Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 108 (2016)

Heft: 1

Artikel: Schwebstoffe, hydro-abrasiver Verschleiss und Wirkungsgradänderungen an Peltonturbinen : ein Forschungsprojet am KW Fieschertal

Autor: Abgottspon, André / Felix, David / Boes, Robert

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939510

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: 11.07.2025

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

Schwebstoffe, hydro-abrasiver Verschleiss und Wirkungsgradänderungen an Peltonturbinen

Ein Forschungsprojekt am KW Fieschertal

André Abgottspon, David Felix, Robert Boes, Thomas Staubli

Zusammenfassung

Durch schwebstoffhaltiges Wasser kommt es insbesondere bei Hoch- und Mitteldruckwasserkraftanlagen zu hydro-abrasivem Verschleiss an Turbinen und Pumpen mit entsprechenden Wirkungsgradreduktionen. Die Folgen sind erhöhte Unterhaltskosten und Ertragseinbussen.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurden die Schwebstoffbelastung, die Abrasion an Peltonlaufrädern und die dadurch verursachten Wirkungsgradänderungen am KW Fieschertal während dreier Jahre detailliert gemessen und untersucht. Mit den Messungen konnten die Variation der Schwebstoffbelastung mit der Zeit, die Abhängigkeit von der Gletscherschmelze, von Regenereignissen und auch vom Betrieb der Anlage aufgezeigt werden. Die untersuchten, praxistauglichen Messmethoden erlaubten ein kontinuierliches Monitoring der Schwebstoffbelastung und lieferten somit eine Grundlage für die wirtschaftliche Optimierung des Anlagenbetriebs, beispielsweise für das vorübergehende Ausleiten von Fassungen und den Betriebsunterbruch während eines Hochwassers.

Die Abrasion der Laufradbecher wurde mit detaillierten Messungen bestimmt. Um die Auswirkungen der Abrasion auf den Wirkungsgrad zu quantifizieren, wurde eine Methode des Wirkungsgradmonitorings entwickelt, die den Anlagebetrieb möglichst wenig beeinträchtigt. Darauf basierend kann die Wirtschaftlichkeit von Revisionsarbeiten (Nachschleifen, Nachbeschichten) und Ersatzinvestitionen beurteilt werden.

Résumé

Les turbines et les pompes des aménagements hydroélectriques à haute ou moyenne chute peuvent subir de l'usure par abrasion causée par des particules minérales contenues dans l'eau. L'usure engendre une diminution des rendements hydrauliques, une augmentation des coûts d'entretien et des pertes de revenu.

Dans le cadre d'un projet de recherche, la charge des sédiments en suspension, l'abrasion des roues Pelton ainsi que les différences de rendements hydrauliques en resultant ont été mesurées et analysées à l'aménagement de Fieschertal pendant trois ans. Les mesures ont montré la variation temporelle de la charge en sédiments ainsi que les effets de la fonte glaciaire, des pluies, et de l'exploitation de l'aménagement. Les techniques de mesure investiguées et éprouvées permettent une surveillance en continu de la charge des sédiments en suspension. Ceci fournit une base pour une opération économiquement optimisée, comme par exemple, d'interrompre le captage d'eau et le turbinage pendant les crues.

L'abrasion des augets des roues Pelton a été quantifiée par des mesurages détaillés. Pour quantifier l'effet de l'abrasion sur les rendements hydrauliques, une méthode de surveillance a été développée en prenant compte de ne pas entraver l'exploitation. La surveillance des rendements sert de base pour juger la rentabilité des travaux de maintenance (meulage et revêtement sur site) et des investissements de remplacement.

1. Einleitung

Dieser Artikel bezieht sich auf die am 30. September 2015 an der Hochschule Luzern während der Tagung «Schwebstoffe, hydro-abrasiver Verschleiss und Wirkungsgradänderungen an Peltonturbinen» in Horw gehaltenen Präsentationen.

1.1 Hydro-abrasiver Verschleiss

Eine beträchtliche Anzahl hydroelektrischer Anlagen im Alpenraum und weltweit (vor allem im Himalaya und in den Anden) sind jahreszeit– aber auch ereignisabhängig mit stark schwebstoffhaltigem Wasser belastet. Die betroffenen Wasserkraftanlagen befinden sich meist unterhalb von Einzugsgebieten mit aktueller oder ehemaliger, starker Vergletscherung. Sie weisen keinen grösseren Stauraum auf, oder es werden Gebirgsbäche direkt in das Triebwassersystem eingeleitet.

Hohes Schwebstoffaufkommen wird durch Schnee- und Gletscherschmelze, Starkniederschläge *(Bild 1)* oder auch durch die Speicherbewirtschaftung (z. B. bei gezieltem Turbinieren von schwebstoffhaltigem Wasser) verursacht. Die Turbinen und Pumpen betroffener Wasserkraftanlagen sind hydro-abrasivem Verschleiss («Silt- oder Sandabrasion») ausgesetzt. Abhilfe wird teilweise mit Entsandern (z.B. *Ortmanns* 2006) und Beschichtung der Maschinenteile (z. B. *Gummer* 2009) gefunden. Die Abscheidung der kleineren Partikel (Silt und Feinsand) ist jedoch oft nicht mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand möglich. Auch bei kleinen Partikeln treten bei hohen Fliessgeschwindigkeiten und starken Umlenkungen der Strömung rasch Abrasionsschäden an wasserberührten Turbinen- oder Pumpenbauteilen auf. Dies trifft auch bei beschichteten Oberflächen *(Bild 2)* zu. Der hydro-abrasive Verschleiss ist von folgenden Faktoren abhängig (*Winkler et al.* 2011, *IEC 62364* 2013):

Partikel
- Konzentration (Suspended Sediment Concentration, SSC)
- Grösse (Particle Size Distribution, PSD)
- Form
- Härte

Turbine und Strömung
- Turbinentyp, Bauteil
- Geometrie, Strömungsmuster

- Relativgeschwindigkeit
- Härte der Beschichtung und des Grundmaterials

Gemäss Erfahrung und in der Literatur beschriebenen Berechnungsansätzen (z. B. Sulzer Hydro 1996 in DWA 2006, *Winkler et al.* 2010) nimmt der hydro-abrasive Verschleiss in Funktion der Relativgeschwindigkeit der Partikel gegenüber den bewegten Turbinenteilen stark zu (v^2 bis v^4). Bei grossen Nettofallhöhen H_N und den damit verbundenen hohen Strömungsgeschwindigkeiten bei Peltonturbinen ($v \approx [2gH_N]^{0.5}$) ist mit grösseren Abrasionsschäden zu rechnen (z. B. *Bajracharya et al.* 2008). Aufgrund des Rückgangs der Gletscher und des Permafrosts gelangen von unbewachsenen Flächen tendenziell mehr Sedimente in Fliessgewässer. Mit zusätzlichen ökologischen Bestimmungen (z. B. betreffend Stauraumspülungen) rücken die Thematik des hydro-abrasiven Verschleisses und der Umgang mit Feinsedimenten weiter in den Vordergrund.

1.2 Auswirkungen des hydro-abrasiven Verschleisses

Durch die Abrasion der Turbinenteile weicht deren Geometrie zunehmend vom ursprünglichen hydraulischen Profil ab. Dies führt zu einer Verschlechterung der Strömungsbedingungen und zu einer Wirkungsgradabnahme (*Cateni et al.* 2008). Bei unbeschichteten Peltonturbinen werden die Mittelschneiden stumpf und die Becherinnenseite wellig; die bewirkte Wirkungsgradreduktion nach einer Schwebstoffsaison kann mehrere Prozente betragen (*Strübin* und *Bussy* 1988, *Thomann* 1988). Bei beschichteten Peltonturbinen treten grosse Wirkungsgradreduktionen erst auf, wenn die Beschichtung mindestens lokal abgetragen ist und das Grundmaterial erodiert wird. Von besonderer Bedeutung für die Wirkungsgradreduktion sind die Geometrie der Mittelschneiden und der Bechereintrittskanten. Aus der Literatur (*Brekke et al.* 2002, *Maldet* 2008) ist bekannt, dass der Wirkungsgrad um einige Prozent abfallen kann, wenn die Mittelschneidenbreite einige Prozent der Becherbreite erreicht. Die Mittelschneidenbreite wird in der Praxis oft als Indikator für die Abnutzung verwendet (*Boes* 2010). Die Mittelschneidenbreite ist aber nicht die einzige relevante Grösse für die Beschreibung des Verschleisses und seiner Auswirkungen. Die Wirkungsgradreduktion kann auch mit einer Vertiefung der Becherausschnitte in Verbindung gebracht werden (*Hassler* und *Schnablegger* 2006).

Hydro-abrasiver Verschleiss kann beträchtliche Kosten für die Instandhaltung und den Ersatz von Turbinenbauteilen verursachen. Weiter können Laufradwechsel zu Produktionsausfällen führen, wenn diese während der Volllastzeit durchgeführt werden müssen. Liegt für das KW Fieschertal (64 MW, 144 GWh/a) beispielsweise eine Wirkungsgradabnahme von 1 % vor, beträgt die Minderproduktion ca. 1 GWh/a, was dem Jahresverbrauch von ca. 200 typischen Schweizer Haushalten entspricht. *Kalberer* (1988) schätzte die Produktionsverluste infolge Wirkungsgradreduktion bei Peltonanlagen im zeitlichen Mittel auf 0.5 %. Dies ergab bei einer wohl noch heute annähernd gültigen Produktionserwartung mit Peltonturbinen von 13 TWh/a in der Schweiz Produktionsverluste von 65 GWh/a.

1.3 Notwendigkeit kontinuierlicher Messmethoden

Wenn Laufräder beschichtet und in der Formgebung speziell für hohe Schwebstoffbelastung ausgelegt werden, ist meistens eine Wirkungsgradeinbusse in Kauf zu nehmen. Der Unterschied in der Wirtschaftlichkeit zwischen der verlängerten Einsatzzeit gegenüber dem Produktionsverlust infolge der Wirkungsgradeinbusse muss für jede Anlage individuell betrachtet werden. Diese Beurteilung der Wirtschaftlichkeit sollte aber nicht nur statisch vor der Errichtung einer neuen Anlage oder bei einer grösseren Revision (Laufradersatz) durchgeführt werden, sondern basierend auf Messdaten fortlaufend erfolgen.

Für ein wirksames Monitoring sind kontinuierliche Messmethoden erforderlich. Diese sollten insbesondere die Schwebstoffkonzentration und den Turbinenwirkungsgrad erfassen, welche die wichtigsten Einfluss- und Auswirkungsgrössen des hydro-abrasiven Verschleisses sind. Gemäss Laboruntersuchungen (*Sulzer Hydro* 1996 in DWA 2006, *Winkler et al.* 2011) verursachen gröbere Partikel bei gleicher Schwebstoffkonzentration (SSC) mehr Abrasion als feine Partikel. Deshalb ist zu empfehlen, bei umfassenden Monitorings ebenfalls die Partikelgrössenverteilung (PSD) zu messen. Dabei sollten Messwerte mindestens minütlich erfasst werden, da starke Schwebstoffereignisse zu raschen Anstiegen in der SSC führen können.

1.4 Ausgangslage und Forschungsprojekt

Das Problem des hydro-abrasiven Verschleisses ist qualitativ bekannt und es bestehen gewisse Berechnungsansätze zur Abschätzung des Materialabtrags an unbeschichteten Turbinenbauteilen (*Sulzer Hydro* 1996 in DWA 2006). Es sind aber praktisch keine vollständigen Prototyp-Messdatensätze bezüglich Schwebstoffbelastung, Abrasion und Wirkungsgradänderungen verfügbar. Physikalische Modellversuche zu Abrasion (*Grein* und *Krause* 1994, *Winkler et al.* 2011) tragen zur Verbesserung des Prozessverständnisses und der Grundlagenkenntnisse bei; aus Gründen der Durchführbarkeit weichen aber die Strömungsverhältnisse zum Teil stark von Prototyp-Bedingungen ab (Massstabseffekte). Es besteht also Bedarf an Messsystemen,

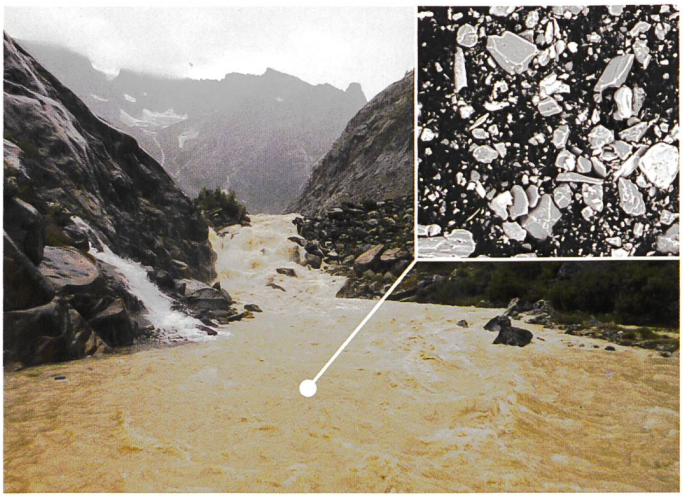

Bild 1. Stark schwebstoffhaltiger Gebirgsfluss Wysswasser am 08. August 2013 wenig oberhalb der Wasserfassung des KW Fieschertal und Mikroskopbild der Partikel (Fotos: VAW).

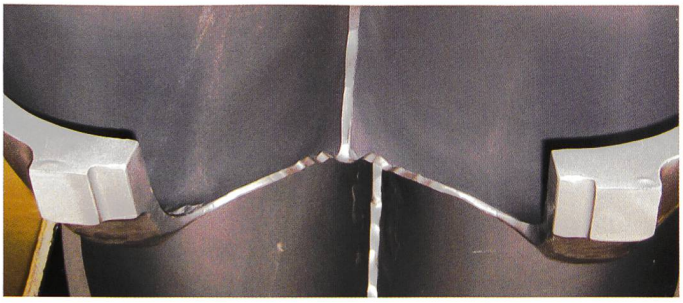

Bild 2. Hydro-abrasiver Verschleiss an Laufrädern im KW Fieschertal nach einer schwebstoffreichen Saison. Die Beschichtung wird meist zuerst auf der Mittelschneide und im Ausschnitt abgetragen (Foto: VAW).

die für den Einsatz an Wasserkraftanlagen geeignet sind, um die Schwebstoffführung des Triebwassers quantifizieren zu können. Neben dem Wunsch nach verbesserten Abrasionsmodellen besteht auch ein Interesse an verbesserten Bemessungsgrundlagen für den Anlagenentwurf und -betrieb. Diese sollten für das Sedimentmanagement und den hydro-abrasiven Verschleiss unter folgenden Gesichtspunkten optimiert werden:

- Bestimmung der Bemessungskorngrösse für Entsandungsanlagen
- Auswahl von Turbinenbeschichtungen
- Auslegung der hydraulischen Maschinen in Bezug auf die Formgebung
- Prüfung der Option des gezielten Weiterleitens von Feinsedimenten in Stauseen über den Triebwasserweg
- Abschätzung eines Grenzwertes für vorübergehende Kraftwerksabschaltungen während eines kurzzeitigen, starken Schwebstoffaufkommens

Zur Verbesserung der Kenntnisse über den hydro-abrasiven Verschleiss an Hochdruckwasserkraftanlagen und geeigneter Gegenmassnahmen haben die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich und das Kompetenzzentrum für Fluidmechanik und Hydromaschinen (CC FMHM) der Hochschule Luzern im Jahr 2011 ein Forschungsprojekt initiiert. Das Ziel des Projekts war, die Zusammenhänge zwischen Schwebstoffbelastung, Abrasion und Wirkungsgradänderungen weiter zu untersuchen. Das Projekt wurde, gemeinsam mit Industriepartnern, mit Hauptgewicht auf einer Fallstudie am KW Fieschertal durchgeführt. Im Rahmen dieses interdisziplinären Forschungsprojekts wurde unter realen Betriebsbedingungen die Schwebstoffführung des Triebwassers (SSC und PSD) mittels neuartiger Messtechnik kontinuierlich erfasst. Der Verschleiss an den Laufrädern der Peltonturbinen und die Wirkungsgradveränderungen wurden mehrfach gemessen. Der Wirkungsgrad wurde unter anderem auch kontinuierlich gemessen, um ihn der Schwebstoffführung des Triebwassers gegenüberstellen zu können.

1.5 Das Kraftwerk Fieschertal

Das KW Fieschertal (schematischer Längsschnitt in *Bild 3*) ist eine Hochdruck-Wasserkraftanlage mit Tirolerfassung am Bergbach Wysswasser, dessen Einzugsgebiet zu 57 % vergletschert ist (Stand 2009). Es ist kein Stausee vorhanden. Die Fassung wurde in den 1970er-Jahren direkt an der Zunge des Fieschergletschers gebaut. Inzwischen hat sich der Gletscher um ca. 500 m zurückgezogen, wodurch ein Gletschervorfeld entstand. Bei geringem Abfluss lagern sich Sedimente ab, welche dann bei grossem Abfluss wieder erodiert werden. Weiter fallen Sedimente in verschiedenen Korngrössen von unbewachsenen, leicht erodierbaren Hängen und vor allem von der Erosion unter dem Gletscher an. Das Wasser fliesst von der Fassung durch einen Kies- und einen Sandfang in einen 2 km langen Freispiegelstollen, der als Tagesspeicher (64 000 m^3) dient. Vom Freispiegelstollen gelangt das Triebwasser durch eine erdverlegte Druckleitung zu den zwei Maschinengruppen (MG) im Dorf Fieschertal. In der Zentrale sind zwei horizontalachsige, zweidüsige Peltonturbinen mit einer Nennleistung von je 32 MW installiert. Die Fallhöhe beträgt 509 m und der Ausbauvolumenstrom der Anlage beträgt 15 m^3/s. Im *Bild 3* sind die im Monitoring des Forschungsprojekts erfassten Informationen dargestellt. Die Farben beziehen sich auf die drei Teilbereiche des Monitorings: (i) Schwebstoffe (gelb), (ii) Verschleiss (grün) und (iii) Turbinenwirkungsgrad (rosa).

2. Messtechniken und Vorgehen

2.1 Schwebstoffmessungen

2.1.1 Gravimetrische SSC mittels Flaschenproben

Schwebstoffkonzentrationen (SSC) können am zuverlässigsten durch Wägung des getrockneten Rückstands im Labor bestimmt werden (gravimetrische Methode). Dafür sind im Feld möglichst repräsentative Proben des sedimenthaltigen Wassers zu entnehmen. Wenn Proben in regelmässigen Intervallen von beispielsweise einigen Tagen entnommen werden, werden in der Regel die SSC-Spitzen schlecht erfasst. Deshalb wurden an der Wasserfassung und in der Schieberkammer des KW Fieschertal automatische Probenehmer eingesetzt, die von Messrechnern gesteuert wurden (*Boes et al.* 2013). So konnten auch Proben zu Zeitpunkten mit erhöhter SSC gewonnen werden. Über drei Jahre wurden von 285 Flaschenproben aus der Schieberkammer die SSC gravimetrisch bestimmt. Da die gravimetrische Methode aufwendig ist und die Messresultate nicht in Echtzeit zur Verfügung stehen, sind verschiedene indirekte Methoden entwickelt worden (*Wren et al.* 2000). Im vorliegenden Forschungsprojekt wurden die folgenden fünf Methoden für das Echtzeit-Monitoring des Schwebstoffaufkommens angewendet, untersucht und weiterentwickelt.

2.1.2 SSC mittels Trübungsmessungen

Bei Trübungssonden wird die Dämpfung oder die Rückstreuung von Licht infolge der Schwebstoffe im Wasser gemessen. Viele Streulicht-Trübungssonden haben einen Messbereich von 4000 FNU (Formazine Nephelometric Unit), einige bis 9999 FNU. Trübungsmesswerte hängen von der SSC sowie der Grösse, Form und Farbe der Partikel ab (*Sutherland et al.* 2000, *Boes et al.* 2013). Die Umrechnung von Trübungsmesswerten in SSC basiert auf Korrelationen, die durch Vergleich von Trübungsmesswerten und gravimetrischen SSC ermittelt werden. Im Langzeitbetrieb sind automatische Einrichtungen für die Reinigung der Sensorenoptik erforderlich, um Messwertverfälschungen zu vermeiden und den Unterhaltsaufwand gering zu halten. Dafür können Wischer oder Druckluftreinigung eingesetzt werden.

Im Wysswasser bei der Wasserfassung des KW Fieschertal und am Ende des Entsanders wurden Eintauch-Trübungs-

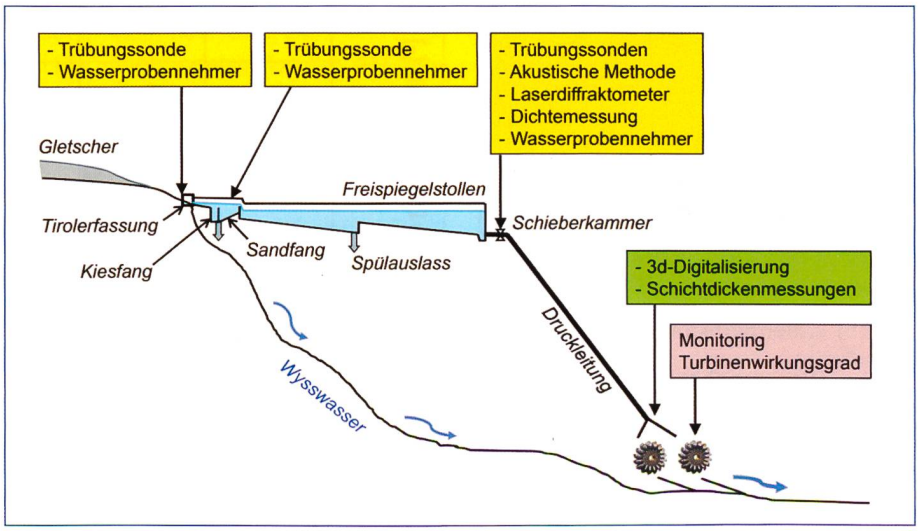

Bild 3. Schematisches Längenprofil des KW Fieschertal mit den drei Teilbereichen des Monitorings.

sonden installiert. Die Sonde im Wysswasser wurde zum Schutz vor Geschiebe und Eisstücken in einem massiven, gelochten Stahlrohr montiert. Diese Sonde hat die Aufgabe, auch aktuelle Trübungswerte zu liefern, wenn die Wasserfassung bei einem Unwetter geschlossen wird. Die Sonde im Entsander ist vor Naturgefahren besser geschützt und erhöht die Zuverlässigkeit des Schwebstoffmonitorings im Fassungsbereich (Redundanz). Von diesen Trübungssonden können hohe SSC aufgrund der Fliesszeit des Wassers im Triebwassersystem mit einer Vorwarnzeit von einer Stunde erkannt werden. In der Schieberkammer des KW Fieschertal wurden versuchsweise drei Trübungssonden an einer Probeentnahmeleitung installiert, die von der Druckleitung gespeist wird *(Bild 4)*. Bei zwei dieser Sonden wird die Trübung an der leicht unter Druck stehenden Entnahmeleitung gemessen, bei der dritten an einem frei fallenden Wasserstrahl am Austritt einer kleinen abzweigenden Leitung. Die Bauweise dieser Trübungssonde hat den Vorteil, dass keine Reinigung erforderlich ist, weil die Sensorenoptik nicht mit schwebstoffhaltigem Wasser in Kontakt kommt.

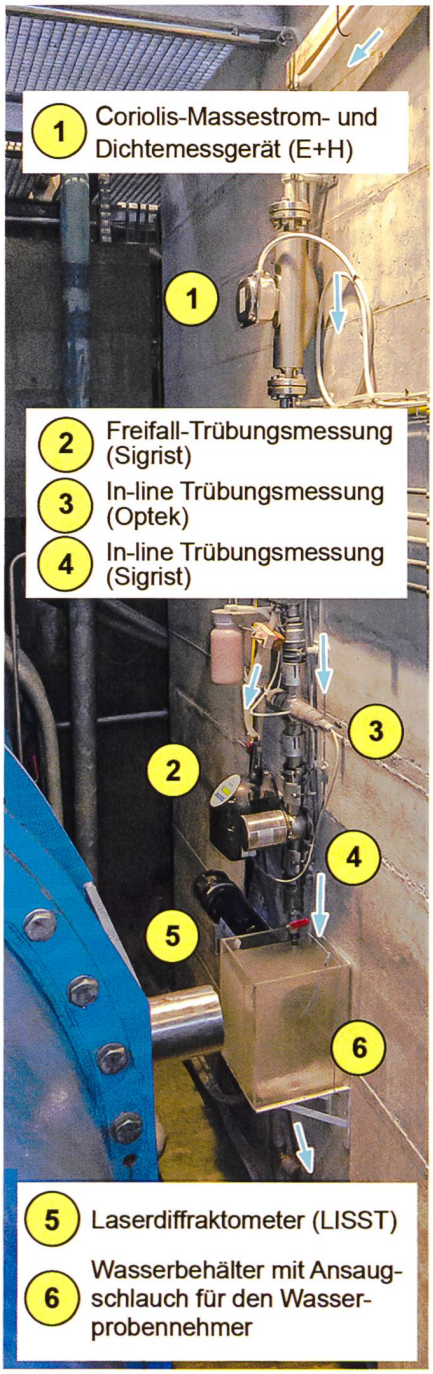

Bild 4. Schwebstoffmessgeräte in der Schieberkammer des KW Fieschertal (Foto: VAW).

2.1.3 SSC mittels akustischer Methode

Akustische Signale im Ultraschallbereich können auf verschiedene Arten für das Schwebstoffmonitoring genutzt werden (Stichworte: forward und/oder backscatter sowie multi-frequency). In diesem Projekt wurde eine akustische Methode eingesetzt, mit der das Schwebstoffaufkommen in einer Druckleitung ohne zusätzliche Sensoren überwacht werden kann, da unterstrom der Schieberkammer eine akustische Durchflussmessung (ADM) installiert ist (vier Pfade, $d_i = 1.95$ m, 1 MHz). Bei einer ADM werden Ultraschallpulse von einer Rohrwand zur anderen gesendet. Wenn das Wasser Schwebstoffe enthält, wird das empfangene Signal abgeschwächt. Das Ausmass dieser Dämpfung hängt – ähnlich wie bei Trübungsmessungen – von der SSC und der Partikelsorte ab *(Bild 5)*. Dies wurde vor den Messungen im KW Fieschertal mittels Versuchen im hydraulischen Labor an der Hochschule Luzern in Horw untersucht (*Costa et al.* 2012, *Boes et al.* 2013). Die im KW Fieschertal gemessenen Dämpfungen wurden wie bei den Trübungssonden mit den gravimetrischen SSC korreliert. Im Bereich höherer SSC wurden für die Korrelation auch Daten der im Folgenden erläuterten CMD- und der Druckmessmethode beigezogen. So wurden die über die Zeit gemittelten Eigenschaften der am Einsatzort vorhandenen Partikel berücksichtigt. Um die ADM für das Schwebstoffmonitoring nutzen zu können, war es mit dem verwendeten Modell (Rittmeyer Risonic) lediglich erforderlich, die Amplituden der empfangenen Ultraschallpulse auf dem Gerät als zusätzliche digitale Ausgangssignale zu definieren und diese dem Messcomputer zuzuführen.

2.1.4 SSC mittels Dichtemessung mit Coriolis-Messgerät

Die SSC kann auch mit einem Coriolis Massestrom- und Dichtemessgerät (CMD) indirekt gemessen werden (*Bishwakarma* und *Støle* 2008). Ein solches Gerät wurde ebenfalls in die Probenahmeleitung eingebaut *(Bild 4)*. Im verwendeten Gerät sind zwei parallele, gebogene Rohre vorhanden, die elektronisch gesteuert, zu feinen Schwingungen angeregt werden. In einem CMD wird der Coriolis-Effekt genutzt, um den Massestrom zu bestimmen. Die Dichte der Flüssigkeit wird über die Veränderung der Eigenfrequenz der durchflossenen Rohrbögen bestimmt. Gemäss Spezifikation des verwendeten CMDs kann die Dichte auf 0.5 g/l genau gemessen werden. Für die Umrechnung von der gemessenen Gemischdichte auf die SSC müssen die Dichte des Klarwassers und die Dichte des Partikelmaterials bekannt sein.

Die Dichte des Klarwassers wurde aufgrund von Literaturwerten und der Wassertemperatur, die ebenfalls im CMD gemessen wird, berechnet. Die Dichte des Partikelmaterials wurde im Labor des Geo-

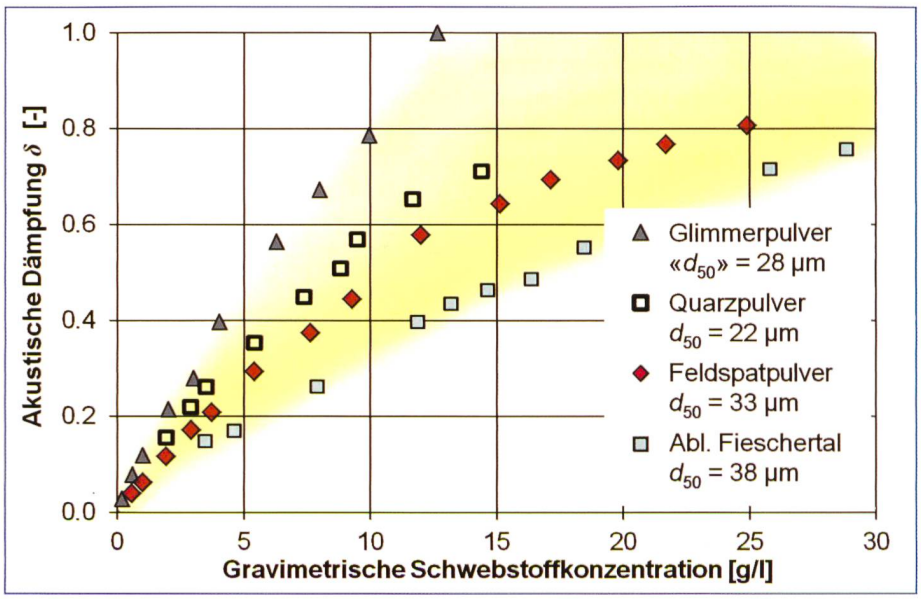

Bild 5. Dämpfung der Ultraschallsignale in Abhängigkeit der SSC für verschiedene Partikelsorten mit unterschiedlichen mittleren Durchmessern.

technischen Instituts der ETH Zürich an einigen getrockneten Proben mit einem Pyknometer bestimmt (ρ_s= 2730 kg/m^3) und als konstant angenommen. Bei der Berechnung der SSC wurde weiter ein periodischer Dichteabgleich berücksichtigt (< 0.6 g/l). Der Dichteabgleich trägt unter anderem der Konzentration gelöster Stoffe Rechnung und kompensiert die saisonal aufgetretene leichte Biofilmbildung in den Messrohren.

2.1.5 SSC und PSD mittels Laserdiffraktometrie

Laserdiffraktometer werden seit einigen Jahrzehnten in Labors für die Messung von Partikelgrössenverteilungen (PSD) verwendet. Seit dem Jahr 2000 sind auch tragbare bzw. eintauchbare Geräte für Messungen vor Ort unter dem Namen «Laser in-situ Scattering and Transmissiometry» (LISST) erhältlich (*Agrawal* und *Pottsmith* 2000), mit welchen sowohl die PSD als auch die Konzentration gemessen werden können. In LISST-Geräten werden die Streuung bzw. Beugung (diffraction) und die Dämpfung von Laserlicht gemessen, die von den Partikeln verursacht werden. Mit der mitgelieferten Software werden die Volumenkonzentration der Partikel in 32 logarithmisch verteilten Grössenklassen (nominal von 2 bis 380 µm) berechnet (*Agrawal et al.* 2008). Daraus können die PSD und die totale Volumenkonzentration ermittelt werden. Die Volumenkonzentrationen wurden mit den Laborresultaten der Flaschenproben auf Massekonzentrationen (SSC) umgerechnet. Mit diesem Vorgehen werden Effekte der Partikelform und allfälliger Flockenbildung auf die SSC berücksichtigt (*Felix et al.* 2013b). Mit LISST können also die SSC und die PSD im Minutentakt vor Ort gemessen werden. In früheren Studien wurden PSD-Messungen aus Kostengründen nur an wenigen Flaschenproben im Labor durchgeführt. Im Gegensatz zu Trübungssonden und der erwähnten akustischen Methode werden beim LISST die aktuellen Partikelgrössen für die Berechnung der SSC berücksichtigt.

In der Schieberkammer des KW Fieschertal wurde ein vielseitig einsetzbares, wasserdichtes LISST-Modell (LISST-100X) verwendet. Bei diesem Modell wird der Laserstrahl standardmässig auf einer Strecke von 50 mm durch die Wasserprobe gesendet. Um den Bereich messbarer SSC zu erhöhen, wurde die optische Pfadlänge durch Einsetzen des stärksten erhältlichen Pfadreduktionsmoduls (Glaskörper) auf 5 mm reduziert. Das LISST-Gerät wurde in der Schieberkammer des KW Fieschertal so montiert, dass dessen Messkopf seitwärts in einen spülbaren Behälter mit Überlauf ragte *(Bild 4)*. Der optische Pfad des Geräts befand sich unmittelbar unter dem Auslauf der Probenahmeleitung.

2.1.6 SSC mittels Druckmessungen

Eine weitere Möglichkeit für die Überwachung der SSC im Triebwasser von Hoch- und Mitteldruckwasserkraftanlagen besteht in der Auswertung von statischen Druckmessungen. Wenn das Triebwasser viel Schwebstoffe enthält, sind die Gemischdichte und somit der Druck am unteren Ende der Druckleitung grösser als bei Klarwasserverhältnissen. Am KW Fieschertal werden u. a. der Oberwasserpegel, der Volumenstrom in der Druckleitung und die Drücke jeweils vor den Turbinen gemessen. Aus den Messdaten in stationären Klarwasserverhältnissen konnten die Druckverluste zwischen dem Oberwasserpegel und den Druckmessstellen in der Zentrale für verschiedene Betriebszustände in Funktion des Volumenstroms berechnet werden. Mit diesen Kennlinien sowie mit aktuellen Druck-, Pegel- und Volumenstromdaten konnte die Dichte des schwebstoffhaltigen Wassers in der Druckleitung in stationären Zuständen berechnet werden. Schliesslich wurde von der Gemischdichte, wie im Abschnitt 2.1.4 erwähnt, auf die SSC umgerechnet. Die mit dieser Methode ermittelte SSC bezieht sich im Gegensatz zu den anderen Methoden nicht auf eine Punkt- oder Querschnittsmessung, sondern auf den ganzen Inhalt der Druckleitung. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass höhere SSC ohne zusätzliche Sensoren gemessen werden können. Ein Nachteil ist, dass keine Vorwarnzeit für allfällige Turbinenabschaltungen vorhanden ist.

Zu den Schwebstoffmessungen ist generell anzumerken, dass die Messunsicherheiten im Vergleich zu anderen Fachgebieten relativ hoch sind. Bei in-situ SSC- und PSD-Messungen gelten derzeit Messunsicherheiten von ± 20 % als realistisch.

2.2 Verschleissmessungen

Die Abrasion an den Bechern der Peltonlaufräder des KW Fieschertal wurde mit den folgenden zwei Methoden im Turbinengehäuse gemessen:

2.2.1 Beschichtungsdicke

Die lokalen Beschichtungsdicken wurden mit einem Schichtdickenmessgerät und Schablonen *(Bild 6)* gemessen. Letztere dienten zur Definition der Lage der Messpunkte innerhalb des Bechers und zum Wiederauffinden der Punkte bei Folgemessungen. Das Schichtdickenmessgerät (Deltascope FMP30 der Helmut Fischer AG mit Zweipolsonde V7FKB4) beruht auf dem Prinzip der magnetischen Induktion und wurde in Bezug auf das vorhandene Grundmaterial wie folgt kalibriert: An einer unbeschichteten, möglichst ebenen und glatten Stelle eines Bechers wurde der Nullpunkt eingestellt. Dann wurde eine Kunststofffolie bekannter Dicke aufgelegt und der zweite Kalibrierpunkt gemessen. Die Abnutzung der Sondenpole wurde kompensiert.

Für die rechte und die linke Becherhälfte wurden je eine Schablone aus Pappmaché durch Abformen an einem Becher erstellt. Beim wiederholten Einsetzen der Schablonen in die Becher der verschiedenen Laufräder mit unterschiedlicher Revisionsgeschichte wurde beobachtet, dass die Lage der Messpunkte auf ca. ±5 mm genau definiert ist. In jeder Messkampagne wurde die Schichtdicke an jedem Messpunkt n = 10 Mal gemessen. Die erweiterte Messunsicherheit (95 %-Vertrauensintervall) des Mittelwerts von n = 10 Schichtdickenmessungen an einem Messpunkt betrug bei der Hälfte der Messungen weniger als 2.5 µm und bei allen als gültig eingestuften Messwerten weniger als 5 µm. Bei einer nominalen Beschichtungsdicke von 300 µm entspricht dies einer relativen Abweichung von 0.8 % bzw. 1.6 %. Aufgrund der Auswertungen wurde weiter abgeschätzt, dass die Reproduzierbarkeit einer über einen Becher gemittelten Schichtdickendifferenz besser als ±5 µm ist.

2.2.2 3D-Digitalisierung

Für die wiederholte Vermessung der aktuellen Geometrie der durch Abrasion beanspruchten Becher wurde ein optischer 3D-Scanner (Comet L3D 5M von Steinbichler bzw. Carl Zeiss Optotechnik) im Turbinen-

Bild 6. Anwendung einer Schablone für die Messung der Schichtdicken in einem Peltonbecher in der Zentrale des KW Fieschertal (Foto: VAW).

gehäuse eingesetzt. Das Messsystem hat eine Auflösung von 5 Mio. Punkten pro Aufnahme. Mit einem Messvolumen von 480 × 400 × 250 mm beträgt der Abstand der Messpunkte auf der Objektoberfläche im Mittel 190 µm. Das System basiert auf den Methoden der Streifenlichtprojektion und der räumlichen Triangulation. Der Projektor und die Kamera sind in einem Gerät kombiniert, das auf einem Stativ frei platziert wird *(Bild 7)*. Das Messsystem wurde im Werk kalibriert. Die Abweichungen zum Soll und zwischen zwei Validierungsmessungen betrugen lediglich ca. 10 µm; Abweichungen bis 40 µm werden vom Hersteller als zulässig erachtet. Nach dem Transport des optischen Messsystems zur Kraftwerksanlage wurde jeweils die Kalibrierung des Messsystems mit einer Referenzplatte überprüft.

Zur Reduktion von Lichtspiegelungen wurden die zu vermessenden Becher vor dem Digitalisieren mit einer weissen Substanz eingesprüht (Entwicklerspray). Dann wurden Markierpunkte, die zum Zusammenfügen mehrerer Einzelaufnahmen dienen, in einem unregelmässigen Muster aufgeklebt. Aufgrund der gegebenen geometrischen Verhältnisse (Sichteinschränkungen durch benachbarte Becher bzw. durch Becherrand und Mittelschneide) und der Grösse der Peltonbecher im vorliegenden Fall (Becherbreite ≈ 65 cm) kann ein Becher nicht mit einer einzelnen Aufnahme vermessen werden, sondern es sind pro Becher ca. 75 Aufnahmen aus verschiedenen Blickwinkeln und geeigneter Distanz erforderlich. Die Einzelaufnahmen werden mithilfe der Markierpunkte und aufgrund der Oberflächengeometrie zu einem Gesamtmodell zusammengefügt (sogenanntes Matching). Es wurde ein Vorgehen entwickelt, mit welchem die Teilaufnahmen, beginnend von der Becheraussenseite, möglichst gut zusammengefügt werden können.

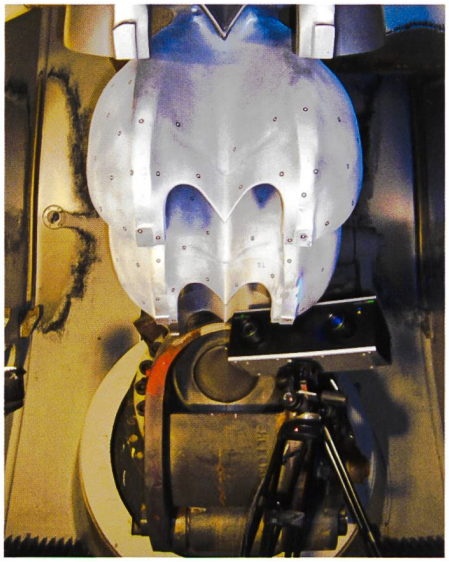

Bild 7. 3D-Digitalisierung im Turbinengehäuse des KW Fieschertal. Das optische Messgerät ist auf einem fahrbaren Stativ aufgebaut (Foto: HSLU).

Die konsolidierten geometrischen Modelle der Oberflächengeometrien (3D-Punktewolken) wurden nachträglich auf dem Bildschirm an Referenzflächen ausgerichtet, um die zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen Geometriemodelle zu vergleichen. Als Referenzflächen wurden der Becherrand und die seitlichen Partien der Becherausschnitte verwendet, da diese eben und nicht von hydro-abrasivem Verschleiss betroffen sind. Aus den 3D-Modellen wurden diverse Schnitte erzeugt, in welchen unter anderem die Mittelschneidenbreite bestimmt wurde. Um diese Breite auch bei gerundeten oder unregelmässig abgetragenen Mittelschneiden zu bestimmen, wurden die Tangentensteigungen an den Schneidenseiten bestimmt. Durch den Vergleich der geometrischen Modelle beziehungsweise der Schnitte, die zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen worden waren, wurden folgende Grössen bestimmt (*Abgottspon et al.* 2013):

- Abnahme der Mittelschneidenhöhe
- Zunahme der Mittelschneidenbreite
- Zunahme der Becherausschnittstiefe
- Volumenabnahme an den Mittelschneiden
- Volumenabnahme im Bereich der Becherausschnitte

Die Volumenunterschiede wurden mit einer Dichte von 7.7 g/cm^3 für das übliche Turbinengrundmaterial in einen Masseverlust umgerechnet. Die Reproduzierbarkeit der ermittelten geometrischen Differenzen wurde untersucht, indem jeweils zwei Geometriemodelle, die in Perioden mit vernachlässigbarer Schwebstoffbelastung aufgenommen worden waren, verglichen wurden. Die Abweichungen betrugen oft weniger als ±0.3 mm, in einem Fall bis ±0.7 mm auf der Innenseite einer Becheraussenwand. Es wurde festgestellt, dass in diesem Bereich und im Bechergrund die Messunsicherheit grösser ist als an den übrigen Partien des Bechers, vermutlich wegen ungünstigeren Bedingungen bei den Aufnahmen (Sichtverhältnisse) und beim Zusammenfügen der Aufnahmen (Anschlusspunkte und Überlappungsflächen). In der vorliegenden Anwendung ist die Geometrie im Bereich der Mittelschneiden und der Bechereintrittskanten relevant. In diesen Bereichen eines Peltonbechers in der untersuchten Grösse wird die Reproduzierbarkeit auf ±0.2 mm geschätzt. Bei einer Abtragstiefe von beispielsweise 1 mm beträgt der relative Fehler 20 %. Für kleinere Peltonbecher oder Teilbereiche von grösseren Bechern, die mit einer oder wenigen Einzelaufnahmen erfasst werden können, ist die Messunsicherheit geringer und dürfte gegen ±0.01 bis ±0.04 mm tendieren.

2.3 Wirkungsgradmonitoring

Um die Änderungen der Wirkungsgrade der beiden Turbinen im Lauf der Zeit zu bestimmen, wurden einerseits regelmässig Indexwirkungsgradmessungen mit dem sog. Sliding-Needle-Verfahren durchgeführt und andererseits eine Auswertemethode für ein kontinuierliches Wirkungsgradmonitoring entwickelt.

2.3.1 Sliding-Needle-Messungen

Mit Indexwirkungsgradmessungen werden Vergleichsmessungen durchgeführt. Diese dienen dazu, Wirkungsgradunterschiede zwischen zwei Messkampagnen quantitativ zu bestimmen. Die absoluten Wirkungsgradunterschiede werden bezüglich einer gleichbleibenden Referenzmessung ausgewiesen. Die periodisch wiederholte Bestimmung von Indexwirkungsgraden erlaubt, den Wirkungsgradverlauf einer Turbine über die Zeit zu überwachen (Wirkungsgradhistorie). Für Indexwirkungsgradmessungen sind langzeitstabile Messwertaufnehmer erforderlich, und die Messung des Volumenstromes ist von zentraler Bedeutung. Dabei ist nicht die Messunsicherheit, sondern die Reproduzierbarkeit relevant. Akustische oder magnetisch-induktive Volumenstrommessungen sind besonders geeignet, da das anspruchsvolle Spülen von Druckaufnehmern, beispielsweise bei Venturi-Messungen, nicht erforderlich ist.

Das Sliding-Needle-Verfahren erlaubt, während möglichst kurzer Zeit (etwa 1 Stunde) den Wirkungsgrad einer Peltonturbine über ihren relevanten Betriebsbereich aufzunehmen. Bei Francis- und Kaplanturbinen wird das entsprechende Messverfahren als Sliding Gate bezeichnet; es wurde erstmals von *Almquist et al.* (1995) erwähnt. Eine Übersicht zu diesem Messverfahren ist in *Abgottspon* und *Staubli* (2008) aufgeführt. Grundsätzlich wird das Stellorgan (Düse oder Leitapparat) bei quasi-stationären Bedingungen kontinuierlich geöffnet und wieder geschlossen *(Bild 8)*. Es werden alle Messgrössen, die für die Wirkungsgradberechnung relevant sind, mit einer Abtastrate von 1 Hz gespeichert. Klassische Indexwirkungsgradmessungen beinhalten im Gegensatz zu den Sliding-Needle- oder -Gate-Messungen eine Reihe von Messpunkten von Teil- bis Überlast, während deren Erfassung die Betriebsbedingungen konstant gehalten werden. Aus den während einer Sliding-Needle-Messung aufgezeichneten

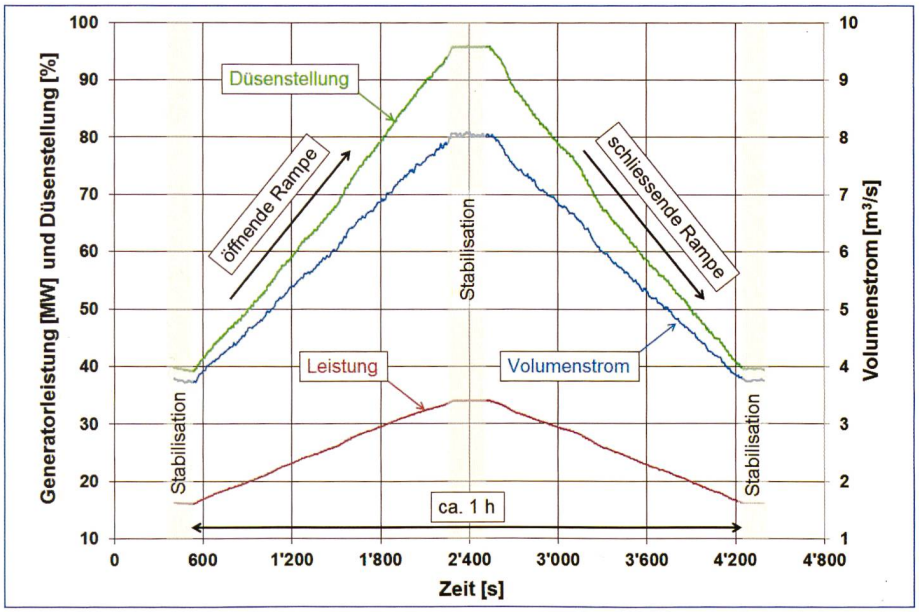

Bild 8. Ganglinien einiger aufgezeichneter Signale während eines Sliding-Needle-Tests.

Daten kann der Wirkungsgrad in Funktion der Leistung berechnet werden. Für jedes Messdatum wurde daraus ein gewichteter Indexwirkungsgrad berechnet und die gewichteten Indexwirkungsgrade in Funktion der Zeit aufgetragen (Wirkungsgradhistorie).

2.3.2 Kontinuierliches Wirkungsgrad-monitoring

Für einen optimierten Betrieb einer stark von hydro-abrasivem Verschleiss betroffenen Anlage ist es wichtig, den Verlauf der Wirkungsgradreduktion mit einer guten zeitlichen Auflösung zu kennen. Obwohl das Sliding-Needle- bzw. -Gate-Messverfahren darauf optimiert wurde, den normalen Anlagenbetrieb möglichst wenig zu beeinträchtigen (Messdauer etwa 1 Stunde), ist es insbesondere in der Volllastzeit in der Praxis oft nicht gut möglich, z. B. monatliche Indexwirkungsgradmessungen durchzuführen. Daher wurde eine Methode für ein kontinuierliches Wirkungsgradmonitoring entwickelt, welche Daten mit einer hohen zeitlichen Auflösung liefert. Dafür werden die Messdaten idealerweise direkt von den Signalwandlern mit einer Abtastrate von 1 Hz von einem Messrechner gespeichert. Zu jedem Zeitpunkt wird ein Indexwirkungsgrad und bei der Tagesauswertung eine gewichtete Wirkungsgraddifferenz zu einer gleichbleibenden Referenzkurve berechnet. Die Wirkungsgraddifferenzen werden dann in der Wirkungsgradhistorie dargestellt. Beim jetzigen Entwicklungstand der Methode ist es möglich, den Indexwirkungsgrad im Einmaschinenbetrieb auszuwerten. Der Grund hierfür liegt darin, dass beim KW Fieschertal die zuverlässigste Volumenstrommessung in der Druckleitung, oberhalb der Aufteilung auf die einzelnen Turbinen, installiert ist. Im Zweimaschinenbetrieb kann die Aufteilung des Volumenstroms auf die einzelnen MG nicht genügend genau berechnet werden (erforderliche Unsicherheit kleiner 0.2 %).

Das kontinuierliche Wirkungsgradmonitoring erfordert anspruchsvolle Signalverarbeitung und Plausibilitätsüberprüfungen zwischen den Signalen in Echtzeit. Um die Messwerte und die Langzeitstabilität der Messwertaufnehmer zu kontrollieren, wurde ein System von Kontrollen, ähnlich eines Expertensystems, aufgebaut. Dabei werden unter anderem die vor den Turbinen gemessenen Drücke mit der Oberwasserpegelmessung unter Berücksichtigung der hydraulischen Verluste in der Triebwasserleitung verglichen. Weiter werden z. B. die Volumenstrommessungen am oberen und am unteren Ende der Druckleitung miteinander verglichen und die Abweichungen ebenfalls kontinuierlich analysiert.

3. Resultate der Schwebstoffmessungen

3.1 Allgemeine Partikeleigenschaften

Wie erwähnt, beträgt die Dichte des Partikelmaterials im Triebwasser des KW Fieschertal im Mittel 2730 kg/m^3. Gemäss weiteren Laboruntersuchungen an einigen getrockneten Proben mit der Rietveld-Röntgenbeugungsanalyse besteht die Partikelmasse zu 65–80 % aus Mineralien mit einer Mohshärte ≥ 6 (Quarz, Feldspat und Epidot), welche mindestens so hart sind wie das Turbinengrundmaterial. Der Rest sind weichere Mineralien (Mohshärte ≤ 3), vorwiegend Glimmer (Muskovit und Biotit). Die mineralogische Zusammensetzung der Partikel in Fieschertal ist mit anderen Anlagen im Wallis vergleichbar (vgl. *Ortmanns* 2006). Gemäss Mikroskopbildern *(Bild 1)* sind die Partikel vorwiegend kantig, einige sind plättchenförmig (Glimmer).

3.2 Verhalten der Schwebstoffmessgeräte allgemein

Die mit den verschiedenen Methoden ermittelten SSC-Ganglinien wurden miteinander verglichen, um Erkenntnisse über das Verhalten der Messgeräte unter verschiedenen Bedingungen zu gewinnen. In *Bild 9* ist ein Ausschnitt der Ganglinien während zweieinhalb Sommertagen dargestellt. Weiter ist der Medianpartikeldurchmesser d_{50} dargestellt, d. h. der Durchmesser, der von 50 % der Partikelmasse nicht überschritten wird.

Meist lagen die SSC unter 2 g/l, die Partikel waren relativ klein ($d_{50} \approx 15$ µm) und die verschiedenen Messmethoden lieferten ähnliche SSC. In Perioden mit höheren SSC wurden tendenziell gröbere Partikel transportiert. Es wurde jedoch nur eine geringe Korrelation zwischen SSC und PSD festgestellt (*Felix et al.* 2013a). Dies kann von dynamischen Prozessen wie dem Abflussgeschehen im Einzugsgebiet und unter dem Gletscher herrühren. Weiter variiert die Strömung im Speicherstollen, weshalb es Änderungen der PSD infolge Absetzen und Resuspension von Schwebstoffpartikeln gibt. In Perioden höherer SSC wichen die SSC der verschiedenen Messmethoden bei einigen Ereignissen deutlich voneinander ab. Die SSC der CMD-Methode stimmte auch bei mehreren g/l gut mit den gravimetrischen Referenz-SSC überein; ähnlich wie die SSC des LISST (sofern vorhanden). Die Trübungssonden und die verwendete akustische Methode unterschätzten im Schwebstofftransportereignis von *Bild 9* die SSC, weil gröbere Partikel vorhanden waren als bei dieser SCC im zeitlichen Mittel üblich. Wie in den Abschnitten 2.1.2 und 2.1.3 erwähnt sowie in den *Bildern 5* und *10* ersichtlich, werden die SSCs von Trübungssonden und der akustische Methode von Veränderungen der Partikelgrösse beeinflusst. In Ereignissen, in denen die Partikelgrösse nicht mit der SSC korreliert, weisen diese beiden Methoden eine erhöhte Messunsicherheit auf. Umgekehrt kann die Tatsache, dass SSC von Trübungsmessungen und der akustischen Methode von der Partikelgrösse abhängen, in Kombination mit einem CMD genutzt werden, um ohne permanenten Einsatz eines LISST mittlere Grössen von aktuell vorhandenen Partikeln zu ermitteln.

Das LISST ermöglichte, SSC bis zu einigen g/l von vorwiegend Grobsilt (20–63 µm) zu messen; bei höheren SSC war das Wasser zu trübe. Die obere Grenze des SSC-Messbereichs hängt stark von der Partikelgrösse und der Partikelform ab. Die Messbereichsgrenze liegt tiefer, wenn feine und deutlich nicht kugelförmige Partikel vorhanden sind. Es gibt LISST-Modelle, die dank automatischer Verdünnung mit Klarwasser in einer Mischkammer gemäss Hersteller bis zu 10-mal höhere SSC messen können. Ein solches Gerät war jedoch im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts nicht erschwinglich.

Mit einem CMD kann der Messbereich höherer SSC relativ kostengünstig abgedeckt werden, wobei keine PSD-Informationen vorliegen. Für die CMD-Methode mit dem periodischen Dichteabgleich wurde aus den Messungen eine erweiterte Messunsicherheit von ±0.3 g/l ermittelt. Die CMD-Methode wird für SSC über 1 g/l als geeignet angesehen (relativer Fehler ≤ 30 %). Die Auswertungen zeigten weiter, dass die akustische Methode für SSC über ca. 0.5 g/l geeignet ist, die Druckmethode für SSC über ca. 2 g/l. Mit optischen Messtechniken wie LISST und Trübungssonden können auch tiefe SSC gemessen werden, die aber bezüglich hydro-abrasivem Verschleiss weniger relevant sind.

3.3 Verhalten der Schwebstoffmessgeräte bei Hochwasser

Anfang Juli 2012 trat das grösste Hochwasserereignis in den drei Messjahren 2012–2014 auf. Dabei wurden auch am meisten Schwebstoffe transportiert. Das Ereignis gab Aufschluss über das Verhalten der Schwebstoffmessgeräte bei ausserordentlich hohen SSC. Da das CMD während dieses Hochwassers noch nicht installiert und hohe SSC mit den optischen und akustischen Messgeräten nicht durchgehend messbar waren, wurde die SSC-Ganglinie während des Hochwassers mit der Druckmethode berechnet. Beide Turbinen wurden während des Ereignisses durchgehend mit dem Ausbauvolumenstrom betrieben, und der Oberwasserpegel entsprach dem maximalen Betriebsspiegel. Gemäss zwei unabhängigen Druckmessungen (eine an jeder MG) war der Druck vor den Turbinen vorübergehend um bis zu 3.5 % grösser als vor und nach dem Hochwasserereignis. Auch die elektrische Leistung nahm während des Hochwassers im selben Ausmass zu. Daraus wurde geschlossen, dass die Dichte des schwebstoffhaltigen Wassers in der Druckleitung vorübergehend auf ca. 1035 kg/m^3 angestiegen sein musste. Dies entspricht einem SSC-Spitzenwert von ca. 50 g/l. Die berechnete SSC-Ganglinie während des Hochwasserereignisses ist in *Bild 22* dargestellt. Die Grössenordnung von 50 g/l wurde weiter durch eine Flaschenprobe aus der Schieberkammer sowie mehrere Imhoff-Trichtermessungen mit schwebstoffhaltigem Wasser aus dem Unterwasserkanal bestätigt.

Die akustische Signaldämpfung während des Hochwassers wurde mit der SSC auf Grundlage der Druckmethode verglichen. Dabei zeigte sich, dass die akustische Methode bis gut 15 g/l funktionierte. Bei höheren SSC wurde das Signal im schwebstoffhaltigen Wasser so stark gedämpft, dass es den Empfänger an der gegenüberliegenden Wand der Druckleitung nicht mehr erreichte. Die ermittelte Messbereichsgrenze von ca. 15 g/l ist kein allgemeingültiger Wert, sondern hängt u.a. von der Partikelgrösse, der Schallfrequenz, der Stärke und Art des gesendeten Signals sowie der Pfadlänge (Leitungsdurchmesser) ab.

Während des Hochwassers überstieg die Trübung während mehrerer Stunden den Messbereich des Streulicht-Trübungsmessgeräts (4000 FNU). Gemäss Druckmethode entsprach dies mit den bei diesem Ereignis vorhandenen Partikeln (d_{50} ≈ 20 µm) einer SSC-Messbereichsgrenze von ca. 6 g/l. Mit dem Durchlicht-Trübungsmessgerät (Optek) konnte eine durchgehende Trübungsganglinie aufgezeichnet werden. Durch Vergleich mit der Druckmethode wurde festgestellt, dass das Signal dieses Trübungsmessgeräts über ca. 5 g/l nicht mehr linear mit der SSC zunahm. Vom LISST waren keine Messdaten verfügbar, weil der Messbehälter mit Feinsand gefüllt wurde und das verwendete LISST für Messungen von SSC über einigen g/l nicht geeignet ist.

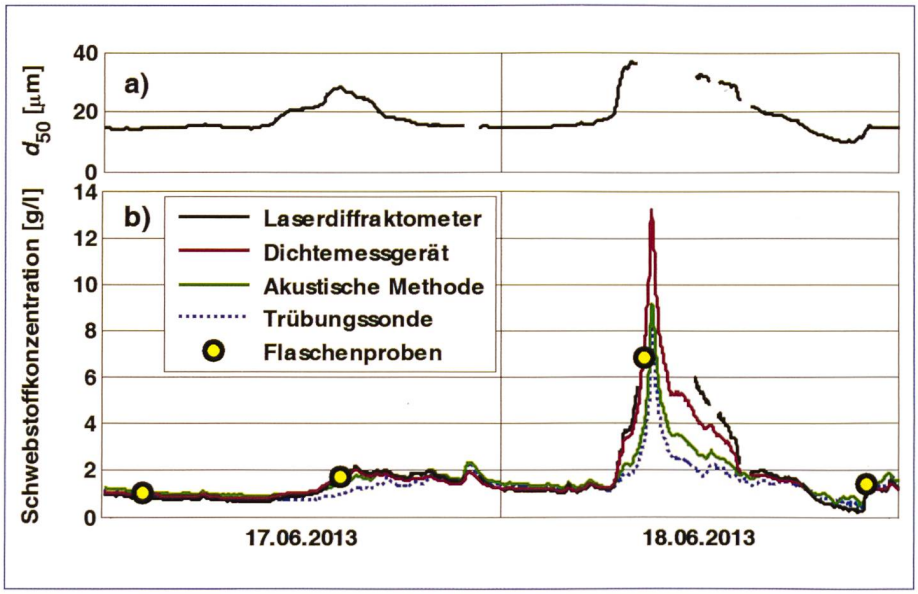

Bild 9. Ausschnitte aus den Ganglinien der a) Medianpartikelgrösse und b) SSC von verschiedenen Messmethoden im Triebwasser des KW Fieschertal.

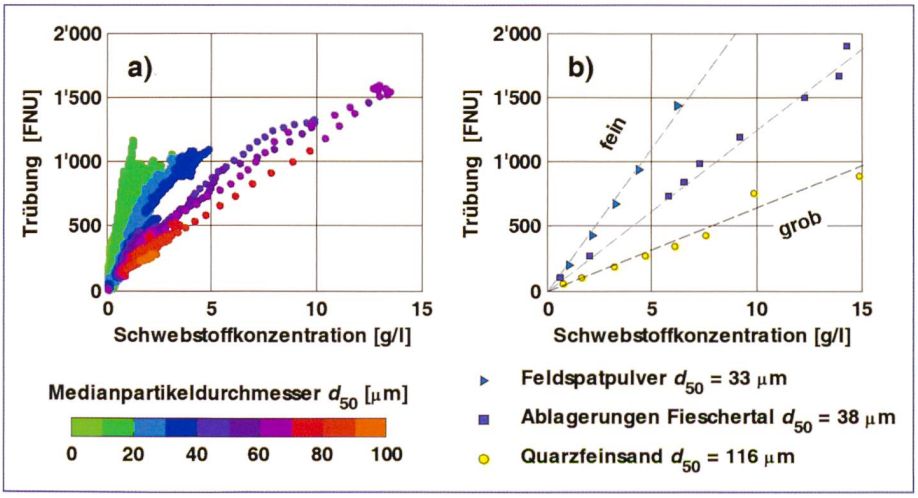

Bild 10 a.) Trübungswerte in Funktion der SSC im Triebwasser des KW Fieschertal, wobei die Farben die Partikelgrössen angeben, und b) entsprechende Messdaten von den Laborversuchen mit verschiedenen Partikelsorten.

3.4 Schwebstoffkonzentrationen und -frachten

Aus den SSC-Ganglinien der verschiedenen Messmethoden wurde eine durchgehende Ganglinie zusammengestellt. Bei SSC über 1 g/l wurde dem Messwert der Dichtemessmethode der Vorzug gegeben. Bei kleineren SSC wurden Messwerte des Laserdiffraktometers verwendet, und falls keine solchen vorhanden waren, wurden Messwerte von Trübungssonden und der akustischen Methode verwendet.

In *Bild 11* sind die SSC-Ganglinien für die Jahre 2012–2014 dargestellt. Im Mittel über die drei Jahre betrug die SSC 0.52 g/l. In der Schwebstoffsaison (ca. April bis Oktober) erreichte die SSC oft mehrere g/l, einige Male überschritt sie 10 g/l und während des Hochwasserereignisses Anfang Juli 2012 erreichte sie wie erwähnt 50 g/l. Aufgrund von Abflussmessungen in der Region wurde die Wiederkehrperiode dieses Hochwasserereignisses auf ca. 20 Jahre geschätzt.

Aus den Zeitreihen der SSC und des Volumenstroms in der Druckleitung wurde die Schwebstofftransportrate in jeder Minute berechnet und über die Zeit integriert. Die Schwebstofffracht in der Druckleitung im Laufe der drei untersuchten Jahre ist ebenfalls in *Bild 11* dargestellt. Die jährlichen Schwebstofffrachten (107 000, 61 000 und 43 000 t) variieren deutlich stärker als die Volumina des turbinierten Wassers (143, 130 und 128 Mio. m^3). Das heisst, die Unterschiede in den jährlichen Schwebstofffrachten kamen vorwiegend durch Variation der SSC zustande (SSC-Jahresmittel = 0.75, 0.47 und 0.34 g/l).

Die Schwebstofffracht in der Druckleitung von 61 000 t im Jahr 2013 beispielsweise entspricht, umgerechnet auf die Einzugsgebietsfläche (58 km^2), einem Abtrag von 0.4 mm pro Jahr. Gemäss *Wittmann et al.* (2007) beträgt die langfristige Denudationsrate in den kristallinen Schweizer Zentralalpen 0.9 ± 0.3 mm/a. Die Differenz kann damit erklärt werden, dass nicht das gesamte im Einzugsgebiet erodierte Sediment durch die Druckleitung transportiert wird. Dazu zählen Sedimente in Entkieser-, Entsander- und Stollenspülungen, der Sedimenttransport im nicht gefassten Wasser sowie Ablagerungen in einem neuen kleinen proglazialen See oberhalb der Wasserfassung.

In Bezug auf die Turbinenabrasion sind Phasen, in welchen die Schwebstofffracht in relativ kurzer Zeit stark zunimmt, von besonderem Interesse. Steile Abschnitte der Kurven in *Bild 11* stellen Schwebstofftransport-Ereignisse dar. Das relativ hohe Schwebstoffaufkommen im Frühsommer wird folgendem Vorgang im Einzugsgebiet zugeschrieben: Auch im Winterhalbjahr wird unter dem Gletscher Fels erodiert. Bei Beginn der Gletscherschmelze im Frühsommer werden die entstandenen Feinsedimentpartikel vermehrt abtransportiert und gelangen ins Triebwasser. Die Kurve der Schwebstofffracht des Jahres 2012 zeigt, dass während des Hochwassers Anfang Juli ein Grossteil der Jahresfracht transportiert wurde und dass die jährlichen Schwebstofffrachten stark von einzelnen Starkregenereignissen abhängen.

Aus den LISST-Messungen sind auch die Grössen der Schwebstoffpartikel bekannt. In Phasen, in denen vorübergehend keine LISST-Messungen vorhanden waren, wurden die Partikelgrössen aufgrund von verfügbaren Messdaten mehrerer anderer Methoden und mithilfe von Korrelationen, die in Phasen mit LISST-Daten ermittelt wurden, berechnet. In *Bild 12* sind die jährlichen Schwebstofffrachten in der Druckleitung in fünf Partikelgrössenklassen dargestellt. In allen drei Jahren waren etwa 55% der Schwebstoffe Fein- und Mittelsilt (<20 µm), etwa 30 % Grobsilt (20–63 µm) und ca. 15 % vorwiegend Feinsand. Im Jahr 2012 war der Anteil gröberer Partikel etwas grösser als in den anderen beiden Jahren, in denen es keine bedeutenden Hochwasser gab.

Nebst der Schwebstofffracht in der Druckleitung wurden auch die Schwebstofffrachten berechnet, welche durch die einzelnen Maschinengruppen gelangten. Dabei wurde angenommen, dass in beiden Turbinenzuläufen die gleiche SSC vorhanden war.

3.5 Gründe für Schwebstoffspitzen

Die SSC im Triebwasser variierte im Sommer bei Volllastbetrieb je nach Gletscherschmelze. Wie erwartet, traten erhöhte SSC nach Regenereignissen auf, siehe z. B. *Bild 13b*. Wie in *Bild 13a* ersichtlich, traten aber markante SSC-Spitzen auch in niederschlagsfreien Perioden auf. In *Bild 14* unten ist ein Detail der SCC-Ganglinie zusammen mit der Ganglinie des Medianpartikeldurchmessers d_{50} der Schwebstoffpartikel während der ersten drei Tage der in *Bild 13a* gezeigten Periode dargestellt. Der obere Teil des *Bilds 14* zeigt die zeitlich entsprechenden Ganglinien des Stollenpegels (gemessen bei der Schieberkammer) und des Volumenstroms in der Druckleitung. In diesen Augusttagen wurde der Speicherstollen zum Ausgleich tageszeitlicher Zuflussschwankungen genutzt. Der Pegel im Speicherstollen erreichte jeweils abends bzw. nachts den maximalen Betriebsspiegel (1643 m ü.M.) und zur Mittagszeit den minimalen Betriebsspiegel (1639 m ü.M.). Bei tiefem Stollenpegel traten höhere SSC und höhere d_{50} auf als bei vollem Speicher-

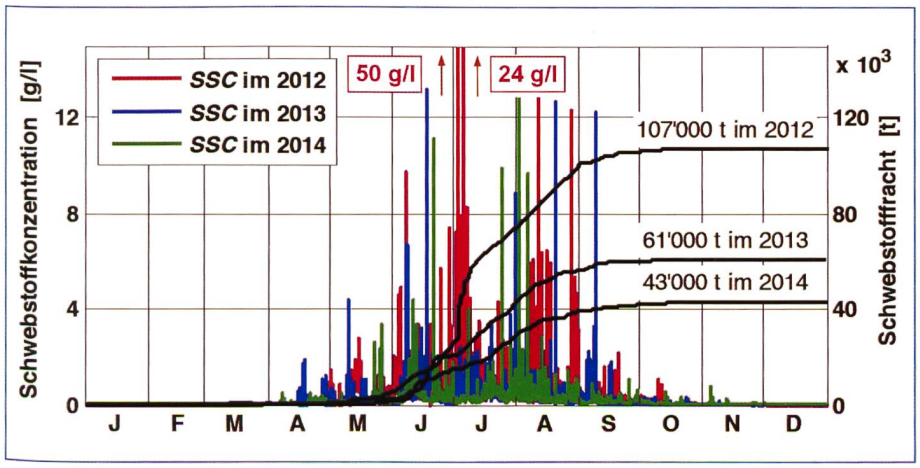

Bild 11. SSC-Ganglinien und Schwebstofffrachten für die Jahre 2012 bis 2014 im KW Fieschertal.

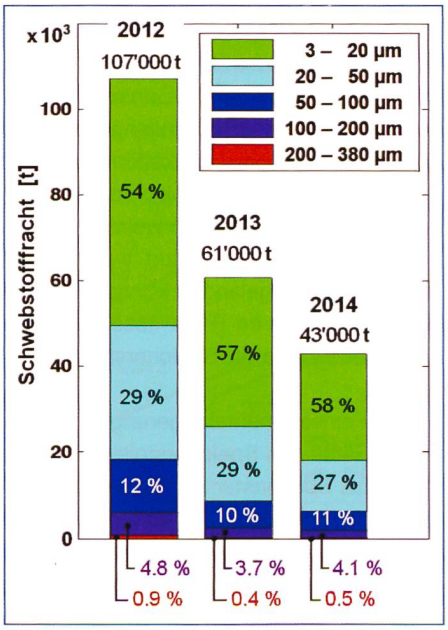

Bild 12. Schwebstofffrachten, aufgeteilt nach Grössenklassen.

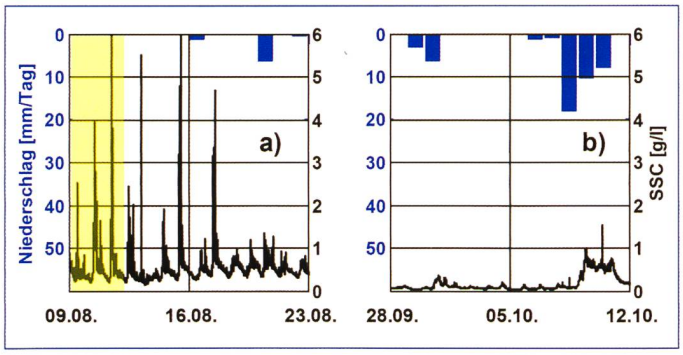

Bild 13. Schwebstoffspitzen, die a) nicht oder b) wesentlich von Regenereignissen abhängen (Felix et al. 2014).

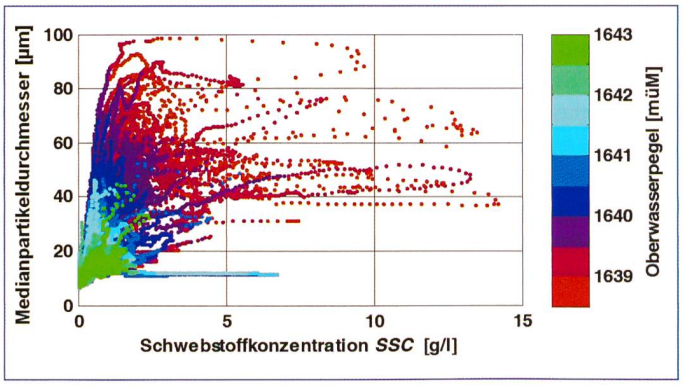

Bild 15. Medianpartikeldurchmesser bei verschiedenen Schwebstoffkonzentrationen infolge der Speicherstollen-Bewirtschaftung.

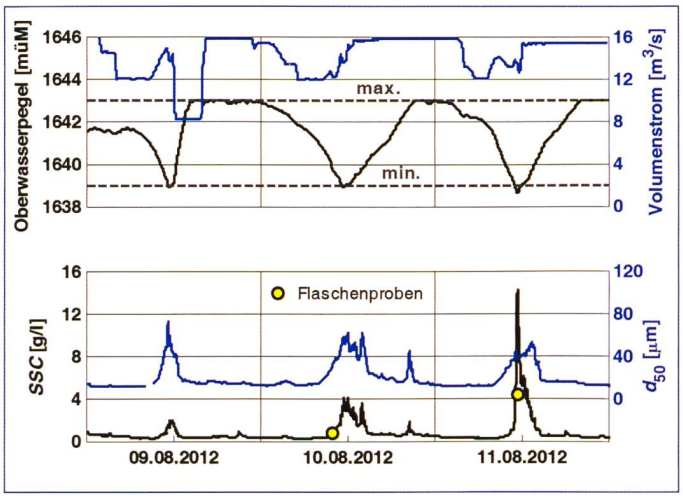

Bild 14. Spitzen der Schwebstoffbelastung bezüglich Konzentration (SSC) und Partikelgrösse infolge der Speicherstollen-Bewirtschaftung, gelb markierter Ausschnitt aus Bild 13.

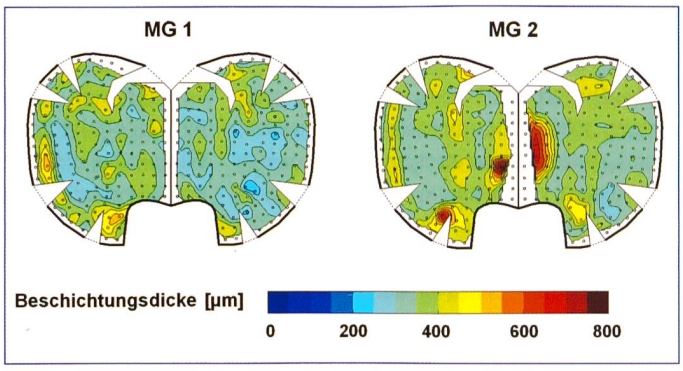

Bild 16. Schichtdickenverteilungen in Bechern des KW Fieschertal (Beispiele jeweils vom Becher Nr. 1 im April 2013).

stollen. Dies ist auch in *Bild 15* zu sehen, in welchem die Messdaten von niederschlagsarmen Perioden (<5 mm/Tag) in den Jahren 2012–2014 zusammengestellt sind.

Der verstärkte Transport gröberer Partikel bei tiefen Stollenpegeln kann mit den hydraulischen Verhältnissen im Speicherstollen erklärt werden: Gemäss Berechnungen betragen bei maximalem Stollenpegel die mittlere Fliessgeschwindigkeit im Stollen <0.5 m/s und die Sohlschubspannung <0.5 Pa. Bei tiefem Stollenpegel treten höhere Fliessgeschwindigkeiten (bis 2 m/s) und deutlich höhere Sohlschubspannungen (bis 20 Pa) auf, durch welche abgelagerte Partikel resuspendiert werden und ins Triebwasser gelangen können. Ein Teil der SSC-Spitzen im Triebwasser wird also durch den Betrieb des Speicherstollens verursacht.

Feinsedimentablagerungen in der ersten Hälfte des Speicherstollens können durch das Spülfenster ins Wysswasser zurückgegeben werden. Feinsedimente in der zweiten Hälfte des Speicherstollens werden aber früher oder später turbiniert. Mit einem Anheben des minimalen Betriebsspiegels im Speicherstollen könnten betriebsbedingte hohe SSC nur vorübergehend vermieden werden, da die Sedimentablagerungen im Stollen zunehmen würden.

4. Resultate der Verschleissmessungen

4.1 Verteilung und Abnahme der Beschichtungsdicken

Bild 16 zeigt Beispiele der räumlichen Verteilungen der Schichtdicken, die in Bechern von nicht fabrikneuen Peltonlaufrädern im April 2013 im KW Fieschertal gemessen wurden. Die Schichtdicken wurden zwischen den Messpunkten (schwarze Symbole) interpoliert und farblich auf einer ebenen Abwicklung der Becherinnenseite dargestellt.

Bei der MG 1 variierten die Beschichtungsdicken zwischen ca. 200 und 500 µm. Bei der MG 2 sind lokal Beschichtungsdicken von bis zu 800 µm vorhanden, da beim Nachbeschichten stellenweise Material auch auf die vorhandene Beschichtung aufgetragen wurde. Auch ohne lokales Nachbeschichten kann die Schichtdicke von benachbarten Messpunkten stark variieren: z. B. variiert die Schichtdicke am linken Rand des Bechers Nr. 1 der MG 1 auf einer Distanz von nur 4 cm um bis zu ca. 200 µm. Dies zeigt, wie wichtig die Lage der Messpunkte ist. An jeweils einem Laufrad haben die Schichtdickenverteilungen der Becher Nr. 1 und Nr. 2 einen ähnlichen Charakter aufgewiesen.

Über die Innenfläche der beiden Becher gemittelt, wurden an der MG 1 folgende Reduktionen der Schichtdicke berechnet: 10 µm während der Schwebstoffsaison 2013 (29 000 t Schwebstoffe) und 4 µm während der Schwebstoffsaison 2014 (22 000 t). Mit einer Reproduzierbarkeit der über einen Becher gemittelten Schichtdickendifferenz von ±5 µm wird die Schichtdickendifferenz von 2013 als signifikant eingestuft und als Abrasion interpretiert. Die Schichtdickendifferenz im Jahr 2014 hingegen liegt innerhalb der Messunsicherheit.

Die Beschichtung in den Bechern ist also für mehrere Jahre ausreichend, sofern keine grösseren Schwebstofftransportereignisse vorkommen. Am stark beschädigten Laufrad, das nach dem Hochwasser vom Juli 2012 ausgebaut werden musste, betrugen die Schichtdicken an 10 % der Messpunkte nur 50 bis 100 µm, u.a. im Bechergrund in der Nähe von Stellen, an denen die Beschichtung vollständig abgetragen wurde (vermutlich auch durch Sekundärschäden bedingt).

Relevant ist der Verschleiss bzw.

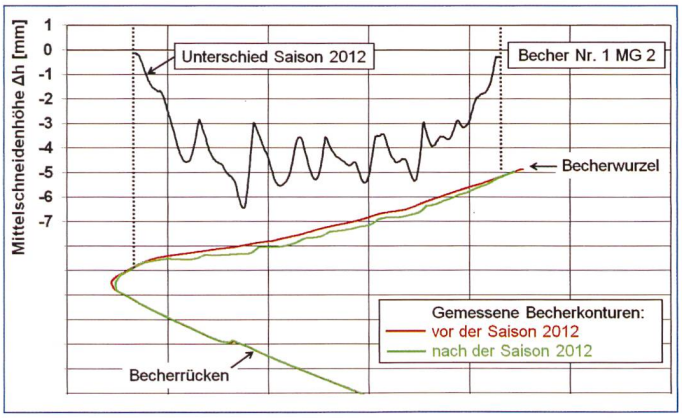

Bild 17. Reduktion der Mittelschneidenhöhe in einem Becher eines Laufrads des KW Fieschertal während der schwebstoffreichen Saison 2012.

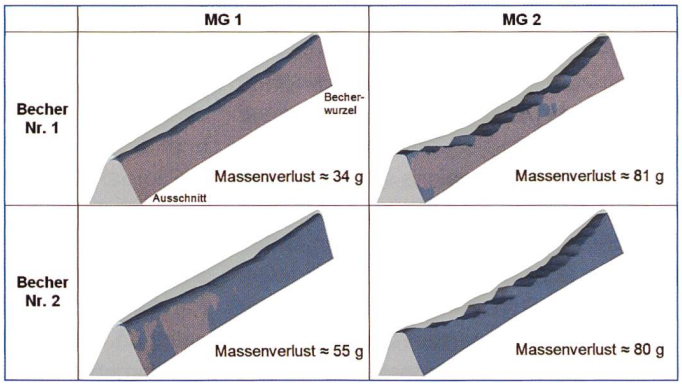

Bild 18. Quantifizierung des Materialverlusts an den Mittelschneiden im schwebstoffreichen Jahr 2012 (nach Abgottspon et al. 2014). Der Zustand vor der Saison ist halbtransparent dargestellt.

der lokale Verlust der Beschichtung auf den Mittelschneiden und an den Bechereintrittskanten am Ausschnitt, der im KW Fieschertal auch in Schwebstoffsaisons ohne grössere Hochwasser auftritt. Der vollständige lokale Verlust der Beschichtung ist von Bedeutung, da dort das weichere Grundmaterial oft tief ausgewaschen wird. Die Abnutzung der Beschichtung an den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten kann aber mit der verwendeten Schichtdickenmesstechnik nicht oder nicht genügend genau erfasst werden.

4.2 Materialverlust an Mittelschneide und Becherausschnitt

Bild 17 zeigt ein Beispiel von zwei Längsschnitten durch die Mittelschneide des Bechers Nr. 1 des Peltonlaufrades der MG 2, welche vor (rot) und nach (grün) der Schwebstoffsaison 2012 gemessen wurden. Die Reduktion der Mittelschneidenhöhe ist als schwarze Linie eingetragen und bezieht sich auf die Achse am linken Rand des Diagramms. Die Mittelschneidenhöhe wurde in diesem Beispiel um bis zu 6.5 mm reduziert. Das Ausmass des hydro-abrasiven Verschleisses am Becher Nr. 2 hat einen ähnlichen Verlauf. Eine Reduktion um 6.5 mm entspricht im Fall des KW Fieschertal 1 % der Becherinnenbreite von 650 mm. In *Bild 18* sind die digitalen Geometriemodelle der Mittelschneiden der Becher Nr. 1 und 2 der beiden MG am Anfang und Ende der Beobachtungsperiode 2012, in der die Schwebstoffbelastung infolge des erwähnten Hochwasserereignisses relativ hoch war, dargestellt. Bei der MG 2 war die Mittelschneide infolge Betrieb während dreier vorangegangener Schwebstoffsaisons und vor Ort durchgeführten Revisionen schon vor der Schwebstoffsaison 2012 stark abgeflacht, was zu etwa doppelt so grossem Massenverlust als bei MG 1 führte. In der MG 1 war zu Beginn der Schwebstoffsaison 2012 ein neuwertiges Laufrad (nach Revision beim Turbinenhersteller) eingesetzt worden. Im mittleren Drittel der Länge der Mittelschneide, wo der Strahl am längsten einwirkt, wurde am meisten Material abgetragen. Aus den beträchtlichen Unterschieden der Masseverluste der Becher von MG 1 kann geschlossen werden, dass mindestens zwei Becher pro Laufrad digitalisiert werden sollten, um einen repräsentativen Mittelwert für ein Laufrad zu ermitteln.

Von den zwei vermessenen Bechern wurde ein mittlerer Massenverlust für das Laufrad der jeweiligen MG hochgerechnet. In der Schwebstoffsaison 2012 mit dem Hochwasserereignis betrug für die MG 1 der Massenverlust 0.9 kg an den Mittelschneiden und 1.5 kg an den Becherausschnitten. Bei der MG 2 betrug der Massenverlust 1.6 kg an den Mittelschneiden und ebenfalls 1.5 kg an den Ausschnitten. An den Ausschnitten kann also etwa gleich oder sogar mehr Material abgetragen werden als an den am meisten beachteten Mittelschneiden.

4.3 Vergleich mit der Schwebstoffbelastung

Die Höhen- und Breitenänderung der Mittelschneiden sind in *Bild 19* in Funktion der kumulierten Schwebstofffrachten für beide MG dargestellt (jeweils Mittelwerte der Becher Nr. 1 und 2). Bei der MG 1 war von 2012 bis 2014 dasselbe Laufrad installiert. Bei der MG 2 waren über denselben Zeitraum drei Laufräder installiert, weshalb nicht alle Datenpunkte miteinander verbunden sind. Ein erster Laufradwechsel war nach dem Hochwasserereignis im Jahr 2012 notwendig. Der zweite Laufradwechsel Ende 2013 war unabhängig von hydro-abrasiven Verschleiss wegen eines Risses nahe der Becherwurzel notwendig.

Bei der MG 1 wurde in der Schwebstoffsaison 2012 die Beschichtung an allen Mittelschneiden und Bechereintrittskanten vollständig abgetragen und die grossen Materialverluste entstanden durch Abtrag des Grundmaterials. Bei einer Schwebstofffracht von etwa 60 000 t wurde die Mittelschneidenhöhe um 6.5 mm reduziert, und die Mittelschneide wurde etwa 3 mm breiter. In den Schwebstoffsaisons 2013 und 2014 hingegen wurde bei der MG 1 die Beschichtung nur in einigen Bechern sehr lokal abgetragen, und die Mittelschneidenhöhen und -breiten änderten sich nicht.

Bei der MG 2 war die Mittelschneide

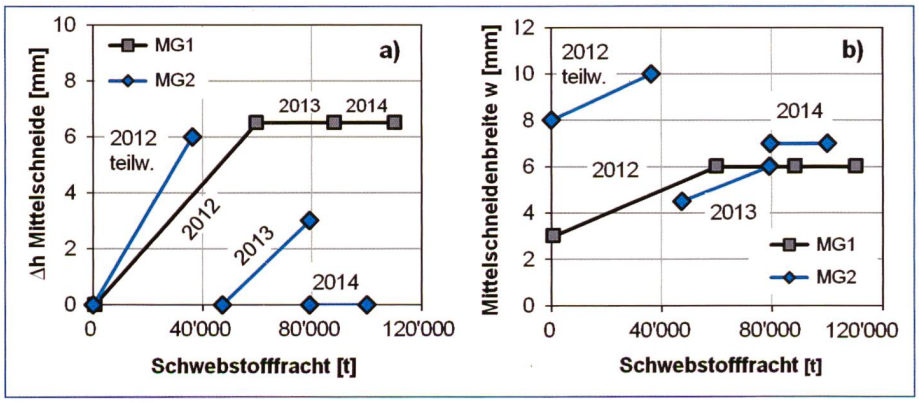

Bild 19. a) Reduktion der Mittelschneidenhöhe und b) Zunahme der Mittelschneidenbreite in Funktion der kumulierten Schwebstofffracht für beide MG des KW Fieschertal.

vor der Schwebstoffsaison 2012 mehr als doppelt so breit wie bei der MG 1. Dies hat dazu geführt, dass es mit der weiteren Verbreiterung der Mittelschneide während der Schwebstoffsaison zu weiteren Sekundärschäden kam, welche im Gegensatz zur MG 1 einen Laufradersatz erforderlich machten; dies trotz einer um ein Drittel kleineren Schwebstofffracht bei der MG 2 als bei der MG 1. Dies zeigt, dass der Zustand eines Turbinenlaufrades vor einer Belastungsperiode entscheidend für das Ausmass des Verschleisses ist.

5. Resultate der Wirkungsgradmessungen

5.1 Historie des Index-Turbinenwirkungsgrades

Bild 20 zeigt die Historie der Wirkungsgradveränderung der MG 1 im KW Fieschertal sowohl mittels der Sliding-Needle-Messungen als auch der kontinuierlichen Wirkungsgradauswertung. Die Wirkungsgradveränderung ist referenziert auf eine erste Messung vom Juli 2012. Die Werte der kontinuierlichen Auswertung streuen mehr als diejenigen der Sliding-Needle-Messungen. Durch Filterung und Mittelung der Messsignale des kontinuierlichen Monitorings konnte die Streuung so weit reduziert werden, dass eine verlässliche Wirkungsgradhistorie resultierte. Die Verläufe der beiden Methoden sind qualitativ und quantitativ ähnlich, sodass die Wirkungsgradhistorie als erhärtet betrachtet werden kann. Die Reproduzierbarkeit der gemessenen Wirkungsgradveränderung beträgt etwa 0.2 %.

In einem Teil der Schwebstoffsaison 2012 wurde bei der MG 1 während 1902 Betriebsstunden eine Wirkungsgradreduktion von 1 % gemessen. Diese Wirkungsgradreduktion ist hauptsächlich auf das im Abschnitt 3.3 erwähnte Hochwasserereignis und dessen Auswirkungen zurückzuführen. Im Jahr 2014 hingegen betrug die Wirkungsgradreduktion lediglich 0.14 % während 3048 Betriebsstunden. In *Bild 20* sind auch die jeweils im Winter durchgeführten Reparaturarbeiten an den Laufrädern eingetragen. Beim KW Fieschertal hat sich das Vorgehen bewährt, in jedem Winter ein Nachschleifen und Nachbeschichten vor Ort durchzuführen. Nach beträchtlichem hydro-abrasivem Verschleiss im Jahr 2012 resultierte durch das Nachschleifen der Mittelschneide und des Ausschnittes eine Wirkungsgradverbesserung von +0.56 %. Nach eher geringem hydro-abrasivem Verschleiss im Jahr 2013 resultierte durch das Nachschleifen keine signifikante Wirkungsgradänderung. Die Auswirkung des Nachbeschichtens der Mittelschneiden und der Becherausschnitte auf den Wirkungsgrad konnte zweimal untersucht werden. Diese lokalen Nachbeschichtungen bewirkten keine signifikanten Wirkungsgradänderungen. Im Lauf der Einsatzzeit eines Laufrads mit wiederholten Revisionen vor Ort sinkt sein Wirkungsgrad generell. Durch eine grosse Revision im Werk mit Materialauftragung kann das hydraulische Profil wiederhergestellt und der hydraulische Wirkungsgrad wieder deutlich erhöht werden.

Eine detaillierte Wirkungsgradhistorie, wie in *Bild 20* dargestellt, ist in der Literatur nicht zu finden. Meist werden zwei Einzelmessungen miteinander verglichen (*Lazzaro* und *Rossi* 1995, *Brekke et al.* 2002, *Singh et al.* 2013). Eine wichtige Erkenntnis aus dem vorliegenden Forschungsprojekt ist, dass Wirkungsgraddifferenzen infolge Abnutzungen oder Revisionsmassnahmen nur als Tendenz vorhersagbar sind. Ein Nachschleifen der Mittelschneiden beispielsweise hat nicht immer denselben Einfluss auf den Wirkungsgrad. Auch lassen sich die an einem Laufrad ermittelten Ergebnisse nicht einfach auf das andere übertragen. Es ist eine Wirkungsgradhistorie pro Laufrad zu erstellen.

Aufgrund der Messdaten mehrerer Jahre kann geprüft werden, ob in Jahren ohne signifikante Wirkungsgradreduktionen und mit wenig Verschleiss (vgl. *Bild 19*) ein jährliches Nachschleifen und Nachbeschichten notwendig und wirtschaftlich sinnvoll ist.

5.2 Vergleich mit der Schwebstoffbelastung

Die aus der Wirkungsgradhistorie in *Bild 20* resultierenden Wirkungsgraddifferenzen sind in *Bild 21* für die einzelnen Schwebstoffsaisons in Funktion der Schwebstofffrachten für beide MG dargestellt. Gelb markiert ist der Bereich der Reproduzierbarkeit der Messungen von ±0.2 %. In diesem Bereich sollten die Wirkungsgraddifferenzen nicht überinterpretiert werden, insbesondere ein geringer Wirkungsgradanstieg. Bei der MG 2 liegt für das Jahr 2012 keine Wirkungsgraddifferenz vor, da das Laufrad nach dem Hochwasserereignis ungeplant ausgewechselt werden musste. Bei etwa gleicher Schwebstofffracht von 30 000 t resultierten Wirkungsgraddifferenzen, die sich um einen Faktor 3 unterscheiden (-0.97 % bei MG 1 im 2012 im Vergleich zu -0.30 % bei MG 2 im 2013).

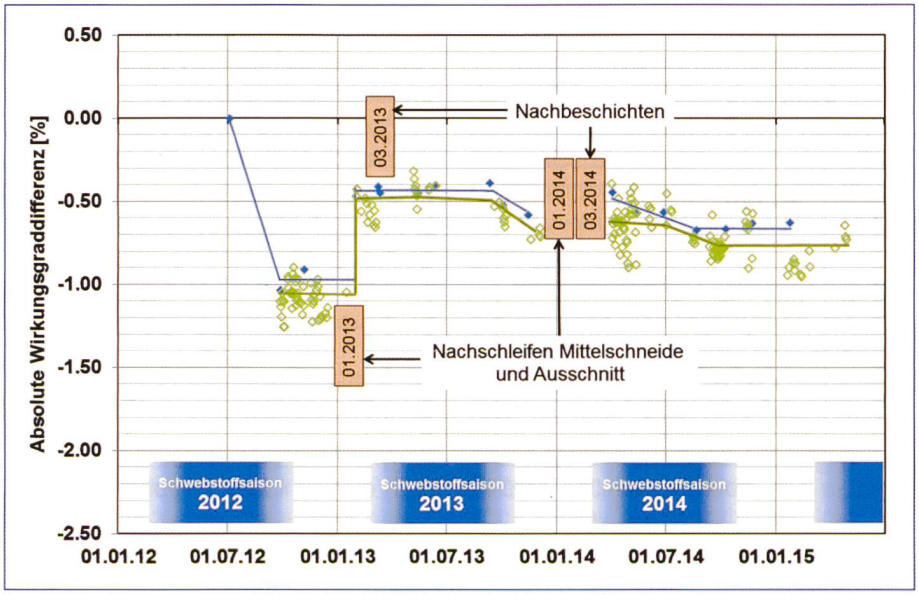

Bild 20. Verlauf der Wirkungsgradänderung der MG 1 im KW Fieschertal aus den Sliding-Needle-Messungen (blau) und aus dem kontinuierlichen Monitoring (grün).

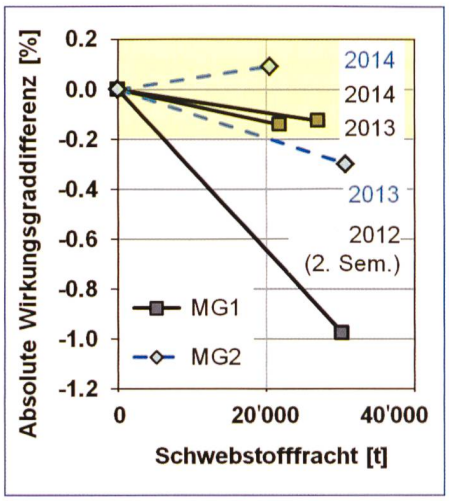

Bild 21. Vergleich der gemessenen Wirkungsgradänderungen an den MG des KW Fieschertal mit den entsprechenden Schwebstoffbelastungen.

Durch Feinsedimente verursachte Kosten für zwei MG	kCHF/a	in % des Werts der Jahreserzeugung
Reparaturkosten	**300**	3.4 %
- an Laufrädern	200	
- an Düsen, Düsenschutzdächern	60	
- am Entsander (Anteil Spülsystem)	40	
Erzeugungsverluste	**30**	0.3 %
- infolge Wirkungsgradreduktion	10	
- infolge Stollenspülungen oder Laufradwechsel mit Wasserverlust	20	
Total Kosten für zwei MG	**330**	3.7 %

Tabelle 1. Erwartungswerte der durch Feinsedimente verur-sachten Kosten für zwei MG des KW Fieschertal im lang-jährigen Mittel, geschätzt auf Basis der Daten von 2012 bis 2014.

Spezifische Feinsedimentkosten	im Normalfall bei SSC = 0.5 g/l	bei SSC = 10 g/l
bezogen auf die Wassermenge	0.33 Rp/m^3	6.6 Rp/m^3
bezogen auf die Erzeugung	0.28 Rp/kWh	**5.5 Rp/kWh**

Tabelle 2. Spezifische Feinsedimentkosten im langjährigen Mittel, geschätzt auf Basis der Daten von 2012 bis 2014 für das KW Fieschertal.

Dies zeigt, dass die Schwebstofffracht alleine kein geeigneter Parameter für die Erklärung und Prognose der Wirkungsgradveränderungen ist.

6. Betriebsoptimierung

6.1 Warnungen vor hoher Schwebstoffbelastung

Da die Schwebstoffbelastung zeitlich stark variiert, kann es wirtschaftlicher sein, bei hoher Schwebstoffbelastung Fassungen vorübergehend auszuleiten und allenfalls das Turbinieren während eines Hochwassers zu unterbrechen. Dabei sind natürlich auch übergeordnete Randbedingungen wie Produktionsverpflichtungen und Produktionsausgleich durch andere Kraftwerke innerhalb einer Bilanzgruppe zu berücksichtigen. Um Situationen mit hoher Schwebstoffbelastung rechtzeitig und zuverlässig zu erkennen sowie vorübergehende Produktionsverluste wirtschaftlich begründen zu können, ist ein Schwebstoffmonitoring erforderlich, welches sich idealerweise nicht nur auf SSC, sondern auch auf die Partikelgrössen beziehen sollte.

Um eine Vorwarnzeit für eine Abschaltung zu erhalten, sind nicht nur Messungen im Triebwasser, sondern auch bereits im Fassungsbereich oder im Fluss oberhalb der Fassung empfehlenswert. Für Vorwarnungen sind auch Messgrössen wie Trübung, Abfluss im Oberlauf und Niederschlag verwendbar. Als zusätzliche Entscheidungsgrundlage können zudem Niederschlags- und Abflussprognosen berücksichtigt werden. Um nach einer Abschaltung zu entscheiden, wann die Anlage wieder in Betrieb genommen werden kann, ist es wichtig, mindestens eine Schwebstoffmessung im Fluss oberhalb bzw. ausserhalb der Wasserfassung zu haben.

Wenn die Signale der Schwebstoffmessungen auch im Kraftwerksleitsystem integriert werden, können Warnungen vor hohen Schwebstoffbelastungen wie andere Alarme an den Pikettdienst ausgegeben werden, welcher die Entscheidung einer Abschaltung zu treffen hat. Es sind keine automatischen Kraftwerksabstellungen aufgrund der Schwebstoffsituation vorgesehen. Bei einer Wasserkraftanlage mit Beileitungen aus anderen Tälern müssen in der Regel nicht alle Fassungen oder nicht alle gleichzeitig ausgeleitet werden, da Starkregenereignisse oft sehr lokal sind. Im Fall des KW Fieschertal ist bei grösseren Hochwassern ein Ausleiten der Fassung zu empfehlen, um starken Feinsedimenteintrag in den Speicherstollen und übermässige Turbinenabrasion zu vermeiden. Aufgrund des begrenzten Nutzvolumens des Speicherstollens ist spätestens eine Stunde nach dem Ausleiten der Fassung das Turbinieren vorübergehend einzustellen.

6.2 Berechnung der Abschaltkonzentration

Die Berechnung der Abschaltkonzentration basiert auf betriebswirtschaftlichen Überlegungen. Dafür sind Grundlagendaten über das Schwebstoffaufkommen, Wirkungsgradreduktionen, Unterhaltskosten und Strompreise erforderlich. Im Kraftwerk Fieschertal sind solche Daten über drei Jahre vorhanden. Von besonderer Bedeutung ist das Hochwasserereignis vom Juli 2012, bei dem ein Laufrad so stark beschädigt wurde, dass es während der Volllastzeit ausgetauscht werden musste, und am anderen Laufrad eine starke Wirkungsgradreduktion auftrat. Im Folgenden wird ein einfaches Vorgehen für die rechnerische Abschätzung der Abschaltkonzentration am Beispiel des KW Fieschertal aufgezeigt.

Die durch Feinsedimente verursachten Reparaturkosten an der Anlage wurden auf etwa 300 kCHF pro Jahr geschätzt *(Tabelle 1)*. Dies unter der Voraussetzung, dass das Kraftwerk bei grösseren Hochwassern nicht abgeschaltet wird und die entsprechenden Schäden auftreten. Dazu kommen Ertragsausfälle wegen Erzeugungsverlusten in der Grössenordnung von 30 kCHF pro Jahr. Für die Berechnung der im langfristigen Mittel erwarteten jährlichen Werte wurden verschiedene Kosten- und Minderertragspositionen mit deren Eintrittswahrscheinlichkeiten berücksichtigt.

Aufgrund der Daten von 2012 bis 2014 wurde geschätzt, dass die jährliche Schwebstofffracht im langjährigen Mittel 50 000 t beträgt. Mit der vereinfachenden Annahme, dass die durch Feinsedimente verursachten Kosten proportional zur Schwebstofffracht sind, ergeben sich damit spezifische Kosten pro Tonne Feinsediment von CHF 330 000 / 50 000 t / = 6.6 CHF/t (0.66 Rp/kg).

Im Normalfall mit SSC = 0.5 g/l während der Schwebstoffsaison sind in 1 m^3 Triebwasser 0.5 kg Schwebstoffe enthalten. Daraus resultieren durch Feinsedimente verursachte spezifische Kosten pro m^3 Wasser von 0.66 Rp/kg · 0.5 kg/m^3 = 0.33 Rp/m^3. Bei SSC = 10 g/l beispielsweise betragen diese 6.6 Rp/m^3 *(Tabelle 2)*. Im KW Fieschertal hat eine Maschinengruppe eine Nennleistung von 32 MW bei einem Nennvolumenstrom von 7.5 m^3/s. In einer Stunde Volllastbetrieb werden also mit 27 000 m^3 Wasser 32 000 kWh erzeugt. Das entspricht einem Arbeitswert von 1.2 kWh/m^3. Mit diesem Arbeitswert liegen die spezifischen Feinsedimentkosten im Normalfall bei 0.33 Rp/m3 / 1.2 kWh/m^3 = 0.28 Rp/kWh und bei hohen SSC von 10 g/l betragen diese 5.5 Rp/kWh. Bei einer SSC von ca. 10 g/l überschreiten die durch Feinsedimente verursachten Kosten den angenommenen Erlös, und es ist wirtschaftlicher, auf das Turbinieren zu verzichten. Es wird empfohlen, in einigen Jahren den Wert der Abschalt-SSC mit einer erweiterten Datenbasis erneut zu berechnen und gegebenenfalls anzupassen. Gemäss

den wenigen auffindbaren Literaturangaben liegen Abschaltkonzentrationen bei andern Wasserkraftanlagen im Bereich von 1.1 g/l (Pelton-KW Dorferbach, *Boes* 2010) bis einige g/l (z. B. 3 g/l bei einem Kraftwerk in Indien, *Singh et al.* 2013). Die Abschaltkonzentration muss anlagespezifisch beurteilt werden, da sie von vielen Faktoren abhängt (Fallhöhe, spezifische Drehzahl, Abrasivität der Partikel, Beschichtung usw.).

Zusammen mit dem Betreiber des KW Fieschertal und dem für die Maschinen verantwortlichen Ingenieur (BKW Engineering) wurde festgelegt, die Fassung auszuleiten und den Turbinierbetrieb anschliessend zu unterbrechen, wenn die SSC in der Druckleitung während mehr als 15 Minuten 10 g/l überschreitet. Da die Wiederinbetriebnahme mit einem Aufwand verbunden ist, wird der Betrieb erst wieder aufgenommen, wenn die SSC unter 5 g/l gesunken ist und das Ende des Ereignisses absehbar wird. In *Bild 22* ist anhand des Verlaufs der SSC im Triebwasser dargestellt, wie dieses Szenario im Fall des Hochwassers vom Juli 2012 ausgesehen hätte. Es ist das einzige Hochwasserereignis während der Beobachtungsperiode von 2012 bis 2014, bei dem das Abstellkriterium erreicht worden wäre. Dies zeigt, dass die Anlage nur bei wirklich relevanten Schwebstoffereignissen ausser Betrieb ginge.

Während der Ausserbetriebnahme von 16 h wären 13 000 t Feinsedimente weniger über die Turbinen geleitet worden, das entspricht 12 % der Jahresfracht von 2012 oder etwa 25 % der Fracht in einem Jahr ohne grösseres Hochwasser. Wenn die Fassung während des Hochwasserereignisses ausgeleitet worden wäre, wären zudem deutlich weniger Feinsedimente in das System eingetragen worden. Dadurch wäre auch die Schwebstoffbelastung in den Wochen nach dem Hochwasserereignis geringer ausgefallen, da die während des Hochwassers im Speicherstollen abgelagerten Feinsedimente anschliessend infolge Resuspension turbiniert wurden.

6.3 Wirtschaftliche Aspekte

Die Wirtschaftlichkeit einer temporären Kraftwerksabschaltung wurde am Beispiel des Hochwasserereignisses vom Juli 2012 für das KW Fieschertal vereinfacht nachgerechnet *(Tabelle 3)*. Durch den vorübergehenden Stillstand beider Maschinengruppen ergeben sich Erzeugungsverluste und Ertragseinbussen. Weiter kann eine allfällige Strafgebühr für die Produktionsabweichung negativ zu Buche schlagen. Auf der anderen Seite würden durch die Abschaltung die Reparaturkosten und die Produktionsminderung infolge Wirkungsgradreduktion für beide MG geringer ausfallen, und es gäbe keinen Erzeugungsverlust infolge eines durch das Hochwasser erforderlich gewordenen Laufradtausches. In Summe wäre in diesem Ereignis ein vorübergehendes Einstellen des Turbinierens deutlich wirtschaftlich gewesen.

Diese wirtschaftliche Betrachtung im Nachhinein wurde durch Schwebstoff-, Turbineninspektions-, Wirkungsgrad- und Kostendaten ermöglicht. Mitte 2012 standen diese Grundlagen noch nicht alle zur Verfügung. Die Wirtschaftlichkeit von Betriebsunterbrechungen ist von Fall zu Fall verschieden, da die Dauer und Intensität eines Hochwassers bzw. der Sedimentbelastung und die Folgen für die Maschinen variieren können.

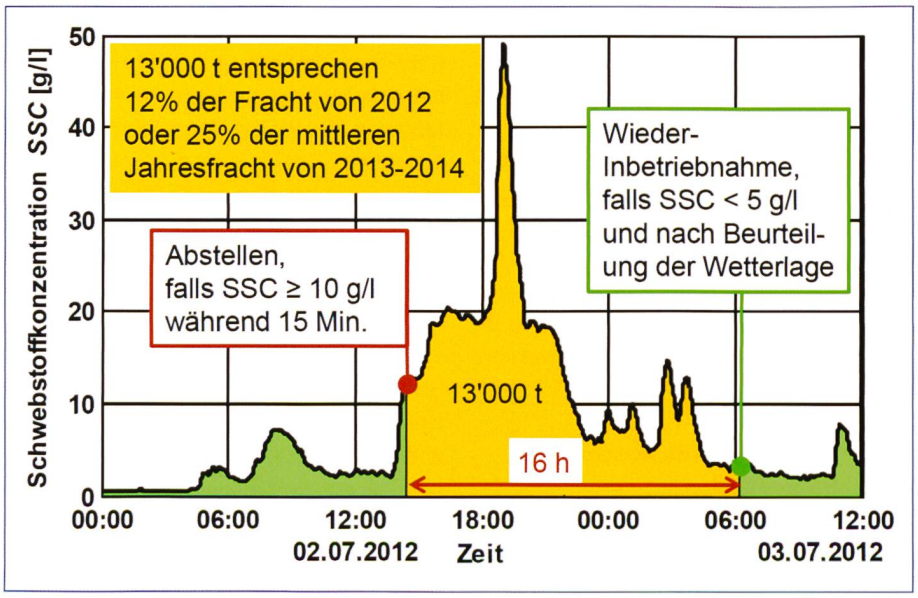

Bild 22. Verlauf der Schwebstoffkonzentration im Triebwasser des KW Fieschertal Anfang Juli 2012 mit Szenario für das vorübergehende Einstellen des Turbinierens.

7. Schlussfolgerungen

Um die Zusammenhänge zwischen der Schwebstoffbelastung, dem hydro-abrasiven Verschleiss und den Wirkungsgradänderungen an Peltonturbinen zu untersuchen, wurden umfangreiche Messungen und Analysen durchgeführt. In einer ersten Projektphase wurde das Verhalten von Schwebstoffmessgeräten unter kontrollierten Bedingungen im Labor erforscht. Anschliessend wurden am Prototyp im KW Fieschertal ein Schwebstoff- und Wirkungsgradmonitoring aufgebaut. Diese werden auch nach Projektende weitergeführt. Der Materialabtrag an den Mittelschneiden und Becherausschnitten wurde mit 3D-Digitalisierungen vor und nach den Schwebstoffsaisons quantifiziert, die Reduktion der Schichtdicke in den Bechern wurden mit Schichtdickenmessungen erfasst.

Die im Vergleich zu Trübungssonden kostspieligen LISST-Geräte sind derzeit die einzigen, die nebst der SSC auch die PSD messen können. Wenn die Messung hoher SSC im Vordergrund steht, kann die einfache und kostengünstigere Methode mit der Dichtemessung (CMD) empfohlen werden. Weiter bietet sich an, ADM-Messeinrichtungen, die in vielen grösseren Wasserkraftanlagen vorhanden sind, für das Schwebstoffmonitoring zu nutzen. Diese Methode bietet den Vorteil einer Messung direkt im Triebwasserweg und sie benötigt nahezu keinen Unterhalt. Eine interessante Möglichkeit ist die Kombination von CMD mit der akustischen Methode (oder Trübungsmessung), da so auch die mittlere Partikelgrösse abgeschätzt werden kann, wenn während einer Kalibrierungsphase zusätzlich ein LISST-Gerät verwendet wird. Das SSC-Monitoring mittels Druckmessungen kommt wie die akustische Methode ohne zusätzliche Sensoren aus, bietet aber keine Vorwarnzeit. Für Informationen über die SSC mit mehr Vorwarnzeit und auch im Fall von ausgeleiteten Fassungen sind Messungen oberhalb bzw. ausserhalb der Fassung erforderlich. Dafür eignen sich günstige Eintauch-Trübungssonden, wobei zeitweise ungenaue SSC-Werte zu tolerieren sind. Für ein verlässliches Schwebstoffmonitoring sind nach wie vor Schöpfproben erforderlich, die auch mit automatischen Probenehmern genommen werden können.

Die Schwebstoffmessungen zeigten, dass die SSC und die PSD nicht stark korrelieren. Sie variieren nicht nur aufgrund von Gletscherschmelze und Regen, sondern werden auch durch den Betrieb der Kraftwerksanlage beeinflusst. In Jahren mit nennenswerten Hochwasserereignissen

kann die Schwebstofffracht deutlich über dem langjährigen Mittel liegen.

Die Schichtdickenmessungen zeigten, dass die Abrasion in den Bechern in Jahren ohne grössere Hochwasser, wie erwünscht, unwesentlich ist. Relevant ist der lokale Verlust der Beschichtungen an den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten am Ausschnitt, infolgedessen das Grundmaterial abgetragen wird und Sekundärschäden entstehen. Der Materialabtrag an diesen relevanten Stellen konnte mit der optischen Vermessung (3D-Digitalisierung) erfasst werden.

Aufgrund der Variation der Schwebstoffbelastung korreliert der Verschleiss wenig mit den Betriebsstunden oder mit saisonal typischen SSC. Wie die Messungen zeigten, hängt der Verschleiss auch nicht nur von der Schwebstofffracht, sondern stark vom anfänglichen Zustand eines Laufrads (Geometrie der Mittelschneiden und Bechereintrittskanten vor einer Belastungsperiode) sowie vom Abtrag der Beschichtung ab.

Mit Sliding-Needle-Indexwirkungsgradmessungen konnten die Wirkungsgradänderungen quantifiziert werden. Um den Messaufwand und die Beeinträchtigung des Anlagenbetriebs weiter zu reduzieren, wurde eine Methode für das kontinuierliche Wirkungsgradmonitoring entwickelt, welche eine höhere zeitliche Auflösung aufweist. Nebst Wirkungsgradabnahmen um bis zu 1.0 % infolge des hydro-abrasiven Verschleisses wurde auch eine Zunahme von bis zu 0.5 % infolge Schleifens der Mittelschneiden gemessen. Wie der Verschleiss korrelieren die Wirkungsgradabnahmen wenig mit den Betriebsstunden oder der Schwebstofffracht. Vielmehr ist die anfängliche hydraulische Kontur des Laufrads wichtig. Da es kaum möglich ist, Wirkungsgradänderungen infolge Abnutzungen oder Revisionsmassnahmen quantitativ vorherzusagen, sind Messungen erforderlich, welche die Grundlage für Wirtschaftlichkeitsüberlegungen bilden. Die kontinuierliche Wirkungsgradüberwachung erlaubt es dem Betreiber, Revisionsarbeiten bezüglich deren Wirtschaftlichkeit zu bewerten.

Das Beispiel des Hochwassers vom Juli 2012 zeigte, dass es deutlich wirtschaftlich sein kann, das Turbinieren während starker Schwebstoffbelastung vorübergehend einzustellen. Mit einer vereinfachten Berechnung wurde am Beispiel des KW Fieschertal eine Abschaltkonzentration von rund 10 g/l ermittelt.

8. Ausblick

Das in diesem Artikel beschriebene Forschungsprojekt bildet den Schwerpunkt der Dissertation von *David Felix*, welche gegen Ende 2016 publiziert werden soll. Weitere Resultate aus diesem Projekt werden in einem Workshop im Rahmen des IAHR-Symposiums on Hydraulic Machinery and Systems am 06. Juli 2016 in Grenoble präsentiert.

Die in diesem Projekt gewonnenen Daten bezüglich Schwebstoffbelastung, Turbinenabrasion und Wirkungsgradveränderungen können genutzt werden, um Berechnungsansätze, insbesondere Abrasionsmodelle zur Vorhersage von Turbinenverschleiss, und numerische Modelle zu kalibrieren bzw. weiterzuentwickeln. Dabei sind der Turbinentyp, die beanspruchte Stelle innerhalb der Turbine und das Zusammenwirken von Beschichtung und Grundmaterial gegenüber früheren Untersuchungen stärker zu berücksichtigen. In Ergänzung zur Weiterführung der Untersuchungen am KW Fieschertal sind detaillierte Messkampagnen an weiteren von hydroabrasivem Verschleiss betroffenen Anlagen wünschenswert. Da in Prototypuntersuchungen die Partikelparameter (v. a. die PSD) nicht kontrolliert und unabhängig variiert werden können und Verschleissmessungen mit hoher zeitlicher Auflösung vom Kraftwerksbetrieb her nicht möglich sind, sind nebst Messungen an Kraftwerksanlagen weitere, möglichst realitätsnahe Laboruntersuchungen zu Abrasion an Turbinenbauteilen erforderlich. Dabei sind nichtlineare Schadensverläufe und das mögliche Zusammenwirken von Abrasion und Kavitation eine besondere Herausforderung.

Die untersuchten und weiterentwickelten Messmethoden können in der Praxis eingesetzt werden. Aus einer Palette von Schwebstoffmessgeräten kann eine fallweise passende Kombination ausgewählt werden. Schwebstoffmessungen und das 3D-Digitalisieren können Kraftwerksbetreibern und Turbinenherstellern dazu dienen, Unterhaltsmassnahmen zu optimieren und festzustellen, ob Spezifikationen und Vertragsbestimmungen bezüglich hydro-abrasiven Verschleisses und Kavitation erfüllt wurden.

Verbesserte Kenntnisse über den hydro-abrasiven Verschleiss, dessen Ursachen und Auswirkungen sowie Gegenmassnahmen tragen dazu bei, den Entwurf, den Betrieb und den Unterhalt von Hoch- und Mitteldruckwasserkraftanlagen an sedimentreichen Gewässern zu optimieren. Dies trägt zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit und der Effizienz der Wasserkraftnutzung bei.

Kosten- bzw. Ertragspositionen	CHF
Erzeugungsverlust während ca. 16 h Stillstand in Volllastzeit (64 MW, Annahme 55 CHF/MWh)	–60 000.–
Vermiedene Reparaturkosten für beide MG (Schätzung)	+200 000.–
Vermiedener Produktionsausfall infolge weniger reduziertem Wirkungsgrad (Schätzung)	+30 000.–
Vermiedener Erzeugungsverlust für Laufradtausch während Volllastzeit (1 MG, 17 h)	+30 000.–
Strafgebühr/Pönale für starke Abweichung der Produktion vom angemeldeten Sollwert	evtl.
Total (ohne allfällige Pönale)	**+200 000.–**

Tabelle 3. Das wirtschaftliche Potenzial einer vorübergehenden Ausserbetriebnahme des KW Fieschertal am Beispiel des Hochwasserereignisses vom Juli 2012.

Verdankung

Das Forschungsprojekt wurde bzw. wird durch *swisselectric research*, das *Schweizer Bundesamt für Energie (BFE)* und die *Gommerkraftwerke AG (gkw)* finanziell unterstützt. Von den Firmen *Sigrist Photometer, Endress+Hauser* und *Rittmeyer* wurden Schwebstoffmessgeräte leihweise zur Verfügung gestellt. Weiter wurde die Erarbeitung dieser Publikation durch den Forschungsfonds des *Schweizerischen Talsperrenkomitees* gefördert. Die Autoren bedanken sich bei allen Projektbeteiligten für ihr Engagement und für die Unterstützung bei der Durchführung der Labor- und Felduntersuchungen.

Literatur

Abgottspon, A., Staubli, T. (2008). Index Tests of a Francis Unit using the Sliding Gate Method. Proc. 7th Intl. Conf. on Hydraulic Efficiency Measurements, IGHEM, Milano.

Abgottspon, 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, Austria: paper no. 18.05.

Abgottspon, A., Staubli, T., Felix, D., Albayrak, I., Boes, R. M. (2014). Monitoring Suspended Se-

diment and Turbine Efficiency. Hydro Review Worldwide 22(4): 28–36.

Agrawal, Y. C., Pottsmith, H. C. (2000). Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport. Mar. Geol. 168: 89–114.

Agrawal, Y. C., Whitmire, A., Mikkelsen, O. A., Pottsmith, H. C. (2008). Light scattering by random shaped particles and consequences on measuring suspended sediments by laser diffraction. J. Geophys. Res. 113, C04023.

Almquist, C. W., March, P. A., Pearson, H. S., Fransen, H. W., Whitehead, B.H. (1995). The Sliding Gate Method for Hydroturbine Efficiency Testing. Proc. WaterPower 95, American Society of Civil Engineers, New York: 793–801.

Bajracharya, T. R., Acharya, B., Joshi, C. B., Saini, R. P., Dahlhaug, O. G. (2008). Sand erosion of Pelton turbine nozzles and buckets: A case study of Chilime Hydropower Plant. Wear 264(3-4): 177–184.

Bishwakarma, M. B., Støle, H. (2008). Real-time sediment monitoring in hydropower plants. J. Hydr. Res. 46(2): 282–288.

Boes, R. (2010). Kontinuierliche Messung von Schwebstoffkonzentration und -korngrössenverteilung im Triebwasser und Quantifizierung der Hydroabrasion an einer Peltonturbine. «Wasser Energie Luft» 102(2): 101–107.

Boes, R. M., Felix, D., Albayrak, I. (2013). Schwebstoffmonitoring zum verschleissoptimierten Betrieb von Hochdruck-Wasserkraftanlagen. «Wasser Energie Luft» 105(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. und Karelin V. Y. (eds.), Abrasive Erosion & Corrosion of Hydraulic Machinery (pp. 155–233). London: Imperial College Press.

Cateni, A., Magri, L., Grego, G. (2008). Optimization of Hydro Power Plants Performance – Importance of rehabilitation and maintenance in particular for the runner profiles. Proc. 7th Intl. Conf. on Hydraulic Efficiency Measurements, IGHEM, Milano.

Costa, L. I., Storti, G., Lüscher, B., Gruber, P., Staubli, T. (2012). Influence of solid particle parameters on the sound speed and attenuation of pulses in ADM. J. of Hydrologic Eng. 17(10): 1084–1092.

DWA (2006). Entlandung von Stauräumen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland.

Felix, D., Albayrak, I., Boes, R.M., Abgottspon, A., Deschwanden, F., Gruber, P. (2013a). Measuring Suspended Sediment: Results of the first Year of the Case Study at HPP Fieschertal in the Swiss Alps. Proc. Hydro 2013, Innsbruck, Austria: paper no. 18.03.

Felix, D., Albayrak, I., Boes, R. M. (2013b). Laboratory investigation on measuring suspended sediment by portable laser diffractometer (LISST) focusing on particle shape. Geomarine Letters 33(6): 485–498.

Felix, D., Albayrak, I., Boes, R. M. (2014). Variation des Feinsedimentgehalts im Triebwasser infolge Speicherstollenbewirtschaftung. VAW-Mitteilungen 227, Boes R. (ed.), ETH Zürich: 183–193.

Grein, H., Krause, M. (1994). Research and Prevention of Hydroabrasive Wear. Proc. 17th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery. Beijing, China.

Gummer, J. H. (2009). Combating Silt Erosion in Hydraulic Turbines. Hydro Review Worldwide 17(1).

Hassler, P., Schnablegger, W. (2006). Pelton runner maintenance and its results at Verbund-Austrian Hydro Power AG. Proc. 14th Intl. Seminar on Hydropower Plants, Doujak E. (ed.), Vienna, Austria: 445–454.

IEC 62364 (2013). Guide for dealing with hydroabrasive erosion in Kaplan, Francis, and Pelton turbines. International Electrotechnical Commission, Geneva.

Kalberer, A. (1988). Erfahrungen mit neuartigen Beschichtungen im Wasserturbinenbau. Intl. Symposium über Erosion, Abrasion und Kavitation im Wasserbau. VAW-Mitteilungen 100, Vischer D. (ed.), ETH Zürich: 245–258.

Lazzaro, B., Rossi, G. (1995). Effetti del deterioramento sulle prestazioni delle macchine idrauliche. L'Energia elettrica. Associazione elettrotecnica ed elettronica italiana, Milano. 72(4): 49–52.

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

Ortmanns, C. (2006). Entsander von Wasserkraftanlagen. VAW-Mitteilungen 193, Minor H.-E. (ed.), Diss. ETH Zürich.

Singh, M., Banerjee, J., Patel, P. L., Tiwari, H. (2013). Effect of silt erosion on Francis turbine: a case study of Maneri Bhali Stage-II, Uttarakhand, India. ISH Journal of Hydraulic Engineering 19(1): 1–10.

Strübin, P., Bussy, M. (1988). Erosionserscheinungen im Kraftwerk Mörel der Aletsch AG aus Sicht der Betriebsleitung. VAW-Mitteilungen 100, Vischer D. (ed.), ETH Zürich: 95–123.

Sulzer Hydro (1996). Ein semi-empirisches Abrasionsmodell zur Vorhersage von hydro-abrasivem Verschleiss an X5 CrNi 13/4 Stahl. Report STT.TB94.020.

Sutherland, T. F., Lane, P. M., Amos, C. L., Downing, J. (2000). The calibration of optical backscatter sensors for suspended sediment of varying darkness levels. Marine Geology 162: 587–597.

Thomann, P. (1988). Erosion an den Pelton-Rädern der Zentrale Stalden der Kraftwerke Mattmark AG. VAW-Mitteilungen 100, Vischer D. (ed.), ETH Zürich: 151–160.

Winkler, K., Dekumbis, R., Wedmark, A. (2010). Finding a way to estimate the amount of abrasion. Proc. Hydro Conference, Lisbon, Portugal.

Winkler, K., Dekumbis, R., Rentschler, M., Parkinson, E., Garcin, H. (2011). Understanding hydroabrasive erosion. Proc. Hydro Conference, Prague, Czech Republic.

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. J. Geophys. Res. 112: F04010.

Wren, D., Barkdoll, B., Kuhnle, R., Derrow, R. (2000). Field Techniques for Suspended-Sediment Measurement. J. of Hydraul. Eng. 126(2): 97–104.

Anschrift der Verfasser

André Abgottspon, Prof. Dr. *Thomas Staubli*, Hochschule Luzern Technik & Architektur, Kompetenzzentrum Fluidmechanik und Hydromaschinen, CH-6048 Horw

andre.abgottspon@hslu.ch

thomas.staubli@hslu.ch

David Felix, Prof. Dr. *Robert Boes*

ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)

CH-8093 Zürich

felix@vaw.baug.ethz.ch

boes@vaw.baug.ethz.ch