

# Optimierung der Anlagen

Autor(en): **Diethelm, Willy**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **98 (1980)**

Heft 36: **Der Gotthard-Strassentunnel**

PDF erstellt am: **24.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74179>

## **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.

# Optimierung der Anlagen

Von Willy Diethelm, Locarno

## Prinzip

Die Lage der beiden Portale des Gottard-Strassentunnels in Göschenen und Airolo sind durch die Möglichkeiten der Linienführung der N2 im Reusstal und in der Leventina vorgegeben. Zwischen diesen beiden Fixpunkten war unter Berücksichtigung der andernorts beschriebenen äusseren Randbedingungen (Verkehrsmenge, gewähltes Lüftungssystem, Frischluftbedarf, geologisch-geotechnische Verhältnisse, Topographie, Lawinen, vorhandene Bauten usw.) die optimale Disposition des Strassentunnels und der zugehörigen Bauwerke (Lüftungsschächte und -zentralen) festzulegen. Im wesentlichen ging es darum, die günstigste Trassie-

rung des Tunnels sowie die zweckmässigste Anzahl und Lage der Lüftungszentralen und -schächte auf Grund von Wirtschaftlichkeitsrechnungen zu bestimmen.

Es handelte sich bei dieser Optimierung darum, die Gesamtdisposition der Anlage zu finden, bei der die Summe der Aufwendungen für den Bau und den Betrieb des Tunnels, der Lüftungsschächte, Lüftungszentralen und Nebenanlagen ein Minimum ergibt. Das bedeutet, dass die Jahreskosten, die sich aus der Verzinsung und Amortisation des investierten Kapitals, aus den Aufwendungen für Unterhalt, Reparaturen und Erneuerung, sowie aus dem Betrieb

der gesamten Anlage ergeben, für die optimale Gesamtdisposition den kleinsten Betrag ausmachen.

Bei einer optimalen Gesamtdisposition muss jedes einzelne Element, aus der sich die Anlage zusammensetzt, für sich allein schon die wirtschaftlichsten Abmessungen aufweisen, d.h. optimal ausgelegt sein. Aus diesem Grund wurden zuerst die Tunnelröhre sowie die Vertikal- und Schrägschächte einzeln optimiert.

Als Resultat dieser eingehenden Untersuchungen konnten Diagramme ausgearbeitet werden, welche die optimale Profilgrösse und die zugehörigen Jahreskosten der Tunnelröhre und der Vertikal- bzw. Schrägschächte in Abhängigkeit der Länge der Lüftungsabschnitte darstellen.

Mit Hilfe dieser Diagramme liessen sich in der Folge für jede untersuchte Variante mit beliebiger Linienführung und Schachtzahl (und beliebigen Kombination von vertikalen und geneigten Schächten) die gesamten Jahreskosten in einfacher Weise sehr rasch bestimmen, die verschiedenen Lösungen gegeneinander abwägen und die Gesamtdisposition mit der kleinsten Summe der Jahreskosten ermitteln.

Nachstehend werden die einzelnen Schritte der Optimierungsrechnung etwas näher erläutert.

## Durchführung

### Jahreskosten / Vergleichskosten

Die Jahreskosten  $J$  eines Elements der Gesamtanlage (Tunnelröhre, Schacht) lassen sich wie folgt berechnen:

$$J = p_B \cdot B + p_I \cdot I + E \text{ (Fr/Jahr)}$$

Darin bedeuten:

$B$  : Baukosten (Fr)

$I$  : Kosten der elektromechanischen Installationen (Fr)

$p_B$  : Jahreskostensatz des baulichen Teils (%/Jahr)

$p_I$  : Jahreskostensatz des elektromechanischen Teils (%/Jahr)

$E$  : Energiekosten (Fr/Jahr)

Die Jahreskostensätze  $p_B$  und  $p_I$  decken den Aufwand für die Verzinsung und Amortisation des investierten Kapitals wie auch den für Unterhalt, Reparaturen und Erneuerung der Anlagen. Sie hängen von der vorgesehenen Amortisationsdauer des entsprechenden Elements ab.

Bei einem Zinssatz von z. B. 5,5% kann mit  $p_B = 6\%$  bei 80 Jahren Amortisationsdauer und  $p_I = 9,5\%$  bei 20 Jahren Amortisationsdauer gerechnet werden. Die Energiekosten ergeben sich aus dem jährlichen Energiebedarf (kWh/Jahr) und dem angenommenen, bzw. festgelegten Energiepreis (Rp./kWh), sowie dem Leistungspreis (Fr/kW).

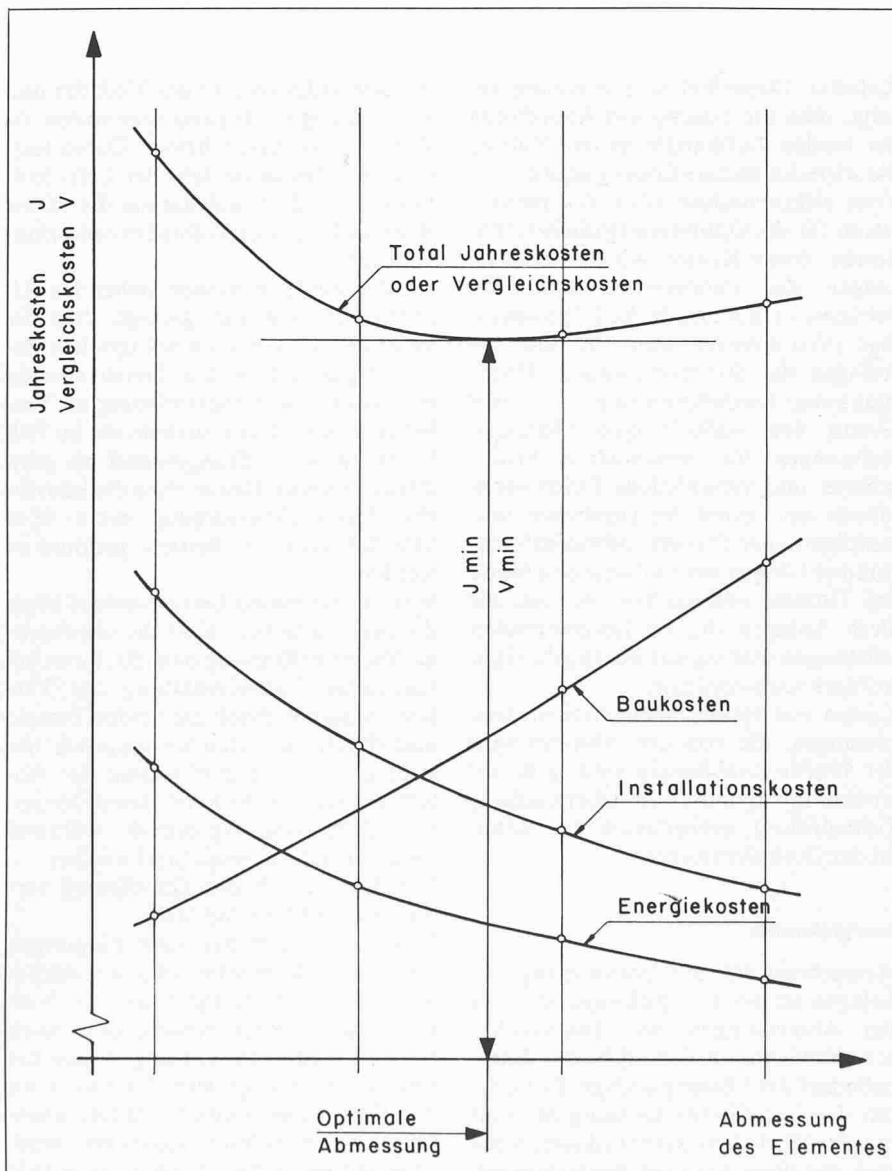


Bild 1. Prinzip der Optimierung eines Elements

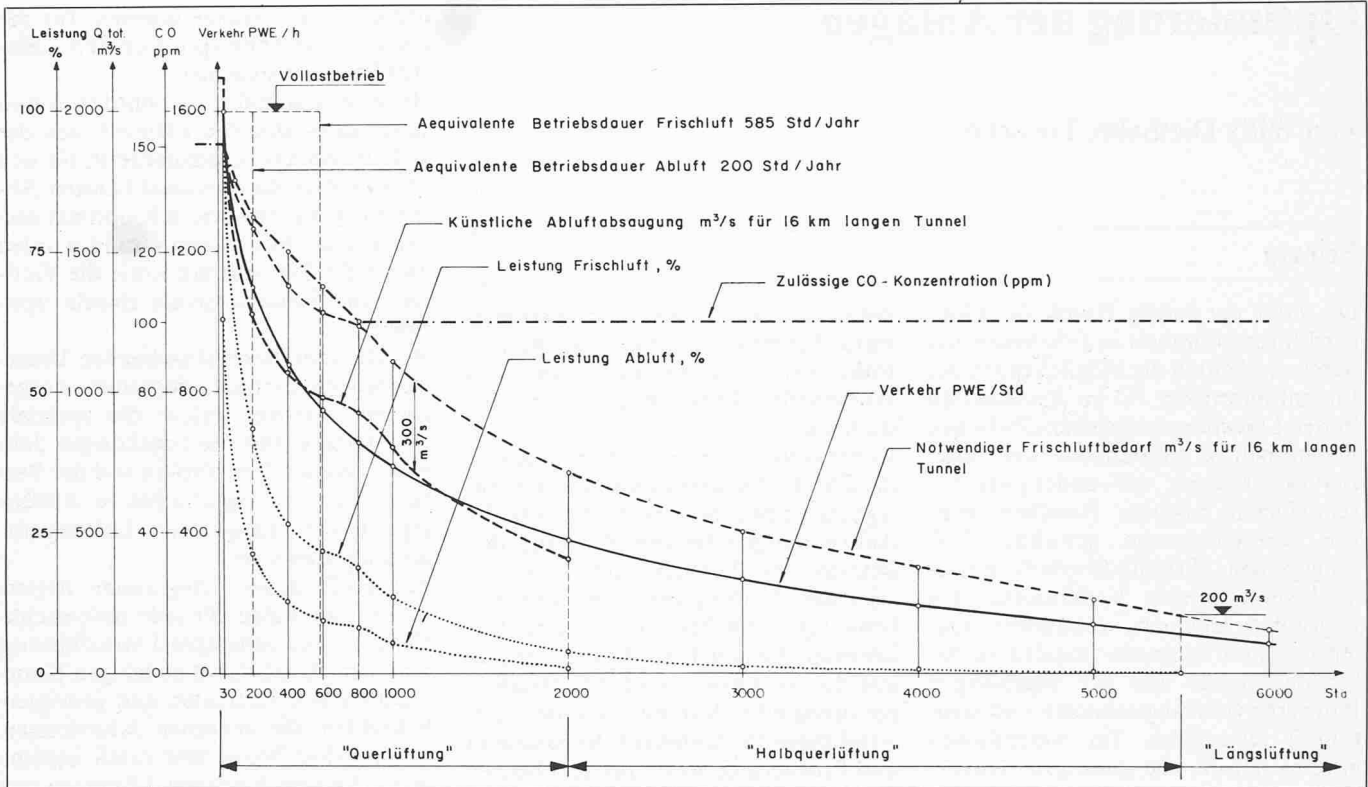


Bild 2. Dauercurve Verkehr, zulässige CO-Konzentration, Luft- und Leistungsbedarf

Es ist auch üblich, in den Optimierungsrechnungen anstelle der Jahreskosten deren kapitalisierten Wert, *Vergleichskosten*  $V$  genannt, zu verwenden:

$$V = \frac{J}{p_B} = B + \frac{p_I}{p_B} \cdot I + \frac{E}{p_B} \quad (\text{Fr})$$

Mit den oben erwähnten Werten von  $p_B$  und  $p_I$  ergibt sich:

$$V = B + 1,585I + 16,7E \quad (\text{Fr})$$

Die Jahreskosten, bzw. Vergleichskosten werden für verschiedene Abmessungen eines Elements ermittelt und daraus seine optimale Dimension bestimmt, für welche  $J$ , bzw.  $V$  den minimalen Wert erreicht (Bild 1). In dieser Berechnung können alle Kosten, die von den Abmessungen des Elements unabhängig sind, vernachlässigt werden.

#### Baukosten und Kosten der elektromechanischen Installationen

Die Baukosten der Tunnelröhre bzw. der Vertikal- und Schrägschächte wurden für verschiedene Profilgrößen und unter Berücksichtigung der zu erwartenden geologisch/geotechnischen Verhältnisse (prognostizierte Felsklassenverteilung) ermittelt.

Für die Tunnelröhre wurden *verschiedene Möglichkeiten der Anordnung der Luftkanäle* untersucht (Zu- und Abluft in der Kalotte; Zuluft unter der Fahrbahn, Abluft in der Kalotte; Zuluft in separatem Parallelstollen, Abluft in der

Kalotte). Dabei hat sich eindeutig gezeigt, dass die Lösung mit Anordnung der beiden Luftkanäle in der Kalotte die wirtschaftlichste Lösung ergibt.

Vom *elektromechanischen Teil* interessieren für die Optimierung die Installationen, deren Kosten mit den Abmessungen der Tunnelröhre, bzw. der Schächte variieren; d.h. die Lüftungsanlage (Ventilatoren, Motoren) und die Anlagen der Stromversorgung (Hochspannung/Niederspannung). Auf Grund von vollständigen Lüftungsrechnungen für verschiedene Profilgrößen und verschiedene Luftmengen (denen auf Grund des gegebenen notwendigen spezifischen Luftbedarfs bestimmte Längen der Lüftungsabschnitte des Tunnels entsprechen) wurden für diese Anlagen die zu installierenden Leistungen und daraus die zugehörigen Anlagekosten ermittelt.

Kosten von elektromechanischen Ausrüstungen, die von den Abmessungen der Profile unabhängig sind (z.B. Beleuchtung, Signalisation, Überwachung Tunnelröhre), beeinflussen das Resultat der Optimierung nicht.

#### Energiekosten

Massgebend für die Optimierung der Anlagen ist der Energiebedarf, der mit den Abmessungen der Tunnelröhre bzw. Schächte variiert, d.h. der Energiebedarf der Lüftungsanlage. Er hängt von der installierten Leistung ab, und von der jährlichen Betriebsdauer, während der diese Leistung benötigt wird. Sie kann ermittelt werden auf Grund

der *Jahresdauercurve des Verkehrs* und der *zulässigen Abgaskonzentration im Tunnel*. Aus diesen beiden Daten lässt sich über das ganze Jahr der Luft- bzw. Leistungsbedarf und daraus die ideale Betriebsdauer mit Vollastbetrieb ermitteln (Bild 2).

Bei den heute in Betrieb stehenden Alpentunneln hat sich gezeigt, dass die unterschiedlichen klimatologischen Bedingungen auf beiden Seiten ständig eine *natürliche Längsströmung* im Verkehrsraum aufrechterhalten, die im Fall Gotthard den Leistungsbedarf bis etwa 200  $m^3/s$  deckt. Damit muss die künstliche Frischluftversorgung nicht über 5500 Std/Jahr in Betrieb genommen werden.

Weil im normalen Betriebsablauf bloss die zugeführte Frischluft die notwendige Abgasverdünnung bewirkt, kann bei schwacher Tunnelbelastung die Verkehrsraumluft durch die beiden Portale und durch die Schächte natürlich abströmen, ohne Zuhilfenahme der Abluftventilatoren. Es kann damit der reine *Halbquerlüftungsbetrieb* während 3500 Std/Jahr durchgeführt werden.

Für den Betrieb der *Querlüftung* verbleiben rund 2000 Std/Jahr.

Weil durch die Witterungsbedingungen und den Verkehr selbst ohnehin stärkere Längsgeschwindigkeiten im Verkehrsraum erzeugt werden, ist es auch zulässig, wenn vom Lüftungssystem her eine solche erzeugt wird. Dies ist dann der Fall, wenn weniger Abluft abgesaugt als Frischluft zugeführt wird. Eine Differenz bis zu 300  $m^3/s$  wurde als zulässig erachtet, im Mittel strömt

damit Verkehrsraumluft mit einer Geschwindigkeit zwischen 3 und 4 m/s aus den Portalen ab.

Da die Ventilatoren sich dank Laufschaufelverstellung und zwei diskreten Drehzahlen dem momentanen Luftbedarf gut anpassen können, so ergeben sich folgende äquivalente Betriebszeiten (die äquivalente Betriebszeit in Stunden, multipliziert mit der installierten Lüftungsleistung in kW führt definitionsgemäss auf den jährlichen Energiebedarf in kWh):

Zuluftventilatoren 585 Std/Jahr  
Abluftventilatoren 200 Std/Jahr

Auch hier beeinflusst der Energiebedarf, der von den Abmessungen des zu optimierenden Elements unabhängig ist (z.B. Energie für Tunnelbeleuchtung) die Ermittlung der optimalen Profilgrösse nicht.

## Resultate

### Tunnelröhre

Aus Bild 3 ist die Ermittlung der optimalen Profilgrösse für einen Lüftungsabschnitt von 2765 m Länge (Luftmenge am Anfang des Abschnittes 360 m<sup>3</sup>/s, spezifischer Luftbedarf 130 m<sup>3</sup>/s km) ersichtlich. Auf gleiche Art wurden optimale Abmessungen der Tunnelröhre (bzw. deren Luftkanäle) für andere Längen der Lüftungsabschnitte ermittelt. Die Zusammenfassung dieser Resultate zeigt in Bild 4 die optimale Profilgrösse, die zugehörigen Bau- und Vergleichskosten sowie die Luftgeschwindigkeit in den Luftkanälen in Abhängigkeit der Länge des Lüftungsabschnittes.

In einem zweiten Berechnungsschritt wurde für die optimale Profilgrösse noch die günstigste Lage der Trennwand zwischen Frischluft- und Abluftkanal ermittelt. Diese Wirtschaftlichkeitsrechnungen zeigten, dass es wegen der längeren Betriebsdauer und der Leistungsreserve der Frischluftventilatoren von Vorteil ist, den Zuluftkanal grösser auszubilden als den Abluftkanal.

### Lüftungsschächte

Wie für die Tunnelröhre, konnte auch für die Schräg- bzw. Vertikalschächte für jede Schacht-Luftmenge (der eine bestimmte Länge der angeschlossenen Tunnel-Lüftungsabschnitte entspricht) die optimale Profilgrösse bestimmt werden. Aus der Zusammenfassung dieser Resultate ergeben sich dann Diagramme, die den optimalen Durchmesser der Vertikal- und Schrägschächte in Abhängigkeit der Luftmenge, bzw. der Länge der angeschlossenen Lüftungsabschnitte des Tunnels darstellen. Als weiterer Parameter tritt dabei auch noch die Schachtlänge in Erscheinung,

da sowohl die Baukosten, wie die installierte Lüftungsleistung bei gleichem Schacht-Durchmesser noch mit der Länge variieren.

Auch bei den Schächten wurde in einem zweiten Berechnungsschritt für die optimale Profilgrösse die wirtschaftlichste Lage der Trennwand zwischen Zuluft- und Abluftteil festgelegt.

### Gesamtdisposition

Zur Festlegung der optimalen Gesamtdisposition wurden für eine grosse Zahl möglicher Lösungen, durch Addition der Anteile der einzelnen Elemente (Tunnelröhre, Vertikal- und Schrägschächte mit Lüftungszentralen und Aussenbauwerken) die gesamten Vergleichskosten ermittelt.

Damit konnte vorerst aus den verschiedenen Varianten mit der gleichen Anzahl Lüftungsschächte, die sich in der

Linienführung des Tunnels und in der Lage der Lüftungszentralen und Schachtköpfe unterscheiden, die zweckmässigste Lösung ermittelt werden. Schliesslich erlaubte die Gegenüberstellung der jeweils günstigsten Disposition mit zwei, drei, vier bzw. fünf Lüftungsschächten die Wahl der optimalen Gesamtanordnung. Bild 5 zeigt das Schlussresultat der Optimierung, aus dem hervorgeht, dass eine Lösung mit vier Lüftungsschächten die wirtschaftlichste Disposition darstellt. Die Trassierung zwischen den beiden Portalen verläuft dabei nicht geradlinig, sondern folgt mit einer kräftigen Auslenkung nach Westen der Talfurche des Gotthardpasses; der Verlauf der Geländeüberdeckung führte im Norden (kleine Überlagerung) zu kürzeren Lüftungsabschnitten als im Süden (grosse Überlagerung, Bild 6).

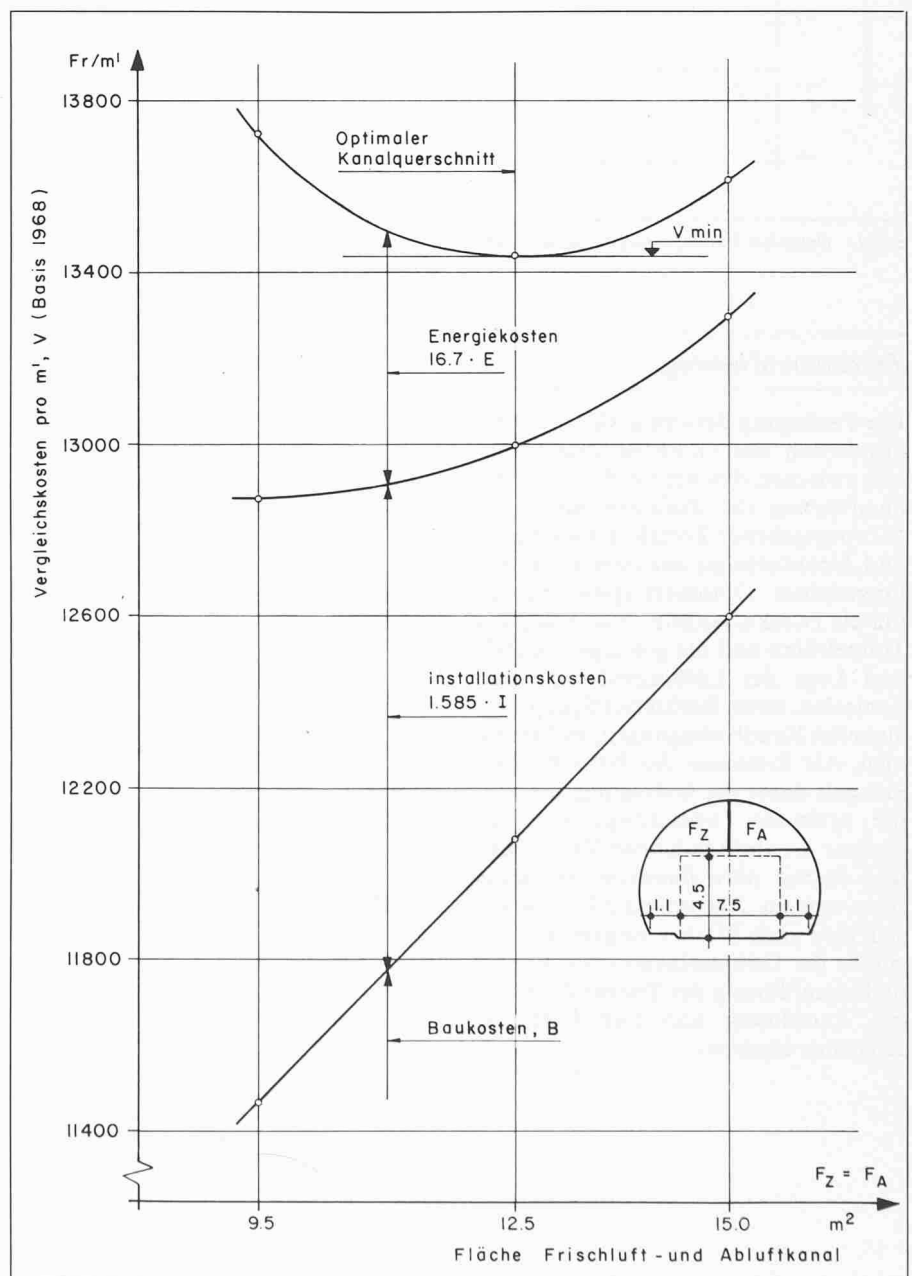


Bild 3. Ermittlung der optimalen Grösse der Luftkanäle für einen Lüftungsabschnitt des Tunnels von 2765 m Länge

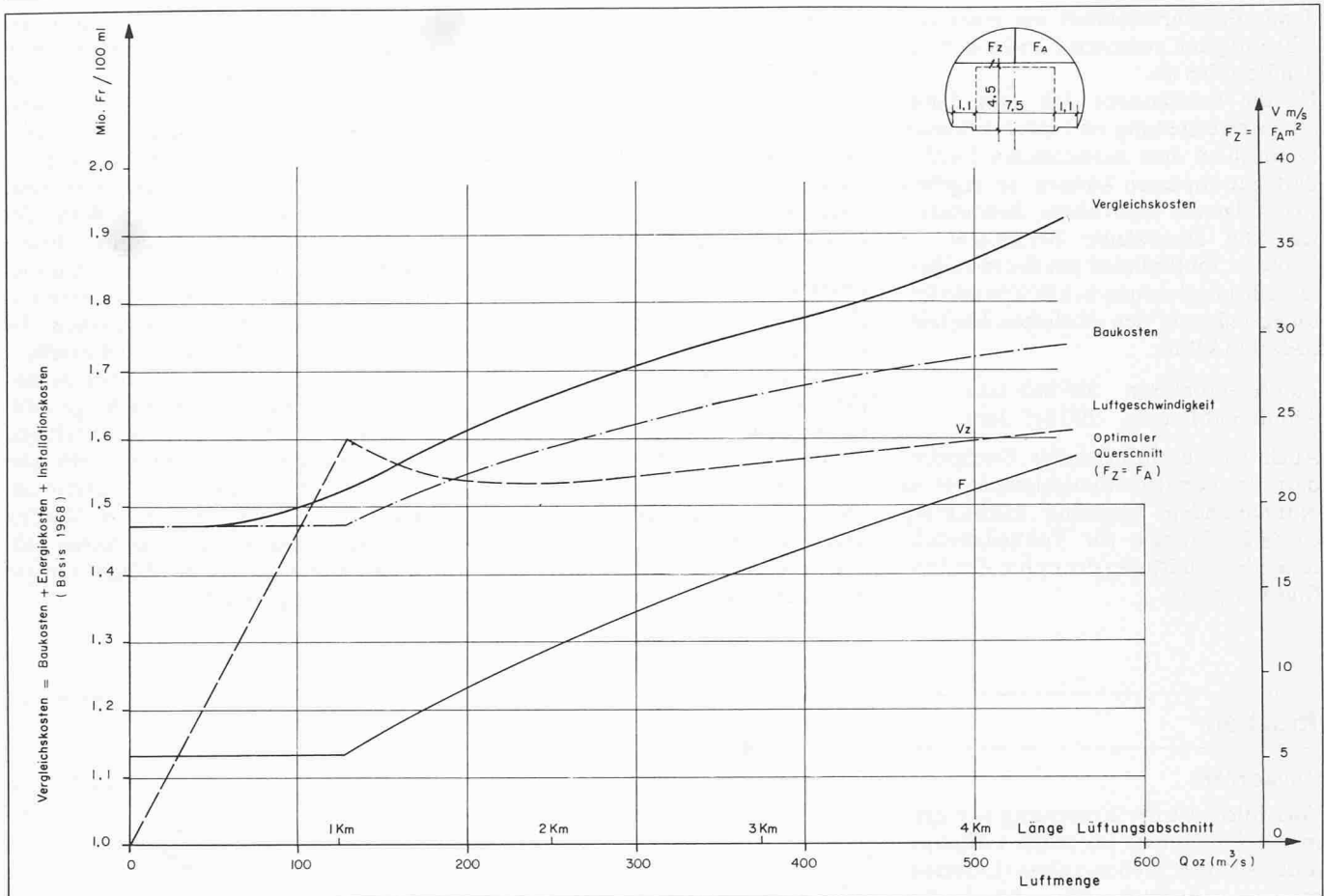


Bild 4. Optimaler Tunnelquerschnitt und dazugehörige Vergleichskosten in Abhängigkeit der Länge des Lüftungsabschnitts, bzw. der Luftmenge

### Zusammenfassung

Die Festlegung der optimalen Gesamtdisposition des Gotthard-Strassentunnels zwischen den beiden durch die Linienführung der Zufahrtsrampen der N2 vorgegebenen Portale in Göschenen und Airolò erfolgte auf Grund von umfangreichen Optimierungsrechnungen um die zweckmässigste Trassierung der Tunnelröhre und die günstigste Anzahl und Lage der Lüftungsschächte und Zentralen, unter Berücksichtigung aller äusseren Randbedingungen, zu bestimmen. Als Kriterium der Wirtschaftlichkeit galt dabei die Bedingung, dass für die optimale Gesamtdisposition die Summe der Aufwendungen für den Bau und Betrieb aller Bauwerke ein Minimum erreicht. Als optimale Lösung hat sich eine nach Westen ausgelenkte, ungefähr der Gotthardpassstrasse folgende Linienführung der Tunnelröhre und die Anordnung von vier Lüftungsschächten ergeben.

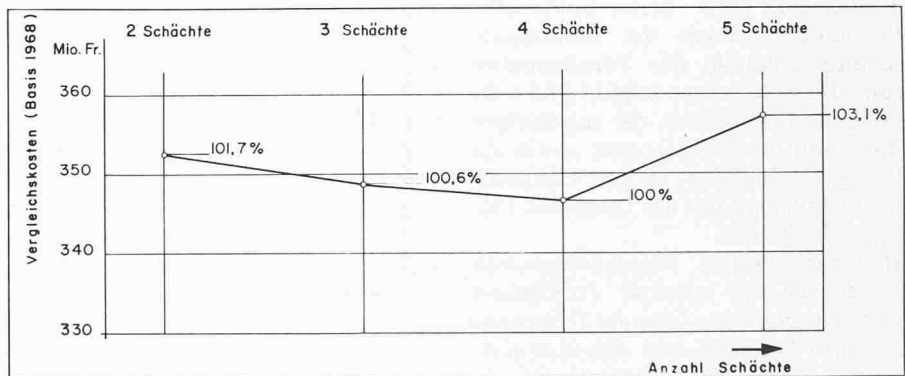


Bild 5. Gesamte Vergleichskosten für jeweils günstigste Lösungen mit zwei, drei, vier und fünf Lüftungsschächten. Die wirtschaftlichste Gesamtdisposition ergibt sich mit vier Lüftungsschächten

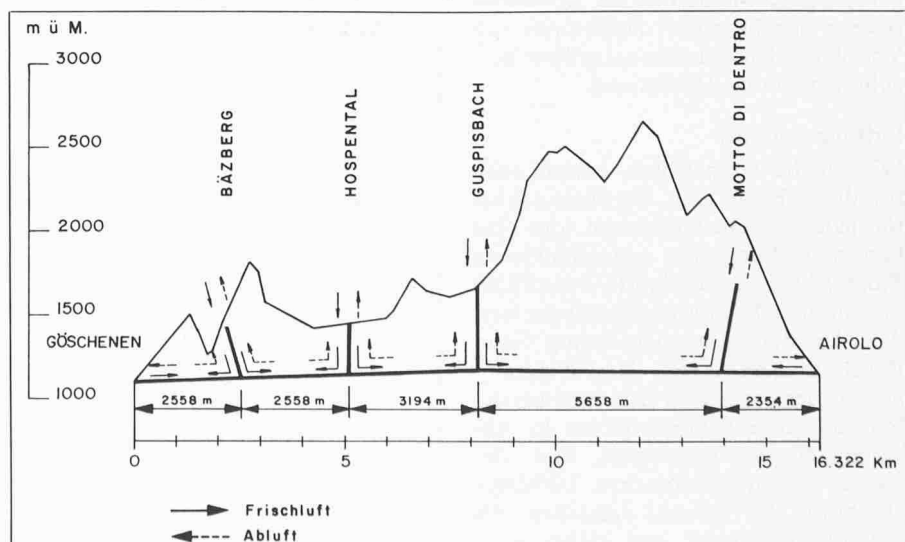


Bild 6. Längenprofil der optimalen Disposition der Anlagen

Adresse des Verfassers: W. Diethelm, dipl. Ing. ETH/SIA, Ingenieurbüro Dr. Ing. G. Lombardi, 6600 Locarno