

11. Treffen junger WissenschaftlerInnen an Wasserbauinstituten

Monitoring und Vorhersage der Sedimentation in Pumpspeicherwerken

Michael Müller und Anton Schleiss

Zusammenfassung

Wie die Speicher herkömmlicher Kraftwerke sind die Staubecken von Pumpspeicheranlagen, welche durch die steigende Energienachfrage in der Schweiz und weltweit stets an Bedeutung gewinnen, von Verlandungsproblemen betroffen. Doch wie werden die Turbulenz und die Ablagerung von Feinsedimenten in solchen Speichern durch die stetig wechselnden Pump- und Turbiniersequenzen beeinträchtigt? Wie kann die Turbulenz durch die Position sowie die Geometrie der Ein- und Auslaufbauwerke beeinflusst werden, um das Absetzen von Feinsedimenten zu reduzieren? Diese Fragen werden in einem Forschungsprojekt untersucht. Ziele, Methodik und erste Resultate von Prototypmessungen sind im vorliegenden Beitrag beschrieben.

Abstract

To satisfy a continuously increasing energy demand, pumped storage hydropower projects become more and more relevant on a worldwide scale. As in traditional hydropower plants, reservoirs are often affected by sedimentation. Long-term sedimentation issues due to fast and repeated change of operations between generating and pumping modes are relatively unknown compared to traditional hydropower schemes. How does the pumping and generating activity affect turbulence in the reservoir and sedimentation process by fine sediments? How could the turbulence be influenced by the geometry of intakes and outlets in order to reduce settling down the fine sediments? These main questions are to be examined in a PhD project, whose objectives, methodology and results of first prototype measurements are described in the present paper.

1. Einleitung

Die Verlandung von Stauseen ist eines der anspruchsvollsten Probleme des Wasserbaus des 21. Jahrhunderts. Die daraus entstehenden Kapazitätsverluste und die Bildung von Ablagerungen vor Einlaufbauwerken oder Grundablässen gefährden die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer der Wasserkraftanlagen sowie die Kontinuität der Energieproduktion und die Sicherheit der Bauwerke.

Um die steigende Energienachfrage zu befriedigen werden Pumpspeicheranlagen sowohl in der Schweiz, wie auch weltweit stets wichtiger. Solche Projekte bestehen im Allgemeinen aus einem oberen und unteren Reservoir, zwischen welchen das Wasser turbiniert oder gepumpt wird. Die langfristigen Ablagerungsprozesse in den Speichern unter Einfluss von stetig wechselnden Pump- und Turbiniersequenzen sind im Vergleich zur Sedimentation in herkömmlichen Kraftwerken verhältnismäßig unbekannt.

Im Rahmen des Projekts *HydroNet – a standardised methodology for pumped storage power plants* forschen schweizweit sieben Institute in den Bereichen Hydrodynamik, Elektronik, Hydraulik, Umwelt und Datentransfer, um Lösungsansätze für die Überwachung und die Vorhersage relevanter Phänomene in Pumpspeicherkraftwerken zu finden. Das *Laboratoire de Constructions Hydrauliques* (LCH) der *Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne* (EPFL) beteiligt sich mit einer Forschungsarbeit, die sich mit der Sedimentation in den Speichern solcher Anlagen, insbesondere dem Einfluss des Pumpspeicherbetriebs, sowie der Position und der Geometrie des Ein-/Auslaufbauwerkes auf die Turbulenz im Becken beschäftigt.

2. Ziele und Vorgehen

Um Lösungen für eine nachhaltige Sedimentbewirtschaftung in Pumpspeicherkraftwerken zu entwickeln, soll im Verlauf der vorgestellten Dissertation folgende Schlüsselfrage beantwortet werden: Wie können die durch den Pumpspeicherbetrieb hervorgerufenen Turbulenzen genutzt werden, um das Absetzen von Feinsedimenten zu verhindern?

Basierend auf einer Literaturstudie, welche die Bereiche Turbulenz, Sedimentation von Stauseen, Sedimenttransport in Druckleitungen, und Strömungsfelder vor Fassungen behandelt, soll eine theoretische Grundlage ausgearbeitet werden, um die wichtigsten physikalischen Prozesse hinter den relevanten Phänomenen zu beschreiben.

Auf einer existierenden Kraftwerksanlage werden Prototypmessungen durchgeführt. Messinstrumente und Wasserentnahmen am Triebwasserweg ermöglichen eine Analyse der Sedimentkonzentration in Funktion von Durchfluss, Fallhöhe, Geschwindigkeitsmessungen und somit eine Quantifizierung des Feststofftransports zwischen den beiden Becken. Da die sedimentologischen Phänomene eng mit den Strömungsbedingungen im See zusammenhängen, werden im Bereich der Wasserfassungen vertikale Geschwindigkeitsprofile studiert.

In hydraulischen Modellversuchen werden Sedimentbilanzen sowie Ablagerungsprozesse in einfachen Beckengeometrien untersucht. Dabei wird der Einfluss der Dauer des Pumpens resp. Turbinierens, der umgewälzten Wassermenge sowie der Position und der Form der Ein-/Auslaufbauwerke analysiert.

Die numerische Simulation der in Laborversuchen getesteten Geometrien und des Prototyps dient zur Bestätigung der beobachteten Vorgänge in Prototyp und Versuchsbecken. Dazu werden ANSYS CFX11, sowie Flow3D[®] verwendet.

3. Resultate: Strömungsfelder vor dem Ein-/Auslaufbauwerk Grimselsee

Messungen im Prototyp sowie die Entwicklung von Methoden zum Monitoring und der Vorhersage der verschiedenen Phänomene sind ein wichtiger Bestandteil des *HydroNet*-Projekts. Unter Mithilfe der *Kraftwerke Oberhasli AG* (KWO) werden solche Analysen am Pumpspeicherwerk Grimsel 2 im Berner Oberland, Schweiz, durchgeführt (Abb. 1). Dieses unterirdisch angelegte Kraftwerk wälzt die Wassermassen zwischen dem Grimselsee (1909 m ü.M.) und dem Oberarsee (2303 m ü.M.) um.

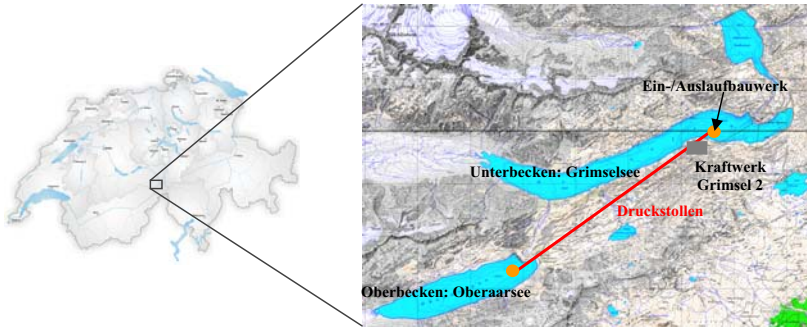


Abbildung 1: Situationsplan Pumpspeicherkraftwerk Grimsel 2

Mit dem Ziel, Geschwindigkeiten vor dem Ein-/Auslaufbauwerk im Grimselsee zu messen, wurden im Herbst 2008 erste Prototypmessungen durchgeführt. Diese Aufzeichnungen ermöglichen, die Auswirkungen des alternierenden Pump- und Turbinierbetriebs auf die Strömungseigenschaften im Becken, sowie den Einfluss einer spezifischen Geometrie des Auslaufbauwerkes zu beobachten.

3.1 Beschreibung des Prototyps

Das Ein-/Auslaufbauwerk im Grimselsee ist zylinderförmig mit einem Durchmesser von 21.70 m auf einer Plattform in einer Nische der Seetopographie auf 1942 m ü.M. eingebettet ist. Das Turbinenwasser gelangt durch einen senkrecht nach oben gerichteten Stollen in den Zylinder und strömt radial durch zehn seitliche Öffnungen aus, welche durch Leitwände getrennt sind (Abb. 2).

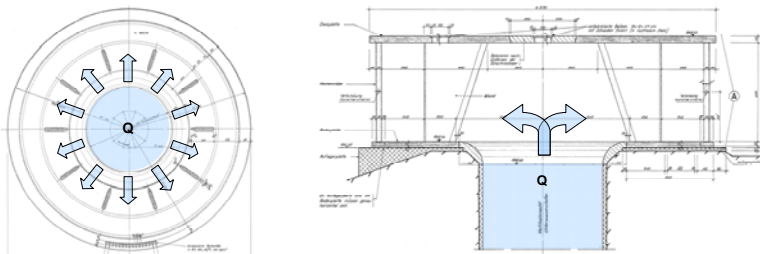


Abbildung 2: Grundriss und Aufriss des Ein-/Auslaufbauwerkes im Grimselsee

Westlich ist das Bauwerk von relativ steilen Felswänden umgeben, im Osten, in Richtung der Talsperre Spittellamm, ist der Seeboden flach und liegt rund 10 m unter der Fassung. Diese Eigenschaften sowie die Anwendungskriterien der Messinstrumente (Abschnitt 3.2), führen zu folgenden Messkonfigurationen (Abb. 3 links):

- Die Ausrichtung der drei Messsonden in der Achse eines Zylindersektors erlaubt das Erfassen der vermuteten Hauptrichtung des ausfliessenden Wasserstrahls.
- Die Platzierung der Sonden in mindestens 25 m Entfernung zum Bauwerk sowie 5 m unterhalb der Auslaufplattform garantiert eine stabile Position der

Messinstrumente und limitiert die Interferenzen zwischen dem ausgesendeten Signal und dem Bauwerk.

- Der Abstand zwischen den jeweiligen Messgeräten von mindestens 50 m limitiert die seitliche Interferenzen zwischen zwei Sonden.

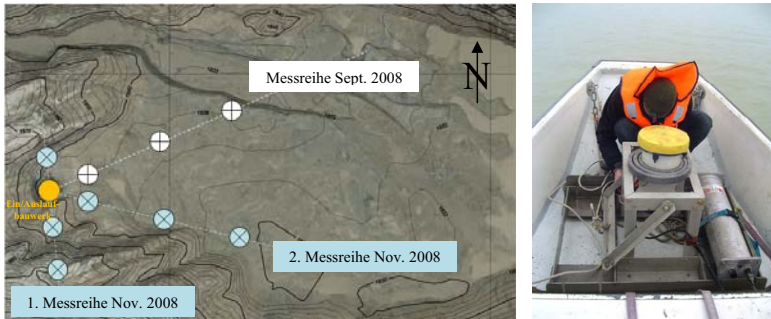


Abbildung 3: Messpunkte vor dem Ein-/Auslaufbauwerk im Grimseesee (links), Vorbereitung der ADP-Sonde (rechts)

3.2 Messeinrichtung

Die auf dem Seegrund platzierte Sonden, sog. „Acoustic Doppler Profiler“ (ADP), sind in der Lage, die Strömungsgeschwindigkeiten über mehrere Wochen aufzuzeichnen. Das Gerät sendet ein akkustisches Signal aus, welches von Partikeln im Wasser zur Sonde zurückreflektiert wird, und errechnet die Geschwindigkeiten der Wassermassen mit Hilfe des physikalischen Grundsatzes der Dopplerverschiebung. Der Standort der Sonden wurde per GPS von einem Boot aus bestimmt und durch eine Messung der Wassertiefe mit einem einfachen Echo-Sounder kontrolliert. Im Moment des Absenkens wird der Akku ans Gerät angeschlossen, was die Aufzeichnung von Druck, Temperatur und Nord- resp. Ostkomponenten der Strömungsgeschwindigkeit auslöst. Erreicht die Sonde den Grund, erlaubt eine doppelachsige Aufhängung die vertikale Ausrichtung der Messoberfläche. Das Gerät speichert diese Bewegungen in Form zweier Winkel, welche die horizontale und vertikale Verschiebung im Bezug auf die Waagrechte angeben. Sind diese beiden Parameter konstant, befindet sich das Messgerät in einer stabilen Lage und die Aufzeichnungen sind zuverlässig. Abbildung 3 (rechts) zeigt eine der verwendeten ADP-Sonden.

3.3 Auswertung der Geschwindigkeitsdaten

Während der ersten Feldkampagne im September 2008 betrug die Dauer der Geschwindigkeitsmessungen fünf Wochentage. Im November 2008 wurden die Profile zusätzlich auch an Wochenenden aufgezeichnet, was eine Messdauer von sechs, resp. acht Tagen ergab. So konnten charakteristische Zyklen erfasst werden, welche sowohl kurzfristige (tags Turbinieren, nachts Pumpen), als auch mittelfristige Sequenzen (sukzessive Entleerung des Speichers im Verlaufe der Woche, Pumpbetrieb an den Wochenenden) beschreiben. Die KWO lieferte für die entsprechenden Perioden sämtliche Durchflussdaten und Pegelstände des Grimsees zur Kontrolle der ADP-Druckmessung. Die ADP-Sonden messen die Geschwindigkeitskomponenten auf jedem Meter der Wassersäule bis zur Seeoberfläche, in einem Zeitintervall von 5 Minuten. So

können nach der Extraktion der Daten zeitabhängige dreidimensionale Geschwindigkeitsprofile vor dem Ein-/Auslaufbauwerk generiert werden, die Aufschluss über die Strömungsverhältnisse vor der Fassung geben.

In Abbildung 4 sind zwei typische Geschwindigkeitsfelder dargestellt, die während dem Pump- resp. Turbinierbetrieb beobachtet wurden. Die Strömungsrichtung entspricht in diesem Falle der zu erwartenden Hauptrichtung der aus- bzw. zuströmenden Wassermassen.

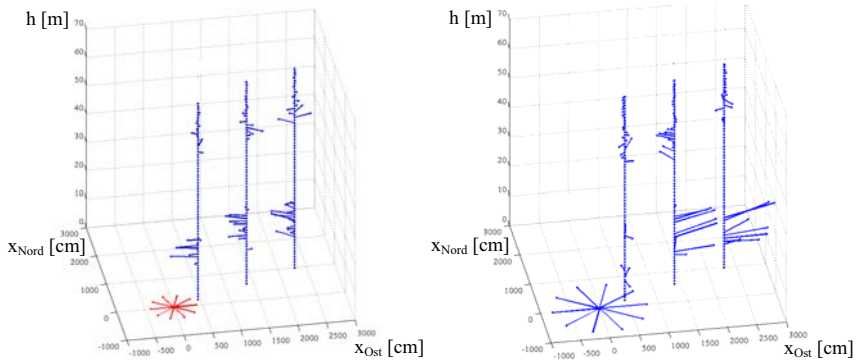


Abbildung 4: Geschwindigkeitsprofile vor dem Ein-/Auslaufbauwerk, Messreihe Sept. 2008; Pumpbetrieb (links), Turbinierbetrieb (ausströmende Wassermassen, rechts)

Es treten allerdings auch Perioden auf, in denen die Ausrichtung der Geschwindigkeitsvektoren nur bedingt mit der vermuteten Ein-/Austrittsrichtung des Wasserstrahls übereinstimmt. Unter anderem wird festgestellt, dass die Wassermassen auch während Perioden ohne Betrieb in Bewegung sind, wobei eine klare Tendenz der Strömungsausrichtung auf den ersten Blick fehlt. Zudem ist eine zweite Hauptrichtung der Geschwindigkeitsvektoren in Richtung Nord-Nordwesten vorhanden, was auf den Einfluss der Seetopographie hinweisen könnte.

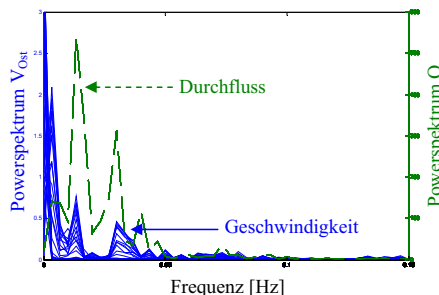


Abbildung 5: Vergleich der Powerspektren der Geschwindigkeits- und Abflussdaten, 1. Messreihe Nov. 2008, Profiler 1 (nördlich des Bauwerkes, Abb. 3 links)

Um zu bestimmen, ob die gemessenen Geschwindigkeiten in direkter Korrelation mit dem Pumpspeicherbetrieb stehen, wurden die Powerspektren der Messreihen und der

Abflussdaten verglichen. Diese in der Signalanalyse häufig verwendete Methode erlaubt mithilfe einer Fourieranalyse die Frequenz einer Datenreihe zu finden, welche am meisten Energie besitzt (Lyons 2004). Abbildung 5 zeigt, dass die Hauptfrequenzen der beiden Signale (Peaks) nahe beieinander liegen und deshalb einen direkten Zusammenhang vermuten lassen.

4. Ausblick

Die Prozesse im Grimsensee werden noch eingehender studiert, um die ersten Beobachtungen zu bestätigen und die Strömungsphänomene zu verstehen. Dazu werden numerische Simulationen durchgeführt, wobei nicht nur das Ein-/Auslaufbauwerk Grimsel 2, sondern auch die weiteren Wasserfassungen und Bauwerke im Becken einbezogen werden.

Im Herbst 2009 erfolgen Umbauarbeiten an einem bestehenden hydraulischen Modell, welches für Laborversuche zur Verlandung von Stauseen konzipiert wurde (Jenzer 2006). Ziel ist es, variable Positionen der Fassungen testen und die Beckengeometrie mit einfachen Mitteln verändern zu können. Die Sedimente werden durch gemahlene Wallnusschalen simuliert, ein Material, welches bereits in anderen Forschungsprojekten am LCH mit Erfolg verwendet wurde (Kantoush 2008).

Das Projektziel von *HydroNet*, ein kontinuierliches Monitoringsystem an einer bestehenden Anlage einzurichten und zu testen konkretisiert sich in Zusammenarbeit mit den KWO. Zur Abschätzung der transportierten Schwebstoffmenge, sowie zur Beobachtung des Einflusses des Betriebs werden derzeit Trübungsmessungen des Pumpen-/Turbinenwassers im Druckstollen des Kraftwerks Grimsel 2 geplant und installiert.

Verdankung

Das vorgestellte Forschungsprojekt wird vom *Competence Center Energy and Mobility* (CCEM), sowie *swiss electric research* finanziert. Die Autoren danken den Partnern für ihre Unterstützung und ihr Engagement.

Bibliographie

Energy Center EPFL (2008). <http://hydronet.epfl.ch>

Jenzer, J. (2006). *Measures against reservoir sedimentation*. Forschungsplan, Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), ETH Lausanne, Lausanne, Schweiz.

Kantoush, S. A. (2008). *Experimental Study on the Influence of the Geometry of Shallow Reservoirs on Flow Patterns and Sedimentation by Suspended Sediments*. Diss. ETH Lausanne Nr. 4048, EPFL, Lausanne, Schweiz.

Lyons, R. G. (2004). *Understanding digital signal processing*. 2nd Edition, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, USA.

Adresse der Autoren

Michael Müller und Prof. Dr. Anton Schleiss
Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Station 18, 1015 Lausanne, Schweiz
michael.mueller@epfl.ch, anton.schleiss@epfl.ch