Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 100 (2008)
Heft: 4

Artikel: Planung und Bemessung von Entlüftungseinrichtungen für Druckstollen
Autor: Wickenhäuser, Martin / Minor, Hans-Erwin
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939719

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: 21.01.2026

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

Planung und Bemessung von Entlüftungseinrichtungen für Druckstollen

■ *Martin Wickenhäuser, Hans-Erwin Minor*

Zusammenfassung

Der vorliegende Artikel stellt Grundlagen zur Planung und Bemessung von baulichen Entlüftungseinrichtungen für Druckstollen vor. Mit grossmassstäblichen physikalischen Modellversuchen wurde die Wasser-Luft-Strömung in leicht abwärts geneigten Druckstollen, in Luftabscheidekammern und in vertikalen Entlüftungsrohren untersucht. Es zeigt sich, dass für eine bestimmte Stollenneigung und einen bestimmten Wasserdurchfluss ein begrenzter Luftvolumenstrom stollenabwärts transportiert wird. Mit den angegebenen optimalen Kammerabmessungen gelingt es, die im Stollen transportierte Luft vollständig auszutragen und über das Steigrohr abzuführen.

1 Einleitung

Luft in Drucksystemen von Wasserkraftanlagen wirkt sich meist negativ auf den Betrieb und auf die Anlage selbst aus. Die negativen Auswirkungen reichen von erhöhten Energieverlusten, Pulsationen, Druckstössen, Veränderung der Druckstosscharakteristik, Wirkungsgradminderung und erhöhter Kavitationsgefahr von Turbinen sowie Pumpen bis hin zu Schäden an Anlagenteilen. Aus diesem Grund werden in der Regel Anlagen so geplant und betrieben, dass keine Luft in das System eingetragen wird. Bei manchen Anlagen kann aber ein Lufteintrag nicht vollständig vermieden werden, oder er wird aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen in Kauf genommen. Darüber hinaus zeigt sich, dass mit dem steigenden Bedarf an Energie und einer flexibleren Verfügbarkeit von Spitzenenergie die Problematik an Bedeutung zunimmt.

Mit richtig entworfenen baulichen Entlüftungseinrichtungen kann Luft auf einfache Weise aus Drucksystemen entfernt werden. Sie bestehen aus einer Luftabscheidekammer an der Firste des Stollens, welche die transportierte Luft aus der Strömung abscheidet, und einem auf die Kammer aufgesetzten Entlüftungsrohr, durch das die Luft abgeführt wird. Da spezifische hydraulische Grundlagen für die Planung und Bemessung solcher Entlüftungseinrichtungen nicht in ausreichendem Mass vorliegen, wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich die Wasserluftströmung in Druckstollen, Luftabscheidekammern und Entlüftungsrohren untersucht. Wickenhäuser (2008) stellt in seiner Dissertation die Ergebnisse vor und zeigt anhand von Beispielen ein Bemessungskonzept auf. Im vorliegenden Artikel wird im Wesentlichen folgenden Fragen nachgegangen: Wie bewegt sich Luft in leicht geneigten Druckstollen, wie gross muss eine Luftabscheidekammer dimensioniert werden, um die transportierte Luft vollständig auszutragen, und wie hoch steigt der Wasserspiegel im Entlüftungsrohr an?

2 Hydraulisches System

Bild 1 zeigt die wesentlichen hydraulischen und geometrischen Einflussparameter des Entlüftungssystems. Diese sind der Volumenstrom der Luft (Q_G) und des Wassers (Q_W), der Durchmesser (D) und die Neigung gegen die Horizontale (S) des Stollens, die Höhe (H), die Länge (L), die Breite (B) sowie die Dachgeometrie der Luftabscheidekammer. Die wesentlichen Parameter im Entlüftungsrohr sind der Luftvolumenstrom (Q_g), der Ausgangswasserspiegel (h_w), der Durchmesser (d) und die Neigung gegen die Vertikale (α_d). Wird Luft im Entlüftungsrohr ausgetragen, steigt der Wasserspiegel (gemessen von Rohrunterkante) vom Ausgangswasserspiegel (h_w) an und schwankt zwischen dem maximalen (h_{max}) und dem minimalen Wasserspiegel (h_{min}). Der mittlere Wasserspiegelanstieg berechnet sich mit $h_m = (h_{max}+h_{min})/2$. Die maximale Wasserspiegelschwankung berechnet sich mit $\Delta f_{max} = h_{max} - h_{min}$.

Da sich die Luftdichte ρ_g im System (z.B. im Steigrohr) mit dem sich änderndem Umgebungsdruck p_i (an der Stelle i) ändert, berechnet sich der Luftvolumenstrom zu:

$$Q_G = \frac{\dot{m}_g}{\rho_{gi}} = \frac{\dot{m}_g \cdot R_s \cdot T}{p_i}. \qquad (1)$$

Dabei ist $\dot{m}_g$ der Luftmassenstrom, R_s die spezifische Gaskonstante und T die Temperatur. Der Luftvolumenstrom ändert sich daher im System und muss in Abhängig-

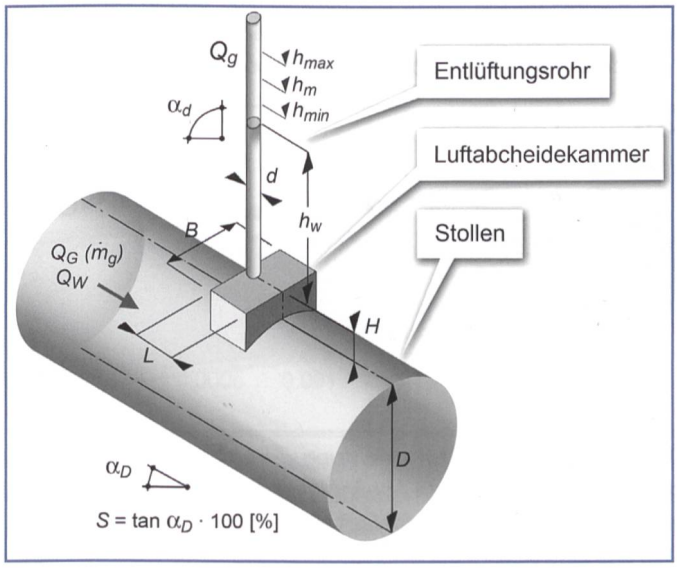


Bild 1. Übersicht über die massgebenden hydraulischen und geometrischen Parameter des Entlüftungssystems.

keit des Drucks berechnet werden. Eine fundamentale Grösse in der Beschreibung von Wasser-Luft-Strömungen ist die bezogene Phasengeschwindigkeit (engl. superficial velocity) der Luft im Steigrohr:

$$U_g = \frac{Q_g}{A_d}, \qquad (2)$$

der Luft im Stollen:

$$U_G = \frac{Q_G}{A_D}, \qquad (3)$$

sowie des Wassers im Stollen:

$$U_W = \frac{Q_W}{A_D}. \qquad (4)$$

Dabei ist A_d der Steigrohrquerschnitt und A_D der Stollenquerschnitt. Zur Beschreibung Froude-ähnlicher Prozesse wird im Stollen die dimensionslose bezogene Phasengeschwindigkeit F_G der Luft:

$$F_G = \frac{Q_G}{A_D\sqrt{gD}} = \frac{U_G}{\sqrt{gD}} \qquad (5)$$

bzw. des Wassers:

$$F_W = \frac{Q_W}{A_D\sqrt{gD}} = \frac{U_W}{\sqrt{gD}} \qquad (6)$$

verwendet.
Dabei ist g die Erdbeschleunigung.
Die dimensionslose bezogene Wassergeschwindigkeit liegt bei den durchgeführten Versuchen zwischen $F_W = 0.25$ bis 0.63. Dies entspricht bei einem Stollendurchmesser von z.B. $D = 6$ m einer mittleren Wassergeschwindigkeit von $u_W = 1.9$ m/s bis 4.8 m/s.

2.1 Versuchsstände

Der Versuchsstand besteht aus einem 11 m langen und von 0 bis 12° abwärts neigbaren transparenten Rohr mit einem Innendurchmesser von $D = 0.484$ m. Der Wasserdurchfluss kann zwischen 0 und 0.26 m^3/s eingestellt werden. Am Anfang des Rohrs ist ein Strömungsgleichrichter angeordnet. Dahinter wird Luft am Rohrboden oder an der Rohrdecke in den Druckabfluss dosiert eingeblasen. Der Luftgehalt ($\beta = Q_G/Q_W$) in der Zuströmung liegt bei den durchgeführten Versuchen zwischen $\beta = 0.3$ bis 5‰. In einer Entfernung von 8 m nach dem Gleichrichter befindet sich an der Firste des Rohrs die Luftabscheidekammer. Auf dieser ist ein Entlüftungsrohr aufgesetzt. Das Entlüftungsrohr, mit einem Durchmesser von $d = 0.032$ m bzw. 0.054 m, ist am oberen Ende zur Atmosphäre offen. Am Ende des Rohres befindet sich ein Schieber, mit dem eine variable Druckhöhe eingestellt werden kann. Danach fliesst das Wasser über ein Auslaufbecken in den Rücklauf.

Die Strömungsverhältnisse im Entlüftungsrohr sowie der Einfluss des Durchmessers werden in einem zweiten grossmassstäblichen Versuchsstand untersucht. Dieser besteht aus einem 8 m hohen, vertikalen und transparenten Rohr mit einem Durchmesser von $d = 0.054$ m bzw. 0.110 m. Das Rohrende ist zur Atmosphäre offen. Am unteren Ende wird Luft dosiert über eine Düse eingeblasen.

3. Wasserluftströmung in leicht geneigten Druckstollen

Hinsichtlich Planung von Entlüftungseinrichtungen ist die Kenntnis der Bewegungsrichtung der Luft im Druckstollen von massgebender Bedeutung. Dabei stellt sich die Frage, wie viel Luft in abwärts geneigten Stollen von der Wasserströmung transportiert wird.

3.1 Strömungsmuster

In Abhängigkeit der Stollenneigung und des Wasser- und des Luftdurchflusses stellen sich unterschiedliche Strömungsmuster und eine Blasengrössenverteilung ein. Bei horizontalen und in Strömungsrichtung ansteigenden Stollen bewegen sich alle Luftblasen mit der Wasserströmung. Bei in Strömungsrichtung abwärts geneigten Stollen (*Bild 2*) können dagegen Luftblasen mit der Wasserströmung transportiert werden oder gegen sie aufsteigen. Dabei bewegt sich ein Teil des Luftvolumenstroms stollenaufwärts (Q_{Gr}), und ein Teil wird mit der Wasserströmung transportiert (Q_{Gt}). Auf die Blasen wirken dabei zum einen Strömungskräfte und zum anderen Auftriebskräfte. Bis zu einer gewissen Geschwindigkeit des Wassers überwiegen die Auftriebskräfte, und die gesamte Luft steigt gegen die Strömung auf. Beim Überschreiten einer kritischen Wassergeschwindigkeit (u_{wc}) übersteigen die Strömungskräfte die Auftriebskräfte kleinerer Blasen und sie werden stromabwärts transportiert, wohingegen grössere Blasen weiterhin gegen die Strömung aufsteigen. Ab einer gewissen Wassergeschwindigkeit wird die Luft vollständig stromabwärts transportiert.

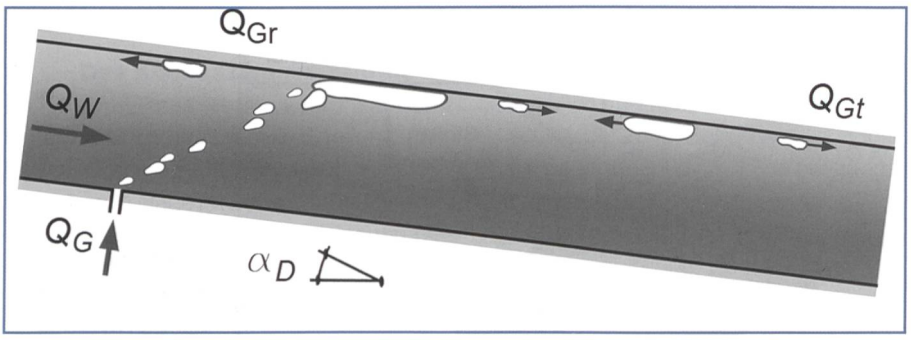


Bild 2. Schematische Darstellung der Bewegungsrichtung von Luft in abwärts geneigten Druckstollen bei konstantem Lufteintrag. In Abhängigkeit der Stollenneigung (α_D) und des Volumenstroms des Wassers (Q_W) und der Luft (Q_G) bewegt sich ein Teil der Luft stollenaufwärts (Q_{Gr}), und ein Teil wird mit der Wasserströmung transportiert (Q_{Gt}).

3.2 Lufttransportkapazität

In den Versuchen wurde der stollenabwärts transportierte Luftvolumenstrom Q_{Gt} in Abhängigkeit von Q_W und Q_G für verschiedene Stollenneigungen S gemessen. Die Messungen zeigen, dass ab einem bestimmten eingetragenen Luftvolumenstrom Q_G der transportierte Luftvolumenstrom konstant wird. Dieser Grenzwert ist der Luftvolumenstrom $Q_{Gt,max}$, der maximal transportiert werden kann. Ist der eingetragene Luftvolumenstrom kleiner als $Q_{Gt,max}$, wird die eingetragene Luft vollständig stollenabwärts transportiert. Ist dagegen der eingetragene Luftvolumenstrom grösser als $Q_{Gt,max}$, steigt die Differenz der Volumenströme gegen die Wasserströmung auf. In *Bild 3* ist die dimensionslose bezogene Luftgeschwindigkeit ($F_{Gt,max}$) der im Stollen maximal transportierten Luft gegen die dimensionslose bezogene Wassergeschwindigkeit (F_W) für eine Stollenneigung von S = –0.4%, –0.8%, –1.2%, –1.8% und –5.2% aufgetragen. Mit zunehmender F_W steigt $F_{Gt,max}$ an, dagegen sinkt $F_{Gt,max}$ mit zunehmender Stollenneigung S.

Wie oben beschrieben, werden ab der kritischen Wassergeschwindigkeit u_{wc} Luftblasen stollenabwärts transportiert. Die entsprechende dimensionslose bezogene Wassergeschwindigkeit liegt bei $F_{Wc} = 0.25$ und ist unabhängig von der Stollenneigung. Bei geringerer bezogenen Wassergeschwindigkeit wandert die eingetragene Luft vollständig gegen die Strömung aufwärts.

Ist bei der Planung einer Entlüftungseinrichtung nicht bekannt, wie viel Luft eingetragen wird (z.B. Wechselsprung

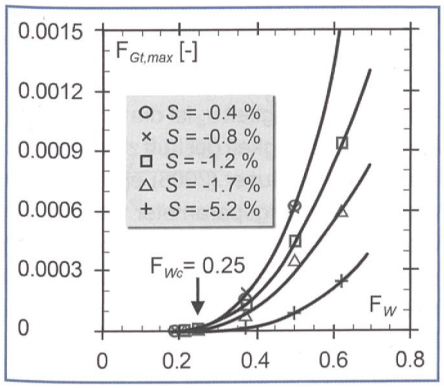


Bild 3. Dimensionslose bezogene Luftgeschwindigkeit $F_{Gt,max}$ der maximal transportierten Luft in Abhängigkeit der dimensionslosen bezogenen Wassergeschwindigkeit F_W und der Stollenneigung S. Die Kurven zeigen die Interpolation zwischen den Messpunkten und die Extrapolation für grössere Wassergeschwindigkeiten.

oder Einlaufwirbel), kann mit *Bild 3* bestimmt werden, wie viel Luft maximal stollenabwärts transportiert wird. Um einen vollständigen Luftaustrag zu gewährleisten, ist die Kammer auf dieser Grundlage zu dimensionieren.

Ist z.B. die Stollenneigung S = _4%, der Stollendurchmesser D = 6.5 m und der Wasserdurchfluss Q_W = 100 m^3/s, ergibt sich mit F_W = 0.38 (Gl. 6) und Bild 3 $F_{Gt,max}$ zu 0.00025 und damit der stollenabwärts transportierte Luftvolumenstrom zu Q_{Gt} = 0.066 m^3/s.

4. Wasser-Luft-Strömung in Luftabscheidekammern

Die Luftabscheidekammer verbindet hydraulisch den Hauptstollen mit dem Entlüftungsrohr. *Bild 4* zeigt schematisch die Strömung in der Luftabscheidekammer. Es stellt sich eine Wirbelströmung ein, die sowohl von der Strömung im Hauptstollen als auch von der im Entlüftungsrohr beeinflusst ist. Die im Stollen transportierte Luft steigt in die Kammer auf, wird in der Wirbelströmung transportiert und entweicht periodisch durch das Entlüftungsrohr. Gelangt Luft durch Rückströmungen im Entlüftungsrohr zurück in die Kammer wird sie von der Wirbelströmung wieder zurück zum Entlüftungsrohr transportiert. Aus diesem Grund ist das Entlüftungsrohr am gegen die Wasserströmung gerichteten Ende der Kammer mittig über die Kammerbreite anzuordnen. Ziel der Entlüftungskammer ist es, die transportierte Luft vollständig aus dem Stollen auszutragen. Es wird definiert, dass bei einer Austragsrate von η = 99.9% die Luft vollständig ausgetragen wird. Die Austragsrate η

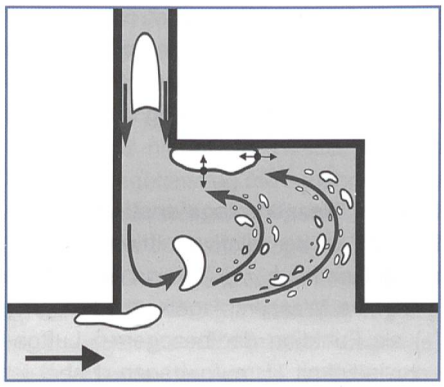


Bild 4. Schematische Darstellung der typischen Wirbelströmung in der Luftabscheidekammer.

der Kammer ist definiert als das Verhältnis vom ausgetragenen zum im Stollen transportierten Luftvolumenstrom:

$$\eta = \frac{Q_g}{Q_{Gt}} \cdot 100 \ [\%]. \qquad (7)$$

Die Messungen der Austragsrate für verschiedene Kammerabmessungen und Geometrien zeigen, dass je nach Wasser- und Luftdurchfluss für eine Austragsrate von $\eta \geq 99.9\%$ eine bestimmte Mindestkammergrösse erforderlich ist. Im Gegensatz zur Kammerhöhe kann sich eine zu lange Kammer negativ auf die Austragsrate auswirken. Daher wird eine minimal erforderliche Kammerhöhe H_{min} und eine optimale Kammerlänge L_{opt} angegeben. In *Bild 5* sind die Mindestkammerhöhe H_{min} und die optimale Kammerlänge L_{opt} gegen die dimensionslose bezogene Luftgeschwindigkeit F_{Gt} der transportierten Luft aufgetragen, bei denen $\eta \geq 99.9\%$ eingehalten ist. Dabei gilt *Bild 5a* für dimensionslose bezogene Wassergeschwindigkeiten bis F_W = 0.25, *Bild 5b* bis F_W = 0.37, *Bild 5c* bis F_W = 0.50 und *Bild 5d* bis F_W = 0.62. Die minimal erforderliche Kammerbreite beträgt $B > 0.5\ D$. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Kammer eine quaderförmige Form mit ebener Decke entsprechend *Bild 1* aufweisen soll.

Ist zum Beispiel F_W = 0.38 und F_{Gt} = 0.00025, wird nach Bild 5c eine Mindesthöhe von H_{min} = 0.18 D, eine optimale Länge von L_{opt} = 0.27 D und eine minimale Kammerbreite von B > 0.5 D erforderlich, um mindestens 99.9% der transportierten Luft aus dem Stollen auszutragen.

Die Grenze eines vollständigen Luftaustrags ist erreicht, wenn einzelne Luftblasen unabhängig von den Kammerabmessungen in der Scherströmung zwischen Kammer und Stollen weiter transportiert werden. Wickenhäuser

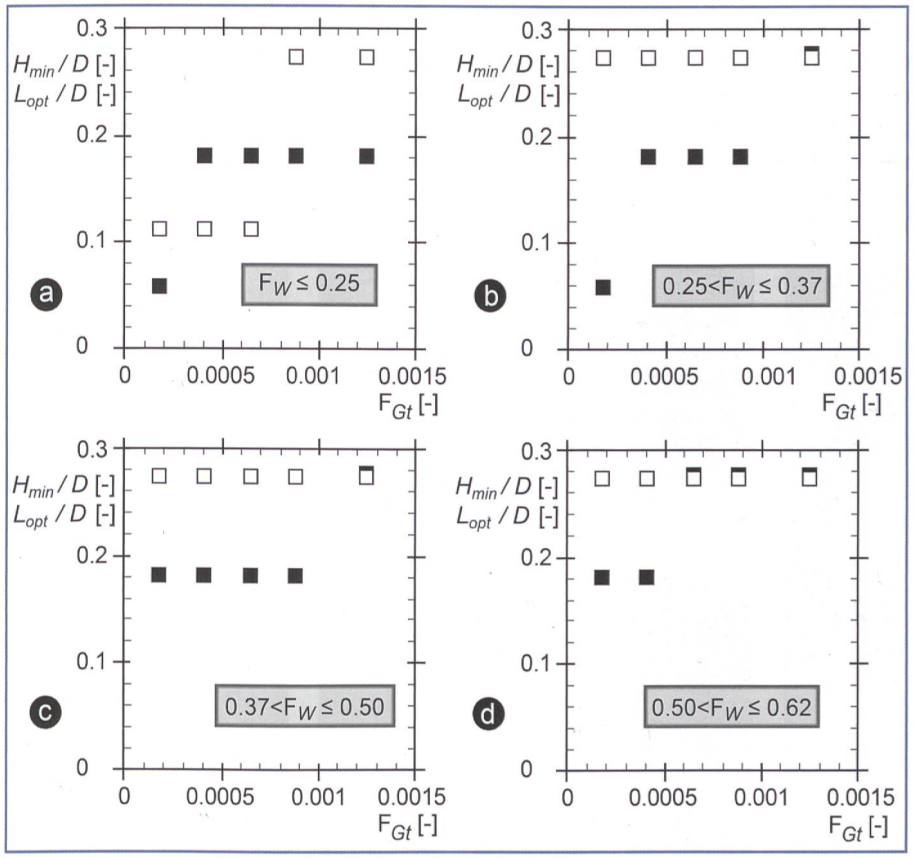


Bild 5. Relative Mindestkammerhöhe H_{min} (■) und die optimale Kammerlänge L_{opt} (□) in Abhängigkeit der dimensionslosen bezogenen Luftgeschwindigkeit F_{Gt} der transportierten Luft und der dimensionslosen bezogenen Wassergeschwindigkeit F_W für eine Austragrate von $\eta \geq$ 99.9% bei einer minimalen Kammerbreite von B > 0.5 ·D.

(2008) zeigt, dass die Grenze bei dimensionslosen bezogenen Wassergeschwindigkeiten von $F_W > 0.62$ (für $D = 4$ m ist $U_W > 3.9$ m/s, für $D = 6$ m ist $U_W > 4.8$ m/s und für $D = 8$ m ist $U_W > 5.5$ m/s) erreicht ist. Schliesslich gelten die angegebenen Kammerabmessungen für eine gleichgerichtete Strömung. Zusätzliche Sekundärströmungen können die Austragsrate deutlich verringern.

5. Wasser-Luft-Strömung in vertikalen Entlüftungsrohren

5.1 Strömungsmuster

Je nach Luftdurchfluss zeigt die Wasser-Luft-Strömung in vertikalen Entlüftungsrohren ein weites Spektrum an möglichen Strömungsmustern (*Bild 6*). Bei geringen Luftdurchflüssen stellt sich in Steigrohren mit einem Durchmesser von $d \geq 0.09$ m turbulente Blasenströmung ein (*Bilder 6a* bis *6c*). Die Luft steigt in Form von Einzelblasen (im Bild weiss) über den Querschnitt verteilt auf. Teilweise bilden sich grössere Einzelblasen aus, die im Rohrzentrum aufsteigen (*Bild 6b*). Bei einer bezogenen Luftgeschwindigkeit von $U_g = 0.09$ m/s geht das Strömungsmuster allmählich in Schaum-Pfropfenströmung über (*Bild 6d* und *6e*). Sie ist durch intermittierend aufsteigende Luftpfropfen (im Bild schwarz), gefolgt von Wasserpfropfen (im Bild weiss), charakterisiert. Die Luftpfropfen sind stark aufgelöst und die Wasserpfropfen stark belüftet. Im Nachlauf eines Luftpfropfens steigt das Wasser nach oben auf, an der Rohrwand strömt es dagegen nach unten. Bei $U_g = 1.0$ m/s bis 1.1 m/s geht das Strömungsmuster in Schaumströmung über (*Bild 6f*). Hierbei handelt es sich um ein hoch chaotisches Strömungsmuster, bei dem die Phasen vollständig durchmischt sind.

5.2 Wasserspiegelanstieg

In *Bild 7* ist der relative mittlere Wasserspiegelanstieg h_m/h_w (O) und der relative maximale Wasserspiegelanstieg h_{max}/h_w (+) als Funktion der bezogenen Luftgeschwindigkeit U_g aufgetragen. Dabei ist der Luftvolumenstrom der bezogenen Luftgeschwindigkeit U_g auf die Druckverhältnisse bei halbem Ausgangswasserspiegel $p_i = p_{atm} + \rho_w\, g\, h_w/2$ (Gl. 1) bezogen. Der Wasserspiegelanstieg nimmt mit zunehmender bezogener Luftgeschwindigkeit degressiv zu.

Mit Hilfe des Driftströmungsmodells (DM) nach Zuber und Findlay (1965) und Ishii (1977) können der mittlere Luftanteil und die mittlere Luftgeschwindigkeit in vertikalen und geneigten Rohren berechnet werden. Das DM ist ein eindimensionales Modell, welches die Relativgeschwindigkeit der Phasen berücksichtigt. Auf der Basis des DM wird der mittlere Wasserspiegelanstieg berechnet:

$$\frac{h_m}{h_w} = \frac{1}{1 - \dfrac{U_g}{C_0 \cdot U_g + u_d}} . \qquad (8)$$

Bei der eindimensionalen Beschreibung der Wasser-Luft-Strömung mit dem DM müssen zwei Driftströmungsparameter eingeführt werden. Der Verteilungsparameter C_0 berücksichtigt die über den Rohrquerschnitt nicht konstante Phasenverteilung, und die querschnittsgemittelte Driftgeschwindigkeit u_d ist die mittlere Relativgeschwindigkeit der Luft zum Wasser. Nach Wickenhäuser (2008) ergeben sich die Driftströmungsparameter für vertikale Entlüftungsrohre mit einem Durchmesser von $0.09\text{ m} < d < 0.48$ m in Abhängigkeit des Strömungsmusters zu:

Turbulente Blasenströmung, $U_g < 0.09$ m/s:

$$C_0 = 2.42,\ u_d = 1.59\left(\frac{\sigma \cdot g \cdot \Delta\rho}{\rho_w^2}\right)^{1/4},$$

Schaumpfropfenströmung, $0.09\text{ m/s} < U_g < 1.1$ m/s:

$$C_0 = 1.31,\ u_d = 2.26\left(\frac{\sigma \cdot g \cdot \Delta\rho}{\rho_w^2}\right)^{1/4}.$$

Dabei ist σ die Grenzflächenspannung zwischen Wasser und Luft und $\Delta\rho$ die Dichtedifferenz zwischen Wasser und Luft. Der maximale Wasserspiegelanstieg liegt um die Hälfte der maximalen Wasserspiegelschwankung ($\Delta f_{max}/2$) über dem mittleren Wasserspiegelanstieg. Wickenhäuser (2008) zeigt, dass die maximale Wasserspiegelschwankung in etwa der Luftpfropfenlänge entspricht, die wiederum eine Funktion der dimensionslosen bezogenen Luftgeschwindigkeit ist. Ergänzt man *Gleichung 8* um diesen Term, ergibt sich der relative maximale Wasserspiegelanstieg zu:

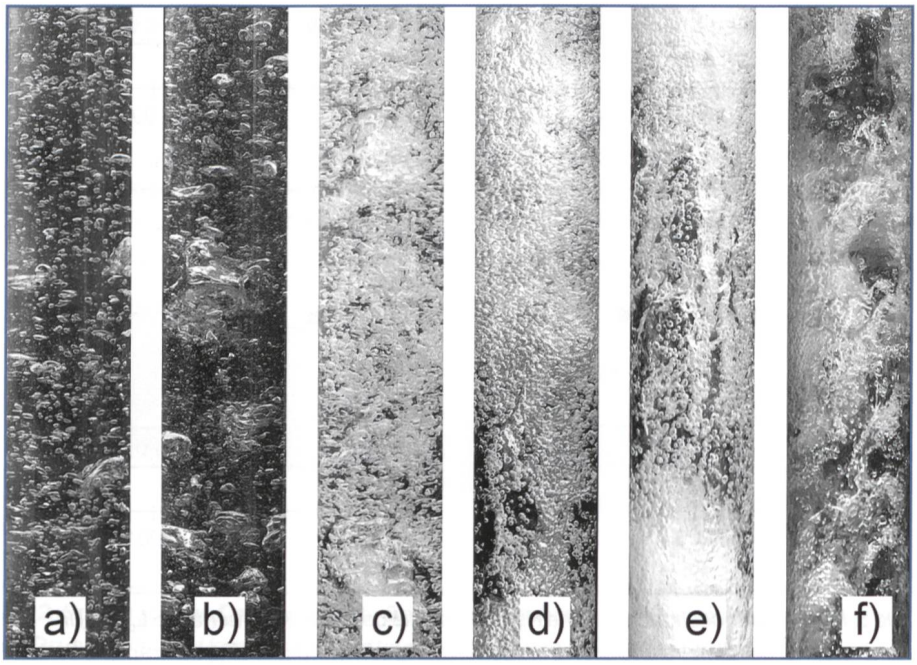


Bild 6. Strömungsmuster in Entlüftungsrohren: a) – c) turbulente Blasenströmung, d) – e) Schaumpfropfenströmung, f) Schaumströmung.

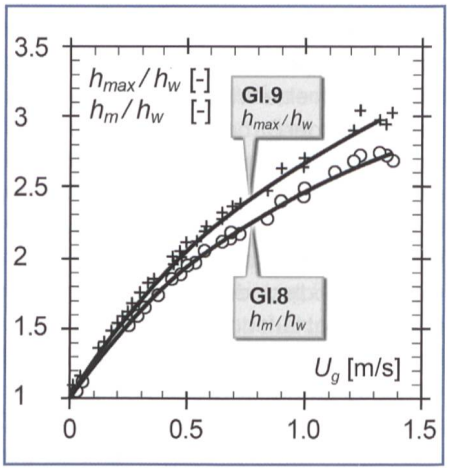


Bild 7. Relativer mittlerer h_m/h_w und relativer maximaler h_{max}/h_w Wasserspiegelanstieg in Abhängigkeit der bezogenen Luftgeschwindigkeit U_g in vertikalen Entlüftungsrohren mit einem Durchmesser von $0.09\text{ m} < d < 0.48$ m. Zusätzlich sind die Berechnungen nach Gleichung 8 und 9 eingetragen.

$$\frac{h_{max}}{h_w} = \frac{h_m}{h_w} + \frac{\Delta f_{max}}{2h_w} = \frac{1}{1 - \frac{U_g}{C_0 \cdot U_g + u_d}} + \frac{d \cdot (11.8 \cdot F_g + 0.52)}{2 \cdot h_w} \quad (9)$$

Wird zum Beispiel Luft mit einer dimensionslosen bezogenen Luftgeschwindigkeit von $F_{Gt} = 0.00025$ in einem Stollen mit $D = 6.5$ m transportiert (mit Gl. 5 folgt $Q_{Gt} = 0.066$ m³/s) und durch eine Entlüftungseinrichtung vollständig ausgetragen, berechnet sich die bezogene Luftgeschwindigkeit (bezogen auf die Druckverhältnisse auf halbem Ausgangswasserspiegel $p_i = p_{atm} + \rho_w g h_w/2$) nach Gl. 1 und Gl. 3 im Entlüftungsrohr mit $d = 0.4$ m und $hw = 10$ m zu $U_g = 0.69$ m/s. Daraus ergibt sich aus Bild 7 oder Gleichung 8 bzw. Gleichung 11 ein mittlerer bzw. maximaler Wasserspiegelanstieg von $h_m = 2.2\ h_w$ bzw. $h_{max} = 2.35\ h_w$.

5.3 Wasserspiegelanstieg bei hohen Ausgangswasserständen

Im Steigrohr nimmt der Luftvolumenstrom bei konstant eingetragenem Luftmassenstrom auf Grund der Druckabnahme von unten nach oben zu. Da die Änderung des Luftvolumenstroms von der mittleren Luftgeschwindigkeit und diese wiederum vom Luftvolumenstrom abhängt, lässt sich die Änderung der Luftdichte über die Zeit nicht analytisch beschreiben. Stattdessen wird der Wasserspiegelanstieg unter Berücksichtigung des sich ändernden Luftvolumenstroms über die Steigrohrhöhe in diskreten Schritten berechnet.

Zum anderen wirkt sich die Gasdichte nicht nur direkt auf den Luftvolumenstrom, sondern auch indirekt auf die Strömungsvorgänge der Wasser-Luft-Strömung aus. So zeigen Letzel et al. (1999), dass mit zunehmendem Systemdruck und damit Luftdichte der mittlere Luftgehalt und damit die mittlere Aufstiegsgeschwindigkeit der Luft abnimmt. Basierend auf den Daten von Letzel et al. (1999) bestimmt Wickenhäuser (2008) die Driftströmungsparameter aus *Gleichung 8* unter Berücksichtigung des Einflusses der Luftdichte. Auf dieser Grundlage lässt sich nun der relative mittlere Wasserspiegelanstieg unter Berücksichtigung des Einflusses der Luftdichte auf die Verteilung der Blasengrössen und unter Berücksichtigung des sich ändernden Luftvolumenstroms über die Steigrohrhöhe berechnen und ist in *Bild 8* dargestellt. Der Luftvolumenstrom der bezogenen Luftgeschwindigkeit U_g ist auf die Druckverhältnisse bei halbem Ausgangswasserspiegel $p_i = p_{atm} + \rho_w g h_w/2$ bezogen. Zusätzlich sind die Messwerte (O) bei $h_w = 4$ m eingetragen. Nach *Bild 8* nimmt der relative mittlere Wasserspiegelanstieg mit zunehmendem Ausgangswasserspiegel h_w stark zu.

Es kann davon ausgegangen werden, dass für Ausgangswasserspiegel bis $h_w = 15$ m *Gleichung 8* bzw. *Bild 7* gültig ist. Dagegen kann für grosse Ausgangswasserstände der relative mittlere Wasserspiegelanstieg unter Berücksichtigung sich ändernden Luftvolumenstroms über die Steigrohrhöhe und des Einflusses der Luftdichte auf die Blasengrössenverteilung nach *Bild 8* abgeschätzt werden.

Bei einem Ausgangswasserspiegel von hw = 50 m und einer bezogenen Luftgeschwindigkeit von $U_g = 0.9$ m/s (bezogen auf die Druckverhältnisse auf halbem Ausgangswasserspiegel $p_i = p_{atm} + \rho_w g h_w/2$) steigt der mittlere Wasserspiegel in einem Steigrohr mit $d = 0.4$ m unter Berücksichtigung des Einflusses der Luftdichte auf die Verteilung der Blasengrössen und unter Berücksichtigung des sich ändernden Luftvolumenstroms über die Steigrohrhöhe gemäss Bild 8 auf $h_m \approx 2.9\ h_w$.

6. Schlussfolgerungen

Mit Hilfe von physikalischen Modellversuchen wurde die Wasser-Luft-Strömung in horizontalen bis leicht geneigten Druckstollen, in Luftabscheidekammern und in vertikalen Steigrohren untersucht und allgemeine Grundlagen für die Planung und Dimensionierung von baulichen Entlüftungssystemen erarbeitet. Die wesentlichen Erkenntnisse hinsichtlich Planung und Dimensionierung für Entlüftungseinrichtungen sind:

- Bei in Strömungsrichtung abwärts geneigten Stollen kann Luft mit der Wasserströmung transportiert werden oder gegen sie aufsteigen. Ab einem bestimmten eingetragenen Luftvolumenstrom ist der transportierte Luftvolumenstrom konstant. Dieser Grenzwert ist der Luftvolumenstrom $Q_{Gt,max}$, der maximal stollenabwärts transportiert wird (*Bild 3*). Ist der eingetragene Luftvolumenstrom kleiner als $Q_{Gt,max}$, wird die eingetragene Luft vollständig stollenabwärts transportiert. Ist dagegen der eingetragene Luftvolumenstrom grösser als $Q_{Gt,max}$, steigt die Differenz der Volumenströme gegen die Wasserströmung auf.
- Je nach Wasser- und Luftdurchfluss ist für eine Austragsrate von $\eta \geq 99.9\%$ eine gewisse Mindestkammergrösse erforderlich. Mit *Bild 5* können die Mindestkammerhöhe H_{min} und die optimale Kammerlänge L_{opt} in Abhängigkeit der dimensionslosen bezogenen Luftgeschwindigkeit F_{Gt} für eine Austragsrate von $\eta \geq 99.9\%$ bestimmt werden.
- Im Entlüftungsrohr steigt der Wasserspiegel in Abhängigkeit des Luftvolumenstrom und des Durchmessers an. Für Ausgangswasserspiegel bis

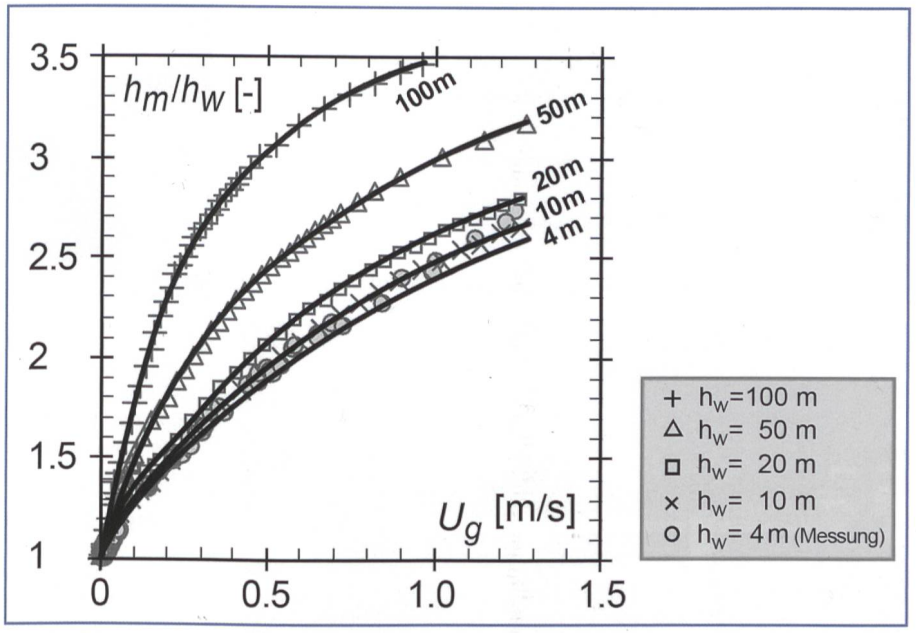


Bild 8. Berechnung des relativen mittleren Wasserspiegelanstiegs h_m/h_w in Abhängigkeit der bezogenen Luftgeschwindigkeit U_g und des Ausgangswasserspiegels h_w unter Berücksichtigung des Einflusses der Dichte auf die Verteilung der Blasengrössen nach Letzel (1999) und unter Berücksichtigung des sich ändernden Luftvolumenstroms über die Steigrohrhöhe.

15 m kann auf der Basis des Driftströmungsmodells der relative mittlere Wasserspiegelanstieg mit *Gleichung 8* berechnet oder mit *Bild 7* bestimmt werden. Für grosse Ausgangswasserstände kann mit *Bild 8* der relative mittlere Wasserspiegelanstieg unter Berücksichtigung des sich ändernden Luftvolumenstroms über die Steigrohrhöhe und des Einflusses der Luftdichte abgeschätzt werden.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch swisselectric research, eine Organisation der schweizerischen Stromverbundunternehmen.

Referenzen

Glauser, S. (2008): Lufttransport in abwärts geneigten Druckleitungen. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

Ishii, M. (1977): One-dimensional drift-flux model and constitutive equation for relative motion between phases in various two-phase flow regimes. International Journal of Multiphase Flow, ANL–77–47, USA.

Kriewitz, C. R. (2007): Entlüftungseinrichtungen in Druckstollen. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

Letzel, H. M., Schouten, J. C., Krishna R. and *van Direndonck L. L.* (1991): A model for gas holdup in bubble columns incorporating the influence of gas density on flow regime transitions. Chemical Engineering Science, 46(10):2491–2496.

Wickenhäuser, M. (2008): Zweiphasenströmung in Entlüftungssystemen von Druckstollen. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Nr. 205.

Wickenhäuser, M. and *Minor, H.-E.* (2007): Deaeration by structural means in pressurized flow, 32nd IAHR Congress, Venice, Italy, 108: 1–8.

VAW (2003): Karahnjukar Project, Jökulsa Tunnel, volume 4168/f. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

VAW (2005): Entlüftungseinrichtungen der Unterwasserführung von Kopswerk II, 4212-B. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

Zuber, N. and *Findlay, J. A.* (1965): Average volumetric concentration in two-phase flow systems. J. Heat Transfer, 87:453–468.

Anschrift der Verfasser

Dr. sc. *Martin Wickenhäuser*
Stucky SA, CH-1020 Renens, (ehemals VAW)
mwickenhaeuser@stucky.ch

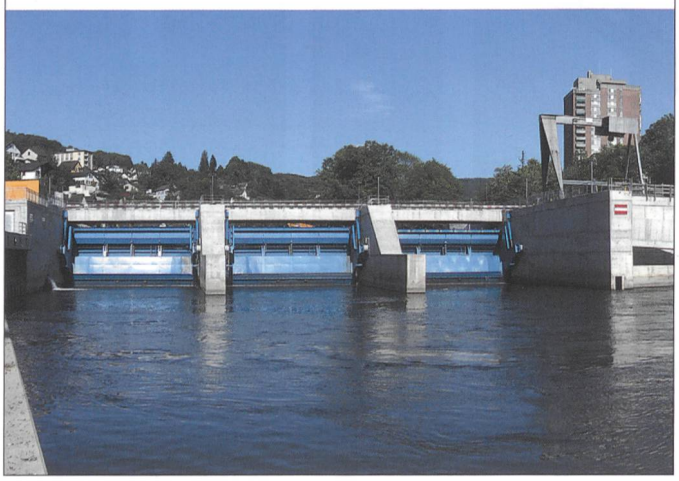
Prof. Dr.-Ing. *H.-E. Minor*
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich
CH-8092 Zürich

H. Erne Metallbau AG
CH-5316 Leuggern, Steiächer
Tel. +41 56 268 00 20 • Fax +41 56 268 00 21 • erne@h-erne.ch
www.h-erne.ch

Metall-/Stahlbau • Stahlwasserbau
Sonderkonstruktionen • Umwelttechnik
Anlage- und Apparatebau • Montagen/Revisionen

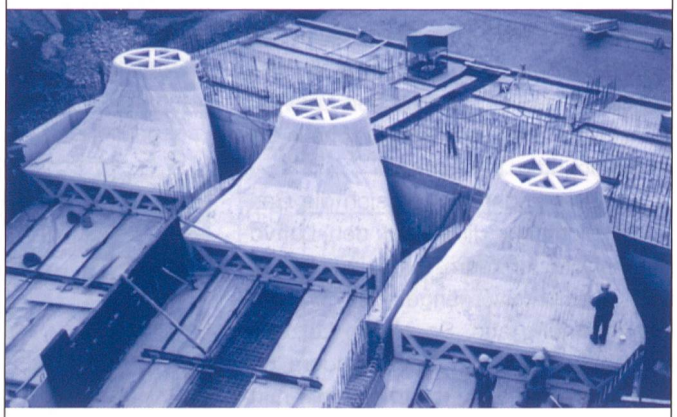
Wir sind Spezialisten für den Stahlwasserbau

- Wehranlagen
- Druckleitungen
- Rechenanlagen
- Gleitschützen
- Notverschlüsse
- Schlauchwehre
- Revisionen



ITECO

Führend in Kleinwasserkraft



Seit drei Jahrzehnten plant und baut die Abteilung Energie & Wasser von **ITECO AG** in der Schweiz und im Ausland Wasserkraftwerke, elektrifiziert isolierte Talschaften, erstellt Strategien und führt Förderprogramme durch. Optimierung ist unser Ziel. ITECO führte zudem etliche **Innovationen** erfolgreich in die Schweiz ein.
www.iteco.ch/kleinwasserkraft

Als **Wasserkraft-Ingenieur**

...können Sie ganzheitliches Denken mit der Praxis verbinden, ein Team führen und verfügen über **Bauerfahrungen**. Interessiert Sie die Mitarbeit in einer dynamischen Firma, so erfahren Sie mehr auf **www.iteco.ch/jobs** oder bei

ITECO Ingenieurunternehmung AG
Hanspeter Leutwiler, Leiter Abteilung E&W,
hpleutwiler@iteco.ch / www.iteco.ch