

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 90 (1972)
Heft: 49

Artikel: Optimierung von Luttendurchmessern nach niedrigsten
Gesamtlüftungskosten beim Bau von Tunneln
Autor: Loch, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-85373>

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: 04.04.2026

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

Optimierung von Luttedurchmessern nach niedrigsten Gesamtlüftungskosten beim Bau von Tunneln

DK 624.191.9.003

Von Dr. E. Loch, Luwa AG, Zürich

Während des Baus von Tunneln ist eine Lüftung erforderlich, um die durch Fahrzeuge, Vortriebsmaschinen oder Sprengen entstehenden gefährlichen Gase zu verdünnen und aus dem Stollen zu spülen. Ausserdem wird durch die Bewetterung die Belastung der unter Tag arbeitenden Personen in bezug auf Staub und Wärme in erträglichen Grenzen gehalten.

Die gegenwärtig im Bau befindlichen oder projektierten Autostrassen- und Bahntunnel in den Alpen haben zum Teil beträchtliche Längen, so dass in Anbetracht der langen Bauzeit, die oft mehrere Jahre in Anspruch nimmt, sehr hohe Betriebskosten für die Belüftung entstehen. Aufgrund der Tatsache, dass in den letzten Jahren in der Praxis sehr oft viel zu kleine Luttenquerschnitte angewendet wurden, sah sich der Verfasser veranlasst, die wesentlichsten Bemessungsgrundlagen von verschiedenen Lüftungssystemen unter Berücksichtigung der Gesamtwirtschaftlichkeit zusammenzustellen.

1. Einleitung

Verschiedene Richtlinien und Vorschriften geben Auskunft über die Art der vorzusehenden Lüftung sowie über die erforderlichen Luftmengen, die in den bzw. aus dem Tunnel gefördert werden müssen [1], [2], [3]. Vorschläge über Lüftungsvarianten werden in [4] aufgezeigt. In den nachfolgenden Ausführungen wird weniger auf grundsätzliche Berechnung als vielmehr auf die Optimierung hinsichtlich Gesamtkosten für die Belüftung eingegangen. Dabei spielen die Kosten für Lutten, Ventilatoren und elektrische Schalteinrichtungen sowie die Wirkungsgrade der Maschinen eine wesentliche Rolle. Die angeführten Preise und Kostensätze sind für Herbst 1972 gültig, können aber mit den üblichen Gleitpreisformeln auf die nächsten Jahre korrigiert werden.

2. Allgemeines Vorgehen

Soll ein gegebener Luftstrom durch eine Lutte gefördert werden, so wird einerseits die Strömungsgeschwindigkeit und somit der Druckverlust und die Leistung des Ventilators grösser, je kleiner der Luttenquerschnitt ist. Andererseits verringern sich die Kosten für die Lutte. Die richtige Auswahl des Luttedurchmessers wird durch eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gewonnen. Dabei sind die gesamten Kosten P für die Belüftung während des Baus des ganzen Tunnelabschnittes zu analysieren und zu optimieren. Sie setzen sich wie folgt zusammen:

$$(1) \quad P = P_L + P_V + P_M + P_E + P_S + P_U$$

Der wirtschaftlichste Luttenquerschnitt F_L kann, wie in Bild 1 angedeutet, durch die Optimumbedingung

$$(2) \quad \frac{\partial P}{\partial F_L} = 0$$

gefunden werden.

3. Analyse der Einzelkosten

3.1 Lutten

Die Kosten einer zur Zeit des Baubeginns angeschafften Lutte von der Länge L_A (m) und einem Durchmesser D (m) betragen:

$$(3) \quad P_L = \tau_L z_L p_L \pi D L_A$$

Bei kreisförmigem Querschnitt ist

$$D = F_L^{1/2} 2/\sqrt{\pi}$$

Die Annuität τ_L kann aus [5] entnommen werden. Zinssatz i und Tilgungszeit z_L richten sich nach den jeweiligen Bedingungen. Bei Tunneln mit längeren Bauzeiten ist es sinnvoll, die Tilgungszeit z_L der Lutte gleich der Bauzeit z_B für den bestimmten Bauabschnitt anzusetzen. Unter Annahme einer konstanten Vortriebsgeschwindigkeit e beim Tunnelbau beträgt die Bauzeit

$$(4) \quad z_B = \frac{L}{eA}$$

Jahre. Je nach Gesteinsart und Maschinenpark bewegt sich e zwischen 0,2 und 0,4 m/h. Im Dreischichtenbetrieb kann die Arbeitsstundenzahl $A = 8000$ h/Jahr erreichen. Der Preis für Lutten kann sehr gut durch den Quadratmeterpreis p_L erfasst werden. Für spiralgefaltete, aus feuerverzinktem Stahlblech hergestellte Rohre (D bis 1 m) einschliesslich Befestigungsmaterial und Montage der Lutte an der Stollendecke ist $p_L = 25$ bis 26 Fr./m². Faltbare Kunststofflutten in einfacher

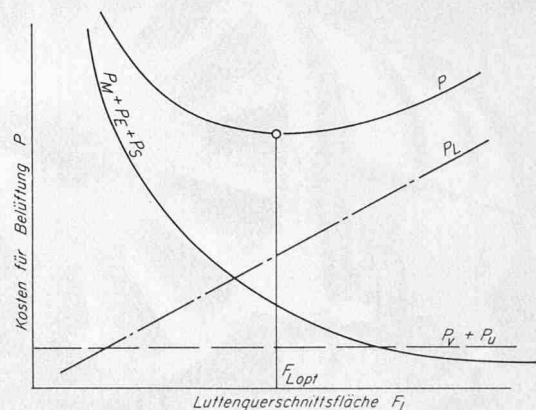


Bild 1. Prinzipieller Verlauf der Einzelkosten für die Belüftung eines Tunneln in Abhängigkeit der Luttenquerschnittsfläche

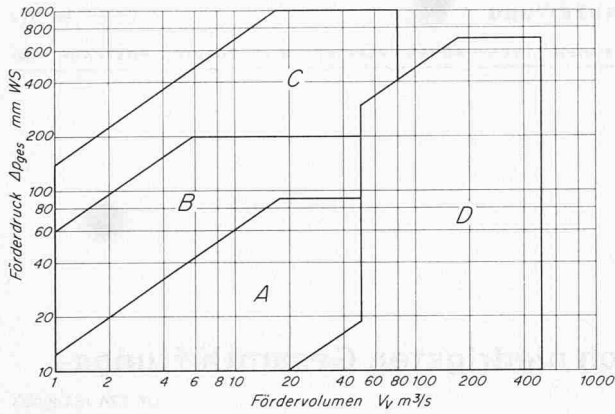


Bild 2. Annähernde Betriebsbereiche verschiedener Axialventilatoren

Ausführung einschliesslich Befestigungsmaterial und Montagekosten je nach Grösse

$D \leq 1,50 \text{ m}$	$p_L \approx 15 \text{ Fr./m}^2$
$1,50 < D < 2,0 \text{ m}$	$p_L \approx 17 \text{ Fr./m}^2$
$D \geq 2,50 \text{ m}$	$p_L \approx 25 \text{ Fr./m}^2$

Kunststoffluttten haben gegenüber Blechluttten einige Vorteile:

- leichter Transport, einfachere Verlegung
- geringeres Gewicht
- preisgünstiger.

3.2 Ventilatoren

In Bewetterungsanlagen werden heute praktisch ausschliesslich Axialventilatoren mit direktem Motorantrieb verwendet. Die nachfolgenden Kostenanalysen beschränken sich deshalb auf diesen Maschinentyp. Der Aufwand für einen Axialventilator richtet sich primär nach dem Verhältnis von Fördermenge zu Förderdruck. Bild 2 gibt einen Eindruck über die ungefähre Unterteilung des $V_V - \Delta p_{ges}$ -Feldes. Jedem Feld entspricht eine bestimmte Ventilatorart mit einer spezifischen Preisklasse.

Ganz allgemein kann der Kostenanteil für den Ventilator (ohne Antriebsmotor) primär vom Fördervolumen V_V (m^3/s) abhängig gemacht werden.

$$(5) \quad P_V = \tau_{MA} z_{MA} p_V V_V$$

τ_{MA} (Annuität) und z_{MA} (Tilgungszeit für Maschinenteile) können je nach Anwendungsfall von den entsprechenden Werten der Lutte differieren.

Der Preisfaktor p_V Fr. s/m^3 kann näherungsweise durch nachstehende Gleichung ausgedrückt werden:

$$(6) \quad p_V \approx q (1 + f_{VL} + f_{La} + f_{NL} + f_{Di})$$

Er beinhaltet alle Nebenkosten einschliesslich Fracht (Schweiz) und Aufstellung. Grundsätzlich ist p_V auch vom Förderdruck des Ventilators abhängig. Innerhalb des Betriebsbereiches eines Ventilortyps (Bild 2) bleibt p_V konstant und springt beim Überschreiten der Bereichsgrenzen auf einen anderen Wert.

Obschon der Einfluss der Ventilatorkosten bei der Optimierung der Lutte nicht zur Geltung kommt, werden die nachfolgenden Faktoren für die Ermittlung der Gesamtkosten benötigt.

Bereich A

Einfache Niederdruckventilatoren nur aus zylindrischem Gehäuse und Laufrad bestehend.

$$q = 185 \text{ Fr. s}/\text{m}^3$$

Alle Faktoren f gleich Null.

Bereich B

Axialventilatoren für höhere Druckbereiche

$$q = 185 \text{ Fr. s}/\text{m}^3$$

$$f_{NL} = 0,06 \text{ für Nachleitrad}$$

$$f_{Di} = 0,14 \text{ für Diffusor, wenn vorhanden}$$

Übrige Faktoren gleich Null.

Bereich C

Hochdruckventilatoren, beispielsweise Gleichdruckaxialgebläse nach Bild 3.

Bild 3a. Gleichdruck-Axialgebläse für grosse Fördervolumen und hohe Drücke. Vergleichbare Betriebsbereich C in Bild 2

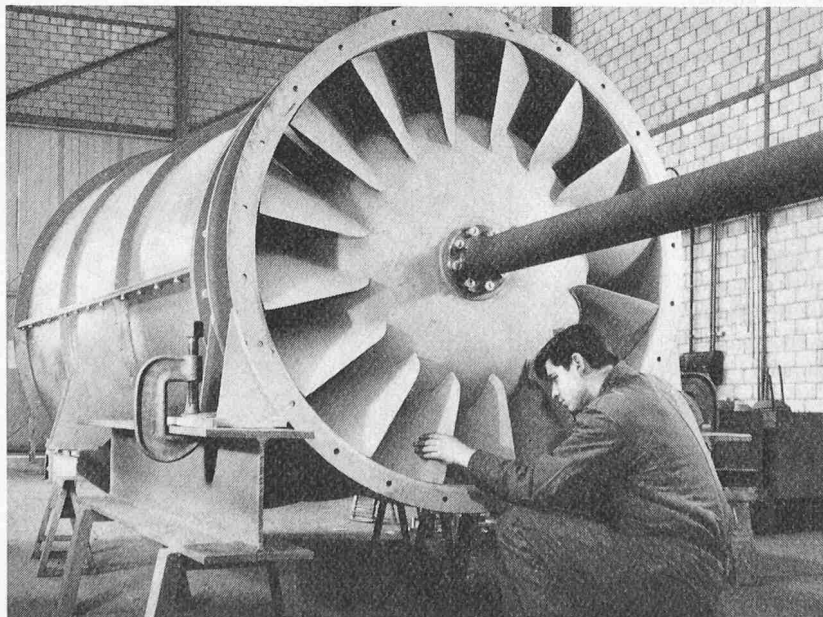
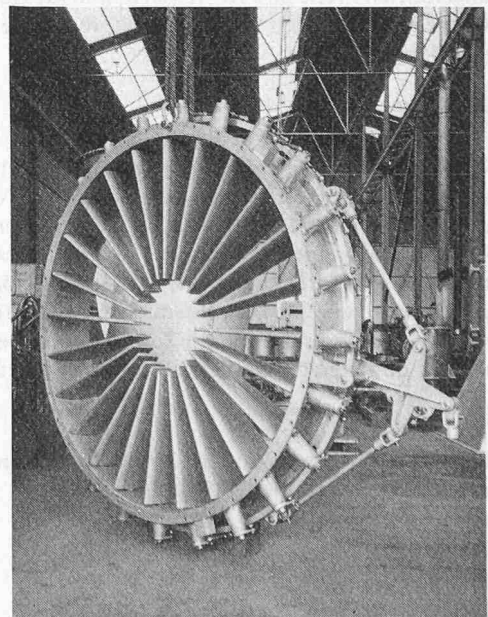


Bild 3b. Verstellbarer Vordrall-Leitapparat zur kontinuierlichen Regelung von Volumen und Druck (Werkphotos Luwa AG Zürich)



$q = 270 \text{ Fr. s/m}^3$ (Diffusor und Nachleitrad inbegriffen)
 $f_{VL} = 0,20$ für feststehenden Vorleitapparat (meist immer erforderlich)
 $f_{VL} = 0,35$ für verstellbaren Vorleitapparat
 Übrige Faktoren gleich Null.

Bereich D

Grossventilatoren

$q = 205 \text{ Fr. s/m}^3$ (Nachleitrad inbegriffen)
 $f_{Di} = 0,14$ für Diffusor, wenn vorhanden
 $f_{La} = 0$ für Laufrad mit im Stillstand verstellbaren Schaufeln
 $f_{La} = 0,44$ für Laufrad mit während des Betriebs verstellbaren Schaufeln
 Übrige Faktoren gleich Null.

Mit den Ventilatoren der Gruppe C und D kann die Fördermenge bzw. der Druck in einem weiten Bereich kontinuierlich geregelt und somit eine optimale Anpassung an die Betriebsverhältnisse erzielt werden.

3.3 Elektromotoren

Zum Antrieb der vorgenannten Ventilatoren werden praktisch ausnahmslos Asynchron-Käfiganker-Motoren verwendet. Die Kosten richten sich hauptsächlich nach Leistung N_V und Drehzahl n

$$(7) \quad P_M = 1,1 \tau_{MA} z_{MA} p_M f_M N_V / n$$

Der Preisfaktor p_M Fr./kW min und der Einflussparameter f_M für mehrere Drehzahlen ist in [6] definiert. Entsprechend der seither eingetretenen Teuerung muss p_M um rund 15% angehoben werden.

3.4 Elektrische Schalteinrichtungen

Dieser Kostenanteil lässt sich ebenfalls auf die Ventilatorleistung beziehen

$$(8) \quad P_E = 1,1 \tau_{MA} z_{MA} p_E N_V$$

Bei Niederspannungsschaltanlagen für eine Motordrehzahl, komplett montiert und betriebsbereit in einfacher Ausführung (Schlagwetter- und Explosionsschutz ausgenommen) ergibt sich ein annähernder Preisfaktor von $p_E \approx 45$ bis 55 Fr./kW. Bei mehreren Motordrehzahlen ist p_E nach [6] aufzuwerten.

3.5 Elektrischer Strom

Dieser Anteil spielt in der Wirtschaftlichkeitsrechnung unter Umständen eine wesentliche Rolle, weshalb eine genaue Erfassung sehr wichtig ist.

$$(9) \quad P_S = \frac{\Theta p_S N_V}{\eta_M}$$

Die über die ganze Bauzeit z_B summierte Vollastbetriebsstundenzahl Θ

$$(10) \quad \Theta = \frac{\eta_M}{N_V} \int_{(z_B)} \frac{N'_V}{\eta'_M} dt$$

ist abhängig von der Vortriebsgeschwindigkeit, der Belüftungsart, der Regulierungsmöglichkeit, der Dichtheit der Lutte sowie den Voll- und Teillastwirkungsgraden der Maschinen η_V, η'_V (Ventilator) und η_M, η'_M (Motor). N'_V bedeutet die Ventilatorleistung bei Teillast während der Vortriebsphase; N_V hingegen die höchste Leistung am Ende des Ausbaues.

Da bei konstanter Vortriebsgeschwindigkeit $dt = dx/v$ gesetzt werden darf, kann die Integration auch über den Längenparameter x durchgeführt werden.

Der Stromtarif p_S richtet sich nach den örtlichen Tarifen und der Abnahmemenge. Es müssen heute Werte zwischen $p_S = 0,10$ und $0,12 \text{ Fr./kWh}$ bezahlt werden.

3.6 Unterhalt und Wartung

In Anbetracht der rauen Betriebsbedingungen (Staub, Beschädigungen usw.) ist mit höheren Wartungskosten als bei festen Lüftungsinstallationen zu rechnen. Als annäherndes Mass kann die Ventilatorleistung herangezogen werden

$$(11) \quad P_U = p_U z_B N_V,$$

worin $p_U \approx 20 \text{ Fr./kW}$ ist.

4. Leistungsbedarf

Die Antriebsleistung für den Ventilator am Ende der Bauzeit ist abhängig vom max. Fördervolumen V_V und dem zugehörigen Druckverlust Δp_{ges} der Lutte.

$$(12) \quad N_V = \frac{V_V \Delta p_{ges}}{102 \eta_V} \approx \frac{\gamma}{204 g \eta_V} \left[\frac{\lambda L}{D} + b \right] \frac{V_V \bar{V}^2}{F_L^2}$$

Der Reibungskoeffizient λ für neue Lutten aus Blech oder Kunststoff kann aus den üblichen Diagrammen unter Zuhilfenahme einer Rauigkeit von $\delta = 2$ bis $3 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$ (δ/D relative Wandrauhigkeit) in Abhängigkeit der Reynoldszahl $Re = wD/\nu$ entnommen werden. Der Faktor b steht zusammenfassend für folgende Koeffizienten: Krümmer $\Sigma \zeta_K$, Austritt ζ_A . Ferner bedeutet: γ das spezifische Gewicht der Luft, g die Erdschwerebeschleunigung, η_V den Ventilatorwirkungsgrad.

Der für die Berechnung des Druckverlustes massgebende Volumenstrom \bar{V} hängt von der Art des Belüftungssystems und auch von der Dichtheit der Lutte ab.

Die vom Ventilator geförderte Luftmenge V_V ist nur bei dichten Lutten gleich der durch die Lutte strömenden Menge. In der Praxis sind Lutten sehr oft undicht. Infolge des starken Einflusses auf die Ventilatorleistung empfiehlt es sich, diese Leckrate zu berücksichtigen. Ein einfaches, verhältnismässig genaues Verfahren geht darauf hinaus, den Druckverlust in der Lutte mit einem mittleren Volumenstrom \bar{V} zu berechnen.

Lutte mit Überdruck (Ventilator in Lutte blasend)

Der Mengenwirkungsgrad einer 100 m langen Lutte kann definiert werden als

$$(13) \quad \varphi_{100} = 1 - \frac{\Delta V}{V} = 1 - \frac{\epsilon}{100},$$

wobei der Mengenverlust ΔV gleichmässig angenommener Undichtheiten in $\epsilon\%$ der durch die 100 m lange Lutte strömenden Luftmenge V angegeben ist. ϵ ist vom Durchmesser, Zustand und der Art der Lutte abhängig. Für eine Lutte der Länge L ergibt sich der Mengenwirkungsgrad zu

$$(14) \quad \varphi_L = (\varphi_{100})^{\frac{L}{100}}$$

Soll die am Ende aus der Lutte durch die Querschnittsfläche F_L austretende Luftmenge V_L betragen, so errechnet sich die erforderliche Fördermenge V_V des Ventilators am Eintritt der Lutte zu

$$(15) \quad V_V = \frac{V_L}{\varphi_L}$$

Für die Druckverlustberechnung kann mit guter Näherung für die ganze Lutte L der mittlere Volumenstrom

$$(16) \quad \bar{V} = V_L + 0,45 (V_V - V_L)$$

herangezogen werden. Zur Ermittlung der Fördermengen V'_L und V'_V bei der Teilstrecke x ist in Gl. (14) L durch x zu ersetzen.

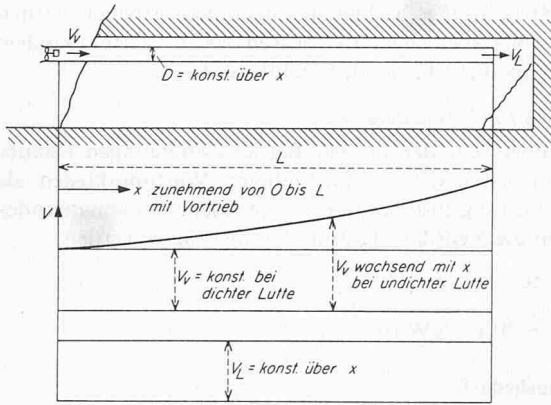


Bild 4. Einfachster Fall der Belüftung eines Stollens mit blasender Lutte

Lutte mit Unterdruck (Ventilator aus Lutte saugend)

Die Rechenmethode ist genau gleich. Ebenso sind alle Gleichungen unverändert anwendbar. Es wird lediglich die Strömungsrichtung umgekehrt und der Mengenverlust ΔV als Mengenzunahme angesehen.

5. Optimale Luttenquerschnittsfläche

Werden nun alle aus der Analyse gewonnenen Einzelkosten in Gl. (1) eingesetzt und die Optimierung Gl. (2) nach F_L durchgeführt, so ergibt sich für den allgemeinen Fall die explizite Näherungslösung gemäss Gl. 17

$$(17) \quad F_{Lopt} \cong \sqrt[3]{\frac{\gamma V_V \bar{V}^2 \left(\frac{5\sqrt{\pi} \lambda L}{4} + 2b \right)}{204 \sqrt{\pi} g \eta_V \tau_L z_L p_L L \bar{A}}} \cdot \sqrt[3]{\left[1,1 \tau_{MA} z_{MA} \left(p_M \frac{f_M}{n} + p_E \right) + \frac{\Theta p_S}{\eta_M} + p_U z_B \right]}$$

Der Aufbau der Gleichung lässt erkennen, dass die Luttenkosten allen anderen in direkter Weise entgegenstehen. Ferner kann die wichtige Folgerung gefunden werden, dass die optimale Luttenquerschnittsfläche ungefähr proportional dem Durchflussvolumen ist. Bei gegebener Luttenlänge und festgelegten Parametern ergibt sich somit eine optimale Durchflussgeschwindigkeit $w_{opt} = V_V / F_{Lopt}$, die unabhängig auf beliebige Luttengrößen angewendet werden kann. Auch geht hervor, dass undichte Lutten grössere Querschnittsflächen erfordern.

6. Praktische Anwendungsfälle

Um die gewonnenen Ergebnisse näher zu verdeutlichen und die Grössenordnungen optimal ausgelegter Lutten dem interessierten Fachmann näherzubringen, werden nachstehend einige Beispiele gegeben. Dabei werden die effektiv berechneten Zahlenwerte ohne Rücksicht auf genormte Lutten Durchmesser verwendet.

Beispiele

6.1 Der einfachste Fall der Bewetterung sieht eine gerade Lutte mit konstant bleibendem Durchmesser vor, wobei der Ventilator am Tunnelportal blasend in die Lutte angeordnet ist und die ganze erforderliche Frischluft V_L in der Nähe der Stollenbrust aus der Lutte in den Tunnelraum strömt, Bild 4. Dadurch entsteht im Tunnel ein Luftstrom von geringer Geschwindigkeit in Richtung Portal. Mit fortschreitendem Vortrieb wird die Lutte immer länger. Die Frischluftmenge V_L

ist konstant mit der Vortriebslänge x zu halten. Dies setzt voraus, dass der Ventilator mit einer entsprechenden Regeleinrichtung ausgerüstet ist.

Die Vollastbetriebsstundenzahl ergibt sich nach Gl. (10) für die dichte Lutte:

a) bei Vernachlässigen der Wirkungsgradänderungen während der ganzen Bauzeit

$$\Theta = \frac{L}{e} \frac{\left(\frac{\lambda L}{2D} + b \right)}{\left(\frac{\lambda L}{D} + b \right)} \cong \frac{L}{2e}$$

b) bei linearer Änderung des Produktes aller Wirkungsgrade $\eta' = \eta_V' \eta_M' \eta_x'$ zwischen dem Anfangszustand A ($x = 0$) und dem Endzustand E ($x = L$, $\eta_E = \eta$)

$$\eta' = \eta_A' + (\eta - \eta_A')x/L$$

$$\Theta = \frac{\eta L}{e \left(\frac{\lambda L}{D} + b \right)} \left\{ \frac{\lambda L}{D(\eta - \eta_A')^2} \left[(\eta - \eta_A') - \eta_A' \ln \frac{\eta}{\eta_A'} \right] + \frac{b L}{(\eta - \eta_A')} \ln \frac{\eta}{\eta_A'} \right\}$$

Der Luttendurchmesser ist vorerst anzunehmen und hinterher, falls erforderlich, zu korrigieren. Für die undichte Lutte ist die Ermittlung von Θ sehr langwierig, weil sowohl der Verlauf der variablen Fördermenge wie auch der veränderliche Förderdruck des Ventilators über die ganze Luttenstrecke berechnet werden muss. Der Absolutwert von Θ ist kleiner als bei der dichten Lutte. Als Näherung kann jedoch mit diesen Werten gerechnet werden.

Zahlenbeispiel: Kunststofflutte

V_L	= 30 m ³ /s	z_L	= $z_{MA} = 1$ Jahr
$L_{\bar{A}}$	= $L = 2000$ m	τ_L	= $\tau_{MA} = 1$
e	= 0,3 m/h	p_L	= 17 Fr./m ²
A	= 6000 h/Jahr	n_1	= 1000 U/min
z_B	= 1,11 Jahre	n_2	= 750 U/min
γ	= 1,10 kg/m ³	f_M	= 1,75
η_V	= 0,78	p_M	≈ 8 · 10 ⁴ Fr./kW min
η_M	= 0,93	p_E	= 50 Fr./kW
η	= 0,725	p_U	= 20 Fr./kW
η'_A	= 0,30	p_S	= 0,10 Fr./kWh
δ	= 3 · 10 ⁻² mm		
λ	≈ 0,012		
b	= $\zeta_A = 1$		
ζ_K	= 0		

6.1.1 Ergebnisse einer dichten Lutte unter Vernachlässigung der Wirkungsgradänderung der Maschinen während des Vortriebs:

V_V	= $\bar{V} = V_L$	Δp_{ges}	= 160 mmWS
η	= η'		Ventilatorotyp B
Θ	= 3600 h	p_V	= 22 Fr. s/m ³
F_{Lopt}	= 2,20 m ²	P_{opt}	= 221 260 Fr.
D_{opt}	= 1,67 m		
w_{opt}	= 13,7 m/s		

Zum Vergleich werden die Gesamtkosten P einer Lutte von kleinerem Durchmesser ermittelt:

$$\begin{aligned}
 w &= 19 \text{ m/s} & \Delta p_{\text{ges}} &= 363 \text{ mmWS} \\
 F &= 1,58 \text{ m}^2 & \text{Ventilator typ C} & \\
 D &= 1,42 \text{ m} & p_V &= 365 \text{ Fr. s/m}^3 \\
 P_Z &= 247\,500 \text{ Fr.} & &
 \end{aligned}$$

Gegenüber der optimierten Lösung ergeben sich um 12% höhere Gesamtkosten für die Belüftung.

6.1.2 Gleiche Annahmen wie oben, jedoch mit einer undichten Lutte und Berücksichtigung der Wirkungsgradänderung zwischen Anfang und Ende der Betriebsperiode:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon &= 2\% & \Delta p_{\text{ges}} &= 115 \text{ mmWS} \\
 \varphi_{100} &= 0,98 & \text{Ventilator typ B} & \\
 \varphi_L &= 0,668 & p_V &= 222 \text{ Fr. s/m}^3 \\
 V_V &= 45 \text{ m}^3/\text{s bei } x = L & P_{\text{opt}} &= 257\,160 \text{ Fr.} \\
 \bar{V} &= 36,8 \text{ m}^3/\text{s} \text{ ---} & & \\
 \Theta &= 4100 \text{ h} & & \\
 F_{L\text{opt}} &= 3,0 \text{ m}^2 & & \\
 D_{\text{opt}} &= 1,95 \text{ m} & & \\
 \bar{W}_{\text{opt}} &= 12,3 \text{ m/s} & &
 \end{aligned}$$

Die wesentliche Erhöhung von Θ ergibt sich aus der Berücksichtigung der tiefen Teillastwirkungsgrade. Der Wert Θ beträgt bei der gegebenen Undichtheit aber konstanten Maschinenwirkungsgraden nur 3190 h

Als Gegenüberstellung wiederum die dünne Lutte aus Beispiel 6.1.1, jedoch mit derselben prozentualen Undichtheit:

$$\begin{aligned}
 D &= 1,42 \text{ m} & \Delta p_{\text{ges}} &= 545 \text{ mmWS} \\
 F &= 1,58 \text{ m}^2 & \text{Ventilator typ C} & \\
 \bar{w} &= 23,3 \text{ m/s} & p_V &= 365 \text{ Fr. s/m}^3 \\
 P &= 369\,000 \text{ Fr.} & &
 \end{aligned}$$

Die Gesamtkosten sind hier infolge des grossen Energiebedarfs sogar 43% höher als bei optimal ausgelegter Lutte. Als wichtige Folgerung aus diesem Beispiel ergibt sich, dass die Leckverluste einen wesentlichen Einfluss auf die Bemessung der Lutte sowie auf die Gesamtkosten für die Bewetterung haben können.

6.2 Es wird dieselbe Belüftungsart wie in 6.1 untersucht, jedoch soll, sobald die Länge l erreicht ist, die Frischluftmenge V_l sprunghaft auf V_L erhöht werden, vgl. Bild 5. Dieser Fall ist in der Praxis zum Beispiel dann erforderlich, wenn ab einer bestimmten Stollenlänge mehr Fahrzeuge zum Abräumen des ausgebrochenen Gesteins eingesetzt werden.

Für die dichte Lutte folgen die Vollastbetriebsstunden aus:

- a) unter Vernachlässigen der Wirkungsgrad- und λ -Wertänderung sowie der Annahme, dass $b \ll l/D$ ist

$$\Theta \cong \frac{l^2}{2eL} \left[\left(\frac{V_{Vl}}{V_{VL}} \right)^3 + \left(\frac{L}{l} - 1 \right)^2 \right]$$

- b) das Produkt aller Wirkungsgrade η' aller Maschinen ändere sich linear zwischen dem Anfangspunkt A (η'_A) und dem Endzustand E ($\eta'_E = \eta_l$ bzw. η_L) des jeweiligen Streckenabschnittes

$$\begin{aligned}
 \Theta &= \frac{l^2 \eta_L}{2eL} \left\{ \left(\frac{V_{Vl}}{V_{VL}} \right)^3 \left(\frac{1}{\eta_l - \eta'_A} \right)^2 \left[\eta_l - \eta'_A \left(1 + \right. \right. \right. \\
 &+ \left. \left. \ln \frac{\eta_l}{\eta'_A} \right) \right] + \left(\frac{L/l - 1}{\eta_L - \eta'_A} \right)^2 \left[\eta_L - \eta'_A \left(1 + \ln \frac{\eta_L}{\eta'_A} \right) \right] \right\}
 \end{aligned}$$

Für die undichte Lutte ist Θ kleiner als die oben angeführten Werte, doch kann ohne grossen Fehler mit diesen

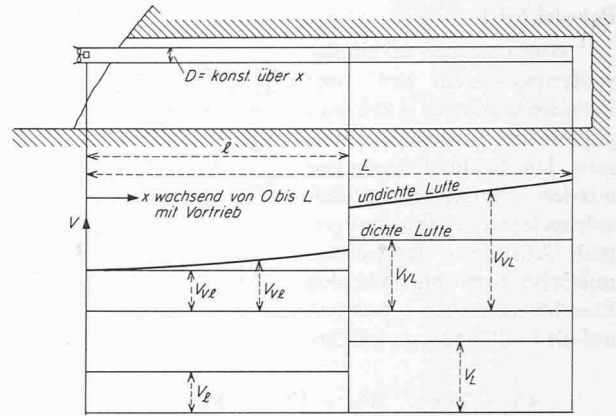


Bild 5. Sprunghafte Erhöhung der Luftmenge nach Erreichen der Vortriebslänge l

gerechnet werden. Alle weiteren Gleichungen bleiben für die Auslegung unverändert.

Zahlenbeispiel:

$$\begin{aligned}
 V_l &= 30 \text{ m}^3/\text{s} & t &= 6\% \\
 V_L &= 50 \text{ m}^3/\text{s} & z_L &= z_{MA} = 3 \\
 l &= 2000 \text{ m} & \tau_L &= \tau_{MA} = 0,374 \\
 L_A &= L = 4000 & p_L &= 17 \text{ Fr./m}^2 \\
 e &= 0,20 \text{ m/h} & n_1 &= 1500 \text{ U/min} \\
 A &= 7000 \text{ h/Jahr} & n_2 &= 1000 \text{ U/min} \\
 Z_B &= 2,86 \text{ Jahre} & f_M &= 1,66 \\
 \gamma &= 1,10 \text{ kg/m}^3 & p_M &= 7 \cdot 10^4 \text{ Fr./kW min} \\
 \eta_V &= 0,80 & p_E &= 50 \text{ Fr./kW} \\
 \eta_M &= 0,93 & p_U &= 20 \text{ Fr./kW} \\
 \eta_L &= 0,745 & p_S &= 0,12 \text{ Fr./kWh} \\
 \eta'_{Al} &= 0,30 & & \\
 \eta_l &= 0,70 & & \\
 \eta'_{AL} &= 0,40 & & \\
 \delta &= 3 \cdot 10^{-2} \text{ mm} & & \\
 \lambda &\cong 0,012 & & \\
 b &= 1 & &
 \end{aligned}$$

6.2.1 Ergebnisse für eine dichte Lutte

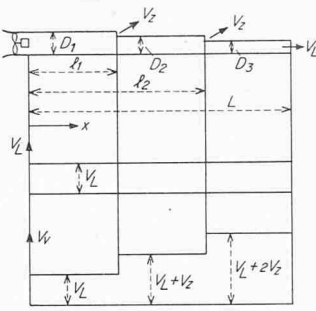
$$\begin{aligned}
 V_l &= V_{Vl}, \quad V_L = V_{VL} \\
 V_{VL} &= V_V = V \\
 \Theta &= 3725 \text{ h mit Berücksichtigung der } \eta\text{-Änderung (im Vergleich } \Theta = 3040 \text{ h ohne } \eta\text{-Änderung)} \\
 F_{\text{opt}} &= 3,64 \text{ m}^2 \\
 D_{\text{opt}} &= 2,15 \text{ m} \\
 w_{L\text{opt}} &= 13,7 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

6.3 In vielen Fällen ist es nicht erforderlich, die ganze im Stollen benötigte Frischluft bis zur Stollenbrust zu fördern. Ein wesentlicher Anteil der Frischluft dient zur Verdünnung und Spülung der Abgase der Traktionsfahrzeuge, die zwischen Portal und Stollenbrust verkehren. Es kann ein Luttesystem angewendet werden, das ein Ausblasen vorgegebener Frischluftmengen in den Tunnel in bestimmten Längenabständen vorsieht. In solchen Systemen spielt die Dichtheit der Lutte keine Rolle, sofern der Mengenverlust bekannt ist und in die Auslegung miteinbezogen wird. Wieder sei angenommen, dass die Lutte proportional der Vortriebslänge anwächst und die am Ende der Lutte ausgeblasene Frischluftmenge V_L konstant gehalten wird.

Nachfolgende Berechnungsgrundlagen sind unter Voraussetzung von $\lambda = \text{konst}$, $\eta = \text{konst}$, $b = 0$ durchgeführt.

Beispiel 6.3.1

Angenommen sei ein Bewetterungssystem mit zwei Zwischenauslässen (V_z) und abgestuften Luttendurchmessern. Die Schlussfolgerungen aus den vorangegangenen Beispielen legen es nahe, die optimale Abstufung der Luttendurchmesser proportional den Durchflussmengen bezogen auf die Endlänge L zu wählen.



$$\frac{V_L + 2V_z}{D_1^2} = \frac{V_L + V_z}{D_2^2} = \frac{V_L}{D_3^2} = \text{konst}$$

In den Gleichungen (3) (17) (18) sind folgende Ausdrücke einzuführen:

$$V_V = V_L + 2V_z$$

$$\bar{V}^2 = \left[\frac{l_1}{L} V_V^2 + \left(\frac{l_2 - l_1}{L} \right) \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^5 (V_L + V_z)^2 + \left(1 - \frac{l_2}{L} \right) \left(\frac{D_1}{D_3} \right)^5 V_L^2 \right]$$

$$\Delta p_{\text{ges}} = \frac{\sqrt{\pi} \gamma \lambda L}{8g F_1^{5/2}} \bar{V}^2$$

$$\Theta = \frac{L}{2e V_V \bar{V}^2} \left\{ V_L^2 \left[\left(\frac{l_1}{L} \right)^2 + (V_L + V_z) \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^5 \left(\frac{l_2 - l_1}{L} \right)^2 + (V_L + 2V_z) \left(\frac{D_1}{D_3} \right)^5 \left(\frac{L - l_2}{L} \right)^2 \right] + (V_L + V_z)^2 \left[\left(\frac{2l_1(l_2 - l_1)}{L^2} + (V_L + 2V_z) \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^5 \frac{2(l_2 - l_1)(L_1 - l_2)}{L^2} + (V_L + 2V_z)^3 \frac{2l_1(L - l_2)}{L^2} \right) \right] \right\}$$

$$L_{\bar{A}} = l_1 + (l_2 - l_1) \frac{D_2}{D_1} + (L - l_2) \frac{D_3}{D_1}$$

Zahlenbeispiele:

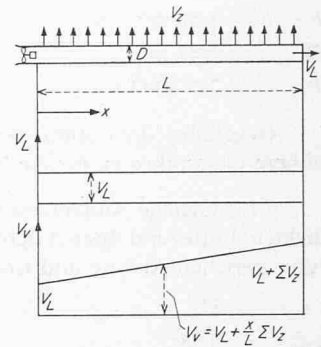
$$\begin{aligned} V_L &= 20 \text{ m}^3/\text{s} \\ L &= 2000 \text{ m} \end{aligned} \quad \text{alle weiteren Daten gleich wie 6.1}$$

$$\begin{aligned} V_z &= 5 \text{ m}^3/\text{s} & V_V &= 30 \text{ m}^3/\text{s} \\ l_1 &= 666 \text{ m} & \bar{V} &= 31,4 \text{ m}^3/\text{s} \\ l_2 &= 1333 \text{ m} & \Theta &= 2500 \text{ h} \\ D_1/D_2 &= 1,09 & L_{\bar{A}} &= 1825 \text{ m} \\ D_1/D_3 &= 1,225 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{1\text{opt}} &= 2,19 \text{ m}^2 \\ D_{1\text{opt}} &= 1,67 \text{ m}, D_{2\text{opt}} = 1,53 \text{ m}, D_{3\text{opt}} = 1,36 \text{ m} \\ \bar{w}_{1\text{opt}} &= 14,3 \text{ m/s} \\ P_{\text{opt}} &= 202 \text{ 860 Fr.} \end{aligned}$$

Beispiel 6.3.2

In diesem Beispiel werde die aus der Lutte ausströmende Luftmenge ΣV_z gleichmäßig auf die Luttelänge L verteilt. Ferner sei D konstant.



In den Gleichungen (3) (17) (18) sind folgende Ausdrücke einzuführen:

$$V_V = V_L + \Sigma V_z$$

$$\bar{V}^2 = \left(V_L + \frac{\Sigma V_z}{\sqrt{3}} \right)^2$$

$$\Delta p_{\text{ges}} = \frac{\lambda L}{D} \frac{\gamma}{2g} \bar{V}^2$$

$$\Theta = \frac{L}{2e V_V \bar{V}^2} [V_L^3 + 1,44 V_L^2 \Sigma V_z + 0,74 V_L \Sigma V_z^2 + 0,13 \Sigma V_z^3]$$

Zahlenbeispiele:

$$\begin{aligned} V_L &= 20 \text{ m}^3/\text{s} \\ L &= 20000 \text{ m} \end{aligned} \quad \text{alle weiteren Daten gleich wie 6.1}$$

$$\begin{aligned} \Sigma V_z &= 10 \text{ m}^3/\text{s} & V_V &= 30 \text{ m}^3/\text{s} \\ & & \bar{V} &= 25,8 \text{ m}^3/\text{s} \\ & & \Theta &= 2560 \text{ h} \\ & & L &= 2000 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{\text{opt}} &= 1,86 \text{ m}^2 \\ D_{\text{opt}} &= 1,54 \text{ m} \\ w_{\text{opt}} &= 16,1 \text{ m/s} \\ P_{\text{opt}} &= 216 \text{ 960 Fr.} \end{aligned}$$

Um auch hier auf niedrigere Gesamtkosten zu kommen, müsste der Luttendurchmesser mit zunehmender Länge abgestuft werden.

7. Schlussfolgerungen

In der Praxis besteht meistens die Neigung, zu kleine Luttenquerschnitte zu wählen. Die aus den hier willkürlich angenommenen Beispielen gewonnenen Ergebnisse dürfen selbstverständlich nicht verallgemeinert werden. Als Richtlinie für optimalwirtschaftlich ausgelegte Lutten können Luftgeschwindigkeiten je nach Bauzeit zwischen 10 und 15 m/s angesehen werden. Diese eher bescheidenen Geschwindigkeiten sind daraus zu erklären, dass die Lutten, insbesondere jene aus Kunststoff, sehr billig sind und der Energieaufwand während der Bauzeit wesentlich schwerer ins Gewicht fällt. Leider muss manchmal auch auf die Versperrung im Tunnel durch die Lutten Rücksicht genommen werden, wodurch wegen Platzmangels auf kleinere Luttenquerschnitte zurückgegriffen werden muss.

Besonderes Augenmerk ist auf die Undichtheit der Lutten zu richten. Sie beeinflusst die Gesamtkosten wesentlich. Undichte Lutten erfordern im allgemeinen grössere Durchmesser. Auch kommt es vor, dass Lutten am Anfang der Bauzeit dicht

sind, später aber infolge Beschädigungen und Manipulationen undicht werden. Diese Tatsache sollte bei der Bemessung der Lutten und der maschinellen Einrichtungen berücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA). Richtlinien für die Berechnung der künstlichen Stollenbelüftung. Form. 1484.
- [2] SUVA. Gotthard-Strassentunnel. Bemessung und Betrieb der künstlichen Belüftung während der Untertagarbeiten.
- [3] Grob H.: Betrachtungen zur Entwicklung im Tunnelbau. «Schweiz. Bauzeitung» 86 (1968), H. 36, S. 635-642.
- [4] Ruegg, H.: Lüftungsprobleme während dem Bau eines Tunnels. «Aktuelles Bauen» Nr. 2 (1969).
- [5] Hütte I, Auflage 27, S. 80.
- [6] Loch, E.: Optimierungsaufgaben bei der Lüftung von Autostrassentunneln. «Schweiz. Bauzeitung» 88 (1970), H. 50, S. 1159-1178.

Adresse des Verfassers: Dr. E. Loch, Luwa AG, 8047 Zürich, Aneimonenstrasse 40.

Die Fernwärmeversorgung der kantonalen Gebäude in Zürich

DK 697.34 (494.34)

1. Die Vorgeschichte

Schon in den Jahren 1930/32 wurde in Zürich das Fernheizkraftwerk (FHK) der Eidgenössischen Technischen Hochschule als Lehrinstitut und als kommerzielles Heizwerk erstellt. Ein mit diesem Werk abgeschlossener Wärmelieferungsvertrag vom 8. September 1932 sicherte die Versorgung des Kantonsspitals, ein zweiter Vertrag vom 25. Juli 1933 die der kantonalen Verwaltungsgebäude. Auch das neue Kantonsspital und die Universitätsgebäude sind anfangs der fünfziger Jahre an das FHK angeschlossen worden, wobei dieses auf seine Höchstleistung ausgebaut werden musste, die auf dem sehr beschränkten Raum möglich war. In der Folge sah sich das FHK gezwungen, die Lieferverträge mit dem Kanton auf die Heizsaison 1974/75 zu kündigen, um dem erhöhten Bedarf der in starker Erweiterung begriffenen Gebäude der ETH genügen zu können.

In Kenntnis dieser Entwicklung hat sich der Regierungsrat des Kantons Zürich schon 1966 entschlossen, Studien über eine Fernwärmeversorgung durchführen zu lassen. Diese zeigten, dass ein Heizwerk, das die Bedürfnisse der kantonalen Bauten im Hochschul- und Spitalgebiet Zürichs zu decken vermag, zweckmässigerweise in einem Industriegebiet zu erstellen ist. Nach Fühlungnahme mit den zuständigen eidgenössischen, kantonalen und städtischen Stellen konnte eine Lösung gefunden werden, die als zukünftigen Wärmelieferanten die damals baureife städtische Kehrrechtverbrennungsanlage im Glattal miteinschloss.

Zur Verwirklichung einer ersten Etappe dieser Fernwärmeversorgung bewilligte das Zürcher Volk in der kantonalen Abstimmung vom 23. März 1969 einen Kredit von 21,5 Mio Fr. zur Erstellung eines Rohrleitungskanals und -stollens von der Kehrrechtverbrennungsanlage Hagenholz im Glattal zum Kantonsspital und zur Kantonsschule Rämibühl sowie zur Installation einer durchgehenden Dampfleitung. Rohrkanal und -stollen wurden so projektiert, dass darin Fernleitungen zur Deckung des gesamten Wärmebedarfs kantonaler Bauten im Versorgungsgebiet auf 20 bis 30 Jahre hinaus untergebracht werden können. Die in der ersten Etappe erstellte Dampfleitung ist für eine höchste Heizleistung von 40 Gcal/h bemessen. Sie vermag den grössten Teil der in der Kehrrechtverbrennungsanlage anfallenden Wärme in das Spital- und Hochschulgebiet zu transportieren. Kanal und Stollen vermö-

gen im Endausbau die Leitungen für eine Heizleistung von rd. 200 Gcal/h aufzunehmen.

2. Die Bauausführung

Der Fernheizkanal besteht aus zwei Abschnitten, Bild 1. Ein erster von 1400 m Länge führt von der Kehrrechtverbrennungsanlage zum Stollenportal an der Winterthurerstrasse. Er wurde im Tagbau erstellt. Der zweite Abschnitt, der von dort bis zum Schacht Wässerwiese an der Schönleinstrasse reicht, ist 3800 m lang und wurde mit einer Tunnelfräse mit kreisrunden Querschnitt ausgefräst.

Der Tagbaukanal verläuft von der Kehrrechtverbrennungsanlage längs der Bahnlinie bis auf die Höhe der Saatlenstrasse, unterquert die Bahnlinie und führt dann längs des Strassenzuges Saatlenstrasse-Luegislandstrasse bis zur Winterthurerstrasse. Bis zum Knickpunkt Luegislandstrasse weist er einen lichten Querschnitt von 3,20 × 3,00 m auf, von dort bis zum Stollenportal einen solchen von 2,90 × 3,00 m. Den verbreiterten Kanalteil wird die Stadt Zürich gegen Kostenbeteiligung für ein eigenes Leitungspaar mitbenützen, womit es ihr möglich ist, für Schwamendingen und Oerlikon ein Fernheiznetz aufzubauen.

Der Stollen verläuft im ersten Teilstück in der Verlängerung des Tagbaukanals geradlinig unter der Winterthurerstrasse hindurch. Die ersten rund 40 m befinden sich in Lockergestein. Von dort konnte im gesunden Molassefels eine elektrisch angetriebene Tunnelfräse System Robins eingesetzt werden, die den Stollen in südöstlicher Richtung bis zum Schachtfuss Strickhof vorantrieb. Der weitere Verlauf in südlicher Richtung führt geradlinig zum Schacht Sternwartstrasse (Kantonsspital, neue Frauenklinik) und schliesslich zum Endpunkt «Wässerwiese» (Anschluss der Kantonsschule Rämibühl). Bild 1 zeigt das Längenprofil, Bild 2 den Lageplan. Die Tunnelfräse erlaubte im Mittel täglich 18 m Stollen-vortrieb. Der Durchmesser des Ausbruchprofils betrug 3,70 m. Es wurde nur während der Tagschicht gefräst. Hinter der Fräsmaschine legte man sofort vorfabrizierte Sohlenstücke ein, auf denen die Gleise für den Materialabtransport montiert werden konnten. Die Nachtschicht betonerte die Stollenwandung von 15 cm Stärke.

An der Nahtstelle von Kanal und Stollen wird das Dienstgebäude Luegisland erstellt. Es enthält Diensträume,