



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht 26. September 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.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	4
Zusammenfassung.....	5
Résumé.....	6
1. Einführung	6
2. Monitoring in Pumpspeicherkraftwerken.....	7
2.1 Pumpspeicherkraftwerk Grimsel 2.....	8
2.2 Strömungsverhältnisse nahe der Ein- und Auslaufbauwerke.....	9
2.3 Transport von Feinsedimenten zwischen zwei Stauseen.....	13
3. Versuche zum Absetzverhalten von Feinsediment unter dem Einfluss von Pumpspeichersequenzen.....	15
3.1 Versuchsstand und Messeinrichtung	15
3.2 Parameterstudie.....	16
3.2.1 Feinsediment.....	17
3.2.1 Magnitude und Frequenz der In-Out-Zyklen	17
3.3 Resultate.....	19
3.3.1 Strahleigenschaften und 2D-Strömungsfelder	19
3.3.2 Absetzverhalten der Feinsedimente.....	20
3.3.2 Sedimenttransport zwischen den Becken	22
4. Schlussfolgerungen	23
4.1 Überwachung im Prototyp	23
4.2 Resultate der Laborversuche	23
4.3 Empfehlungen und Ausblick	24
Verdankungen.....	25
Bibliographie.....	25
Follow-up und Eckdaten	27
Anhang	28
Liste der Publikationen 2009 bis 2012.....	28

Vorwort

Der vorliegende Schlussbericht fasst die für die Praxis wesentlichen Ergebnisse des Forschungsprojektes in einem deutschsprachigen Artikel zusammen, welcher 2012 in der Fachzeitschrift „wasser, energie, luft“ publiziert wird.

Im Anhang sind wissenschaftliche Publikationen aufgeführt, die im Verlauf der Forschungsarbeit publiziert, resp. eingereicht wurden.

Die detaillierten Resultate des Forschungsprojektes werden als Dissertation Nr. 5471 unter dem Titel „Influence of in- and outflow sequences on flow patterns and suspended sediment behavior in reservoirs“ an der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) veröffentlicht. Unter demselben Titel wird zudem die Communication 53 des Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) erscheinen.

Einfluss von Pumpspeichersequenzen auf die Strömungsverhältnisse und das Absetzverhalten von Feinsedimenten in Stauseen

■ Michael Müller, Giovanni de Cesare und Anton J. Schleiss

Zusammenfassung

Die Stauraumverlandung und die daraus resultierenden Kapazitätsverluste beeinträchtigen Zuverlässigkeit, Effizienz, Lebensdauer und Sicherheit von Wasserkraftanlagen. Nebst traditionellen Speicherkraftwerken sind auch Pumpspeicherwerke betroffen, die durch flexibles Turbinieren und Pumpen zwischen zwei Stauhaltungen erlauben, je nach Bedarf Strom zu produzieren oder zu absorbieren. Sie spielen deshalb eine wichtige Rolle bei der Stromnetzregulierung und der Bereitstellung von Spitzenenergie. Inspiriert durch das zyklische Hin-und-her-Bewegen der Wassermassen wurde in der vorliegenden Studie untersucht, ob Feinsedimente nach deren Eintrag in den Stausee im Bereich der Wasserfassung durch die von Pumpspeichersequenzen erzeugte Turbulenz in Suspension gehalten werden können. So würden sich die Partikel langsamer absetzen und könnten entweder durch den Triebwasserstollen abturbiniert, oder durch andere Bauwerke wie z.B. einen Spülstollen abgeführt werden.

Im Pumpspeicherkraftwerk Grimsel 2 in den Schweizer Alpen wurden über mehrere Wochen Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Wasserfassung gemessen. Eine Trübungsmessung am oberen Ende des Druckschachts erlaubte ein Echtzeitmonitoring der Sedimentkonzentrationen während rund acht Monaten und das Errechnen der Sedimentbilanz zwischen den beiden Stauseen.

In der Versuchsanlage im Labor wurde der Einfluss von Abfluss und Frequenz der Pumpspeicherzyklen auf die Strömungsverhältnisse und das Absetzverhalten von Feinsedimenten untersucht. Neben 2D Strömungsfeldern wurde die zeitliche Entwicklung des in Suspension gehaltenen Sedimentanteils gemessen und mit einem Referenzszenario ohne Pumpspeicherbetrieb verglichen. Außerdem konnten Ein- und Austrag von Sediment und damit die Sedimentbilanz des Systems errechnet werden.

Prototypmessungen sowie Laborversuche zeigen, dass Pumpspeichersequenzen die Strömungsbedingungen in Staubecken und insbesondere im Nahbereich der Wasserfassung beeinflussen. Die verursachte Turbulenz hält Feinsedimente in Suspension, so dass beträchtliche Sedimentmassen im System hin- und hertransportiert werden. Die Sedimentbilanz bleibt jedoch neutral, solange beide Stauhaltungen ungefähr gleiche Partikelkonzentrationen aufweisen.

Résumé

La sédimentation des réservoirs et les pertes de capacité qui en résultent affectent la fiabilité, l'efficience, la durée de vie et la sécurité des aménagements hydroélectriques. Comme tous les aménagements traditionnels d'accumulation, les aménagements de pompage-turbinage sont également concernés. Par un turbinage et pompage flexible entre deux réservoirs, ils permettent de produire de l'énergie ou de l'absorber, selon les besoins. Ainsi, ils jouent un rôle clé dans la régulation des réseaux et dans l'approvisionnement en énergie de pointe. Inspiré par les allers-retours d'eau dus aux cycles d'exploitation, l'objectif de la présente recherche est d'étudier si les particules fines arrivant dans le réservoir et plus précisément devant la prise d'eau pouvaient être gardées en suspension par la turbulence induite par les séquences de pompage-turbinage. Ainsi, leur dépôt pourrait être retardé et leur évacuation par les turbines ou éventuellement par des systèmes de vidange ou de purge pourrait être favorisée.

Dans l'aménagement de pompage-turbinage Grimsel 2 dans les Alpes Suisses, les vitesses d'écoulement devant la prise d'eau ont été mesurées pendant plusieurs semaines. Un système de mesure de turbidité dans la partie supérieure du puits blindé a permis une surveillance continue en temps réel des concentrations sédimentaires pendant huit mois ainsi que l'établissement du bilan sédimentaire entre les deux réservoirs.

Lors des essais en laboratoire, l'influence du débit et de la fréquence des cycles de pompage-turbinage sur les conditions d'écoulement et la sédimentation des particules fines a été étudiée. Appart de champs de vitesse 2D, l'évolution temporelle du taux de sédiments en suspension a été mesurée et comparée à un essai de référence sans opération de pompage-turbinage. De plus, le bilan sédimentaire du système a été calculé.

Les mesures sur prototype et en laboratoire ont montré que les séquences de pompage-turbinage affectent les conditions d'écoulement dans un réservoir. La turbulence provoquée permet de garder en suspension les sédiments fins, ce qui conduit à des masses considérables transportés dans le système. Globalement, le bilan sédimentaire reste équilibré tant que les deux réservoirs présentent des concentrations similaires.

1. Einführung

In der Energieversorgung und einem zukünftigen Strommarkt mit Nachfrage an Spitzenenergie und erhöhtem Bedürfnis an Netzregulierung spielen Pumpspeicherwerke eine zentrale Rolle. Die Schweiz hält bezüglich Knowhow und Energieproduktion aus Wasserkraft eine privilegierte Position inne, die es zu erhalten gilt. Deshalb wurde 2007 das Konsortium HydroNet (hydronet.epfl.ch) ins Leben gerufen, mit dem

Ziel, neue Methodologien in den Bereichen Design, Betrieb und Überwachung von Pumpspeicherwerkwerken zu definieren.

Am Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) wurden zwei HydroNet-Teilprojekte im Bereich Wasserbau bearbeitet, zum einen die Berechnung und Überwachung von Druckstollen und –schächten (Hachem, 2011) und zum anderen der Einfluss des Pumpspeicherbetriebs auf die Verlandung von Stauseen (Müller, 2012).

Im vorliegenden Artikel wird die Arbeit betreffend Stauraumverlandung präsentiert, die folgende Hauptziele beinhaltete:

- Beschrieb des Einflusses von wechselndem Betrieb zwischen Pumpen und Turbinieren auf Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Wasserfassungen sowie auf das Absetzverhalten von Feinsediment in Staushaltungen. Hauptziel war, bestimmte Pumpspeicherzyklen zu definieren, welche die Feinpartikel länger in Suspension halten und so die Verlandung verlangsamen und den Sedimentaustrag zu unterstützen.
- Entwicklung und Anwendung möglicher Überwachungsmethoden in einer bestehenden Anlage, um Strömungsbilder im Stausee und Sedimenttransport zwischen zwei Staushaltungen kontinuierlich und über längere Zeit zu beobachten.
- Parameterstudie im Versuchsstand, um den Einfluss der Magnitude (Abfluss) und der Frequenz von Pumpspeicherzyklen, der relativen Zyklendauer, der initialen Sedimentkonzentration sowie der Position des Ein- und Auslaufbauwerks zu untersuchen.

In der Folge wird die Fließrichtung stets aus der Sichtweise des Stauraumes angegeben. Während einer In-Sequenz tritt also Wasser in den Speicher ein, während einer Out-Sequenz wird dem Becken Wasser entnommen.

2. Monitoring in Pumpspeicherwerkwerken

Durch den Pumpspeicherbetrieb sind die Wassermassen vor den Wasserfassungen schnellen und häufigen Wechseln zwischen turbulenten Strömungsverhältnissen bei einströmendem Wasser und relativ langsamem, potentiellen Geschwindigkeitsfeldern bei ausströmendem Wasser unterstellt. Studien haben gezeigt, dass der Pumpspeicherbetrieb Auswirkungen auf die Schichtung und damit die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Speichers hat (Potter *et al.*, 1982). Durch das Mischen der Wassersäule können thermische Stratifikation, Nährstoffhaushalt sowie Ökosysteme beeinträchtigt werden. Häufig ist der künstliche Eintrag von turbulenter kinetischer Energie im Vergleich zu natürlichem windinduziertem Eintrag gross, so dass Feinsediment in Schwebefehl gehalten oder gar aufgewirbelt wird (Imboden, 1980; US Bureau of Reclamation, 1993; Anderson, 2010).

Kenntnis über die Strömungsbedingungen vor den Wasserfassungen sind für bestehende Anlagen wertvoll, um Hauptströmungsrichtungen, Zirkulationszellen und

Geschwindigkeiten zu beobachten und damit eventuelle Absetzonen vorherzusagen. Für zukünftige Anlagen könnte dieses Wissen für die Wahl einer optimalen Geometrie und Anordnung der Fassung dienen, um im späteren Betrieb Verlandungsprobleme zu minimieren. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden in Feldversuchen über mehrere Tage kontinuierlich Geschwindigkeitsprofile im Bereich der unteren Wasserfassung des Pumpspeicherkraftwerks Grimsel 2 gemessen. Resultate aus numerischen Simulationen ergänzten die Analyse.

Eine kontinuierliche Messung der Feststoffkonzentrationen im Triebwasserweg würde es dem Kraftwerksbetreiber erlauben, die im Pumpspeicherbetrieb hin- und herbewegten Sedimentmassen zu quantifizieren und allfällige Anstiege des Sedimentgehalts nach Hochwasser mit Trübeströmen frühzeitig zu erkennen und den Betrieb nach Möglichkeiten anzupassen. Werden die Messungen über mehrere Jahre geführt, könnte die Sedimentbilanz zwischen zwei Speichern beobachtet werden und der Einfluss des Pumpspeicherbetriebs abgeschätzt werden. In der vorliegenden Studie wurde am Triebwasserweg des Grimsel 2 Kraftwerks über acht Monate ein Trübungsmonitoring betrieben, wobei die Echtzeitdaten sowohl vor Ort, wie auch über eine Internetverbindung am Institut einsehbar waren.

2.1 Pumpspeicherkraftwerk Grimsel 2

Das Einzugsgebiet der Aare in der Region Oberhasli, Schweiz, ist Teil eines komplexen Wasserkraftssystems mit acht grösseren Stauseen und neun Kraftwerken. Bewirtschaftet von den Kraftwerken Oberhasli AG (KWO) stehen dort rund 8% der installierten Leistung von schweizer Speicherkraftwerken bereit und es werden rund 10% der elektrischen Energie des Landes produziert.

Das Pumpspeicherwerk Grimsel 2 (Abbildung 1) nutzt seit 1982 das Gefälle zwischen den beiden Stauseen Oberaar (Oa) und Grimsel (Gr). Das Oberbecken Oberaarsee liegt auf 2303 m ü.M. und stellt ein Speichervolumen von $V_{Oa} = 57 \times 10^6 \text{ m}^3$ zur Verfügung, der Grimselsee auf 1909 m ü.M. beinhaltet $V_{Gr} = 95 \times 10^6 \text{ m}^3$. Im Turbinierbetrieb beträgt der Abfluss zu Spitzenzeiten bis zu $Q_{Turb} = 93 \text{ m}^3/\text{s}$ (Oa – Gr), während im Pumpbetrieb maximal $Q_{Pump} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ in den Oberaarsee zurückfliessen. Jährlich werden rund 600 bis $700 \times 10^6 \text{ m}^3$ zwischen den beiden Stauseen hin- und herbewegt.

Die beiden Wasserfassungen in Oberaar- und Grimselsee sind durch einen z.T. gepanzerten Triebwasserweg von rund 5 km Länge verbunden. Von der Fassung im Oberaarsee führt ein Druckstollen zum Wasserschloss Kessiturm, von wo aus ein geneigter Druckschacht zum Kraftwerk Grimsel 2 führt. Die Wasserfassung im Grimselsee ist ein zylinderförmiges, seitlich offenes Bauwerk mit einem dichten Rechen, der die ein- und ausströmenden Wassermassen gleichmässig über den gesamten Querschnitt verteilen soll (VAW, 1982). Im Oberaarsee besteht die Fassung aus einem trompetenförmigen Ein- und Auslaufbauwerk. Das unterirdische

Kraftwerk ist mit vier unabhängigen Pump-Turbinen ausgerüstet, die insgesamt eine installierte Leistung von 350 MW bereitstellen.

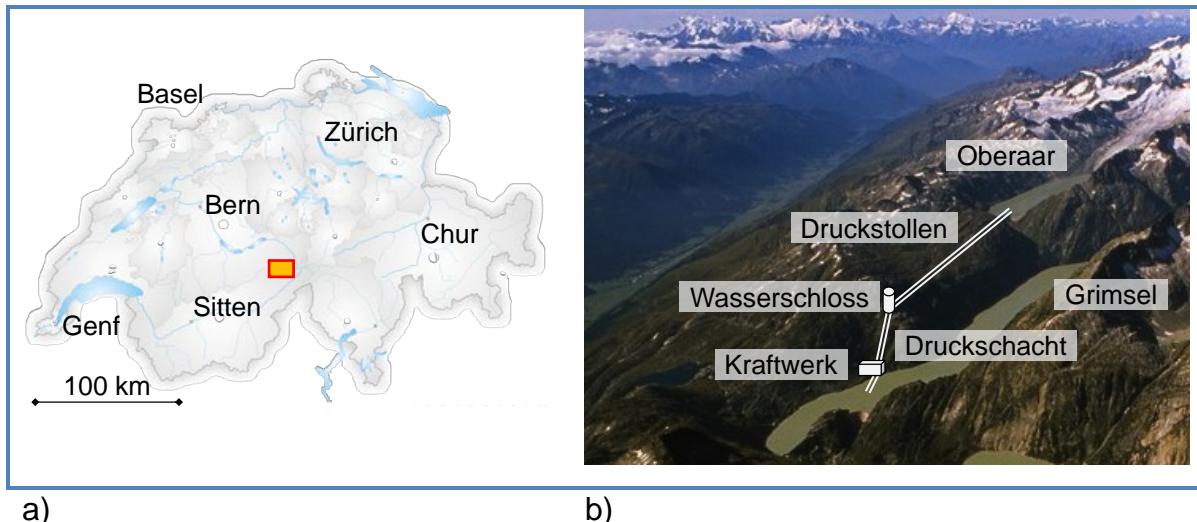


Abbildung 1. Lage (a) und Hauptelemente (b) des Pumpspeicherwerks Grimsel 2

Die Einzugsgebiete der beiden Seen sind teils vergletschert. Oberflächenerosionsraten von 1 bis 2 mm/Jahr führen zu einem hohen Sedimenteintrag. In den drei Hauptspeichern der KWO (Oberear-, Grimsel- und Räterichsbodensee) gelangen jährlich nur 40 kt unterstrom in die Aare, während rund 230 kt/Jahr zurückgehalten werden (Anselmetti *et al.*, 2007). Die Eigenschaften der Schwebstoffe im Grimselgebiet wurden in der Vergangenheit u.a. von Blaser und Bühler (2001), Bühler und Siegenthaler (2003) sowie Bonalumi *et al.* (2011) untersucht, um die hydro-mechanischen Auswirkungen der Pumpen und Turbinen auf die Trübung, den Feststofftransport im System und die Schwebstoffverteilung zwischen den Seen mit und ohne Pumpspeicherbetrieb zu beschreiben. Die Korngrößen liegen zwischen $d_s = 0.2$ und $40 \mu\text{m}$, mit einem mittleren Durchmesser von $d_{s,m} = 3$ bis $4 \mu\text{m}$. Je nach Jahreszeit variiert die Schwebstoffkonzentration zwischen $C = 50$ und 200 mg/l in den Tiefenwasser der beiden Seen, wobei speziell der Grimselsee im Sommer einen erhöhten Schwebstoffgehalt aufgrund Gletscherschmelze und Trübestromen aufweisen kann (Bonalumi *et al.*, 2011). In Extremfällen können Konzentrationen von $C = 700 \text{ mg/l}$ nahe der Spittellammsperre auftreten (Bühler *et al.*, 2005).

2.2 Strömungsverhältnisse nahe der Ein- und Auslaufbauwerke

Das Absetzen von Feinsediment vor Wasserfassungen wird u.a. von den Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen im Nahbereich der Bauwerke beeinflusst. Der Eintrag an turbulenten kinetischer Energie durch den Turbinenbetrieb ist im Falle des Grimselsees rund 25 mal höher als jener, der auf natürliche Weise durch Wind verursacht wird. Die thermische Schichtung wird dadurch beeinflusst und

das Wasser vor der Fassung durchmischt. Deshalb wurde in Feldmessungen untersucht, wie der Pumpspeicherbetrieb des Grimsel 2 Kraftwerks die Wassermassen im Grimselsee bewegt. Gleichzeitig sollte die Funktionstüchtigkeit der Messinstrumente für eine allfällige Langzeitüberwachung in alpinen Speichern getestet werden.

Während je drei Wochen im September und November 2008 wurden jeweils drei Acoustic Doppler Velocity Profilers (ADCP) auf dem Seegrund platziert, die im Fünfminutentakt auf jedem Meter entlang der Wassersäule eine Ost- und eine Nordkomponente der Strömungsgeschwindigkeit aufzeichneten. Nach der Auswertung der Daten konnten so ein- und zweidimensionale Strömungsbilder erstellt und mit den Betriebsabflüssen verglichen werden. Das Instrument sowie die drei Messlinien, die je 3.5, 4.5 und 7.5 Aufzeichnungstagen entsprechen, sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Messpositionen wurden aufgrund der Seetopographie und der geografischen Hauptausrichtungen des Stausees gewählt.

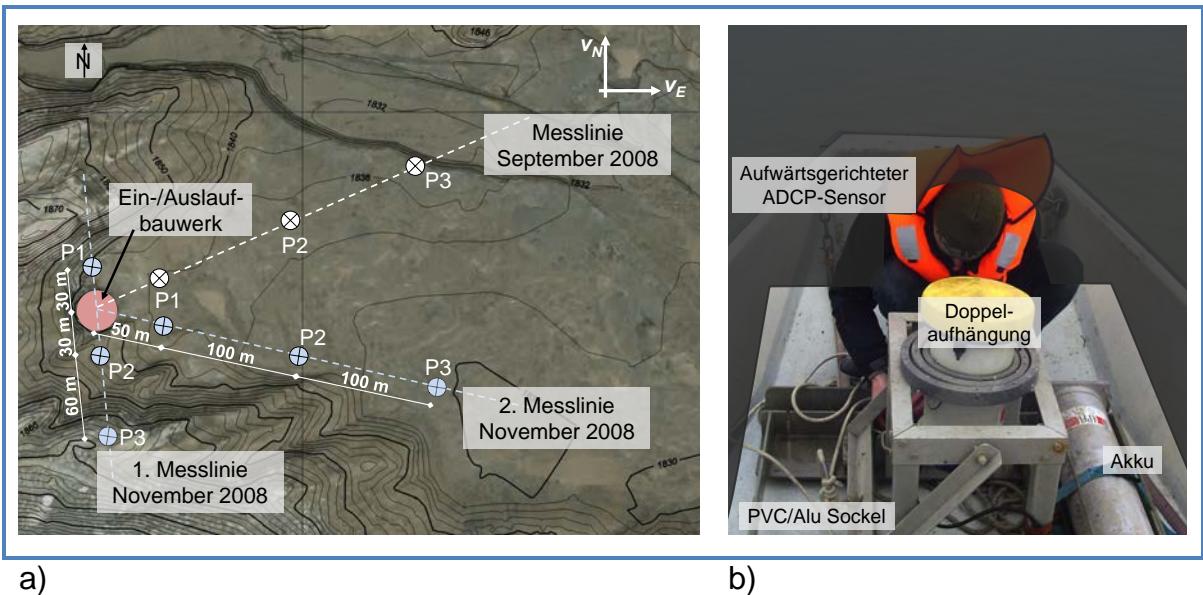


Abbildung 2. Lage (a) und Hauptelemente (b) des Pumpspeicherwerks Grimsel 2

Im Pumpbetrieb wurde nur ein sehr geringer Einfluss in unmittelbarer Nähe der Fassung festgestellt, die Strömungsgeschwindigkeiten lagen bei rund 6 cm/s in 30 m und bei 2 cm/s in 50 m Entfernung zum Rechen (Abbildung 3b, d, f). Für alle drei Messlinien zeigten die 2D-Profilen Geschwindigkeitsvektoren, die in Richtung Fassung gerichtet sind. Im Turbinierbetrieb wurden wesentlich höhere Geschwindigkeiten gemessen, mit Werten bis zu 12 cm/s in 150 m Entfernung zum Auslaufbauwerk (Abbildung 3a, c, e). Die stärkste Strömung wurde dabei in der E-SE ausgerichteten Messlinie beobachtet. Im Norden und Süden des Bauwerks werden die Wassermassen an den relativ steilen Felswänden ab- und entlang des flachen Seegrundes in Richtung Spittellammsperre gelenkt.

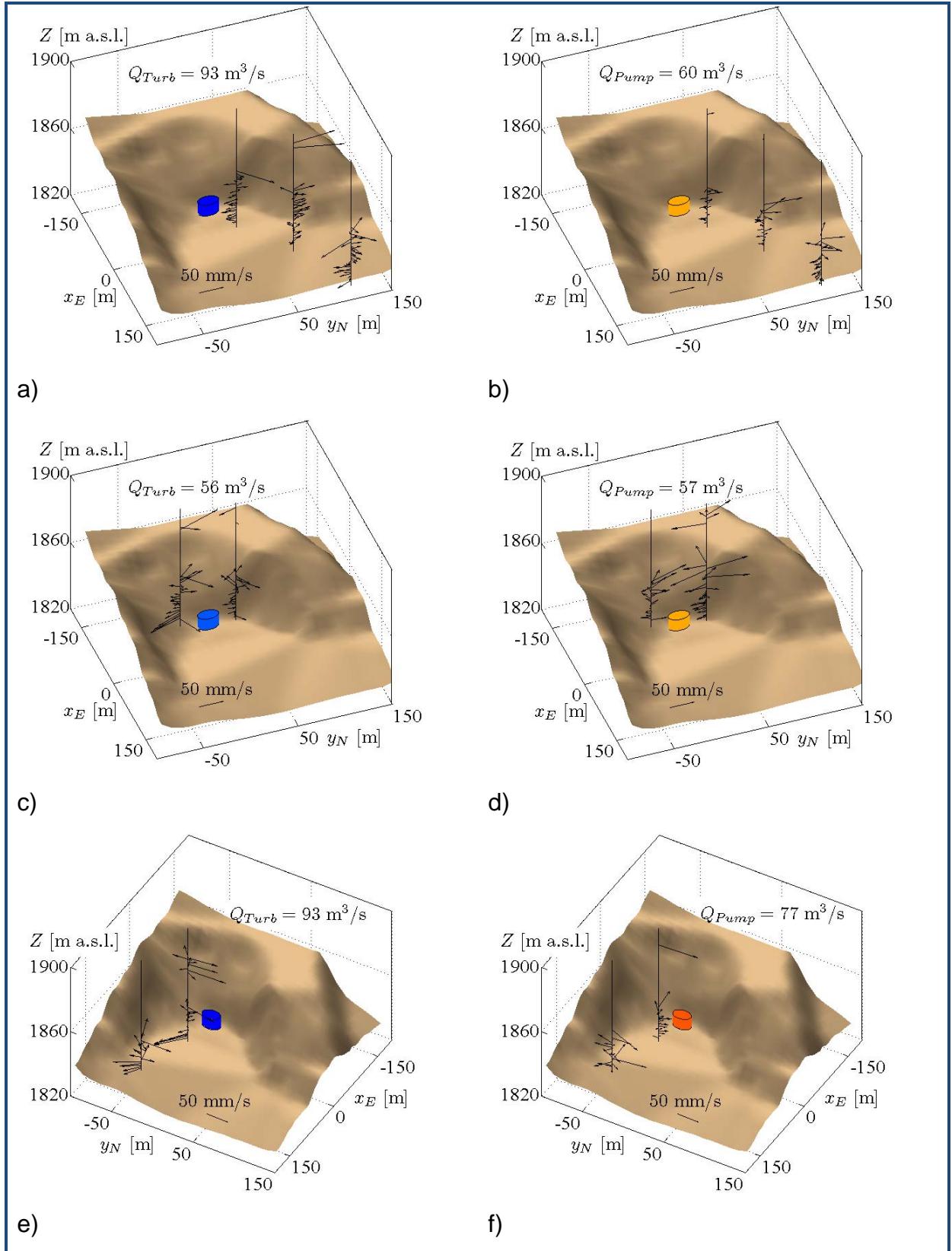


Abbildung 3. 2D Geschwindigkeitsprofile nahe der Wasserfassung Grimsel 2 während Turbinier- (In-Sequenz, links) und Pumpbetrieb (Out-Sequenz, rechts) am 17. September 13.20h (a), 19. September 05.00h (b), 7. November 10.30h (c) und 05.50h (d), 17. November 18.20h (e) und 02.10h (f)

Etwa fünf bis zehn Meter oberhalb des Grundes wurden Rückströmungen zur Fassung hin gemessen, die in der E-NE-Messlinie besonders ausgeprägt auftraten. Auch bei Nichtbetrieb waren die Wassermassen in Fassungsnähe stets in Bewegung, klare Tendenzen bezüglich Strömungsrichtungen konnten dabei jedoch nicht beobachtet werden. Ebensowenig erlaubten die ADCP-Messungen, den zeitlichen Aufbau der Strömungsfelder detailliert aufzuzeigen.

Deshalb wurden die den Feldmessungen entsprechenden Pumpspeicherzyklen in einem dreidimensionalen numerischen Modell in ANSYS-CFD simuliert. Die numerischen Resultate bildeten die im Prototyp beobachteten Strömungsphänomene adäquat nach und bestätigten die Hauptrichtungen und die Größenordnung der gemessenen Geschwindigkeitsprofile. Das Modell berechnete leicht höhere Geschwindigkeiten, die sich mit der grösseren zeitlichen Kontinuität erklären lässt. Stationäre Bedingungen, d.h. ein zeitlich stabiles Strömungsbild, wurden nach rund 150 Minuten kontinuierlichen Turbinierbetriebs erreicht (Abbildung 4a). Eine Sensitivitätsanalyse bezüglich des Temperaturunterschiedes zwischen einströmendem und stagnierendem Wasser zeigte, dass ein im Prototyp gemessener Unterschied von $\Delta T_w = +/- 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ keinen wesentlichen Einfluss auf die Strömungsbedingungen hat.

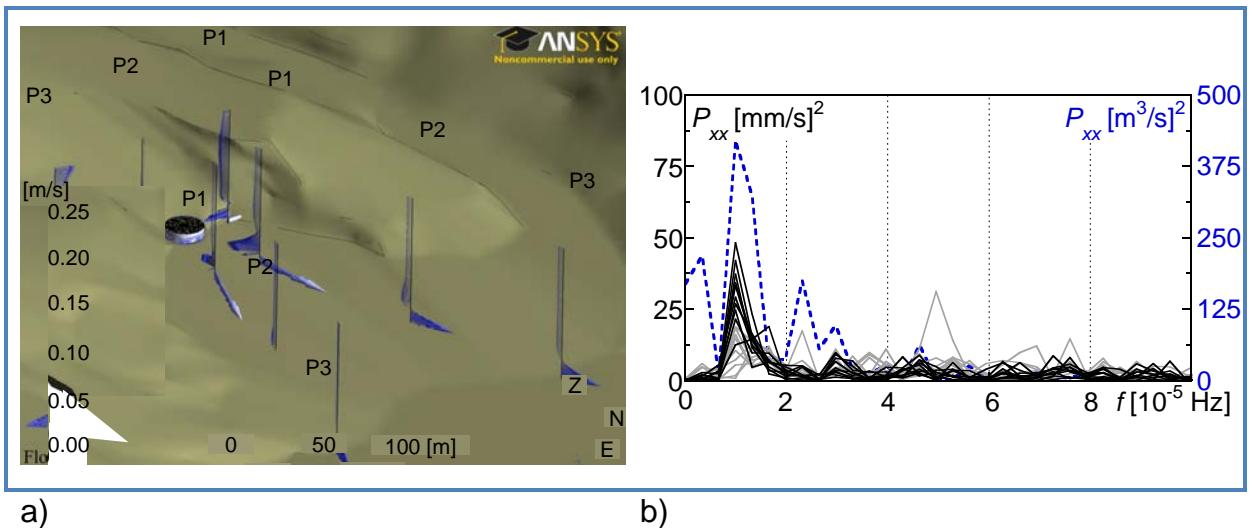


Abbildung 4. Geschwindigkeitsprofile im numerischen Modell nach 150 Minuten Turbinierbetrieb um Maximalabflusswerte (a) und Powerspektren der Abfluss- und Geschwindigkeitszeitreihen für das Messinstrument P1 im September 2008 (b)

Grosse Wasservolumen können durch Wind in Eigenschwingung geraten, deren Frequenz von Tiefe und Oberfläche des Sees abhängt. Um aufzuzeigen, dass die aufgezeichneten Geschwindigkeitsdaten nicht von solchen internen Schwingungen (sog. Seiches) beeinflusst wurden, sondern mit dem Pumpspeicherbetrieb korrelieren, wurde eine Spektralanalyse der aufgezeichneten Daten durchgeführt. Die

Hauptperiode der Geschwindigkeitskomponenten entsprachen derjenigen der Betriebszyklen von 1 Tag, wobei vor allem die Ostkomponente stark mit dem Pumpspeicherbetrieb korreliert (Abbildung 4b) und die Nordkomponente mit einer wesentlich geringerer Amplitude reagiert. Frequenzen von Schwingungen des gesamten Sees waren dabei nicht vorhanden. Dies zeigte auf, dass die Geschwindigkeitsprofile ausschliesslich von den Pumpspeichersequenzen verursacht wurden, die ungestört von Eigenschwingungen des Sees gemessen wurden.

2.3 Transport von Feinsedimenten zwischen zwei Stauseen

Um den Feststofftransport zwischen den beiden Seen Oberaar und Grimsel zu studieren wurde der Druckschacht des Kraftwerks in der Nähe des Wasserschlusses mit einer Trübungsmessstelle ausgerüstet. Während rund acht Monaten konnte so die Partikelkonzentration des gepumpten und turbinierten Wassers kontinuierlich aufgezeichnet werden. Ziel der Messungen war, die langfristige Entwicklung der Sedimentkonzentration zu überwachen, um eine Sedimentbilanz des Systems zu errechnen und allfällige kurzfristige durch den Pumpspeicherbetrieb hervorgerufenen Veränderungen der Sedimentkonzentration festzustellen.

Von der Entnahmestelle am Druckschacht wurden rund 1 bis 2 l/s Wasser durch eine vorgefertigte Messanordnung geleitet, wo in einem Messzylinder eine Zuellig Cosmos®25-E Sonde die Trübung mass (Abbildung 5a). Via einem *b-line II* Messverstärker gelangte ein elektronisches Signal zur Akquisitionskarte und von dort aus an einen Industriecomputer, wo die aufgezeichneten Daten gespeichert wurden und in Echtzeit einsehbar waren (Abbildung 5b). Via Internet konnte auf die Messresultate zugegriffen und das Messsystem betrieben und bei Bedarf angepasst werden.

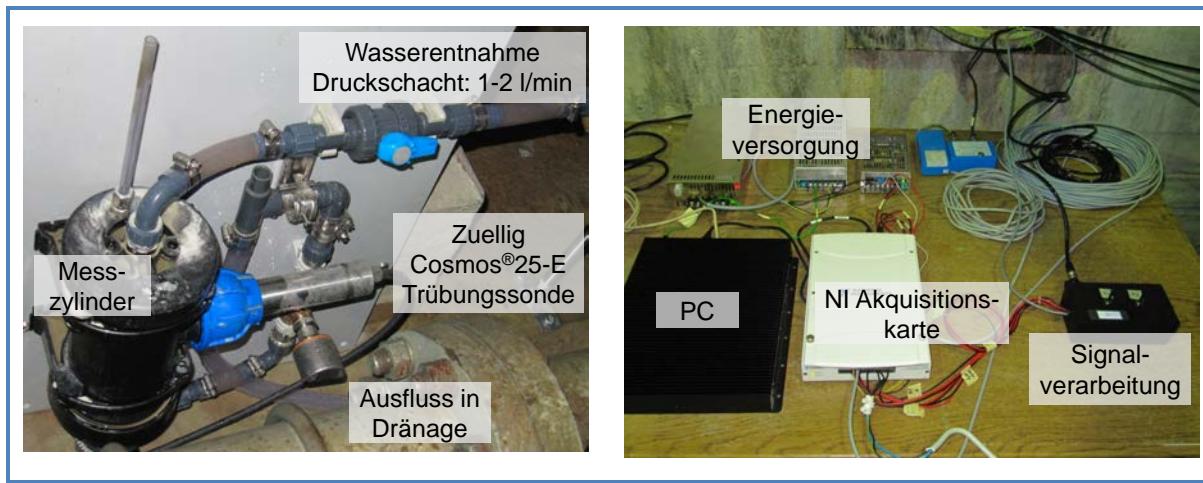


Abbildung 5. Foto der Trübungsmessstelle nahe des Druckschachts (a) und der eingerichteten Datenakquisition (b) im Kraftwerk Grimsel 2

Das Trübungssignal wurde mithilfe der Kalibrierwerte in eine Feststoffkonzentration umgerechnet und wöchentliche Monitoringgrafiken zeigten die Entwicklung des Partikelgehalts im Drucksystem der Anlage. Ende 2010 betrugen die Monatsmittel der Konzentrationswerte zwischen $C_m = 80$ und 90 mg/l , bevor sie zwischen Februar und April 2011 auf $C_m = 55$ bis 60 mg/l sanken. In den Wintermonaten ist die Sedimentzufuhr aufgrund des schnee- und eisbedeckten Einzugsgebietes bekanntlich klein. Nach der Schneeschmelze im Frühling wurden im System Grimsel 2 wieder erhöhte Sedimentkonzentrationen von rund $C_m = 80 \text{ mg/l}$ gemessen.

Im Verlaufe der Messperiode wurden auch kurzfristige Schwankungen der Sedimentkonzentrationen aufgezeichnet. Der Quotient zwischen C_{Pump} und C_{Turb} sagte aus, wieviel mehr Sediment in die eine oder andere Betriebsrichtung transportiert wurde. Zwischenzeitlich wurden im Pumpbetrieb 16% höhere Konzentrationen gemessen, als in den vorhergehenden oder folgenden Turbiniersequenzen ($C_{\text{Pump}}/C_{\text{Turb}} = 1.16$). Diese kurzfristigen Veränderungen in der Sedimentkonzentration korrelieren mit den Betriebsabflüssen und wurden sowohl bei hohen, wie auch tiefen Monatsmitteln C_m beobachtet. Eine wichtige Rolle spielen dabei die Pegel der beiden Seen, erhöhte Sedimentkonzentrationen im Pumpbetrieb wurden bei sehr tiefem Grimselseestand gemessen, während ein tiefer Pegel des Oberaarsees höhere Konzentrationswerte im Turbinierbetrieb hervorrief.

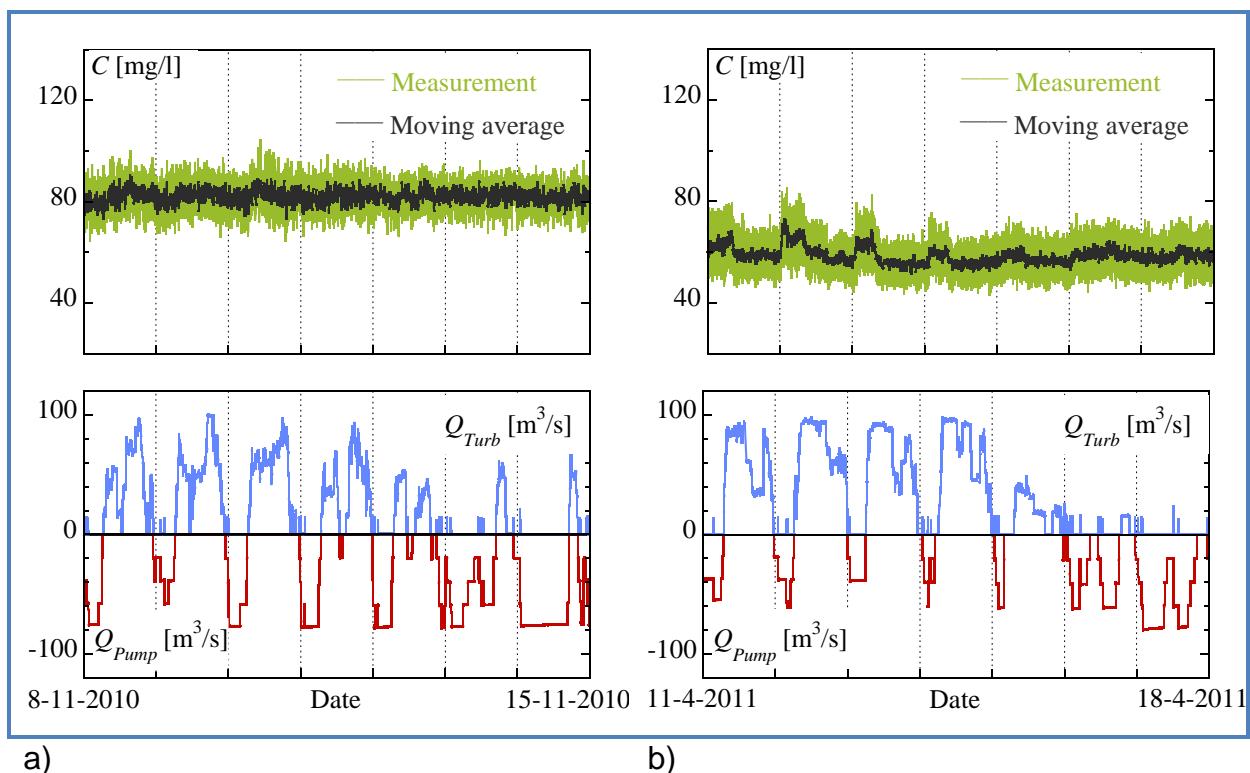


Abbildung 6. Entwicklung der gemessenen Sedimentkonzentration C und Betriebsabflüsse a $Q_{\text{Pump}}, \text{Turb}$ während den Messperioden vom 8. bis 15.11.2010 (a) und vom 11. bis 18.4.2011 (b)

Über die gesamte Messdauer von rund acht Monaten wurden etwas mehr als 45'000 t Feinsediment durch den Pumpspeicherbetrieb hin- und herbewegt. Bei einer Dichte des Sedimentgemisches von 1'500 kg/m³ entspricht dies einem Volumen von rund 30'000 m³, wobei zu beachten ist, dass Aufzeichnungen in den Sommermonaten und damit der Zeit maximalen Sedimenteintrags aus dem Einzugsgebiet fehlen. Ein Vergleich mit den von Anselmetti *et al.* (2007) berechneten Absetzraten von 22'000, resp. 74'000 m³/Jahr im Oberaar- und Grimselsee zeigt, wie beträchtlich die Sedimentvolumen sind, die alleine durch den Kraftwerksbetrieb im System bewegt werden. Nichtsdestotrotz war die Sedimentbilanz über die Messperiode von Oktober 2010 bis Juni 2011 ausgeglichen, es fand also kein Nettoaustausch an Sediment zwischen Oberaar- und Grimselsee statt.

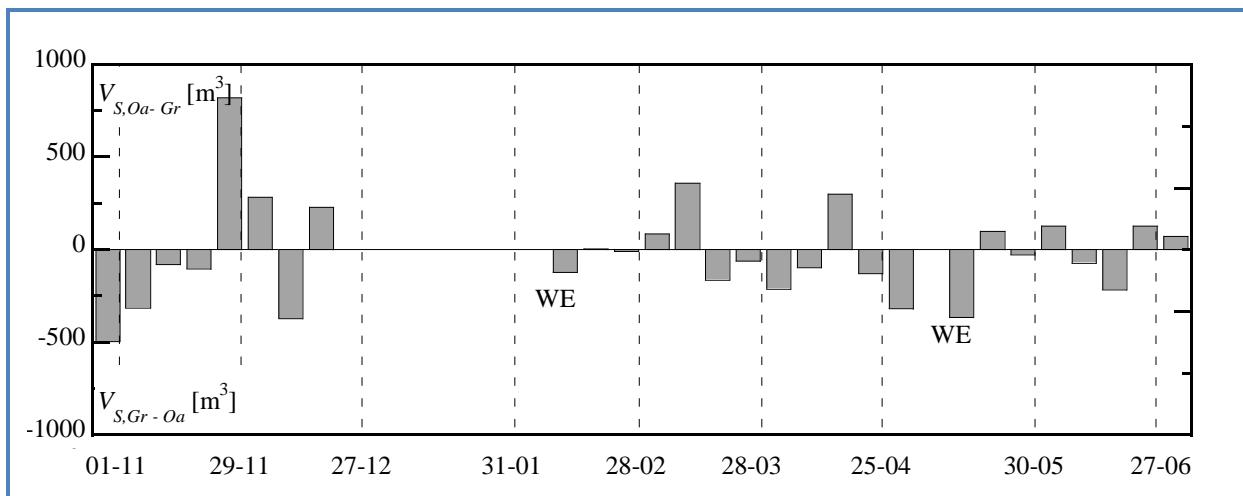


Abbildung 7. Während Pump- (Gr - Oa) und Turbinierbetrieb (Oa – Gr) transportierte Sedimentvolumen vom November 2010 bis Juni 2011

3. Versuche zum Absetzverhalten von Feinsediment unter dem Einfluss von Pumpspeichersequenzen

Die Laborversuche hatten zum Ziel, die durch den Pumpspeicherbetrieb verursachten Strömungen sowie das Absetzverhalten von Feinsediment in Stauseen, resp. im Nahbereich der Wasserfassung zu beschreiben. Dazu wurden verschiedene In-Out-Zyklen zwischen zwei Becken gefahren und die daraus resultierenden Geschwindigkeitsfelder und Trübungswerte gemessen.

3.1 Versuchsstand und Messeinrichtung

Der Versuchsstand bestand aus zwei rechteckigen Becken, zwischen welchen Wasser hin- und hergepumpt werden konnte. Im 12 m³ fassenden Hauptbecken der Anlage (sog. main basin MB) wurde ein trompetenförmiges Ein-/Auslaufbauwerk eingebaut. Das Mischbecken (mixing tank MT) stellte die für die Versuche nötige

Wassermenge zur Verfügung, so dass das Modell in geschlossenem Kreislauf funktionieren konnte.

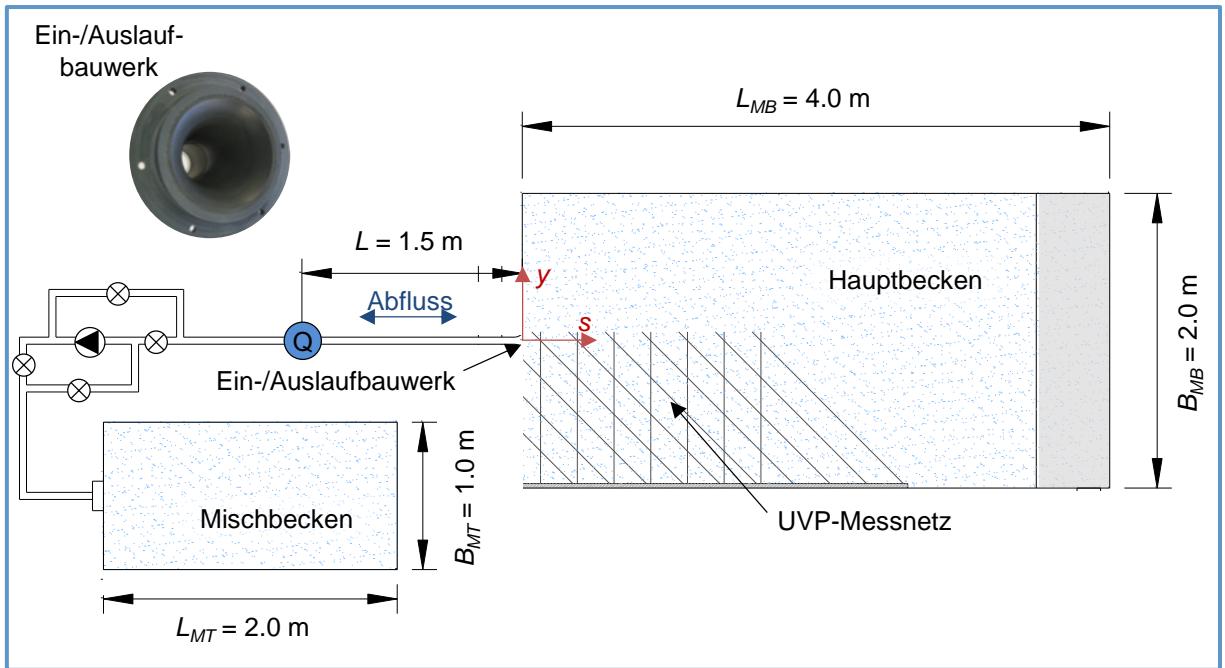


Abbildung 8. Grundriss und Hauptelemente der Versuchsanlage

In beiden Becken massen zwei Trübungssonden kontinuierlich die Partikelkonzentration und erlaubten so, die Sedimentbilanz (SB) zwischen den Becken sowie den in Suspension gehaltenen Sedimentanteil (suspended sediment ratio SSR) in beiden Testvolumen zu errechnen.

Die Strömungsverhältnisse im Hauptbeckens wurden mit 2 MHz Ultrasonic Velocity Profilers (UVP, MetFlow SA (SA, 2000), Switzerland) gemessen. 17 Sonden zeichneten in einem Quadranten horizontale 2D Geschwindigkeitsfelder auf und erlaubten so, die kinetische Energie des Testvolumens zu bestimmen.

3.2 Parameterstudie

Die experimentellen Parameter wurden unter dem Kriterium der Froudschen Ähnlichkeit ausgewählt, so dass das Verhältnis aus Trägheits- und Gewichtskräften im Modell demjenigen im Prototyp entspricht. Die Reynoldszahl des Ein-/Auslaufbauwerks lag bei $7'560 \leq Re \leq 29'180$ und war damit turbulent für alle getesteten Abflüsse.

Längen wurden mit der Breite des Hauptbeckens B_{MB} normiert, Geschwindigkeiten mit der Fließgeschwindigkeit in der Druckleitung $v_0 = Q_{IN,OUT}/A$ und Zeiten mit der sog. mittleren Aufenthaltszeit $t_m = V_{MB}/Q_{IN,OUT}$. Letztere wurde von Stefan and Gu (1992) für Mixvorgänge durch Wasserstrahle vorgeschlagen und kann auch für existierende oder geplante Pumpspeicherkraftwerke errechnet werden. Im

Versuchsstand liegt die mittlere Aufenthaltszeit zwischen 8'000 und 30'000 s, also rund 2 bis 8.5 h.

3.2.1 Feinsediment

Absetzvorgänge werden vom umgebenden Fluid und den Eigenschaften der Partikel beeinflusst van Rijn (1984). Im Experiment wurden die Feinsedimente durch gemahlene Nusssschalen mit homogener Korngrösse simuliert, welche sich für Versuche bezüglich Verlandungsproblemen als ideal erwiesen haben (Kantoush *et al.*, 2008; Jenzer Althaus, 2011). Mit einer spezifischen Dichte von $\rho_s = 1480 \text{ kg/m}^3$ und einem mittleren Korndurchmesser von $d_m = 121 \mu\text{m}$ erlaubte das Material, in Realität vorkommende Verhältnisse zwischen Fliess- und Absetzgeschwindigkeiten zu reproduzieren.

Da die Sedimentkonzentration die Absetzgeschwindigkeit beeinflusst, wurden drei verschiedene Anfangskonzentrationen in den Becken untersucht.

3.2.1 Magnitude und Frequenz der In-Out-Zyklen

Unter Berücksichtigung der Beckenvolumen, der Bemessung des Ein- und Auslaufbauwerks (Jenzer Althaus, 2011) sowie realen Pumpspeicherzyklen wurden fünf verschiedene Abflüsse zwischen $Q = 0.3$ und 1.1 l/s getestet (Abbildung 9a bis e).

Die ursprüngliche Zyklendauer wurde in Klarwasserversuchen und numerischen 3D-Simulationen ermittelt. Die Zeit, die benötigt wird, um während In-, Out- oder Nichtbetrieb-Sequenzen stationäre Strömungsbedingungen und damit maximale und konstante kinetische Energie im Becken zu erreichen, wurde als sog. "time to peak" t_P definiert. Diese Dauer hängt vom Abfluss ab und führte bei fünf In-Out-Zyklen und einer Zyklfrequenz von $Kt_P = 1.0$ zu einer absolute Versuchsdauer $10t_P$ zwischen 2 h 15 min und 11 h 20 min.

Zusätzlich wurden schnellere Zyklen mit $Kt_P = 0.6$ und 0.8 simuliert, also mit schnelleren Wechseln zwischen den beiden Betriebsrichtungen und damit einer Reduktion der Zeit, in welcher das Geschwindigkeitsfeld im Becken aufgebaut werden kann. So wurden keine stationären Bedingungen erreicht während einer In- oder Out-Sequenz. Schliesslich wurden langsamere Zyklen mit $Kt_P = 1.2$ getestet, also mit verlängerter Dauer des stationären Strömungszustands, bevor die Betriebsrichtung wieder geändert wurde (Abbildung 9f bis h).

Die studierten Abflüsse und Frequenzen decken eine recht grosse Bandbreite von langsamen, schnellen, starken und schwachen Pumpspeichersequenzen ab. Selbstverständlich sind reale Pumpspeicherdiagramme bezüglich Dauer und Abflusswert weitaus unregelmässiger, weisen jedoch ebenfalls zyklisches Verhalten auf, je nachdem ob es sich um Tages-, Wochen- oder Jahresspeicher handelt. Zwei zusätzliche Szenarien mit einer unterschiedlichen relativen Sequenzdauer $t_{P,IN}/t_{P,OUT}$ tragen dieser Gegebenheit Rechnung (Abbildung 9i und j).

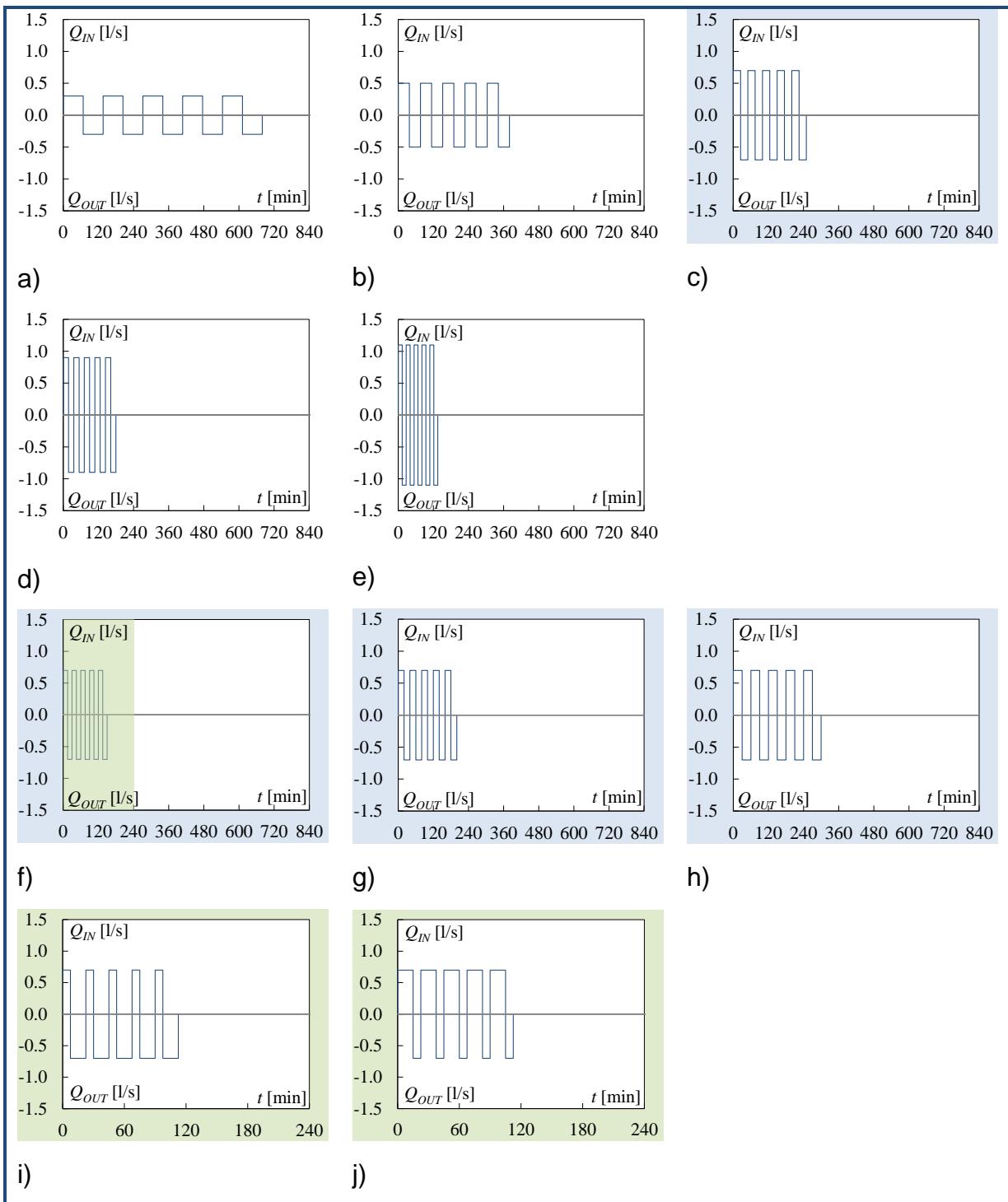


Abbildung 9. Auswahl von untersuchten In-Out-Sequenzen. Variation des Abflusses $Q = 0.3$ (a), 0.5 (b), 0.7 (c), 0.9 (d) und 1.1 l/s (e) für eine Zyklenfrequenz von $Kt_P = 1.0$. Variation der Zyklenfrequenz $Kt_P = 0.6$ (f), 0.8 (g) und 1.2 (h) für einen Abfluss von $Q = 0.7 \text{ l/s}$. Variation der relativen Zyklendauer $t_{P,IN}/t_{P,OUT} = 0.5$ (i) und 2.0 (j) für $Q = 0.7 \text{ l/s}$ und $Kt_P = 0.6$

Schlussendlich konnte die Wasserfassung in drei verschiedene Positionen z_i/B_{MB} über dem Beckenboden angebracht werden, um den Einfluss der Lage des Bauwerks in den Laborversuchen zu untersuchen. Für einen Abfluss von $Q = 1.1 \text{ l/s}$ wurde das Bauwerk von der ursprünglich in Beckenmitte gelegenen Position $z_i/B_{MB} = 0.25$ auf $z_i/B_{MB} = 0.125$ und 0.375 verlegt.

3.3 Resultate

3.3.1 Strahleigenschaften und 2D-Strömungsfelder

Eine erste Versuchsreihe fokussierte sich wie erwähnt auf den Beschrieb der Strömungsbedingungen im Hauptbecken und der Entwicklung der kinetischen Energie während der In-Out-Zyklen. 1D-UVP-Messungen erlaubten, den bei In-Sequenzen ins Becken eintretenden Wasserstrahl zu charakterisieren und mit Angaben in der Literatur zu vergleichen. Für die gegebenen Becken- und Fassungsgeometrien hat der Strahl einen sehr kurzen Kern, in dem die Fließgeschwindigkeit noch der Austrittsgeschwindigkeit, resp. der Anströmgeschwindigkeit in der Druckleitung entspricht. Danach folgt eine rasche Abnahme der Achsengeschwindigkeit, welche ähnlich der von Abramovich (1963), Revill (1992) und Jirka (2004) gegebenen Werten entspricht.

Eine Analyse horizontaler 2D-Geschwindigkeitsfelder und die Berechnung der kinetischen Energie im Becken erlaubte die vom Abfluss abhängige "time to peak" zu definieren, die zwischen $t_P/t_m = 0.099$ und 0.136 variierte. Die auf Höhe der Wasserfassung ebenfalls mit UVP aufgenommenen horizontalen Geschwindigkeitsfelder zeigen unabhängig vom Abfluss jeweils einen oszillierenden Wasserstrahl und Rotationsströmungen bei In-Sequenzen. Zu Beginn der Out-Sequenzen ist jeweils noch der Einfluss der vorangehenden In-Sequenz messbar. Mit Ausnahme der unmittelbaren Nähe zum Einlaufbauwerk, wo sehr tiefe Geschwindigkeiten zur Fassung hin gemessen wurden, waren kaum Tendenzen bezüglich systematischen Bewegungen des Wasservolumens feststellbar. Ober- und unterhalb der Fassungsachse hingegen konnte für hohe Abflüsse bei In-Sequenzen ebenfalls Rotationsströmungen gemessen werden die für kleinere Abflüsse nicht entstanden.

Die Zyklennagnitude beeinträchtigte im Wesentlichen die kinetische Energie im Becken, ein Abfluss von $Q = 1.1 \text{ l/s}$ generiert rund dreimal soviel Energie wie der Minimalabfluss von 0.3 l/s . Numerische Simulationen schätzten diesen Unterschied sogar mit einem Faktor 10 ab. Die Zyklenvorzeit spielt eine untergeordnete Rolle, während eine asymmetrische Position der Wasserfassung näher an der Oberfläche oder am Beckengrund ebenfalls höhere Energilevels hervorruft.

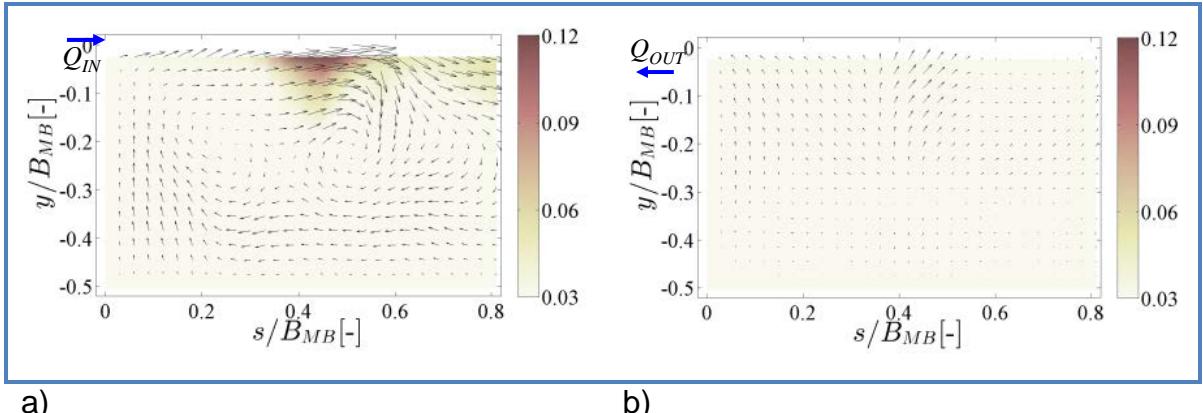


Abbildung 10. Horizontales Geschwindigkeitsfeld [m/s] auf Fassungshöhe $z_i/B = 0.25$ während einer In- (a) und einer Out-Sequenz für einen Abfluss von $Q = 1.1 \text{ l/s}$ und eine Zyklusfrequenz von $K_t = 1.0$

3.3.2 Absetzverhalten der Feinsedimente

Ein Referenzversuch ohne In-Out-Sequenzen diente der Definition des Absetzverhaltens der Feinsedimente. Danach wurde der Einfluss von Pumpspeichersequenzen Anhand des sog. “suspended sediment ratio SSR“ und des sog. “increased suspended sediment ratio INC_{SSR}“ beschrieben:

$$SSR(t) = \frac{\sum M_{\text{susp}}(t)}{M_0} = \frac{M_{\text{susp},MB}(t) + M_{\text{susp},MT}(t)}{M_{0,MB} + M_{0,MT}} \quad (\text{Gleichung 1})$$

wobei M_{susp} : Masse der Feinsedimente in Suspension [g], und M_0 : ursprünglich dem System beigefügte Sedimentmasse [g].

$$INC_{\text{SSR}}(t) = \frac{SSR(t) - SSR_{\text{Ref}}(t)}{SSR_{\text{Ref}}(t)} \quad (\text{Gleichung 2})$$

Die beiden Werte beschreiben also zum einen den normierten Anteil an Material, der während der Versuchsdauer in Suspension bleibt, und zum anderen die Effizienz der getesteten In-Out-Sequenzen im Vergleich zu einem Nichtbetrieb-Szenario.

Die Resultate der Laborversuche zeigten, dass sich in fast jedem Fall rund 60% der Feinsedimente in einer ersten Phase während einer Dauer von $t/t_m = 0.2$ (einem bis zwei In-Out-Zyklen, je nach Abfluss) absetzen. Die Absetzkurve folgt einer Potenzfunktion, wobei nur ein unwesentlicher Einfluss der ursprünglichen Konzentration im System C_0 gemessen wurde.

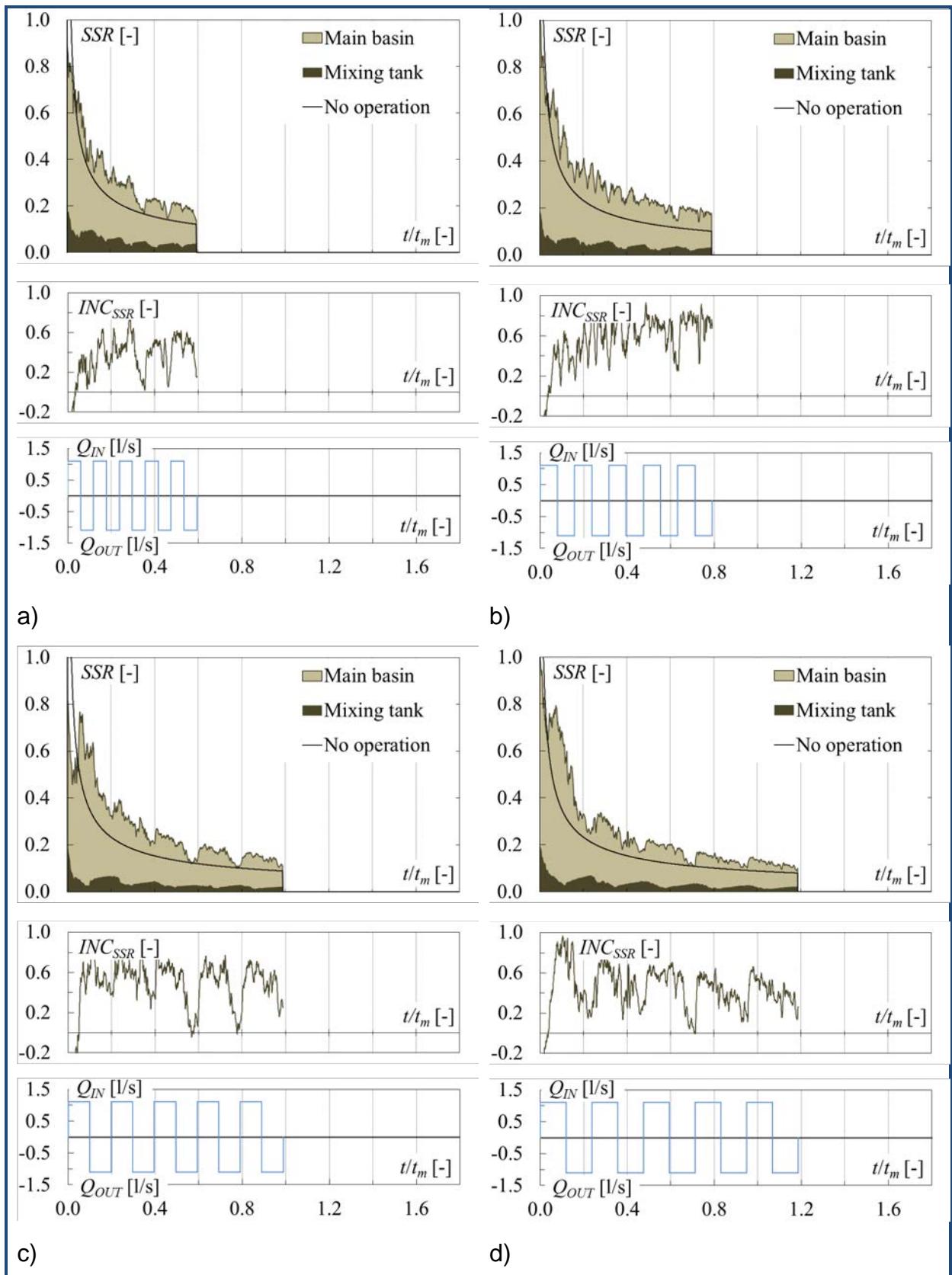


Abbildung 11. Normierter Sedimentanteil in Suspension SSR , relative Effizienz INC_{SSR} und Abfluss Q in Funktion der normierten Zeit t/t_m für $C_0 = 0.8 \text{ g/l}$, $Q = 1.1 \text{ l/s}$ und $Kt_P = 0.6$ (a), 0.8 (b), 1.0 (c) und 1.2 (d)

Hohe Abflüsse kombiniert mit hoher Zyklenfrequenz führten zu maximalen SSR. In solchen Konfigurationen erreichte der Anteil des Feinsediments in Suspension um 50 bis 80% höhere Werte als bei Nichtbetrieb. Zudem korrelierte der zeitliche Verlauf der Effizienz der In-Out-Sequenzen mit den Betriebsabflüssen der Versuchsanlage (Abbildung 11). Tiefere Abflüsse führten ebenfalls zu 10 bis 40% höheren SSR-Werten im Vergleich zum Referenzversuch. Die Korrelation zwischen Abflussdaten und dem Absetzverhalten der Feinsedimente ist jedoch nicht mehr messbar.

Speziell in der ersten Absetzphase ist die Zyklenfrequenz ein Schlüsselfaktor für die Effizienz der Pumpspeicherzyklen. Wenn zu Beginn schnelle In-Out-Sequenzen gefahren wurden, konnte der SSR wesentlich erhöht werden, insbesondere auch über längere Versuchsdauern mit bis zu zehn In-Out-Zyklen. So konnte der SSR auch nach $t/t_m = 1.6$ rund 60% über dem Referenzwert gehalten werden.

Die Positionen der Wasserfassung näher zur Wasseroberfläche und zum Beckengrund führten zu einer um 20% erhöhten Effizienz der Zyklen im Vergleich zur Lage des Bauwerks in Beckenmitte. Durch die asymmetrische Position entstehen vermehrt auch vertikale Rotationsbewegungen der Wassermassen, welche erlauben, mehr Feinsediment in Schwebeflüssigkeit zu halten.

3.3.2 Sedimenttransport zwischen den Becken

Die Sedimentbilanz des Systems entspricht der normierte Sedimentmasse, die während eines Versuchs von einem ins andere Becken transportiert wurde. Sie errechnete sich also durch die Differenz zwischen der Masse an Feinsediment die ins Hauptbecken eintritt, resp. letzteres wieder verlässt:

$$SB(t) = \frac{M_{S,IN}(t) - M_{S,OUT}(t)}{M_0} \quad (\text{Gleichung 3})$$

Auch wenn die transportierten Sedimentmassen aufgrund der In-Out-Zyklen beträchtlich sind, wird die Sedimentbilanz von den Betriebszyklen unwesentlich beeinflusst. Die gemessenen Werte zwischen $-0.03 < SB < 0.04$ für alle getesteten Konfigurationen liegen innerhalb des Messfehlers der Trübungssonden und sind vernachlässigbar. So bewegte der Pumpspeicherbetrieb viel Sediment zwischen den beiden Becken der Versuchsanlage hin und her, trug aber nicht zu einer Umverteilung der Sedimentanteile bei. Grundsätzlich war es die Betriebsrichtung der ersten Sequenz, die zu einer leicht positiven oder negativen Bilanz führte, da zu Beginn des Versuches die höchsten Konzentrationen vor den Fassungen vorhanden waren.

4. Schlussfolgerungen

Die Verlandung von Stauseen gefährdet die Betriebssicherheit und die Nachhaltigkeit von Speicherkraftwerken. Der Einfluss der stetig wechselnden Betriebsregimes von Pumpspeicherwerken auf die Verlandung von Stauseen wurde bisher verhältnismässig wenig erforscht. Die vorliegende Arbeit untersuchte deshalb die Auswirkungen von Pumpspeichersequenzen auf die Strömungsbedingungen und das Absatzverhalten von Feinsediment, mit dem Ziel, die vor die Wasserfassungen gelangenden Partikel möglichst lange in Suspension zu halten, um sie über den Triebwasserweg oder Spül- und/oder Auslassorgane abführen zu können.

4.1 Überwachung im Prototyp

Geschwindigkeitsmessungen vor einem Ein- und Auslaufbauwerk kombiniert mit numerischen Simulationen erlaubten

- die Haupströmungsrichtungen und Rückströmungen im Nahbereich der Wasserfassung aufzuzeigen,
- die Strömungsgeschwindigkeiten vor dem Bauwerk zu quantifizieren sowie
- die zeitliche Entwicklung der von Pumpspeichersequenzen hervorgerufenen Strömungsfeldern zu evaluieren.

Eine Schlüsselrolle kommt dabei der Topographie des Seegrundes zu, welche die Entstehung und die Hauptrichtungen von Strömungsfeldern und Zirkulationszellen im Stausee wesentlich beeinflusst. Die angewandte Messmethode (Acoustic Doppler Current Profilers) ist eine geeignete Überwachungsmethode, die dank der unabhängigen Energieversorgung bei Bedarf auch über mehrere Monate betrieben werden könnte.

Die Trübungsmessungen in der Druckleitung, resp. die Aufzeichnungen der Partikelkonzentration im bewirtschafteten Wasser eines Pumpspeicherwerks ermöglichen

- die frühzeitige Erkennung von erhöhten Sedimentkonzentrationen im System und damit vor den Wasserfassungen und
- bei einem Betrieb über mehrere Jahre das Erstellen einer Sedimentbilanz zwischen zwei Speichern.

Integriert in ein bestehendes oder neues Kontroll- und Überwachungssystem eines Kraftwerkbetreibers können sie zu einem aktiven Sedimentmanagement beitragen, sofern die Anlage die Möglichkeit bietet, die durch den Pumpspeicherbetrieb in Suspension gehaltenen Feinsedimente unterstrom via Spül- oder Auslassorgane auszutragen.

4.2 Resultate der Laborversuche

Nach Vorversuchen und der Bestimmung der initialen Dauer der In-Out-Sequenzen (time to peak) sowie einem Referenzversuch zum Absatzverhalten der Feinsedimente im Becken ohne Einfluss von Pumpspeicherzyklen, wurden fünf Parameter

systematisch in Experimenten untersucht, insbesondere Magnitude (Abfluss) und Frequenz der Zyklen.

Rund 60% der ursprünglichen Sedimentmasse setzt sich zu Beginn des Versuches ab. Diese erste Absetzphase kann durch In-Out-Zyklen hohen Abflusses und hoher Frequenz verlängert werden. Tiefe und mittlere Abflüsse halten 10 bis 40% mehr Feinsediment in Suspension als bei Nicht-Betrieb, hohe Abflüsse bis zu 60%. Erhöhte Zyklusfrequenz hat lediglich bei hohem Abfluss eine messbaren Einfluss, der Anteil an Sediment in Suspension kann dabei auf 80% gesteigert werden. Bei geringen Abflüssen bleibt dieser zwischen 10 und 40%. Sind die In-Sequenzen im Vergleich zu den Out-Sequenzen länger, sind auch die Phasen mit starker Turbulenz im Becken länger und der relative Sedimentanteil in Suspension kann erhöht werden. Bei asymmetrischer Position des Ein- und Auslaufbauwerks, sprich einer Lage näher an der Wasseroberfläche oder am Beckengrund, wird der relative Sedimentanteil in Suspension gegenüber einer Fassung in Beckenmitte um rund 20% gesteigert.

Für alle getesteten Szenarien wurde eine ausgeglichene Sedimentbilanz gemessen. Diese wurde jedoch kaum von den Pumpspeichersequenzen beeinflusst, auch wenn die hin- und hertransportierten Massen beträchtlich waren. Da sich ein Grossteil der Partikel zu Beginn der Versuche absetzte, entschied die Anfangsrichtung des Betriebs über eine leicht positive oder negative Sedimentbilanz.

4.3 Empfehlungen und Ausblick

Angewandt auf den realen Fall, in dem ein Trübestrom vor die Ein- und Auslaufbauwerke eines Pumpspeicherkraftwerks gelangt und sich dort Feinsedimente abzusetzen beginnen, kann davon ausgegangen werden, dass ein Grossteil des Absetzens in den ersten Stunden nach dem Trübeereignis erfolgt. Diese Phase kann durch den Kraftwerksbetrieb nicht ganzheitlich verhindert, jedoch gemäss den Resultaten aus den Laborversuchen durch schnelle und mit maximal möglichem Abfluss gefahrene Pumpspeichersequenzen verlängert werden. Im späteren Verlauf erlauben Sequenzen mit Maximalabfluss, die Feinsedimente länger in Schwebeflüssigkeit zu halten, um sie allenfalls kontinuierlich durch ein zusätzliches Bauwerk (Grundablass, Spülstollen) abführen zu können.

Bei sehr unterschiedlicher Sedimentkonzentration in den beiden Becken kann der Pumpspeicherbetrieb eine Verschiebung der Sedimentbilanz und somit einen künstlichen Sedimenteintrag in einen Stausee zur Folge haben. Der Einfluss ursprünglich verschiedener Konzentrationen könnte in künftigen Laborversuchen untersucht werden. Die Prototypmessungen zeigten keinen Nettoaustausch zwischen den beiden Stauseen, in anderen Studien wurde jedoch beobachtet, dass speziell in den Sommermonaten, wenn der natürliche Sedimenteintrag am höchsten ist, eine Umverteilung der Sedimente erfolgen kann. Ein Langzeitmonitoring der Feststoffkonzentration mithilfe des vorgeschlagenen Messsystems würde ein besseres Verstehen

und Abschätzen des Sedimentaustauschs zwischen zwei Pumpspeicherbecken erlauben.

Soll dem Absetzverhalten der Feinsedimente bereits bei der Bemessung von Ein- und Auslaufbauwerken Rechnung getragen werden, so sollte ein möglichst grosser Eintrag an kinetischer Energie, sprich Turbulenz im Nahbereich der Fassung, angestrebt werden. Die kinetische Energie ist der am einfachsten quantifizierbare Faktor, welcher vorgängig im numerischen Modell berechnet, oder später vor Ort mit Geschwindigkeitsmessungen bestimmt werden kann.

Verdankungen

Die präsentierte Forschungsarbeit war Teil der Projektgruppe *HydroNet I* die vom Swiss Competence Center Energy and Mobility (CCEM-CH), swisselectric research und dem Bundesamt für Energie (BfE – hydropower research) finanziert wurde. Die Autoren danken den Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) für deren Unterstützung und den technischen Support während den Prototypmessungen im Grimselgebiet.

Bibliographie

- Abramovich, G.N. 1963. The theory of turbulent jets. M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts.
- Anderson, M.A. 2010. Influence of pumped-storage hydroelectric plant operation on a shallow polymictic lake: Predictions from 3-D hydrodynamic modeling. *Lake and Reservoir Management* **26**(1): 1-13.
- Anselmetti, F., R. Bühler, D. Finger, S. Girardclos, A. Lancini, C. Rellstab and M. Sturm 2007. Effects of Alpine hydropower dams on particle transport and lacustrine sedimentation. *Aquatic Sciences* **69**(2): 179-198.
- Blaser, S. and J. Bühler 2001. Werden durchlaufende Sedimentpartikel in hydraulischen Maschinen fragmentiert? *Wasser, Energie, Luft - eau, énergie, air* **93** (11): 305-311. (in German)
- Bonalumi, M., F.S. Anselmetti, R. Kaegi and A. Wüest 2011. Particle dynamics in high-Alpine proglacial reservoirs modified by pumped-storage operation. *Water Resources Research* **47**(9): W09523.
- Bühler, J. and C. Siegenthaler 2003. Veränderungen im Oekosystem Brienzersee. Teilprojekt 3.2: Korngrössenverteilung, Zusammensetzung und Transport von Schwebstoffen im Grimselgebiet. Report, Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern (GSA), Bern, Switzerland. (in German, unpublished)
- Bühler, J., C. Siegenthaler and A. Wüest 2005. Turbidity currents in an alpine pumped-storage reservoir. In: Lee, J. H. W. & Lam, K. M., eds., Environmental hydraulics and sustainable water management, Hong Kong, China, 239-244.
- Hachem, F. 2011. Monitoring of Steel Lined Pressure Shafts Considering Water-Hammer Wave Signals and Fluid-Structure Interaction. Thesis 5171,

- Communication N° 49 du Laboratoire de constructions hydrauliques, A. Schleiss (ed.). Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland.
- Imboden, D. 1980. The Impact of Pumped Storage Operation on the Vertical Temperature Structure in a Deep Lake: A Mathematical Model. In: Clugston, J. P., eds., Proceedings of the Clemson Workshop on Environmental Impacts of Pumped Storage Hydroelectric Operations, Clemson, South Carolina, US: Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, Report FWS/OBS-80/28, 125-146.
- Jenzer Althaus, J. 2011. Sediment Evacuation from Reservoirs through Intakes by Jet Induced Flow. Thesis 4927, Communication N° 45 du Laboratoire de constructions hydrauliques, A. Schleiss (ed.). Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland.
- Kantoush, S.A., G. De Cesare, J.L. Boillat and A.J. Schleiss 2008. Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modelling. *Flow Measurement and Instrumentation* **19**(3–4): 139-144.
- Müller, M. 2012. Influence of in- and outflow sequences on flow patterns and suspended sediment behavior in reservoirs. Thesis 5471, EPFL.
- Potter, D.U., M.P. Stevens and J.L. Meyer 1982. Changes in physical and chemical variables in a new reservoir due to pumped storage operations. *Journal of the American Water Resources Association* **18**(4): 627-633.
- SA, M.-F. 2000. UVP monitor - User's guide. Lausanne, Switzerland.
- Stefan, H.G. and R. Gu 1992. Efficiency of Jet Mixing of Temperature-Stratified Water. *Journal of Environmental Engineering* **118**(3): 363-379.
- van Rijn, L.C. 1984. Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering* **110**(11): 1613-1641.
- VAW, V.f.W.H.u.G. 1982. Auslaufbauwerk Grimselsee - Bericht über die hydraulischen Modellversuche. ETH Zürich, Switzerland. (in German, unpublished)

Adresse der Autoren

Michael Müller, Giovanni De Cesare und Anton Schleiss

Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Station 18, CH-1015 Lausanne, Tel. +41 21 693 2385

michael.mueller@a3.epfl.ch, giovanni.decesare@epfl.ch, anton.schleiss@epfl.ch

Follow-up und Eckdaten

Das vorliegende Forschungsprojekt wurde von den Herren Prof. Anton Schleiss und Dr. Giovanni De Cesare (Directeurs de thèse) begleitet. Alle sechs bis sieben Wochen fanden Projektsitzungen statt, um den Projektverlauf und die Resultate zu diskutieren.

Im Rahmen interner Vorträge am Institut sowie Sitzungen im Plenum der HydroNet-Gruppe wurden die Zwischenresultate vier, resp. sechs Mal präsentiert. Zudem wurden dem BfE in den Jahren 2009 bis 2011 drei Jahresberichte zugestellt.

Am 10. Juli 2012 wurde die Arbeit vor einem Gremium von fünf Experten verteidigt. Die Jury evaluierte die Schlusspräsentation und die Dissertation "Influence of in- and outflow sequences on flow patterns and suspended sediment behavior in reservoirs" und akzeptierte sie ohne Vorbehalte. Die Endversion des Dissertaionsberichts wurde am 16. August 2012 der EPFL zur Veröffentlichung abgegeben (bereits auf EPFL-Website online). Ein öffentlicher Vortrag (defense publique) am 31. August 2012 beschloss die vierjährige Arbeit am Forschungsprojekt.

Anhang

Liste der Publikationen 2009 bis 2012

- M. Müller and A. Schleiss (2009). Monitoring und Vorhersage der Sedimentation in Pumpspeicherwerken. In Schleiss (ed), *Communication 40 du LCH – 11. Treffen junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an Wasserbauinstituten*, 153-158, Lausanne, Schweiz. (in German)
- L. Bremen, M. Müller and A. Schleiss (2010). Modellversuche zum Einfluss von Pumpspeichersequenzen auf Strömungsverhältnisse in einem quaderformigen Becken. In Weber, Fenrich, Gebler, Kramer & Noack (eds), *12. Treffen junger WissenschaftlerInnen an Wasserbauinstituten*, 193:72-78, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Deutschland. (in German)
- M. Müller, G. De Cesare and A. Schleiss (2008). Wirbel über Wasserfassungen: Geschwindigkeits-messungen im hydraulischen Modell. *10. Treffen junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an Wasserbauinstituten*, Innsbruck, Österreich. (in German)
- M. Müller, G. De Cesare and A. Schleiss (2010). Influence of pumped storage operation on flow conditions near intake/outlet structures: in situ measurement using ADCP. In Dittrich, Koll, Aeberle & Geisenhainer (eds), *River Flow 2010 International Conference on Fluvial Hydraulics*, 1139-1145, Braunschweig, Germany.
- M. Müller, G. De Cesare and A. Schleiss (2011). Experiments on turbulence and settling down of fine sediments induced by pumped storage operations in a cuboidal reservoir. In *Proceedings of the 34th IAHR World Congress*, volume CD-ROM, 1795-1802, Brisbane, Australia.
- Müller, M., De Cesare, G. and Schleiss, A. (2012). One- and two-dimensional UVP velocity sampling in a cuboidal basin subject to in- and outflow sequences, Proc. of the eight International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, 8th ISUD, September 19-21, 2012, Dresden, Germany, pp. 15-18
- Müller, M., De Cesare, G. and Schleiss, A. (submitted in 2012 to *Water Resources Management*). In situ measurement and numerical modeling of flow fields in a reservoir subject to pumped-storage operation.
- Müller, M., De Cesare, G. and Schleiss, A. (submitted in 2012 to *Journal of Hydraulic Engineering*). Continuous long-term observation of suspended sediment transport between two pumped-storage reservoirs
- Müller, M., De Cesare, G. and Schleiss, A. (submitted in 2012 to *International Journal of Sediment Research*). Experiments on the effect of in- and outflow sequences on suspended sediment exchange rates