

Überblicksbericht 2011

Forschungsprogramm Wasserkraft



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN

Titelbild:**Der Grimselsee mit Staumauer Spitalamm**

Der Grimselsee dient als Unterbecken für das Pumpspeicherkraftwerk Grimsel 2, welches natürliche Zuflüsse vom Unteraargletscher und dem Stausee Oberaar nutzt. Zu Schwachlastzeiten kann Wasser aus dem Grimselsee in den Oberaarsee zurückgepumpt werden. Bei den Grimselkraftwerken sind unter dem Begriff KWO plus derzeit umfangreiche Erweiterungsarbeiten im Gang. Neben dem geplanten Bau und der Aufwertung neuer und bestehender Kraftwerke wird eine Erhöhung des Stauziels des Grimselsees angestrebt, die das Speichervolumen um rund drei Viertel steigern würde. Damit könnte wesentlich mehr Strom im Winter bereitgestellt werden. Die Kraftwerke Oberhasli KWO positionieren sich mit diesen Massnahmen ebenso wie andere grosse Betreiber der Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke für den zukünftigen Strommarkt in der Schweiz und im übrigen Europa.

BFE Forschungsprogramm Wasserkraft

Überblicksbericht 2011

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern

Programmleiter BFE (Autor):

Dr. Klaus Jorde, Entec AG (klaus.jorde@entec.ch)

Bereichsleiter BFE:

Dr. Michael Moser (michael.moser@bfe.admin.ch)

<http://www.bfe.admin.ch/forschungwasserkraft>

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

Einleitung

Wasserkraft erzeugt etwa 16 % des weltweiten Stromverbrauchs und ist in der Schweiz die bedeutendste Quelle für die Generierung von elektrischem Strom. Fast 60 % des benötigten Stroms werden hier mithilfe von Wasserkraft erzeugt. Über die Hälfte davon stammt aus Speicherkraftwerken. Das heisst, dass dieser Strom auf Abruf bereitgestellt werden kann, was ihn besonders wertvoll macht. Der andere Teil stammt aus Laufwasserkraftwerken ohne Speichermöglichkeiten [2]. Die meisten attraktiven Standorte in der Schweiz sind seit langem genutzt, trotzdem stiegen die Erwartungen an die Schweizer Wasserkraft infolge der Reaktorkatastrophe in Fukushima und der darauf entstandenen Energiedebatte massiv an. Man schätzt aber, dass 80–85 % des vorhandenen nutzbaren Potenzials heute bereits ausgenutzt wird. Dennoch finden enorme Investitionen in die Wasserkraft statt. Insbesondere bei den Speicherkraftwerken und Pumpspeicherkraftwerken gibt es eine Reihe von wesentlichen Erweiterungen und Neubauten, die infolge ihrer Rolle im europäischen Verbundnetz wirtschaftlich attraktiv geworden sind.

Das Forschungsprogramm Wasserkraft unterstützt und fördert die vollständige Nutzung des vorhandenen Wasserkraftpotenzials in der Schweiz. Dieser Zielsetzung wird eine ganzheitliche Betrachtungsweise zu Grunde gelegt, die neben technischen und ökonomischen Aspekten auch ökologische und landschaftsbezogene Schutzaspekte mit einbezieht. Mit «vollständiger Nutzung» ist daher nicht die Ausnutzung des gesamten technischen Potenzials gemeint, sondern der Anteil, für dessen Nutzung ein gesellschaftlicher und politischer Konsens vorhanden ist. Das Forschungsprogramm trägt unter an-

derem dazu bei, Wissen und Informationen zu schaffen und bereitzustellen, die diese Konsensfindung unterstützen.

Ein grosser Teil der Wasserkraftforschung, insbesondere im Bereich der grossen Speicherkraftwerke, wird wie seit jeher von den grossen Forschungseinrichtungen der ETHs sowie der Universitäten und Fachhochschulen geleistet. Die Fragestellungen beziehen sich häufig auf Erneuerungs- oder Erweiterungsmassnahmen an einer bestimmten Wasserkraftanlage, für die es bis heute keine genau untersuchten und allgemein gültigen Lösungsansätze gibt. In solchen Fällen werden häufig Felduntersuchungen mit Laborversuchen nachgestellt und die gewonnenen Erkenntnisse in Entwurfsrichtlinien oder in numerische Modelle implementiert. Dies können rein technische aber auch hydraulisch-ökologische oder technisch-ökonomische Fragestellungen sein, die meistens von mehreren Geldgebern gemeinsam gefördert werden. Zunehmende Bedeutung haben Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke, die meistens in Kombination gebaut und betrieben werden. Da in Europa immer mehr Strom aus nicht regulierbaren erneuerbarer Energie in die Netze eingespeist wird, braucht es mehr Speichermöglichkeiten, die mit grossen Leistungen und schnell zu- und abgeschaltet werden können und bei einem Überangebot aus Wind und Sonne Strom aus dem Netz für ihre Speicherpumpen aufnehmen können. Für die Speicherkraftwerke und alle ihre Komponenten bedeutet das ganz andere Betriebsweisen als noch vor einigen Jahren, insbesondere häufige Lastwechsel und Wechsel zwischen Pump- und Turbinenbetrieb.

Die Kleinwasserkraft befindet sich im immerwährenden Spannungsfeld zwischen dem Wunsch nach mehr erneuerbarer Energie und dem gleichzeitig wachsenden Wunsch nach einer intakten Umwelt und Natur. Die kostendeckende Einspeisevergütung mit ihren sehr attraktiven Vergütungssätzen für kleine Wasserkraftanlagen hat eine grosse Anzahl von Wasserrechtsanträgen zur Folge und die Behörden sind zum Teil überfordert. Gleichzeitig wächst der Widerstand gegen noch mehr kleine Wasserkraftanlagen. Neuere Untersuchungen liefern Klarheit über das tatsächlich nutzbare Potenzial, das mithilfe kleiner und sehr kleiner Wasserkraftanlagen in der Schweiz noch erschlossen werden könnte. Was davon tatsächlich nutzbar ist oder genutzt werden sollte, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen, die, wie praktisch alle Forschung im Bereich Kleinwasserkraft, öffentlich gefördert werden müssen. Gleichzeitig erarbeiten viele Kantone eigene Schutz- und Nutzungsstrategien, um die vielen Anfragen besser bewältigen zu können. Kleine Wasserkraftwerke können schätzungsweise insgesamt zu einer ca. 5 %-igen Steigerung der Wasserkraftproduktion beitragen.

Weltweit betrachtet wurde nie so viel neue Stromerzeugung aus Wasserkraftwerken in Betrieb genommen, wie zurzeit. Die grössten Zuwächse finden sich in den Schwellenländern Asiens, Afrikas und Lateinamerikas, wo noch enorme nicht genutzte Ressourcen vorhanden sind. Viele grossen Projekte sind aufgrund ihrer komplexen sozio-ökonomischen, gewässerökologischen und geopolitischen Auswirkungen umstritten.

IEA Klassifikation: 3.6 Hydropower
Schweizer Klassifikation: 2.7 Wasserkraft

Programmschwerpunkte

Die Schwerpunkte in der Wasserkraftforschung resultieren aus der Situation in der Schweiz selbst, aber auch aus der Einbindung der Schweizer Wasserkraftwerke in das europäische Verbundnetz. Das Programm ist in die Sparten Gross- und Kleinwasserkraftwerke unterteilt [1,4].

Die technischen Potenziale der Grosswasserkraft werden bereits zum grössten Teil genutzt, und die weiteren möglichen Zuwächse in Bezug auf die Produktion sind im Vergleich dazu gering. Dagegen wird die installierte Leistung bei vielen Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken derzeit massiv gesteigert, neue Pumpspeicherkraftwerke werden gebaut. Die Speichermöglichkeiten werden im europäischen Verbundnetz dringend benötigt, weil immer grössere Mengen von Strom aus Wind- und Solarenergie in das Netz eingespeist werden. Aus dieser Rolle im europäischen Verbundnetz und den damit verbundenen häufigen Lastwechseln ergeben sich veränderte technische Anforderungen. Die Speicher und die hydraulischen und elektromechanischen Komponenten der Kraftwerke müssen dafür neu ausgelegt werden. Das ganze System wird mittel- bis langfristig schwerer prognostizierbar und die Unsicherheiten müssen bei den sehr langfristigen Investitionsentscheidungen mit berücksichtigt werden. Der Klimawandel bewirkt einen stärkeren Eintrag von Schwebstoffen und Geschiebe, was zur Speicherverlandung beiträgt und die Laufräder der Turbinen belastet. Hier müssen langfristig stabile Verhältnisse geschaffen werden und die Speicherverlandung muss kontrollierbar werden. Auch die weitere Revitalisie-

rung der Flüsse im Zusammenhang mit der Wasserkraftnutzung, insbesondere die Fischwanderung, sind nach wie vor wichtige Forschungsthemen.

Bei den Kleinwasserkraftwerken gibt es noch beträchtliche technische Potenziale, die bisher nicht genutzt sind [7,8,9]. Ob und wie weit diese tatsächlich unter technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten noch zur Stromerzeugung herangezogen werden können, wird derzeit vertieft untersucht. Zunehmend werden heute auch Niederdruckanlagen gebaut, wo z. B. bei der Turbinentechnologie Anpassungsbedarf besteht und auch weitere technische Fragen nicht generell gelöst sind.

Rückblick und Bewertung 2011

Das Forschungsprogramm Wasserkraft fördert Projekte seit Ende 2008. Bis 2011 wurden insgesamt 15 Projekte gefördert. Im Jahr 2011 wurden drei Projekte abgeschlossen. Dabei wurden verbesserte und damit wirtschaftlichere Bemessungsansätze für stahlausgekleidete Druckleitungen für Hochdruckwasserkraftanlagen entwickelt. Im Bereich Kleinwasserkraftanlagen wurden alle heute verfügbaren Niederdrucktechnologien untersucht und vergleichend beurteilt. Dies war notwendig, da die Hersteller solcher Komponenten oft keine abgesicherten Betriebsdaten, z. B. Wirkungsgrade liefern. Die Übersicht hilft den Investoren im Kleinwasserkraftbereich bei der Auswahl geeigneter Turbinen. In einem weiteren Projekt wurden unterschiedliche Vorrichtungen und betriebliche Massnahmen zur Abweisung bzw. Ableitung von Geschiebe

aus dem Turbineneinlauf von Kleinwasserkraftanlagen an einer Pilotanlage getestet und untersucht [10,11]. Der Schlussbericht enthält wichtige Hinweise für die Planung von Niederdruckanlagen bei geschiebeführenden Gewässern. Insgesamt wurden vier neue Projekte begonnen, die alle aus dem Bereich Grosswasserkraft stammen und zum grössten Teil aus unterschiedlichen Quellen, einschliesslich Eigenleistungen der Betreiber, gefördert werden. Bei zwei Projekten geht es um Geschiebe in Speichern bzw. dadurch verursachte Probleme an Turbinen. Ein weiteres grosses Projekt behandelt den Fischabstieg an grossen Flusskraftwerken und schliesslich wird untersucht, wie Unsicherheiten und Risiken über die lange Betriebsdauer eines Wasserkraftwerks bereits bei der Planung mit berücksichtigt werden können.

Ausblick

Im Jahr 2012 wird die Potenzialabschätzung und die tatsächliche Nutzbarkeit des in der Schweiz vorhandenen Kleinwasserkraftpotenzials abgeschlossen. Der Arbeit liegt eine ganzheitliche Beurteilungsmethode zugrunde, die auch gewässerökologische und sozioökonomische Aspekte sowie den Landschaftsschutz berücksichtigt. Die Projekte, die im Jahr 2011 in der Sparte Grosswasserkraft begonnen wurden, haben alle Laufzeiten von drei bis vier Jahren. Fünf bis sechs weitere Projekte sind bereits in der Planung, so dass die Möglichkeiten des Forschungsprogramms 2012 vollständig ausgeschöpft sein werden.

Highlights aus Forschung und Entwicklung

Die beiden nachfolgend vorgestellten Projekte zeigen einen Ausschnitt aus den Forschungsarbeiten in diesem Programm. Aus dem Bereich Kleinwasserkraftanlagen wird ein Projekt vorgestellt, in dem zum Teil neue aber auch herkömmlich Turbinenkonzepte für sehr niedrige Fallhöhen untersucht und bewertet wurden. Eines der Projekte aus dem Bereich der Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke untersucht die Sedimentationsproblematik im wechselnden Turbinen- und Pumpbetrieb.

Evaluation von Ultra-Niederdruckkonzepten für Schweizer Flüsse

An Schweizer Mittellandflüssen besteht eine grosse Anzahl an Wehrschwellen, die für den Erosions- und Hochwasserschutz erstellt worden sind und die ein beachtliches, aber ungenutztes Wasserkraftpotenzial enthalten. Die Fallhöhen an diesen Schwellen bewegen sich jedoch im Bereich von 2m oder weniger und geeignete Maschinengruppen für solche Ultra-Niederdruckanlagen waren bisher nur beschränkt verfügbar. Bestrebungen in verschiedenen Nachbarländern der Schweiz haben zu Pilotlösungen für Ultra-Niederdruckanlagen geführt, die in den letzten zwei Jahren an einzelnen Standorten in Betrieb genommen worden sind. Insgesamt wurden 7 Pilotlösungen und 3 schon länger bekannte Wasserkraftmaschinen für kleinste Fallhöhen identifiziert und deren Anwendung für Schweizer Verhältnisse evaluiert [3,5]. Es zeigte sich, dass:

- einige der besuchten Anlagen erst im Jahre 2010 in Betrieb genommen werden konnten und deshalb noch kaum über relevante Betriebserfahrungen verfügen
- zum Teil noch viele Kinderkrankheiten vorherrschen und die Entwicklung nicht abgeschlossen ist
- für zwei Konzepte (Wasserdruckmaschine und Schachtkraftwerk) noch keine Anbieter von tatsächlich käuflichen Maschinen und Anlagen auf dem Markt sind. Diese Konzepte sind noch im Entwicklungsstadium bei Universitätsinstituten

- keines der insgesamt 10 untersuchten Konzepte eine Lösung für sämtliche Anwendungsfälle darstellt; vielmehr müssen die spezifischen Anforderungen der verschiedenen Ultra-Niederdruck-Standorte analysiert und das im konkreten Fall jeweils geeignete Konzept gewählt werden.

Der vorliegende Bericht charakterisiert die identifizierten Pilotlösungen, zeigt die für die Evaluation vorgeschlagene Systematik und den zugehörigen Kriterienraster und stellt die Stärken und Schwächen der 10 Konzepte in Form von Spinnennetz- oder Radardiagrammen anschaulich dar.

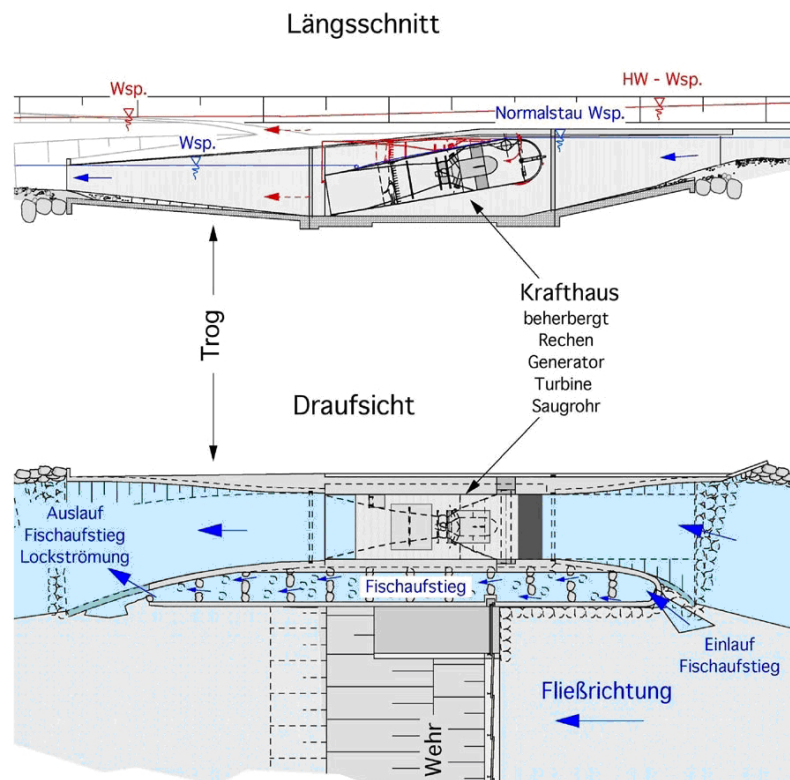
Einer der innovativen neuen technischen Lösungsansätze ist das bewegliche Kraftwerk, welches von der Hydro-Energie Roth GmbH in Karlsruhe, Deutschland, entwickelt wurde (Figur 1). Folgende Kriterien sollten dabei erfüllt sein:

- Das Krafthaus soll anhebbar sein, um Geschiebe direkt weiterzugeben

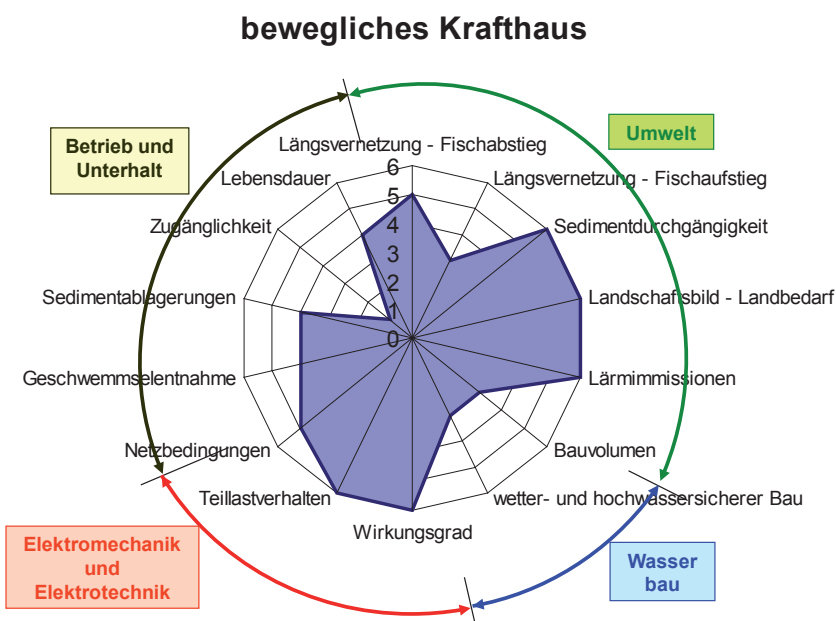
- Bauvereinfachung: das Konzept soll keinen zusätzlichen Kiesfang, Geschiebespülkanal benötigen.
- Es soll optisch möglichst wenig auffallen.
- Über das Krafthaus soll der Fischabstieg, aber auch die Geschwemm-selweitergabe möglich sein.
- Die ungenutzte Energie bei erhöhten Abflüssen soll zusätzlich genutzt werden können.

Darauf basierend wurde das bewegliche, über- und unterströmbare Wasserkraftwerk entwickelt. Bei diesem werden in einem Bauwerk folgende Anlagenteile integriert:

- das schwenkbare Krafthausgehäuse ersetzt einen beweglichen Wehrverschluss;
- ein Spülkanal zur Weitergabe der Sedimente bzw. des Geschiebes;
- ein hydraulisch optimierter Zu- und Ablauftrichter;



Figur 1: Bewegliches Kraftwerk im Längsschnitt mit Rechen-Turbine-Generator-Saugrohr in einer Klappe («Krafthausgehäuse») eingebaut (Quelle: Hydro-Energie Roth GmbH).



Figur 2: Spinnendiagramm zur Evaluation des Ultra-Niederdruckkonzepts «bewegliches Krafthaus».

- am Turbineneinlauf ist ein Rundbogenrechen installiert;
- sowohl ein sohl- wie auch ein oberflächennaher Fischabstieg ist möglich;
- seitlich neben dem Trog ist eine Fischeaufstiegshilfe angeordnet.

Inzwischen ist auch in der Schweiz ein erster solcher Kraftwerkstyp in Kradolf-Schönenberg an der Thur installiert. Die Vor- und Nachteile dieses Konzepts sind in einem Spinnendiagramm zusammengefasst (Figur 2). Daraus erkennt man das sehr gute elektromechanische Verhalten und insbesondere die hohen Wirkungsgrade klassischer Turbinen, wie sie von alternativen Konzepten im allgemeinen nicht erreicht werden. Auch im Umweltbereich, z. B. bei Sedimentdurchgängigkeit, Fischabstieg, Landschaftsbild und Lärmmissionen schneidet diese Technik sehr gut ab. Nachteilig sind hingegen die schwierige Zugänglichkeit der unter Wasser liegenden Komponenten und die aufwändige Bauweise mit tiefen und damit kostenintensiven Gründungen in der Flusssohle.

Die Darstellung der Evaluation in einem Radar- oder Spinnennetzdiagramm zeigt auf einen Blick die Stärken und Schwächen der verschiedenen Konzepte. Obwohl die Evaluation

Schulnoten (1 schlechteste, 6 beste) verwendet, ist die Bildung eines Gesamtnotendurchschnitts über die 14 Kriterien nicht erlaubt, da absichtlich keine Gewichtung vorgenommen wurde (es herrscht z. B. ein Übergewicht von 5 Kriterien zugunsten der Umweltthemen). Der Investor in eine Ultra-niederdruckanlage soll auf einen Blick erkennen können, welches Konzept sich für seine spezifische Anwendung und dessen Randbedingungen am besten eignet, sich aber nicht durch eine rein arithmetische Bestnote fehlleiten lassen. Es hat sich gezeigt, dass keines der untersuchten Konzepte den anderen generell überlegen ist und dass alle jeweils unterschiedliche Stärken und Schwächen haben, die sich in unterschiedlich geformten Spinnendiagrammen äussern.

In diesem Projekt konnten einige der Unklarheiten bezüglich verschiedener Ultra-Niederdrucktechnologien ausgeräumt werden. Insbesondere ist dies dort notwendig, wo keine brauchbaren technischen und sonstigen Informationen von der Herstellern und Promotoren bestimmter Technologien verfügbar sind. Hier stehen den Investoren der Schweizer Kleinwasserkraftszene jetzt brauchbare und verlässliche, einheitlich ermittelte Informationen zur Verfügung.

Überwachung und Vorhersage der Sedimentation in Pumpspeicherkraftwerken

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

In der vorliegenden Forschungsarbeit wird im Rahmen eines Forschungskonsortiums untersucht, welche Auswirkungen der wechselnde Pumpspeicherbetrieb auf die Partikelkonzentrationen im System einer Anlage sowie auf die Strömungsbedingungen und die Trübung in den Staubecken hat.

Um Lösungen für eine nachhaltige Sedimentbewirtschaftung in Pumpspeicherkraftwerken zu entwickeln, soll beantwortet werden, wie der Pumpspeicherbetrieb die Turbulenz im Becken und die Ablagerung von Feinsedimenten beeinflusst, und ob die Turbulenz durch den Betrieb des Kraftwerks und die Position der Ein-/Auslaufbauwerke beeinflusst werden kann, um das Absetzen feiner Sedimente zu reduzieren.

Basierend auf einer Literaturstudie wurde eine theoretische Grundlage ausgearbeitet, um die wichtigsten physikalischen Prozesse hinter den relevanten Phänomenen zu beschreiben. Prototypmessungen auf einer existierenden Kraftwerksanlage ermöglich-

ten eine Analyse der Verlandungsprozesse in einem realen Kraftwerk und zeigten Überwachungsmöglichkeiten auf. In hydraulischen Modellversuchen und numerischen Simulationen konnte der Einfluss verschiedener Parameter wie Abfluss, Zyklendauer, Verhältnis Pump-/Turbiniensequenzen, Konzentration und Position des Ein-/Auslaufbauwerks studiert werden.

Die Prototypmessungen wurden am Pumpspeicherwerk Grimsel II in der Region Oberhasli durchgeführt. Im Grimselsee, dem Unterbecken der Anlage, wurden drei Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) vor dem Ein-/Auslaufbauwerk auf dem Seegrund platziert (Figur 3). So konnten während rund drei Wochen kontinuierlich Geschwindigkeitsprofile vor dem zylinderförmigen Bauwerk gemessen werden. Die Daten wurden ausgewertet, in Form von dreidimensionalen Strömungsfeldern im See dargestellt und anschliessend mit den Betriebsdaten des Kraftwerksbetreibers verglichen (Figur 4).

Sowohl während Pump- wie auch bei Turbiniersequenzen wurden typische, sich wiederholende Strömungsbilder festgestellt. Insbesondere die in das Becken eintretenden Wassermassen generieren eine Strömung, die nach kurzer Zeit bis weit in den See hinein messbar ist. Im Gegensatz dazu dauert es beim Pumpen (also Wasserent-

nahme durch die Fassung) wesentlich länger, bis sich die Strömung im See zum Bauwerk hin ausrichtet. Zudem ist dieses Geschwindigkeitsfeld häufig nur in unmittelbarer Nähe der Fassung messbar.

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

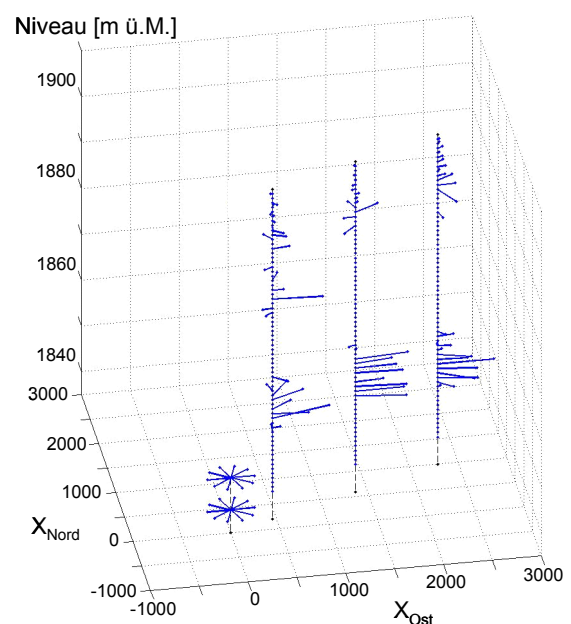
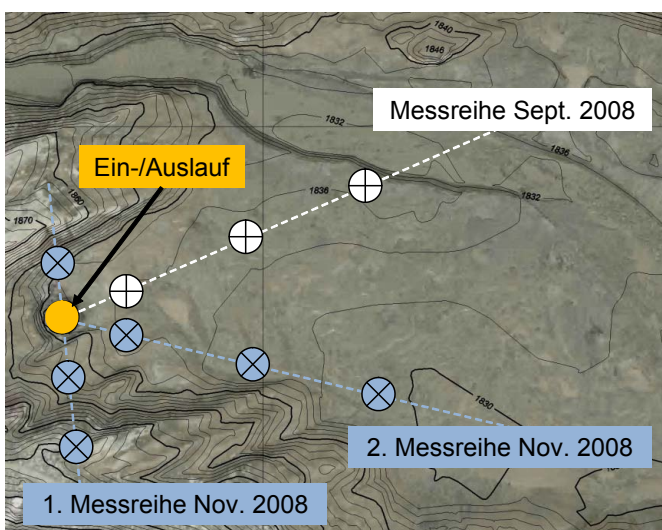
Die Feststoffkonzentration im turbinieren und gepumpten Wasser konnte so über eine Messdauer von acht Monaten (November 2010 bis Juli 2011) kontinuierlich aufgezeichnet werden (Figur 5). Die Resultate zeigen einen wesentlichen Unterschied der Trübung im System zwischen Winter- und Sommermonaten, der auf das Niederschlagsregime des Grimselgebiets zurückzuführen ist. In den Wintermonaten fällt Schnee, der See ist eisbedeckt und oberstrom erfolgt dadurch vom Unteraargletscher kaum natürlicher



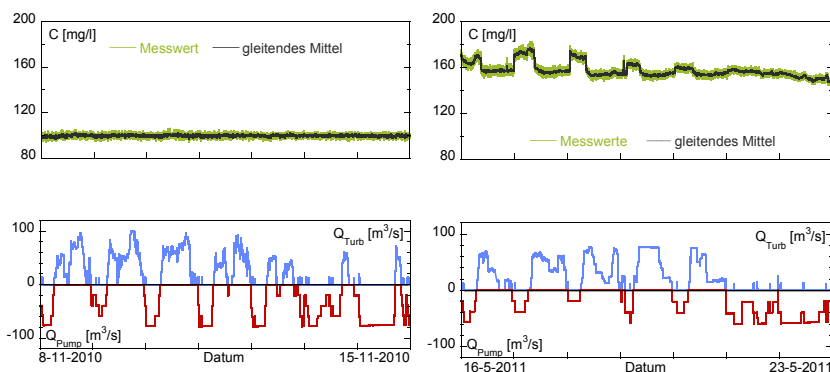
Figur 3: Feldmessungen im Grimselsee mit einem Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) zur Messung von vertikalen Geschwindigkeitsprofilen, die sich während des Pump- und des Turbinienbetriebs ausbilden.

Zufluss, der Sedimente in das Becken eintragen könnte. Zudem wurden in Abhängigkeit der Seestände in Pump- und Turbinierbetrieb unterschiedliche Konzentrationen gemessen, was verdeutlicht, dass die Pumpspeicherung die Sedimentbilanz zwischen den beiden Becken beeinflusst.

In hydraulischen Modellversuchen wurden Geschwindigkeitsfelder sowie



Figur 4: Links: Messachsen und Positionen der ADCPs vor dem Ein-/Auslaufbauwerk Grimsel 2. Rechts: typische 3D-Geschwindigkeitsprofile bei Turbinierbetrieb. Die horizontalen Äste bezeichnen Richtung und Grösse der Geschwindigkeitsvektoren.



Figur 5: Gemessene Feststoffkonzentration (oben) und zugehörige Betriebsdaten (unten), Pump- und Turbinenbetrieb. Aufzeichnungen (a) vom 8. bis 15. November 2010 und (b) vom 16. bis 23. Mai 2011.

Sedimentbilanzen und Ablagerungsprozesse in einer vereinfachten Beckengeometrie untersucht. Die Anlage besteht aus zwei Becken, die mit einem Rohrsystem und einer Pumpe verbunden sind und erlaubt den Betrieb in beide Richtungen (vereinfachte «In-Out»-Sequenzen). Studiert wurde der Einfluss des Abflusses, der Zyklendauer, dem Quotienten zwischen Pump- und Turbinierzyklus sowie der initialen Sedimentkonzentration und der Höhe

des Einlaufbauwerks. Letzteres konnte im Modell auf drei Positionen über dem Beckenboden eingebaut werden.

Der Abfluss wurde mit einem Durchflussmesser kontrolliert und über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten. Die Geschwindigkeitsfelder im Hauptbecken wurden mit 16 Ultrasonic Velocity Profilers (UVP, 2 MHz), die Konzentration in beiden Becken mit einer Trübesonde gemessen. Die

Feinsedimente wurden mithilfe von gemahlenen Nusschalen simuliert, welche optimale Eigenschaften (Korndurchmesser und Dichte) für eine repräsentative Modellierung von Verlandungsprozessen aufweisen.

In Vorversuchen mit Klarwasser wurde das Verhalten des eintretenden Wasserstrahls beschrieben. Die Versuchsreihen mit Feststoffen zeigen, dass sich deren Absetzen nicht komplett verhindern, dank der «In-Out»-Sequenzen jedoch wesentlich verzögern lässt, so dass ein Teil der Sedimente durch den Triebwasserweg abgeführt werden kann.

Ähnlich wie im Prototyp variiert die Konzentration in Abhängigkeit der Pumpspeicheraktivität. Basierend auf den Versuchsergebnissen wurden schliesslich weitere Parameter definiert und in Abhängigkeit der zu Beginn genannten Variablen beschrieben, um zu einem besseren Verständnis der Verlandungsvorgänge in Pumpspeicherwerken beizutragen. Damit trägt das Projekt dazu bei, Strategien zur Reduktion der Verlandungserscheinungen in Becken von Pumpspeichieranlagen zu entwickeln.

Nationale Zusammenarbeit

Die nationale Zusammenarbeit im Jahr 2011 war sehr stark beeinflusst von den Ereignissen in Fukushima. Unmittelbar nach der Reaktorkatastrophe wurden als Konsequenz des geplanten Ausstiegs aus der Kernenergie eine Reihe von Initiativen gestartet, mit denen verschiedene Möglichkeiten untersucht werden sollen, um die zukünftige Energieversorgung der Schweiz sicherzustellen. Unterschiedliche Expertengruppen innerhalb des Bundesamts für Energie arbeiten an Strategien und Szenarien für die zukünftige Stromversorgung der Schweiz [6]. Die Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften erstellt ein Positionspapier zur zukünftigen Stromversorgung der Schweiz. Die Erwartungen an die Wasserkraft sind dabei hoch, in der Öffentlichkeit wurden teilweise unrealistische Erwartungen geäussert. Die Diskussionen innerhalb verschiedener Expertengruppen ergaben die übereinstimmende Einschätzung, dass die in den Szenarien formulierten Produktionserwartungen nur schwer realisiert werden können, wenn sich die bestehenden Rahmenbedingungen nicht ändern. Die Programmleitung war aktiv in diese Arbeiten eingebunden, aber auch die meisten Verantwortlichen der einzelnen Forschungsprojekte waren direkt in diesen Gremien involviert. Verstärkt wurde die Programmleitung in diesem Jahr auch zu verschiedenen Veranstaltungen eingeladen, um dort über die Perspektiven und die Hemmnisse der Wasserkraftnutzung in der Schweiz zu referieren.

Auf der Programmebene wurden wie in den Vorjahren wissenschaftliche Begleitgruppen für einige laufende

Forschungsprojekte etabliert. Diese Gruppen treffen normalerweise ein- bis zweimal jährlich zusammen, um über den Projektfortschritt informiert zu werden und die weitere Vorgehensweise zu erörtern. Zum Teil sind sie integraler Bestandteil des Projektes mit einem wesentlichen Einfluss auf den Verlauf der Arbeiten bei grösseren Projekten. Zum Beispiel besteht die Begleitgruppe zum Projekt Fischabstiege aus einer international und interdisziplinär besetzten Gruppe aus Projektnehmern, externen Wissenschaftlern, Vertretern der beteiligten Wasserkraftwerke und Behördenvertretern. In anderen Fällen dienen Begleitgruppen eher der Sicherstellung der Umsetzung von Forschungsergebnissen in die Praxis.

Das Forschungsprojekt Sustainable Sedimentation in Pumped Storage Plants ist Teil des Projekts HydroNet – Modern Methodologies for Design, Manufacturing and Operation of pumped storage power plants. Schweizweit forschen sieben Institute in den Bereichen Hydrodynamik, Elektronik, Hydraulik, Umwelt und Datentransfer, um Lösungsansätze für die Überwachung und die Vorhersage relevanter Phänomene in Pumpspeicherkraftwerken zu finden.

Die einzelnen Projekte des Forschungsprogramms Wasserkraft sind national gut vernetzt, weil sie meistens aus verschiedenen Förderquellen finanziert sind und neben verschiedenen Wasserkraftbetreiberfirmen auch andere Institutionen beteiligt sind. In den meisten Fällen wird interdisziplinär geforscht.

Internationale Zusammenarbeit

An der internationalen Arbeitsgruppe der Alpenkonvention – Platform Water Management in the Alps – ist die die Programmleitung weiterhin beteiligt. Dort werden Richtlinien für Fragen wie Kleinwasserkraftnutzung, Sedimentbewirtschaftung oder Schwall-Sunk Betrieb in Arbeitsgruppen mit Vertretern aller Alpenländer erarbeitet. Die Ergebnisse sollen den Mitgliedsländern bei der Umsetzung eigener Strategien helfen. Die Schweiz wirkt zwar mit, da sie die Alpenschutzkonvention unterzeichnet hat, allerdings hat sie das Energie-Protokoll nie ratifiziert.

Auch im Jahr 2011 wurde die Zusammenarbeit zwischen dem norwegischen «Centre for Environmental Design of Renewable Energy» und dem Forschungsprogramm Wasserkraft des BFE weitergeführt. Die Programmleitung ist hier als Mitglied der International Scientific Advisory Group tätig. Leider gibt es nach wie vor keine in die einzelnen Projekte hineinreichende Zusammenarbeit,

obwohl zwischen der Schweiz und Norwegen viele Ähnlichkeiten bei den offenen Fragen bestehen. Dies trifft insbesondere im Bereich der Speicherkraftwerke und ihrer ökologischen Auswirkungen zu. Aber auch bei den technischen Auswirkungen der veränderten Betriebsweise von Speicherkraftwerken gäbe es Ansatzpunkte für eine engere Zusammenarbeit.

Projektbezogene Kooperationen wurden im Jahr 2011 im Projekt Fischabstieg aufgebaut. Dieses Projekt wird zum Teil vom Verband Aare Rheinwerke VAR getragen und finanziert. In diesem Verband sind unter anderem die Wasserrechtsbesitzer der Kraftwerke Hochrhein zwischen Bodensee und Basel zusammengeschlossen. Da die Kraftwerke am Hochrhein zum grössten Teil Grenzkraftwerke zwischen der Schweiz und Deutschland sind, sind hier deutsche Betreibergesellschaften massgeblich beteiligt.

Referenzen

- [1] BFE (2007). *Energieforschungsprogramm Wasserkraft für die Jahre 2008 – 2011*.
- [2] BFE (2011). *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2010*.
- [3] Bölli, M. (2011): *Forschung und Entwicklung - Neue Konzepte für Ultra-Niederdruck-Kraftwerke*. Newsletter Nr. 15, Programm Kleinwasserkraftwerke, November 2011.
- [4] CORE/BFE (2007). *Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 – 2011*.
- [5] Eichenberger, P. und Scherrer, I. (2011): *Neue Konzepte für Ultra-Niederdruck-Kraftwerke*. Wasser, Energie, Luft, Heft 3, September 2011.
- [6] SATW (2011). *Zukunft der Stromversorgung Schweiz (Entwurfassung), Bericht der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften SATW (Stand 2011), unveröffentlicht*.
- [7] Schröder, U. und Weidmann, Y (2010): *GIS-gestützte Berechnung des hydroelektrischen Potenzials von Fließgewässern in der Schweiz – Einfluss von Höhenmodell und Gewässernetz*. Angewandte Geoinformatik 2010, Beiträge zum 22. AGIS-Symposium Salzburg, Wichmann Verlag, Seite 310-315.
- [8] Schröder U. (2010): *Das hydroelektrische Potenzial der Schweiz als Planungsgrundlage für den Ausbau der Kleinwasserkraft*. OTTI, Tagungsband zum 13. Internationalen Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke, September 2010, Seite 22-27.
- [9] Schröder U. (2011): *Ermittlung des Wasserkraftpotenzials in der Schweiz*. Wasserwirtschaft 7-8/2011, Seite 19-23.
- [10] Schürmann, A. und Eichenberger, P.: *Messsystem zur Detektierung und Quantifizierung von Geschiebetrieb*. Tagungsband 14. Internationales Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke, September 2011, Innsbruck.
- [11] Schürmann, A.; Wiget, M. und Eichenberger, P. (2011): *Messsystem zur Detektierung und Quantifizierung von Geschiebetrieb*. WasserWirtschaft Heft Nr. 7-8, 2011.

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- BEWÄLTIGUNG VON GESCHIEBE AN KLEINWASSERKRAFTANLAGEN - ERFOLGSKONTROLLE VON AUSGEFÜHRTEN BAULICHEN UND BETRIEBLICHEN MASSNAHMEN**

Lead: **Entegra Wasserkraft AG**

Contact: **Eichenberger Peter** peter.eichenberger@entegra.ch

Abstract: Schweizer Mittellandflüsse werden zunehmend durch Niederdruck-Wasserkraftanlagen genutzt. In diesen Gewässern tritt häufig während Hochwässern starker Geschiebetrieb auf. Wenn Geschiebe in die Triebwerkszuleitungen gelangt, führt dies zu Betriebsstörungen oder Schäden. In diesem Projekt werden unterschiedlichen Strategien untersucht, wie der Geschiebeeintrag reduziert oder vermieden werden kann.

R+D 3.6.2*

Funding: **BFE**

Period: **2010–2011**
- DESIGN OF STEEL LINED PRESSURE TUNNELS AND SHAFTS**

Lead: **Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne**

Contact: **Schleiss Anton** anton.schleiss@epfl.ch

Abstract: Die herkömmlichen Dimensionierungsansätze für stahlausgekleidete Hochdruckleitungen werden mithilfe von Modellversuchen überprüft und verbessert. Die Ergebnisse werden in numerische Modelle implementiert.

R+D 3.6.1

Funding: **BFE CCEM**

Period: **2009–2011**
- ENTWURF UND BEMESSUNG VON SEDIMENTUMLEITSTOLLEN**

Lead: **Eidg. Technische Hochschule Zürich**

Contact: **Boes Robert** boes@vaw.baug.ethz.ch

Abstract: Zur Reduktion der Verlandung von Speicherseen bei Wasserkraftanlagen wurden in den letzten Jahren in einigen Fällen Sedimentumleitstollen gebaut. Da es bisher weltweit hierzu wenig Erfahrung gibt, gleichzeitig aber der Bedarf nach einer langfristigen Speicherbewirtschaftung weltweit ansteigt, sind grundlegende Untersuchung zur Bemessung solcher Anlagen notwendig. Dazu trägt dieses Projekt bei.

R+D 3.6.1

Funding: **BFE SER**

Period: **2011–2013**
- ERHEBUNG DES KLEINWASSERKRAFTPOTENZIALS DER SCHWEIZ, TEIL A**

Lead: **Watergisweb AG**

Contact: **Schröder Udo** u.schroeder@watergisweb.ch

Abstract: mithilfe von GIS unterstützten Modellen auf der Basis von digitalen Höhenmodellen und flächendeckenden Abflussdaten wird in diesem Projekt das Kleinwasserkraftpotenzial flächendeckend für die ganze Schweiz untersucht. Dabei wird für jedes einzelne Gewässer ab einer bestimmten Länge das auf summierte Linienpotenzial berechnet.

R+D 3.6.2

Funding: **BFE**

Period: **2008–2012**
- ERHEBUNG DES KLEINWASSERKRAFTPOTENZIALS DER SCHWEIZ, TEIL B**

Lead: **Universität Bern**

Contact: **Weingartner Rolf** rolf.weingartner@giub.unibe.ch

Abstract: In Ergänzung zum rein technischen Potenzial, welches im Teil A. untersucht wurde, werden hier zusätzlich Aspekte der Gewässerökologie, des Landschaftsschutzes und soziokulturelle Gesichtspunkte erfasst. Werden diese mit dem technischen Potenzial verschnitten, kann daraus das tatsächlich und unter ganzheitlichen Gesichtspunkten nutzbare Potenzial abgeleitet werden.

R+D 3.6.2

Funding: **BFE**

Period: **2008–2012**
- ERHEBUNG DES KLEINWASSERKRAFTPOTENZIALS DER SCHWEIZ, TEIL C**

Lead: **Netzwerk Wasser im Berggebiet**

Contact: **Lehning Michael** lehning@slf.ch

Abstract: Im Teilprojekt C der Studie zum Kleinwasserkraftpotenzial der Schweiz wird die Umsetzung der Untersuchungsergebnisse gemeinsam mit den Bergkantonen durchgeführt. Den Kantonen sollen die Ergebnisse und die Modellansätze als Entscheidungshilfe für ihre eigenen Kleinwasserkraftwerksstrategien dienen.

R+D 3.6.2

Funding: **BFE**

Period: **2008–2012**
- EVALUATION VON ULTRA-NIEDERDRUCKKONZEPTEN FÜR SCHWEIZER FLÜSSE**

Lead: **Entegra Wasserkraft AG**

Contact: **Eichenberger Peter** peter.eichenberger@entegra.ch

Abstract: Herkömmliche Turbinen sind für Fallhöhen unter 2 m nur bedingt geeignet. Es gibt viele ungenutzte Abstürze mit solchen geringen Fallhöhen, an denen bisher keine Wasserkraft genutzt wird. Die Studie zeigt einen Vergleich und eine Bewertung der heute verfügbaren Wasserkraftmaschinen für den Ultra Niederdruck Bereich.

R+D 3.6.2

Funding: **BFE**

Period: **2009–2011**

● HYDROPOWER DESIGN UNDER UNCERTAINTIES

R+D 3.6.1

Lead: Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne

Funding: BFE

Contact: Schleiss Anton anton.schleiss@epfl.ch

Period: 2011–2014

Abstract: Wasserkraftanlagen haben sehr hohe Investitionskosten und müssen sich über extrem lange Zeiträume amortisieren. Die Unsicherheiten zum Beispiel bezüglich der Strompreisentwicklung oder des Einflusses des Klimawandel auf das Wasserangebot sowie andere Risiken müssen bei der Planung besser berücksichtigt werden. Hierzu werden Methoden entwickelt.

● LUFTEINTRAGSRATE IN DRUCKSYSTEME VON WASSERKRAFTANLAGEN INFOLGE EINLAUFWIRBEL

R+D 3.6.1

Lead: Eidg. Technische Hochschule Zürich

Funding: BFE STV SER

Contact: Boes Robert boes@vaw.baug.ethz.ch

Period: 2009–2013

Abstract: Durch die Rolle der Schweizer Wasserkraft für die Bereitstellung von Spitzenstrom im europäischen Verbundnetz haben sich die Anforderungen an die Bewirtschaftung der Speicher verändert. Die verfügbaren Speichervolumen werden soweit möglich vollständig ausgenutzt. In diesem Zusammenhang wird in diesem Projekt untersucht, ab welchen Überdeckungen der Einläufe zu den Triebwasserleitungen Luft eingeblasen werden kann, da solche Luftblasen problematisch sein können.

● MASSNAHMEN ZUR GEWÄHRLEISTUNG EINES SCHONENDEN FISCHABSTIEGS

R+D 3.6.1

Lead: Eidg. Technische Hochschule Zürich

Funding: BFE SER VAR EAWAG

Contact: Boes Robert boes@vaw.baug.ethz.ch

Period: 2011–2014

Abstract: Während Fische aufstiege seit langem erprobt sind und erfahrungsgemäß gut funktionieren, ist die Frage des Fischabstiegs bisher stark vernachlässigt worden. In diesem Projekt sollen Konzepte und Methoden entwickelt werden, mit denen absteigende Fische sicher ins Unterwasser von Flusskraftwerken geleitet werden können, ohne dass sie in die Turbinen gelangen.

● PILOTANLAGE MÜNSTER (VS): UNIVERSALTURBINE FÜR WASSERVERSORGUNGEN

P+D 3.6.2

Lead: Stiftung Revita

Funding: BFE

Contact: Schindelholz Bruno info@revita.ch

Period: 2009–2012

Abstract: Die so genannte Universal Turbine ist eine Pelton Turbine, wie in einem Überdruckbehälter läuft. Der Druck in diesem Behälter entspricht dem Gegendruck, der für ein nachgeschaltete Wasserversorgung notwendig ist. Diese Turbinen werden daher in Wasserversorgungsanlagen eingesetzt. In diesem Projekt wurde ein Prototyp gebaut und erprobt.

● SCHWEBSTOFF-MONITORING UND VERSCHLEISS AN PELTON TURBINEN

R+D 3.6.1

Lead: Eidg. Technische Hochschule Zürich

Funding: BFE SER BKW GWK

Contact: Boes Robert boes@vaw.baug.ethz.ch

Period: 2011–2013

Abstract: Schwebstoffe im Triebwasser von Wasserkraftanlagen führen insbesondere bei Hochdruckanlagen zu Abrasionsschäden. In diesem Projekt werden neue Beschichtungen für die Schaufeln von Pelton Turbinen untersucht, die die Lebensdauer der Laufräder deutlich verlängern sollen.

● SUSTAINABLE SEDIMENTATION IN PUMPED STORAGE PLANTS

R+D 3.6.1

Lead: Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne

Funding: BFE CCEM

Contact: Schleiss Anton anton.schleiss@epfl.ch

Period: 2009–2012

Abstract: Beim Pump- und Turbinenbetrieb in Speicherkraftwerken wird nicht nur Wasser sondern auch suspendierte Stoffe bewegt. In Abhängigkeit von den sich ausbildenden Strömungsverhältnissen bleiben diese Stoffe in der Schwebelag oder setzen sich ab. Im Labor sowie an einem Prototyp werden diesen Vorgänge untersucht und aus den Ergebnissen numerische Modelle entwickelt und kalibriert, mithilfe derer die Verlandungsprozesse besser analysiert werden können.

