



Doctoral Thesis

Zweiphasenströmung in Entlüftungssystemen von Druckstollen

Author(s):

Wickenhäuser, Martin

Publication Date:

2008

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005595457> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

ETH-Diss.-Nr. 17682

Zweiphasenströmung in Entlüftungssystemen von Druckstollen

Abhandlung
zur Erlangung des Titels

Doktor der Wissenschaften
der
ETH Zürich

vorgelegt von

Martin Wickenhäuser

Dipl.-Ing., TU Berlin, geboren am 25.03.1976 in Deutschland

Hauptreferent: Prof. Dr. H.-E. Minor
Korreferent: Prof. Dr. P. Rutschmann

2008

Kurzfassung

Luft in Drucksystemen von Wasserkraftanlagen wirkt sich meist negativ auf den Betrieb und auf die Anlage selbst aus. Die negativen Auswirkungen reichen von einem erhöhten Reibungsdruckabfall, Pulsationen und Druckstössen, Wirkungsgradminderung von Turbinen und 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 ein Lufteintrag nicht vollständig vermieden werden, oder er wird aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen in Kauf genommen. Darüber hinaus zeigt sich, dass mit steigendem Bedarf an Energie und flexiblerer Verfügbarkeit von Spitzenenergie die Problematik an Bedeutung zunimmt.

Mit baulichen Entlüftungseinrichtungen kann Luft auf einfache Weise aus Drucksystemen entfernt werden. Sie bestehen aus einer Luftabscheidungskammer 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. Erfahrungen der letzten Jahre zeigen, dass spezifische hydraulische Grundlagen über die Wasserluftströmung in Druckstollen, Luftabscheidekammern und Entlüftungsrohren für die Planung und Bemessung solcher Entlüftungseinrichtungen nicht in ausreichendem Mass vorliegen. Mit der vorliegenden Arbeit sollen diese Grundlagen erarbeitet werden.

Hierfür wurden an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) an der ETH Zürich zwei Versuchstände errichtet und grossmassstäbliche Modellversuche durchgeführt. Dabei wurde die Wasserluftströmung in horizontalen und leicht abwärts geneigten Druckstollen, in Luftabscheidekammern sowie in Entlüftungsrohren untersucht.

Das Strömungsmuster einer Wasserluftströmung in Druckstollen sind im Wesentlichen von den Phasendurchflüssen und der Stollenneigung abhängig. Dabei zeigt sich bei allen untersuchten Phasendurchflüssen und bei allen Neigungen eine unterschiedliche Blasengrössenverteilung. In abwärts geneigten Leitungen werden je nach Phasendurchflüssen Luftblasen stromabwärts transportiert oder sie steigen gegen die Strömung auf. Bis zu einer kritischen Wassergeschwindigkeit in Druckstollen mit einem Gefälle bis 1.7 % steigt die Luft vollständig gegen die Hauptströmungsrichtung zurück. Bei höheren Wassergeschwindigkeiten wird Luft stollenabwärts transportiert. Hierbei zeigt sich, dass für jede untersuchte Stollenneigung und Wassergeschwindigkeit ein Grenzwert für den stollenabwärts transportierten Luftvolumenstrom existiert. Mit den gewonnenen Ergebnissen lässt sich bestimmen, in welche Richtung und in welcher Menge sich Luft in Druckstollen mit geringer Neigung bewegt.

Die Strömungsprozesse in Luftabscheidekammern wurden in Abhängigkeit der Kammerabmessungen und der Phasendurchflüsse untersucht und die jeweilige Austragsrate gemessen. Auf dieser Grundlage wurden Kammerabmessungen ermittelt, bei denen die im Stollen transportierte Luft vollständig ausgetragen wird.

In Entlüftungsrohren stellen sich in Abhängigkeit des Luftdurchflusses und des Durchmessers unterschiedliche Strömungsmuster ein. Dabei entsprechen die Strömungsmuster denen der Literatur, und die Art der Luftzugabe in das Steigrohr hat keinen signifikanten Einfluss auf den mittleren Wasserspiegelanstieg. Die Bestimmung des mittleren Luftanteils im Steigrohr erlaubt es, mit Hilfe des Driftströmungsmodells den mittleren und maximalen Wasserspiegelanstieg zu berechnen.

Da in den hydraulischen Modellversuchen der Wasserspiegelanstieg aus praktischen Gründen nur bei niedrigen Ausgangswasserspiegeln gemessen werden kann, wurde er für hohe Ausgangswasserspiegel unter Berücksichtigung des sich ändernden Luftvolumenstroms über die Steigrohrhöhe mit Simulationsrechnungen bestimmt. Es zeigt sich, dass in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms und des Ausgangswasserspiegels der Wasserspiegel bei Entlüftung auf das zwei- bis dreifache des Ausgangswasserspiegels steigen kann.

Auf dieser Grundlage wurde ein Planungs- und Bemessungskonzept für bauliche Entlüftungseinrichtungen in Druckstollen erarbeitet und anhand dreier Fallbeispiele dargestellt.

Abstract

Air in the pressure system of hydropower plants may have negative effects on their operation and energy production as well as on the structure itself. These negative effects include an increase of the friction pressure drop, pressure fluctuations and high pressure pulses. Furthermore, the trapped air result in a reduction of the efficiency of turbines and pumps. For this reason hydropower plants are designed so that no air is entrained into the system. Nevertheless this cannot completely be achieved in practice, either due to design limitations or construction costs. This problem appears to be increasing in the future because of the rising demand of energy and a more flexible operation, in terms of peak power production.

The air can be evacuated from the pressure system by means of structural deaeration device. These consist of a deaeration chamber at the ridge of the tunnel, separating the air from the water and a pipe or drill hole on top of the chamber, evacuating the air. The experience of the last years showed that there is a lack in specific knowledge of air-water flow in pressure tunnels, in deaeration chambers and in deaeration pipes for the design of such deaeration devices. This thesis intends to close this gap and to develop design guidelines for structural deaeration device.

To carry out large scale model tests, two experimental rigs were built at the Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW) at ETH Zurich. These allowed the investigation of the air-water flow in horizontal and downwardly inclined large conduits ($D = 0.484$ m), in deaeration chambers as well as in standpipes was investigated.

The flow pattern of the air-water flow in conduits depends mainly on the flow rate of the two phases and the inclination angle of the pipe. For each investigated air- and water flow rate and inclination angle of the conduit a different bubble size distribution are observed. In downwardly inclined pressure pipes air bubbles are either transported downstream with the water flow or ascent in opposite direction. With downward slopes from 0.4% to 1.7%, up to a critical water velocity in the conduit, all air bubbles rise in opposite direction to the water flow. With increasing water velocities a portion of air is transported with the water flow. For each inclination angle and water velocity there exists a limit value for the volume flow rate of the transported air. Due to the research findings, the direction and the flow rate of the air can be evaluated.

The air-water flow pattern in the deaeration chamber was investigated and the percentage of the deaerated air was measured depending on its size and the air- and water flow rate. Based on the percentage of the deaerated air the dimensions of the deaeration chamber were found for which the transported air in the conduit is completely evacuated.

Depending on the air flow rate, the pipe diameter and the way the air is entering the deaeration pipe the flow pattern was observed and the average void fraction was measured. The observed flow pattern in the deaeration pipe are in good agreement with those stated in the technical literature. The drift-flux model allows the calculation of the average and maximum two-phase mixture level swell. Because of the limited water column height in the experimental rig, the level swell for large initial water column heights had to be determined by simulation. The results of the measurements and simulation show that the two-phase mixture level swell is up to three times the initial water column height.

Based on the findings design guidelines for deaeration devices were developed and are illustrated with three examples.