



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Jahresbericht 2011, 24. Februar 2012

Sustainable sedimentation in pumped-storage plants – Nachhaltige Sedimentation in Pumpspeicherwerken

Auftraggeber:

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

Kofinanzierung:

CCEM-HydroNet

Auftragnehmer:

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)
Station 18, CH-1015 Lausanne
www.lch.epfl.ch

Autoren:

Michael Müller, Giovanni De Cesare, Anton Schleiss
Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Station 18, CH-1015 Lausanne, tél. +41 21 693 2385
michael.mueller@a3.epfl.ch, giovanni.decesare@epfl.ch, anton.schleiss@epfl.ch

BFE-Bereichsleiter:Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter:Dr. Klaus Jorde

BFE-Vertrags- und Projektnummer:154102 / 103094

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

MOTIVATION UND ZIELE

Die Verlandung von Staauseen und die daraus entstehenden Kapazitätsverluste beeinträchtigen die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer von Wasserkraftanlagen sowie die Kontinuität der Energieproduktion. Die Reduktion des Speichervolumens gefährdet die Nutzung von Speichern zum Brechen von Hochwasserspitzen und Ablagerungen vor Einlaufbauwerken oder Grundablässen stellen ein Sicherheitsrisiko für die Bauwerke dar. Dabei sind nicht nur traditionelle Wasserkraftwerke betroffen, sondern auch die neuere Generation von Pumpspeicherwerken. Solche Anlagen erlauben durch die Anordnung mit zwei Staubecken bei Bedarf entweder Strom zu produzieren oder aus dem Netz zu absorbieren und spielen deshalb eine wichtige Rolle bei der Befriedigung der Nachfrage nach Spitzenenergie und bei der Regulierung der Stromnetze. Die Speicher dieser Kraftwerke sind stetig wechselnden Pump- und Turbiniersequenzen ausgesetzt, deren Auswirkungen auf die Verlandungsprozesse verhältnismässig unbekannt sind.

Als Partner im Projekt *HydroNet – Modern Methodologies for Design, Manufacturing and Operation of 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 Pumpspeicherwerkten zu finden (Abbildung 1). In der vorliegenden Forschungsarbeit wird im Rahmen dieses Konsortiums untersucht, welche Auswirkungen der wechselnde Pumpspeicherbetrieb auf die Partikel-konzentrationen im System einer Anlage sowie auf die Strömungsbedingungen und die Trübung in den Staubecken hat.

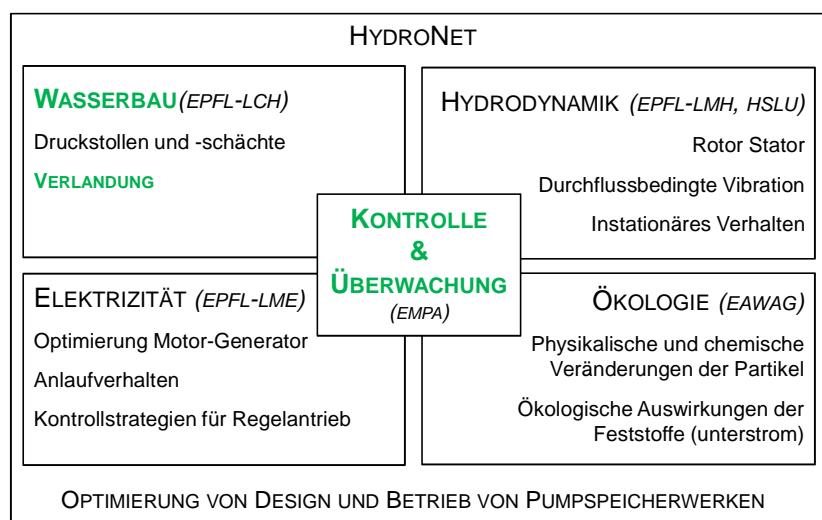


Abbildung 1: Partner und Hauptziele des *HydroNet*-Projekts

Um Lösungen für eine nachhaltige Sedimentbewirtschaftung in Pumpspeicherwerkten zu entwickeln, soll beantwortet werden, wie der Pumpspeicherbetrieb die Turbulenz im Becken und die Ablagerung von Feinsedimenten beeinflusst und ob die Turbulenz durch den Betrieb des Kraftwerks und die Position der Ein-

/Auslaufbauwerke beeinflusst werden kann, um das Absetzen feiner Sedimente zu reduzieren.

Basierend auf einer Literaturstudie wurde eine theoretische Grundlage ausgearbeitet, um die wichtigsten physikalischen Prozesse hinter den relevanten Phänomenen zu beschreiben. Prototypmessungen auf einer existierenden Kraftwerksanlage ermöglichen eine Analyse der Verlandungsprozesse in einem realen Kraftwerk und zeigten Überwachungsmöglichkeiten auf. In hydraulischen Modellversuchen und numerischen Simulationen konnte der Einfluss verschiedener Parameter wie Abfluss, Zyklendauer, Verhältnis Pump-/Turbiniersequenzen, Konzentration und Position des Ein-/Auslaufbauwerks studiert werden.

PROTOTYPMESSUNGEN

In der Region Oberhasli (Schweiz) wurden Prototypmessungen am Pumpspeicherwerk Grimsel II durchgeführt. Im Grimselsee, dem Unterbecken der Anlage, wurden drei Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) vor dem Ein-/Auslaufbauwerk auf dem Seegrund platziert. So konnten während rund drei Wochen kontinuierlich Geschwindigkeitsprofile vor dem zylinderförmigen Bauwerk gemessen werden. Die Daten wurden ausgewertet, in Form von dreidimensionalen Strömungsfeldern im See dargestellt (Abbildung 2) und anschliessend mit den Betriebsdaten des Kraftwerksbetreibers verglichen.

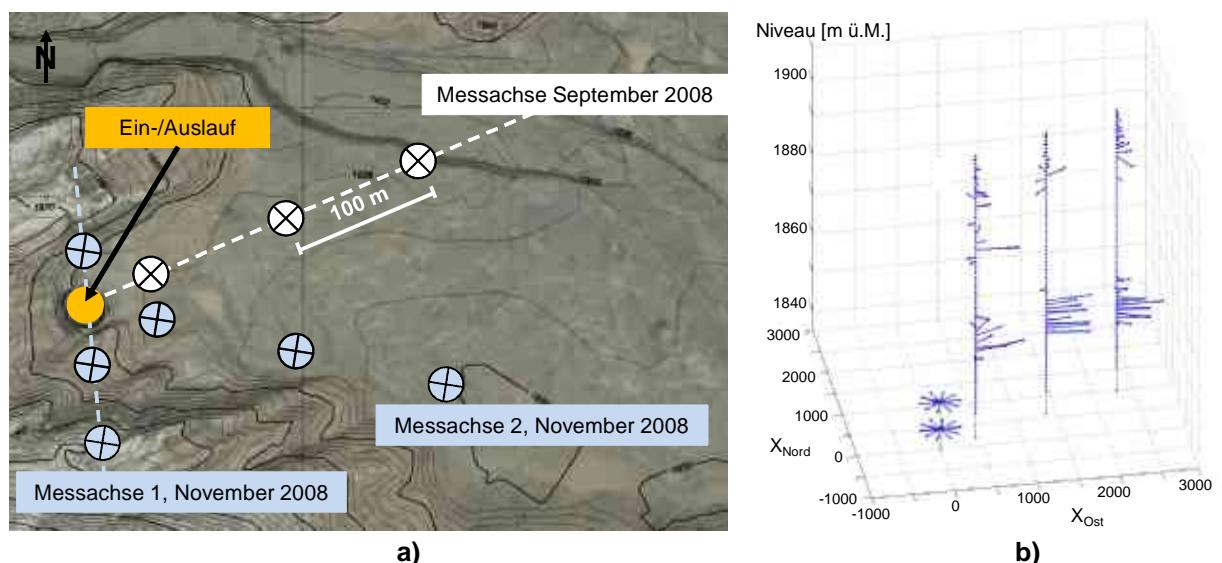


Abbildung 2: a) Messachsen und Positionen der ADCPs vor dem Ein-/Auslaufbauwerk Grimsel 2, b) typische 3D-Geschwindigkeitsprofile bei Turbinierbetrieb (Ausströmen, 17. September 2008)

Sowohl während Pump- wie auch bei Turbiniersequenzen wurden typische, sich wiederholende Strömungsbilder festgestellt. Insbesondere die in das Becken eintretenden Was-

sermassen generieren eine Strömung, die nach kurzer Zeit bis weit in den See hinein messbar ist. Im Gegensatz dazu dauert es beim Pumpen (also Wasserentnahme durch die Fassung) wesentlich länger, bis sich die Strömung im See zum Bauwerk hin ausrichtet. Zudem ist dieses Geschwindigkeitsfeld häufig nur in unmittelbarer Nähe der Fassung messbar.

Des Weiteren wurde der Druckschacht des Grimsel II-Kraftwerks mit einer Trübesonde ausgestattet, um den Feststoffanteil im System zu messen und den Sedimenttransport zwischen den beiden Becken abzuschätzen. Die Messsonde wurde vor Ort an ein Akquisitionssystem angeschlossen, welches die gemessene Konzentration sowie die Betriebsabflüsse mit einer Frequenz von 60 s speicherte. Via Internet konnten die Daten in Echtzeit verfolgt, die Resultate ausgewertet und die Akquisitionsparameter überwacht und bei Bedarf angepasst werden.

Die Feststoffkonzentration im turbinierten und gepumpten Wasser konnte so über eine Messdauer von acht Monaten (November 2010 bis Juli 2011) kontinuierlich aufgezeichnet werden. Die Resultate zeigen einen wesentlichen Unterschied der Trübung im System zwischen Winter- und Sommermonaten (Abbildung 3), der auf das Niederschlagsregime des Grimselgebiets zurückzuführen ist. In den Wintermonaten fällt Schnee, der See ist eisbedeckt und oberstrom erfolgt dadurch vom Unteraargletscher kaum natürlicher Zufluss, der Sedimente in das Becken eintragen könnte. Zudem wurden in Abhängigkeit der Seestände in Pump- und Turbinierbetrieb unterschiedliche Konzentrationen gemessen, was verdeutlicht, dass die Pumpspeicherung die Sedimentbilanz zwischen den beiden Becken beeinflusst (Abbildung 3b).

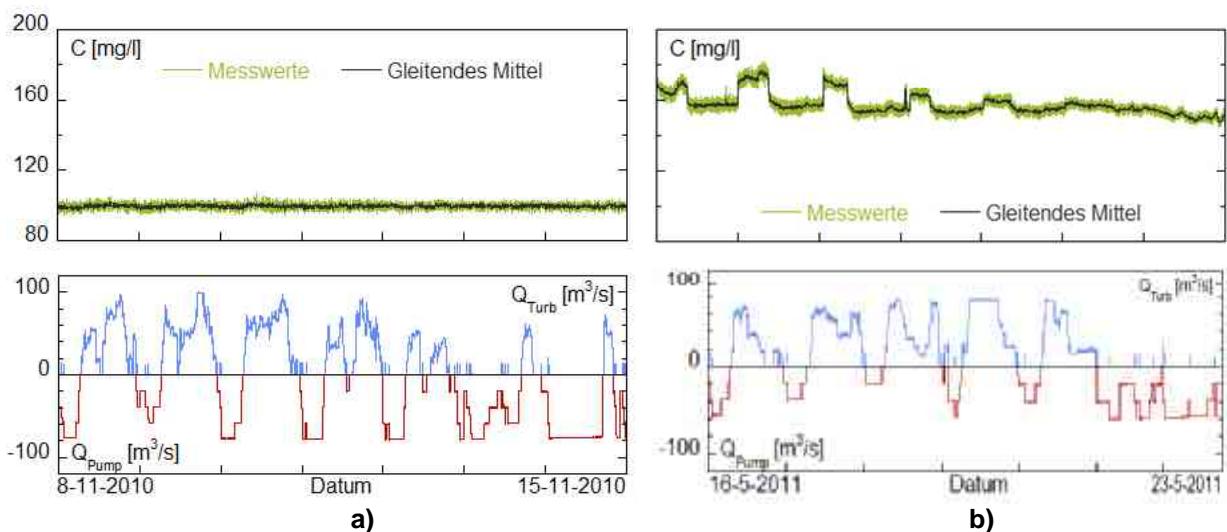
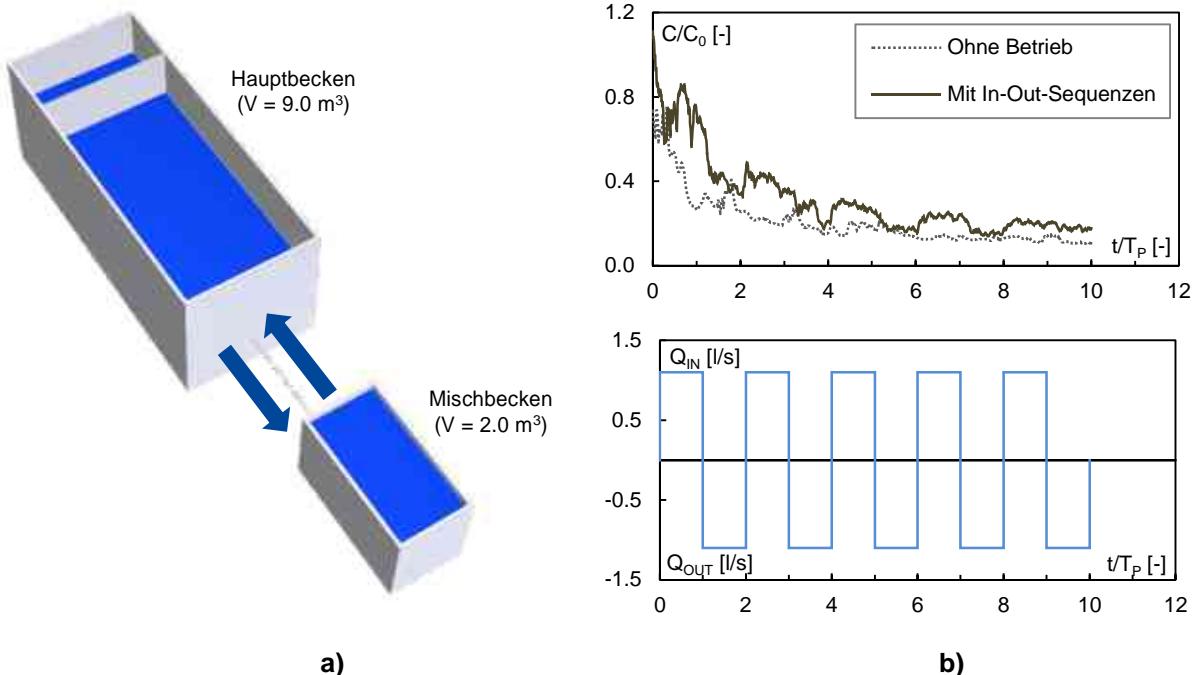


Abbildung 3: Feststoffkonzentration (oben) und zugehörige Betriebsdaten (unten), Aufzeichnungen vom 8. bis 15. November 2010 (a) und vom 16. bis 23. Mai 2011 (b)

HYDRAULISCHE MODELLVERSUCHE

In hydraulischen Modellversuchen wurden Geschwindigkeitsfelder sowie Sedimentbilanzen und Ablagerungsprozesse in einer vereinfachten Beckengeometrie untersucht. Die Anlage besteht aus zwei Becken, die mit einem Rohrsystem und einer Pumpe verbunden sind und erlaubt den Betrieb in beide Richtungen (vereinfachte "In-Out"-Sequenzen, Abbildung 4a). Studiert wurde der Einfluss des Abflusses Q ,

der Zyklendauer T_P , dem Quotienten zwischen Pump- und Turbinierzyklus $T_{P,IN}/T_{P,OUT}$ sowie der initialen Sedimentkonzentration C_0 und der Höhe des Einlaufbauwerks. Letzteres konnte im Modell auf drei Positionen über dem Beckenboden eingebaut werden.



**Abbildung 4: a) Schema des physikalischen Modells,
b) Konzentration im Hauptbecken (oben) und zugehörige Abflussdaten (unten)**

Der Abfluss wurde mit einem Durchflussmesser kontrolliert und über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten. Die Geschwindigkeitsfelder im Hauptbecken wurden mit 16 Ultrasonic Velocity Profilers (UVP, 2 MHz), die Konzentration in beiden Becken mit einer Trübesonde gemessen. Die Feinsedimente werden mithilfe von gemahlenen Nusschalen simuliert, welche optimale Eigenschaften (Korndurchmesser und Dichte) für eine repräsentative Modellierung von Verlandungsprozessen aufweisen.

In Vorversuchen mit Klarwasser wurde das Verhalten des eintretenden Wasserstrahls beschrieben. Die Versuchsreihen mit Feststoffen zeigen, dass sich deren Absetzen nicht komplett verhindern, dank der In-Out-Sequenzen jedoch wesentlich verzögert lässt, so dass ein Teil der Sedimente durch den Triebwasserweg abgeführt werden kann (Abbildung 4b). Ähnlich wie im Prototyp variiert die Konzentration in Abhängigkeit der Pumpspeicheraktivität. Basierend auf den Versuchsresultaten wurden schliesslich weitere Parameter definiert und in Abhängigkeit der zu Beginn genannten Variablen beschrieben, um zu einem besseren Verständnis der Verlandungsvorgänge in Pumpspeicherwerken beizutragen.