

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 87 (1995)
Heft: 10

Artikel: Störmungsmessungen zur Betriebssicherheit
Autor: Volkart, Peter / Speerli, Jürg / Benesch, Michael
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-940438>

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: 10.02.2026

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

schlaggebende Lugeon-Kriterium als zuverlässige Beurteilungsgrundlage nicht ausreicht und zu überdimensionierten, ja unnötigen Massnahmen führen kann. Dieses Kriterium muss folglich als überholt angesehen werden [1, 4, 5]. Bei der Entscheidung für oder gegen ein Injektionsprogramm sollten nicht mehr nur die Ergebnisse von WD-Versuchen zugrundegelegt werden, sondern auch alle anderen hydrogeologisch relevanten Gegebenheiten. Es kommt schliesslich auf die Durchlässigkeit des gesamten durchsickerten Gebirgsabschnittes zwischen Wasser- und Luftseite an – und nicht auf die Durchlässigkeit in der Umgebung des Bohrloches. Ein ähnlich wichtiger Stellenwert kommt ausserdem der Verpressfähigkeit eines Gebirges zu – durchlässige Gebirge sind durchaus nicht immer verpressbar.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. Friedrich-Karl Ewert, Universität – GH – Paderborn, Abt. Höxter, An der Wilhelmshöhe 44, D-37671 Höxter.

Danksagung

Mittlerweile wurden bereits mehrere Projekte durchgeführt, bei denen auf eine Untergrundabdichtung verzichtet werden konnte und entsprechende Einsparungen möglich wurden, nachdem mit einer

Analyse der hydrogeologischen Rahmen- und Detailbedingungen und der Verpressfähigkeit die Berechtigung einer solchen Vorgehensweise nachgewiesen werden konnte. Soweit bekannt, wurde im Kalkstein wegen der Karst-Problematik ein solches Konzept noch nicht realisiert. Den Nordostschweizerischen Kraftwerken (NOK), der für das Projekt zuständigen Aufsichtsbehörde und Prof. Stuky als ihrem Experten dankt der Autor für ihre Bereitschaft, auch unter den anscheinend ungünstigen geologischen Voraussetzungen ein angepasstes Behandlungskonzept zu realisieren.

Literatur

- [1] Ewert, F.-K. (1985): Rock Grouting, with Emphasis on Dam Sites. 428 p., 225 Bilder, 20 Tab., Springer-Verlag Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo.
- [2] Ewert, F.-K. (1986): The hydraulic situation of the subsoil at the Pueblo Viejo Dam (Guatemala). Proc. 5th Int. IAEG Congress, p. 1245–1257, 8 Figs., A. A. Balkema, Rotterdam/Boston 1986.
- [3] Ewert, F.-K. (1987): Die hydraulische Wirkung der Untergrundabdichtung des Staudamms Pueblo Viejo/Guatemala. Die Wasserwirtschaft 77, H. 6, p. 325–329, 7 Bilder.
- [4] Ewert, F.-K. (1992): The individual groutability of rocks. Water Power & Dam Construction, Ja. 1992, p. 23–30, London.
- [5] Ewert, F.-K. (1992): Evaluation and interpretation of water pressure tests. P. 141–162, 9 Figs., Proc. Conf. Institution of Civil Engineers «Grouting in the Ground», Thomas Telford, London.
- [6] Housby, A. C., (1976): Routine interpretation of the Lugeon Water Test., Q. J. Eng. Geol. 9.
- [7] Heitfeld, K.-H. (1991): Talsperren. 468 S., 354 Bilder, 37 Tab., Gebr. Borntraeger, Berlin/Stuttgart.

Grundablass Panix

Strömungsmessungen zur Betriebssicherheit

Peter Volkart, Jürg Speerli, Michael Benesch

Grundablässe werden unterstrom der Regulierschütze unter Teilfüllung durchströmt. Infolge Einschnürung und Umlenkung versprüht der Abfluss unmittelbar nach der Schütze. Dies und die meist hohen Fliessgeschwindigkeiten führen zum Eintrag von Luft ins Wasser; diese kann sowohl vom Stollenende her als auch durch eine eigentliche Belüftungsleitung ersetzt werden.

Eine ausreichende Querschnittsfläche, die nicht durch das Wasser-Luft-Gemisch belegt wird, ist deshalb notwendig. Doch wie gross muss diese sein?

Diesen und anderen für Sicherheit und Betrieb wesentlichen Fragen wurde anlässlich einer ausgedehnten Naturmesskampagne an der Sperre Panix nachgegangen. Einige überraschende, leicht vorsichtig stimmende Ergebnisse sind die Ausbeute dieser bereits vor dem Bau der Staumauer in die Wege geleiteten Aktion.

Der Grundablass-Stollen als grosse Unbekannte?

Der Grundablass einer Talsperre ist das tiefstgelegene Regulier-, Präventions- und Notorgan eines Stauraumes. Als Regulierorgan bei kleinsten Öffnungen der Verschlüsse kann er etwa für Dotier- und Restwasser genutzt werden. Präventiv wird er zur Schaffung eines Rückhalteraumes bei Hochwassergefahr, für die periodische Ausspülung eines sedimentierten Verlandungskörpers oder zur Teilabsenkung bei Inspektionen der Sperre und Unterhaltsarbeiten teilweise geöffnet. Als eigentliches Notorgan unter

Vollöffnung käme er im Falle einer schnellstmöglichen Absenkung des Stausees, etwa bei drohender Zerstörungsgefahr der Sperre, zum Einsatz. Dies wäre zugleich der Extremfall mit dem stärksten Angriff auf das untenliegende Gerinne.

Im Idealfall sollte ein Grundablass demnach jederzeit voll betriebstauglich sein; anderseits wird eine Inbetriebnahme nach Möglichkeit vermieden, um jeglichen Verlust an Nutzwasser zu unterbinden.

Die jährlichen Tests der elektromechanischen Anlagen an Talsperren werden – wenn überhaupt – bei kleinen Durchflüssen in den Grundablässen durchgeführt; das Strömungsverhalten bei hoher Beaufschlagung wird praktisch nie getestet.

Den Fragen nach vibrationskritischen Schützenstellungen unter Teilöffnung oder nach dem maximalen Lufteintrag in die Strömung wird in der Planung nachgegangen, an der ausgeführten Anlage meidet man dann aber kritische Lastfälle. Deshalb ist die Höchstkapazität eines Grundablasses im realen Betrieb nicht genau bekannt.

Diese Problematik der kritischen Strömungszustände wird nun zunehmend wieder aktuell – sei es im Rahmen eines modernen, vernetzten Sicherheitsdenkens, sei es im Zuge einer Produktionsanhebung, etwa durch Erhöhen von bestehenden Talsperren. Es ist auch erst die heutige Entwicklung in der experimentellen Fluidodynamik, insbesondere auch auf dem Gebiete der Zweiphasenströmung, die den Zugang zur notwendigen dreidimensionalen Betrachtensweise innerhalb der unterschiedlichen Fliessabschnitte eines Grundablasses überhaupt möglich macht.

In diesem Zusammenhang sind vor allem diejenigen Grundablässe von Interesse, die unterstrom der Verschlusschützen keinen unmittelbaren Strömungsaustritt ins Freie, sondern einen längeren, geschlossenen Stollen aufweisen. Diese Bauform nennen wir *Grundablass-Stollen*.

Naturmessungen heute für die Sicherheit von morgen

Die 1992 fertiggestellte, 53 m hohe Gewichtsmauer Panix im Val da Pignu, einem Nebental des Vorderrheins, weist einen solchen Grundablass-Stollen der Länge von ca. 38 m auf. Der 150 cm hohe und 110 cm breite Regulierquerschnitt ist 27 m unterstrom der wasserseitigen Eintrittsöffnung angeordnet. Als Regulierorgan dient eine Gleitschütze.

Bild 1 zeigt schematisch, wie der Grundablass-Stollen innerhalb der Sperranlage Panix angeordnet ist. Als Besonderheit münden zwei Hochwasserentlastungsstollen je seitlich in den Hauptstollen des Grundablasses.

Im Verlaufe des Sommers 1992 hatte ein Team von Ingenieuren und Wissenschaftlern der Abteilung Wasserbau der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glazio- logie, VAW, dank dem Entgegenkommen der Nordost-schweizerischen Kraftwerke AG, NOK, und der tatkräftigen Unterstützung durch die Kraftwerke Vorderrhein AG, KVR, die seltene Gelegenheit, In-situ-Messungen am Grundablass-Stollen Panix durchzuführen. Während des ersten, schrittweisen Aufstauens des Beckens ergab sich die Möglichkeit, Betriebsfälle mit variablem Seestand und Grundablassdurchfluss real zu testen und dazu gezielt Strömungsmessungen durchzuführen.

Die angegangenen Hauptfragen sind in Bild 2 schematisch wiedergegeben. An sich ging es darum, drei Fliessabschnitte gesondert zu untersuchen, nicht ohne aber deren mögliche Wechselwirkung im Auge zu behalten. Es handelt sich vorerst um den Abfluss unter Druck zwischen See und Schütze, dann den Schützenbereich selbst und schliesslich um den Freispiegelabfluss im unmittelbar anschliessenden Stollen.

Abschnitt zwischen See und Schütze: 27 m Abfluss unter Druck

Hier wird gewissermassen die Vorgeschichte der Strömung der folgenden Abschnitte festgelegt. Gemessen wurden der Innendruck in Schützennähe und – neu – die dynamischen, d.h. kurzzeitigen Schwankungen dieses

Druckes, um beispielsweise signifikante Druckfrequenzen aufzuspüren und in Bezug zu den Vorgängen im Schützenbereich zu setzen. Insgesamt gelangten 22 oberflächenbündig versetzte Drucksensoren zum Einsatz.

Bereich der unterströmten Gleitschütze

Seeseitig der Schütze steht der Grundablass unter Druck; letzterer ist durch die Seespiegelkote vorgegeben. Unterstrom der umströmten Lippe der teilgeöffneten Schütze bildet sich ein luftdurchsetzter und mit Stosswellen überlagerter Freispiegelabfluss. Oftmals ist bei kleinen Öffnungen ein markanter Sprühstrahl (spray) Zeuge der jähnen Druckumlagerung an dieser Engstelle. Sowohl durch die örtlich konzentrierte Abfluss-Beschleunigung als auch durch den Eintrag von Luftblasen stellt sich zwischen Stollenscheitel und Gemischspiegel ein Unterdruck ein – ein an sich unerwünschtes Phänomen, das Kavitation, pulsierenden Abfluss oder gar ein Zuschlagen des Stollenquerschnittes begünstigen könnte. Durch Zuführen von atmosphärischer Luft von aussen durch die rund 36 m lange Belüftungsleitung mit einem grosszügigen Innendurchmesser von 110 cm wird der Unterdruck weitmöglichst ausgeglichen.

Hier ging es vor allem darum, das Strömungsbild durch die Stollendecke mittels Video aufzunehmen und den Luftstrom in der Belüftungsleitung zu messen, wobei die Querschnittsfläche der Ansaugöffnung der Belüftung variiert wurde.

Bereich des 38 m langen teilgefüllten Grundablass-Stollens

Messungen der Fliessgeschwindigkeiten und der Konzentration von eingetragenen Luftblasen im Abfluss, kombiniert mit Videoaufnahmen und Strömungsmessungen im Luftraum über dem Spiegel, sollten mithelfen, die Hauptproblematik zu erhellen: Wie auch in Bild 3 schematisiert, geht es letztlich darum, wie stark der Stollen tatsächlich durch das abströmende Wasser-Luft-Gemisch ausgefüllt wird. Es sei vorweggenommen, dass der mit üblichen Mittelwertsrechnungen abschätzbare freie Stollenquerschnitt und der beobachtete nicht immer viel gemeinsam haben.

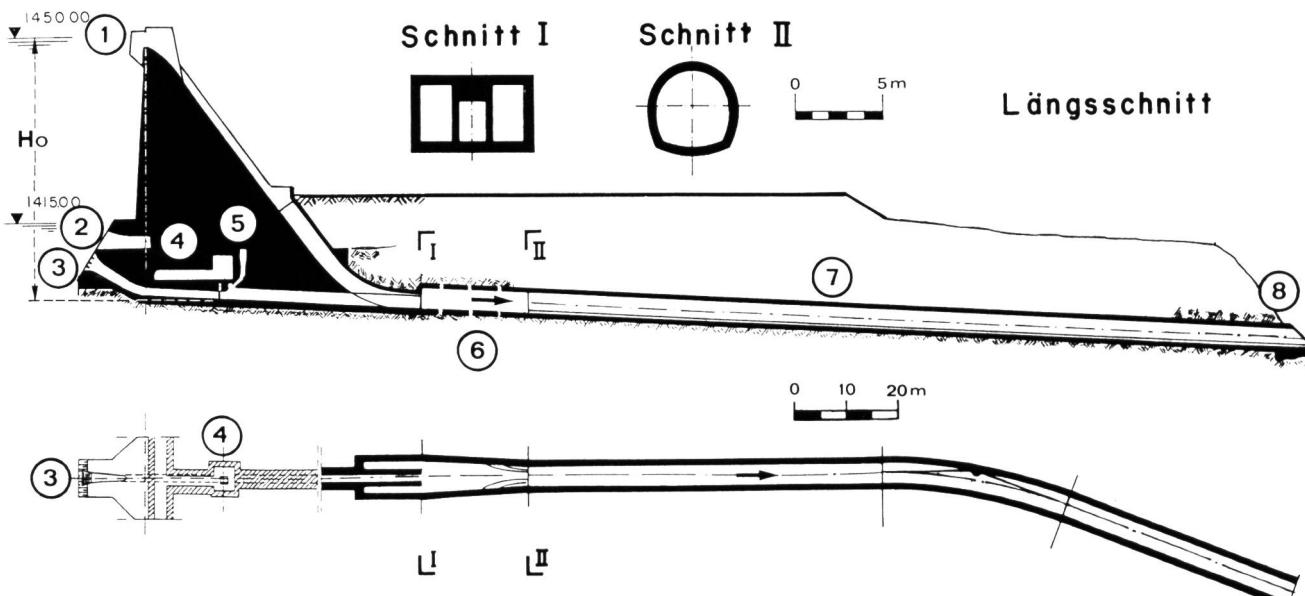


Bild 1. Sperranlage Panix: Stollen und Hochwasserentlastung in Längsschnitt und Situation. 1 Hochwasserentlastung, 2 Triebwasserfassung, 3 Grundablasseinlauf, 4 Schützenkammer, 5 Belüftung, 6 Vereinigungskammer, 7 Unterwasserstollen, 8 Stollenportal. Der 38 m lange Grundablass-Stollen liegt zwischen Schütze (4) und Vereinigungskammer (6). Die Gleitschütze ist 150 cm hoch und 110 cm breit, der Stollen weitet sich auf 240 × 150 cm auf.

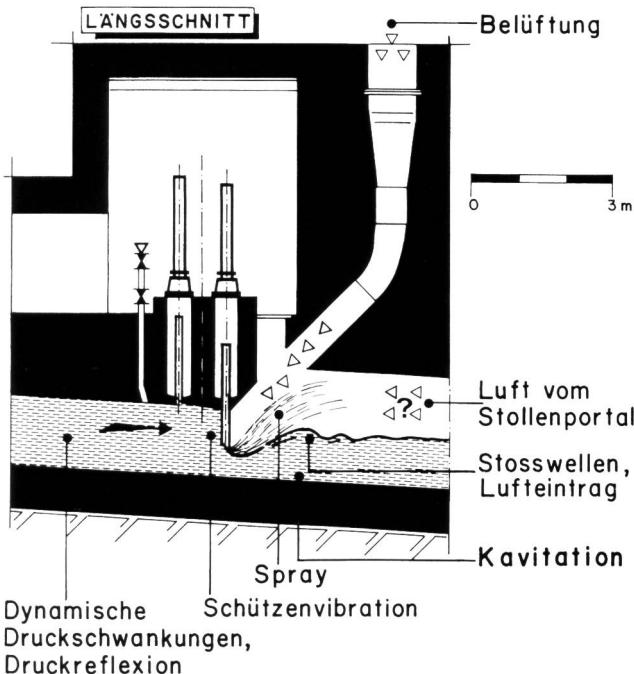


Bild 2. Die wesentlichen Fragestellungen für die Naturversuche am Grundablass-Stollen Panix.

In Tabelle 1 sind die wesentlichen Versuchsgroßen der Naturkampagne zusammengestellt.

Erste Resultate, Sicherheitsüberlegungen

Die Messkampagne war sehr aufwendig; es dürfte sehr selten, wenn nicht gar erstmalig sein, dass im Feldversuch bei mitlaufenden Kameras gleichzeitig dynamische Wanddrücke, Fließgeschwindigkeiten, Luftzufuhr und Luftkonzentrationen usw. in einem Grundablass-Stollen erhoben werden konnten. Einzig eine frühere Naturmesskampagne der VAW am kurzen Grundablass der Staumauer Solis aus dem Jahre 1986 kann als Wegbereiter zu diesem Unternehmen angesehen werden.

Zur Kampagne Panix wurde ein 16minütiger VAW-Film auf VHS Video erstellt.

Die spezifisch für die Talsperre Panix geltenden Detailresultate waren für den Betreiber erfreulich. Da es darüber hinaus aber möglich geworden ist, gewisse Aussagen zu machen, die für Grundablass-Stollen weitgehend allgemeine Gültigkeit besitzen, soll diesen hier erste Priorität eingeräumt werden :

1. Im Abschnitt zwischen See und Schütze wirkt der Stollen auch als akustischer Resonator. Messungen belegen, dass dadurch gewisse Frequenzen des dynamischen Wanddruckes verstärkt, andere wiederum ausgelöscht werden.

2. Somit muss unter anderem die Länge dieses unter Druck laufenden Stollenabschnittes Auswirkungen auf das turbulente Strömungsverhalten unmittelbar vor der Schütze haben.

3. Kleine Schützenöffnungen führen zu intensiver Strahlversprühung und in der Folge zu einem fast ausgefüllten ersten Stollenabschnitt bei gleichzeitig hohem Zustrom durch die Belüftungsleitung.

4. Diese örtlich konzentrierte, extreme Energieumlage rung birgt immer das Risiko von Schützenvibrationen, Kavitation und pulsierendem Stollenabfluss bei instationärer Strömung in der Belüftungsleitung und im Luftraum über dem Wasser-Luft-Gemisch.

Tabelle 1. Einige Daten zu den Naturmessungen der VAW im Grundablass-Stollen der Staumauer Panix.

Messparameter	Anzahl	Spezifikation
Statische Druckhöhe ab Seespiegel	5	33, 40, 45, 47,5 und 50 m
Schützenöffnungen	30	von 1 cm bis 150 cm
Öffnungen der Belüftungsleitung	3	25%, 50% und 100% = 2,2 m ²
Dynamische Drucksonden	22	Druckbereich 5 bis 7 bar Q_{max} im Versuch = 34 m ³ /s (Q_{Ausbau} wäre 42 m ³ /s)
Durchfluss		
Wasser- geschwindigkeit	4	$v_{\text{max}} = 25,6 \text{ m/s}$
Luftgeschwindigkeit Stollen, bidirektional	3	-1,8 m/s bis 4,0 m/s
Luftgeschwindigkeit Belüftungsleitung	1	$v_{\text{max}} = 45 \text{ m/s}$
Luftkonzentration	6	
Luftdruck	6	
Lufttemperatur	1	
Videokameras	4	
Fotokameras	4	

5. Eher überraschend traten Anzeichen einsetzender Kavitation der Gleitschütze nicht, wie in der Fachliteratur jeweils abgehandelt, entweder bei kleinsten oder allenfalls bei über 90prozentiger Schützenöffnung auf, sondern eher im Öffnungsbereich von ca. 60%. Sicher sollte man nicht alle Grundablasse über denselben Leisten schlagen.

6. Neuzeitliches Sicherheitsdenken führt tendentiell zu strengerer Vorschriften und einem Ausbau auf höhere Be messungsdurchflüsse und unter Umständen eben auf grössere Querschnitte im Grundablass. Die realen Abflüsse durch den Stollen kümmern sich aber nicht um vorgegebene Hochwasserextrapolationen.

Es ist durchaus denkbar, dass die kritischen kleinen oder allenfalls auch die mittleren Schützenöffnungen in Zukunft häufiger beaufschlagt werden könnten, da man für identischen Durchfluss die Schütze in einem grösseren Stollen weniger oder zumindest anders öffnen muss als in einem kleineren.

7. Es ist somit nicht völlig von der Hand zu weisen, dass sich die angestrebte Sicherheit des Stollens bei seltener Höchstbeaufschlagung einerseits und die Sicherheit im häufigen Normalbetrieb anderseits teilweise entgegenlaufen können.

8. Der Grundablassabfluss besitzt ein gewisses Luftaufnahmevermögen. Die eingetragene Luft wird dabei grösstenteils über die Belüftungsleitung ersetzt. Bei einer Reduktion der Eintrittsquerschnittsfläche der Belüftungsleitung strömt aber auch vermehrt Luft vom Stollenende

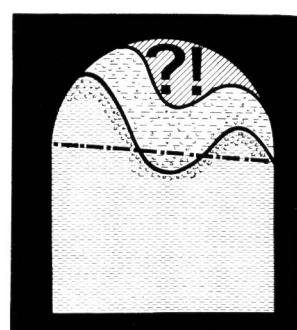


Bild 3. Schematischer Strömungs-Querschnitt durch den Grundablass-Stollen. Welche Fläche bleibt über dem Gemischspiegel noch frei? Wie strömt die Luft in diesem freien Raum? Wodurch wird die tatsächliche Schluckfähigkeit begrenzt? Sind Vorgänge wie Zuschlägen und Pulsationen eigentlich kritisch, und spielt allenfalls die Stollenlänge eine Rolle?



Bild 4. Fotoaufnahme der Strömung am Austritt aus dem Stollen des Grundablasses in Panix, beaufschlagt mit $15 \text{ m}^3/\text{s}$ und bei ca. 18 m/s Geschwindigkeit. Die vertikale Skala links weist eine Dezimeterteilung auf.

Trotz der Entfernung von fast 40 m von der um 50 cm geöffneten Schütze – bei einer statischen Druckhöhe von 45 m – tritt noch immer ein Zweiphasengemisch mit unruhiger Oberfläche auf. Angebrachte Bänder an der Stollendecke belegen, wie die Luft von aussen gegen die Hauptfliessrichtung in den Stollen hineinströmt: Auch eine grosszügige Belüftungsleitung nach den Schützen kann den vollen Luftbedarf nicht decken!

entgegen der Fliessrichtung des Abflusses in Richtung Unterdruckbereich bei den Schützen. Die Unterdrücke im Schützenbereich nehmen mit der Drosselung der Belüftungsleitung zu. Es besteht also eine Wechselwirkung zwischen der Luftströmung durch die Belüftungsleitung und der Luftströmung an der Stollendecke des Grundablass-Stollens.

Bei gewissen Randbedingungen strömt kontinuierlich Luft vom Stollenportal Richtung Schützen, bei anderen nur periodisch.

9. Bei einer ausreichend bemessenen Belüftungsleitung ist die vom Stollenende hereinströmende Luft vernachlässigbar. Ist hingegen die Belüftungsleitung zu klein oder teilweise verstopft, so wird die Luftströmung vom Stollenende Richtung Schützenbereich äusserst wichtig, damit die Unterdrücke in diesem Bereich nicht zu gross werden. Dies bedingt aber, dass oberhalb des Gemischabflusses noch genügend Raum für eine Luftzirkulation besteht. Die Vorstellung eines bis auf wenige Flächenprozente ausgefüllten Grundablass-Stollens verträgt sich demnach nicht mit den heutigen Sicherheitsüberlegungen.

10. Die Möglichkeit, eine Strömung im Inneren des Grundablass-Stollens mittels Video mitzuverfolgen, muss als ausgesprochen positiv angesehen werden. Bestehen

etwa an einer Stauanlage grundsätzliche Unsicherheiten über die Grenzbeaufschlagung eines Stollens, so empfehlen wir, den nachträglichen Einbau einer Kamera in Betracht zu ziehen. Bereits schon Beobachtungen an kleinen Durchflüsse liefern wertvolle, um nicht zu sagen handgreifliche Aussagen auch für höhere Beaufschlagung.

11. Die Naturmesskampagne Panix hat Erkenntnisse gebracht, die nur mit Literaturstudium oder physikalischer und numerischer Modellierung nicht zu erzielen gewesen wären. Und doch steigen die Anforderungen an die Betriebssicherheit einer Talsperre zunehmend. Weitere Messkampagnen dieser Art werden wiederum äusserst wertvoll sein.

12. Noch sind nicht alle Fragen geklärt. Die in der Folge aufgezählten, vor dem Abschluss stehenden VAW-Dissertationen, die alle auch in engem Bezug zur Naturmesskampagne Panix stehen, werden weiterführende Aussagen ermöglichen:

M. Benesch «Dynamische Strömungsvorgänge und Druckfluktuationen»

P. Billeter «Schwingungen unterströmter Schützen mit mehreren Freiheitsgraden»

J. Speerli «Strömungsdynamik in Grundablass-Stollen von Talsperren»

Referenzen

- Billeter, P., Volkart, P.*: Hydrodynamik bei Wasserkraftwerken. «Schweizer Ingenieur und Architekt» 10/1994 S.145–153.
- de Vries, F., Volkart, U. P.*: Field measurements of pressure fluctuations in a high head bottom outlet structure. International Symposium on Model-Prototype Correlation of Hydraulic Structures, Colorado Springs, USA, 1988, p. p. 199–209.
- Lier, P., Volkart, P.*: Prototype investigation on aeration and operation at the Curnera high head bottom outlet. ICOLD Congress 1994, Durban.
- Speerli, J., Volkart, P.*: Strömungsdynamik in Grundablassstollen. «Bulletin SEV, VSE» 16/1994, S. 31–34.
- VAW-Film: Naturmesskampagne am Grundablass Panix. VHS, 16 Minuten, 1994.
- VAW-Versuchsbericht Staumauer Panix. Nr. 919, 1987.
- Volkart, P., Speerli, J.*: Prototype investigation of high velocity flow in the high head tunnel outlet of the Panix dam. ICOLD Congress 1994, Durban.
- Volkart, P.*: Moderne Lösungswege in Hydraulik und Wasserbau: Numerische und physikalische Modellierung. «wasser, energie, luft» 84 (1992), S. 313–318.
- Volkart, P. U.*: Instrumentation for measuring local air concentration in high-velocity free-surface flow. The International Symposium on Hydraulics for high Dams, Beijing 1988.
- Billeter ,P., Speerli, J.*: Prototype investigation of the air entrainment in a high head bottom outlet. XXIV IAHR Congress, Madrid 1991, pp. D-321–330.

Anschrift der Verfasser: Dr. Peter Volkart, Leiter Abteilung Wasserbau VAW, Dozent ETH Zürich, dipl. Bauing ETH Jürg Speerli, Leiter Gruppe Stauanlagen VAW, dipl. Physiker Michael Benesch, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH, CH-8092 Zürich.