



Doctoral Thesis

Strömungsprozesse in Grundablassstollen

Author(s):

Speerli, Jürg

Publication Date:

1998

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001923975> →

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](#).

Diss. ETH Nr. 12583

STRÖMUNGSPROZESSE IN GRUNDABLASSTOLLEN

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

Jürg Speerli

Dipl. Bau-Ing. ETH
geboren am 28. Dezember 1960
von Kilchberg, Zürich

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. D. Vischer, Referent
Prof. Dr. H.-E. Minor, Korreferent
Dr. P. Volkart, Korreferent

1998

Zusammenfassung

Der Grundablass ist das zuunterst angeordnete Regulierorgan bei einer Talsperre und dient in erster Linie als *Sicherheitsorgan*. Beim Betrieb des Grundablasses schießt das Wasser unter grossem Druck und entsprechend hoher Strömungsgeschwindigkeit unter der Regulierschütze hervor. Luft wird in den Wasserabfluss eingemischt und fliesst im *Wasser-Luft Gemisch* in den Freispiegelstollen, den sogenannten Grundablassstollen. Infolge des Lufteintrages in den Wasserstrahl sinkt der Luftunterdruck im Grundablassstollen, womit die Gefahr von Kavitationsschäden und Schützenschwingungen steigt. Um den Luftunterdruck zu begrenzen, wird der Stollenanfang mit der freien Atmosphäre durch eine *Belüftungsleitung* verbunden.

Das Verhältnis Luftzufluss durch die Belüftungsleitung zu Wasserabfluss im Grundablass wird als *Luftbedarf* bezeichnet. Die bisherige Bemessung des Luftbedarfs beruht auf einer Funktion der *Froude-Zahl* an der *Vena Contracta* (Ort der grössten Strahleinschnürung), worin die Parameter Energiehöhe und Schützenöffnung subsumiert sind. Der Einfluss der Belüftungsleitung auf den Luftbedarf ist untersucht worden, hingegen ist bisher die Auswirkung des Grundablassstollens unberücksichtigt geblieben. Die Querschnittsfläche des Grundablassstollens wird höchstens als Normierungsgrösse verwendet, die Länge völlig vernachlässigt. Der Luftzufluss vom Stollenportal in den Grundablassstollen wird im Luftbedarf nicht berücksichtigt.

Die Analyse eigener *in-situ Messungen* und Literaturdaten zeigen beim Luftbedarf eines Grundablassabflusses grosse Unterschiede. Sie können teilweise mit der unterschiedlichen Geometrie der einzelnen Grundablassstollen erklärt werden. Der Luftzufluss durch die Belüftungsleitung und der Luftzufluss vom Stollenportal in den Grundablassstollen stehen in Wechselwirkung. Eine systematische Untersuchung des Einflusses des Grundablassstollens auf den Luftbedarf des Grundablassabflusses ist bei Prototypen infolge von betrieblichen Einschränkungen und dem hohen personellen und finanziellen Aufwand kaum durchführbar.

Trotz Einschränkungen bei der Übertragbarkeit von Modelldaten auf Prototypwerte ist an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich eine systematische

Untersuchung an einem physikalischen Versuchsstand durchgeführt worden. Die Belüftungs- und Abflussprozesse im hydraulischen Modell sind vergleichbar mit denjenigen aus der *in-situ* Messung am Grundablass der Stauanlage Panix, Schweiz. Ziele der hydraulischen Modellversuche sind den Einfluss des Grundablassstollens auf den Luftbedarf des Grundablassabflusses aufzuzeigen, Bemessungsformeln für die einzelnen Luftzuflüsse, den Luftdruckverlauf im Grundablassstollen und den Verlauf der Gemischtiefe im Grundablassstollen herzuleiten. Zu diesem Zweck sind messtechnisch erfasst worden: Energiehöhe vor der Regulierschütze, Wasserabfluss, Luftzufluss durch die Belüftungsleitung und Luftzufluss vom Stollenportal in den Grundablassstollen, sowie Luft- und Wasserdrücke im Grundablassstollen. Beim Gemischabfluss sind sowohl die Strömungsgeschwindigkeit als auch die Luftkonzentration gemessen worden.

Die Hauptergebnisse dieser Studie können wie folgt zusammengefasst werden: Die Summe der *Luftzuflüsse* durch die Belüftungsleitung und den Grundablassstollen ist bei den untersuchten Energiehöhen, Stollenlängen und Schützenöffnungen unabhängig von der Drosselöffnung der Belüftungsleitung. Die Luft strömt sowohl durch die Belüftungsleitung als auch durch den Grundablassstollen nach dem Prinzip des geringsten Widerstandes respektive Energieabfalls zum Unterdruckgebiet unterstrom der Regulierschütze. Der Gemischabfluss besitzt demnach bei gegebener Energiehöhe, Stollenlänge und Schützenöffnung eine *maximale Luftaufnahmekapazität*. Die *Stollenlänge* beeinflusst sowohl den Luftzufluss durch die Belüftungsleitung als auch den Luftzufluss vom Stollenportal in den Grundablassstollen. Der Luftzufluss durch die Belüftungsleitung ist für lange Stollen grösser als für kurze Stollen, hingegen ist der Luftzufluss vom Stollenportal in den Grundablassstollen für kurze Stollen grösser als für lange Stollen. Der *Luftunterdruck* im Grundablassstollen verläuft exponentiell abnehmend, mit dem Maximum am Stollenanfang und Atmosphärendruck am Stollenausgang. Der Lufteintrag erfolgt kurz unterstrom der *Vena Contracta*. Die *Gemischtiefe* steigt in Strömungsrichtung an und hat bei flach geneigten und genügend langen Stollen den Endwert bei der Normalabflusstiefe. Mit grösser werdender Energiehöhe nimmt die *Luftkonzentration* im Abfluss zu, insbesondere auch die sohlennahe Luftkonzentration. Dies ist von Bedeutung im Hinblick auf die Vermeidung von Kavitationsschäden. Gegenläufig verhält sich die Luftkonzentration bei zunehmender Schützenöffnung. Die Grössen Luftzufluss durch die Belüftungsleitung, totaler Luftzufluss zum Grundablassstollen, Luftunterdruck und Gemischtiefe im Grundablassstollen können mit neu hergeleiteten Formeln bemessen werden.

Résumé

La vidange de fond est l'organe de réglage placé le plus bas dans un barrage. Elle répond en premier lieu à des besoins de *sécurité*. Son fonctionnement est caractérisé par un écoulement à haute pression et grande vitesse du jet évacué sous la vanne de réglage. De l'air est entraîné par le débit d'eau et un mélange *eau-air* s'écoule à surface libre vers l'aval, dans la galerie de fuite de la vidange de fond. Cet entraînement par le jet a pour conséquence une diminution de la pression de l'air dans la galerie. Le danger d'apparition de dégâts dus à la cavitation et de vibrations des vannes s'accroît fortement. Afin de limiter les sous-pressions de l'air, la partie antérieure de la galerie est reliée à l'atmosphère par un *conduit d'aération*.

Le rapport entre le débit d'air amené par le conduit et le débit d'eau s'écoulant dans la vidange de fond est désigné comme *besoin en air*. Ce besoin a été exprimé jusqu'ici à l'aide d'une fonction du *nombre de Froude* à la *vena contracta*, fonction faisant intervenir implicitement les paramètres "hauteur de charge et "ouverture de la vanne". L'influence du conduit d'aération sur le besoin en air avait déjà été prise en considération, tandis que celle de la galerie de la vidange de fond avait été jugée négligeable. La grandeur de la section de cette galerie a au plus été utilisée pour normaliser des résultats, sa longueur étant négligée. L'analyse des *mesures in-situ* réalisées par le Laboratoire et les données de la littérature montrent de grandes différences quant au besoin en air de l'écoulement dans une vidange de fond. Celles-ci sont en partie dues à la géométrie propre de chaque ouvrage. Une interaction a lieu entre les apports d'air provenant du conduit d'aération et respectivement de la section terminale de la galerie de la vidange. L'examen de l'influence de la galerie sur le besoin en air de la vidange de fond ne peut guère être entrepris en prototype, ceci pour des raisons liées aux servitudes de l'exploitation et à la nécessité d'engager des moyens importants à cet effet.

Malgré la difficulté de transposer les résultats obtenus en modèle aux valeurs du prototype, une étude systématique sur une installation d'essai a été réalisée au Laboratoire de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques (VAW) de l'EPFZ. Les processus d'aération et d'écoulement observés sur le modèle physique sont comparables à ceux que les mesures *in-situ* faites dans la vidange de fond du barrage de *Panix*, Suisse ont montré. Les essais sur modèle devaient

permettre d'observer l'influence de la galerie de la vidange sur le besoin en air de l'écoulement évacué, d'établir des formules pour déterminer les divers apports d'air, de montrer la répartition des pressions d'air, respectivement l'évolution de la hauteur du mélange dans la galerie de la vidange de fond. A cet effet, les grandeurs suivantes ont été mesurées: la hauteur de la charge à l'amont de la vanne de réglage, le débit d'eau, les débits d'air parvenant dans la galerie par le conduit d'aération et par la section terminale, ainsi que les pressions d'eau et les pressions de l'air dans la galerie. La vitesse d'écoulement et la concentration d'air du mélange eau-air ont été relevées.

Les résultats principaux de cette étude peuvent être résumés comme suit: la somme des *débits d'air* provenant du conduit d'aération et de la section terminale de la galerie de la vidange de fond est indépendante du degré d'étranglement du conduit d'aération pour les hauteurs de charge, les longueurs de la galerie et les ouvertures de la vanne examinées. Tant dans le conduit d'aération que dans la galerie, l'air se déplace vers la zone de sous-pression à l'aval de la vanne de réglage selon le principe de la moindre résistance, respectivement de la moindre perte d'énergie. Pour une hauteur de charge, une longueur de la galerie et un degré d'ouverture de la vanne donnés, l'écoulement du mélange eau-air est ainsi caractérisé par une *capacité maximale d'entraînement d'air*. La *longueur de la galerie* influence aussi bien le débit d'air transitant dans le conduit d'aération que le débit d'air pénétrant dans la galerie par la section terminale. Le débit d'air dans le conduit d'aération croît lorsque la longueur de la galerie augmente. Par contre, le débit d'air provenant de la section terminale de la galerie croît lorsque la longueur de cette dernière diminue. La *sous-pression de l'air* dans la galerie de la vidange décroît exponentiellement entre sa valeur maximale située à l'entrée et la pression atmosphérique située à la sortie de l'ouvrage. L'introduction de l'air dans la galerie se fait à l'aval immédiat de la *vena contracta*. La *profondeur du mélange* augmente en direction de l'écoulement et atteint, pour des galeries à radier peu incliné, une valeur finale égale à la profondeur normale. La *concentration d'air* de l'écoulement, en particulier au voisinage du radier, augmente avec la hauteur de charge. Ce fait est important dans l'optique de la prise de mesures contre les dégâts dus à la cavitation. Par contre, la concentration d'air diminue lorsque le degré d'ouverture de la vanne augmente. Les grandeurs telles que le débit d'air dans le conduit d'aération, le débit d'air total parvenant à la galerie de la vidange de fond, la pression de l'air et la profondeur du mélange dans la galerie peuvent être déterminées à l'aide des formules nouvellement établies.

Abstract

The bottom outlet is the end regulating component of a dam and is primarily a *safety device*. Flow velocities downstream of bottom gates are large due to enormous heads on the gate. Air is thus entrained in the flow and reference is made to an *air-water mixture*. Due to air entrainment into the flow, the air pressure in the bottom outlet is reduced resulting in increased potential for cavitation damage and gate vibration. To limit the air subpressure, the bottom outlet is connected with an *air supply system*.

The ratio of air discharge by the supply system and water discharge is referred to as *air demand*. The design of the air demand is based on the *Froude number* at the contracted section just downstream of the gate, including thus the effects of energy head on the gate and gate opening ratio. The effect of the air supply system on the air demand has been analyzed, but the influence of the bottom outlet has not been accounted for so far.

In-situ measurements and published data on the air demand of bottom outlets indicate considerable deviations. These can be explained by different geometries of the outlet structures considered. The air discharge from the air supply system and the outlet tunnel are definitely related. A systematic analysis of the bottom outlet on the air demand for prototype structures is not feasible due to limited personnel and cost.

Despite limitations in transforming model to prototype data, a systematic laboratory study was conducted at the laboratory of hydraulics, hydrology and glaciology (VAW). The aeration and flow processes in the physical model are comparable to those obtained from prototype observations at *Panix dam, Switzerland*. The purposes of the laboratory study include investigations on the effect of bottom outlet on the air demand, design relations for the two air discharges, the air pressure curve and the mixture depth along the bottom outlet. The observations thus involve the pressure head on the gate, the water discharge, air discharges in the air supply system and the bottom outlet, and air and water pressures. In addition, mixture velocities and air concentrations have been determined for mixture flow.

The main results may be summarized as follows: The sum of *air discharges* in the air supply system and the bottom outlet is nearly constant for any energy head on the gate, degree of throttling of the air supply and outlet tunnel length. Air is supplied thus from either the air supply system or the tunnel end to the location of minimum air pressure, just downstream of the gate, according to the principle of minimum resistance. Accordingly, the mixture flow has a *maximum air entrainment capacity*. The *tunnel length* has an effect on both the air supply system and the tunnel air flow. For long tunnels, the air discharge through the air supply system is larger than for short tunnels, whereas the air discharge from the tunnel outlet is larger for short than for long tunnels. The *air subpressure* at the upstream end of the tunnel decreases exponentially to atmospheric pressure at the tunnel outlet. The *mixture flow depth* increases from the gate to the tunnel outlet, with incipient air entrainment at the contracted flow section. For moderately-sloping long bottom outlets, uniform flow may establish towards the tunnel outlet. For increasing pressure on the gate, and decreasing gate opening ratio, the average *air concentration* increases, particularly close to the tunnel invert. This feature is significant, especially with regard to cavitation protection. Parameters such as the air discharge in the supply system, the total air discharge, the air pressure and the mixture flow depth in the bottom outlet can be predicted, based on extensive model data and a hydraulic theory.