

Zeitschrift:	Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber:	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band:	114 (2022)
Heft:	2
Artikel:	Betriebs- und Unterhaltsoptimierung von beschichteten Pelonturbinen mit hydro-abrasivem Verschleiss : Erkenntnisse aus einem Forschungsprojekt am KW Fieschertal
Autor:	Abgottspont, André / Felix, David / Staubli, Thomas
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-990522

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Betriebs- und Unterhaltsoptimierung von beschichteten Peltonturbinen mit hydro-abrasivem Verschleiss

Erkenntnisse aus einem Forschungsprojekt am KW Fieschertal

André Abgottspö, David Felix, Thomas Staubli, Robert Boes

Zusammenfassung

Turbinen von Hoch- und Mitteldruck-Wasserkraftanlagen können bekanntlich durch Schwebstoffpartikel im Wasser stark abgenutzt werden, was zu erheblichen Unterhaltskosten, Wirkungsgradabnahmen, Minderproduktion und somit zu Ertragseinbussen führt. Diese Problematik wurde am Hochdruck-Laufwasserkraftwerk Fieschertal (Wallis) in einem Forschungsprojekt untersucht.

Mit einer innovativen Methodenkombination wurden die Schwebstoffbelastung, die Abrasion an den Peltonturbinen und deren Wirkungsgradänderungen in den Jahren von 2012 bis 2020 detailliert gemessen und analysiert. Die neunjährige Messreihe wurde für die Optimierung des Betriebs und des Unterhalts verwendet: Um die Turbinen vor übermässigem Verschleiss zu schützen, wurde ein System für vorübergehende Ausserbetriebnahmen der Anlage aufgebaut und in Ereignissen mit hohen Schwebstoffkonzentrationen (Hochwasser) getestet. Weiter wurde aufgrund der Wirkungsgradhistorie untersucht, wann ein Laufradwechsel am wirtschaftlichsten ist.

Die Erkenntnisse aus diesem Projekt können auf andere Wasserkraftanlagen an sedimentreichen Fließgewässern übertragen werden, um deren Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz in Bezug auf den Umgang mit Feinsedimenten zu verbessern.

Résumé

Les turbines des centrales hydroélectriques à haute et moyenne chute peuvent être fortement usées par des particules des sédiments fins transportées en suspension dans les eaux. Ceci entraîne des coûts de maintenance, des réductions des rendements, des pertes de production et une diminution des recettes. Cette problématique a été étudiée dans un projet de recherche à l'aménagement au fil de l'eau à haute chute de Fieschertal (Valais).

En utilisant une combinaison innovatrice de méthodes, la charge en sédiments fins, l'abrasion des turbines Pelton et les changements de leurs rendements ont été mesurés et analysés en détail de 2012 à 2020. La série de mesures sur neuf ans a été utilisée pour optimiser l'exploitation et l'entretien: Afin de protéger les turbines d'une usure excessive, un système pour la mise hors service temporaire de l'aménagement a été établi et testé lors des événements à hautes concentrations de sédiments. Sur la base de l'historique des rendements, on a examiné à quel moment il est plus économique de changer de roue.

Les connaissances acquises dans ce projet peuvent être appliquées à d'autres aménagements afin de contribuer à augmenter leur rentabilité et efficacité énergétique concernant la gestion des sédiments fins.

durch vorzeitig erforderliche Ersatzinvestitionen. Zudem können Ertragseinbussen anfallen, wenn Turbineneinheiten aufgrund von hydro-abrasivem Verschleiss nicht für den Betrieb verfügbar sind. Durch die Abrasion an den Turbinen werden demnach die Energieeffizienz und die Wirtschaftlichkeit solcher Wasserkraftanlagen beeinträchtigt. Besonders betroffen sind:

- Anlagen in Einzugsgebieten mit aktuell oder früher hohem Vergletscherungsgrad, insbesondere, falls Wasser turbiniert wird, welches nicht einem Speichersee entnommen wurde.
- Peltonturbinen, da bei diesem Turbintyp die höchsten Geschwindigkeiten zwischen der Strömung und den Turbinenbauteilen auftreten und die Strömung am stärksten umgelenkt wird.

Die Thematik der Turbinenabrasion gewinnt aus folgenden Gründen an Bedeutung:

- Infolge des Rückzugs von Gletschern und Permafrost im alpinen Raum und der zunehmenden Variabilität der Niederschläge werden tendenziell mehr Sedimente in Fließgewässer eingetragen.
- Der langjährige Kostendruck in der Wasserkraftbranche fordert weitere wirtschaftliche Optimierungen wie die automatische Überwachung des Sedimentaufkommens und des Wirkungsgrads sowie zustandsbasierte Instandhaltungsprogramme.
- Aufgrund der energiepolitischen Zielsetzungen (Energiestrategie 2050) der Schweiz soll das bestehende Wasserkraftpotential bestmöglich genutzt werden, d.h. es sind im zeitlichen Mittel möglichst hohe Turbinenwirkungsgrade anzustreben.
- Bei Stauanlagen mit aktuellen Verlandungsproblemen oder zum Reduzieren von Schwebstoffkonzentrationspitzen während Spülungen wird auch die Möglichkeit des kontinuierlichen Weiterleitens von Feinsedimenten über den Triebwasserweg vermehrt geprüft (Felix et al., 2017).

1. Einleitung

1.1 Hydro-abrasiver Verschleiss

Im Triebwasser von Wasserkraftanlagen können mineralische Schwebstoffe enthalten sein, welche an exponierten Anlageteilen zu hydro-abrasivem Verschleiss führen. Turbinenbauteile von Hoch- und Mitteldruckanlagen sind speziell betroffen, da diese hohen Strömungsgeschwindigkeiten ausgesetzt sind. Die Einfluss-

größen wie die Geschwindigkeit sowie die Eigenschaften der Partikel und der Turbinenbauteile sind in der IEC-Richtlinie 62364 (2013/2019) bzw. in der zugrundeliegenden Literatur näher beschrieben. Solcher Verschleiss reduziert den Wirkungsgrad der Turbinen und somit die Elektrizitätsproduktion (z.B. Hassler & Schnablegger, 2006; Maldet, 2008). Weiter führt dieser zu erhöhten Betriebskosten durch häufigere und umfangreichere Revisionsarbeiten und

1.2 Gegenmassnahmen

Um Wirkungsgradreduktionen zu begrenzen und die Betriebssicherheit zu erhalten, werden Turbinenbauteile regelmässig revidiert oder ersetzt. Zur Erhöhung des Abrasionswiderstands der Bauteile werden vermehrt Hartbeschichtungen angewendet, welche allerdings durch grosse Feinsedimentfrachten, Kavitation oder hohe lokale Beanspruchung durch ausnahmsweise im Triebwasser enthaltene Steine auch beschädigt werden können.

Da das Schwebstoffaufkommen im Wasser abhängig von der Gletscherentwicklung, der Jahreszeit, der hydrologischen Situation und dem Wetter stark variiert, bietet sich als weitere Möglichkeit an, den Betrieb solcher Wasserkraftanlagen vorübergehend einzustellen, z.B. während Hochwasser nach Gewittern im Sommer (Boes et al., 2013; Felix, 2017). Die Einflussfaktoren des hydro-abrasiven Verschleisses und seine Auswirkungen, sowie Massnahmen zur Optimierung des Betriebs und des Unterhalts von betroffenen Wasserkraftanlagen, sind in *Bild 1* schematisch dargestellt. Die Zusammenhänge sind qualitativ bekannt, aber für die Optimierung des Betriebs und der Planung sind zusätzliche, praktisch anwendbare Messmethoden und bessere quantitative Kenntnisse der Zusammenhänge erforderlich.

1.3 Forschungsprojekt

Um die Thematik der Turbinenabrasion und entsprechende Gegenmassnahmen weiter zu untersuchen, initiierten die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich und das Kompetenzzentrum Fluidmechanik und Hydromaschinen der Hochschule Luzern (HSLU) im Jahr 2011 ein langjähriges Forschungsprojekt am Kraftwerk (KW) Fieschertal im Oberwallis. Das Projekt basierte auf Vorarbeiten der HSLU (Abgottspion,

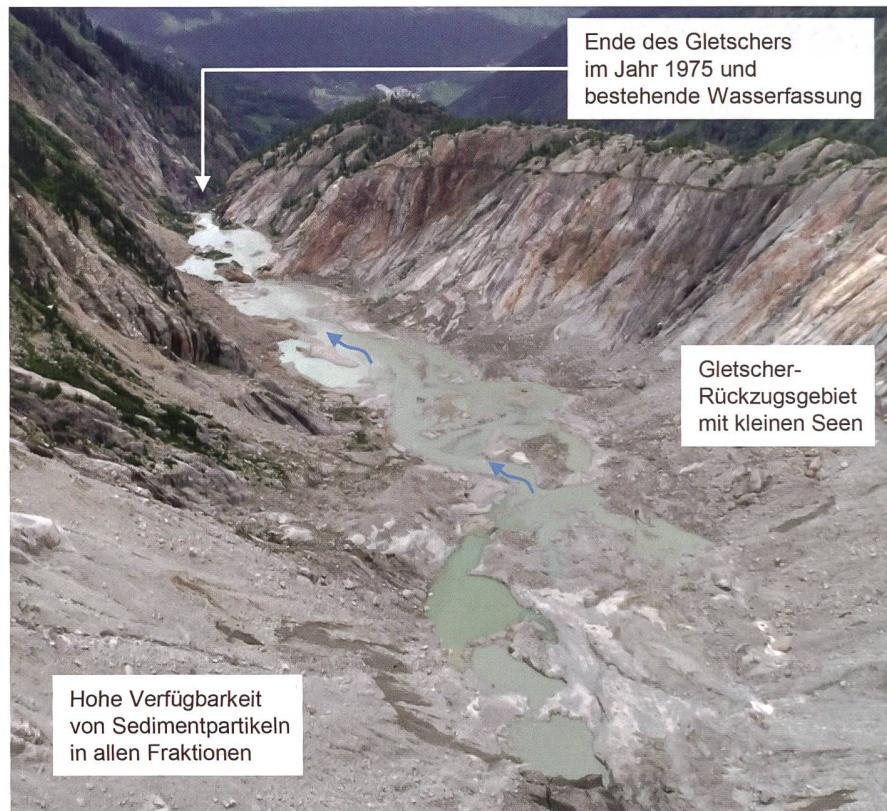


Bild 2: Blick vom Ende des Fieschergletschers talauswärts (Drohnenaufnahme 21. Juli 2020, VAW).

2011) und Erfahrungen am KW Dorferbach im Tirol (Boes, 2010). Die Untersuchungen am KW Fieschertal wurden in mehreren Teilprojekten massgeblich durch das BFE gefördert: In den Jahren 2012–2017 im Rahmen des Forschungsprogramms Wasserkraft und von 2018–2021 im Rahmen eines Pilotprojekts.

Das KW Fieschertal wird durch die Gommerkraftwerke AG (gkw) betrieben. Es nutzt Wasser des Gebirgsflusses Wysswasser, der dem Fieschergletscher, dem zweitlängsten Gletscher der Alpen, entspringt. Durch die Erosion im Einzugsgebiet, insbesondere am Gletscherbett, sind Sedimentpartikel in allen Fraktionen reichlich vorhanden (*Bild 2*). Da der Grossteil

der Sedimentpartikel kleiner ist als das Bemessungsgrenzkorn des Entsanders (0,3 mm), ist im Triebwasser die Schwebstoffbelastung im Sommerhalbjahr hoch. Das KW Fieschertal verfügt über einen Speicherstollen zum Ausgleich tageszeitlicher Zuflussschwankungen und für den stundenweisen Teillastbetrieb im Winter. Aufgrund des relativ kleinen Speichervolumens handelt es sich aber praktisch um ein Laufwasserkraftwerk. Mit der erwähnten Feinsedimentbelastung und einer Bruttofallhöhe von 520 m trat an den Pelonturbinen seit deren Inbetriebnahme 1975 ausgeprägter hydro-abrasiver Verschleiss auf. Es handelt sich um zwei horizontalachsige Maschinen mit je zwei Düsen, je einem Laufrad mit 2,8 m Durchmesser und einer Nennleistung von je 32 MW. Als Massnahme gegen Abrasionsschäden werden bei den Düsen Bauteile aus Stellit mit Wolframkarbid-Beschichtung verwendet, und seit 2005 sind Laufräder im Einsatz, deren Becherinnenseiten mit Wolframkarbid beschichtet sind. Trotz dieser Massnahmen sind in der Regel in jedem Winter Revisionsarbeiten erforderlich.

Das KW Fieschertal mit seinen Anlagen sowie die verwendeten Messmethoden und die Resultate der Jahre 2012–2014 wurden bereits in einem früheren WEL-Artikel beschrieben (Abgottspion et al., 2016). Der vorliegende Beitrag fasst

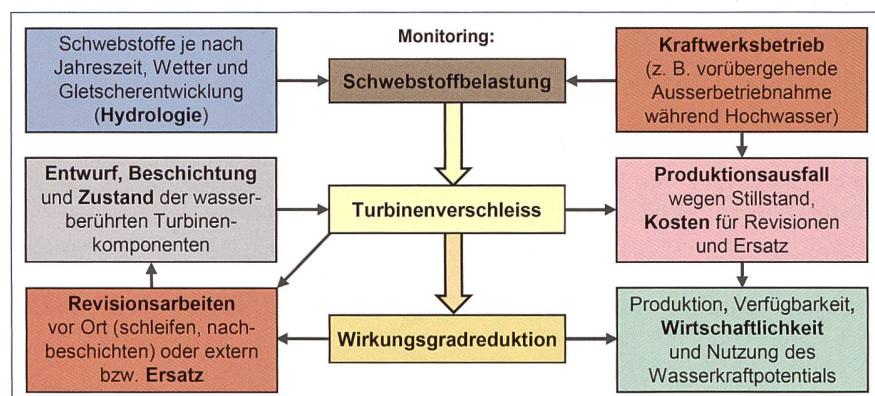


Bild 1: Einflussfaktoren, Auswirkungen und Handlungsmöglichkeiten (orange) betreffend hydro-abrasivem Verschleiss an hydraulischen Maschinen.

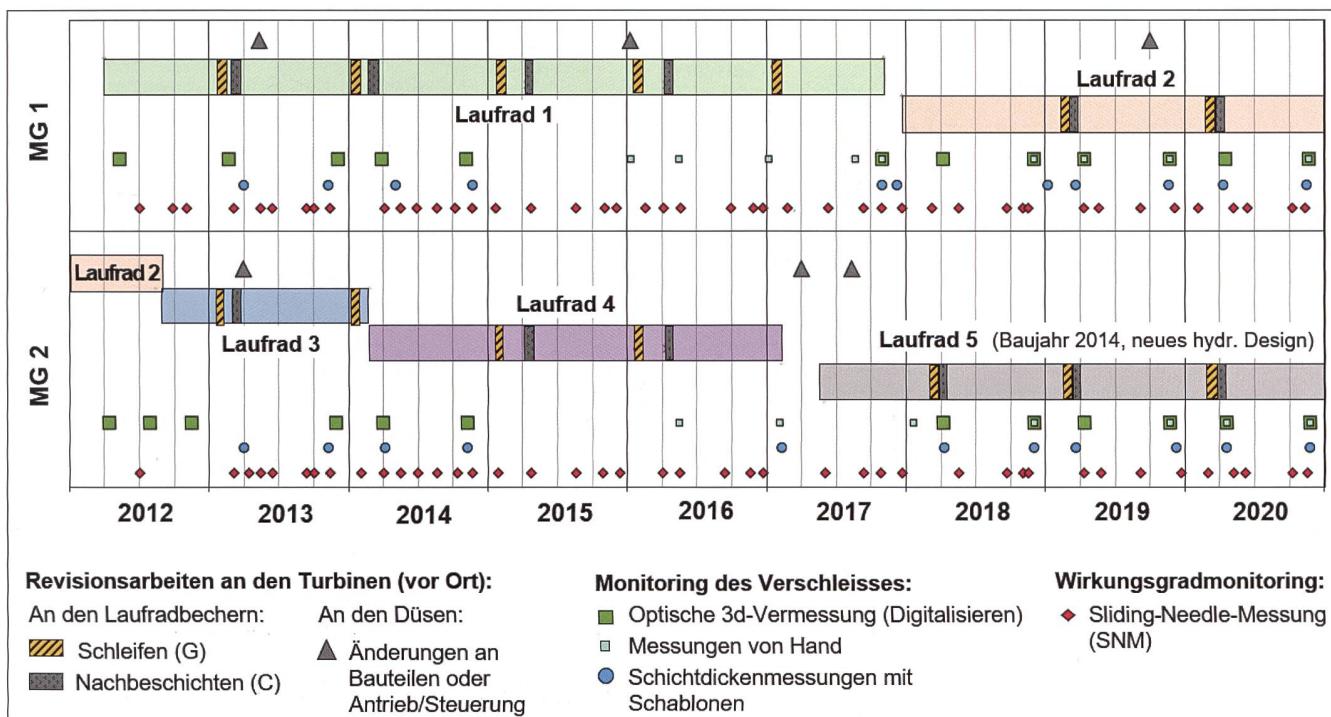


Bild 3: Zeitliche Übersicht über den Laufradeinsatz, die Revisionsarbeiten und die Messungen am KW Fieschertal.

die Resultate bis 2020 und die wesentlichen Punkte aus dem Schlussbericht (Felix et al., 2022) zusammen. Diese wurden auch am 26. August 2021 an einer Fachtagung in Naters präsentiert.

Im Bild 3 sind die durchgeführten Messungen zur Turbinenabrasion und Wirkungsgradveränderungen über die neun untersuchten Jahre 2012–2020 für beide Maschinengruppen (MG) zusammenge stellt. Weiter ist angegeben, wann welche Laufräder im Einsatz waren und welche Revisionsarbeiten an den Laufrädern und Düsen durchgeführt wurden. Parallel zu den in Bild 3 dargestellten periodischen Messungen wurden die Schwebstoffbelastung während jeder Schwebstoffsaison und der Wirkungsgrad der beiden Turbinen kontinuierlich gemessen.

2. Schwebstoffbelastung

2.1 Relevante Größen und Messmethoden

Die Partikelbelastung der Turbinen hängt gemäss IEC 62364 (2013/2019) nebst den Betriebsstunden von folgenden Größen ab:

- Schwebstoffkonzentration (Suspended Sediment Concentration SSC),
- Partikelgröße bzw. mittlerer Durchmesser,
- Partikelhärte,
- Partikelform.

Die SSC und die Partikelgrößen können im Lauf der Zeit stark und rasch variieren.

Die primäre Methode für die Messung der SSC ist die Laboranalyse von Wasserproben mittels Wägung des getrockneten Rückstandes. Damit die SSC in Echtzeit und mit weniger Aufwand gemessen werden kann, stehen verschiedene indirekte Messmethoden wie Trübung, Akustik und Dichtemessung zur Verfügung (Abgottsporn et al., 2016; Felix 2017). Die Größenverteilung der Partikel kann mit Laserdiffraktometrie ebenfalls in Echtzeit gemessen werden, wobei die geotechnischen Größenklassen Ton (<2 µm), Silt (2–63 µm) und Feinsand (63–200 µm) unterschieden werden. Gröbere Partikel verursachen mehr Abrasion, insbesondere an beschichteten Bauteilen. Auf die Messung der SSC und der Partikelgrößen im KW Fieschertal wird im Abschnitt 2.2 näher eingegangen.

Die Härte und die Form der Partikel sind vorwiegend Eigenschaften des Einzugsgebiets und wurden als konstant angenommen. Laboranalysen zeigten, dass die Schwebstoffe im Triebwasser des KW Fieschertal im Mittel 31 Prozent Quarz (Mohshärte 7) enthalten. Dieser Anteil der Sedimente ist abrasiv für die hartbeschichteten Turbinenbauteile. Für den üblichen Turbinenchromstahl sind Partikel mit einer Mohshärte >4,5 abrasiv (z. B. Feldspat). Im KW Fieschertal beträgt dieser Anteil 75 Prozent. Der Rest (vor allem Glimmer) ist für Turbinen nicht abrasiv. Mikroskop-Bilder zeigten wie erwartet, dass die harten Partikel kantig und daher besonders abrasiv sind.

Nebst der Partikelbelastung gemäss IEC 62364 (2013/2019) können aus der

SSC und der turbinierten Wassermenge über die Zeit Schwebstofffrachten (Suspended Sediment Loads SSL) berechnet werden.

2.2 Echtzeit-Schwebstoffmonitoring

In den ersten zwei Jahren des Forschungsprojekts (2012–2013) wurden in der Schieberkammer – am Übergang vom Speicherstollen zur Druckleitung – mehrere Messwertaufnehmer installiert, um die SSC und die Partikelgrößen im Triebwasser laufend und in Echtzeit zu messen (Abgottsporn et al., 2016). Um die Sedimentdynamik des Gesamtsystems besser zu verstehen und als Grundlage für vorübergehende Ausserbetriebsnahmen des Kraftwerks während hoher Schwebstoffbelastung, wurden danach auch an der Wasserfassung (Bild 4) und im Entsander Instrumente für die SSC-Messung installiert.

Trübungssonden und akustische Methoden eignen sich für tiefe bis mittlere SSC, d. h. mit den dort üblicherweise vorhandenen Siltpartikeln bis maximal 6 g/l. Für mittlere und höhere SSC sind an der Wasserfassung und in der Schieberkammer je ein Coriolis Durchfluss- und Dichtemessgerät (CFDM) im Einsatz.

Die Partikelgrößen wurden während des Forschungsprojekts in der Schieberkammer mit einem Laserdiffraktometer im Minutenrhythmus in detaillierten Größenklassen gemessen. Da dieses Messgerät aber nur bis zu SSC von wenigen g/l funktioniert sowie unterhaltsintensiv und kostspielig ist, wurden diese Messungen für

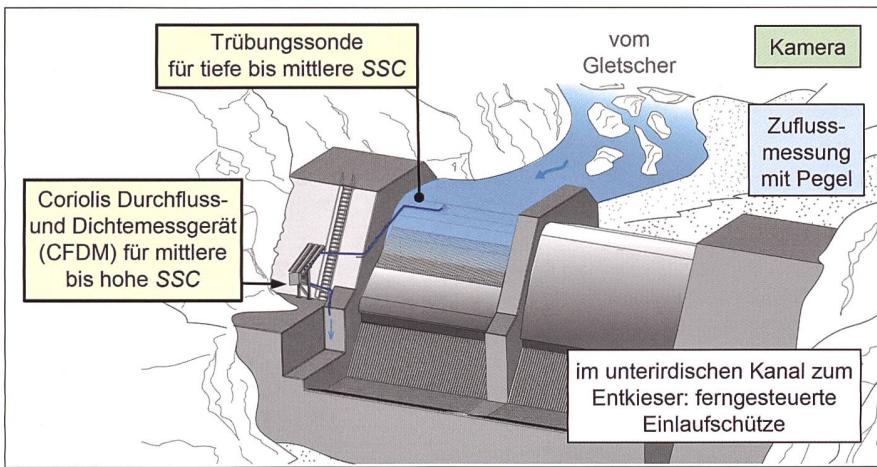


Bild 4: Wasserfassung des KW Fieschertal mit Instrumentierung für das Schwebstoffmonitoring in Echtzeit (Visualisierung: VAW, Plangrundlage: gkw).

den Langzeitbetrieb der Anlage nicht weitergeführt.

2.3 Schwebstoffkonzentrationen und -frachten

Das Bild 5 zeigt die SSC in der Schieberkammer des KW Fieschertal von Januar bis Dezember jeweils für die Jahre 2012–2020. Der Mittelwert über die neun Jahre betrug 0,53 g/l. Wie erwartet sind die SSC von Mitte November bis Mitte April tief (<0,05 g/l). Der Rest des Jahres, mit erhöhten SSC vor allem im Juli und August, wird als Schwebstoffssaison bezeichnet. Diese entspricht beim Laufwasserkraftwerk Fieschertal den Monaten mit hohen Anteilen an der Jahreserzeugung (hellblaue Flächen).

Im Bild 5 sind SSC-Spitzenwerte von drei Hochwassereignissen gekennzeichnet. Während des Hochwassers vom 2. bis 3. Juli 2012 mit einer Wiederkehrperiode von ca. 20 Jahren wurden 50 g/l erreicht (Abgottsporn et al., 2016). Der Höchstwert in den neun Jahren von ca. 110 g/l wurde durch das Gewitter vom 29. Juli 2017 verursacht, welches im Abschnitt 2.6 näher beschrieben wird. Anfangs Oktober 2020, erstaunlich spät im Jahr, gab es ein weiteres natürliches Schwebstofftransport-Ereignis, auf welches im Abschnitt 2.7 eingegangen wird.

Weitere SSC-Spitzen in der Druckleitung traten vor allem aus betrieblichen Gründen auf: In Perioden mit Vollastbetrieb, also im Sommer, ist der Speicherstollen stets mit Wasser gefüllt und die größeren Anteile der Schwebstoffe (Grobsilt und Feinsand) setzen sich ab. Wenn der Wasserspiegel danach stark abgesenkt wird, um das Speichervolumen möglichst vollständig zu nutzen, können abgelagerte Sedimentpartikel resuspendiert werden. Dann treten im Triebwasser hohe

SSC auf (Abgottsporn et al., 2016; Felix 2017). Solche Resuspensions-Ereignisse dauern allerdings meist nur 5 bis 15 Minuten, seltener bis 60 Minuten, da der tur-

binierte Abfluss beim Erreichen des minimalen Betriebswasserspiegels gedrosselt wird, um den Speicher wieder füllen zu lassen. Der Speicherstollen kann auf der Hälfte seiner Länge periodisch gespült werden. Für den Erhalt des Nutzvolumens lassen sich aber solche Resuspensions-Ereignisse nicht vollständig vermeiden und sind aus Sicht des Turbinenunterhalts vertretbar.

Basierend auf den SSC-Ganglinien in Bild 5 und der Ganglinie des Volumenstroms (Durchfluss) in der Druckleitung wurde die Schwebstofftransportrate berechnet. Bei Vollastbetrieb (16 m³/s) und der mittleren SSC (0,53 g/l) werden in der Druckleitung gut 8 kg Silt pro Sekunde transportiert, das sind ca. 700 t an einem typischen Sommertag. Die Schwebstofftransportrate wurde jeweils von Anfangs Januar bis Ende Dezember zur jährlichen Schwebstofffracht SSL integriert.

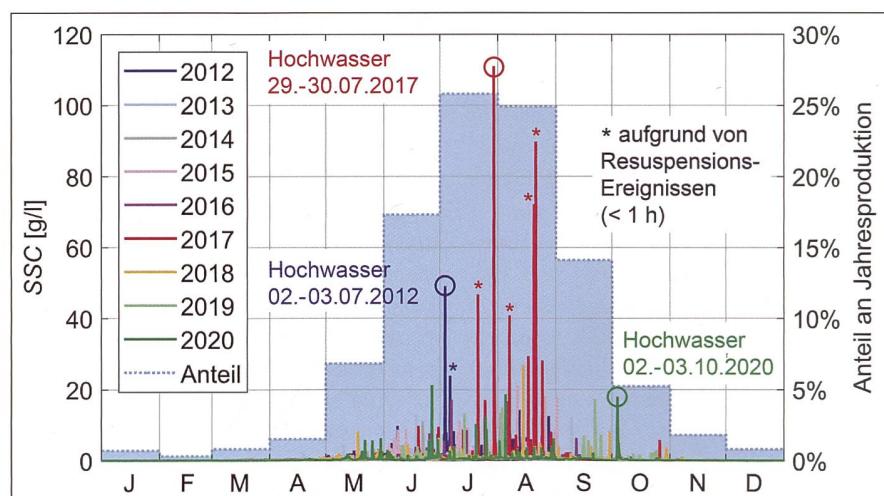


Bild 5: Schwebstoffkonzentration SSC gemessen in der Druckleitung (Schieberkammer) sowie mittlere monatliche Anteile an der Jahresproduktion des KW Fieschertal (Betriebsdaten: gkw).

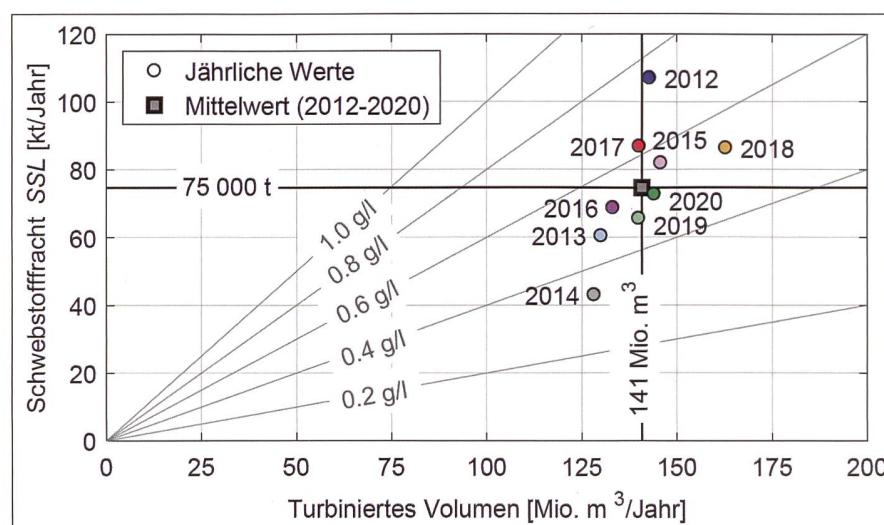


Bild 6: Jährlich turbinierte Schwebstofffrachten in Funktion der entsprechenden Wasservolumina im KW Fieschertal (Betriebsdaten: gkw).

Das Bild 6 zeigt die jährlichen SSL der beiden Turbinen in Funktion der turbinierten Wasservolumina von 2012–2020 (Punkte) sowie deren Mittelwerte (horizontale und vertikale Linien). Im Jahr 2012 mit dem etwa 20-jährlichen Hochwasser lag die SSL 43 Prozent über dem Mittelwert, hingegen im Jahr 2014 (ohne Hochwasser) 42 Prozent unter dem Mittelwert. Im Jahr 2018 mit der höchsten mittleren Jahres-temperatur der neun Jahre war das Wasservolumen besonders hoch (Gletscherschmelze). Die Standardabweichung der Wasservolumina betrug 7 Prozent ihres Mittelwerts; bei der SSL betrug sie 25 Prozent ihres Mittelwerts. An den geneigten Linien lassen sich mittleren jährlichen SSC ablesen, da diese aus dem Verhältnis der SSL und den Wasservolumina resultieren. In den einzelnen Jahren variierten die mittleren SSC beträchtlich, da sich die Schwebstofffrachten stärker veränderten als die Wasservolumina.

2.4 Gebietsabtrag

Im Mittel über die Untersuchungsperiode wurden 75000t Feinsediment pro Jahr turbiniert. Bezogen auf die Einzugsgebietsfläche von 58,6km² und mit einer Gesteinsdichte von 2,73t/m³ entspricht dies einem Felsabtrag von 0,47mm/Jahr. Wittmann et al. (2007) schätzten den langfristigen Gebietsabtrag (Denudationrate) in den kristallinen Zentralalpen auf 0,9±0,3mm/Jahr. Da nicht die ganze Sedimentfracht aus dem Einzugsgebiet durch die Druckleitung transportiert wird (Geschiebe, Schwebstoffe im Überwasser und Spülungen), ist der Mittelwert der SSL in der Druckleitung plausibel.

2.5 Partikelgrößen

Schwebstoffe weisen in der Regel eine breite Größenverteilung auf. Als Kennwert für die Grösse der Sedimentpartikel wurde der Median-Partikeldurchmesser d_{50} verwendet. Er gibt den Durchmesser an, welcher von 50 Prozent der Partikelmasse über- bzw. unterschritten wird. Dieser Wert lag im zeitlichen Mittel bei 11 µm, d.h. im Bereich von mittlerem Silt. Insbesondere während der erwähnten Resuspensions-Ereignisse stieg d_{50} bis 120 µm. Während ca. 14 Tagen/Jahr lag d_{50} im Bereich von Mittelsilt (20 bis 60 µm) und während gut 1 Tag/Jahr im Bereich von Feinsand (60 bis 200 µm).

2.6 Hochwasserereignis 2017

Am Abend des 29. Juli 2017 trat am Wysswasser ein Hochwasserereignis als Folge eines Gewitters auf (Felix et al., 2021). Die

Kamera bei der Wasserfassung zeigte Regen, einen erhöhten Abfluss und eine sehr starke Wassertrübung (Bild 7a).

Der Abfluss im Wysswasser erreichte etwa 38m³/s, was nur etwa dem doppelten Ausbauabfluss der Fassung entspricht (Bild 8a). Dieser Spitzenabfluss war deutlich kleiner als jener des Hochwassers von 2012. Nach dem Gewitter nahm der Abfluss rasch ab. An der Rhone in Brig (ca. 20km südöstlich von Fieschertal, inklusive Wysswasser) wurde kein ausserordentlich hoher Abfluss gemessen. Es handelte sich demnach um einen sehr lokalen Niederschlag. Da solche Gewitterniederschläge kaum vorhersagbar sind, sind Messungen des Zuflusses und der SSC für den Betrieb von Wasserkraftanlagen wichtig.

Das Bild 8b zeigt den Verlauf der SSC während des Ereignisses. Der Spitzenwert von 110 g/l (wie in Bild 5) und ein weiterer sehr hoher Wert von 77 g/l stammen von Wasserproben am Ende des Entsanders (Bild 7b). Bild 7c zeigt, wie viel Feinsediment sich in einer Wasserprobe von 0,5 Litern absetzte. Die Trübungssonden an der Wasserfassung und am Ende des Entsanders zeigten während des Ereignisses SSC-Werte, die im Vergleich zu den Ergebnissen der Wasserproben unplausibel tief sind. Diese ungültigen Trübungsmesswerte wurden gestrichelt dargestellt. Bei hoher Trübung kommt es aufgrund von Mehrfachstreuung vor, dass Trübungssonden irreführende, zu tiefe Werte anzeigen (Voichick et al., 2018).

Im Bild 8c zeigt die schwarze Linie, wie viele Tonnen Feinsediment im Lauf des Ereignisses in die Kraftwerksanlage gelangt wären, wenn diese durchgehend (mit Volllast) betrieben worden wäre. Diese po-

tenzielle Fracht von 14 600t während des Ereignisses entspricht 19 Prozent der mittleren jährlichen SSL (75 000 t).

Während des Hochwassers 2017 wurden die Turbinen ausser Betrieb genommen, um übermässigen Verschleiss zu vermeiden. Da damals an der Wasserfassung noch keine Instrumentierung vorhanden war, mit welcher auch hohe SSC in Echtzeit gemessen und ins Kraftwerksleitsystem übermittelt werden, wurde die Anlage erst ausser Betrieb genommen, als das CFDM in der Schieberkammer anzeigen, dass die SSC dort 10g/l überschritt. Es dauert etwa eine Stunde, bis Wasser von der Fassung durch den Speicherstollen zum Druckleitungseinlauf bei der Schieberkammer geflossen ist. Inklusive dieser Stunde Verzögerung gelangte trotz der vorübergehenden Ausserbetriebnahme bereits ein Drittel der potenziellen Sedimentfracht des Ereignisses ins Kraftwerkssystem (Anstieg der schwarzen Kurve in Bild 8c). Um dies zukünftig zu vermeiden, wurde das CFDM an der Wasserfassung installiert (Bild 4). In den Bildern 8b und 8c sind weiter die durchgeführte Ausserbetriebnahme (hellbraun) sowie ein optimiertes Szenario mit früherer Ausser- und Wiederinbetriebnahme und angepasstem Wert für die Abschalt-SSC (rot) dargestellt. Dies wird im Abschnitt 5 erläutert.

2.7 Sedimenttransportereignis 2020

In den neun untersuchten Jahren kam es, nebst 2012 und 2017, im Jahr 2020 zu einem nennenswerten, wenn auch kleineren Schwebstofftransportereignis. Dieses trat anfangs Oktober infolge eines ergiebigen Niederschlags auf. Da die Schneefallgrenze unter die Höhe der Wasserfass-

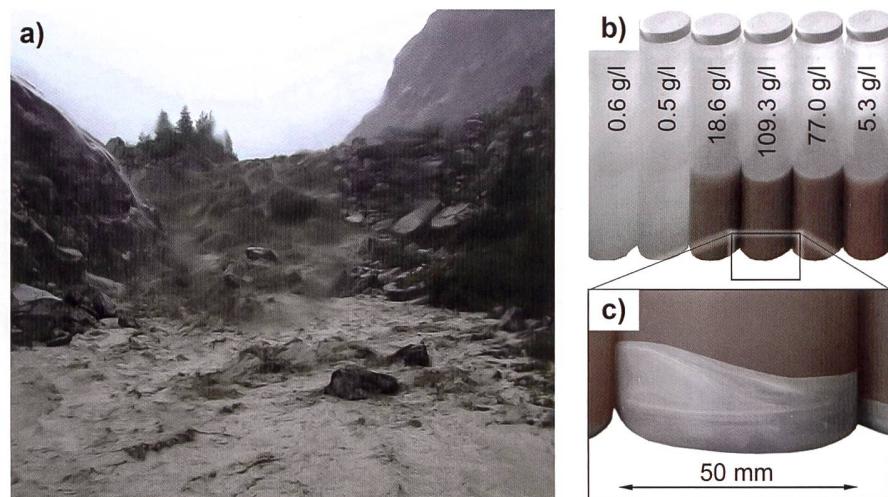


Bild 7: a) Zufluss zur Wasserfassung des KW Fieschertal im Gewitter vom 29. Juli 2017 (Foto: gkw), b) Wasserproben (je 0,5 Liter) vor und während des Hochwassers und c) abgelagerte Feinsedimente in der Probe mit der höchsten SSC (Fotos: VAW).

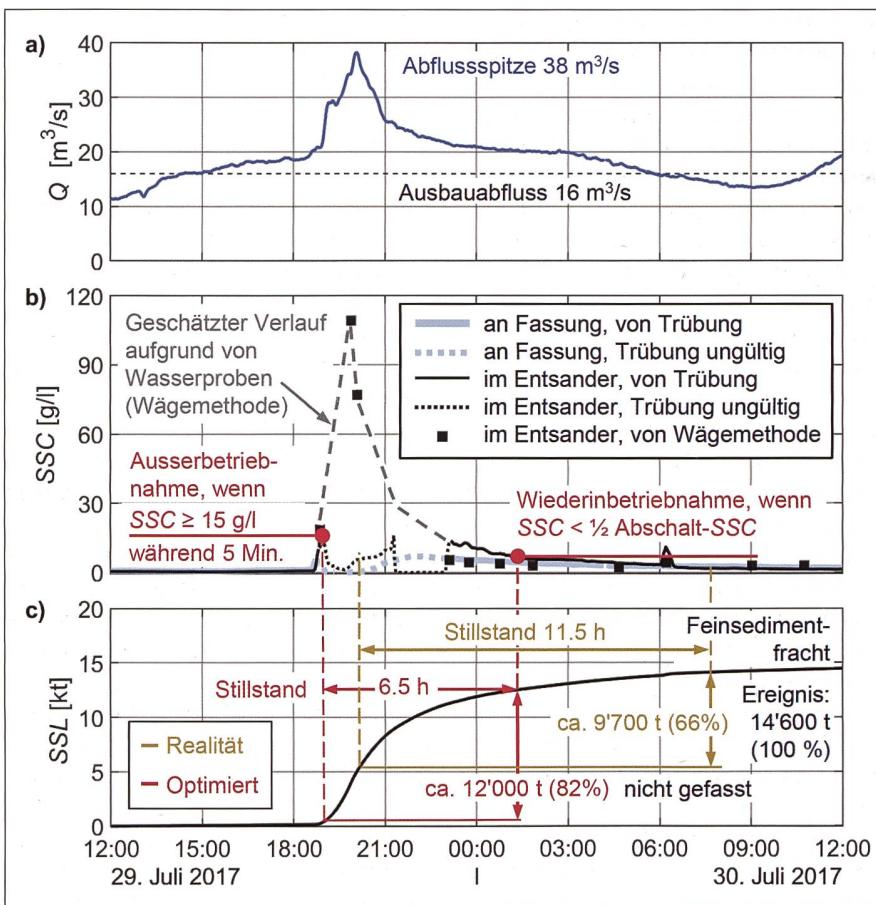


Bild 8: Hochwasser vom 29./30. Juli 2017: a) Zufluss Q , b) Schwebstoffkonzentration SSC bei der Wasserfassung und im Entsander, c) potenzielle Schwebstofffracht SSL im Kraftwerk, mit durchgeföhrter Ausserbetriebnahme (hellbraun) und optimiertem Szenario (rot).

sung sank, kam es am Wysswasser zu keinem ausserordentlich hohen Abfluss und der Spitzenabfluss erreichte lediglich die Ausbauwassermenge der Wasserfassung. Solche Abflüsse kommen im Sommer täglich vor. Die SSC war dagegen deutlich höher als an Sommertagen.

Das Bild 9 zeigt die SSC -Ganglinien, die mit verschiedenen Methoden während dieses Ereignisses gemessen wurden. An der Wasserfassung und am Ende des Ent-sanders waren je eine Trübungssonde und ein automatischer Wasserprobennehmer im Einsatz. Weiter wurde die SSC an der Fassung mit dem CFDM-Gerät via Dichte gemessen.

Gemäss dem CFDM erreichte die SSC 17 g/l . Vom CFDM gemessene hohe Werte wurden durch zwei Wasserproben von ca. 12 g/l während abnehmender SSC bestätigt. Für $SSC < \text{ca. } 6 \text{ g/l}$, d.h. vor und nach der SSC -Spitze, lieferten alle Messmethoden ähnliche Werte. Aber in der Phase, als die SSC gemäss dem CFDM 6 g/l überschritt, zeigten die Trübungssonden tiefere Werte, die als ungültig eingestuft wurden (gestrichelte Linienabschnitte). Wie für das Hochwasser 2017 erläutert,

können solche zu tiefen Werte auftreten, wenn Trübungssonden überlastet sind. Da dies am KW Fieschertal bereits in früheren Jahren beobachtet worden war, wurde die Trübungssonde an der Wasserfassung im Jahr 2018 mit einem CFDM-Gerät ergänzt, mit welchem auch hohe SSC gemessen

werden können. Im Schwebstofftransportereignis 2020 konnten dann mit dem CFDM erstmals hohe SSC an dieser Messstelle gemessen werden.

3. Verschleiss an den Laufradbechern

3.1 Typische Schäden und Revisionen

An den beschichteten Peltonlaufrädern des KW Fieschertal wurde meist im Lauf einer Schwebstoffsaeson die Hartbeschichtung auf den Mittelschneiden und an den Becherausschnitten stellenweise oder systematisch abgetragen. Nach dem lokalen Verlust der Beschichtung wird das weniger harte Grundmaterial mit einer höheren Abtragsrate erodiert, wodurch Geometrieveränderungen in der Grössenordnung von mehreren Millimetern auftreten können (Felix, 2017). Diese wirken sich negativ auf den Wirkungsgrad aus. Im Gegensatz zu unbeschichteten Peltonbechern, in denen der hydro-abrasive Verschleiss zu einer welligen bzw. schuppenförmigen Oberfläche führt (z.B. Rai et al., 2017), blieben die Becherinnenseiten mit Ausnahme von Sekundärschäden meist vollflächig beschichtet.

An den Laufrädern des KW Fieschertal werden kleine und grosse Revisionen durchgeführt. Eine kleine Revision umfasst das Schleifen der Mittelschneiden und Becherausschnitte sowie meist das Nachbeschichten von Stellen, an denen die Beschichtung vollständig abgetragen wurde. Diese Arbeiten werden in den Wintermonaten im Gehäuse einer Turbine durchgeführt, währenddessen die andere MG betriebsbereit bleibt. Bei einer grossen Revision wird die Beschichtung ent-

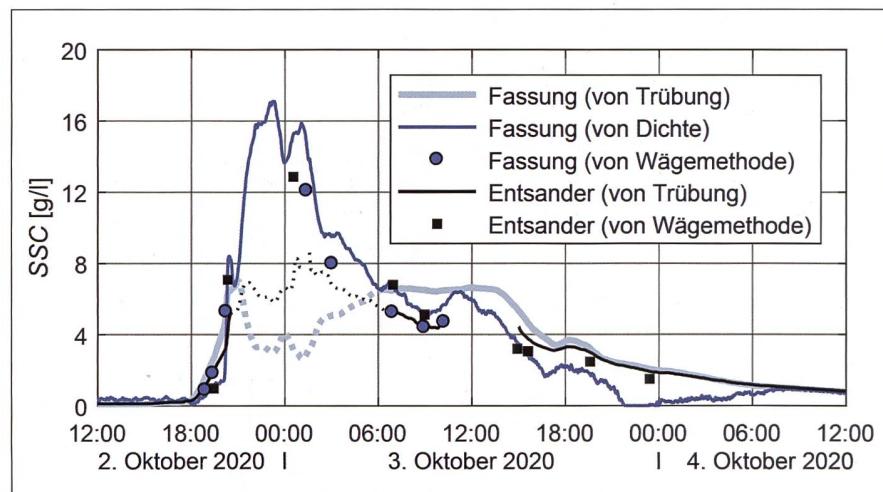


Bild 9: Schwebstofftransport-Ereignis von anfangs Oktober 2020: Schwebstoffkonzentrationen SSC bei den Fassungsbauwerken, die mit mehreren Methoden gemessen wurden (ungültige Messwerte von überlasteten Trübungssonden strichliert).

fernt, fehlendes Material aufgeschweisst, die ursprüngliche Geometrie wiederhergestellt, und nach einer thermischen Behandlung und Prüfungen die Beschichtung wieder aufgetragen. Eine grosse Revision wird extern ausgeführt und bedingt den Ausbau des Laufrads und den Einbau eines Ersatzlaufrads.

Das Bild 10 zeigt ein Beispiel eines Laufradbechers mit fortgeschrittenen, systematischer Abrasion der Mittelschneide und am Ausschnitt. Dieses Laufrad wurde nach der Schwebstoffsaison 2017 ausgebaut und in die grosse Revision beim Laufradhersteller gegeben. Seit seiner vorherigen grossen Revision im Jahr 2011 war es während sechs Schwebstoffsaisons im Einsatz. Von 2011 bis 2017 wurden die Mittelschneiden und Becherausschnitte fünfmal geschliffen und viermal nachbeschichtet (Bild 3).

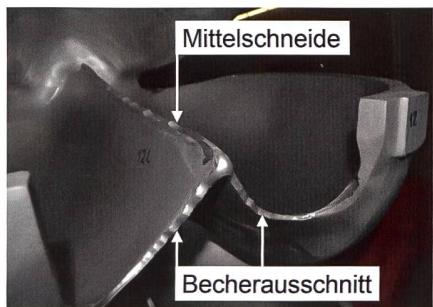


Bild 10: Abgenutzter Becher eines beschichteten Peltonlaufrads (Foto: VAW).

3.2 Verschleiss-Messungen

Um den Verschleiss an den Pelonturbinen im KW Fieschertal zu bestimmen, wurden

die Bechergeometrie und die Beschichtungsdicken jeweils an zwei Bechern pro Laufrad in der Regel vor und nach der Schwebstoffsaison gemessen. Dabei kamen optische 3D-Vermessungen und magnetisch-induktive Schichtdickenmessungen zum Einsatz (Abgottsporn et al., 2016). Durch Vergleich von zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeföhrten Messungen konnten Geometrieveränderungen und Materialverluste (Volumen- bzw. Massendifferenzen) bestimmt werden. Nachfolgend werden Auswertungen der 3D-Vermessungen an den Mittelschneiden diskutiert. Entsprechende Auswertungen wurden auch für die Becherausschnitte durchgeführt.

3.3 Veränderungen der Mittelschneidengeometrie

Die geometrischen Veränderungen der Mittelschneiden wurden unter anderem in Längsschnitten in der Symmetrieebene des Laufrads untersucht (Bild 11a). Damit die Höhenunterschiede infolge der Abrasion an den Mittelschneiden besser sichtbar sind, wurde in der Höhe ein grösserer Massstab als in der Länge gewählt. Die Veränderungen der Mittelschneidenhöhen zwischen jeweils zwei Messungen sind im oberen Bildteil dargestellt.

Das Bild 11a zeigt die Auswertung für das Laufrad 1, das im Jahr 2012 nach einer grossen Revision neuwertig in die Maschinengruppe (MG) 1 eingebaut wurde und bis Ende 2017 im Einsatz war (Bild 10). Anfangs war die Oberkante der Mittelschneide gerade; durch den Verschleiss wurde sie wellig. Der Materialabtrag ist

etwa auf halber Länge der Mittelschneide am ausgeprägtesten. In der Schwebstoffsaison 2012, mit Betrieb der Turbinen während des Hochwassers ohne Schliessen der Fassung, wurde die Mittelschneidenhöhe um bis zu ca. 7 mm reduziert (hellblau). In den folgenden zwei Jahren bis Ende 2014 mit eher geringen Schwebstoffsfrachten blieb die Geometrie der Mittelschneide annähernd unverändert. Nach weiteren drei Betriebsjahren und Revisionsarbeiten vor Ort war die Mittelschneidenoberkante am Ende der Schwebstoffsaison 2017 bis zu weiteren ca. 11 mm tiefer (violett). In sechs Jahren wurde also die Mittelschneide um bis zu 18 mm abgetragen.

Die Bilder 11b und 11c zeigen beispielhaft Mittelschneidenquerschnitte auf halber Länge der Mittelschneiden. Die Achsen wurden mit der inneren Becherbreite B normiert. Zu Beginn der Schwebstoffsaisons sind die Schneiden normalerweise gerundet. In Schwebstoffsaisons ohne nennenswerte Abrasion blieb die gerundete Form erhalten. Im Anfangsstadium der Grundmaterialabrasion auf den Mittelschneiden entsteht eine schmale Nut, welche breiter wird. Dann brechen die überstehenden Beschichtungsänder an der einen oder später oft an beiden Flanken ab. In Jahren mit starker Abrasion resultierten abgeplattete Querschnitte mit beidseitig ausgeprägten Kanten. An solchen abgestumpften Schneiden kann es zu Strömungsablösungen kommen, die zu Sekundärschäden durch Kavitation an den Flanken der Mittelschneiden oder im Becher führen können.

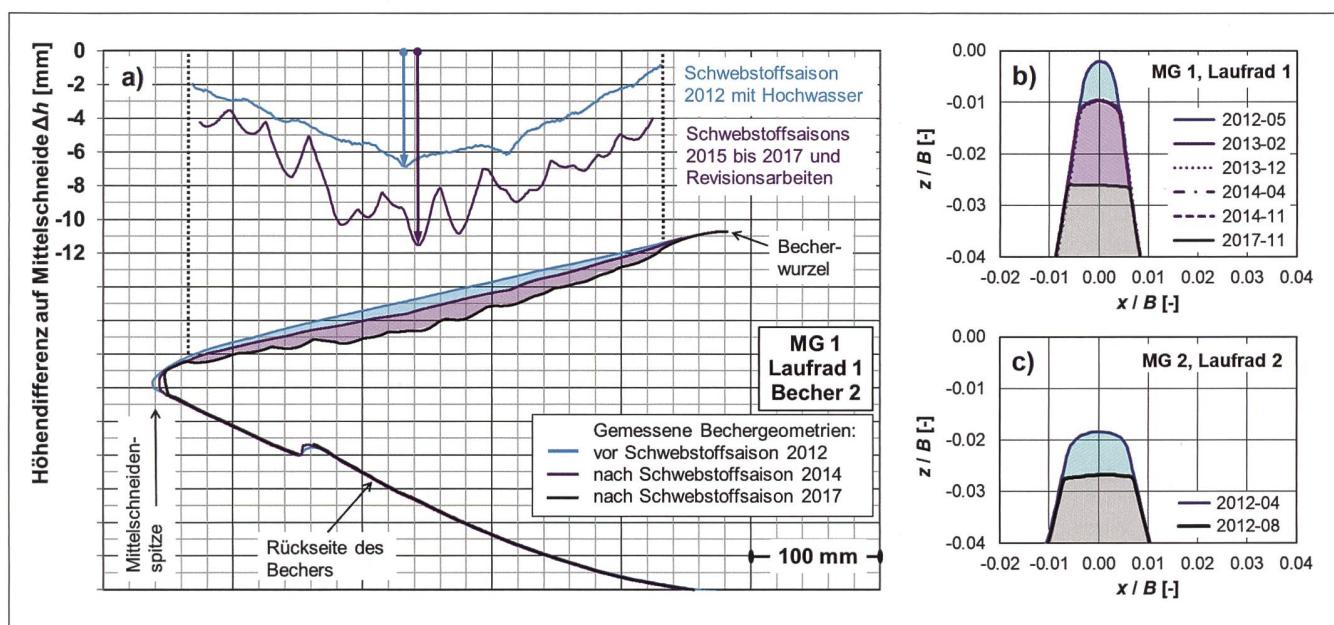


Bild 11: Abrasion an Mittelschneiden a) im Längsschnitt sowie b) und c) im Querschnitt (nachgeführt von Abgottsporn et al. 2016).

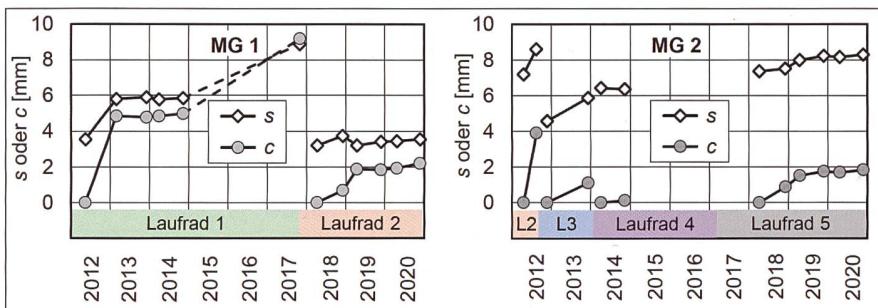


Bild 12: Veränderungen der Mittelschneidenbreite s und der Becherausschnittstiefe c für die beiden MG über neun Jahre.

3.4 Charakteristische Verschleissgrößen

Von den aus den 3D-Vermessungen gewonnenen detaillierten Informationen zur Abrasion an den Mittelschneiden und den Becherausschnitten wurden zwei charakteristische Größen abgeleitet, die den Abnutzungszustand eines Laufrads zu einem gegebenen Zeitpunkt einfach beschreiben:

Für die Abrasion an den Mittelschneiden wurde die Mittelschneidenbreite gewählt, da diese für die Strömung im Becher und somit den Turbinenwirkungsgrad wichtiger ist als die Mittelschneidenhöhe. Damit die Mittelschneidenbreite auch bei gerundeten Querschnitten bestimmt werden kann, wurden je eine Tangente mit einer Steigung von 2:1 (vertikal:horizontal) auf jeder Seite der Mittelschneide angelegt und die Querdistanz von deren Berührungs punkten als Mittelschneidenbreite verwendet (Abgottspoon *et al.*, 2013). Der charakteristische Wert der Mittelschneidenbreite s wurde als Mittelwert entlang der Mittelschneidenlänge im Bereich der verfügbaren Aufnahmen definiert.

Für die Abrasion an den Becherausschnitten wurde deren Vertiefung in radia ler Richtung als charakteristische Größe gewählt. Diese widerspiegelt auch die Abnahme des hydraulisch wirksamen Laufraddurchmessers. Der charakteristische Wert der Zunahme der Ausschnittstiefe c wurde als Mittelwert über die Strahl breite definiert. Bei der ersten verfügbaren Vermessung eines eingebauten Laufrads wurde $c=0$ gesetzt.

Die charakteristischen Verschleissgrößen s und c wurden als Mittelwerte der beiden vermessenen Becher pro Laufrad bestimmt. Bild 12 zeigt, wie sich diese Größen über die untersuchten neun Jahre entwickeln. Da die Mittelschneiden auch bei einem neuwertigen Laufrad nicht messerscharf sind, sondern im Querschnitt einen gewissen Minimalradius aufweisen, ist s stets >0 , während c für jedes eingesetzte Laufrad definitionsgemäß bei 0

beginnt. Die Zunahmen von s , also die Δs , verlaufen in der Regel ähnlich wie Δc . Dabei ist Δc meist etwas grösser als Δs , da die Abrasion am Ausschnitt im vorliegenden Fall schneller voranschreitet als auf der Mittelschneide.

4. Wirkungsgradänderungen

4.1 Wirkungsgradhistorien

Die Wirkungsgradhistorie jeder MG, also die zeitliche Entwicklung ihres Wirkungsgrades bis zur Gegenwart, wurde mit zwei Verfahren bestimmt: Einerseits wurden sogenannte Sliding-Needle-Messungen (SNM) zu bestimmten Zeitpunkten vor allem vor und nach der Schwebstoffsaison durchgeführt (Abgottspoon & Staubli, 2008; Abgottspoon *et al.*, 2016). Andererseits wurde ein kontinuierliches Wirkungsgradmonitoring entworfen, umgesetzt und laufend ausgewertet (Abgottspoon *et al.*, 2021).

Das Bild 13 zeigt die Wirkungsgrad historie der MG 1 in den Jahren 2012–2020 aufgrund der zwei erwähnten Verfahren. Die Wirkungsgraddifferenzen sind absolu-

te Prozentwerte, die auf den Wirkungsgrad bei den ersten SNM der jeweiligen MG bezogen sind. Am oberen Bildrand ist angegeben, welche Laufräder eingebaut waren. Am unteren Bildrand sind die Zeitpunkte der Revisionsarbeiten, Laufradwechsel und Ersatz der Düsenbauteile gekennzeichnet.

Bei der MG 1 kam es in der zweiten Hälfte des Jahres 2012, im Nachgang zum Hochwasserereignis vom 2. bis 3. Juli 2012, zu einer Wirkungsgradreduktion von ca. 1,0 Prozent. Durch die Revisionsarbeiten im Winter stieg der Wirkungsgrad um ca. 0,6 Prozent an und blieb in den Jahren 2013–2015 nahezu konstant. In den Jahren 2016 und 2017, also im 5. und 6. Einsatzjahr des Laufrads 1 seit dessen grosser Revision, nahm der Wirkungsgrad um rund 1,0 Prozent bzw. sogar ca. 1,3 Prozent ab. Durch den Laufradwechsel im Winter 2017/2018 resultierte ein beträchtlicher Wiederanstieg des Wirkungsgradniveaus von ungefähr 1,6 Prozent. In den Jahren 2018–2020 nahm der Wirkungsgrad leicht zu. Ein wahrscheinlicher Grund dafür ist, dass die anfangs rauhe Hartbeschichtung in den Bechern durch das zeitweise feinsedimenthaltige Wasser poliert wurde und durch die abnehmende Rauheit vor allem im Bechergrund geringere hydraulische Reibungsverluste resultierten. Ein weiterer möglicher Grund ist, dass das Schleifen der Mittelschneiden und der Becherausschnitte zu hydraulischen Profilen mit vorübergehend leicht höherem Wirkungsgrad führte.

Bei den SNM ist die zeitliche Auflösung nicht so hoch, da deren Durchführung mit einem gewissen Aufwand verbunden ist

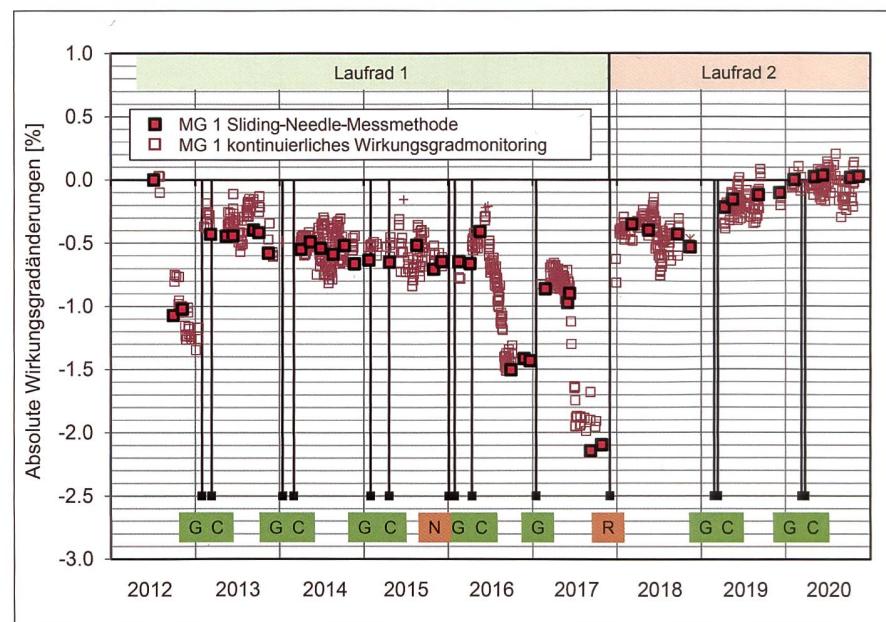


Bild 13: Wirkungsgradhistorie der MG 1 mit Revisionsarbeiten (grün; G=Schleifen, C=Nachbeschichten) und Ersatz (orange; R=Laufrad, N=Düsenkomponenten).

und diese im KW Fieschertal aufgrund der vorhandenen Instrumentierung, mit einer akustischen Durchflussmessung an der Druckleitung oberstrom des Hosenrohrs, nur im Einmaschinen-Betrieb durchgeführt werden können. Um Produktionsverluste in diesem KW ohne grösseren Speicher zu vermeiden, wurden die SNM vor allem ausserhalb der Volllast-Produktionszeit, d. h. vor Juni/Juli und nach August/September durchgeführt. Das kontinuierliche Wirkungsgradmonitoring ermöglicht hingegen eine höhere zeitliche Auflösung, was insbesondere während der Sommermonate interessant ist (z. B. in den Jahren 2016 und 2017 in Bild 13); dafür ist die Unsicherheit in den Wirkungsgraddifferenzen grösser, da die Streuung der Punkte grösser ist. Die beiden Methoden ergänzen einander. Das kontinuierliche Wirkungsgradmonitoring liefert Wirkungsgrade, die generell gut mit jenen von den SNM übereinstimmen. Die Abweichungen bewegen sich in der Grössenordnung von $\pm 0,2$ Prozent.

Die gemessenen Wirkungsgradunterschiede im Prozentbereich sind wirtschaftlich relevant: Mit einer Jahresproduktion des KW Fieschertal von ca. 160 GWh entspricht eine Wirkungsgradreduktion von 0,5 Prozent bis 1 Prozent einem Produktionsverlust von 800 bis 1600 MWh/Jahr. Mit einem angenommenen Strompreis von 50 CHF/MWh entspricht dies Mindererinnahmen von 40 bis 80 kCHF/Jahr.

4.2 Kennwerte aus den Wirkungsgradhistorien

Als Grundlage für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wurden folgende Wirkungsgradunterschiede aus den Historien ausgewertet (Abgottsporn et al., 2021):

- Zunahme infolge kleiner Revisionen: Schleifen und Nachbeschichtungen in 8 Fällen im Mittel $+0,12$ Prozent oder Schleifen in anderen 3 Fällen mit stumpferen Schneiden im Mittel $+0,43$ Prozent; je nach Ausmass des Verschleisses in der vorherigen Saison und Laufradzustand; erweiterte Messunsicherheit bisher so gross wie der Mittelwert oder grösser.
- Abnahme während der Schwebstoffsaisons: 0 bis $-1,3$ Prozent, im Mittel $-0,35$ Prozent $\pm 0,22$ Prozent (erweiterte Standardabweichung von 17 Werten) je nach Schwebstofffracht und Laufradzustand (Schneidengeometrie und Nachbeschichtung) vor der Schwebstoffsaeson, wobei der Wirkungsgrad mit zunehmender Schadensentwicklung progressiv abnimmt.

Insbesondere bei den Wirkungsgradunterschieden infolge Revisionen ist die Unsicherheit wegen der wenigen bisher verfügbaren Werte hoch. Mit weiteren Beobachtungsjahren und entsprechender Auswertung kann die Unsicherheit reduziert werden.

4.3 Wirkungsgradreduktionen je nach Verschleiss

Aufgrund der Wirkungsgradhistorien wurde auch das sogenannte Wirkungsgraddefizit jeder MG betrachtet, d. h. um wie viel Prozent der aktuelle Wirkungsgrad tiefer liegt als der Referenzwirkungsgrad von der ersten SNM pro Laufradgeneration bei der entsprechenden MG.

Im Bild 14 sind die Wirkungsgraddefizite in Funktion der relativen Mittelschneidenbreite im Lauf der Jahre dargestellt. Die relative Mittelschneidenbreite ist die absolute Mittelschneidenbreite s , normiert mit der inneren Becherbreite B . Diese dimensionslose Grösse widerspiegelt den Abnutzungszustand eines Laufrads. Brekke et al. (2002) gaben als typische Grössenordnung für unbeschichtete Becher an, dass der Turbinenwirkungsgrad bei Vollast um etwa 1 Prozent abnehme, wenn $s/B=1$ Prozent beträgt (sogenannte Faustformel von Brekke).

Beim Laufrad 5 mit einem neuen hydraulischen Design war die Mittelschneide bereits im fabrikneuen Zustand breiter als bei den Laufrädern der früheren Generation (Laufräder 1 bis 4). Beim neuen Laufrad-Design wurde offenbar die Robustheit gegenüber hydro-abrasivem Verschleiss höher gewichtet als der Spitzenwirkungsgrad im Neuzustand. Im Lauf der vier Jah-

re, in denen dieses Laufrad in der Untersuchungsperiode im Einsatz war, gab es eine leichte Mittelschneidenverbreiterung, während der Wirkungsgrad leicht abnahm. Die Datengrundlage ist aber noch zu wenig aussagekräftig.

Für die Laufräder 1 und 3 kann hingegen ein klarer Trend identifiziert werden. Es resultierte für diesen Laufradtyp eine Wirkungsgradabnahme, die gut der doppelten relativen Mittelschneidenverbreiterung entspricht. Die mittlere Wirkungsgradreduktion im KW Fieschertal ist also etwa doppelt so gross wie gemäss der Faustformel von Brekke zu erwarten war.

Weiter sind im Bild 14 entsprechende Resultate von mehreren unbeschichteten und beschichteten Laufrädern des KW Dorferbach dargestellt (Maldet, 2008; weitere Daten der TIWAG in Felix, 2017). In jenem KW sind die Laufräder bedeutend kleiner und die Becher nur etwa ein Drittel so breit wie im KW Fieschertal. Aufgrund der Normierung der Mittelschneidenbreite mit der Becherbreite können die Steigungen der Trendlinien trotzdem verglichen werden. Für die Laufräder der älteren Generation im KW Fieschertal resultierte eine grössere Wirkungsgradreduktion als im Durchschnitt im KW Dorferbach. Dies und der Vergleich mit der Faustformel von Brekke zeigt, dass für Prognosen beträchtliche Unterschiede vorliegen. Um ein Prognosemodell zuverlässiger zu gestalten, sind jeweils anlagen spezifische Messungen, weitere Untersuchungen in anderen Kraftwerksanlagen und systematische Untersuchungen im Labor mit entsprechender Klassifizierung bzw. Parametrisierung erforderlich.

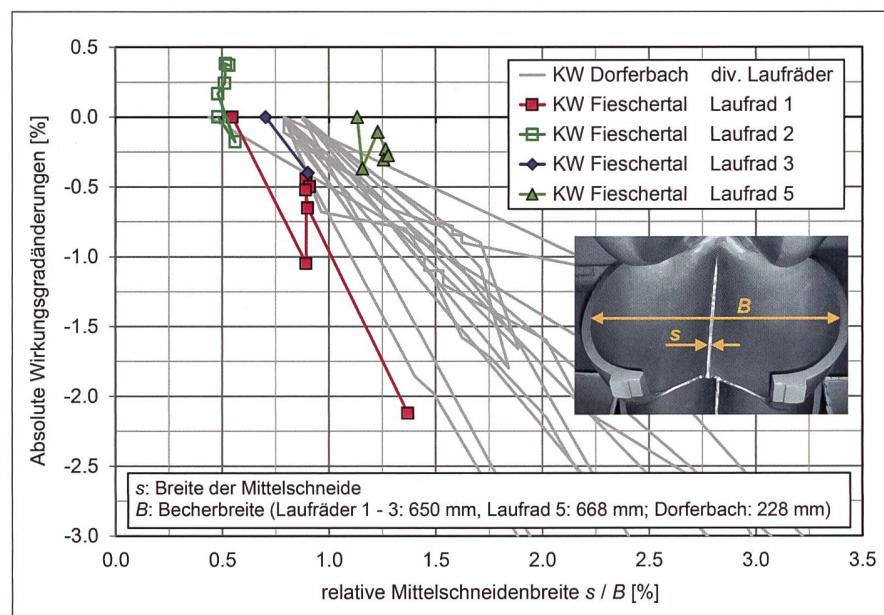


Bild 14: Wirkungsgradabnahme mit zunehmender relativer Mittelschneidenbreite.

5. Ausserbetriebsnahmen während Hochwasser

5.1 Bestimmung der Abschaltkonzentration

Eine wichtige Möglichkeit zur Betriebsoptimierung von Laufwasserkraftanlagen bezüglich Abrasion besteht darin, diese in Phasen mit ausserordentlich hohem Sedimentaufkommen vorübergehend ausser Betrieb zu nehmen, d.h. die Wasserfassung zu schliessen. Für die Umsetzung dieser Betrieboption stellt sich die Frage, wie hoch der Schwellenwert, die sogenannte Abschalt-SSC, gewählt werden soll. Bei zunehmender SSC steigen die Kosten, die durch die Feinsedimente verursacht werden. Wenn diese Kosten bezogen auf die produzierte kWh höher sind als der Strompreis, ist der Betrieb unwirtschaftlich, da die Kosten den Erlös übersteigen.

Aufgrund der Daten der ersten drei Projektjahre (2012–2014) und mit einem Strompreis von ca. 50 CHF/MWh (5 Rp./kWh), der jahrelang üblich war, wurde die Abschalt-SSC auf 10 g/l geschätzt (Abgottsporn et al., 2016). Zum Schluss des Projekts wurden die Berechnungen aufgrund der längeren Datenbasis der Jahre 2012–2020 wie folgt aktualisiert:

- Die durch Feinsedimente bedingten Kosten an beiden MG beliefen sich im Mittel über die neun Jahre auf 290 kCHF/Jahr.
- Die mittlere turbinierte Schwebstofffracht SSL betrug 75 000 t/Jahr (Bild 6).
- Mit der vereinfachenden Annahme, dass die durch Feinsedimente verursachten Kosten proportional zur Schwebstofffracht sind, ergeben sich damit spezifische Kosten pro Tonne

Feinsediment von 290 kCHF/75 000 t $\approx 3.90 \text{ CHF/t} = 0,39 \text{ Rp/kg}$ (erste Schätzung ergab 0,66 Rp/kg).

- Bei der mittleren SSC = 0,53 g/l resultieren durch Feinsedimente verursachte spezifische Kosten von $0,39 \text{ Rp/kg} \cdot 0,53 \text{ kg/m}^3 = 0,21 \text{ Rp/m}^3$ Wasser.
- Mit dem Arbeitswert des Wassers im KW Fieschertal entspricht dies $0,21 \text{ Rp/m}^3 / 1,2 \text{ kWh/m}^3 = 0,17 \text{ Rp/kWh} = 1.70 \text{ CHF/MWh}$.
- Bei einer ca. 30-mal höheren Konzentration als die mittlere SSC von 0,53 g/l sind die spezifischen Kosten entsprechend höher und erreichen den angenommenen Strompreis von 50 CHF/MWh.

So wurde der typische Wert der Abschalt-SSC auf $0,53 \cdot 30 \approx 15 \text{ g/l}$ geschätzt (Schnittpunkt der ansteigenden Kosten mit der horizontalen Linie des typischen Strompreises im Bild 15). Bei höherem Strompreis – wie z.B. im Winter 2021/2022 und angedeutet durch den grünen Variationsbereich – ist die wirtschaftliche Abschalt-SSC entsprechend höher. Bei stark variierenden Strompreisen wäre prüfenswert, die Abschalt-SSC dynamisch in Abhängigkeit des aktuellen Strompreises (und ggf. weiterer Aspekte, siehe Abschnitt 5.3) im Leitsystem zu implementieren.

Die Abschalt-SSC ist anlagen spezifisch, da der Wert von vielen Faktoren, welche die Abrasion und die Wirtschaftlichkeit beeinflussen, abhängt (Fallhöhe; Typ, Bauart und Grösse der Turbine und deren spezifische Drehzahl; Eigenschaften der Sedimentpartikel, Material und Beschichtung der wasserberührten Turbinenkomponen-

ten; Revisionsarbeiten). Gemäss den wenigen auffindbaren Literaturangaben liegen Abschalt-SSC bei andern Mittel- und Hochdruck-Wasserkraftanlagen im Bereich von 1,1 bis 10 g/l (Felix, 2017). Die Abschalt-SSC im vorliegenden Fall ist also höher als die bisher in der Literatur vorhandenen Werte.

Die SSC von 15 g/l wird im Mittel an nur ca. 3h pro Jahr überschritten. Da in einigen Jahren keine solchen Ereignisse vorkommen, können in Jahren mit einem grösseren Hochwasser SSC >15 g/l während eines halben bis ganzen Tages pro Jahr vorkommen.

Weil die Ausser- und Wiederinbetriebnahme der Anlage mit einem gewissen Aufwand verbunden ist, wurde vorgeschlagen, mit der Wiederinbetriebnahme zuzuwarten, bis die SSC an der Wasserfassung unter die halbe Abschalt-SSC gesunken ist.

5.2 Wirtschaftlichkeit von Ausserbetriebsnahmen

Im Hochwasser 2012 wurde das KW Fieschertal wie erwähnt durchgehend betrieben. An einem Laufrad, das anfangs der Schwebstoffsaison nicht in neuwertigem Zustand war, trat so starker Verschleiss auf, dass es während der Vollastzeit ausgewechselt werden musste. Im Nachhinein wurde abgeschätzt, dass eine Abschaltung während ca. 16h einen wirtschaftlichen Vorteil in der Gröszenordnung von 200 kCHF ergeben hätte (Abgottsporn et al., 2016). In der Folge wurden automatische Alarne vor hohen SSC im Leitsystem definiert. Die Betriebsorganisation wurde so angepasst, dass der Pikett-Mitarbeiter die Kompetenz hat, die Anlage bei Überschreiten der Abschalt-SSC ausser Betrieb zu nehmen, nachdem er unter andrem die Messwerte als plausibel eingeschätzt, den Wetterbericht berücksichtigt und den Strombezüger informiert hat.

Im Hochwasser 2017 wurde das KW Fieschertal wie im Abschnitt 2.6 beschrieben abgestellt, nachdem die SSC in der Schieberkammer um 20 Uhr die damalige Abschalt-SSC von 10 g/l überschritt (Felix et al., 2021). Im Hochwasser 2017 war die maximale SSC höher als im Hochwasser 2012, obwohl die Abflussspitze kleiner war. Das Kriterium für die Wiederinbetriebnahme war bereits um zwei Uhr nachts, also 6 h nach der Abschaltung, erfüllt. Da die Kühlwasserentsandungsanlage während des Stillstands bei hoher SSC durch Feinsedimente verstopft wurde, waren aber für die Wiederinbetriebnahme zusätzliche Mitarbeiter erforderlich, welche erst am Vormittag jenes Sonntags verfügbar waren. Daher standen die Turbinen gut 11 Stunden

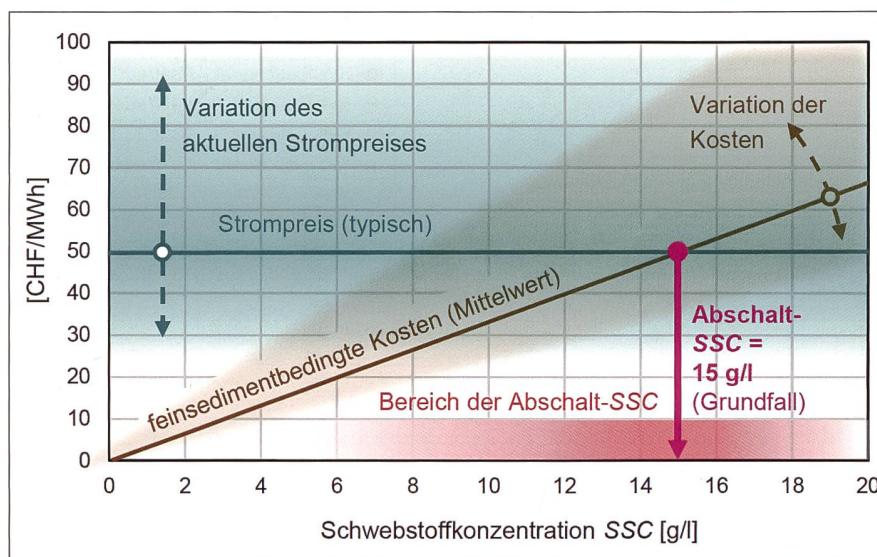


Bild 15: Bestimmung der Abschalt-Schwebstoffkonzentration für das KW Fieschertal.

still. Mit der durchgeführten Abstellung konnten zwei Drittel der potenziellen Sedimentfracht jenes Ereignisses vom Kraftwerk ferngehalten werden und die Abstellung war wirtschaftlich.

Wenn bereits im Jahr 2017 ein CFDM an der Wasserfassung installiert gewesen wäre, hätte die Fassung aufgrund von dessen Messwerten bestenfalls eine Stunde früher geschlossen werden können. Mit einer früheren Abstellung wäre weniger Feinsediment ins System gelangt, sodass die Wiederinbetriebnahme einfacher und im besten Fall, auch je nach Personalverfügbarkeit, schon während der Nachtstunden möglich gewesen wäre. Mit dem in Bild 8 rot dargestellten optimierten Abschalt-Szenario hätten 82 Prozent der potenziellen Sedimentfracht jenes Ereignisses vom Kraftwerk ferngehalten werden können. Mit den aktualisierten feinsedimentbedingten Kosten wurde geschätzt, dass bei einem Strompreis von 50CHF/MWh ein wirtschaftlicher Vorteil von ca. 26kCHF resultiert hätte (Tabelle 1). Bei einem tieferen Strompreis (wie in vergangenen Jahren im Sommer während der Nachtstunden insbesondere am Wochenende) wäre die Abschaltung noch wirtschaftlicher gewesen. Nur bei einem Strompreis über 110CHF/MWh hätte ein durchgehender Betrieb wirtschaftlich begründet werden können.

Beim kleineren Schwebstofftransportereignis im Oktober 2020 (Abschnitt 2.7), mit moderatem Abfluss und nicht so hoher SSC-Spitze, wurde der Kraftwerksbetrieb während 15 Stunden eingestellt. Dies erwies sich im Nachhinein als leicht unwirtschaftlich. Solche Ergebnisse sind in Kauf zu nehmen, da zu Beginn und während der Ereignisse unklar ist, wie sich das Wetter, der Abfluss und die SSC weiter entwickeln werden. Mit den aktualisierten Abschalt-SSC von 15g/l und einem leicht erhöhten Strompreis (>70CHF/MWh) hätte das KW Fieschertal in diesem Ereignis durchgehend wirtschaftlich betrieben werden können.

Angenommener Strompreis [CHF/MWh]	30	50	100
Mindereinnahmen infolge Stillstand während ca. 6.5 h in Vollastzeit (64 MW), Produktionsverlust 420 MWh	–13kCHF	–21kCHF	–42kCHF
Vermiedene feinsedimentbedingte Kosten (Revisionen, Wirkungsgrad) ca. 12'000 t à 3.90 CHF/t für beide MG	+47kCHF	+47kCHF	+47kCHF
Total (ohne allfällige Pönale)	+34kCHF	+26kCHF	+5kCHF

Tabelle 1: Wirtschaftlichkeit der Ausserbetriebnahme während des Hochwassers vom 29. Juli 2017 (Szenario von Bild 8).

5.3 Weitere Aspekte

Im vorherigen Abschnitt wurde aufgezeigt, wie wichtig der aktuelle Strompreis während solcher vorübergehenden Ausserbetriebnahmen ist. Im Folgenden werden zwei weitere Aspekte diskutiert, die einen Einfluss auf die Abschalt-SSC haben.

Falls gröbere Partikel als üblich im Triebwasser vorhanden sind, wird eine erhöhte Abrasionsrate erwartet und somit sind die feinsedimentbedingten Kosten zeitweise höher (grössere Steigung in Bild 15). Wenn also bei Hochwasser gröbere Partikel im Triebwasser vorhanden sind als gewöhnlich, ist prinzipiell eine tiefere Abschalt-SSC zu wählen. Dies wurde aber im KW Fieschertal aus folgenden Gründen bisher nicht umgesetzt und stattdessen eine konstante mittlere Partikelgrösse angenommen:

- Mit der derzeit auf dem Markt erhältlichen Messtechnik können Partikelgrössen nicht mit vertretbarem Aufwand in Echtzeit und bei hohen SSC genügend zuverlässig gemessen werden.
- Der Einfluss der Partikelgrössen auf die Abrasion an verschiedenen Stellen eines (beschichteten) Peltonbechers ist bisher in der Forschung nicht restlos geklärt.
- Die Messungen im KW Fieschertal zeigten, dass gröbere Partikel in der Druckleitung vorwiegend infolge Resuspension bei tiefen Wasserständen im Speicherstollen, also nicht infolge Hochwassers, auftraten.

Einen weiteren Einfluss auf die Abschalt-SSC hat die Resteinsatzdauer der Turbinenbauteile bis zu ihrer nächsten grossen Revision bzw. ihrem Ersatz. So kann bei einem Laufrad, das im kommenden Winter sowieso in eine grosse Revision gegeben oder entsorgt wird, insbesondere gegen das Ende einer Schwebstoffaison eine höhere Abschalt-SSC gewählt werden, da für wenige verbleibende Monate ein grösserer Verschleiss und entsprechende Min-

derproduktion eher toleriert werden können.

6. Wirtschaftlichkeit von Unterhaltsmassnahmen

6.1 Kleine und grosse Revisionen

Wie im Abschnitt 3.1 erwähnt, werden im KW Fieschertal an den Laufrädern kleine und grosse Revisionen durchgeführt. Die kleinen Revisionen werden in der Regel in jedem Winter durchgeführt. In Jahren mit unterdurchschnittlicher Schwebstofffracht und bei Laufrädern in gutem Zustand kann darauf verzichtet werden. Kleine Revisionen kosteten etwa 5 Prozent des Anschaffungspreises eines neuen beschichteten Laufrads, wenn beide MG gleichzeitig nachzubeschichten waren. Darin sind auch die Kosten für die Revisionsarbeiten an weiteren Komponenten im Turbinengehäuse wie die Düsenschutzdächer und die Strahlablenker enthalten.

Die grossen Revisionen, d. h. Generalüberholung des Laufrads mit Neubeschichtung in der Regel beim Hersteller, werden im KW Fieschertal etwa alle 6 Jahre fällig. Nach einer grossen Revision wird wieder etwa der anfängliche Wirkungsgrad erreicht und das Laufrad kann bezüglich des Wirkungsgrads als neuwertig bezeichnet werden. Eine grosse Revision wird in der Regel nach einem Laufradwechsel eingeleitet, ausser wenn das Laufrad nicht mehr verwendet werden soll (z. B. wegen Ermüdung oder neuem hydraulischem Design). Die Kosten einer grossen Revision lagen in der Grössenordnung von 40 Prozent des Neupreises. Da die grossen Revisionen ein bedeutender Kostenfaktor sind, wurde der wirtschaftlichste Zeitpunkt eines Laufradwechsels untersucht.

6.2 Optimaler Zeitpunkt eines Laufradwechsels

Je länger das Intervall zwischen den grossen Revisionen ist, desto kleiner werden die dadurch verursachten jährlichen Kosten (Annuität). Andererseits nimmt der Wirkungsgrad progressiv ab, und dementsprechend nehmen die Produktionseinbussen und Mindereinnahmen immer stärker zu. Für den Kraftwerksbetreiber stellt sich daher jeweils im Spätherbst die Frage, ob im kommenden Winter

- das Laufrad ausgebaut und ein neuwertiges Ersatzlaufrad eingebaut werden (Variante A), oder
- nur eine kleine Revision durchgeführt und das Laufrad im nächsten Winter ausgewechselt werden soll (Variante B).

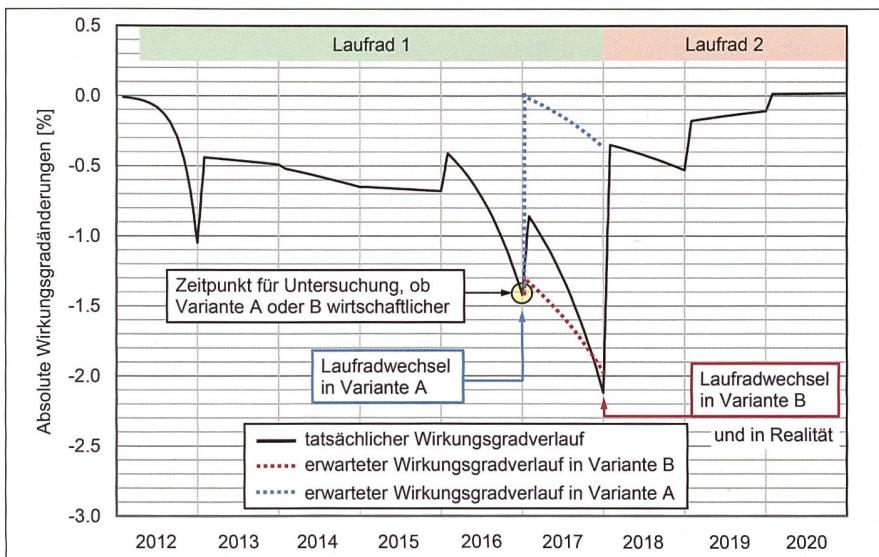


Bild 16: Wirkungsgradhistorie der MG 1 mit erwarteten Wirkungsgradverläufen je nach Zeitpunkt des Laufradwechsels.

Diese Frage nach dem optimalen Zeitpunkt eines Laufradwechsels wird im Folgenden am Beispiel der MG 1 im Spätherbst 2016 unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten untersucht. Das Laufrad 1 war damals seit seiner letzten grossen Revision fünf Schwebstoffsaisons im Einsatz und sein Wirkungsgrad hatte um 1,4 Prozent abgenommen, wie der gelbe Punkt auf der schwarzen Linie in Bild 16 zeigt. Bei dieser Linie handelt es sich um die Ausgleichskurve der Wirkungsgradhistorie aus Bild 13. Weiter sind die in den Varianten A und B damals erwarteten Wirkungsgradverläufe (gestrichelte Linien) dargestellt. Wenn der Laufradwechsel im betrachteten Winter durchgeführt worden wäre (Variante A), wäre anfangs der folgenden Schwebstoffsaeson kein Wirkungsgraddefizit mehr vorhanden gewesen (blaue Linie). Mit dem Laufradwechsel erst im nächsten Winter (Variante B, wie ausgeführt), war eine weitere Abnahme des Wirkungsgrads zu erwarten (rote Linie). Die erwarteten Wirkungsgradverläufe wurden aufgrund des Wirkungsgradniveaus zum Betrachtungszeitpunkt (-1,4 Prozent), der Kennwerte aus Abschnitt 4.2 und der mittleren Erwartungswerte der progressiven Wirkungsgradabnahme prognostiziert.

6.3 Untersuchung der Wirtschaftlichkeit

In Tabelle 2 werden die Kosten der beiden Varianten gegenübergestellt. In Variante B werden die Kosten der grossen Revision auf ein Jahr mehr verteilt und sind daher weniger hoch. Da die Düsenbauteile am einfachsten gleichzeitig mit dem Laufrad ersetzt werden, wurden auch deren Kosten auf die entsprechenden Jahre verteilt.

Eine kleine Revision wird in beiden Varianten fällig, entweder im betrachteten oder im nächsten Winter. Da im Winter 2016/2017 bei der anderen MG das Laufrad gewechselt wurde, wurde auf das Nachbeschichten des betrachteten Laufrads aus Kostengründen verzichtet. Deshalb waren damals die Kosten für die kleine Revision in Variante B tiefer.

Der Hauptunterschied liegt bei den wirkungsgradbedingten Mindereinnahmen: Für das Jahr nach dem untersuchten Entscheidungszeitpunkt war in Variante B ein mittleres Wirkungsgraddefizit von gut 1,6 Prozent zu erwarten (Mittelwert der roten gestrichelten Linie in Bild 16), mit dem früheren Laufradwechsel hingegen nur knapp 0,2 Prozent (blau gestrichelte Linie), was zu ca. 60 kCHF höheren Einnahmen geführt hätte. In Summe wäre Variante A mit dem

früheren Laufradwechsel um ca. 30 kCHF wirtschaftlicher gewesen (Tabelle 2).

Selbstverständlich spielen für die Planung von Revisionen und Ersatzanschaffungen nebst der Wirtschaftlichkeit auch andere Aspekte wie die Verfügbarkeit von Personal und Partnern, akzeptable Betriebsunterbrüche, die Beschaffungsstrategie oder andere Projekte im Kraftwerkspark eine Rolle.

Zum Schluss wurde der erwartete und der tatsächliche Wirkungsgradverlauf im Jahr 2017 verglichen (rote und schwarze Linien in Bild 16). Durch das Schleifen der Mittelschneiden und der Ausschnitte im Winter 2016/2017 stieg der Wirkungsgrad deutlich stärker als aufgrund des mittleren Erfahrungswerts erwartet wurde. Aber in der Schwebstoffsaeson 2017 nahm der Wirkungsgrad rasch stark ab und sank etwa auf das erwartete Niveau. Die Prognose des Wirkungsgrads am Ende der kommenden Schwebstoffsaeson war also realistisch und hätte so die Wahl der wirtschaftlicheren Variante ermöglicht.

6.4 Nutzen des Wirkungsgradmonitorings

Als Grundlage für die Planung und wirtschaftliche Begründung von Unterhalts- bzw. Revisionsmassnahmen sind die Wirkungsgradhistorien eine unabdingbare Grundlage. Einerseits geben sie das aktuelle Wirkungsgraddefizit an, welches u.a. für die Berechnung der erwarteten wirkungsgradbedingten Mindereinnahmen erforderlich ist. Andererseits können aus den Wirkungsgradhistorien typische Werte und deren Bandbreite für jährliche Wirkungsgradabnahmen oder bestimmte Revisionsarbeiten ermittelt werden, welche für die Prognose der wirtschaftlichen Auswirkungen von Revisionsmassnahmen nützlich sind.

7. Schlussfolgerungen

Am KW Fieschertal konnte eine detaillierte Messreihe der Schwebstoffbelastung, der Turbinenabrasion und der Wirkungsgradänderungen von zwei grossen, beschichteten Peltonturbinen über neun Jahre zusammengestellt und unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte analysiert werden. Zur Reduktion der Unsicherheiten wurden mehrere Messmethoden, insbesondere für die Messung der SSC, kombiniert. In der Literatur war eine vergleichbare Untersuchung bisher nicht verfügbar.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Projekt lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Kostenelement	Variante A: Laufradwechsel im betrachteten Winter	Variante B: Laufradwechsel im nächsten Winter
Annuität für grosse Laufradrevision und Ersatz der Düsenbauteile	79 kCHF	68 kCHF
Revisionsarbeiten vor Ort	46 kCHF	26 kCHF
Wirkungsgradbedingte Mindereinnahmen	7 kCHF	68 kCHF
Total	132 kCHF	162 kCHF

Tabelle 2: Wirtschaftlichkeit des in Bild 16 untersuchten Laufradwechsels zu zwei Zeitpunkten.

- Die Messung der Schwebstoffkonzentration mit geeigneter, oft kombinierter Instrumentierung ist die Grundlage dafür, rechtzeitig und zuverlässig Alarne auszulösen, um Wasserkraftanlagen während hoher Schwebstoffbelastung vorübergehend ausser Betrieb zu nehmen und Turbinen vor übermässigem hydroabrasivem Verschleiss zu schützen.
- Die Abschalt-Schwebstoffkonzentration für solche vorübergehenden Ausserbetriebnahmen liegt gemäss bisher bekannten Beispielen zwischen 1 bis 15 g/l und kann unter Berücksichtigung des Strompreises für eine bestimmte Anlage rechnerisch abgeschätzt werden.
- Das kontinuierliche Monitoring, insbesondere des Wirkungsgrads der einzelnen Maschinen, ist die wichtigste Grundlage für die wirtschaftliche Optimierung des Betriebs von Wasserkraftanlagen an sedimentführenden Fließgewässern.
- Weil jedes Jahr bezüglich Hochwasser, Revisionsgeschichte der Laufräder etc. unterschiedlich ist, ist die Optimierung nur aufgrund von zuverlässigen Messdaten über mehrere Jahre möglich. Nur so können aussagekräftige Werte bestimmt werden.
- Für die Optimierung des Laufradunterhalts wurde aufgezeigt, wie der wirtschaftlichste Zeitpunkt für einen Laufradwechsel, der in der Regel eine grosse Revision auslöst, ermittelt werden kann.

Zahlreiche Erkenntnisse aus dem Projekt, beispielsweise betreffend das Monitoring der Schwebstoffe, die Abrasion der Turbinen und ihrer Wirkungsgrade oder die aufgezeigten Methoden für die Abschätzung der Abschalt-SSC und der optimalen Revisionszeitpunkte, lassen sich auf andere Wasserkraftanlagen übertragen. Um auf die Eigenheiten der entsprechenden Einzugsgebiete, Kraftwerksanlagen und Messstellen einzugehen, sind fallweise Überlegungen und Anpassungen erforderlich.

Das systematische Schliessen von Fassungen bei einer Überschreitung eines SSC-Schwellenwerts kann nicht nur bei Laufwasserkraftwerken, sondern auch bei gewissen Wasserfassungen von Speicherwasserkraftwerken angewandt werden, z. B. an Bachfassungen direkt am Triebwassersystem oder Überleitungen zu Staustufen.

Weiter sind die Erkenntnisse aus diesem Projekt auch für Speicherwasserkraftwerke, die bisher nicht von Turbinenabrasion betroffen waren, aus zwei Gründen relevant: Einerseits kann die fortschreitende Speichererweiterung dazu führen, dass mehr Sedimentpartikel ins Triebwasser gelangen. Andererseits kann es für den langfristigen Erhalt der Nutzvolumen mangels Alternativen erforderlich werden, Feinsedimente vermehrt über den Triebwasserweg abzuleiten, wobei verstärkte Turbinenabrasion in Kauf zu nehmen und

die maschinelle Ausrüstung entsprechend zu entwerfen bzw. anzupassen ist.

Verdankung

Das Forschungsprojekt wurde durch swiss-electric research, das Schweizer Bundesamt für Energie (BFE) und die Gommerkraftwerke AG (gkw) finanziell unterstützt. Weiter arbeiteten an diesem Projekt zeitweise VAW-Mitarbeiter im Rahmen des Schweizerischen Kompetenzzentrums für Energieforschung – Strombereitstellung (SCCER-SoE), welches durch Innosuisse gefördert wurde. Von den Firmen Sigrist Photometer, Endress+Hauser und Rittmeyer wurden Schwebstoffmessgeräte leihweise zur Verfügung gestellt. Die Autoren bedanken sich bei allen Projektbeteiligten, insbesondere bei Bernhard Truffer und Martin Perren (gkw), Martin von Burg und Dr. Peter Gruber (HSLU) sowie Maximilian Kastinger und Dr. Ismail Albayrak (VAW) für ihre Mitarbeit bei den Untersuchungen.

Dokumentation

Der ausführliche Schlussbericht über die Untersuchung am KW Fieschertal (*Felix et al., 2022*) mit Details zu allen Messstellen und weiteren Ergebnissen wird auf ARAMIS, der Forschungsdatenbank des Bundes, publiziert: www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=40669.

Quellen:

- Abgottsporn, A. (2011): Messung abrasiver Partikel in Wasserkraftanlagen. Masterarbeit (unveröffentlicht), Kompetenzzentrum Fluidmechanik und Hydromaschinen, Hochschule Luzern.
- Abgottsporn, A., Staubli, T. (2008): Index Tests of a Francis Unit using the Sliding Gate Method. Proc. 7th Int'l. Conf. on Hydraulic Efficiency Measurements, IGHEM, Milano.
- Abgottsporn, A., Stern, P., Staubli, T., Felix, D., Winkler, K. (2013): Measuring Turbine Abrasion and Efficiency Decrease: First Results of the Case Study at HPP Fieschertal. Proc. Hydro 2013, Innsbruck; paper no. 18.05.
- Abgottsporn, A., Felix, D., Boes, R., Staubli, T. (2016): Schwebstoffe, hydro-abrasiver Verschleiss und Wirkungsgradänderungen an Pelonturbinen – Ein Forschungsprojekt am KW Fieschertal. Wasser Energie Luft, 108. Jahrgang, Heft 1: 9–24.
- Abgottsporn, A., von Burg, M., Staubli, T., Felix, D. (2021): Analysis of hydro-abrasive erosion and efficiency changes measured on the coated Pelton turbines of HPP Fieschertal. Proc. 30th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Lausanne. IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci., 774, 012030.
- Boes, R. (2010): Kontinuierliche Messung von Schwebstoffkonzentration und -körngrössenverteilung im Triebwasser und Quantifizierung der Hydroabrasion an einer Pelonturbine. Wasser Energie Luft, 102. Jahrgang, Heft 2: 101–107.
- Boes, R. M., Felix, D., Albayrak, I. (2013): Schwebstoffmonitoring zum verschleissoptimierten Betrieb von Hochdruck-Wasserkraftanlagen. Wasser Energie Luft, 105. Jahrgang, Heft 1: 35–42.

- Brekke, H., Wu, Y. L., Cai, B.Y. (2002): Design of Hydraulic Machinery Working in Sand Laden Water. In Duan C. G. & Karelín V. Y. (eds.), Abrasive Erosion & Corrosion of Hydraulic Machinery (pp. 155–233). Imperial College Press, London.
- Felix, D. (2017): Experimental investigation on suspended sediment, hydro-abrasive erosion and efficiency reductions of coated Pelton turbines. VAW-Mitteilungen 238 (Boes R., ed.) und Dissertation 24145, ETH Zürich.
- Felix, D., Albayrak, I., Boes, R. (2017): Weiterleitung von Feinsedimenten via Triebwasser als Massnahme gegen die Stauraumverlandung. Wasser Energie Luft, 109. Jahrgang, Heft 2: 85–90.
- Felix, D., Abgottsporn, A., Albayrak, I., Boes, R. (2021): Temporary shutdowns of the high-head run-of-river HPP Fieschertal to prevent excessive turbine erosion during floods. Proc. 30th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Lausanne. IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci., 774, 012029.
- Felix, D., Abgottsporn, A., Staubli, T., von Burg, M., Kastinger, M., Albayrak, I., Boes, R. (2022): Untersuchung der Schwebstoffbelastung, der hydro-abrasiven Erosion und der Wirkungsgradänderungen an beschichteten Pelonturbinen in der Hochdruckwasserkraftanlage Fieschertal. Schlussbericht vom 06.2022 an das BFE. VAW der ETH Zürich und Kompetenzzentrum Fluidmechanik und Numerische Methoden der Hochschule Luzern.
- Hassler, P., Schnablegger, W. (2006): Pelton runner maintenance and its results at Verbund-Austrian Hydro Power AG. Proc. 14th Int'l. Seminar on Hydropower Plants, Doujak E. (ed.), Vienna: 445–454.
- IEC 62364 (2013/2019): Guide for dealing with hydro-abrasive erosion in Kaplan, Francis, and Pelton turbines. 1st/2nd edition. International Electrotechnical Commission, Geneva.

Maledt, R. (2008): Pelton runner with high erosion caused by glacier sediment: assessment and measures. Proc. 15th Int'l. Seminar on Hydropower Plants, Doujak E. (ed.), Vienna: 639–646.

Rai, A. K., Kumar, A., Staubli, T. (2017): Hydro-abrasive erosion in Pelton buckets: Classification and field study. Wear, 392–393: 8–20.

Voichick, N., Topping, D.J., Griffiths, R.E. (2018): False low turbidity readings from optical probes during high suspended-sediment concentrations. Hydrology and Earth System Sciences, 22(3): 1767–1773.

Wittmann, H., von Blanckenburg, F., Kruesmann, T., Norton, K. P., Kubik, P.W. (2007): Relation between rock uplift and denudation from cosmogenic nuclides in river sediment in the Central Alps of Switzerland. Journal of Geophysical Research 112: F04010.

Autoren:

André Abgottsporn, vormals Mitarbeiter am CC FMNM der Hochschule Luzern, etaeval GmbH, Altsaggenstrasse 3, 6048 Horw, andre.abgottsporn@etaeval.ch

David Felix, vormals Mitarbeiter an der VAW der ETH Zürich, Beratender Ingenieur, Winzerstr. 79, 8408 Winterthur, david.felix@aquased.ch

Thomas Staubli, Hochschule Luzern Technik & Architektur, Kompetenzzentrum Fluidmechanik und Numerische Methoden (CC FMNM), 6048 Horw, thomas.staubli@hslu.ch

Robert Boes, ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), 8093 Zürich, boes@vaw.baug.ethz.ch