesehen, der Frischluftstrom von oben, so muss eine raschere Verdünnung erfolgen und die Passanten im Tunnel erhalten auf Atemhöhe bessere Luft. Durch diese Umkehrung des Strömungssinnes soll also erreicht werden: im oberen Teil des Tunnels, auf den es ankommt, bessere Sicht, zudem eine raschere Durchdringung der schädlichen Gase mit Frischluft und damit eine bessere Luftzusammensetzung. Dabei muss die Ventilationseinrichtung so angeordnet sein, dass direkt über der Fahrbahn ein genügender Unterdruck entsteht, der die Gase absaugt (siehe Titlis-Tunnelprofil in Abb. 2). Eine solche Anordnung entspricht somit der Forderung von Prof. Andraea, die störenden Auspuffgase so rasch wie möglich zu entfernen.

⁴⁾ Vergl. «SBZ» Bd. 111, S. 254* (14. Mai 1938).

Zur Frage der Lüftung langer Autotunnel, Verbesserte Querlüftung

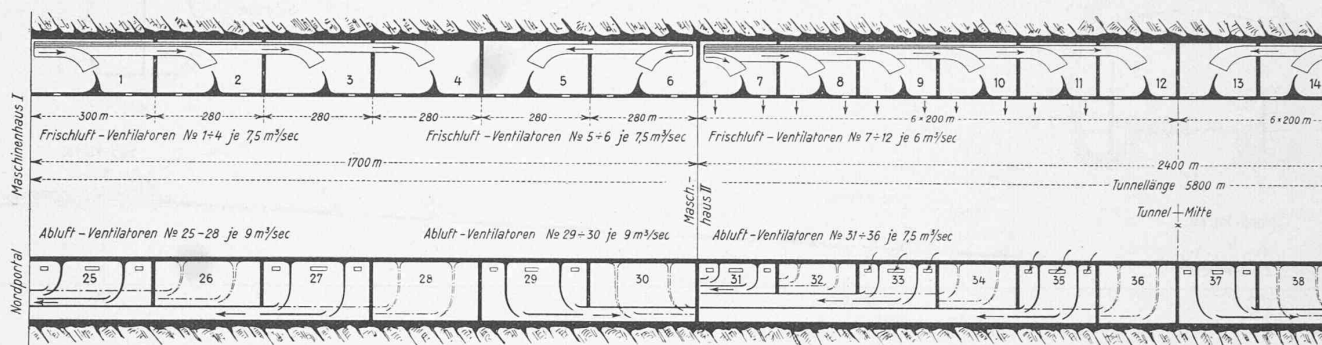


Abb. 3. Sektionierte Querlüftung für einen Autostrassen-Titlistunnel, Vorschlag A. Bartholomäi; schematischer Längsschnitt

Die in den bisher erstellten Grosstädte-Tunnels ausgeführte Anordnung der Querlüftung hat noch einen weiteren Nachteil, der bei langen Alpentunneln besonders zur Geltung kommen muss. In einem Gebirgsstrassentunnel unterliegt die Frequenz gewaltigen Schwankungen, die saisonbedingt sind und berücksichtigt werden müssen. Beim bisher gebräuchlichen System, bei dem zwischen den Ventilatorenstationen lange Zu- und Abluft-Kanäle bestehen (vgl. Bd. 106, S. 168*), ist es unmöglich, die Lüftung in genügender Weise zu regulieren und der grossen Schwankungen unterworfenen Verkehrsdichte anzupassen. Wird nämlich die Lüftung bei geringem Verkehr aus Wirtschaftlichkeitsgründen gedrosselt, so liefern die entfernteren Ausström-Schlitze dieser langen Kanäle zu wenig oder gar keine Luft mehr. Dadurch müssen in den weniger belüfteten Strecken grössere Anhäufungen von Rauch, Oeldampf und CO entstehen (durch Messungen im Schelde-Tunnel festgestellt). Mit andern Worten: die an sich schon mühsame Regulierung der Eintrittsöffnungen kann wohl annähernd für eine bestimmte Ventilatorenleistung stimmen, nicht mehr aber für grössere oder kleinere Leistung.

Das Lüftungs-System muss aber einerseits eine gleichmässige Luft-Zu- und Abfuhr auf der ganzen Länge gewährleisten, auch bei schwacher Lüftung, anderseits gestatten, in gewissen Momenten, wenn aus irgend einem Grunde an einer Stelle des Tunnels die Luft eine stärkere Verunreinigung erfährt, diese Stelle stärker zu belüften. Eine solche Regulierung wäre bei der bisher angewandten und in der «SBZ» bereits wiederholt beschriebenen Anordnung der Querlüftung nur durchführbar, wenn die Luftschlitze im Querschnitt automatisch verstellbar gemacht werden könnten. Dies würde aber auf grossen Längen zu Unzulänglichkeiten führen und nach kurzer Zeit würden die automatischen Klappen nicht mehr funktionieren.

Für den projektierten Titlis-Tunnel ist nun vorgesehen worden, die Zu- und Abluft-Kanäle zwischen zwei Ventilatorenstationen in eine grössere Anzahl Sektoren von etwa 200 m Länge zu unterteilen (Abb. 2 und 3). Jedem Sektor soll Luft aus seinem zugehörigen Ventilator direkt zugeführt, beziehungsweise auf der Abluftseite (unten) abgesaugt werden. Die Anzahl der Ventilatoren wird dadurch vergrössert und ihre Einzelleistung verkleinert, dafür wird aber die Betriebssicherheit erhöht. Die Regulierung ist so gedacht, dass bei niedriger Frequenz, eine entsprechende Zahl von Sektoren der Frischluftseite gedrosselt oder abgeschaltet wird. Infolge der verminderten Luftzufuhr im Innern, entsteht ein verstärkter Luftzug von den Portalen her. Die Luft strömt dann nicht mehr senkrecht von oben nach unten durch den Tunnel, sondern schräg seitwärts. Dadurch werden auch jene Sektoren von Frischluft durchspült, in denen die Frischluftventilatoren abgestellt sind. Durch die Abschaltung einzelner Sektoren wird deshalb bei niedriger Frequenz an mechanischer Leistung gespart.

Wenn die topographischen und geologischen Verhältnisse des zu durchfahrenden Gebirges gestatten, ohne zu hohe Kosten eine grössere Anzahl von Zwischenstationen zu erstellen — die durch schräge Stollen oder Schächte mit der Aussenluft verbunden sind, wobei der Maschinenraum im Tunnel selbst angeordnet wird — können auch längere Tunnels ohne Ueberdimensionierung der Ventilation zweckmässig und wirtschaftlich belüftet werden (Abb. 3). Ist es möglich, durch ein eigenes Kraftwerk den elektrischen Strom unter günstigen Bedingungen zu beschaffen, so gestaltet sich dergestalt der Betrieb eines Gebirgsstrassentunnels verhältnismässig billig. Die Maschinenanlagen können alle von einer Zentrale aus gesteuert werden und benötigen wenig Unterhalt. Da, wie bereits betont, die Wirtschaftlichkeit solcher Bauten

stark von den Betriebspesen, bzw. den Lüftungskosten abhängt, muss beim Entwurf darauf Bedacht genommen werden, dass der Betrieb der Lüftung später tragbar wird, ansonst solche Projekte von vornherein zum Scheitern verurteilt sind.

A. Bartholomäi, Ingenieur-Bureau, Luzern.

Nachschrift. Ich möchte an dieser Stelle dem Betriebsleiter des Schelde-Tunnels in Antwerpen, Obergeringieur F. van Haren, meinen verbindlichsten Dank aussprechen für die weitgehende Unterstützung, die er mir bei meinen Untersuchungen zuteil werden liess. Die von ihm erhaltenen Mitteilungen, sowie die angestellten Versuche und Beobachtungen, waren für die Ausarbeitung der Belüftungsanlage für das Titlis-Projekt von grundlegender Bedeutung.

A. B.

Nachschrift der Redaktion. Wenn wir den vorstehenden Ausführungen Aufnahme gewährt haben, geschah dies ohne jegliche Stellungnahme zum Vorschlag eines Titlis-Strassentunnels als solchem. Was aber der Beachtung wert erscheint, ist die grundsätzliche Verbesserung der Querlüftung durch Unterteilung der Luft-Zu- und Ableitung in einzeln regelbare Abschnitte, wie sie hier vorgeschlagen wird. Ob die Querschnittsbemessung dieser Kanäle und die Sektionslängen zutreffend gewählt sind, kann nach Vorstehendem nicht beurteilt werden. Geht man für die Bestimmung der Frischluftmenge von den Grosstadt-Tunneln Antwerpen usw., also in Seehöhe, und den dort als zulässig festgestellten $0,5\text{‰}$ CO aus, so ist nicht ausser Acht zu lassen, dass in 1600 bis 1700 m Meereshöhe der Frischluftbedarf des Menschen von 25 l/min bei leichter Anstrengung um etwa 20% grösser ist, als im Mittelland.



Abb. 1. Basel, Bauzustand 1838, Eisenbahnen um 1860. — 1:60000