

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

Michael Müller, Giovanni De Cesare, Anton Schleiss

Zusammenfassung

Die nachhaltige Nutzung von Speicherseen wird zunehmend durch die Verlandung bedroht. Dabei stellt sich die Frage, wie der Pumpspeicherbetrieb den Verlandungsprozess in den oberen und unteren Staubecken beeinflusst. In der vorliegenden Studie wurde erstmals untersucht, ob Feinsedimente nach deren Eintrag in den Stausee im Bereich der Wasserfassung durch die von Pumpspeichersequenzen erzeugte Turbulenz in Suspension gehalten werden können. Falls sich die Partikel langsamer absetzen, könnten sie allenfalls durch das Triebwassersystem aus dem unteren Staubecken abturbiniert werden.

Prototypmessungen sowie Laborversuche zeigen, dass Pumpspeichersequenzen die Strömungsbedingungen in Staubecken und insbesondere im Nahbereich der Wasserfassung bedeutend 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 gestion durable des retenues est de plus en plus menacée par l'alluvionnement. Une exploitation par pompage-turbinaie pourrait être en mesure d'influencer ces processus d'alluvionnement dans les retenues supérieures et inférieures. L'objectif de la présente recherche était donc de déterminer si les particules fines transportées dans le réservoir dans une zone proche de la prise d'eau peuvent être maintenues en suspension par la turbulence induite lors des séquences de pompage-turbinaie. Le dépôt des sédiments fins pourrait ainsi être retardé et ces derniers pourraient éventuellement être évacués de la retenue par le système d'adduction d'eau du palier inférieur.

Des mesures sur prototype et en laboratoire ont démontré que les séquences de pompage-turbinaie influencent significativement les conditions d'écoulement dans les retenues. La turbulence ainsi générée permet de maintenir en suspension les sédiments fins, entraînant un transport de masse considérable 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 stark variabler Nachfrage an Spitzenenergie und erhöhtem Bedürfnis an Netzregulierung spielen Pumpspeicherwerke eine zentrale Rolle. Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts HydroNet (hydronet.epfl.ch) wurden neue Methoden für die Bemessung, den Betrieb sowie die Überwachung von Pumpspeicherkraftwerken erarbeitet.

Im vorliegenden Artikel werden die wesentlichen Resultate des Teilprojekts zum Thema «Einfluss des Pumpspeicherbetriebs auf die Verlandung von Stauseen» vorgestellt (Müller, 2012). Dabei wurden folgende Hauptziele verfolgt:

- Beschrieb des Einflusses von wechselndem Betrieb zwischen Pumpen und Turbinieren auf Strömungsgeschwindigkeiten im Stauraum, insbesondere im Bereich der Triebwasserfassungen, sowie auf das Absetzverhalten von Feinsedimenten. Hier ging

es insbesondere darum, bestimmte Pumpspeicherzyklen zu definieren, welche die Feinpartikel länger in Suspension halten und so die Verlandung verlangsamen und den Sedimentatrag unterstützen.

- Entwicklung und Anwendung möglicher Überwachungsmethoden in einer bestehenden Anlage, um Strömungsbilder im Stausee und Sedimenttransport zwischen zwei Stauhaltungen kontinuierlich und über längere Zeit zu beobachten.
- Parameterstudie im Versuchsstand, um den Einfluss der Amplitude (Abfluss) und der Frequenz von Pumpspeicherzyklen, der relativen Zyklendauer, der initialen Sedimentkonzentration sowie der Position des Ein- und Auslaufbauwerks zu untersuchen.

Nachfolgend wird die Fliessrichtung stets aus der Sichtweise des Stauraumes angegeben. Während einer In-Sequenz wird also Wasser in den Speicher

eingetragen, während einer Out-Sequenz wird Wasser entnommen.

2. Feldmessungen beim Pumpspeicherkraftwerk Grimsel 2

2.1 Motivation

Durch den Pumpspeicherbetrieb sind die Wassermassen vor den Triebwasserfassungen schnellen und häufigen Wechseln zwischen turbulenten Strömungsverhältnissen bei einströmendem Wasser und relativ langsamen, potenziellen 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 die thermische Stratifikation, der Nährstoffhaushalt sowie das Ökosystem beeinträchtigt werden. Häufig ist der künstliche Eintrag von turbulenter

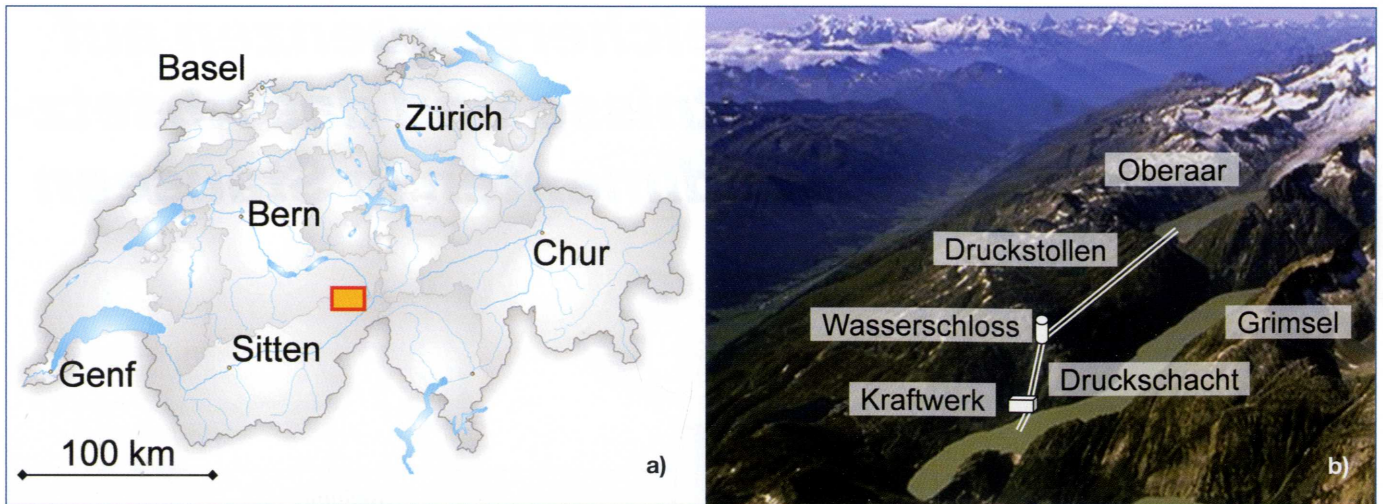


Bild 1. Lage (a) und Hauptelemente (b) des Pumpspeicherwerks Grimsel 2.

kinetischer Energie im Vergleich zu natürlichem windinduziertem Eintrag gross, so dass Feinsedimente in Schwebelage gehalten oder gar aufgewirbelt werden können (Anderson, 2010; Imboden, 1980; US Bureau of Reclamation, 1993).

Kenntnisse über die Strömungsbedingungen vor den Wasserfassungen sind für bestehende Anlagen wertvoll, um Hauptströmungsrichtungen, Zirkulationszellen und Geschwindigkeiten zu beobachten und damit eventuelle Auflandungszonen vorherzusagen. Für zukünftige Anlagen könnte dieses Wissen für die Wahl einer optimalen Geometrie und Anordnung der Treibwasserfassung dienen, um im späteren Betrieb Verlandungsprobleme zu minimieren. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden während mehreren Tagen 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, kann die Sedimentbilanz zwischen zwei Speichern beobachtet 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, jederzeit einsehbar waren.

2.2 Pumpspeicherkraftwerk Grimsel 2

Das Einzugsgebiet der Aare in der Region Oberhasli, Schweiz, ist Teil eines komplexen Wasserkraftsystems 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 Pumpspeicherkraftwerk Grimsel 2 (Bild 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 $700 \times 10^6 \text{ m}^3$ Wasser zwischen den beiden Stauseen hin- und herbewegt.

Die beiden Wasserfassungen im Oberaar- und Grimselsee sind durch einen zum Teil gepanzerten Triebwasserweg von rund fünf Kilometer Länge verbunden. Von der Fassung im Oberaarsee führt ein Druckstollen zum Wasserschloss Kesiturm, von wo aus ein geeigneter Druckschacht zum Kraftwerk Grimsel 2 führt. Die Triebwasserfassung im Grimselsee ist ein zylinderförmiges, seitlich offenes und am Stauseeboden angeordnetes Bauwerk mit einem relativ dichten Rechen, der die ein- und ausströmenden Wassermassen gleichmässig über den gesamten Querschnitt verteilt (VAW, 1982). Im Oberaarsee besteht die am Ufer angeordnete Fassung aus einem trompetenförmigen Ein- und

Auslaufbauwerk. Das unterirdische Kraftwerk Grimsel 2 ist mit vier Pump-Turbinengruppen ausgerüstet, die insgesamt eine installierte Leistung von 350 MW bereitstellen.

Die Einzugsgebiete der beiden Seen sind teilweise vergletschert. Oberflächenerosionsraten von 1 bis 2 mm/Jahr führen zu einem hohen Sedimenteintrag. In den drei Hauptspeichern der KWO (Oberaar-, Grimsel- und Räterichsbodensee) gelangen jährlich nur 40 000 t unterstrom in die Aare, während rund 230 000 Kt/Jahr zurückgehalten werden (Anselmetti et al., 2007). Die Eigenschaften der Schwebstoffe im Grimselgebiet wurden in der Vergangenheit unter anderem von Blaser und Bühler (2001), Bühler und Siegenthaler (2003) sowie Bonalumi et al. (2011) untersucht, um die hydromechanischen 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 Trübeströmen aufweisen kann (Bonalumi et al., 2011). In Extremfällen können im Unterbecken Konzentrationen von $C = 700 \text{ mg/l}$ nahe der Spittelammsperre auftreten (Bühler et al., 2005).

2.3 Strömungsverhältnisse im Bereich der Ein- und Auslaufbauwerke

Das Absetzen von Feinsedimenten vor Wasserfassungen wird unter anderem von

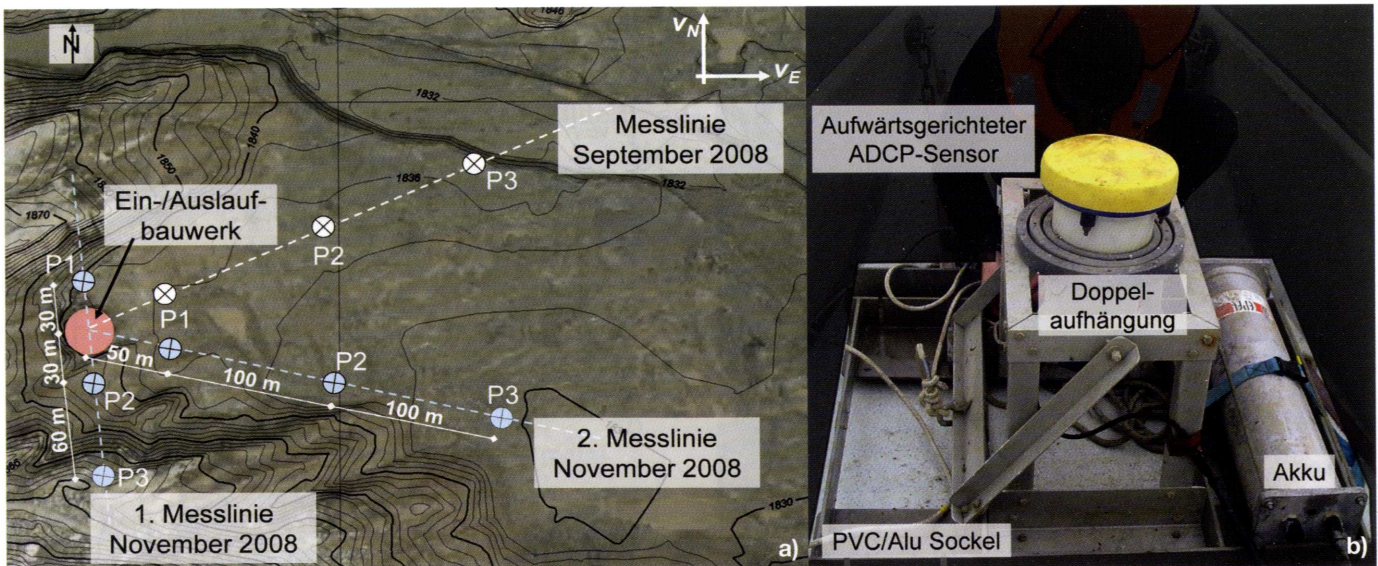


Bild 2. Seetopographie und Messlinien für Geschwindigkeitsprofile im Bereich der Fassung Grimsel 2 (a), Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) (b).

den Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen im Nahbereich der Bauwerke beeinflusst. Der Eintrag an turbulenter kinetischer Energie durch den Turbinierbetrieb 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 Current 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 Bild 2 dargestellt. Die Messpositionen wurden aufgrund der Seetopographie und der geografischen Hauptausrichtungen des Stausees gewählt.

Im Pumpbetrieb (Out-Sequenz) wurde nur ein sehr geringer Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeiten in unmittelbarer Nähe der Fassung festgestellt. Die Geschwindigkeiten lagen bei rund 6 cm/s in 30 m und bei 2 cm/s in 50 m Ent-

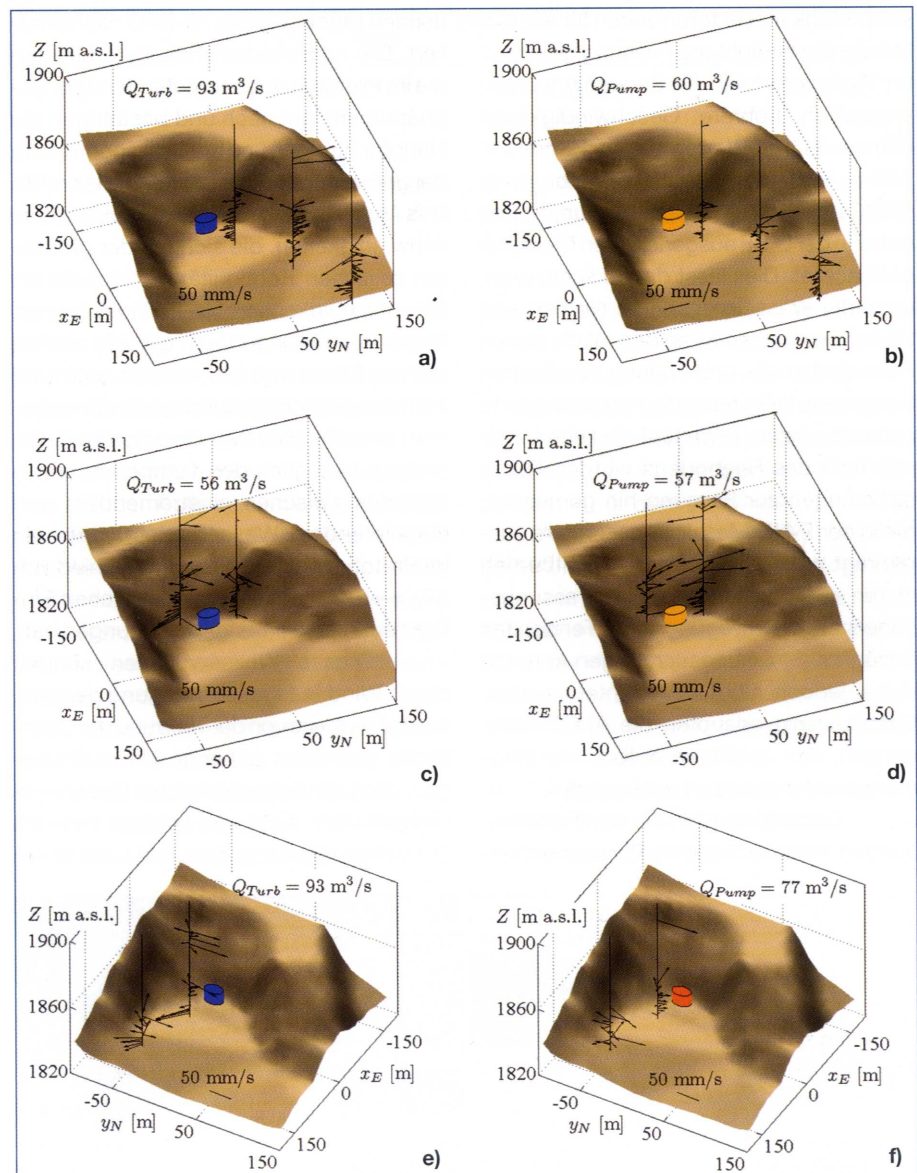


Bild 3. 2-D-Geschwindigkeitsprofile im Bereich der Wasserfassung Grimsel 2 während Turbinier- (In-Sequenz, links) und Pumpbetrieb (Out-Sequenz, rechts) am 17. September 13.20 Uhr (a), 19. September 05.00 Uhr (b), 7. November 10.30 Uhr (c) und 05.50 Uhr (d), 17. November 18.20 Uhr (e) und 02.10 Uhr (f).

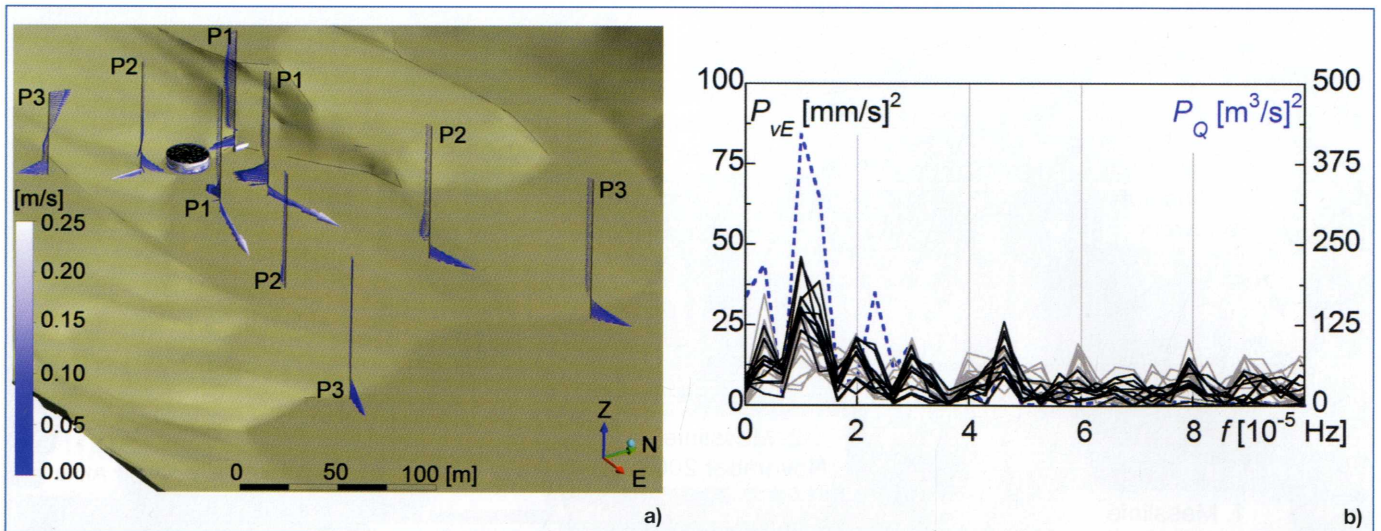


Bild 4. Geschwindigkeitsprofile im numerischen Modell nach 150 Minuten Turbinierbetrieb bei Maximalabfluss (a) und Powerspektren der Zeitreihen von Abfluss (P_Q) und Geschwindigkeit (P_{VE} , Ostkomponente) für das Messinstrument P1 im September 2008 (b).

fernung zum Rechen (Bild 3b, d, f). Die Geschwindigkeitsvektoren waren für alle drei Messlinien in Richtung Fassung gerichtet. Im Turbinierbetrieb (In-Sequenz) wurden wesentlich höhere Geschwindigkeiten gemessen, mit Werten bis zu 12 cm/s in 150 m Entfernung zum Auslaufbauwerk (Bild 3a, c, e). Die stärkste Strömung wurde dabei in der E-SE ausgerichteten Messlinie beobachtet. Dies lässt darauf schliessen, dass die Wassermassen im Norden und Süden des Bauwerks an den relativ steilen Felswänden ab- und entlang des flachen Seegrunds in Richtung Spittellamm Sperre gelenkt werden. Etwa fünf bis zehn Meter oberhalb des Seebodens wurden Rückströmungen zur Fassung hin gemessen, die in der E-NE-Messlinie besonders ausgeprägt auftraten. Auch bei Nichtbetrieb waren die Wassermassen in Fassungs-nähe stets in Bewegung; klare Tendenzen bezüglich Strömungsrichtungen konnten dabei jedoch nicht beobachtet werden. Ebensovienig erlaubten die ADCP-Messungen, den zeitlichen Aufbau der Strömungsfelder detailliert aufzuzeigen.

Deshalb wurden die den Feldmessungen entsprechenden Pumpspeicher-

zyklen in einem dreidimensionalen numerischen Modell in ANSYS-CFD nachsimuliert. Die numerischen Resultate bildeten die im Prototyp beobachteten Strömungsphänomene gut nach und bestätigten die Hauptrichtungen und die Grössenordnung der gemessenen Geschwindigkeitsprofile. Das Modell berechnete leicht höhere Geschwindigkeiten, die sich mit der grösseren zeitlichen Kontinuität der simulierten Geschwindigkeitsprofile erklären lassen. Stationäre Bedingungen, d.h. ein zeitlich stabiles Strömungsbild, wurden nach rund 150 Minuten kontinuierlichem Turbinierbetrieb erreicht (Bild 4a). Eine Sensitivitätsanalyse bezüglich des Temperaturunterschiedes zwischen einströmendem und stagnierendem Wasser zeigte, dass ein im Prototyp gemessener Unterschied von $\Delta T_w = \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ keinen wesentlichen Einfluss auf die Strömungsbedingungen hat.

Grosse Wasservolumen können durch Wind in Eigenschwingung geraten, deren Frequenz von der Tiefe und der 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 einem Tag, wobei vor allem die Ostkomponente stark mit dem Pumpspeicherbetrieb korreliert (Bild 4b) und die Nordkomponente mit einer wesentlich geringerer Amplitude reagiert. Frequenzen von Schwingungen des gesamten Sees waren dabei nicht vorhanden. Die Geschwindigkeitsprofile konnten so eindeutig den Pumpspeichersequenzen zugeordnet werden, ungestört von Eigenschwingungen des Sees.

2.4 Transport von Feinsedimenten zwischen zwei Stauseen

Um den Feststofftransport zwischen den beiden Seen Oberaar und Grimsel zu untersuchen wurde der Druckschacht des Kraftwerks in der Nähe des Wasserschlosses mit einer Trübungsmessstelle ausgerüstet. Während rund acht Monaten konnte so die Partikelkonzentration des gepumpten und turbinieren 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 hervorgerufene Veränderungen der Sedimentkonzentration festzustellen.

Von der Entnahmestelle am Druckschacht wurden 1 bis 2 l/s Wasser in einen Messzylinder mit einer Züllig-Cosmos®25-E-Trübungssonde geleitet (Bild 5a). Via einem b-line II-Messverstärker gelangte ein elektronisches Signal zur Akquisitionskarte und von dort aus an einen Industrie-

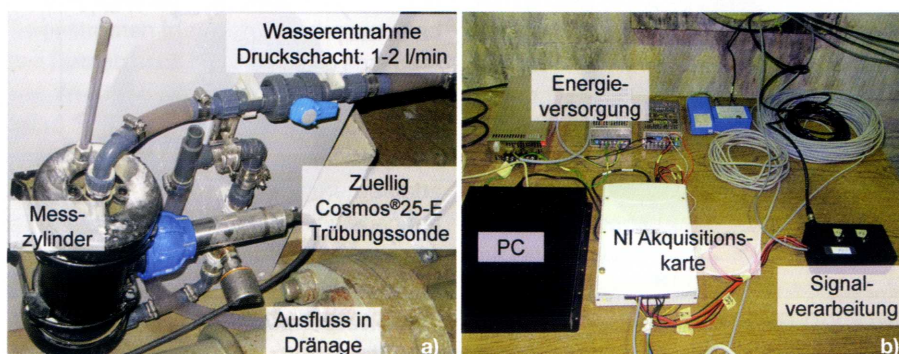


Bild 5. Fotos der Trübungsmessstelle nahe des Druckschachts (a) und der eingerichteten Datenakquisition (b) im Wasserschloss Kessiturm.

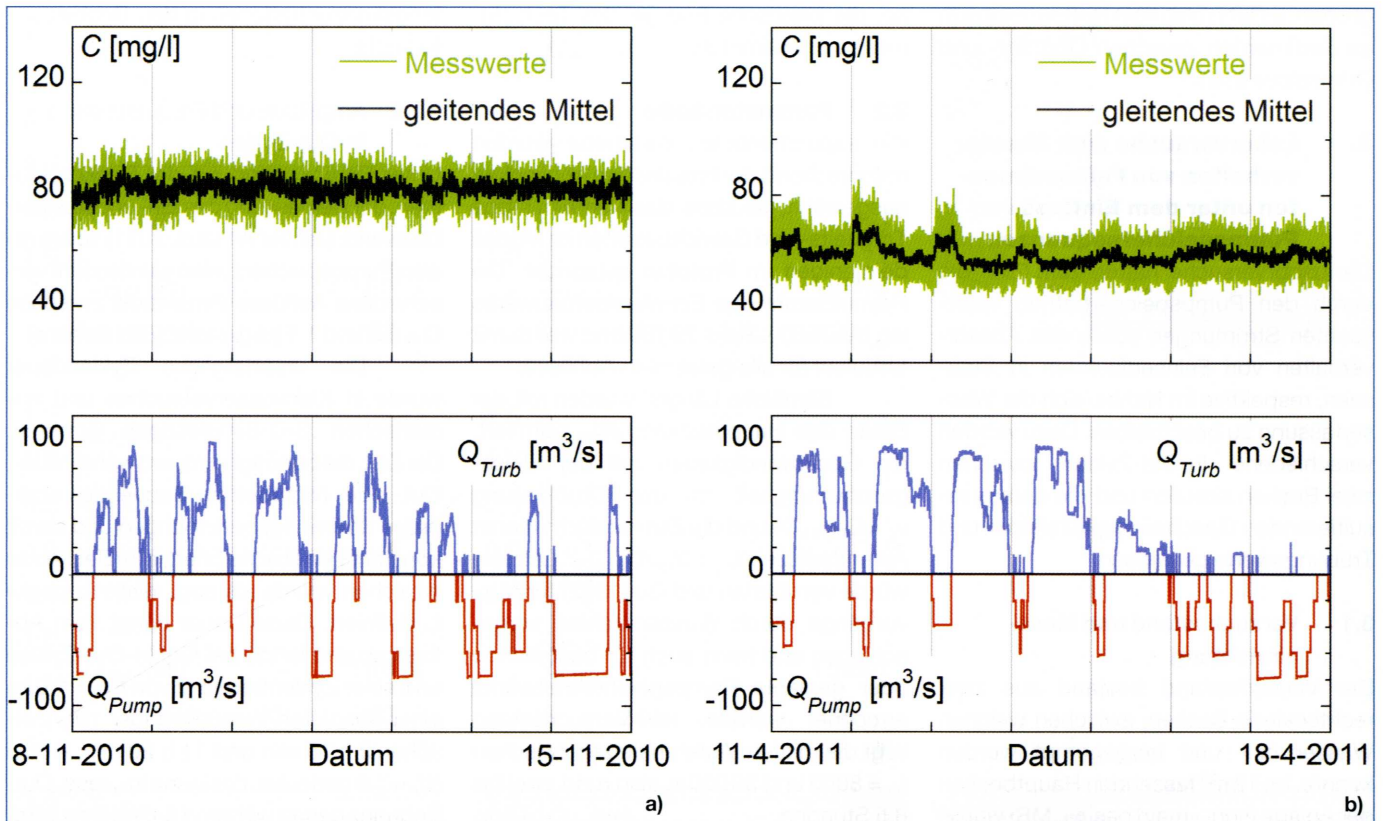


Bild 6. Entwicklung der gemessenen Sedimentkonzentration C und Betriebsabflüsse Q_{Pump} , Q_{Turb} während den Messperioden vom 8. bis 15.11.2010 (a, Seepiegel Oberaar 2298 m ü. M., Grimsel 1900 m ü. M.) und vom 11. bis 18.4.2011 (b, Seepiegel Oberaar 2265 m ü. M., Grimsel 1870 m ü. M.).

computer, wo die aufgezeichneten Daten gespeichert wurden und in Echtzeit einsehbar waren (Bild 5b). Via Internet konnte auf die Messresultate zugegriffen und das Messsystem gesteuert werden.

Das Trübungssignal wurde mit einer Kalibrierungsfunktion in eine Feststoffkonzentration umgerechnet. Wochenweise erstellte Monitoringdiagramme zeigten die Entwicklung des Partikelgehalts im Triebwassersystem der Anlage (Bild 6). Ende 2010 betrug 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 in den Stausee aufgrund des schnee- und eisbedeckten Einzugsgebietes bekanntlich klein. Nach der Schneeschmelze im Frühling wurden im System Grimsel 2 wieder erhöhte Sedimentkonzentrationen von rund $C_m = 80$ mg/l gemessen.

Im Verlaufe der Messperiode wurden auch kurzfristige Schwankungen der Sedimentkonzentration aufgezeichnet. Der Quotient zwischen der Konzentration im Pumpwasser C_{Pump} und im Turbinenwasser C_{Turb} zeigt, wieviel mehr Sediment in die eine oder andere Betriebsrichtung transportiert wurde. Zwischenzeitlich wurden im Pumpbetrieb 16% höhere Konzentrationen gemessen als in den vorherge-

henden oder folgenden Turbiniersequenzen ($C_{Pump}/C_{Turb} = 1.16$). 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 Wasserstände der beiden Seen. Eine erhöhte Sedimentkonzentration im Pumpbetrieb wurde bei sehr tiefem Grimselseestand gemessen, während ein tiefer Pegel des Oberaarsees höhere Konzentrationswerte im Turbinierbetrieb hervorrief.

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 Sedimentge-

misches von 1500 kg/m^3 entspricht dies einem Volumen von rund $V_S = 30\,000 \text{ m}^3$, wobei zu beachten ist, dass Aufzeichnungen in den Sommermonaten und damit der Zeit des maximalen Sedimenteintrags aus dem Einzugsgebiet fehlen. Ein Vergleich mit den von Anselmetti et al. (2007) berechneten Absetzraten von $V_S = 22\,000$, resp. $74\,000 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ im Oberaar- und Grimselsee zeigt, wie beträchtlich die Sedimentvolumen sind, die alleine durch den Kraftwerksbetrieb im System bewegt werden. Die in die eine oder andere Richtung transportierten Volumen variierten beträchtlich von Woche zu Woche (Bild 7). Nichtsdestotrotz war die Sedimentbilanz über die Messperiode von Oktober 2010 bis Juni 2011 ausge-

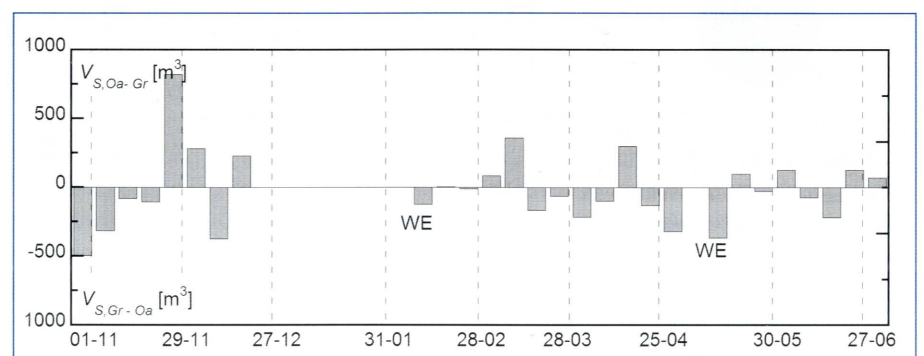


Bild 7. Während Pump- (Gr – Oa) und Turbinierbetrieb (Oa – Gr) transportierte Sedimentvolumen V_S vom November 2010 bis Juni 2011.

glichen, es fand also kein Nettoaustausch an Sedimenten zwischen Oberaar- und Grimselsee statt.

3. Laborversuche zum Absetzverhalten von Feinsedimenten unter dem Einfluss von Pumpspeichersequenzen

Die Laborversuche hatten zum Ziel, die durch den Pumpspeicherbetrieb verursachten Strömungen sowie das Absetzverhalten von Feinsedimenten in Stauseen, respektive im Nahbereich der Wasserefassung zu beschreiben. Dazu wurden verschiedene In-Out-Zyklen zwischen zwei Becken simuliert 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 im geschlossenen Kreislauf funktionieren konnte.

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 Hauptbecken wurden mit 2 MHz Ultrasonic Velocity Profilers (UVP, MetFlow SA, Schweiz) gemessen. 17 Sonden zeichneten in einem Quadranten horizontale 2-D-Geschwindigkeitsfelder auf und erlaubten

so, die kinetische Energie des Testvolumens zu bestimmen.

3.2 Parameterstudie

Die experimentellen Parameter wurden entsprechend 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 $7560 \leq Re_i \leq 29180$ und war damit turbulent für alle getesteten Abflüsse.

Sämtliche Längen wurden mit der Breite des Hauptbeckens B_{MB} normiert, die Geschwindigkeiten mit der Fließgeschwindigkeit in der Druckleitung $v_0 = Q_{IN,OUT}/A$ und die Zeit mit der mittleren Aufenthaltszeit $t_m = V_{MB}/Q_{IN,OUT}$. Letztere wurde von Stefan und Gu (1992) für Mixvorgänge durch Wasserstrahlen vorgeschlagen und kann auch für bestehende oder geplante Pumpspeicherkraftwerke errechnet werden. Im Versuchsstand liegt die mittlere Aufenthaltszeit zwischen $t_m = 8000$ und 30000 s, also rund zwei bis 8.5 Stunden.

3.2.1 Feinsedimente

Absetzvorgänge werden vom umgebenden Fluid und den Eigenschaften der Partikel beeinflusst (van Rijn, 1984). Im Experiment wurden die Feinsedimente durch gemahlene Nusschalen mit homogener Korngrösse simuliert, welche sich für Versuche bezüglich Verlandungsproblemen als ideal erwiesen haben (Jenzer Althaus, 2011; Kantoush et al., 2008). Mit einer spezifischen Dichte von $\rho_s = 1480$ kg/m³ und einem mittleren Korndurchmesser von $d_m = 121$ µm konnten prototypähnliche Verhältnisse zwischen Fließ- und Absetzgeschwindigkeiten reproduziert werden.

Da auch die Sedimentkonzentration die Absetzgeschwindigkeit beeinflusst, wurden drei verschiedene An-

fangskonzentrationen in den Becken untersucht.

3.2.2 Amplitude 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 (Amplitude) zwischen $Q = 0.3$ und 1.1 l/s getestet (Bild 9a bis e).

Die ursprüngliche Zyklendauer wurde in Klarwasserversuchen und numerischen 3-D-Simulationen ermittelt. Die Zeit, die benötigt wird, um während In-, Out- oder Nichtbetrieb-Sequenzen stationäre Strömungsbedingungen und damit 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 Zyklenfrequenz von $Kt_p = 1.0$ zu einer absoluten Versuchsdauer $10t_p$ zwischen 2 h 15 min und 11 h 20 min, wobei $Kt_p = 1.0$ bedeutet, dass eine In-, resp. Out-Sequenz genau während t_p gefahren wird.

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 (Bild 9f und g). 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 (Bild 9).

Die studierten Abflüsse und Frequenzen decken eine recht grosse Bandbreite von langsamen, schnellen, starken und schwachen Pumpspeichersequenzen ab. Selbstverständlich sind reale Pumpspeicherdigramme 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 $t_{p,IN}/t_{p,OUT}$ trugen dieser Gegebenheit Rechnung (Bild 9i und j).

Schliesslich wurde die Wasserefassung an drei verschiedenen Höhenlagen z/B_{MB} über dem Beckenboden angebracht, um den Einfluss der Lage des ein- und ausströmenden Wassers zu untersuchen. Für einen Abfluss von $Q = 1.1$ l/s wurde das Bauwerk von der ursprünglich in Beckenmitte gelegenen Position

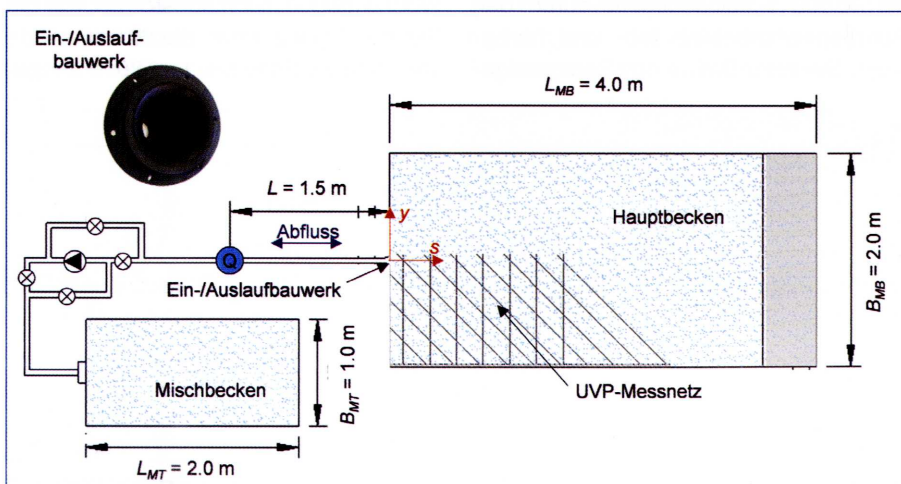


Bild 8. Schema mit Hauptelementen der Versuchsanlage.

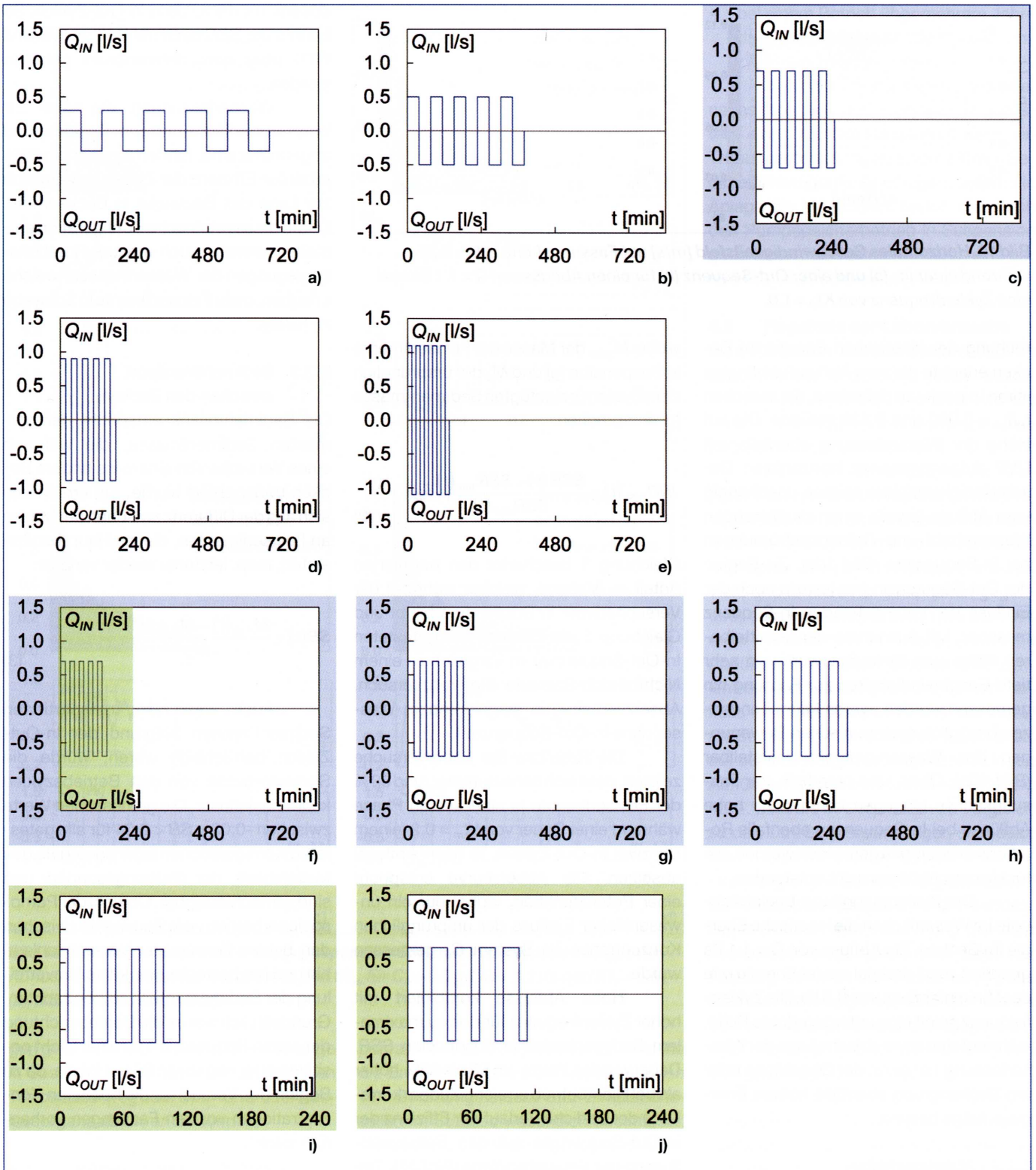


Bild 9. Auswahl von untersuchten In-Out-Sequenzen. Variation des Abflusses $Q = 0.3$ (a), 0.5 (b), 0.7 (c), 0.9 (d) und 1.1 l/s (e) für eine Zyklusfrequenz von $Kt_p = 1.0$. Variation der Zyklusfrequenz $Kt_p = 0.6$ (f), 0.8 (g) und 1.2 (h) für einen Abfluss von $Q = 0.7$ l/s. Variation der relativen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

$z/B_{MB} = 0.25$ auf $z/B_{MB} = 0.125$ und 0.375 verlegt.

3.3 Resultate

3.3.1 Strahleigenschaften und 2-D-Strömungsfelder

Eine erste Versuchsreihe konzentrierte 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, respektive 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 verläuft. Eine Analyse horizontaler 2-D-Geschwindigkeitsfelder und die Be-

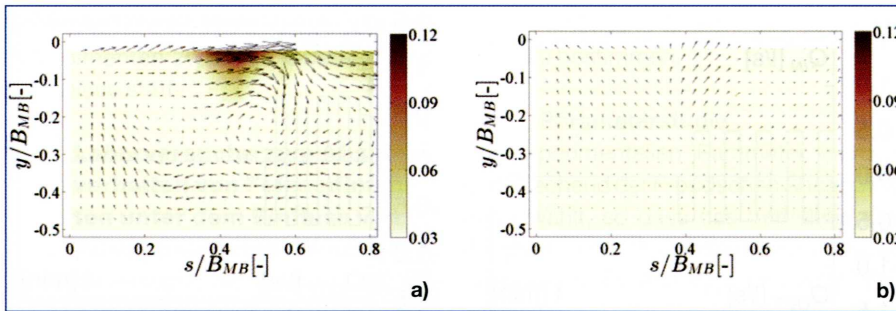


Bild 10. Horizontales Geschwindigkeitsfeld [m/s] auf Fassungshöhe $z/B = 0.25$ während einer In- (a) und einer Out-Sequenz (b) für einen Abfluss von $Q = 1.1$ l/s und eine Zyklusfrequenz von $Kt_p = 1.0$.

rechnung 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 zeigten unabhängig vom Abfluss jeweils einen oszillierenden Wasserstrahl und Rotationsströmungen bei In-Sequenzen (Bild 10a). Zu Beginn der Out-Sequenzen war 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 (Bild 10b). Ober- und unterhalb der Fassungssachse hingegen konnten für hohe Abflüsse bei In-Sequenzen ebenfalls Rotationsströmungen gemessen werden, die für kleinere Abflüsse nicht entstanden.

Die Zyklusmagnitude beeinträchtigte im Wesentlichen die kinetische Energie im Becken. Ein Abfluss von $Q = 1.1$ l/s generiert rund dreimal soviel Energie wie der Minimalabfluss von 0.3 l/s. Die Zyklusfrequenz spielt eine untergeordnete Rolle, während eine asymmetrische Lage der Wasserfassung näher an der Oberfläche oder am Beckengrund ebenfalls höhere Energieeinträge bewirkt.

3.3.2 Absetzverhalten der Feinsedimente

Der Einfluss von Pumpspeichersequenzen wurde anhand des sogenannten «suspended sediment ratio» SSR und des «increased suspended sediment ratio» INC_{SSR} beschrieben, welche wie folgt definiert sind:

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

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

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

Gleichung 1 beschreibt den normierten Anteil an Material, welcher während der Versuchsdauer in Suspension bleibt und Gleichung 2 die Effizienz der getesteten In-Out-Sequenzen im Vergleich zu einem Nichtbetrieb-Szenario (Referenzversuch, Absetzverhalten in stagnierendem Wasser ohne In-Out-Sequenzen).

Die Resultate der Laborversuche zeigten, dass sich nahezu immer 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 entspricht einer Potenzfunktion, wobei nur ein unwesentlicher Einfluss der ursprünglichen Konzentration im System C_0 gemessen wurde.

Hohe Abflüsse kombiniert mit hoher Zyklusfrequenz führten zu maximalem Sedimentanteil in Suspension SSR . Dabei wurden Werte um 50 bis 80% höher als bei Nichtbetrieb erreicht. Zudem korrelierte der zeitliche Verlauf der Effizienz der In-Out-Sequenzen mit den Betriebsabflüssen der Versuchsanlage (Bild 11). Tiefere Abflüsse führten ebenfalls zu 10 bis 40% höheren SSR -Werten im Vergleich zum Referenzversuch. Die Korrelation zwischen dem Absetzverhalten der Feinsedimente und den Abflussdaten war jedoch nicht mehr messbar.

Die Zyklusfrequenz ist insbesondere in den ersten Zyklen ein Schlüsselfaktor für die Effizienz der Pumpspeichersequenzen. Wenn zu Beginn schnelle In-Out-Sequenzen gefahren wurden, konnte der SSR wesentlich erhöht werden, insbesondere auch über verlängerte Versuchs-

dauern 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.

Wasserfassungen, die näher zur Wasseroberfläche und zum Beckengrund angeordnet sind, führten zu einer um 20% erhöhten Effizienz der Zyklen im Vergleich zur Lage des Bauwerks in Beckenmitte. Durch die asymmetrische Konfiguration entstehen vermehrt auch vertikale Rotationsbewegungen der Wassermassen, welche erlauben, mehr Feinsedimente in Schwebelage zu halten.

3.3.3 Sedimenttransport zwischen den Becken

Die Sedimentbilanz entspricht der normierten Sedimentmasse, die während eines Versuchs von einem ins andere Becken transportiert wurde. Sie errechnete sich aus der Differenz zwischen der Masse an Feinsedimenten, die ins Hauptbecken eintritt, resp. letzteres wieder verlässt:

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

Auch wenn die transportierten Sedimentmassen aufgrund der In-Out-Zyklen beträchtlich waren, wurde die Sedimentbilanz von den Betriebszyklen kaum beeinflusst. Die gemessenen Werte zwischen $-0.03 < SB < 0.04$ für alle getesteten Konfigurationen lagen innerhalb des Messfehlers der Trübungssonden und sind vernachlässigbar. Obwohl der Pumpspeicherbetrieb viele Sedimente zwischen den beiden Becken der Versuchsanlage hin und her bewegte, war keine Umverteilung der Sedimentanteile zu beobachten. 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 präzentrierte Arbeit untersuchte deshalb die Auswirkungen von Pumpspeichersequenzen auf die Strömungsbedingungen und das Absetzverhalten von Feinsediment, mit dem Ziel, die vor die Wasserfassung-

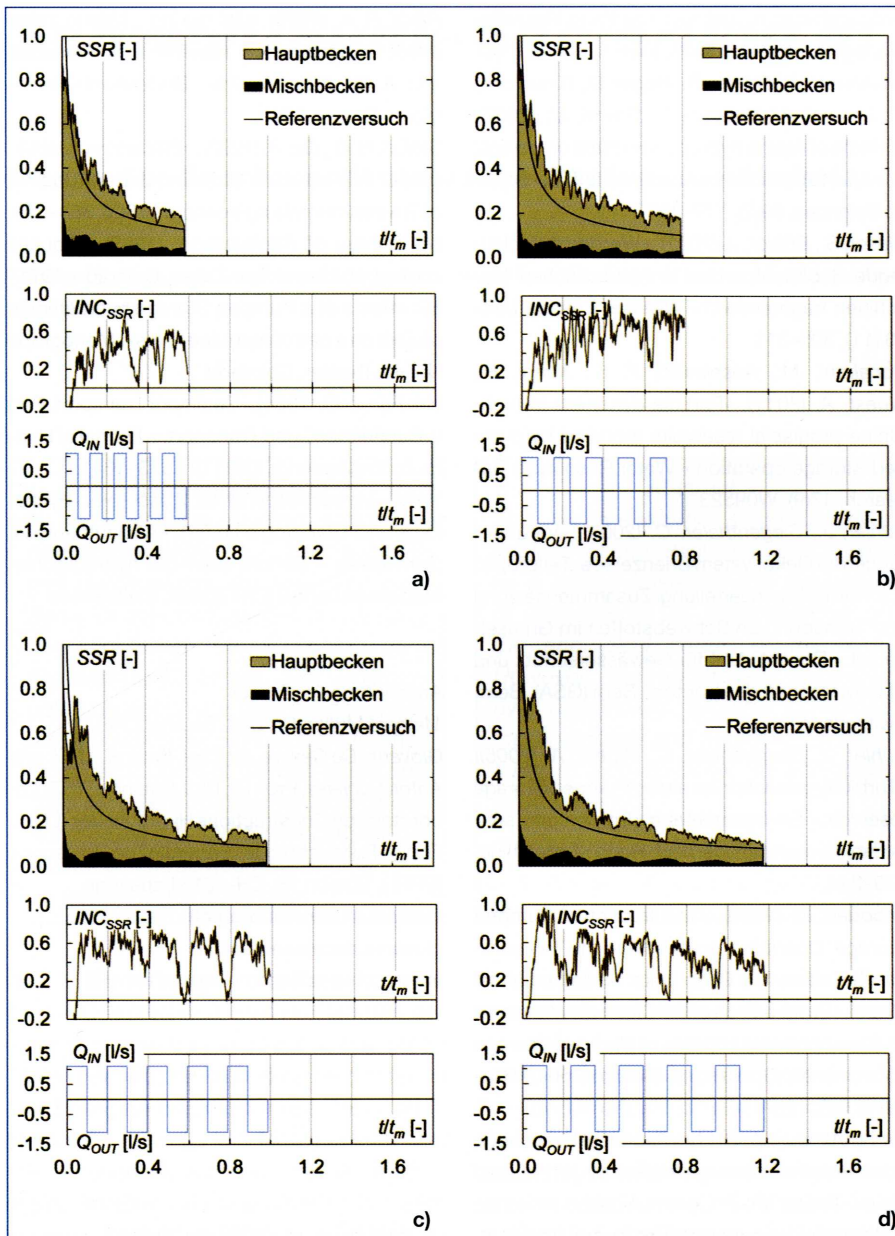


Bild 11. Normierter Sedimentanteil in Suspension SSR , relative Effizienz INC_{SSR} und Abfluss Q in Funktion der normierten Zeit t/t_m für $C_0 = 0.8 \text{ g/l}$, $Q = 1.1 \text{ l/s}$ und $Kt_p = 0.6$ (a), 0.8 (b), 1.0 (c) und 1.2 (d).

gen 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 erlauben:

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

Eine Schlüsselrolle kommt dabei der To-

pographie 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, respektive die Aufzeichnungen der Partikelkonzentration im bewirtschafteten Wasser eines Pumpspeichers 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 kann ein Trübungsmonitoring zu einem aktiven Sedimentmanagement beitragen, sofern die Anlage die Möglichkeit bietet, die durch den Pumpspeicherbetrieb in Suspension gehaltenen Feinsedimente durch eine untere Kraftwerksstufe auszutragen.

4.2 Resultate der Laborversuche

Fünf Parameter wurden systematisch in Experimenten untersucht, wobei insbesondere die Amplitude (Abfluss) und die Frequenz der Zyklen des Pumpspeicherbetriebes von Bedeutung sind.

Rund 60% der ursprünglichen Sedimentmasse setzt sich zu Beginn des Versuches ab. Diese erste Absetzphase kann durch In-Out-Zyklen mit hohem Abfluss und hoher Frequenz verlängert werden. Tiefe und mittlere Abflüsse halten gegenüber dem Referenzversuch 10% bis 40% mehr Feinsediment in Suspension, hohe Abflüsse bis zu 60%. Eine erhöhte Zyklenfrequenz hat lediglich bei hohem Abfluss einen 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 der Fassung näher an der Wasseroberfläche oder am Beckengrund, wird der relative Sedimentanteil in Suspension gegenüber einer Fassung in Beckenmitte um rund 20% gesteigert.

Die in den Versuchen hin- und hertransportierten Sedimentmassen sind beträchtlich. Nichtsdestotrotz ist die Sedimentbilanz für alle getesteten Szenarien ausgeglichen, sprich sie wird kaum von den In-Out-Sequenzen beeinflusst. Da sich ein grosser Anteil der Partikel zu Beginn der Versuche absetzt, bewirkt die Anfangsrichtung des Betriebs eine leicht positive oder negative Sedimentbilanz.

4.3 Empfehlungen und Ausblick

Für den realen Fall, dass 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 Absetzphase kann durch den Pumpspeicherbetrieb 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 Schwebelage zu halten, um sie allenfalls kontinuierlich durch die Triebwasserfassung einer Unterstufe abzuführen.

Bei sehr unterschiedlicher Sedimentkonzentration in den beiden Staubecken könnte der Pumpspeicherbetrieb eine Verschiebung der Sedimentbilanz und somit einen künstlichen Sedimenteintrag in eines der Becken zur Folge haben. Die Prototypmessungen am Pumpspeicherwerk Grimsel 2 zeigten jedoch keinen Nettoaustausch zwischen den beiden Stauseen.

Dem Absetzverhalten der Feinsedimente kann bereits bei der Bemessung und Anordnung des Ein- und Auslaufbauwerks Rechnung getragen werden, indem ein möglichst grosser Eintrag an kinetischer Energie, sprich Turbulenz, im Nahbereich der Fassung angestrebt wird. Die kinetische Energie ist der am einfachsten quantifizierbare Faktor, welcher vorgängig im numerischen Modell berechnet oder später vor Ort mit Geschwindigkeitsmessungen bestimmt werden kann. Die Lage des Ein- und Auslaufbauwerks im Unterbecken sollte zudem optimal zu bestehenden Triebwasserfassungen der Unterstufe angeordnet werden, so dass die in Schwebelage gehaltenen Sedimente durch letztere abgeführt werden können.

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 der Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) für deren Unterstützung während den Prototypmessungen im Grimselgebiet.

Literatur

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., Bühler, R., Finger, D., Girardclos, S., Lancini, A., Rellstab, C., Sturm, M. (2007). «Effects of Alpine hydropower dams on particle transport and lacustrine sedimentation.» *Aquatic Sciences*, 69(2), 179–198.

Blaser, S., Bühler, J. (2001). «Werden durchlaufende Sedimentpartikel in hydraulischen Maschinen fragmentiert?» «Wasser Energie Luft» 93 (11), 305–311.

Bonalumi, M., Anselmetti, F. S., Kaegi, R., Wüest, A. (2011). «Particle dynamics in high-Alpine proglacial reservoirs modified by pumped-storage operation.» *Water Resources Research*, 47(9), W09523.

Bühler, J., Siegenthaler, C. (2003). «Veränderungen im Ökosystem Brienzersee. Teilprojekt 3.2: Korngrößenverteilung, Zusammensetzung und Transport von Schwebstoffen im Grimselgebiet.» Bericht, Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern (GSA), Bern, Switzerland.

Bühler, J., Siegenthaler, C., Wüest, A. (2005). «Turbidity currents in an alpine Pumped Storage reservoir.» *Environmental hydraulics and sustainable water management*, Hong Kong, China, 239–244.

Imboden, D. (1980). «The Impact of Pumped Storage Operation on the Vertical Temperature Structure in a Deep Lake: A Mathematical Model.» *Proceedings of the Clemson Workshop on Environmental Impacts of Pumped Storage Hydroelectric Operations*, Clemson, South Carolina, US, 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.

Jirka, G. (2004). «Integral Model for Turbulent Buoyant Jets in Unbounded Stratified Flows. Part I: Single Round Jet.» *Environmental Fluid Mechanics*, 4(1), 1–56.

Kantoush, S. A., De Cesare, G., Boillat, J. L., Schleiss, A. J. (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, Communication N° 53 du Laboratoire de constructions hydrauliques, A. Schleiss (ed.), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland.

Potter, D. U., Stevens, M. P., Meyer, J. L. (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.

Revill, B. K. (1992). «Jet mixing.» *Mixing in the Process Industries*, J. Harnby, N. F. Edwards, and A. W. Nienow, eds., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.

Stefan, H. G., Gu, R. (1992). «Efficiency of Jet Mixing of Temperature-Stratified Water.» *Journal of Environmental Engineering*, 118(3), 363–379.

US Bureau of Reclamation. (1993). «Aquatic ecology studies of Twin Lakes, Colorado, 1971–86: effects of a Pumped Storage hydroelectric project on a pair of montane lakes.» Monograph No. 43, Denver, Colorado.

Van Rijn, L. C. (1984). «Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport.» *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11), 1613–1641.

VAW – Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (1982). «Auslaufbauwerk Grimselsee – Bericht über die hydraulischen Modellversuche.» ETH Zürich, Switzerland.

Anschrift der Verfasser

Michael Müller, Dr. Dipl. Bauing. EPFL,
Giovanni De Cesare, Dr. Dipl. Bauing. EPFL und
Anton Schleiss, Prof. Dr. Dipl. Bauing. ETHZ; Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Station 18, CH-1015 Lausanne
michael.mueller@iub-ag.ch
giovanni.decesare@epfl.ch
anton.schleiss@epfl.ch