

Ausgleichs- und Regulierbecken Innertkirchen - Planung, Realisierung und Inbetriebnahme des ersten Beckens zur Reduktion von Schwall und Sunk in der Schweiz

Michael Müller, Roland Kaderli, Yves Keller, Matthias Gehri und Markus Kost

Zusammenfassung

Die bestehenden Kraftwerksanlagen Handeck 2 und Innertkirchen 1 der Kraftwerke Oberhasli AG, Schweiz, wurden im Rahmen eines Ausbauprojekts durch parallele Triebwassersysteme und neue Kavernenzentralen erweitert. Bei der Planung und Realisierung der Neubauten der untersten Kraftwerksstufe wurden bauliche Massnahmen zur aktiven Schwall-/Sunkreduktion berücksichtigt, damit die betriebsbedingten Pegelschwankungen in der Hasliaare gedämpft und das unterstrom liegende Gewässer ökologisch aufgewertet werden können. Die erweiterte Anlage umfasst deshalb ein Ausgleichs- und Regulierbecken sowie einen über 2 km langen sogenannten Parallel-Unterwasserstollen, die mit ihren Speichervolumina eine Schwall-Sunk-orientierte Regulierung des komplexen Kraftwerksparks ermöglichen sollen.

In Vorstudien wurden die Kapazitäten der Regelorgane des Beckens sowie deren Einfluss bei der Wasserrückgabe in das natürliche Unterwasser in physikalischen Modellversuchen untersucht. Ausserdem wurden nach einer ersten Berechnung von Schwall-/Sunkgradienten in Funktion verschiedener Speichervolumina die Zielraten für Schwall und Sunk in Abhängigkeit des Grundabflusses der Hasliaare definiert.

In der Ausführungsplanung wurde die Speicherbewirtschaftung unter Berücksichtigung von sicherheitsrelevanten und betrieblichen Randbedingungen und unter Einhaltung der kritischen Schwall-/Sunkraten optimiert. Diese Analysen zeigten, dass sowohl der Unterwasserstollen als auch das Becken aktiv reguliert werden müssen, um sämtliche Anforderungen an das System zu erfüllen.

Diese Schwall-Sunk-Regelung wurde in Form einer robusten Volumenbilanz realisiert. Dabei spielen die Zuflussprognosen, die Ist-Volumina und die zukünftigen Soll-Volumina die zentralen Rollen. Zahlreiche Begrenzungsfunktionen sorgen dafür, dass die Wasserrückgabe auch bei überraschenden Zuflussänderungen mit minimalen Schwall- und Sunkgradienten erfolgt. Lokale Begrenzungsfunktionen halten die Wasserstände an allen relevanten Orten in sicheren Grenzen. Erste Inbetriebsetzungsversuche zeigten, dass die Schwall-Sunk-Regelung mit den geplanten Konzepten und Einrichtungen auf gutem Weg ist. Optimierungsbedarf besteht noch bei einzelnen Organantrieben und Regelparametern.

1 Ausgangslage, Vorgaben, Ziele

1.1 Ausgangslage

Im Rahmen des Ausbauprojekts "Tandem" wurden die beiden aufeinanderfolgenden Kraftwerksanlagen Handeck 2 und Innertkirchen 1 zwischen 2011 und 2016 durch parallele Systeme aufgewertet (Müller et al. 2014). Der Ausbau ermöglicht der Betreiberin, Kraftwerke Oberhasli AG (KWO), eine Steigerung der Leistungsregulierung von insgesamt 240 MW sowie eine erhöhte Flexibilität im Betrieb ihrer Anlagen.

Vor dem Ausbau gelangte das turbinierete Wasser von maximal $Q_{Inn1,max} = 39 \text{ m}^3/\text{s}$ aus der unterirdischen Zentrale Innertkirchen 1 (Inn1) über einen rund 1330 m langen Unterwasserstollen ins Gadmerwasser und von dort aus nach weiteren 50 m in die Hasliaare (Abb. 1). Das Unterliegergewässer erfuhre die Abflussschwankungen aus dem Turbinierbetrieb entsprechend ungedämpft. Zusätzlich wurde bisher auch das Wasser aus dem bestehenden Kraftwerk Innertkirchen 2 (Inn2, $Q_{Inn2,max} = 29 \text{ m}^3/\text{s}$) direkt über einen ca. 40 m langen Freispiegelkanal in die Hasliaare geleitet.

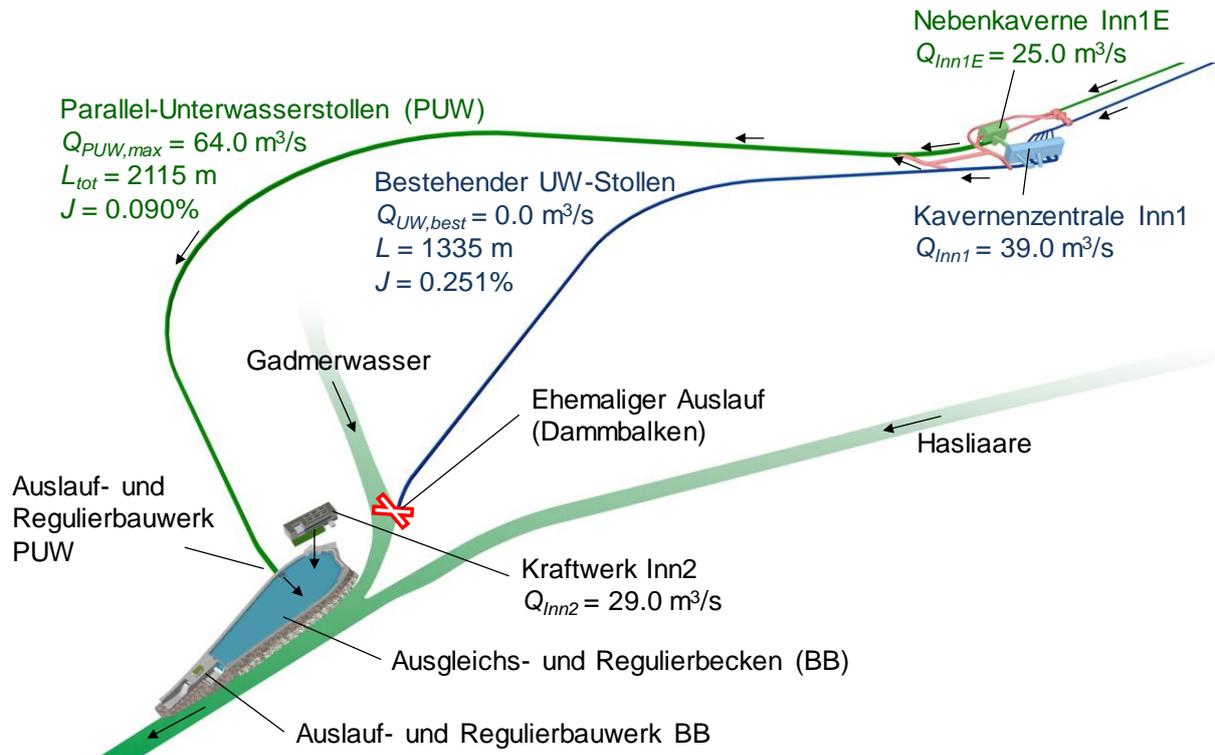


Abb. 1 Übersicht Anlagenteile erweitertes Kraftwerkssystem Innertkirchen 1 & 1E.

Das Ausbauprojekt "Tandem" umfasste den Bau eines parallelen Triebwasserweges, der in einem Abstand von rund 50 m zur bestehenden Anlage ausgebrochen wurde. Von der oberwasserseitigen Kraftwerksstufe Handeck führen nun zusätzlich zum bestehenden Triebwassersystem ein Parallelstollen und ein Parallelschacht zur neuen unterirdischen Nebenkaverne Innertkirchen 1E (Inn1E), wo ein zusätzlicher Abfluss von bis zu $Q_{Inn1E,max} = 25 \text{ m}^3/\text{s}$ turbinier werden kann. Mit dieser Kraftwerkserweiterung und der damit verbundenen erhöhten Ausbaumassmenge und Regulierungsmöglichkeit hätten sich die Abflussschwankungen in der Hasliaare verschärft.

Da die 2011 in Kraft getretene Revision des Schweizerischen Gewässerschutzgesetzes (GSchG) unter anderem eine Behebung der wesentlichen Beeinträchtigungen durch Schwall/Sunk mittels baulichen und allenfalls betrieblichen Massnahmen vorschreibt, setzte sich die KWO zum Ziel, das unterstrom liegende Gewässer ökologisch aufzuwerten. Zur Dämpfung allfälliger durch den Kraftwerksbetrieb hervorgerufenen Pegelschwankungen in der Hasliaare sollte ein Speichervolumen geschaffen werden, das zur aktiven Schwall-/Sunkreduktion beiträgt.

1.2 Vorgaben, Ziele

In einer hydrologischen Vorstudie wurden die Schwall-/Sunkgradienten des ursprünglichen Gewässerzustandes ohne Kraftwerk sowie der Zustände mit dem Kraftwerk Inn1 sowie nach Realisierung des "Tandems" abgeschätzt (Schweizer et al. 2013a). Die Berechnungen zeigten, dass eine Schwall-/Sunkdämpfung mit einem Volumen zwischen $V = 50'000 \text{ m}^3$ und $100'000 \text{ m}^3$ zu wesentlich besseren ökologischen Bedingungen führen. Dies nicht nur im Vergleich zur zukünftigen Situation ohne Schwall-/Sunkmassnahme, sondern auch gegenüber der Situation vor der Systemerweiterung (Tab. 1). Im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse legte schliesslich ein Expertengremium bestehend aus Ökologen, Ingenieuren, Fachstellenvertretern und Betreiberin ein Speichervolumen von $V = 80'000 \text{ m}^3$ als optimale und für alle Seiten verträgliche Lösung fest (Schweizer et al. 2013b).

Die relevanten Schwall-/Sunkgradienten, die als Zielwerte für das Ausführungsprojekt definiert wurden, sind in Tab. 1 zusammengefasst. Sie basieren auf Berechnungen für die bezüglich Pegelschwankungen besonders kritischen Wintermonate November bis März mit natürlich bedingt kleinen Abflüssen in der Hasliaare (Bieri et al. 2014). Bei ansteigendem Pegel (Schwall) ist über den gesamten Abflussbereich ein Gradient von $+0.70 \text{ m}^3/\text{s}/\text{min}$ anzustreben. Zudem darf ein maximaler Gradient von $+2.50 \text{ m}^3/\text{s}/\text{min}$ nicht überschritten werden. Die Sunkrate bis zu einem Grundabfluss von $8.1 \text{ m}^3/\text{s}$ darf $-1.33 \text{ m}^3/\text{s}/\text{min}$ betragen. Für tiefere Grundabflüsse beläuft sich die kritische Pegelrückgangsrate auf $0.5 \text{ cm}/\text{min}$, was einer Sunkrate von $-0.14 \text{ m}^3/\text{s}/\text{min}$ entspricht. Damit wird das Trockenfallen von jungen Forellen in den Wintermonaten bei tiefen Wasserständen verhindert.

Tab. 1 Gradienten Schwall (+), Sunk (-) und Sunk bei tiefem Grundabfluss $< 8.1 \text{ m}^3/\text{s}$ (-*) für bestehendes und ausgebautes Kraftwerkssystem (Bieri et al. 2014).

Kraftwerkskonfiguration	Bestand (vor Ausbau)			"Tandem" ohne UW-Speicher			"Tandem" mit UW-Speicher $V = 80'000 \text{ m}^3$		
	(+)	(-)	(-*)	(+)	(-)	(-*)	(+)	(-)	(-*)
Schwall-/Sunkrate [$\text{m}^3/\text{s}/\text{min}$]	1.36	1.21	0.70	1.43	1.35	0.70	0.70	1.33	0.14

2 Konzept Schwall-Sunk-Reduktion

2.1 Randbedingungen

Aufgrund der beengten Platzverhältnisse im Talboden von Innertkirchen konnte in Form eines Ausgleichs- und Regulierbeckens (BB) maximal ein Volumen von rund $V_{\text{BB}} = 20'000 \text{ m}^3$ realisiert werden. Deshalb wurde der neue Parallelunterwasserstollen (PUW) mit einem großen Querschnitt und einer Länge von fast 2.2 km so ausgelegt, dass er weiteres Speichervolumen zur Verfügung stellen kann. Der bestehende Unterwasserstollen sollte mit Dammbalken verschlossen und die Unterwasserstollen der beiden Kraftwerke verbunden werden, so dass in Zukunft sämtliches Wasser durch den neuen PUW abfließt. Sämtliche Anlageteile sind so konzipiert, dass bei einer Revision einer Zentrale die benachbarte Anlage weiter autonom funktionieren kann.

Während der Ausführungsplanung wurde die Hydraulik des Systems BB/PUW in 1D-Simulationen (MIKE URBAN, DHI) für verschiedene Betriebsszenarien untersucht und optimiert. Die Bewirtschaftung des Speichervolumens wurde mit einem angepassten Regelalgorithmus verfeinert. Dabei wurden nicht nur die kritischen Schwall-/Sunkraten berücksichtigt, sondern zusätzlich auch die von der KWO geforderten sicherheitsrelevanten und betrieblichen Randbedingungen. So sollten zum Beispiel weder die beiden Einzelspeicher BB und PUW, noch das Gesamtsystem über- oder leerlaufen. Gleichzeitig sollten ein rasches Anfahren auf Vollast sowie ein Abschalten der Turbinen innerhalb kurzer Zeit möglich bleiben, damit der Kraftwerksbetrieb aufgrund der neuen Schwall-/Sunkregulierung keine Einschränkungen erfährt. Die Berechnungen zeigten, dass eine aktive Regulierung nicht nur am Beckenende, sondern auch bei der Einmündung des PUW in das BB notwendig ist. Dies um die definierten Zielwerte der Schwall- und Sunkraten einhalten und das System sicher und flexibel betreiben zu können.

2.2 Parallel-Unterwasserstollen

Der ursprünglich als Freispiegelstollen konzipierte PUW weist eine Breite von 7.42 m und eine Firsthöhe von 6.00 m sowie ein sehr flaches Stollengefälle von 0.9‰ auf. Damit wird bei maximalem Durchfluss eine Fliesstiefe von etwas über 4.50 m erreicht und unter den Laufködern bleiben knapp 40 cm Reserve bezüglich Freihang. Im unregulierten Freispiegelbetrieb hätte der PUW je nach Abfluss ein Speichervolumen bis zu $V_{PUW} = 60'000 \text{ m}^3$ bereitgestellt, was gemäss Vorstudien zusammen mit dem Becken ausreichend gewesen wäre. Allerdings hat die Berücksichtigung der zusätzlichen Randbedingungen gezeigt, dass für gewisse relevante Betriebsfälle zusätzliches Speichervolumen erforderlich ist.

Mittels zwei Segmentschützen von je 6 m Breite am Ende des PUW erhöht sich das bewirtschaftbare Volumen von $40'000 \text{ m}^3$ auf bis zu $73'000 \text{ m}^3$, je nach momentanem Abfluss im System und Regulierungsmöglichkeiten. Wird der PUW vom Unterwasser her eingestaut, verändern sich die hydraulischen Randbedingungen und der Stollen muss unter Druckabfluss die kritischen Pegel einhalten. Ausserdem wurden Be- und Entlüftungselemente erforderlich, um den Luftaustausch während transienten Vorgängen gewährleisten zu können (Abb. 3).

2.3 Ausgleichs- und Regulierbecken

Das Ausgleichs- und Regulierbecken bildet den Flaschenhals am untersten Ende des komplexen Kraftwerksparks der KWO (Abb. 2). Zum einen mündet der PUW ins Becken, zum anderen wird nach dem Ausbau auch das Wasser aus dem Kraftwerk Inn 2 direkt ins Becken geleitet und nicht mehr direkt in die Hasliaare abgegeben. Das BB stellt ein bewirtschaftbares Volumen von maximal $V_{BB,max} = 19'800 \text{ m}^3$ zur Verfügung und wird mittels einer 12.5 m breiten Klappe und einer 10.0 m breiten Segmentschütze reguliert.

Im Vorfeld der Planung wurden die Kapazitäten dieser beiden Auslass- und Regelorgane, die vorgesehene Geometrie der Tosbecken sowie der Einfluss des neuen Beckens bei der Wasserrückgabe in das natürliche Unterwasser in physikalischen Modellversuchen am Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) untersucht und optimiert (LCH, 2014). Es zeigte sich, dass die beiden Auslassorgane bei normalen Fliessbedingungen in der Hasliaare auch einzeln die notwendige Entlastungskapazität von knapp $100 \text{ m}^3/\text{s}$ aufbringen damit die geforderte Redundanz der Regelorgane gewährleistet ist. Im Hochwasserfall bedarf es eines hohen Pegels im BB, damit der maximale Abfluss aus den Kraftwerken weiterhin abgeführt werden kann. Die Hochwasser-

sicherheit des Hasliaareabschnittes wird durch den Bau des BB und dessen Auslauf- und Regulierbauwerke nicht beeinträchtigt.



Abb. 2 Luftbild des fertiggestellten Ausgleichs- und Regulierbeckens Innertkirchen. Oben rechts: Kraftwerk Innertkirchen 2, Mitte: Ausgleichs- und Regulierbecken mit Auslauf- und Regulierbauwerk PUW, unten links: Wasserrückgabe über Auslauf- und Regulierbauwerk BB in die Hasliaare. Entlang des rechten Bildrands sind das Gadmerwasser sowie oberhalb der Bahbrücke das ehemalige Auslaufbauwerk des bestehenden Unterwasserstollens erkennbar.

3 Vorgesehener Regelbetrieb

3.1 Herausforderungen

Die grössten Herausforderungen für den Regelbetrieb stellen folgende Umstände dar:

- Aus dem Betrieb des Kraftwerksparks resultieren Zuflüsse zwischen 0 bis 64 m³/s (Inn1) in den Stollen und 0 bis 29 m³/s (Inn2) direkt in das Becken. Theoretisch ist damit ein Zuflussgradient von 93 m³/s/15 min denkbar, was 6.2 m³/s/min entspricht. Für die Wasserrückgabe in die Hasliaare wird ein Gradient angestrebt, der eine Grössenordnung tiefer liegt.
- Das Stollensystem und das Becken beeinflussen sich gegenseitig und bilden zusammen ein schwingfähiges System. Die Regulierung soll solche Schwingungen nicht anregen und darf sie keinesfalls verstärken.
- Die Regelung muss den minimalen Freihang aller direkt betroffenen Turbinen sicherstellen. Verstellungen an den Regelorganen am Ende des Stollens wirken aber erst mit einer Totzeit von einigen Minuten im Unterwasser der Turbinen des Kraftwerks Inn1.

- Die aktuellen Wasserstände, Volumina und Durchflüsse werden ausschliesslich mit Wasserstands- und Positionsmessungen ermittelt. Es gibt nur wenige Orte im hydraulischen System, welche eine in allen Betriebsfällen verlässliche Wasserstandsmessung erlauben.

3.2 Ansatz

Die Vorgaben nach Kapitel 1.2 können mit dem beschränkten Volumen nur erfüllt werden, wenn das System Stollen und Becken vorausschauend durch sanfte Füllung oder Entleerung auf bestimmte Füllgrade geführt und damit aufkommende Betriebsfälle vorbereitet wird. Dazu braucht es Kenntnisse über die zukünftigen Zuflüsse, also eine verlässliche Prognose.

Für den Übergabepunkt zwischen dem Kraftwerkpark der KWO und dem Hochspannungsnetz gibt es einen Wirkleistungssollwert, der über mehrere Stunden im Voraus bekannt ist. Mit diesem Wirkleistungsfahrplan kann grundsätzlich eine Prognose der Zuflüsse ins System Stollen und Becken erstellt werden. Diese Prognose ist mit den folgenden Unschärfen behaftet:

- Im Leitsystem ist erst mit dem manuellen Startbefehl bekannt, mit welchen Maschinengruppen die zukünftige Wirkleistung generiert werden wird. Je nach eingesetzter Turbine des Kraftwerksparks der KWO gelangt ein beträchtlicher oder auch gar kein Zufluss in das System BB/PUW.
- Werden Pumpen zugeschaltet, sinkt die Wirkleistung am Übergabepunkt grundsätzlich. Allerdings kann gleichzeitig der Zufluss ins System steigen, weil ein Teil der zugeschalteten Pumpenleistung andernorts durch Turbinierung kompensiert wird.
- Aufgrund der Situation am Energiemarkt kommt es häufig zu bedeutenden Änderungen des Wirkleistungsfahrplanes innerhalb der aktuellen Viertelstunde. Diese Änderungen können nicht prognostiziert werden.

Simulationen zeigten, dass der Betrieb mit einer unscharfen und zeitweise falschen Prognose wesentlich besser gelingt als ohne.

3.3 Umsetzung

Die Regelung basiert auf robusten Volumenbilanzen von Stollen und Gesamtsystem. Das Ist-Volumen wird aus den aktuellen Wasserständen und der Geometrie bestimmt. Das Soll-Volumen ergibt sich aus den zu erwartenden Zuflüssen in der kommenden Stunde. Bei hohen Zuflüssen wird ein hohes Systemvolumen angestrebt, um bei Zuflussrückgang genügend Wasser für einen sehr langsamen Abflussrückgang in die Hasliaare zur Verfügung zu haben.

Die Zuflussprognose besteht aus mehreren Abbildern des bestehenden Kraftwerksreglers. Diese Klone werden jeweils mit zukünftigen Wirkleistungssollwerten und den aktuellen Istwerten versorgt. Sie liefern die zukünftigen Leistungssollwerte für die relevanten Kraftwerke, aus denen der zukünftige Zufluss in das System bestimmt wird. Damit das System auch bei falschen Prognosen, überraschenden Fahrplanänderungen, Handeingriffen und Störungen die Schwall-/Sunksituation gut meistert, sind zahlreiche Begrenzungsfunktionen implementiert.

Die errechneten Soll-Abflüsse aus dem Stollen werden mit zwei Segmenten, diejenigen aus dem Becken mit einer Klappe und einem Segment realisiert. Wichtig für diese Organe sind die exakte Bestimmung der Abflüsse und die variablen Verstellgeschwindigkeiten. An folgenden relevanten Orten wurden Wasserstandsmessungen mit je einem bis drei Sensoren eingerichtet: Unterwasser der Turbinen, Stollenanfang, Stollenende, Beruhigungsbecken und Hasliaare

nach der Wasserrückgabe. Die beiden Messstellen im Becken sowie am Ende des PUW sind in Abb. 3 illustriert.

Die übergeordneten Funktionen wie Zufluss-Prognose, Volumenbilanzen und Systembegrenzungen sind in redundanten Rechereinheiten der bestehenden Kraftwerksregelung implementiert. Je eine Automatisierungseinheit beim Stollenauslauf und bei der Wasserrückgabe in die Hasliaare beherbergen die lokalen Funktionen wie Abflussregelung, Organsteuerung und weitere Begrenzungen. Letztere sorgen für die Einhaltung aller sicherheitsrelevanten Wasserstände in den Stollen und im Becken.

Die Messstellen, die Regelstruktur und die Leittechnikstruktur sind so ausgelegt, dass sie auf Fremdeinflüsse und Störungen weitgehend unempfindlich sind.

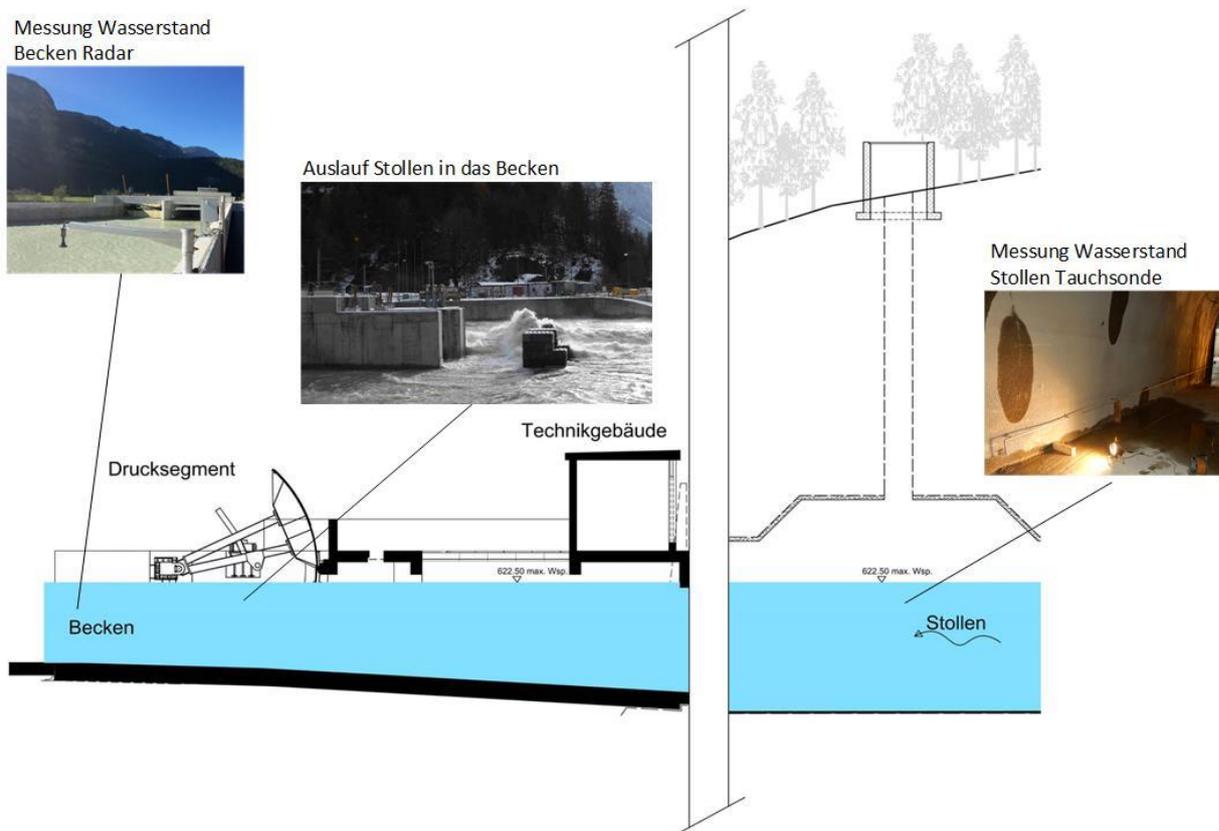


Abb. 3 Schnitt durch das Auslauf- und Regulierbauwerk PUW in das BB, inkl. Entlüftungsbohrung am Stollenende.

4 Inbetriebsetzungsversuche

Im Oktober/November 2015 erfolgte die Inbetriebsetzung (IBS) des Ausgleichs- und Regulierbeckens sowie des Unterwasserstollens mit Wasser aus den bestehenden Kraftwerksanlagen. Dabei erfolgte u.a. auch die später im Betrieb erforderliche Aufzeichnung der Becken- und Stollenpegel, der Stellgrößen der insgesamt vier Regelorgane sowie der Abflusswerte aus den Kraftwerken. Anhand von IBS-Versuchen unter vorgegebenem Kraftwerksbetrieb konnten einerseits die Sicherheits- und Betriebsfunktionen des Reglers, aber auch die technischen Randbedingungen des Systems nachgewiesen werden.

4.1 Systemeigenschaften

In ersten Füll- und Entleerungsversuchen wurden die reell verfügbaren Speichervolumina der beiden Speichersysteme ermittelt. Das effektive Nutzvolumen des BB beläuft sich auf ca. $V_{BB,Nutz} = 17'000 \text{ m}^3$, dasjenige des PUW (inkl. bestehendem, mit Dammbalken abgeschlossenen Unterwasserstollen) auf knapp $V_{PUW,Nutz} = 89'000 \text{ m}^3$. Da der PUW anlässlich der Ausführung nach den Ausbrucharbeiten nicht auf das Regelprofil verkleidet, resp. aufgespritzt wurde, steht aufgrund der Überprofile je nach Füllstand ein bis zu 25% grösseres Speichervolumen zur Verfügung als ursprünglich angenommen (Abb. 4a). Durch den Mehrausbruch weist der PUW einen grösseren Abflussquerschnitt auf, allerdings nimmt ohne Verkleidung auch die Rauhgigkeit des Stollens zu. Anlässlich der IBS-Versuche wurden deshalb stationäre Betriebsbedingungen gefahren, um die Fliessgefälle zu messen und damit die effektive Rauhgigkeit des PUW zu bestimmen.

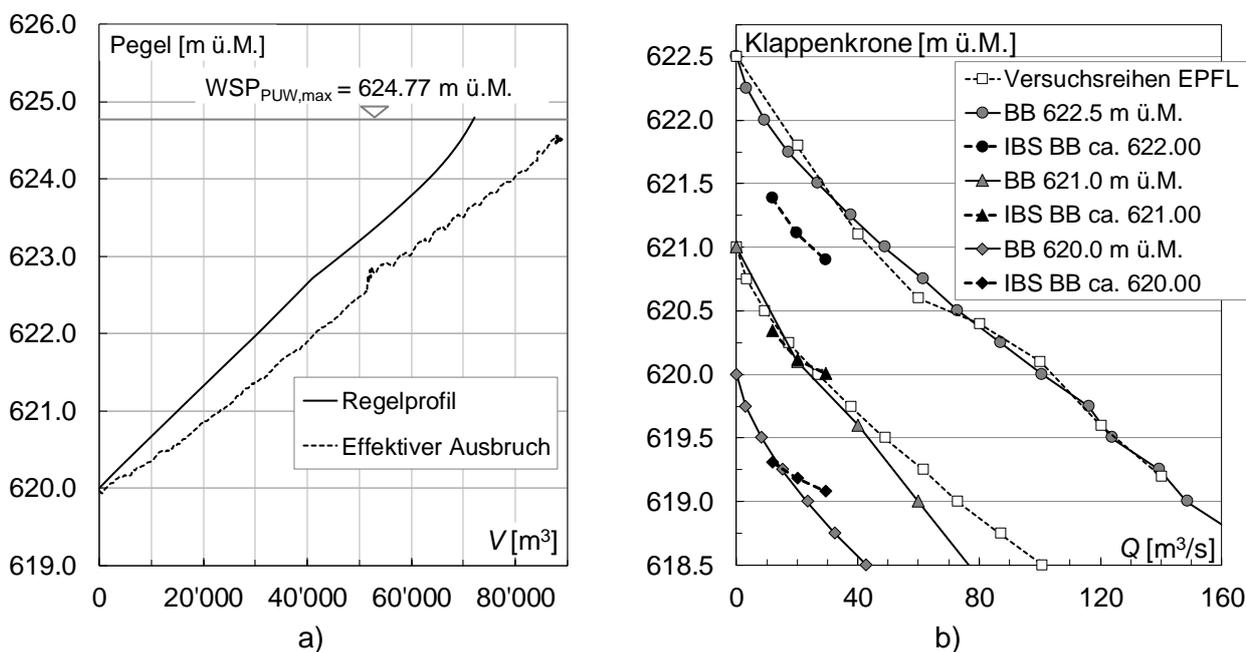


Abb. 4 Vergleich Resultate aus Vorstudien, Ausführungsplanung und IBS-Versuchen: a) Berechnete (-) und im Prototyp gemessene (---) Pegel-Volumen-Beziehung für das Speichersystem PUW und bestehender Unterwasserstollen, b) Berechnete (grau), im Modell ermittelte (weiss) und im Prototyp gemessene (schwarz) Beziehung zwischen Klappenstellung und Abflusskapazität für das Auslaufbauwerk BB.

Danach konnten im Rahmen der Echtversuche die rechnerisch und die mittels hydraulischen Modellversuchen bestimmten Stützkurven der Regelorgane überprüft werden. In Abb. 4b ist ein Vergleich für die Beziehung Klappenstellung-Abflusskapazität dargestellt. Aufgrund der Betriebseinschränkungen konnten bisher lediglich Abflüsse bis maximal $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$ getestet werden. In diesem tiefen Abflussbereich bestätigen die im Prototyp gemessenen Kapazitäten für Beckenpegel ab 621.00 m ü.M. die berechneten und im Modell ermittelten Werte. Bei tieferen Beckenpegeln divergieren Prototypmessungen und Berechnungen, resp. Modellresultate. Aufgrund der Beckengeometrie entsteht insbesondere bei tiefen Wasserständen im BB eine Hauptströmung entlang der Seitenmauer Richtung Hasliaare. Dadurch entstehen im Oberwasser der Klappe hohe Anströmgeschwindigkeiten und das Organ weist eine wesentlich höhere Abflusskapazität auf als ursprünglich angenommen. Beim sich im Schatten der

Hauptströmung befindenden Segmentschütz korrespondieren die gemessenen Werte in zufriedenstellendem Maße mit den Vorgabewerten und Modellversuchen.

Ausserdem erlaubte eine visuelle Überwachung vor Ort die Definition weiterer typischer Strömungseigenschaften im Becken in Abhängigkeit von Durchfluss und Beckenpegel. Weiterführende Datenauswertungen brachten teilweise starke Schwingungsphänomene in den beiden Speichervolumina zu Tage. Insbesondere der PUW schwingt nach Regelaktivitäten mit den beiden Segmentschützen mit Amplituden bis zu ± 15 cm und einer Periode von ca. 13 Minuten. Erst nach rund 1.5 h beträgt die Schwingungsamplitude weniger als ± 5 cm. Inwiefern sich diese Systemschwingungen auf die Regulierung auswirken, werden die ersten Betriebserfahrungen unter kontinuierlichem Kraftwerksbetrieb zeigen.

4.2 Regelfunktionen

Die Inbetriebsetzung von Sensoren, Aktoren und der Begrenzungsfunktionen zeigte sich weitgehend problemlos. Schwieriger gestalteten sich die übergeordneten Funktionen, weil das Stollensystem und das Becken sich gegenseitig beeinflussen und ein schwingfähiges System darstellen. Erste Versuche der übergeordneten Regelung endeten mehrmals damit, dass das Becken vom Regler entleert wurde.

Erst mit der Implementation der aufgrund der erfassten Systemeigenschaften überarbeiteten Kurvenscharen gelang es, mit der übergeordneten Regelung die gewünschten stabilen Zustände zu erreichen. In dieser Phase wurde auch klar, dass die Antriebe der Organe bei der Wasserrückgabe optimiert werden müssen. Ihre Verstellung muss im Normalbetrieb sehr langsam und gleichmässig, und beim Eingriff von Begrenzern sehr schnell und entschieden möglich sein.

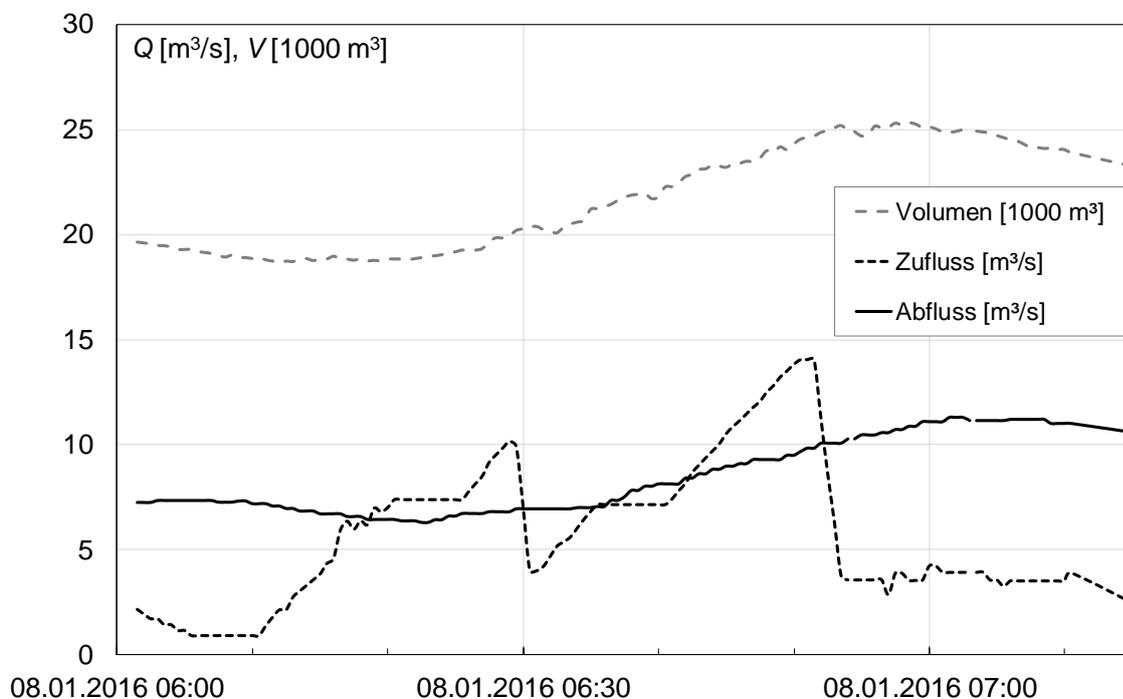


Abb. 5 Ergebnis aus den IBS-Versuchen vom Januar 2016: Abflüsse aus den Kraftwerken Inn1 und Inn2 (---) ins System BB/PUW, Wasserrückgabe in die Hasliaare (—) sowie zeitliche Entwicklung des Speichervolumens (---). Die dämpfende Wirkung des Systems zwischen totalem Zufluss und Abfluss geht eindeutig hervor.

5 Ausblick

Im Frühjahr 2016 werden, nach der Optimierung der ölhydraulischen Antriebe der Stellorgane, weitere IBS-Versuche mit zusätzlichem Wasser aus dem neuen Kraftwerk Inn1E gefahren. Dann werden zusätzliche Lastfälle mit erhöhten Abflüssen weitere Aufschlüsse über das Verhalten der Regelorgane, des Speichersystems und des Reglers geben. Das System zur Schwall-/Sunkreduktion wird gemeinsam mit den anderen Ausbauten seinen regulären Betrieb im Sommer 2016 aufnehmen. In den folgenden Jahreszeiten gilt es, die Parameter des Reglers so einzustellen, dass das System die Vorgaben in allen Betriebssituationen optimal erfüllt.

Literatur

- Bieri, M.; Müller, M.; Schweizer, S.; Schleiss, A.J. (2014). Flow restoration in Alpine streams affected by hydropower operations – A case study for a compensation basin, Proceedings of River Flow 2014 – the 7th International Conference on Fluvial Hydraulic, 3.-5. September 2014, EPFL, Lausanne, Schweiz.
- LCH (2012). Auslassorgane Beruhigungsbecken Innertkirchen – Hydraulische Modellversuche, EPFL-LCH, Lausanne, LCH Bericht Nr. 2/2014, 184 Seiten. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag der KWO (Autoren: Ferràs, D.; Zeimetz, F.; Pfister, M.)
- Müller, M.; Zahno, M.; Keller, Y; Billeter, P.; Stamm, J.; Kost, M. (2014). Building new power plants under continuous exploitation of neighboring hydropower schemes - planning and construction challenges of the "Tandem" enhancement project in the Central Alps of Switzerland. Proceedings of HYDRO 2014 – Building on recent development progress, 13.-15. Oktober 2014, Como, Italien.
- Schweizer, S.; Bieri, M.; Tonolla, D.; Monney, J.; Rouge, M.; Stalder, P. (2013a). Schwall/SunkSanierung in der Hasliaare – Phase 2a: Konstruktion repräsentativer Abflussganglinien für künftige Zustände, Wasser Energie Luft 2013(4), 267–274.
- Schweizer, S.; Schmidlin, S.; Tonolla, D.; Büsser, P.; Maire, A.; Meyer, M.; Monney J.; Schläppi, S.; Schneider, M.; Theiler, Q.; Tuhtan, J.; Wächter, K. (2013b). Schwall/Sunk-Sanierung in der Hasliaare – Phase 2b: Ökologische Bewertung von künftigen Zuständen, Wasser Energie Luft 2013(4), 275–285.

Anschrift der Verfasser

Dr. Michael Müller und Yves Keller
IUB Engineering AG
Belpstrasse 48, Postfach, CH-3000 Bern 14, Schweiz
michael.mueller@iub-ag.ch, yves.keller@iub-ag.ch

Roland Kaderli und Matthias Gehri
BKW Energie AG, Engineering Hydro & Infrastructure
Viktoriaplatz 2, CH-3013 Bern, Schweiz
roland.kaderli@bkw.ch, matthias.gehri@bkw.ch

Markus Kost
Kraftwerke Oberhasli AG
Grimselstrasse 19, CH-3862 Innertkirchen, Schweiz
markus.kost@kwo.ch