



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 2012

19. September 2013

Lufteintragsrate in Drucksysteme von Wasserkraftanlagen infolge Einlaufwirbel

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wasserkraft
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

«swisselectric research»
Seilerstrasse 3
CH-3001 Bern
research@swisselectric.ch

Auftragnehmer:

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)
ETH Zurich
Gloriastrasse 37/39
8092 Zürich
www.vaw.ethz.ch

Autoren:

Georg Möller, Dr. Martin Detert, Prof. Dr. Robert Boes
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)
ETH Zurich
moeller@vaw.baug.ethz.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Dr. Klaus Jorde

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 154207 / 103191

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Drucksysteme von Wasserkraftanlagen sollen frei von Luft sein. Andernfalls sind Wirkungsgradminderung, Pulsationen, Druckstöße und Durchflussreduktionen die Folge. Einlaufwirbel werden als eine massgebende Quelle des Lufteintrags angesehen. Zum Mechanismus und zur Quantifizierung des Lufteintrags fehlt bis heute ein fundiertes Wissen. Aufgrund dessen müssen auf der sicheren Seite liegend entsprechend grosse Reserven bei Planung und Betrieb eingehalten werden. Ist die Vorhersage des Lufteintrags möglich, eröffnet sich eine Alternative zur heutigen Bemessung. Eine Quantifizierung von Schadenspotentialen respektive von Gegenmassnahmen macht ökonomische Abwägungen zwischen einerseits Verhinderung und andererseits Zulassen von Lufteintrag möglich. Wasserkraftanlagen und insbesondere deren Speicherbewirtschaftung können wirtschaftlich optimiert bemessen und betrieben werden.

Die VAW untersucht mittels physikalischer Modellversuche den Lufteintrag durch Einlaufwirbel. Die hierzu notwendigen grossmassstäblichen Bedingungen werden mit einem Tank von ca. 50 m³ Volumen und einem Durchfluss bis zu 520 l/s erreicht. Das Modell ermöglicht die Einhaltung der heute bekannten Grenzwerte bzgl. der Modellähnlichkeit von Einlaufwirbeluntersuchungen um ein Mehrfaches.

Die durch den Wirbel am Einlauf ins Drucksystem des Modells eingetragene Luftmenge wird stromab mittels Entlüftung kontinuierlich während zwei Stunden für insgesamt 34 Lastfälle bestimmt. Damit ist zum ersten Mal die Lufteintragsrate systematisch ermittelt worden. Es wurde eine maximale Lufteintragsrate von 0.8 % gemessen. Mittels einer *2D-Particle Image Velocimetry (PIV)* wird das horizontale Geschwindigkeitsfeld um den Wirbel auf einer Gesamtfläche von 1 m² gemessen. Die Zirkulation als einer der wichtigsten Parameter zur Charakterisierung des Wirbels wird aus dem Geschwindigkeitsfeld ermittelt. Zudem werden die PIV Aufnahmen mittels Objekterkennung zur Bestimmung der Lage des Wirbels und des Durchmessers des Luftschlauches ausgewertet. Der Luftschlauchdurchmesser korreliert linear mit der Zirkulation. Die mittleren Geschwindigkeiten im Luftschlauch des Wirbels sind ebenfalls abschätzbar.

Aus den analysierten Daten konnten zwei Ansätze zur Vorhersage der Lufteintragsrate entwickelt werden: (1) Ein intrinsischer Ansatz, welcher mittels der Überdeckung und der Einlaufgeschwindigkeit eine Vorhersage ermöglicht. (2) Ein extrinsischer Ansatz, welcher die Vorhersage aufgrund von numerisch bestimmter Zirkulation ermöglicht. Eine praktische Bemessung von Einlaufbauwerken bzw. das Aufstellen von präzisen Richtlinien für den Betrieb von Wasserkraftanlagen hinsichtlich der Lufteintragsrate von Einlaufwirbeln sind damit möglich.

Mit dem Jahr 2012 endete die finanzielle Förderung durch das BfE. Im Juni 2013 wurden die Ergebnisse des Forschungsprojektes erfolgreich im Rahmen der Dissertation von Herrn Möller verteidigt. Bis September 2013 wurden neben der Dissertation sechs Veröffentlichungen publiziert, zwei Veröffentlichungen wurden eingereicht und eine weitere Veröffentlichung befindet sich in der Vorbereitung.

Projektziele

Stromproduktion durch Wasserkraftanlagen bedingt die Fassung und Weiterleitung von Triebwasser. In Druckstollen und -leitungen verändert eingetragene Luft die Abflusseigenschaften von einem einphasigen Fluid (Reinwasser) zu einer Zweiphasenströmung (Wasser-Luft-Gemisch). Dies wirkt sich markant auf den Betrieb, die Sicherheit und die Wirtschaftlichkeit aus. Wirkungsgradminderung, Pulsationen, Druckstöße und Durchflussreduktionen können die Folge sein. Eine massgebende Quelle des Lufteintrags sind Einlaufwirbel. Es ist daher ein Anliegen, die Lufteintragsrate zu bestimmen. Ein fundiertes Verständnis zum Mechanismus und damit zur Quantifizierung des Lufteintrags ist bis dato nicht gegeben, so dass bisher auf der sicheren Seite liegend entsprechende Reserven bei Planung und Betrieb einzuhalten sind. Bei Kenntnis bzw. Prognosemöglichkeit der Lufteintragsrate können jedoch deren negative Auswirkungen quantifiziert werden sowie die Wirtschaftlichkeit einer Wasserkraftanlage und insbesondere die Speicherbewirtschaftung optimiert werden.

Daraus lassen sich folgende Ziele des vorliegenden Forschungsprojekts formulieren:

- Ermittlung der Lufteintragsrate von Einlaufwirbeln anhand grossmassstäblicher physikalischer Modellversuche; Herstellen eines Zusammenhangs zwischen massgebenden Parametern des Wirbels, wie beispielsweise der Zirkulation und der Lufteintragsrate
- Entwicklung eines Ansatzes zur Beschreibung des Phänomens mit Hilfe der Projekt daten
- Erstellung von Bemessungsgleichungen zur praxistauglichen Bestimmung der einge tragenen Luft

Ergebnisse

Die VAW untersucht mittels physikalischer Modellversuche den Lufteintrag durch Einlaufwirbel. Die hierzu notwendigen grossmassstäblichen Bedingungen werden mit einem Tank von 50 m³ Volumen und einem Durchfluss bis zu 520 l/s erreicht. Das Modell ermöglicht die Einhaltung der heute bekannten Grenzwerte bzgl. der Modellähnlichkeit von Einlaufwirbeluntersuchungen. Die durch den Wirbel am Einlauf (Abb. 1) ins Drucksystem des Modells eingetragene Luft wird stromab mittels Entlüftung bestimmt. Die Lufteintragsrate wurde durch eine Modellfamilie nach Froude untersucht. Hierbei wurden Einlaufdurchmesser von 200, 300, 400, 500 mm untersucht. Übertragbare Lufteintragsraten konnten für Einlauf Durchmesser grösser gleich 400 mm gemessen werden. Mit Hilfe der Ergebnisse der Modellfamilie konnten die Ergebnisse der gesamten Untersuchung verifiziert werden. Die Entlüftungseinrichtung (Abb. 2) ist durch zusätzliche Speicher erweitert, um den hoch instationären Lufteintrag über einen Zeitraum von mehreren Stunden quasi kontinuierlich aufnehmen zu können. Statistisch signifikante Lufteintragsraten werden über Messdauern von 2 Stunden bestimmt. Die Lufteintragsrate kann gut in Abhängigkeit der relativen Überdeckungshöhe und der Einlauf-Froudezahl dargestellt werden (Abb. 3). Die Festlegung der Lufteintragsrate erfolgt durch zwei verschiedene Mittelwerte: Zum einen wird ein laufender Mittelwert verwendet (Abb. 3, links), und zum anderen ein Mittelwert über ausgeprägte Wirbelphasen. Vereinzelt und kurzzeitig kommt es zu grösseren Lufteintragsraten. Diese spielen jedoch eine untergeordnete Rolle und werden nicht berücksichtigt.

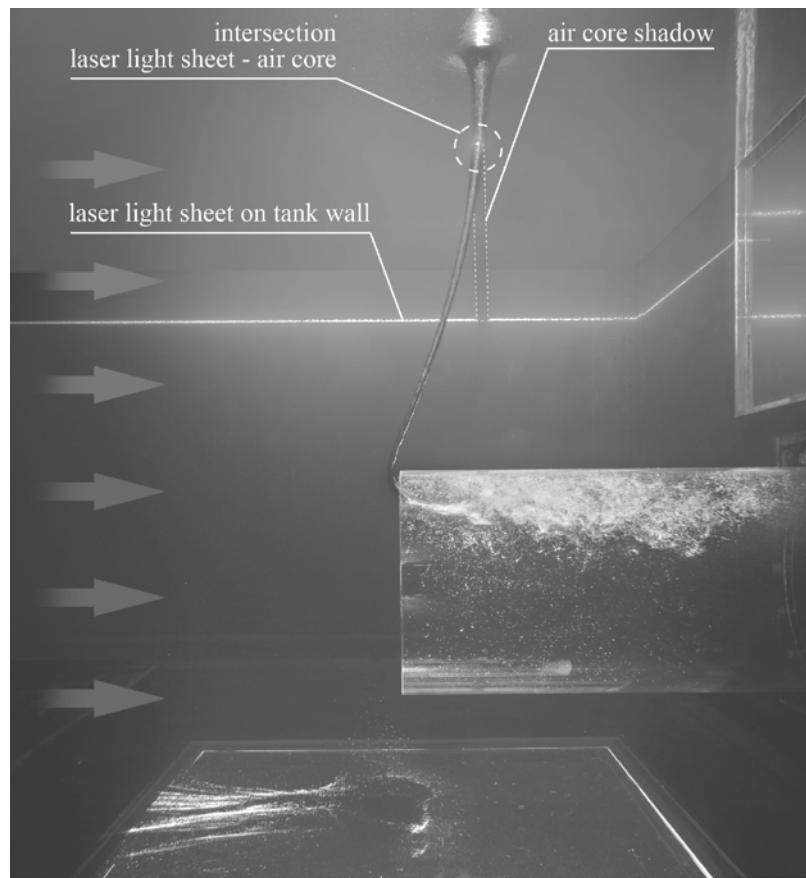


Abb. 1: Wirbel mit Luftschauch am horizontalen Rohreinlauf im Tank. Der Laserlichtschnitt des PIV-Systems wird am Luftschauch und an der Tankwand reflektiert, ein Schatten hinter dem Luftschauch wird durch den Laser erzeugt.

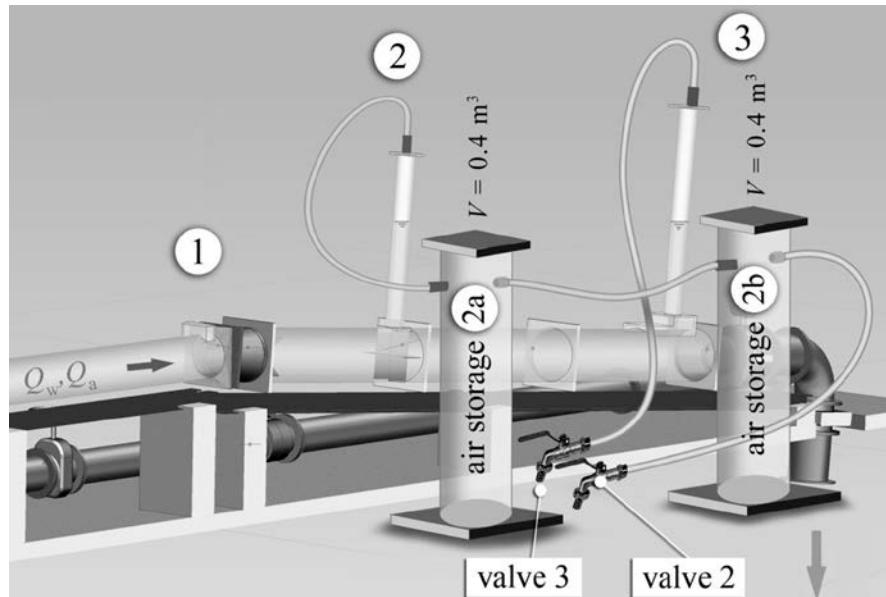


Abb. 2: Entlüftungseinrichtung mit drei Steigrohren am Drucksystem im Anschluss an den Tank. Steigrohr 1 ist bei sehr kleinen Lufteintragsraten installiert. Die zusätzlichen Luftspeicher 2a und 2b erhöhen die Messdauer und sind an Steigrohr 2 angegeschlossen. Es wird der Druck und der Wasserspiegel in den Steigrohren gemessen und mit Hilfe der idealen Gasgleichung der Lufteintrag bestimmt.

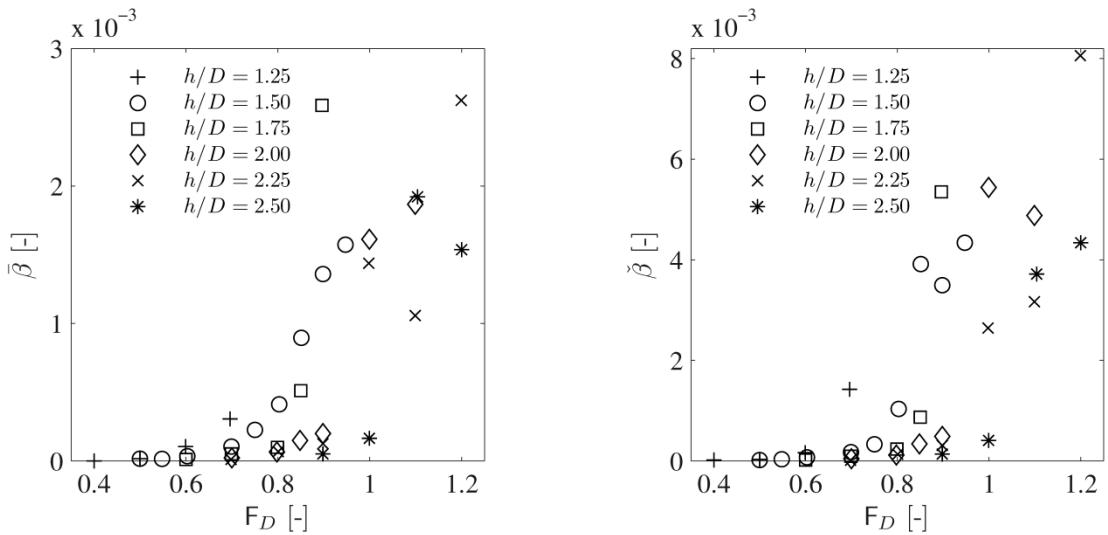


Abb. 3: Lufteintragsraten $\bar{\beta}$ der 34 Langzeitmessungen $\bar{\beta}$ in Abhängigkeit der relativen Überdeckungshöhe h/D und der Einlauf-Froudezahl $F_D = v_D/(gD)^{0.5}$. Links: mittlere Lufteintragsrate nach 2 h, rechts: mittlere Lufteintragsrate für vordefinierte Wirbelphasen innerhalb der zweistündigen Messdauer.

Zur Vorhersage der Lufteintragsrate wurde aus diesen Ergebnissen ein intrinsischer Ansatz auf Basis der Überdeckung und der Einlaufgeschwindigkeit entwickelt. Ein zweiter, extrinsischer Ansatz berücksichtigt die Zirkulation des Wirbels. Hierzu wurde das horizontale Geschwindigkeitsfeld um den Wirbel mittels 2D-Particle Image Velocimetry (PIV) auf einer Gesamtfläche von bis zu 1 m^2 vermessen, dessen Zentrum mittels Objekterkennung detektiert und die Zirkulation unter Annahme eines Potentialwirbels berechnet. Beide Ansätze, sowohl der intrinsische als auch der extrinsische beinhalten ein Vorhersageband für die Prognose von Lufteintragsraten. Die PIV-Aufnahmen wurden zusätzlich genutzt, um den Luftschlauch indirekt über seinen Schatten zu detektieren und zu vermessen. Es zeigt sich ein deutlich linearer Zusammenhang zwischen Zirkulation und Luftschlauchdurchmesser. In Kombination mit der Lufteintragsrate wurden daraus die mittleren Luftgeschwindigkeiten im Schlauch ermittelt, welche rund zehn Mal grösser sind als die mittleren Wassergeschwindigkeiten im Rohr. Final wurde ein Ansatz zur Bestimmung der kritischen Überdeckungshöhe von Einläufen basierend auf der Lufteintragsrate entwickelt.

Die Ergebnisse der Dissertation ermöglichen einen faszinierenden Einblick in die physikalischen Prozesse zum Lufteintragsmechanismus bei Einlaufwirbeln. Erstmals ist für dieses Phänomen nunmehr eine belastbare Prognose von Lufteintragsraten möglich.

Bewertung und Ausblick

Alle Bestandteile des hydraulischen Modells und der Messtechnik funktionieren nach der Optimierung wunschgemäß. Eine systematische Untersuchung der Lufteintragsrate in für die Wasserkraft typischen Lastfällen wurde abgeschlossen. Aus den analysierten Daten konnten zwei Bemessungsansätze zu Lufteintragsraten entwickelt werden. Darüber hinaus wurden Aussagen über den physikalischen Prozess des Lufteintrags abgeleitet. Alle Ergebnisse können der Dissertation (Möller, 2013) und entnommen werden. Ein erstes Journal-paper wurde im September 2013 eingereicht, ein weiteres ist in Vorbereitung.

Referenzen

Dissertation:

Möller, G. (2013). Vortex-induced Air Entrainment Rate at intakes, *ETH Zurich*
<http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-009932182>

Paper:

Möller, G., Detert, M. & Boes, R.M. (2013). Vortex-induced Air Entrainment Rates at Intakes. [submitted to *Journal of Hydraulic Engineering*].

Detert, M., Möller, G. & Boes, R.M. (2013). Image Analysis of Air-entraining Vortices at Intakes. [in preparation for *Journal of Hydraulic Engineering*].

Keller, J., Möller, G. & Boes, R.M. (2012). PIV Measurements of air-core intake vortices. *Journal of Hydraulic Engineering* [submitted to *Journal of Hydraulic Engineering*].

Möller, G., Meyer, A., Detert, M. & Boes, R.M. (2012). Lufteintragsrate durch Einlaufwirbel - Modellfamilie nach Froude. *Proc. Internationales Wasserbausymposium Graz 2012*: 371-378.

Möller, G., Detert, M. & Boes, R.M. (2012). Air entrainment due to vortices – State-of-the-art. *Proc. 2nd IAHR Europe Congress 2012*: paper B16.

Möller, G., Detert, M. & Boes, R.M. (2011). Vortex induced air entrainment rate into pressure systems of hydropower plants. *Newsletter of the Energy Science Center at ETH Zurich*, October 2011.

Möller, G. (2009). Einlaufwirbel im hydraulischen Modell. *Proc. 11. JuWi – Treffen, Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)*: 147-152.

Möller, G. (2008). Lufteintrag in Drucksysteme von Wasserkraftanlagen – Forschungsidee. *Proc. 10. JuWi – Treffen, Arbeitsbereich Wasserbau, Institut für Infrastruktur, Universität Innsbruck*: 133-137.

DISS. ETH NO. 21277

VORTEX-INDUCED AIR ENTRAINMENT RATE AT INTAKES

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
GEORG MÖLLER
Dipl.-Bauing., TU Berlin (Germany)

12.06.1976

citizen of Germany

accepted on the recommendation of
examiner: Prof. Dr. Robert Michael Boes
co-examiners: Prof. Dr. Anton Schleiss
Prof. John S. Gulliver, Ph.D.
Dr. Martin Detert

2013

Abstract

This research project deals with the investigation, description, and understanding of air entrainment rates due to intake vortices. Large-scale physical model tests have been conducted at VAW in a 50 m³ laboratory steel tank. The horizontal velocity field around the vortex is measured by 2D Particle Image Velocimetry system. A de-aeration system enables continuous measurements of air entrainment rates. The transferability from model scale test to prototypes is validated via scale family tests. As a result, limiting values for investigations regarding air entrainment due to vortices are developed. The probability of occurrence of intake vortices, the size of the air core, the velocity field, and the related air entrainment rate are compared and analyzed, resulting in two practical design approaches: These both guidelines, an intrinsic and an extrinsic one, enable for the first time to pre-estimate the amount of air that is entrained into the pressure system of hydropower plants (HPP) by intake-vortices. Moreover, a new approach is developed which enables the determination of the critical submergence. The physical process of air entrainment and, therefore, the flow through the air-core tube is examined and a new hypothesis concerning the driving process of air-core flow is developed. With these findings the efficiency of a HPP can be improved significantly, especially with regard to storage management operation as well as according to the design of de-aeration counter-measures.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird der Lufteintrag durch Einlaufwirbel erstmals systematisch untersucht und beschrieben. Kernstück bildet dabei ein 50 m^3 grosser Stahltank eines grossmassstäblichen, physikalischen Modells. Ein 2D Particle Image Velocimetry System ermöglicht die Messung des horizontalen Geschwindigkeitsfeldes des Wasserkörpers um den Wirbel, und ein komplexes Entlüftungssystem erlaubt eine kontinuierliche Messung der Lufteintragsrate. Die Übertragbarkeit der Modellresultate auf Prototypmassstäbe wird mittels Modellfamilienuntersuchungen nachgewiesen. Aus dieser Validierung werden Grenzwerte zur Untersuchung von lufteinziehenden Wirbeln im Modell abgeleitet. Hauptresultate wie die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Einlaufwirbeln, die Grösse des Luftschlauchs, das Geschwindigkeitsfeld um den Wirbel und vor allem die Lufteintragsrate sind die Basis zur Ableitung zweier Bemessungsansätze für die Praxis: Mit Hilfe je eines intrinsischen und eines extrinsischen Berechnungsansatzes ist es nunmehr zum ersten Mal möglich, die Lufteintragsrate von Einlaufwirbeln in Drucksysteme von Wasserkraftanlagen (WKA) zu bestimmen. Darüber hinaus wird ein neuer Ansatz zur Berechnung der kritischen Überdeckungshöhe von Einläufen basierend auf den analysierten Lufteinträgen entwickelt. Der physikalische Prozess des Lufteintrags und damit auch der der Strömung durch den Luftschlauch wird hinsichtlich des antreibenden Prozesses analysiert. Durch die erzielten Erkenntnisse kann der Wirkungsgrad von Wasserkraftwerken nun deutlich verbessert werden. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die Bewirtschaftung von Speichern und für die Gestaltung von Entlüftungseinrichtungen sowie den Umgang mit Luft in Drucksystemen von Wasserkraftanlagen.

1 VORTEX-INDUCED AIR ENTRAINMENT RATES AT INTAKES

2 Georg Möller ¹; Martin Detert ²; and Robert M. Boes ³

3

4 **Abstract:** This research paper presents an intrinsic approach to estimate air entrainment rates due
5 to intake vortices based on large-scale laboratory measurements. Quasi-continuous measurements
6 of the amount of entrained air were conducted using a sophisticated de-aeration system. The data
7 analysis of 34 test runs resulted in a parameter fit function describing air entrainment rates. An ad-
8 ditional prediction band provides a handle to inspect probability aspects. The guidelines presented
9 enable hydraulic design engineers to estimate both the amount of entrained air and the critical in-
10 take submergence at horizontal intakes. Thus, the efficiency and safety of pressurized systems is
11 further increased.

¹ Dr., Scientist, Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, CH-8092 Zürich, Switzerland (corresponding author). E-mail: moeller@vaw.baug.ethz.ch

² Dr., Senior Scientist, Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, CH-8092 Zürich, Switzerland. E-mail: detert@vaw.baug.ethz.ch

³ Professor Dr., Director, Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, CH-8092 Zürich, Switzerland. E-mail: boes@vaw.baug.ethz.ch

IMAGE ANALYSIS OF AIR-ENTRAINING VORTICES AT INTAKES

Martin Detert¹; Georg Möller²; and Robert M. Boes³

4

5 **Abstract:** This research paper focusses on the mechanisms of air-entraining vortices at intakes.
6 Particle image velocimetry (PIV) is used to determine both the horizontal velocity field around the
7 vortex core and the actual diameter of the vortex tube. The latter is measured by a sophisticated
8 image analysis methodology applied to the shadow of the air tube, enabling an analysis of the air-
9 core flow as well. The air flow velocity is determined based on the measured air discharges. Finally,
10 the findings concerning the air-core flow are analyzed with respect to the driving processes. A crude
11 model is developed that describes the air flow hydraulics in the tube.

¹ Dr., Senior Scientist, Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, CH-8092 Zürich, Switzerland. E-mail: detert@vaw.baug.ethz.ch

² Dr., Scientist, Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, CH-8092 Zürich, Switzerland (corresponding author). E-mail: moeller@vaw.baug.ethz.ch

³ Professor Dr., Director, Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, CH-8092 Zürich, Switzerland. E-mail: boes@vaw.baug.ethz.ch

1 PIV MEASUREMENTS OF AIR-CORE INTAKE VORTICES

2 Jens Keller ¹; Georg Möller ²; and Robert M. Boes ³

3

4 **Abstract:** Particle Image Velocimetry (PIV) measurements were conducted in a large-scale hy-
5 draulic model to obtain the horizontal velocity field of intake vortices with considerable air en-
6 trainment. Vortex wandering and air-core diameter were determined by object detection using PIV
7 images and velocity vector maps. This allowed for the calculation of ensemble- and azimuthally-
8 averaged velocity fields. The results of the horizontal velocity field around the vortex, whose circu-
9 lation affects a wide area, confirms the applicability of the analytic solution of the 2D Navier-
10 Stokes equation for a potential (free) vortex. The setup and the improvement of the PIV measure-
11 ments and their limitations are presented. For example, a complete resolved velocity field close to
12 the air-core did not exist due to reflections at the interface between air and water. Vortex character-
13 istics like vorticity and circulation are derived from the velocity fields and turbulence is shown by
14 representing in-plane Turbulent Kinetic Energy (TKE).

¹ PhD student, Department of Energy, University of Oviedo, Campus de Gijón, 33203 Gijón, Spain. E-mail: keller-jens@uniovi.es

² Dr., Scientist, Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, CH-8092 Zürich, Switzerland (corresponding author). E-mail: moeller@vaw.baug.ethz.ch

³ Professor Dr., Director, Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, CH-8092 Zürich, Switzerland. E-mail: boes@vaw.baug.ethz.ch

Lufteintragsrate durch Einlaufwirbel

Modellfamilie nach Froude

G. Möller¹, A. Meyer¹, M. Detert¹ und R.M. Boes¹

¹ Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich,
8092 Zürich, SWITZERLAND

E-Mail: moellege@ethz.ch

Kurzfassung

Drucksysteme von Wasserkraftanlagen sollen aufgrund von überwiegend negativen Konsequenzen frei von Luft sein. Bis dato fehlen die Grundlagen zur Abschätzung der Lufteintragsrate durch Einlaufwirbel, welche als massgebender Lufteintragsprozess angesehen werden. Um die Übertragbarkeit der Resultate des hydraulischen Modells zu gewährleisten, wurde eine Modellfamilie mit Einlaufdurchmessern von DN200 bis DN500 durchgeführt. Die publizierten Grenzwerte zur Modellierung von Einlaufwirbeln bezüglich der Viskosität und der Oberflächenspannung des Wassers sind um ein Mehrfaches eingehalten. Wider Erwarten treten deutliche Massstabseffekte bei Durchmessern kleiner DN400 auf. Im vorliegenden Beitrag werden neue Grenzwerte für Untersuchungen zur Lufteintragsrate vorgeschlagen.

Einleitung

Die Lufteintragsrate durch Einlaufwirbel sollte experimentell zur Minimierung von Maßstabseffekten nur in grossmassstäblichen Modellversuchen ermittelt werden. Zur Untersuchung bezüglich der Bildung von Einlaufwirbeln im hydraulischen Modell liegen empirische Grenzwerte vor. Diese Werte stehen beispielsweise im Zusammenhang mit der Viskosität und der Oberflächenspannung des Wassers.

Problematik

Drucksysteme von Wasserkraftanlagen sollen frei von Luft sein. Andernfalls kommt es zu Wirkungsgradminderung, Pulsationen, Druckstößen oder Durchflussreduktion. Einlaufwirbel werden als eine massgebende Quelle des Lufteintrags angesehen. Zum Mechanismus und zur Quantifizierung des Lufteintrags fehlt bis heute ein fundiertes Wissen. Aufgrund dessen müssen, auf der sicheren Seite liegend, entsprechend grosse Reserven bei Planung und Betrieb von Einlaufbauwerken eingehalten werden. Ist die Vorhersage des Lufteintrags möglich, eröffnet sich eine Alternative zur heutigen Bemessung. Eine Quantifizierung von Schadenpotentialen resp. von Gegenmassnahmen macht ökonomische Abwägungen zwischen Verhinderung und Zulassen von Lufteintrag möglich. Wasserkraftanlagen und insbesondere deren Speicherbewirtschaftung können wirtschaftlich optimiert bemessen und betrieben werden.

Modellähnlichkeit von Einlaufwirbeluntersuchungen

In der Mehrzahl der experimentellen Untersuchungen in der Fachliteratur wird die Modellierung auf das verallgemeinerte Froude'sche Modellgesetz basiert. Es wird davon ausgegangen, dass Schwerkraft und die Trägheitskräfte die massgebenden Kräfte sind. Die Verwendung der Froude'schen Ähnlichkeit bedeutet, dass beispielsweise die Ähnlichkeitsbedingungen nach Reynolds und Weber nicht gleichzeitig erfüllbar sind. Da die Einflüsse der Viskosität und der Oberflächenspannung im Prozess der Einlaufwirbelbildung jedoch nicht zu vernachlässigen sind, werden bei der Modellierung Erfahrungen und Grenzwerte aus der Fachliteratur in Form von dimensionslosen Zahlen verwendet. Werden diese eingehalten, können Modellergebnisse

mit vernachlässigbaren Abweichungen auf den Prototyp übertragen werden. Häufig verwendete dimensionslose Zahlen des Einlaufs sind beispielsweise die Reynoldszahl $R_D = vD/v$ und die Weberzahl $W_D = v(\rho D/\sigma)^{0.5}$, mit v = mittlere Fließgeschwindigkeit, D = Einlaufdurchmesser, v = kinematische Viskosität, ρ = Dichte und σ = Oberflächenspannung. Die Eigenchaften der Zuströmung werden mit der radialen Reynoldszahl $R_R = Q/vh$, mit h = Überdeckungshöhe bezogen auf die Achse des Einlaufrohrs und Q = Durchfluss berücksichtigt. Es gibt weitere Kriterien, für welche jedoch die dynamischen Eigenschaften der Zuströmung, wie z. B. die Zirkulation im Einlaufbereich, benötigt werden. Diese Werte wurden zum Grossteil im Rahmen von Grundlagenuntersuchungen an elementaren Versuchsaufbauten aufgestellt. [1] ermittelte an einem Tank mit kreisrunder Bodenöffnung eine untere Grenze von $R_D = 2 \cdot 10^4$, [2] bestimmte $W_D > 11$ am vertikal nach unten gerichteten Rohr und [3] legte $R_R > 2.0 \cdot 10^4$ an einem horizontalen Rohr quer zur Zuströmung fest. Alle diese Grenzen beziehen sich auf die Ähnlichkeit der Bildung des Wirbels. Die Grösse des Lufteintrags wurde bis dato nicht systematisch untersucht ([4]). Es liegen derzeit somit keine Grenzen hierzu vor.

Methodik

Hydraulisches Modell

Das grossmassstäbliche physikalische Modell ist so dimensioniert, dass die publizierten Grenzwerte bezüglich der Modellähnlichkeit von Einlaufwirbeluntersuchungen, die sich auf die Bildung von Einlaufwirbeln beziehen, um ein Mehrfaches eingehalten werden. In Abbildung 1 ist das an der VAW erstellte Modell schematisch dargestellt.

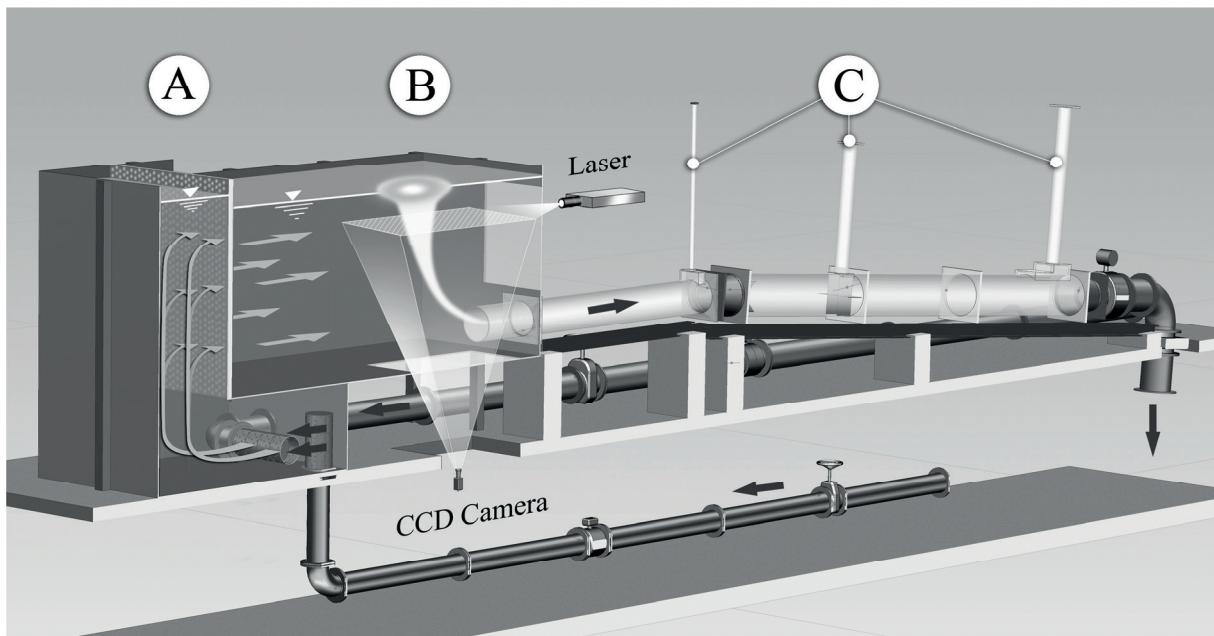


Abbildung 1: Schnitt durch das bestehende physikalische Modell: A) Beruhigung der Zuströmung aus den Pumpen mit Einlaufbecken und Filtermatte am Übergang zum Tank, B) Tank mit Geschwindigkeitsmessung (2D-Particle Image Velocimetry (PIV), horizontale Gesamtfläche schraffiert) um den Wirbel, C) Entlüftungseinrichtung des Drucksystems mittels dreier Steigrohre mit Entfernungen vom Einlauf von $C_1 = 3.7$ m, $C_2 = 6.4$ m, $C_3 = 10.6$ m.

Die Gesamtlänge des Modells beträgt 18.5 m. Der Tank, in dem sich die Einlaufwirbel bilden, hat ein Volumen von 50 m^3 . Zwei frequenzgesteuerte Pumpen erzeugen einen max. Durchfluss von $Q = 510 \text{ l/s}$ und ermöglichen, das Modell in einem geschlossenen Kreislauf bei konstantem Wasserspiegel im Tank und Durchfluss zu betreiben. Dadurch können die Strömung

im Tank am Einlauf zum Drucksystem und der Lufteintrag systematisch vermessen werden. Relative Überdeckungshöhen des Einlaufs können in einem Bereich $h/D = 0 - 8$ untersucht werden, mit h = Überdeckungshöhe bezogen auf die Rohrachse und D = Rohrdurchmesser. Die Strömung im Einlauf kann mit der Einlauf-Froudezahl $F_D = v_{\text{Rohr}}/(gD)^{0.5}$ charakterisiert werden, mit v_{Rohr} = mittlere Geschwindigkeit im Rohr. Dabei kann $F_D = 0 - 10$ variiert werden. Innerhalb der beiden Bereiche (h/D , F_D) lassen sich somit ähnliche Zustände wie an Prototyp-Bauwerken simulieren.

Generell wird die Einlaufwirbelbildung von der Zuströmung zum Einlauf beeinflusst. Eine Reduzierung der Beeinflussung auf ein Minimum ist im Hinblick auf allgemeingültige Ergebnisse eine Grundvoraussetzung. Von den Zulaufrohren DN300 und DN250 muss der Wasserstrahl gleichmäßig auf den Tankquerschnitt verteilt werden. Daher wurde ein Einlaufbecken angeordnet (vgl. Abbildung 1, A). Durch ein perforiertes Rohrende, eine Filtermatte und ein Lochblech wird der entsprechende Strömungswiderstand erzeugt, um die Strömung im folgenden Tank zu vergleichmässigen. Diese Massnahme wurde optimiert unter Berücksichtigung der Durchgängigkeit von Partikeln der Grösse $< 600 \mu\text{m}$, die für die PIV-Aufnahmen notwendig sind. Zudem sorgt an der Oberfläche ein Wellendämpfer (nicht abgebildet) für einen ruhigen Wasserspiegel.

Das horizontale, scharfkantige Einlaufrohr ragt mit einem Stirnabstand von 0.8 m in den Tank. Die verbleibende Länge des horizontalen Rohrs ist 3.0 m. Die Rohre des gesamten horizontalen Teils mit einer Länge von 3.8 m wurden mit Durchmessern $D = [0.2, 0.3, 0.4, 0.5]$ m ausgetauscht und als Modellfamilie untersucht. Daran schliesst ein unter 5° geneigtes Rohr an (Abbildung 2). In diesem wird mit Hilfe einer Entlüftungseinrichtung die Lufteintragsrate ermittelt. Bei kleinen Lufteintragsraten und geringen Durchflüssen kann zusätzlich am Ende des horizontalen Teils entlüftet werden.

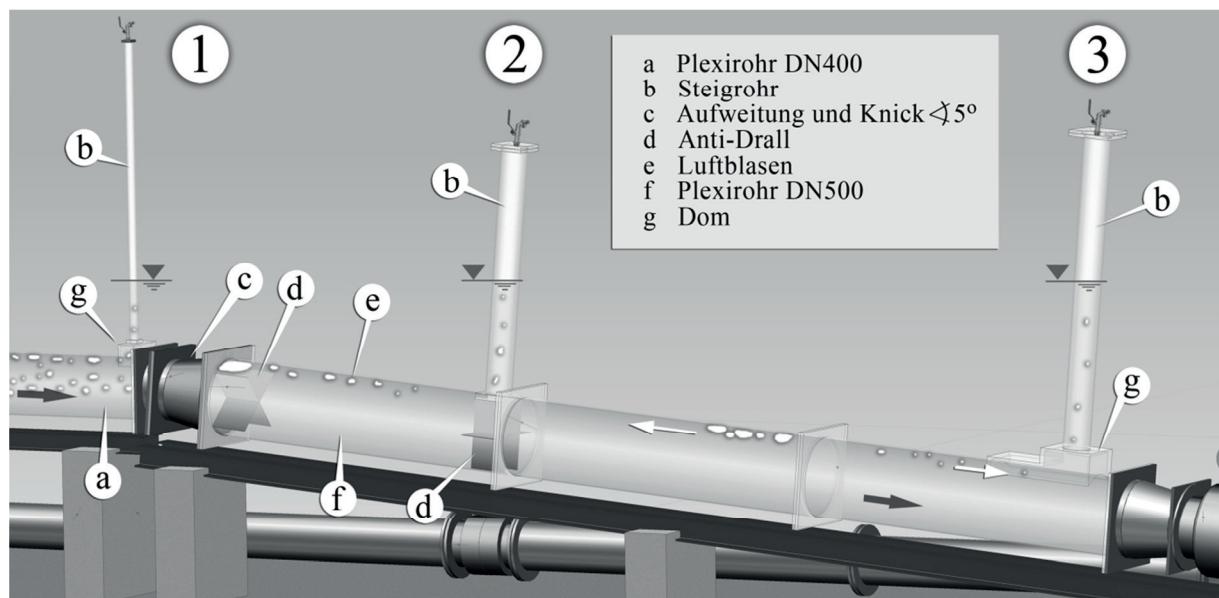


Abbildung 2: Entlüftungseinrichtung zur Bestimmung der Lufteintragsrate β .

Aufgrund des grossen Parameterraums der Untersuchung sind drei Steigrohre für die sich ändernden Eigenschaften der Zwei-Phasen-Strömung im System (Geschwindigkeit, Blasengrösse) notwendig. Die Lufteintragsmessungen wurden mittels dosierter Zugabe von Druckluft bei verhinderter Wirbelbildung kalibriert. Eine vollständige Entlüftung kann für Einlauf-Froudezahlen $F_D \leq 1.4$ (Bezug DN400) sichergestellt werden. Für grössere Werte wurden Korrekturfunktionen ermittelt.

Modellähnlichkeit und Modellfamilie

Bei der Untersuchung von Einlaufwirbeln im hydraulischen Modell ist gemäss unserer Literaturübersicht das Froude'sche Ähnlichkeitsgesetz anzuwenden. Die Einlauf-Froudezahl wird als einer der wichtigsten Parameter angesehen, welcher die erforderliche Überdeckungshöhe beeinflusst ([6]). Die Signifikanz im Prozess der Wirbelbildung ist auf den auf Einfluss der Schwerkraft zurückzuführen. Die Auswirkungen lassen sich in Form einer Senke in der Wasserspiegeloberfläche beobachten. Erreicht diese Senke in der Form eines durchgehenden Luftschauches (Wirbeltyp 6 nach [8]) den Einlaufquerschnitt, spricht man von der kritischen Überdeckungshöhe, bei der der Lufteintrag beginnt. Der physikalische Prozess der Wirbelbildung wird jedoch noch von weiteren Einflüssen begleitet, die bei einer Modellierung nach Froude nicht hinreichend berücksichtigt werden. Da die Reynolds- und Weberzahl nicht konstant bleiben, sind die Auswirkungen von Oberflächenspannung und Viskosität nicht vernachlässigbar. Tabelle 1 zeigt zum Vergleich die publizierten Grenzwerte mit den untersuchten Zuständen während der gegenständlichen Modelluntersuchung.

Tabelle 1: Berechnung der Massstabszahlen λ anhand der verwendeten Einlaufrohrdurchmesser D. Untersuchte Froudezahlen $0.4 \leq F_D \leq 1.4$ ergeben deutlich höhere Werte als die publizierten Grenzen.

	D [m]	λ [-]	R _D [-]			W _D [-]		
			Grenz.	min. (0.4)	max. (1.4)	Grenz.	min. (0.4)	max. (1.4)
DN500	0.484	1	$2 \cdot 10^4$	$4.2 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^6$	11	71	248
DN400	0.389	1.24		$3.0 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^6$		57	199
DN300	0.291	1.34		$1.9 \cdot 10^5$	$6.8 \cdot 10^5$		42	149
DN200	0.190	1.53		$1.0 \cdot 10^5$	$3.6 \cdot 10^5$		28	97

Um eine Übertragbarkeit der Modellresultate ohne signifikante Maßstabseffekte sicherzustellen, ist deren Überprüfung in einer Modellfamilie unumgänglich. Dabei ist die Variation des Längenmasses wichtig, um etwaige Einflüsse sichtbar zu machen. In der vorliegenden Untersuchung wurde der Einlaufdurchmesser D variiert. Es wird aufgrund der Grösse des Tanks und der damit verbundenen geringen Geschwindigkeit der Zuströmung davon ausgegangen, dass Randeinflüsse vernachlässigbar sind. Alle anderen Grössen, z. B. Überdeckung und Durchfluss, wurden nach Froude umgerechnet ([5]).

Messtechnik

Zur Ermittlung des Strömungsfeldes um den Luftschauch des Wirbels wird ein 2D-Particle Image Velocimetry (PIV) - Messsystem eingesetzt. Es kann die Strömungsgeschwindigkeit auf einer Fläche von $\sim 1 \text{ m}^2$ gemessen werden. Dazu ist die optische Zugänglichkeit durch zwei Seiten- und eine Bodenscheibe gewährleistet. Abbildung 3 skizziert eine Versuchsdurchführung und zeigt die wichtigsten Komponenten.

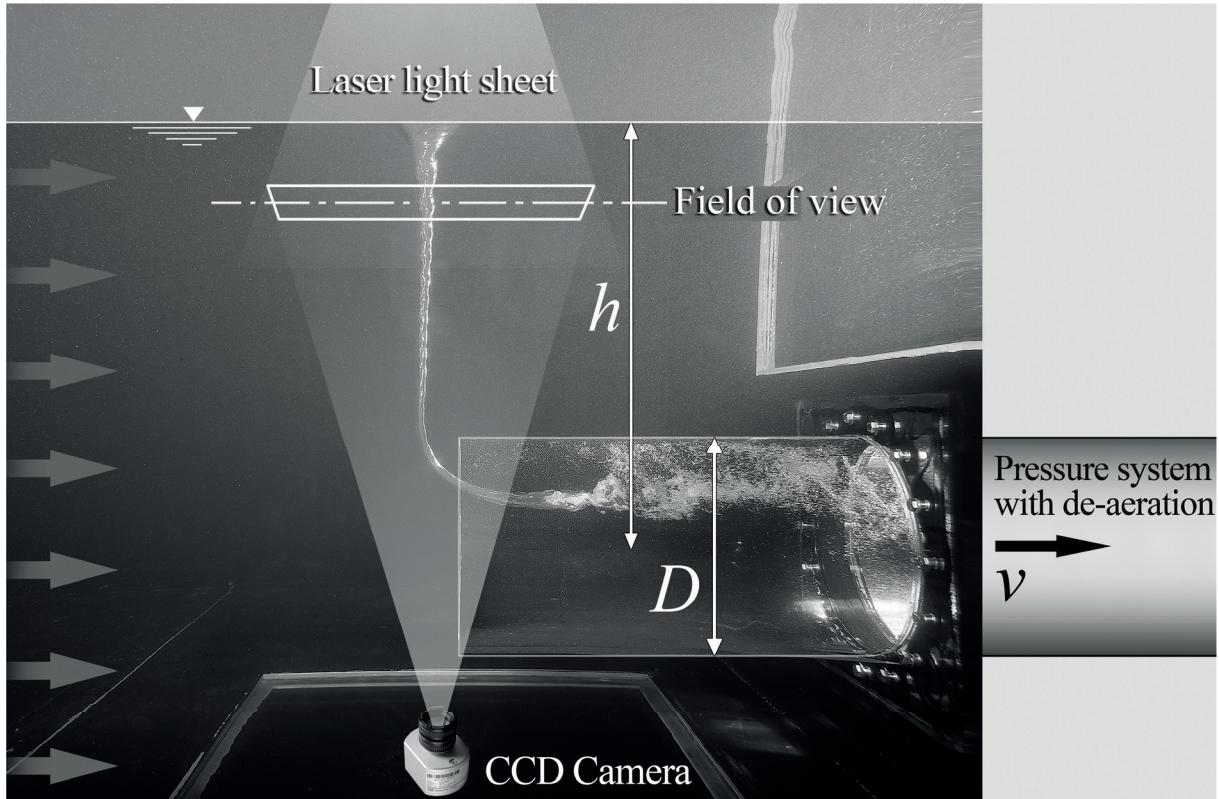


Abbildung 3: Schema einer Versuchsdurchführung im physikalischen Modell mit lufteinziehendem Einlaufwirbel. Die Vermessung des horizontalen Geschwindigkeitsfeldes um den Luftschlauch des Wirbel erfolgt mit 2D-PIV auf einer Gesamtfläche von $\sim 1 \text{ m}^2$.

Resultate

Parameterraum und kritische Überdeckungshöhe

Der Parameterraum der vorliegenden Untersuchung ergibt sich aus den relativen Größen Einlauf-Froudezahl F_D und Überdeckungshöhe h/D . Dieser wurde in Vorversuchen zur Messbarkeit des Lufteintrags festgelegt. Abbildung 4 zeigt die systematisch beobachteten Messpunkte (grau). Dabei ist ein Augenmerk auf kritische bzw. lufteinziehende Wirbel, welche nach der ARL-Wirbelklassifikation ([8]) Typ 5 und 6 entsprechen, gelegt worden. In Bezug auf den messbaren Lufteintrag ist lediglich Typ 6 mit voll ausgebildetem Luftschlauch von der freien Oberfläche bis in den Einlaufquerschnitt von Interesse, da die Lufteintragsraten des Typs 5 mit der Ablösung einzelner Blasen bereits vor dem Einlauf klein und nicht messbar sind. Die Abbildung zeigt durch die jeweiligen Symbole hervorgehoben die Messpunkte, an denen der Lufteintrag des Wirbeltyps 6 der jeweiligen Durchmesser vermessen werden konnte. An Punkten $< F_D$ und $> h/D$ davon ist der Lufteintrag zu klein und nicht messbar – oder kein Wirbel vorhanden. Bei den Punkten $> F_D$ und $< h/D$ davon ist der Lufteintrag zu gross, um diesen mit der optimierten Entlüftungseinrichtung messen zu können. Die Bereiche des messbaren Lufteintrags der einzelnen Durchmesser unterscheiden sich nicht wesentlich, so dass allein anhand dieses Kriteriums keine Massstabseffekte feststellbar sind.

Die kritische Überdeckungshöhe ist als Beginn des Lufteintrags definiert. Publizierte Abschätzungen wie nach [7], die ebenfalls in Abbildung 4 eingezeichnet sind, werden oft verwendet. Aufgrund der vorliegenden Resultate kann diese Abschätzung mit einer gewissen Unschärfe bestätigt werden. Zudem ist dies ein Indiz für die Allgemeingültigkeit der Resultate am bestehenden hydraulischen Modell.

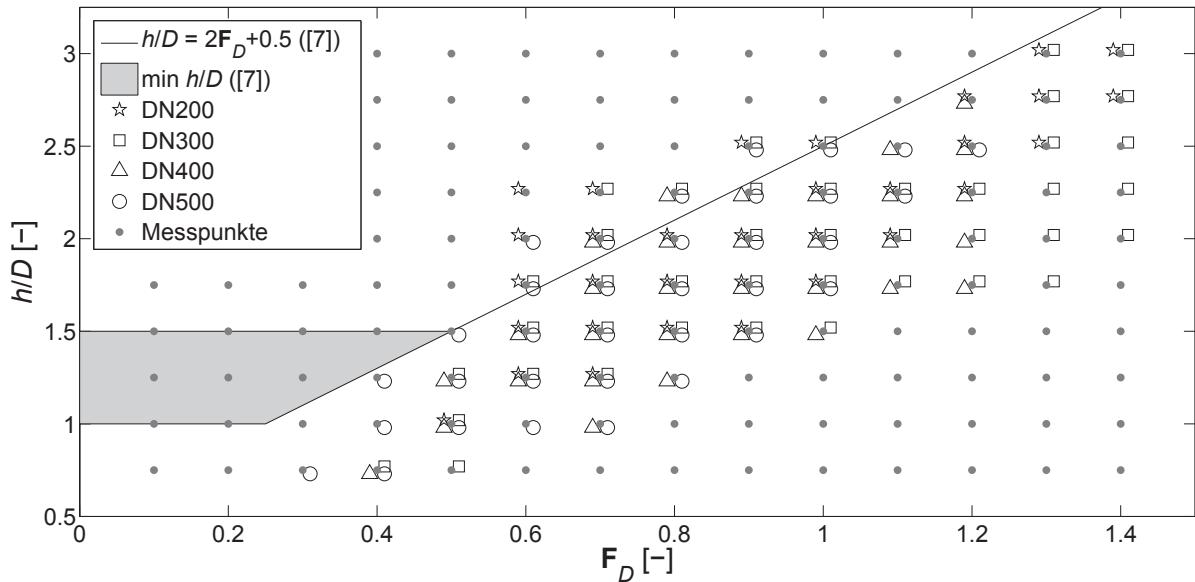


Abbildung 4: Untersuchte Messpunkte im Parameterraum und messbarer Lufteintrag. Zum Vergleich ist die kritische Überdeckungshöhe nach [7] eingezeichnet.

Lufteintragsrate

In Abbildung 5 sind Ergebnisse der Lufteintragsrate $\beta = Q_A/Q_w$ über den Parameterraum aufgetragen, mit Q_A = eingetragener Luftstrom und Q_w = Wasserdurchfluss. Die gemessenen β -Werte erreichen bis zu 0.6%. Bei dieser Größe ist die Strömung im Rohr visuell stark mit Luft durchmischt (white water). Die Raten für DN400 und DN500 sind ähnlich. Aufgrund des absolut größeren Durchflusses kommt die Entlüftungseinrichtung an ihre Grenzen, so dass im Bereich großer F_D und kleiner h/D keine belastbaren Messungen mehr durchführbar sind.

Die Lufteintragsrate β wird aus Mittelwerten über Messdauern von 2 bis 600 s bestimmt. Die Dauer ist abhängig von der Lufteintragsrate und der zur Verfügung stehenden Wasserspiegelabsenkung im Steigrohr. Jede Lufteintragsrate ist somit ein Mittelwert der Messdauer. Mit steigender Froudezahl und abnehmender Überdeckung nehmen die Eintragsraten exponentiell zu. Größere Lufteintragsraten als dargestellt treten auf, sind aber aus verschiedenen Gründen nicht messbar. Wirbel verlöschen sich zum Teil gegenseitig und führen so zu einem diskontinuierlichen Lufteintrag über die Messdauer. Das kurzzeitige Potential zum Lufteintrag ist jedoch entsprechend hoch, es treten große Lufteintragsraten auf, deren Dauer jedoch kürzer als die Messdauer ist.

Liegen keine Maßstabseffekte vor, sind die dimensionslosen Lufteintragsraten β bei allen untersuchten Durchmessern gleich groß. Bei DN200 und DN300 wurden deutlich kleinere, überproportional abnehmende Lufteintragsraten festgestellt. Zum Vergleich ist in der Abbildung 6 ein Box-Plot mit allen übereinstimmenden Messpunkten des Parameterraums dargestellt. Die mittige Linie markiert jeweils den Median jeder Messserie. Die Begrenzung der Box sind die Quantile 25% und 75%. Die Antennen stehen für den gesamten Wertebereich. Die Veränderung der Lufteintragsraten ist durch Verkleinerungsfaktoren $V_f = \beta_{DN500}/\beta_{DNi}$ veranschaulicht, d.h. V_f gibt das Verhältnis der Referenz-Lufteintragsrate, hier β_{DN500} , und der Lufteintragsrate des jeweiligen Einlaufrohrdurchmessers, beispielsweise β_{DN300} , wieder. Der Vergleich der Resultate der vier Messserien zeigt die Bedeutung der Wahl des Einlaufdurchmessers. Im Mittel sind die Lufteintragsraten bei einem DN200 10fach und bei einem DN300 3fach kleiner als die Werte bei DN 500 ($\sim DN400$).

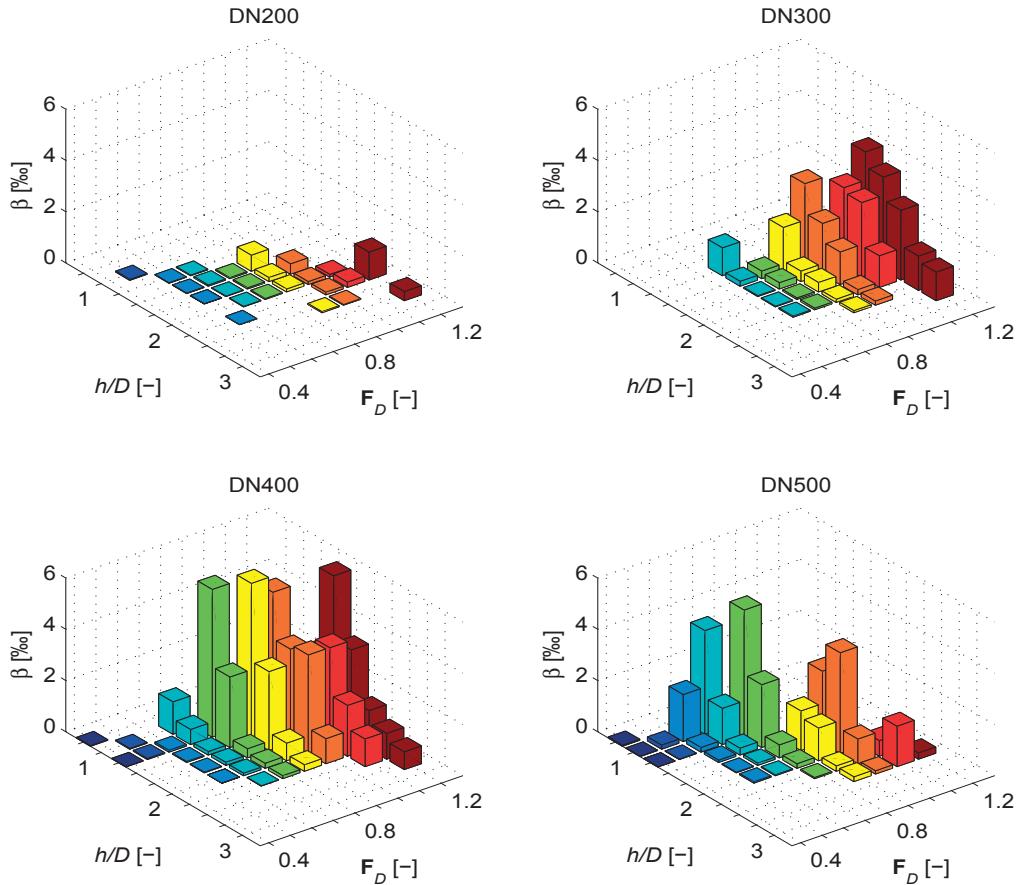


Abbildung 5: Vergleich Lufteintragsraten β der untersuchten Einlaufdurchmesser über den untersuchten Parameterraum. Eine Übertragbarkeit bzw. Ähnlichkeit ist gewährleistet, wenn die β -Werte gleich gross sind.

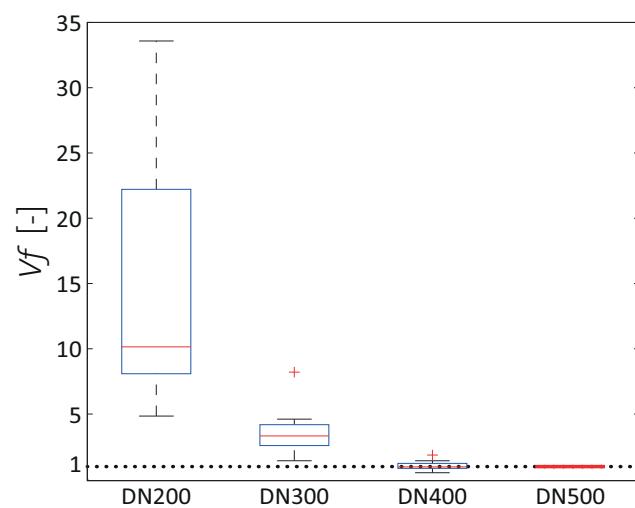


Abbildung 6: Verkleinerungsfaktoren $V_f = \beta_{DN500}/\beta_{DN_i}$ als Vergleich der Lufteintragsraten β_i für die untersuchten Einlaufdurchmesser DN200–DN500. Als Referenz gilt DN500. Beispiel: Ermittlung Werte DN300: $V_f_{DN300,i} = \beta_{DN500,i}/\beta_{DN300,i}$. Definition: Box = Inter quantile range (IQR = $Q_{75\%}-Q_{25\%}$), Linie Median ($Q_{50\%}$), Antenne = 1.5 IQR, Kreuz=Ausreisser (> 1.5 IQR).

Zusammenfassende Diskussion und Ausblick

Dieser Artikel beschreibt und analysiert grossmassstäbliche Modellversuche zur Abschätzung der Lufteintragsrate durch Einlaufwirbel. Die Beeinflussung des Lufteintrags durch Viskosität und Oberflächenspannung konnte bei kleiner werdendem Modellmaßstab deutlich festgestellt werden. Die Ergebnisse lassen erste Aussagen über eine Grenze der Modellierbarkeit von Lufteinträgen durch Einlaufwirbel zu. Die Viskosität und die Oberflächenspannung spielen in etwa bei Reynoldszahlen $R_D = vD/v > 6*10^5$ und bei Weberzahlen $W_D = v(\rho*D/\sigma)^{0.5} > 120$ eine untergeordnete Rolle. Diese hiermit postulierten Grenzen liegen um das 25 bzw. 11fache höher als die bis dato publizierten Grenzen für eine Wirbelbildung bis zum kritischen Zustand. Sie entsprechen annähernd den Grenzwerten, die für Untersuchungen zum Lufteintrag an Hochgeschwindigkeits-Kanalströmungen empfohlen werden ([9]). Die Verwendung obiger empirischer Grenzwerte bzgl. der Bildung von lufteinziehenden Wirbeln wird daher in Bezug auf die Lufteintragsrate in Frage gestellt.

Folgender Ansatz über eine detaillierte Betrachtung des Luftschauchs erscheint zielführender: Die Höhe des Lufteintrags wird vom Luftschauch und dem dortigen Unterdruck bestimmt. Trotz des verhältnismässig grossen physikalischen Modells liegen die beobachteten Luftschauchdurchmesser im Bereich von wenigen Millimetern im Maximum. Mit Hilfe einer separaten Auswertung der PIV-Aufnahmen über Objekterkennungsalgorithmen soll in einem nächsten Schritt der Durchmesser des Luftschauchs bestimmt werden. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Luftgeschwindigkeiten im Schlauch um eine Größenordnung höher sein können, als die Geschwindigkeiten des umliegenden Wassers.

Danksagung

Die Autoren danken swisselectric research und dem Bundesamt für Energie (BFE) für die finanzielle Unterstützung und der Pöry Energy AG Zürich für die technische Unterstützung.

Quellenverzeichnis

- [1] Daggett L.L. & Keulegan G.H. (1974). Similitude in free-surface vortex formations. *Journal of the Hydraulics Division* 100(11), (pp. 1565-1581).
- [2] Jain A.K., Raju K.G.R. & Garde R.J. (1978). Vortex formation at vertical pipe intakes. *Journal of the Hydraulics Division* 104(10), (pp. 1429-1445).
- [3] Anwar H.O., Weller J.A. & Amphlett M.B. (1978). Similarity of free-vortex at horizontal intake. *Journal of Hydraulic Research* 16(2), (pp. 95-105).
- [4] Möller G., Detert M. & Boes R.M. (2012). Air entrainment due to vortices – State-of-the-art. *Proc. 2nd IAHR Europe Congress 2012* [akzeptiert].
- [5] Meyer, A. (2012). Modellfamilie zum Lufteintrag durch Einlaufwirbel. Masterarbeit VAW. ETH Zürich und Arbeitsbereich Wasserbau, Universität Innsbruck.
- [6] Raju K.G.R. & Garde R.J. (1987). Modelling of vortices and swirling flows. *Swirling flow problems at intakes*. IAHR Hydraulic Structures Design Manual 1, J. Knauss, ed., Balkema, Rotterdam, Netherlands (pp. 77-90).
- [7] Knauss J. (1987). Prediction of critical submergence. *Swirling flow problems at intakes*. IAHR Hydraulic Structures Design Manual 1, J. Knauss, ed., Balkema, Rotterdam, Netherlands (pp. 57-76).
- [8] Hecker G.E. (1987a). Fundamentals of vortex intake flow. *Swirling flow problems at intakes*. IAHR Hydraulic Structures Design Manual 1, J. Knauss, ed., Balkema, Rotterdam, Netherlands (pp. 13-38).
- [9] Boes R.M. & Hager W.H. (2003). Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering* 129(9), (pp. 661-670).

AIR ENTRAINMENT DUE TO VORTICES – STATE-OF-THE-ART

Georg Möller¹, Martin Detert¹ and Robert M. Boes¹

¹Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, 8092 Zurich, Switzerland

E-mail: moellege@ethz.ch

Abstract

A major design criterion of intakes has usually been to avoid air entrainment by vortices. This paper gives a review of intake vortices research regarding the quantification of entrained air. Only four publications dealing with air entrainment were found in a literature review. However, no useful information is provided to quantify the air entrainment. A correlation with essential flow parameters is missing. In a large number of publications the term “air entraining vortices” is used, but no information is given regarding air entrainment. The present paper further describes the consequences of air being entrained into a pressure system. It is discussed how the knowledge of the air entrainment rate could be used for a new design concept improving the safety, durability and efficiency of hydropower waterways. Two general measures are emphasized: (1) the common way to avoid air entrainment completely, and (2) a new approach to allow air entrainment. A large-scale model has been built at VAW of ETH Zurich and tests to quantify the air entrainment rate due to intake vortices are currently conducted. Moreover, the physical processes of air transport mechanism in the air core and bubble separation from the air core to a pressure pipe system have been analyzed. The velocity field of an intake vortex is measured by 2D Particle Image Velocimetry (PIV). The results will allow correlating the air entrainment rate to the leading hydraulic parameters, e.g. the circulation of a vortex.

Introduction

Air entrainment into power waterways usually takes place either at hydraulic jumps in tunnels, at drop shafts or by vortices at intake structures. The latter phenomenon occurs at any intake in different forms and is usually the leading entrainment mechanism. Particularly strong vortices have considerable potential for air entrainment. The occurrence of vortices is thus a major problem for the design, retrofitting and operation of water intakes. Almost one hundred years of research has led to a large number of publications regarding intake vortices. Vortices are present in many natural and technological states (Lugt, 1983). Vortices at intakes can be characterized by different vortex-types and

vortical flows, respectively. In principle, an intake vortex is an idealized big single free potential surface vortex as shown in Figure 1. The direction of rotation is clockwise as could be expected for the Southern Hemisphere. Appearances are deceptive. Binnie (1964) and Trefethen et al. (1965) have proved the evidence of the influence of the Coriolis effect by extensive experiments on both the Northern and the Southern Hemisphere. The direction of rotation depends merely on the properties of the approach flow. The influence of the Coriolis force on the radial velocity of a vortex is 3×10^7 times smaller than that due to gravity (Shapiro, 1962).

Statements about the length of the air core and about air entrainment into the intake are often not possible from prototype observations, as the accessibility is limited as opposed to model investigations.



Figure 1: The intake vortex turns clockwise during the emptying through the diversion tunnel (diameter = 7.6 m) at Lake Arapuni (New Zealand). The tunnel submergence was about 21 m (Ball, 1933).

If present, the vortex core is a forced vortex which first appears as a dimple at the water surface. If the dimple gets longer and some air bubbles separate from what is called air core, the air entrainment due to a vortex starts. This process is driven by the vortex field, the so-called free vortex. Deny (1956) termed and described the different phases of vortex formation as “stages in development of air entraining

vortex". Later on the term "vortex-type" was developed. Hecker (1987a) shows that air entrainment takes place at vortex types 5 and 6 (of in total six stages) after the established Alden Research Laboratory (ARL) vortex type classification (Figure 2). When the air entrainment starts or the air core tip reaches the intake cross section a so-called critical state has been reached. The submergence at this stage is therefore often identified as critical (s_{cr}). In practical design of intakes the minimum water storage elevation is fixed right above this height.

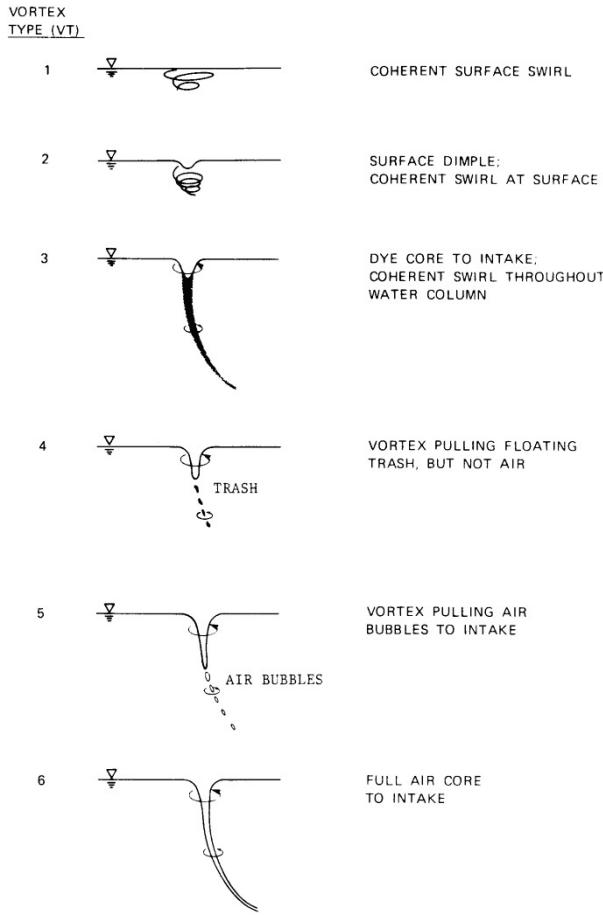


Figure 2: ARL vortex type classification (Hecker, 1987a).

To determine the point of critical submergence several empirical approaches for horizontal intakes have been developed (Gordon, 1970, Anwar et al., 1978, Knauss, 1987, Hecker, 1987b). However, the results of these approaches vary considerably due to the unique character of the investigated intake approach flow. From experience with prototype and model investigations Denny & Young (1957) conclude a general trend between the critical submergence and the intake velocity. At low intake velocities the influence of the submergence is important. However, at high intake velocities the critical submergence asymptotically approaches a constant value. Hydraulic model tests are still a common way to define the required minimum submergence. The formation of a vortex may appear at any kind of intake and is independent of its utilization, but the conse-

quences and their importance differ considerably (Wickenhäuser, 2008).

Consequences of entrained air

At hydroelectric power plants the water for energy production is typically transported in pressure tunnels and pipes. In case air is entrained into the pressure system, the flow properties change from a single phase fluid (pure water) to a two-phase flow (air-water mixture). This may have strong consequences on the operation, safety and efficiency of the whole plant. These effects can be divided into three main groups: (1) reduction in efficiency of turbines and pumps, (2) unsteady flow behavior, i.e. pulsation and pressure surges in the system with corresponding mechanical loads on the involved components, (3) stationary effects, e.g. flow reductions from stationary air bubbles, and local corrosion damage.

As to the first group direct effects of air in hydraulic machinery such as pumps and turbines are quantifiable. Minimum air entrainment rates already cause a reduction in efficiency of around 1 %. An air entrainment rate of 1.5 % leads to an efficiency reduction of up to 16 % (Denny & Young, 1957, Papillon et al., 2000). For air entrainment rates up to 4 % there is a further continuous decrease in efficiency. At air entrainment rates between 7 and 20 %, depending on the type of pump (axial pumps are more sensitive than centrifugal), a sudden drop of efficiency down to a total flow interruption may take place (Chang, 1977). Today the air entrainment rate due to vortices is not sufficiently and universally known. The efficiency reduction cannot be predicted.

As to group (2), the effects due to air bubbles and the resulting compressible air-phase vary depending on bubble size, frequency, absolute pressure and pressure difference. The pressure peaks can reach extreme values and through their periodical return may add a change of load. For example, compressed air bubbles in a pressure pipe of a power plant may expand at the transition from the hydrodynamic service head of up to several hundred meters of water column to atmospheric pressure. This process may be quite explosive. Extreme pressure changes can also cause cavitation. The pulsations may cause hydraulic machinery, parts of the plant or the whole pressure system to oscillate. As a result of fluctuations in discharge, the operating characteristics of hydraulic machines are affected, leading to uneconomic handlings and to an increased wearing of machine bearings and runners.

As to negative stationary effects of consequence group (3), flow reductions due to decreasing flow cross section after an accumulation of air as well as local corrosion damage of steel lining may occur. These consequences are more static than those of groups (1) and (2), but nevertheless unwanted.

Design practice

Vortices at intakes are a major source of air entrainment, requiring significant reserves to avoid their occurrence. Existing hydropower plants are designed and operated in such a way that no air enters the pressure system at all. This leads to a high submergence and thus to a limitation in terms of storage management and a loss of storage volume, respectively. Nevertheless, the entrainment of air cannot be prevented at every moment – especially for conditions close to operational limits, as even a conservative design constitutes an element of risk with regard to the aforementioned effects.

Two general types of measures are possible, (1) keep air away from the waterways, and (2) handle entrained air appropriately. The first measure is to avoid air entrainment by high submergence and low intake velocities or by anti-vortex devices. The secondary flow above the intake will be disturbed by this measure. The required submergence is typically a function of the pipe Froude number $F_D = v/(gD)^{0.5}$ and may be expressed by

$$\left(\frac{s}{D}\right)_{\text{cr}} = K F_D + 0.5 \quad (1)$$

where s = submergence relative to the pipe axis, D = intake diameter, v = intake velocity and g = gravitational acceleration (Figure 7). Note that $K = 1.7$ for symmetrical and $K = 2.3$ for asymmetrical approach flow according to Gordon (1970) and $K = 2.0$ according to Knauss (1987), who further specifies $\min(s/D)_{\text{cr}} = 1.5$. Denny & Young, (1957), Knauss (1983) and Rutschmann et al. (1987) give an overview of anti-vortex devices. Figure 3 illustrates anti-vortex devices at embankments.

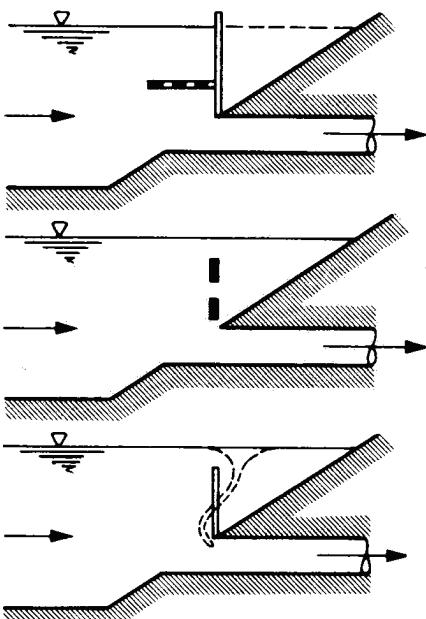


Figure 3: Schematic anti-vortex devices at embankments (Knauss, 1983)

Several publications report about special solutions after hydraulic model investigations of intake structures (Rindels & Gulliver, 1983, Rutschmann et al., 1987, Möller et al., 2010, Amiri et al., 2011).

The second type of measures allows air entrainment and determines the consequences by using a different design approach. The need for power and flexible availability of regulating energy has increased. The rated capacity of both new and existing plants is raised more and more often. By increasing the discharge the air entrainment rate also increases. A controlled air entrainment through intake vortices must be taken into account under certain circumstances. To ensure safe operation and to optimize the efficiency of new and refurbished hydropower plants knowledge of the vortex-induced air entrainment rate is a prerequisite. Once this rate is known, then vortices can be classified as critical ones that must be prevented, or as uncritical ones that may be permitted.

The effects on the plant vary may vary from negligible to uncontrollable. In the simplest case the entrained air passes the pressure conduit and de-aerates at the surge chamber. Air can also concentrate at the tunnel roof and propagate against the flow direction. Its expansion at normal pressure can cause an explosion. The influence of air entering the hydraulic machines is described above.

In many cases a de-aeration device is a simple but effective solution. Wickenhäuser (2008) presents several de-aeration systems by structural means as e.g. a chamber with an attached riser pipe at the top of the conduit to convey the collected air from the tunnel to the atmosphere. The dimensions of the de-aeration device are a function of discharge, conduit diameter and the inflowing amount of air (air entrainment rate β). Wickenhäuser (2008) gives examples how to de-aerate the full air phase from the pressure tunnel or pipe. However, knowledge about the quantity of entrained air is required for an appropriate design.

The existing design criterion to fully avoid air entrainment can therefore be replaced by a flexible assessment strategy. Knowing the air entrainment rate and quantifying the resulting potential damages finally allows the design of counter-measures such as de-aeration systems, thereby improving the efficiency of a hydroelectric power plant, especially with regard to storage management. ‘Classical’ measures of type (1) can also be used: For instance, the design of an anti-vortex device could be a good solution to retain the efficiency and flexibility, but this device may need to be large and thus quite expensive. A de-aeration device is an interesting alternative and is worth an economical consideration regarding the design of intakes.

Vortex-air entrainment rate

Vortices at intakes are a major source of air entrainment. Their air entrainment rate, especially any correlation to a flow pattern, is unknown today. The relative air entrainment rate

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} \quad (2)$$

expresses the relationship between the volumetric air discharge Q_a and the volumetric water discharge Q_w . Sometimes the air concentration $C = Q_a/(Q_a+Q_w) = \beta/(\beta+1)$ is used instead of β . For small amounts of air Q_a the values of β and C are nearly the same. Up to $\beta = C/(1-C) = 1\%$ the difference between β and C is less than 1 %. The use of the reference pressure of the compressible air phase is more important and has to be specified.

First approaches on the relative air entrainment rate β at pump sumps are presented by Iversen (1953). Figure 4 shows the air entrainment rate β (denoted "Air to water ratio" here) on the ordinate as a function of relative intake submergence Z/D , and of the relative side wall and bottom distances X/D and Y/D , respectively, where D = intake diameter, X = side wall distance, Y = bottom clearance and Z = submergence. The measurement of air entrainment was performed with a specially developed so-called "air separator". The pipe is interrupted by a closed cylindrical tank in which the air separates from the water and accumulates at the top section.

According to Denny & Young (1957) the air entrainment rate of pump sumps is typically $\beta = 5\%$ and may reach $\beta = 10\%$ in extreme cases. Investigations of Hattersley (1965) show air entrainment rates between $\beta = 0.06$ and 0.73% , thus one to two magnitudes smaller than reported by Denny & Young (1957).

For horizontal axis intakes Padmanabhan (1984) gives maximum values of air concentration rates versus the submergence Froude number $F_s = v/(gs)^{0.5}$, with v = average velocity at the characteristic intake cross-section, s = intake submergence relative to the center of the pipe axis and g = gravitational acceleration (Figure 7). Figure 5 shows the data measured on a model with two horizontal intake pipes and a basin representing a pump sump. With $C_{\max} = 0.15$, the maximum relative air entrainment rate amounts to $\beta = C/(1-C) = 18\%$. The data scatter is considerable, hindering a trend analysis. The air entrainment was not correlated with the flow parameters. The author provides only an envelope line of the maximum air entrainment rate. A systematic evaluation and continuation of attempts to measure the air entrainment rate was not conducted till today (Padmanabhan, 2008).

In Table 1 all air entrainment rates found in the literature review are listed. The rates of the different investigations vary widely over several orders of magnitude.

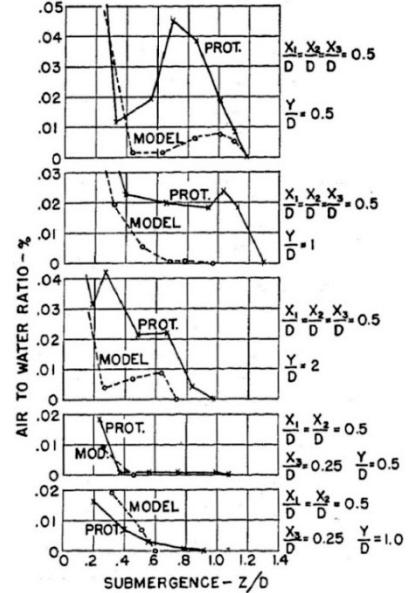


Figure 4: Relative air entrainment rate β ("Air to water ratio") for model and prototype as a function of the relative intake submergence Z/D for various relative wall and bottom distances X/D and Y/D , respectively (Iversen, 1953).

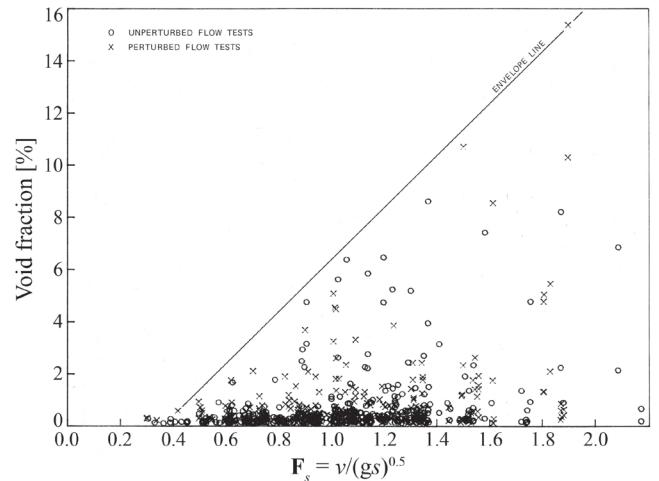


Figure 5: Air concentration $C = \beta/(\beta+1)$ ("Void fraction") vs. submergence Froude number $F_s = v/(gs)^{0.5}$, the "envelope line" gives the maximum air entrainment rate as a function of F_s (Padmanabhan, 1984).

Table 1: Results of investigations of air entrainment rate β .

Publication	Air entrainment rate β	Correlation $\beta = f(\dots)$
Iversen (1953)	1 - 5 %,	n/a
Denny & Young (1957)	extreme > 10 %	n/a
Hattersley (1965)	0.06 - 0.73 %	n/a
Padmanabhan (1984)	max. 18 %	$\sim F_s^1$

¹ The values of submergence Froude number were printed versus the void fraction. A correlation does not exist.

Intake vortex research at VAW

As given above, the significance of the air entrainment rate as an important design criterion is increasing. To close the lack of knowledge regarding air entrainment rates a large-scale physical model consisting of a 50 m³ laboratory steel tank (Figure 6) has been built at VAW. Two pumps provide a maximum discharge of 500 l/s in a closed loop. The pipe

and the submergence Froude numbers $F_D = v/(gD)^{0.5}$ and $F_s = v/(gs)^{0.5}$ can be varied from 0 up to 2 and 2.8, respectively, for an usual intake diameter of $D = 0.4$ m. The relative submergence s/D (note that Iversen uses Z/D) varies from 0 to 4. Froude similarity was chosen due to the free surface flow. In this case the influence of viscosity and surface tension cannot be considered adequately.

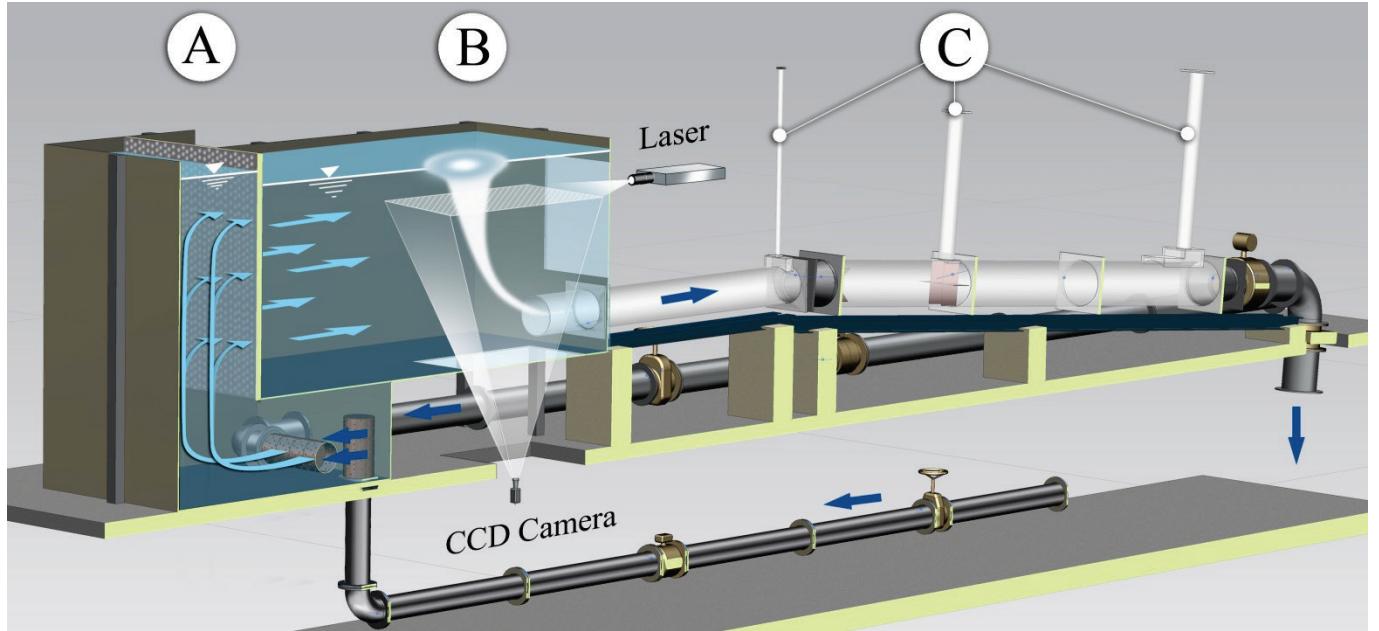


Figure 6: Cross section through the experimental setup at VAW: (A) intake basin and filter fleece to homogenize the flow, (B) tank with 2D Particle Image Velocimetry (PIV), (C) de-aeration devices at the pressure system by means of three rising pipes.

Through the compliance of empirical limits their influence should be negligible to avoid scale effects. The model exceeds several times the generally accepted limits regarding similitude criteria of intake vortex investigations: Viscous effects are small for intake Reynolds numbers $R_D > 2.4 \times 10^4$ according to Daggett & Keulegan (1974), with $R_D = vD/v$ and v = kinematic viscosity. Regarding the intake Weber number $W_D = v(\rho D/\sigma)^{0.5}$, the limit value specified by Raju & Garde (1987) is $W_D > 11$ in order to avoid decisive effects of surface tension in the model vortex formation. The vortex formation at the intake is not enforced by a certain installation. Thus, the unsteady nature of the hydraulic phenomena is seen to be undisturbed.

The horizontal velocity field around the vortex is measured by means of 2D Particle Image Velocimetry (PIV) on a total area of up to 1 m². Figure 7 shows an experimental run. The measured horizontal velocity field around the vortex, whose rotation affects a wide area, confirms the applicability of the analytic solution of the 2D Navier-Stokes equation for the potential vortex. The air entrainment judged from visual observation of the white water is higher than the actually measured maximum concentration of up to 1 %. The device for quantifying the air entrainment is currently being optimized to increase the measurement accuracy.

cy at low air entrainment rates. A forthcoming challenge is a complete de-aeration of the entrained air, which is a prerequisite to measure large air entrainment rates. The water level in the rising pipes (Figure 6, C) equals the piezometric head at atmospheric ambient pressure at the beginning of each run. If the pipes are closed on top, the pressure increases above atmospheric pressure with each accumulated bubble rising through the pipe. This results in a water level drop.

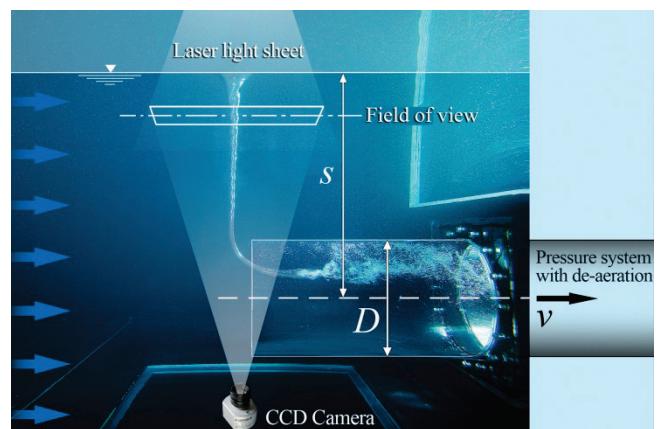


Figure 7: Experimental run in the physical VAW model with air-entraining vortex. A de-aeration device allows to

quantify the vortex-entrained air. A 2D PIV is used to measure the velocity field around the vortex.

Using the ideal gas law the mass of the collected air can be calculated. At a given pressure the volume and thus the air discharge Q_a over the measurement time can be determined. The aim of this project is to enhance the understanding of vortex-induced air entrainment and thus to improve the practical design of intake structures at hydropower plants.

Conclusions

Nowadays, vortex-induced air entrainment at hydroelectric power plant intakes is typically prevented by applying empirical approaches to compute the required submergence. Often, the relatively large submergence results in a loss of flexibility, of storage volume and of efficiency of the plant. However, with many storage plants being newly built or upgraded in the course of increasing regulating energy demand, the knowledge of air entrainment rate becomes more and more important. No useful information on this parameter has been found in the present literature review. For this reason the air entrainment is experimentally investigated at VAW using a large-scale hydraulic model. The results can be analysed towards practical approaches to design and operate intakes of hydroelectric power plants with respect to an acceptable, damage-free air entrainment rate.

Acknowledgements

The authors would like to thank swisselectric research and the *Swiss Federal Office of Energy* (SFOE) for their financial support and *Pöyry Energy AG Zurich* for their technical input.

References

- Amiri, S. M., Zarrati, A. R., Roshan, R. & Sarkardeh, H. (2011). Surface vortex prevention at power intakes by horizontal plates. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, volume 164(4), pp. 193-200.
- Anwar, H. O., Weller, J. A. & Amphlett, M. B. (1978). Similarity of free-vortex at horizontal intake. *Journal of Hydraulic Research*, volume 16(2), pp. 95-105.
- Ball, E. B. (1933). Free Vortices. *The Engineer*, volume 155(June 30), pp. 654-654.
- Binnie, A. M. (1964). Some Experiments on bath-tub vortex. *Journal of Mechanical Engineering Science*, volume 6(3), pp. 256-257.
- Chang, E. (1977). Review of literature on the formation and modeling of vortices in rectangular pump sumps. *BHRA Report TN1414*. Cranfield, UK.
- Daggett, L. L. & Keulegan, G. H. (1974). Similitude in free-surface vortex formations. *Journal of the Hydraulics Division*, volume 100(HY11), pp. 1565-1581.
- Denny, D. F. (1956). An experimental study of air-entraining vortices in pump sumps. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers*, volume 170, pp. 106-125.
- Denny, D. F. & Young, G. A. J. (1957). The prevention of vortices and swirl at intakes. *IAHR Seventh General Meeting*, Lisbon, pp. Paper C1.
- Hattersley, R. T. (1965). Hydraulic design of pump intakes. *Journal of the Hydraulics Division*, volume 91(2), pp. 223-249.
- Hecker, G. E. (1987a). Fundamentals of vortex intake flow. *Swirling flow problems at intakes. IAHR Hydraulic Structures Design Manual 1*, J. Knauss, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 13-38.
- Hecker, G. E. (1987b). Conclusions. *Swirling flow problems at intakes. IAHR Hydraulic Structures Design Manual 1*, J. Knauss, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 139-155.
- Gordon, J. L. (1970). Vortices at intakes. *Water Power*, volume 22(4), pp. 137-138.
- Iversen, H. W. (1953). Studies of submergence requirements of high-specific-speed pumps. *Transactions of the ASME*, volume 75(4), pp. 635-641.
- Knauss, J. (1983). *Wirbelbildung an Einlaufbauwerken (Luft- und Dralleintrag)*. DVWK Schriften. Bonn, Germany, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK). Heft 63 [in German].
- Knauss, J. (1987). Prediction of critical submergence. *Swirling flow problems at intakes. IAHR Hydraulic Structures Design Manual 1*, J. Knauss, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Lugt, H. J. (1983). Vortex flow in nature and technology. *A Wiley-Interscience Publication*, New York, USA.
- Möller, G., Pinotti, M. & Boes, R. (2010). Einlaufwirbeluntersuchung am Kraftwerk Handeck 2 – Kritische Überdeckungshöhe und Wirbelunterdrückungsmassnahmen. *Proc. Internationales Symposium Wallgau*, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München. Bericht 124, pp. 407-416 [in German].
- Padmanabhan, M. (1984). Air ingestion due to free-surface vortices. *Journal of Hydraulic Engineering*, volume 110(12), pp. 1855-1859.
- Padmanabhan, M. (2008). Personal communication.
- Papillon, B., Kirejczyk, J. & Sabourin, M. (2000). Atmospheric air admission in hydroturbines. *Proc. Hydro Vision*, Charlotte, North Carolina, USA.
- Raju, K. G. R. & Garde, R. J. (1987). Modelling of vortices and swirling flows. *Swirling flow problems at intakes, IAHR Hydraulic Structures Design Manual 1*. J. Knauss, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 77-90.
- Rindels, A. & Gulliver, J. S. (1983). *An experimental study of critical submergence to avoid free-surface vortices at vertical intakes*. Project report no. 224, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Minneapolis.
- Rutschmann, P., Volkart, P. & Vischer, D. (1987). Design recommendations - Intake structures. *Swirling flow problems at intakes. IAHR Hydraulic Structures Design Manual 1*. J. Knauss, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 91-100.
- Shapiro, A. H. (1962). "Bath-tub vortex." *Nature*, volume 196(4859), pp. 1080-1081.
- Trefethen, L. M., Bilger, R. W., Fink, P. T., Luxton, R. E. & Tanner, R. I. (1965). Bath tub vortex in Southern Hemisphere. *Nature*, volume 207(5001), pp. 1084-1085.
- Wickenhäuser, M. (2008). *Zweiphasenströmung in Entlüftungssystemen von Druckstollen*. Mitteilung 205, H.-E. Minor, ed., Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich [in German].

Wasserkraft: Höhere Effizienz unter veränderten Bedingungen

Die Wasserkraft ist die wichtigste Stütze der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft, und ihre Bedeutung dürfte in den kommenden Jahrzehnten weiter zunehmen. Obwohl die Wasserkraft eine ausgereifte Technologie ist, stellt sie nach wie vor ein spannendes Forschungsgebiet dar. Auch an der ETH Zürich werden im Hinblick auf die künftige Stromproduktion eine breite Palette an Themen bearbeitet.

Konkret untersuchen die Wissenschaftler an der ETH Zürich mit Hilfe von Modellversuchen und numerischen Simulationen, wie sich veränderte Rahmenbedingungen auf die Stromproduktion auswirken werden und wie sich der Betrieb der Anlagen technisch weiter optimieren lässt.

Von Felix Würsten

Mehr als die Hälfte der gesamten Stromproduktion wird in der Schweiz durch die Wasserkraft erbracht. Es ist davon auszugehen, dass die Bedeutung der Wasserkraft in den kommenden Jahrzehnten weiter zunehmen wird. Zwar ist das Potenzial an Flüssen und Bächen, die sich zur Stromproduktion eignen, heute schon weitgehend ausgeschöpft. Doch insbesondere die Pumpspeicherkraftwerke werden im künftigen Energiesystem eine zentrale Funktion übernehmen, ermöglichen sie doch, die schwankende Produktion von Solar- und Windkraftanlagen auszugleichen und damit die Netzstabilität sicherzustellen.

Veränderte Produktionsbedingungen

Obwohl die Wasserkraft eine ausgereifte Technologie ist, stellt sie nach wie vor ein ergiebiges Forschungsgebiet dar, erklärt Robert Boes, Direktor der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) an der ETH Zürich. So fragt sich beispielsweise die Elektrizitätswirtschaft, wie sich die Klimaveränderung auf die Stromproduktion auswirken wird, insbesondere dort, wo ein grosser Teil des Einzugsgebietes von Gletschern bedeckt ist. Neuere Berechnungen der ETH Zürich zeigen, dass auch künftig genügend Wasser für die Stromproduktion vorhanden sein wird, dass die veränderten Verhältnisse – weniger Niederschläge im Sommer, mehr Niederschläge im Winter und ein früheres Erreichen des jährlichen Abflussmaximums – jedoch Anpassungen beim Betrieb nötig machen werden.

Auch strengere Anforderungen beim Gewässerschutz erfordern von den Kraftwerksbetreibern neue Antworten. So hat man in den letzten Jahren beispielsweise bei vielen Kraftwerken Fischaufstiegsanlagen gebaut, die den Fischen das Wandern flussaufwärts ermöglichen. Noch nicht gelöst ist jedoch die Frage, wie man den Fischen das Wandern flussabwärts erleichtern könnte, folgen die Tiere doch in der Regel der Hauptströmung, welche eben nicht entlang der Fischaufstiege

fliest, sondern durch die Turbinen. In einem interdisziplinären Projekt, das biologische und wasserbauliche Aspekte gleichsam berücksichtigt, sollen nun mögliche Lösungsansätze aufgezeigt werden.

Obwohl Wasserkraftanlagen heute in der Regel sehr hohe Wirkungsgrade aufweisen, versuchen die Betreiber, den Betrieb weiter zu optimieren. «Angesichts der grossen Mengen an Strom wirken sich bereits kleine Leistungssteigerungen auf die wirtschaftliche Bilanz aus», hält Boes fest. Ein wichtiges Phänomen, das an der VAW zurzeit untersucht wird, ist der Einzug von Luft. Enthält das Wasser in den Druckleitungen Luft, kann dies bei der Turbinierung des Wassers zu ernsthaften Problemen führen – von der deutlichen Minderung des Turbinen-Wirkungsgrads bis hin zur Beschädigung von Stollen und Leitungen. Bereits seit längerem weiß man, dass etwa beim Wassereinzug in den Stauseen Wirbel entstehen können, durch die Luft in das Wasser gelangt. Auch neue Konzepte für Pumpspeicherkraftwerke, bei denen die Pumpen und die Turbinen gleichzeitig in Betrieb sind, stellen für die Ingenieure eine Herausforderung dar, muss doch auch hier der Einzug von Luft in die Pumpen möglichst unterbunden werden.

Modell und Simulation kombinieren

Phänomene wie den Lufteinzug untersuchen die Wissenschaftler an der VAW unter anderem mit Hilfe von physikalischen Modellen in der grossen Versuchshalle. «Eine Zeitlang glaubte man, numerische Computermodelle könnten dereinst die physikalischen Experimente überflüssig machen», erläutert Boes. «Doch die konkrete Erfahrung zeigt, dass es beides braucht: die Computersimulation und das Laborexperiment.» Dass die realen Modelle nach wie vor wichtig sind, hat zwei Gründe: Die Abbildung der Realität im Computermodell stösst zum einen an gewisse Grenzen, vor allem bei hochkomplexen Strömungen wie Wasser-Luft- und Wasser-Sediment-Gemischen. «Zum anderen hat auch die Messtechnik grosse

Fortschritte gemacht, so dass wir heute gewisse Phänomene viel genauer studieren können als früher», meint Boes.

Die Fortschritte bei der Messtechnik kommen nicht nur im Labor zum Tragen, sondern auch bei Feldversuchen. So werden VAW-Forscher demnächst im Oberwallis eine neuartige Anlage installieren, die eine kontinuierliche Messung der Feinpartikel im Wasser ermöglicht. Gerade diese Feinpartikel stellen für die Kraftwerksbetreiber ein ernsthaftes Problem dar, tragen sie doch zur schnelleren Abnützung der Turbinenräder bei. Wie bei vielen anderen VAW-Projekten geht es auch hier um eine sehr konkrete Fragestellung. «Viele unserer Forschungsprojekte sind anwendungsorientiert», bestätigt Boes. «Doch gerade

aus solchen Projekten ergeben sich immer wieder spannende Fragen für die Grundlagenforschung.»



Allalin- und Schwarberggletscher mit Mattmark-Reservoir (photo G. Kappenberger, 2007)

Einfluss der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung vergletscheter Einzugsgebiete

Daniel Farinotti, Andreas Bauder und Martin Funk
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, CH-8092 Zürich
E-mail: farinotti@vaw.baug.ethz.ch

Die Wasserkraftbranche schaut in den Alpen besonders besorgt auf die Folgen des Klimawandels. Die Tatsache, dass viele hydroelektrisch genutzte Einzugsgebiete teilweise vergletschert sind und der Gletscherrückzug eine der eindrücklichsten Erscheinungen des Klimawandels ist, tragen zu dieser Besorgnis bei. Im Rahmen verschiedener Studien wurde an der VAW bis anhin bei einem Dutzend alpiner Einzugsgebiete untersucht, mit welchen hydro-glaziologischen Änderungen in den nächsten hundert Jahren gerechnet werden muss.

Die Resultate zeigen, dass die zu erwartenden Entwicklungen stark gebietsabhängig sind. Eine entscheidende Rolle spielt das heute vorhandene Eisvolumen und dessen Verteilung. Als Faustregel gilt: In Gebieten, die heute zu mehr als einem Drittel vergletschert sind, zeigt die künftige Entwicklung der Jahresabflüsse ein charakteristisches, zweiphasiges Muster. In einer ersten Phase nehmen die Abflussmengen aufgrund der erhöhten Gletscherschmelze zu; in einer zweiten Phase muss mit rückläufigen Abflussmengen aufgrund abnehmender Gletscherflächen gerechnet werden. In allen unter-

suchten Gebieten findet der Übergang zwischen den beiden Phasen vor 2050 statt, wobei der genaue Zeitpunkt wiederum mit dem heutigen Eisvolumen zusammenhängt.

Aus Sicht der Wasserkraftnutzung sind nicht nur die Jahresabflussmengen relevant. Die Verteilung der Abflüsse über das Jahr ist ebenfalls von Bedeutung. Klimaszenarien lassen zwar gleichbleibende Jahresniederschlagsmengen erwarten, sagen aber eine andere Jahresverteilung voraus. Im Mittel muss in den Schweizer Alpen in den Monaten Juli und August mit einer Verringerung des Niederschlags um 20 Prozent gerechnet werden, in den Wintermonaten hingegen wird eine Zunahme von ca. 10 Prozent erwartet. Diese Niederschlagsänderung, die im Jahresverlauf nicht homogen verteilt Temperaturanstieg (vor allem in den Sommer- und Wintermonaten) und die erwartete Entwicklung der Gletschermassen werden in Zukunft zu veränderten Abflussjahresgängen führen. Der maximale Abfluss wird früher im Jahr erreicht, die Sommerabflüsse gehen markant zurück, und in den Übergangsjahreszeiten nehmen die Abflüsse zu.

Will man diese Erkenntnisse in Bezug auf die Wasserkraftnutzung zusammenfassen, könnte das Fazit lauten: Auch in Zukunft wird es für die Wasserkraft genügend Wasser geben. Allerdings wird sich das Wasserangebot anders über das Jahr verteilen, was betriebliche Massnahmen erfordern wird. Die genaue Entwicklung der beschriebenen Veränderungen ist allerdings stark gebietsabhängig.

» www.vaw.ethz.ch/divisions/gz/projects_DE

Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken

Robert Kriewitz und Robert Boes

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, CH-8092 Zürich

E-mail: kriewitz@vaw.baug.ethz.ch

Mit einem Anteil von rund 56 Prozent an der Stromproduktion übernimmt die Wasserkraft in der Schweiz die bedeutendste Rolle bei der Versorgung des Landes mit elektrischer Energie. Die Wasserkraft ist erneuerbar und lässt sich sowohl zur Regulierung der Netze und Bereitstellung von Spitzenstrom durch Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke als auch zur Herstellung von kontinuierlicher Bandenergie durch Flusskraftwerke einsetzen. Die Wasserkraft wird deshalb auch in Zukunft zusammen mit weiteren erneuerbaren Energien wie Sonne und Wind eine zentrale Stellung in der schweizerischen Elektrizitätsversorgung einnehmen. Gleichzeitig muss sie sich aber auch neuen Herausforderungen stellen, die sich durch die Weiterentwicklung des Gewässerschutzes ergeben.

Das revidierte Gewässerschutzgesetz, das im Januar 2011 inkraftgetreten ist, schreibt vor, dass die wesentlichen Beeinträchtigungen der Gewässer, die durch den Menschen verursacht wurden, innerhalb 20 Jahren zu beseitigen sind. Dies stellt eine grosse Aufgabe für die Energiewirtschaft und die Kantone dar.

Ein wichtiger Teilespekt der Gewässersanierung betrifft die Wiederherstellung von Gewässerha-

bitaten, deren Durchgängigkeit unterbrochen wurde. So können Flusskraftwerke beispielsweise die Wanderungen von Fischen behindern. Insbesondere der Fischabstieg, der für die Arterhaltung einiger mitteleuropäischer Fischarten wichtig ist, wird durch den aktuellen Ausbaustandard der Anlagen beeinträchtigt.

Die VAW führt in diesem Zusammenhang mit dem Verband Aare-Rheinwerke (VAR), der Eawag, swiselectric research und dem Bundesamt für Energie (BfE) ein Forschungsprojekt durch, das innovative bauliche Massnahmen entwickeln soll, mit denen die schadlose Abwärtswanderung von Fischen in Fließgewässern sichergestellt werden soll, die durch grössere Flusskraftwerke genutzt werden. Das Projekt leistet damit einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen wirtschaftlichen Nutzung der Wasserkraft.

Das Problem des Fischabstiegs kann nicht einseitig durch biologische oder bautechnische Ansätze angegangen werden, denn die Beeinträchtigung hängt zum einen von der spezifischen Fischfauna ab, zum anderen aber auch von den jeweiligen hydrologischen, hydraulischen und morphologischen Besonderheiten in der Nähe der Kraftwerke. Das Forschungsprojekt verfolgt deshalb einen transdisziplinären Ansatz, an dem sich Fachleute aus der Wasserwirtschaft, dem Wasserbau und der Fischökologie beteiligen. Die Zusammenarbeit ermöglicht einen breiten Einsatz von Untersuchungsmethoden: hydraulische Modellversuche an der VAW (s. Abb. 1), Versuche mit einem Prototypen sowie die Überwachung vor Ort durch ein aktives Fischmonitoring.

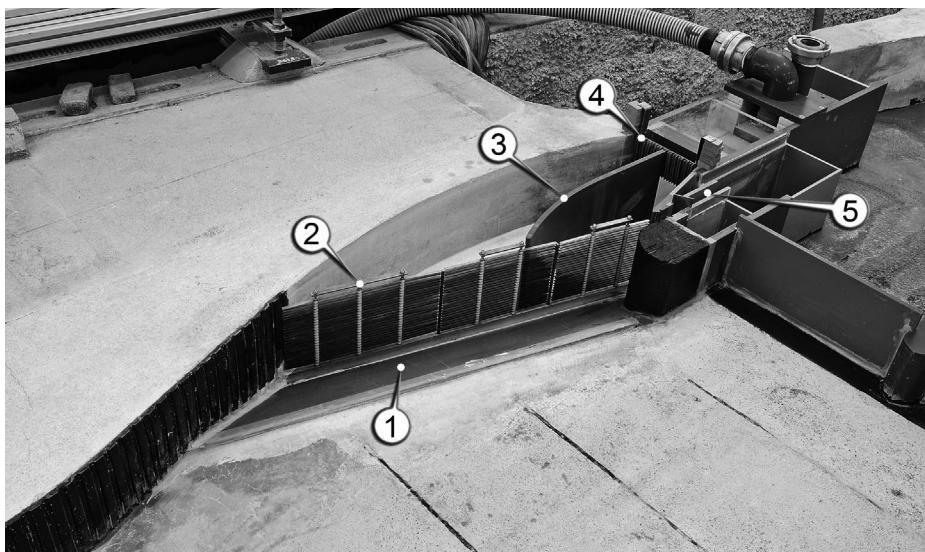


Abb.1: Physikalisches Modell eines (1) Kraftwerkseinlaufs an der VAW mit (2) Fischleiterchen, (3) Leitwand, (4) Tauchwand und (5) Bypass zur Realisierung eines schonenden und gleichzeitig wirtschaftlichen Fischabstiegs

Hongrin-Léman – Hydraulische Modellversuche zum Pumpspeichersystem Veytaux 2

Robert Kriewitz, Jilles Lucas, Adriano Lais und Robert Boes

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, CH-8092 Zürich

E-mail: kriewitz@vaw.baug.ethz.ch

Pumpspeicherwasserkraftwerke können nicht nur zur Stromproduktion eingesetzt werden, sondern auch zur Netzregulierung. Durch das Hochpumpen von Wasser aus einem unteren Speichersee in einen höher liegenden kann Strom in Form von potentieller Energie gespeichert werden (Stromabnahme aus dem Netz). Dieser wird in Zeiten erhöhter Nachfrage durch Turbinieren des Wassers wiedergewonnen (Stromeinspeisung ins Netz). Diese Art der Energiespeicherung erlangt im Zusammenhang mit der vermehrten Nutzung von Solar- und Windenergie zusehends an Bedeutung, da bei diesen Energieformen die Produktion nicht steuerbar ist.

Das Pumpspeicherwerk Hongrin-Léman im Kanton Waadt nutzt den Stausee Lac de l'Hongrin als oberen und den Genfersee als unteren Speicher. Um die Leistung zu erhöhen, beschloss die Betreiberin des Kraftwerks Les Forces Motrices Hongrin-Léman SA den Bau einer zweiten Kraftwerkszentrale. Die zwei Maschinenblöcke der neuen Zentrale Veytaux 2 werden mit 240 MW die Leistung der gesamten Anlage verdoppeln.

Das neue Kraftwerk soll im so genannten hydraulischen Kurzschluss betrieben werden, d.h. die Turbinen und die Pumpen sind gleichzeitig in Be-

trieb. Dadurch kann die Stromabnahme aus dem Netz gesteuert werden, da Pumpen im Gegensatz zu Turbinen viel weniger leicht regelbar sind. Der hydraulische Kurzschluss stellt jedoch besondere Anforderungen an die Anlagen, die nun in einem hydraulischen Modell an der VAW genauer untersucht werden:

- **Lufteintrag:** Bei dem verwendeten Turbinentyp (Peltonturbinen) taucht das Laufrad nicht in das Unterwasser ein. Der Wasserstrahl trifft auf die Turbine und wird dort abgelenkt. Beim Aufprall der Wassertropfen auf das Wasserpolster unterhalb des Laufrades wird Luft in das Unterwasser eingetragen.
- **Lufttransport:** Die eingetragenen Luftblasen werden im Unterwasser mittransportiert und entgasen langsam an die freie Wasseroberfläche.
- **Luftaustrag:** Bei gleichzeitigem Turbinen- und Pumpbetrieb wird das Wasser nach dem Turbinieren direkt den Pumpen zugeführt. Um einen optimalen Wirkungsgrad der Turbinen zu gewährleisten, muss der komplette Austrag der Luftblasen bis zu den Pumpen hin sichergestellt sein.

Mit der Untersuchung an der VAW werden der Lufteintrag an der Turbine simuliert, die Entgasungslänge im Unterwasserkanal bestimmt und allenfalls Optimierungsmassnahmen entwickelt und auf ihre Wirksamkeit hin überprüft.

Das hydraulische Modell an der VAW (Abb. 1) wird im Massstab 1:8.78 aus PVC und Acrylglass nachgebaut und umfasst die beiden Turbinengehäuse, die Unterwasserkanäle und das Pumpensystem. Die Inbetriebnahme des Modells erfolgt im Oktober 2011.

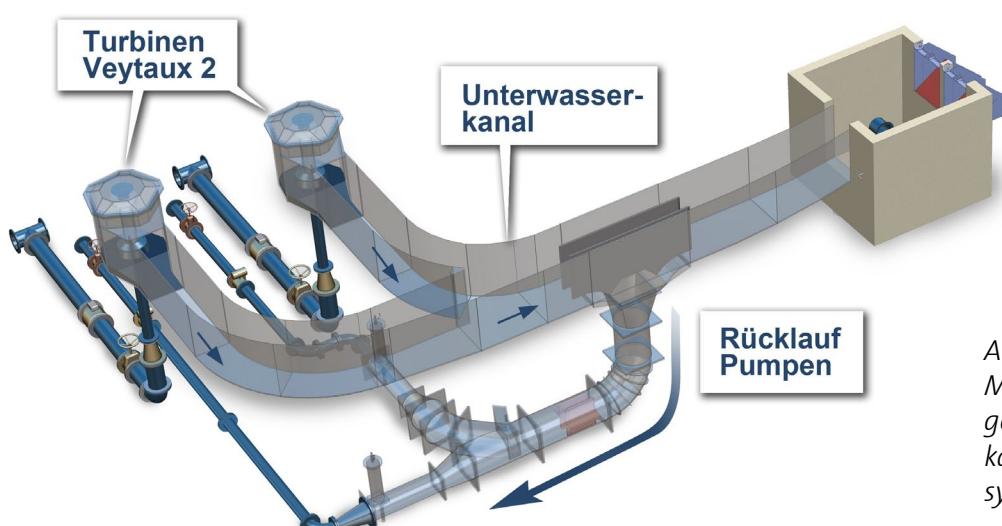


Abb. 1: Physikalisches Modell der Turbinengehäuse, Unterwasserkanäle und des Pumpensystems

Turbinenabrasion durch Feinsedimente im Triebwasser

David Felix und Robert Boes

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, CH-8092 Zürich
E-mail: felix@vaw.baug.ethz.ch

In natürlichen Fließgewässern werden Laub, Treibholz, Kies, Sand und feine Gesteinspartikel mittransportiert (Abb. 1). Der Umgang mit solchen Feststoffen ist eine Herausforderung für Wasserbauingenieure und Betreiber von Wasserkraftanlagen.

In den Alpen sind die Wasserkraftanlagen in der Regel mit Rechen, Entkieser- und Entsandungsanlagen ausgerüstet. Bei Wasserkraftwerken, die Wasser aus vergletscherten Einzugsgebieten (sog. Gletschermilch) nutzen und keinen Speichersee aufweisen, kann im Triebwasser eine beträchtliche Konzentration von mineralischen Schwebstoffen vorhanden sein, durch welche die Turbinen abgenutzt werden. Bei einer Fallhöhe von beispielsweise 500 Meter schiesst der Wasserstrahl in einer Pelonturbine mit ca. 360 km/h aus der Düse in Richtung des Laufrads. Insbesondere durch die harten Gesteinspartikel werden die Turbinenbauteile «abgeschliffen». Man spricht dabei von Hydroabrasivverschleiss (Abb. 2).

Durch erhöhtes Sedimentaufkommen infolge des Klimawandels, durch die angestrebte Effizienzsteigerung in der Energieversorgung und ange-



Abb. 1 Wysswasser (links im Bild) bei der Einmündung in den Rotten als Beispiel eines stark geschiebe- und schwebstoffführenden Bergflusses aus einem vergletscherten Einzugsgebiet in den Schweizer Alpen, August 2010 (Bild: VAW).

sichts der Anforderungen an einen nachhaltigen und insbesondere wirtschaftlichen Betrieb von Wasserkraftanlagen gewinnt das Thema an Bedeutung. Die VAW hat deshalb ein Forschungsprojekt initiiert, das von swisselectric research sowie dem Bundesamt für Energie (BfE) gefördert wird.

Bei der Untersuchung des Hydroabrasivverschleisses ist die hohe Variabilität des Schwebstoffaufkommens im Triebwasser über das Jahr eine Herausforderung, die eine fortlaufende Erfassung der Schwebstoffkonzentration und der Partikelgrößenverteilung erfordert. Bisher wurden die Partikelgrößen in der Regel nur mit einzelnen Schöpfproben, die im Labor ausgewertet wurden, bestimmt. Als Neuerung soll nun an einem Wasserkraftwerk im Oberwallis ein so genanntes in-situ Laserdiffraktometer zum Einsatz kommen, mit dem die Konzentration und die Korngrößenverteilung der Schwebstoffe kontinuierlich und in Echtzeit erfasst werden.

Durch die Untersuchung der Schwebstoffführung des Triebwassers sowie mit periodischen Inspektionen der Turbinen und einer Überwachung des Wirkungsgrads soll der Prozess des Hydroabrasivverschleisses besser verstanden und modelliert werden können. Dies dient der weiteren Optimierung der Anlagenkonzeption, der Anlagenbestandteile, der messtechnischen Ausrüstung und des Betriebs von Wasserkraftanlagen weltweit.

» www.vaw.ethz.ch/people/as/felixda/projects/data/pelton_wear



Abb. 2 Beispiel eines Pelton-Laufrads, das durch feine Gesteinspartikel im Triebwasser stark abgenutzt wurde. Es sind die Verbreiterung der Mittelschneide und Abrasion in den Bechern zu erkennen (Bild: TIWAG).

Lufteintragsrate in Drucksysteme von Wasserkraftanlagen infolge Einlaufwirbel

Georg Möller, Martin Detert und Robert Boes

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie

und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, CH-8092

Zürich

E-mail: moeller@vaw.baug.ethz.ch

Luft in Drucksystemen von Wasserkraftanlagen führt zu unerwünschten Nebenwirkungen: Der Wirkungsgrad wird vermindert, es kommt zu Druckstößen und Pulsationen, und der Durchfluss wird reduziert. Eine wichtige Quelle für den Lufteintrag sind Einlaufwirbel. Bis heute fehlt jedoch ein fundiertes Wissen, wie die Luft in das Drucksystem gelangt. Dadurch fehlen auch Möglichkeiten zur Quantifizierung. Damit das Phänomen vermieden werden kann, müssen daher bei der Planung und beim Betrieb entsprechend grosse Reserven eingehalten werden. Mit einer detaillierten Prognose der Lufteintragsrate und der Quantifizierung des damit verbundenen Schadenspotentials kann jedoch eine Wasserkraftanlage wirtschaftlicher betrieben werden, insbesondere im Hinblick auf die Nutzung als Speicherkraftwerk.

Im Labor der VAW werden grossmassstäbliche physikalische Modellversuche an einem Tank mit einem Volumen von 50 m³ durchgeführt (vgl. Abb. 1). Hierzu werden 80 m³ Wasser mit Hilfe zweier Pumpen mit einem Maximaldurchfluss von 500 l/s im Kreislauf bewegt. Die Wirbelbildung am Einlauf wird

nicht erzwungen, sondern erfolgt frei, um den instationär-labilen Charakter dieses hydraulischen Phänomens zu berücksichtigen. Bei der Untersuchung der lufteinziehenden Wirbel werden die heute bekannten Grenzwerte bzgl. Modellähnlichkeit von Einlaufwirbeluntersuchungen um ein Mehrfaches eingehalten. Die Vermessung des horizontalen Geschwindigkeitsfeldes um den Wirbel erfolgt mittels eines 2D-Particle Image Velocimetry (PIV) auf einer Gesamtfläche von bis zu 1 m². Die ermittelten horizontalen Geschwindigkeitsfelder um den Wirbel, dessen Rotation sich grossräumig auswirkt, bestätigen die Anwendbarkeit der analytischen Lösung der 2D-Navier-Stokes-Gleichung für Potentialwirbel. Die erhaltene Lufteintragsrate ist jedoch wesentlich grösser als erwartet. Die Einrichtung zur Quantifizierung des Lufteintrags wird zurzeit optimiert, um die Messgenauigkeit bei kleinen Lufteintragsraten zu erhöhen. Die vollständige Entlüftung und damit die Voraussetzung zur Vermessung bei grossen Lufteintragsraten stellt eine messtechnische Herausforderung dar.

Ziel des Projektes ist es, mit den im Modell erfassten Messdaten die Lücke im Grundlagenwissen zum wirbelinduzierten Lufteintrag zu schliessen und damit die praktische Bemessung von Einlaufbauwerken an Wasserkraftanlagen zu verbessern. Der Abschluss des Forschungsprojektes ist für Ende 2012 vorgesehen.

» www.vaw.ethz.ch/people/wb/moellege/projects/data/wb_Vortex_air_entrainment_dissertation



Abb. 1: Physikalisches Modell mit Tank (schwarz) und horizontalem Auslaufrohr (Plexiglas, $d = 0.4$ m).

Impressum

Energy Science Center
ETH Zürich, MLK20
8092 Zürich
www.esc.ethz.ch

Herausgeber

Energy Science Center
news@esc.ethz.ch

Bildnachweis

ETH Zürich, © bei den Autoren

Übersetzungen

edittranslate, Zürich

Oktober 2011

11. Treffen junger WissenschaftlerInnen an Wasserbauinstituten

Einlaufwirbel im hydraulischen Modell

Georg Möller

Zusammenfassung

Wirbelbildung bei Einläufen von Wasserkraftanlagen ist eine häufig diskutierte Problematik. In der Literatur vorhandene Ansätze geben keine umfassenden Anhaltspunkte für die Bemessung des Prototyps. Vielfältige Randbedingungen und das instationäre Phänomen der Wirbelbildung haben bisher keinen schematisierten Bemessungsvorschriften erlaubt. Häufig wird deshalb das hydraulische Modell für eine hydraulische Bemessung zur Hilfe genommen. Bei der Wahl des Massstabs und bei der Art der Modellierung muss die Modellähnlichkeit sorgfältig geprüft werden. Kleine Massstabszahlen und hinreichend grosse Weber- und Reynoldszahlen sind ebenso einzuhalten, wie die Abbildung der massgebenden Anströmung. Erste Erkenntnisse aus den bisherigen Vorversuchen eines Forschungsprojekts zum Lufteintrag durch Einlaufwirbel werden im vorliegenden Beitrag diskutiert und die Einflussgrößen auf die Wirbelbildung qualitativ abgeschätzt.

Abstract

Vortices at intakes may cause air entrainment and swirl flow. Therefore, they are avoided when ever possible. Design criteria given in literature are often incomplete. Various boundary conditions and the unsteady characteristic of the phenomenon avoid schematic guidelines. Thus, appropriate design criteria are typically derived from specific hydraulic model tests. However, the physical modeling of intakes is a challenge as well. Similarity considerations regarding scale factor, Weber- and Reynoldsnumbers should be analyzed carefully. Some first results of a preliminary research are discussed and governing parameters qualitatively characterized.

1. Einleitung

Bei der hydraulischen Bemessung von Einläufen bei Wasserkraftanlagen stellt sich oft die Frage nach der erforderlichen Überdeckungshöhe. Knauss (1987) gibt über die bis 1985 publizierten Untersuchungen einen umfassenden Überblick und entwickelt ein Bemessungskriterium. Fast alle Publikationen stammen aus dem Bereich des Maschinenbaus. Es werden hauptsächlich Einläufe von Pumpen untersucht, welche meist einen runden Querschnitt besitzen und das Wasser vertikal nach unten oder oben entnehmen. Zudem sind die Durchmesser der Einläufe kleiner als bei Wasserkraftanlagen. Einläufe von Wasserkraftanlagen sind grösstenteils rechteckig und horizontal ausgeführt. Bei der Auslegung des hydraulischen Modells sind, ebenso wie beim Prototyp, hydraulische Aspekte zu betrachten. Es ist sicherzustellen, dass der Wirbel mit seinen massgebenden Parametern modellähnlich abgebildet wird. Wenn beispielsweise bei einer Modellierung nach Froude gewisse Kriterien der Oberflächenspannung und der Viskosität eingehalten sind, ist die Übertragbarkeit der

Ergebnisse vom Modell zum Prototyp gegeben (Knauss 1987). Zusätzlich ist eine ähnliche Charakteristik der Anströmung des Einlaufs zu gewährleisten. Ist eine Modellierung der Topografie um den Einlauf notwendig oder ist es ausreichend, ein Schnittmodell in einer Versuchsrinne zu untersuchen? Ziel ist es, mit Hilfe von Vorversuchen ein grossmassstäbliches Modell zur Generierung von Einlaufwirbeln dimensionieren zu können.

2. Hydraulisches Modell

Zur Untersuchung der Wirbel wurde ein hydraulisches Modell verwendet (Abb. 1). Der Kanal ist 7 m lang, 1 m breit und 1.2 m hoch. Die rechte Berandung ist zur Strömungsbeobachtung aus Glas. An der unterwasserseitigen Stirnseite ist mittig der horizontale Einlauf mit auswechselbaren, scharfkantigen Plexiglasrohren (Durchmesser $D = 0.11, 0.14, 0.17$ bzw. 0.25 m) angeordnet. Der Stirnabstand X ist 0.25 m, der Sohlabstand $Y = 0.29$ m. Der Durchfluss Q beträgt maximal 130 l/s. Mittlere Einlaufgeschwindigkeiten $v = Q/A_{\text{Rohr}}$ bis 4.5 m/s und Einlauf-Froudezahlen $F_D = v/(gD)^{0.5}$ bis 3.5, mit A_{Rohr} als durchströmte Fläche des Rohrs und g als Erdbeschleunigung, können untersucht werden.

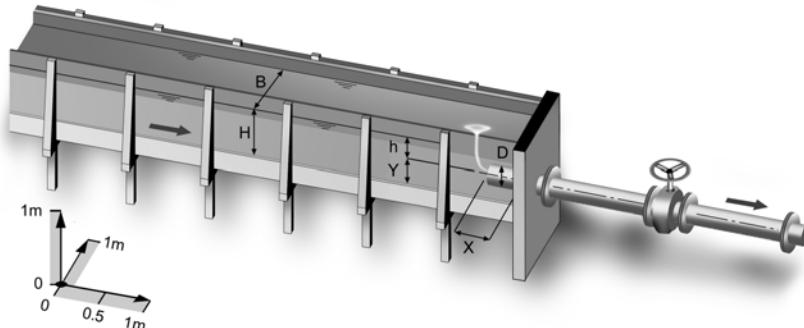


Abbildung 1: Hydraulisches Modell zur Untersuchung der Wirbelproblematik. Fließrichtung von links nach rechts.

3. Einflussgrößen der Wirbelbildung

Die Bildung eines einzelnen Oberflächenwirbels ist ein Prozess, der sich aufgrund von Strömungsinstabilitäten einstellt. Erste vereinfachte Untersuchungen stammen von Einstein und Li (1955) und wurden an vertikalen Zylindern mit zentrischem Ausfluss am Boden durchgeführt. Ohne auf diese Prozesse einzugehen, werden hier übergeordnete Einflussgrößen aufgrund der Erkenntnisse aus den Vorversuchen diskutiert.

3.1 Anströmung

Bei systematischen Untersuchungen wird zwischen symmetrischer und asymmetrischer Anströmung unterschieden. Eine exakt symmetrische Anströmung ist im hydraulischen Modell kaum realisierbar. Die Anströmung kann im Bereich des Einlaufs einen rotierenden Wasserkörper verursachen. Bei Stauseen sind die Einläufe oft in Ufernähe mit geneigter Oberfläche angeordnet, sodass sich die zur Wirbelbildung erforderliche

Rotation ausbilden kann. Wie gross die resultierende Zirkulation, eine Art Drehzahl, ist, hängt von den Differenzen im Geschwindigkeitsprofil der Anströmung ab. Die Zirkulation ist ein wichtiges Mass für die Wirbelbildung.

3.2 Überdeckungshöhe

Die Überdeckungshöhe wird oft als wichtigste bzw. einzige Einflussgrösse bezeichnet und bei der Dimensionierung des Prototyps verwendet. Versuche zeigen, dass die kritische Überdeckung, welche den Beginn des Lufteintrags beschreibt, eine sehr grosse Bandbreite aufweist. Abbildung 2 zeigt den Beginn des Lufteintrags in Abhängigkeit der Einlauf-Froudezahl F_D und der relativen kritischen Überdeckungshöhe $(h/D)_{\text{krit}}$ für die zwei Wirbeltypen 5 und 6.

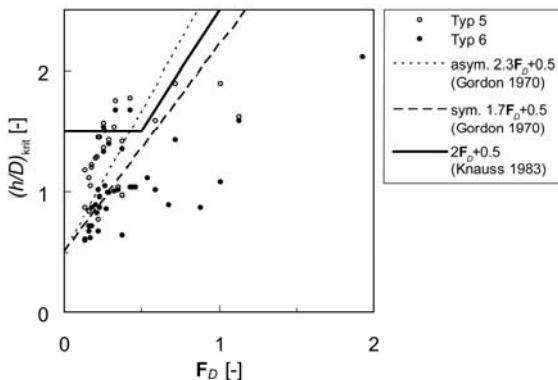


Abbildung 2: Bildung lufteinziehender Wirbel im Vergleich mit Ansätzen zur Abschätzung der kritischen relativen Überdeckungshöhe $(h/D)_{\text{krit}}$

Nach Durgin und Hecker (1978) werden Wirbel in sechs Typen eingeteilt. Als kritischer Entnahmestand wird der Einzug von Luft definiert. Beim Typ 5 sind es Luftblasen und beim Typ 6 erreicht ein durchgehender Luftschaft den Einlaufquerschnitt. Vergleicht man die Versuchsergebnisse mit dem aus Prototypdaten abgeleiteten Ansatz von Gordon (1970) für asymmetrische Anströmung (Abb. 2), liegen 84 % der Messpunkte des Typs 6 unterhalb dieser Grenze. Beim Typ 5 sind es 30 %. Für eine symmetrische Anströmung, welche im Modell eigentlich vorliegt, sind die Anteile unterhalb der Grenze $(h/D)_{\text{krit}} = 1.7F_D + 0.5$ 65 % (6) und 19 % (5). Die von Knauss (1983) empfohlene Grenze $((h/D)_{\text{krit}} = 2F_D + 0.5)$, durchgezogene Linie in Abb. 2) mit einem zusätzlichen Minimum bei $(h/D)_{\text{krit}} = 1.5$ deckt 92 % des Wirbeltyps 6 und 82 % des Typs 5 ab. Im Prototyp als erforderliche Überdeckungshöhe wird meist der nach Gordon bzw. Knauss ermittelte Maximalwert gewählt, da dieser auf der sichereren Seite liegt. Aus Abbildung 2 wird deutlich, dass die mit Hilfe des Maximalwertes gewählte Überdeckungshöhe zu niedrig sein kann. Einige Wirbel tragen im Modell Luft ein, obwohl die Rechnung nach Gordon und Knauss kein Lufteintrag voraussagt. Dabei sind beispielsweise keine grossen Differenzen im Geschwindigkeitsprofil des Modells, die eine grössere Zirkulation verursachen können, vorhanden. Die Ansätze von Gordon und Knauss allein reichen demnach nicht aus und müssen durch zusätzliche Ansätze unter Beachtung anderer Einflussgrössen wie z. B. Zirkulation aus Anströmung der ergänzt werden.

3.3 Viskosität und Oberflächenspannung

Für die Modellierung von Wirbeln in einem kleinen Massstab müssen Grenzen bzgl. der Viskosität und der Oberflächenspannung eingehalten werden. Massstabseffekte können somit reduziert werden. Bei einer Modellierung nach dem Modellgesetz von Froude ist demnach der Einfluss der Viskosität und der Oberflächenspannung unbedingt zu berücksichtigen.

Die Viskosität, als Mass für den Widerstand zwischen den einzelnen Wasserteilchen (auch innere Reibung), muss eine bestimmte Grenze unterschreiten, damit sich Wirbel bilden können. Dieser Widerstand darf nur einen untergeordneten Einfluss haben, um die Modellähnlichkeit zu gewährleisten. Viskose Einflüsse sind klein für Einlauf-Reynoldszahlen $R > 2,4 \cdot 10^4$ (Daggett und Keulegan 1974), mit $R = vD/n$ und n als kinematische Viskosität. Im Prototyp kann dies immer vorausgesetzt werden.

Die Oberflächenspannung ist eine Oberflächenkraft die eine Bildung einer Senke im Zentrum der Rotation verhindert. Für die Weberzahl des Einlaufs soll nach Raju und Garde (1987) $W > 11$ gelten, um massgebende Effekte der Oberflächenspannung bei der Wirbelbildung im Modell zu vermeiden. Abbildung 3 zeigt die im hydraulischen Modell ermittelten kritischen relativen Überdeckungshöhen $(h/D)_{krit}$ in Abhängigkeit der Weberzahl $W = v(rD/s)^{0.5}$, mit s als Oberflächenspannung und r als Dichte des Wassers.

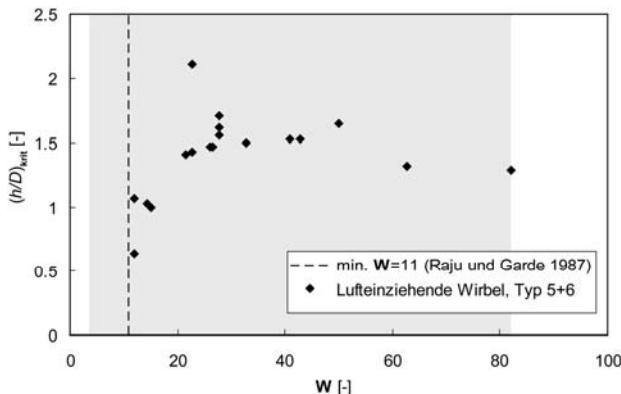


Abbildung 3: Bildung luftziehender Wirbel im hydraulischen Modell abhängig von W und der relativen kritischen Überdeckung $(h/D)_{krit}$ mit dem Grenzkriterium nach Raju und Garde (1987). Es wurden Versuche im Bereich von $3 \leq W \leq 82$ (grau hinterlegt) durchgeführt.

Als kritisch wird die Überdeckung bezeichnet, ab welcher der Luftschlauch den Einlaufquerschnitt erreicht, bzw. wenn Luft ins Drucksystem eingetragen wird. Die Versuche wurden im Bereich $3 \leq W \leq 82$ (vgl. Abb. 3, grauer Bereich) durchgeführt. Die angegebene untere Grenze von $W = 11$ wird bestätigt. Im Bereich von $3 \leq W \leq 11$ bildeten sich im Modell keine Wirbel, bei denen der Luftschlauch den Einlaufquerschnitt erreicht. Abbildung 4 zeigt den Vergleich von Wirbeln mit einer Weberzahl unterhalb der Grenze von Raju und Garde (1987), sowie mit einer grösseren Weberzahl.

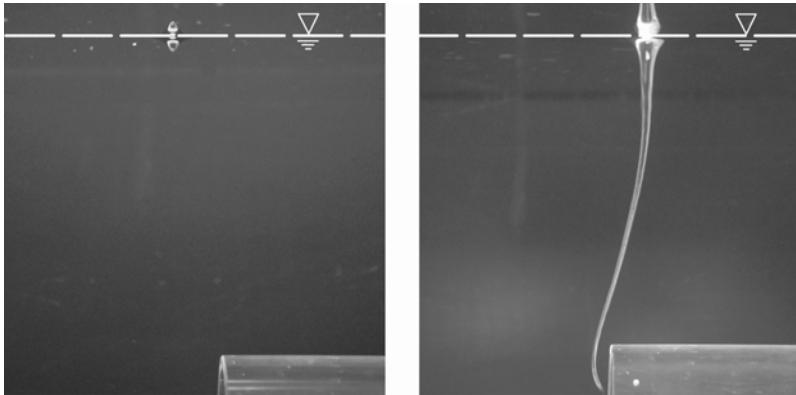


Abbildung 4: Wirbel im hydraulischen Modell mit horizontalem Einlauf,
links: $W = 3$; rechts: $W = 15$; beide mit identischen Randbedingungen

3.4 Wasserspiegeloberfläche

Der Strömungszustand bestimmt den Charakter der Wasserspiegeloberfläche. Beim Einlauf aus einem Stausee ist die mittlere Zuströmgeschwindigkeit gering und die Wasserspiegeloberfläche glatt. Steigt die mittlere Geschwindigkeit, wie beispielsweise bei Einläufen in Flüssen, wird die Oberfläche turbulenter bzw. welliger. Erste Versuche zeigen, dass bei welliger Wasserspiegeloberfläche die Wirbelbildung gehemmt ist.

3.5 Form des Einlaufquerschnitts

Untersuchung von Einlaufwirbeln sind fast alle an kreisrunden, trichterförmigen Querschnitten durchgeführt worden. Der Grossteil der Einläufe von Wasserkraftanlagen ist hingegen in Form von rechteckigen Einlaufquerschnitten ausgeführt, deren Breite oftmals grösser als die Höhe ist. Der projektierende Ingenieur versucht die kritische Überdeckung, welche an Kreisquerschnitten ermittelt wurden und auf die Mittelachse bezogen sind, z. B. mit Hilfe eines äquivalenten Durchmessers zu bestimmen. Damit ist der ermittelte Durchmesser meist grösser als die Höhe des Einlaufquerschnitts, die Überdeckungshöhe h unterscheidet sich demzufolge.

Der Luftschlauch bzw. die rotierenden Wassermasse eines Einlaufwirbels tritt im oberen Teil des Einlaufquerschnitts ein (Abb. 4). Für die Wirbelbildung ist daher die Form in diesem Bereich entscheidend. Bei gleicher Überdeckungshöhe bietet der Rechteckquerschnitt deutlich mehr Fläche als der Kreisquerschnitt. Bei rechteckigen Einlaufquerschnitten kann es zur Bildung mehrerer Wirbel, meist zwei, kommen. Müller et al. (2008) haben dies im Modell im geometrischen Massstab 1:42 beobachtet.

3.6 Strömungszustand vor kritischer Entnahme

Bei der Entnahme von Wasser ist speziell für die Wirbelbildung entscheidend, welcher Strömungszustand zuvor herrschte. Ruht der Wasserkörper zu Beginn und es wird bis auf einen bestimmten Durchflusswert gesteigert, bilden sich Einlaufwirbel später als bei bereits bestehendem Durchfluss mit anschliessender Steigerung bis auf diesen Durchflusswert. Die zeitliche Entwicklung der Auftretenshäufigkeit von Wirbeln nach

der Änderung des Strömungszustands wird im weiteren Verlauf der Forschungsarbeit eingehend untersucht.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

- Der Einfluss der Anströmung ist von Fall zu Fall verschieden. Um bei deren Modellierung den Fehler gering zu halten, muss ein möglichst grosser Ausschnitt der Topografie abgebildet werden. Die numerische Modellierung kann bei der Wahl des Modellperimeters hilfreich sein.
- Die relative kritische Überdeckungshöhe gibt einen Anhalt für die Bemessung eines Einlaufbauwerks. Jedoch müssen zwingend weitere Parameter mit einbezogen werden.
- Die Weberzahl des Einlaufs spielt eine massgebende Rolle bei der Modellierung von Einlaufwirbeln. Der Grenzwert $W = 11$ konnte bestätigt werden.
- Die Beschaffenheit der Wasserspiegeloberfläche ist wichtig für die Wirbelbildung und sollte beachtet werden.
- Die massgebende Fläche eines Einlaufs und deren Überdeckungshöhe ist bei runden und rechteckigen Querschnitten verschieden.

Bibliographie

- Daggett, L. L., und Keulegan, G. H. (1974). *Similitude in free-surface vortex formations*. Journal of the Hydraulics Division. 100(11): 1565 - 1581.
- Durgin, W. W., und Hecker, G. E. (1978). *The Modeling of Vortices at Intake Structures*. Proceedings of the ASCE, IAHR, and ASME Joint Symposium on Design and Operation of Fluid Machinery, Colorado State University, Fort Collins, ed., 1: 381 - 391.
- Einstein, H. A., und Li, H. (1955). *Steady vortex flow in a real fluid*. La Houille Blanche. 10 (4) : 483 - 496. Grenoble Arthaud.
- Gordon, J. L. (1970). *Vortices at intakes*. Water Power. 22 (4) : 137 - 137. London IPC.
- Knauss, J. (1983). *Wirbelbildung an Einlaufbauwerken (Luft- und Dralleintrag)*. DVWK Schriften, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), Bonn, Deutschland.
- Knauss, J. (1987). *Swirling Flow Problems at Intakes*. IAHR Hydraulic Structures Design Manual 1, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Müller, M., De Cesare, G., und Schleiss, A. (2008). *Wirbel über Wasserfassungen: Geschwindigkeitsmessungen im hydraulischen Modell*. 10. JuWi-Treffen, Innsbruck, Österreich, 81 - 86.
- Raju, K. G. R., und Garde, R. J. (1987). *Modelling of vortices and swirling flows. Swirling flow problems at intakes: 77-90*. IAHR Hydraulic Structures Design Manual 1, Balkema, Rotterdam, Netherlands.

Adresse des Autors

Georg Möller

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH)

Gloriastrasse 37/39, 8092 Zürich, Schweiz

moeller@vaw.baug.ethz.ch

Lufteintrag in Drucksysteme von Wasserkraftanlagen

Forschungsidee

Georg Möller

ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)

ETH Zürich, 8092 Zürich

E-Mail: moeller@vaw.baug.ethz.ch

1 PROBLEMATIK

Der Lufteintrag in Drucksysteme an Fassungen von Wasserkraftanlagen kann nicht grundsätzlich vermieden werden. Im Allgemeinen wird der Entwurf eines solchen Einlaufbauwerks dann als hydraulisch einwandfrei bezeichnet, wenn mögliche Wirbelbildungen so kontrolliert werden können, dass der Lufteintrag grundsätzlich vermieden wird und der Dralleintrag in einer annehmbaren Größenordnung ist (Knauss, 1983).

Luft in Drucksystemen führt zu Druckschwankungen im System und hat ungünstige Auswirkungen auf die hydraulischen Maschinen. Die Druckschwankungen können zum einen sehr groß sein und durch deren periodische Wiederkehr eine Dauerbelastung darstellen. Es kommt ausserdem zu einer Wirkungsgradverringerung der gesamten Anlage, was Umsatzverluste nach sich zieht. Der Lufteintrag kann bereits beim Entwurf einer Anlage nicht vollkommen ausgeschlossen werden. Leistungserhöhungen bestehender Anlagen führen ebenfalls dazu, dass Sicherheitsreserven hinsichtlich des Lufteintrags kleiner bzw. unterschritten werden.

An der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich wurden in den letzten Jahren zahlreiche hydraulische Modellversuche von Wasserkraftanlagen mit oben beschriebener Problematik durchgeführt. Dabei handelt es sich um Einläufe von Fluss- und Speicherwerkten, sowie auch um Einläufe von Hochwasserentlastungsanlagen. Dabei wurde folgendes festgestellt.

Im Fall des Flusskraftwerks Eglisau, Schweiz (VAW, 2006c) ziehen bereits vor der Erhöhung des Ausbaudurchflusses Einlaufwirbel Luft in die Turbinenzuströmung ein. An einem hydraulischen Modell im Massstab 1:15 wurden Massnahmen zur Verhinderung des Lufteintrags untersucht. Dabei wird gezeigt, dass bei symmetrischen Turbinenbetrieb mit Hilfe einer Lamellenkonstruktion der Lufteintrag verhindert werden

kann. Bei asymmetrischem Turbinenbetrieb kann mit keiner Massnahme der Lufteintrag verhindert werden.

Bei der Optimierung eines Einlaufbauwerks der Wasserkraftanlage Karahnjukar, Island (VAW, 2006a) im hydraulischen Modell im Massstab 1:22 konnte ein Grossteil des Lufteintrages durch den Einbau eines Kreuzes in die Strömung verhindert werden. Die im Abfluss verbleibende Luft konnte durch eine Entlüftungseinrichtung 125 m nach dem Einlaufbauwerk entgast werden.

Im Fall der Druckluftkammer des Kopswerks II in Österreich, welche im Massstab 1:8.62 untersucht worden ist (VAW, 2006b), wird neben der Anordnung einer Lamellenkonstruktion zur Unterdrückung von lufteinziehenden Wirbeln eine Entlüftungseinrichtung empfohlen.

Bei der Beurteilung der Luftproblematik der Wasserkraftanlage Islas, Schweiz (VAW, 2007) wird das Auftreten von lufteinziehenden Wirbeln beim Abschwung im Wasserschloss festgestellt. Wie viel Luft eingetragen wird kann nicht abgeschätzt werden.

Mit dem zunehmenden Neubau von Wasserkraftanlagen ist mit der wachsenden Bedeutung dieser Problematik zu rechnen. Bei einem Ausbau bestehender Anlagen werden die Sicherheitsreserven geringer bzw. unterschritten und es ist mit einer sprunghaften Zunahme der Bedeutung zu rechnen. Eine quantitative Beschreibung und Prognose des Lufteintrags aus den genannten Gründen möglich sein.

2 STAND DER FORSCHUNG

Die geschilderte Problematik zeigt, dass unter einer Reihe von Voraussetzungen der Lufteintrag in Drucksysteme von Wasserkraftanlagen nicht zu verhindern ist. Im Rahmen einer Dissertation an der VAW (Wickenhäuser, 2008) wurde die Entlüftung von Druckstollen untersucht. Aus dieser Arbeit lässt sich unter anderem die Dimensionierung von Entlüftungsanlage in Druckstollen entnehmen. Eine der wichtigsten Eingangsgrössen ist dabei die Luftmenge im Gemischabfluss, die Lufteintragsrate.

In der Literatur werden die unterschiedlichsten Bereiche von eingetragenen Luftmengen angegeben. Die Untersuchungen stammen alle aus dem Bereich des Maschinenbaus und wurden zum grossteil an Pumpeneinläufen durchgeführt. Hierbei wird anders als bei Einlaufbauwerken von Wasserkraftanlagen, ein Ansaugrohr von oben in einem Pumpensumpf eingetaucht verwendet. Die Lufteintragsrate $\beta = Q_{Luft}/Q_{Wasser}$ erreicht nach Untersuchungen von Iversen (1953) je nach Überdeckung des Einlaufs bis 50 %. Denny und Young (1957) schreiben, dass in Extremfällen über 10 % Luft in den Druckabfluss gelangen. Padmanabhan (1984) gibt in Abhängigkeit der Überdeckungs-Froude-Zahl Fr :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$$

V mittlere Geschwindigkeit im massgebenden Einlaufquerschnitt

g Erdbeschleunigung

h absolute Überdeckungstiefe

die Maximalwerte des Lufteintrags an. Abb. 1 zeigt die ermittelten Daten, es werden maximal ca. 15 % erreicht. Aufgrund dieser Daten ist eine Korrelation des Lufteintrags mit den Strömungsparametern nicht möglich. Es wird lediglich eine Hüllkurve (Envelope Line), die den maximalen Lufteintrag definiert, angeben. Weitere Untersuchungen fehlen bis dato.

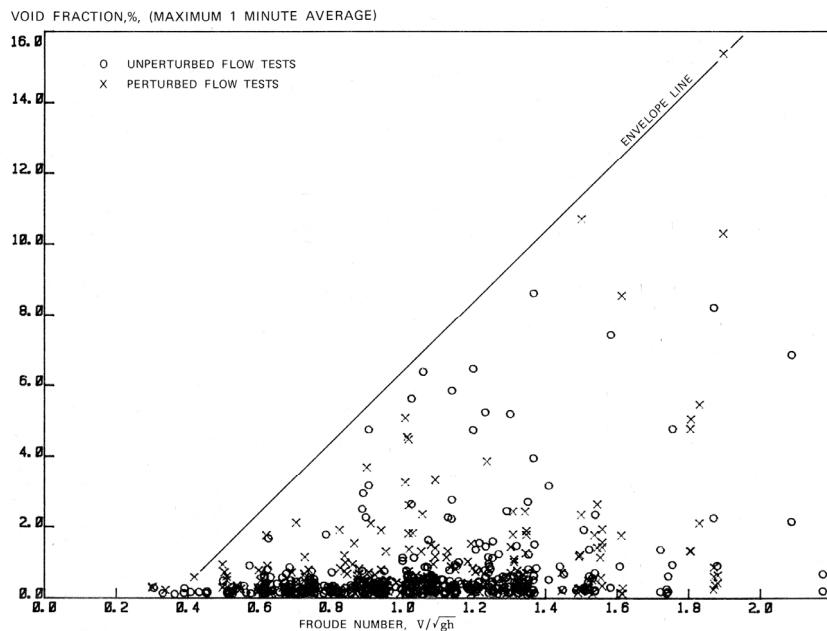


Abb. 1: Hüllkurve der maximalen Luftkonzentration in Abhängigkeit der Überdeckungs-Froude-Zahl (Padmanabhan, 1984)

Zudem ist der Lufteintrag an Einläufen von Wasserkraftanlagen, welche meist seitlich das Triebwasser entnehmen, noch nicht untersucht worden. Es ist nicht bekannt, ob der Lufteintrag aufgrund der Entnahmeart und -richtung variiert.

Die Kenntnis über die eingetragene Luftmenge macht es möglich Entlüftungsbauwerke zu dimensionieren und/oder die auftretenden Auswirkungen auf die Wasserkraftanlage, wie zum Beispiel die Wirkungsgradverringerung quantitativ zu ermitteln.

3 FORSCHUNGSIDEE

Zu Wirbel an Einlaufbauwerken von Wasserkraftanlagen sind in der Vergangenheit viele Untersuchungen durchgeführt worden. Zum Lufteintrag, speziell zur Ermittlung der eingetragenen Luftmenge fehlen Untersuchungen.

3.1 Methoden

Die Untersuchung der lufteinziehenden Wirbel und die Quantifizierung der Lufteintragsrate wird an der VAW mit Hilfe eines grossmassstäblichen hydraulischen Modells untersucht. Dabei werden symmetrische und asymmetrische Anströmungsgeometrien analysiert. Die Entnahme des Triebwassers wird dabei in der Hauptsache seitlich, wie im Prototypen, und mit einem Rohrdurchmesser von 50 cm stattfinden. Denkbar sind auch Untersuchungen mit einer Entnahme in der Sohle.

Mit Hilfe eines PIV-Systems soll die Strömung des lufteinziehenden Wirbels vermessen werden. Die eingetragene Luft wird mit einer Entlüftungsanlage aufgefangen und deren Volumen in Abhängigkeit der Zeit ermittelt.

3.2 Ziele

Die angestrebte Dissertation mit dem vorläufigen Titel "Lufteintrag in Drucksysteme von Wasserkraftanlagen" soll die notwendigen Grundlagen zur Bestimmung der Lufteintragsrate liefern.

4 LITERATUR

Denny D. F. und Young G. A. J. (1957): The Prevention of Vortices and Swirl at Intakes, IAHR Seventh General Meeting, Lissabon, Paper C1

Knauss J. (1983): Wirbelbildung an Einlaufbauwerken: Luft- und Dralleintrag / Jost Knauss. - Hamburg ; Berlin : Parey, 1983. (DVWK Schriften ; (Heft) 63)

Iversen H. W. (1953): Studies of Submergence Requirements of High-Specific-Speed Pumps, Transactions of the ASME, 75(4), 635-641.

Padmanabhan M. (1984): Air Ingestion due to Free-Surface Vortices, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110 (12) 1855-1859.

VAW (2006a): Karahnjukar HEP Iceland, Physical Model Investigation on the Jökulsa Tunnel Intake, volume 4222. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

VAW (2006b): Kopswerk II, Peltonturbinen im Gegendruckbetrieb, Hydraulische Modellversuche zur Entlüftungsproblematik, 4212-A. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

VAW (2006c): Kraftwerk Eglisau, Hydraulische Modellversuche im Zusammenhang mit der Neukonzessionierung, Einlaufwirbelproblematik und Strömungsverhältnisse im Trompeteneinlauf, 4230. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

VAW (2007): Beurteilung der Luftproblematik im Triebwassersystem des KW Isla, 4246. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

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