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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 105 (2013)

Heft: 1

Artikel: Schwebstoffmonitoring zum verschleissoptimierten Betrieb von Hochdruck-Wasserkraftanlagen

Autor: Boes, Robert M. / Felix, David / Albayrak, Ismail

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941541

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 07.01.2026

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

Schwebstoffmonitoring zum verschleiss-optimierten Betrieb von Hochdruck-Wasserkraftanlagen

Robert M. Boes, David Felix, Ismail Albayrak

Zusammenfassung

Die Schädigung von Wasserkraftturbinen durch feinkörnige, harte mineralische Partikel im Wasser (Schwebstoffe) ist bei gewissen Hochdruck-Wasserkraftanlagen sowohl in der Schweiz als auch weltweit ein wirtschaftlich bedeutender Aspekt bei der Planung und im Betrieb. Durch die zunehmende Variabilität der Niederschläge und den Gletscherrückgang gewinnt diese Problematik an Bedeutung.

Für eine wirtschaftliche Optimierung ist es erforderlich, die Schwebstoffführung im Triebwasser, die Schädigung an den Turbinen (Hydroabrasivverschleiss) und die damit einhergehende Wirkungsgradabnahme zu quantifizieren. Als Grundlage für Verbesserungen des Betriebs und der Planung von Revisionsarbeiten ist eine Überwachung (Monitoring) der relevanten Parameter, möglichst in Echtzeit, wünschenswert.

Im vorliegenden Artikel werden Methoden des Schwebstoffmonitorings und die Notwendigkeit von Kalibrierungen der Messgeräte, vorzugsweise unter kontrollierten Laborbedingungen, aufgezeigt. Weiter werden Lösungsansätze zur Minderung der Hydroabrasion, insbesondere die Option eines wirtschaftlich auch bezüglich des aktuellen Verschleisses optimierten Anlagenmanagements, d.h. die Abschaltung von Turbinen während Schwebstoffkonzentrationsspitzen, diskutiert.

Résumé

Des dégâts aux turbines hydrauliques causés par des particules solides fines en suspension dans l'eau turbinée sont économiquement importants et doivent être pris en compte lors de la conception et l'exploitation de certains aménagements hydrauliques en Suisse et dans le monde. En raison de la variabilité croissante des précipitations et du recul des glaciers cette problématique ne cesse de prendre de l'ampleur.

Pour une optimisation économique il faut quantifier le transport solide en suspension dans l'eau turbinée, les dégâts aux turbines (l'usure par hydro-abrasion) ainsi que la réduction correspondante en rendement. Une surveillance des paramètres en jeu est désirable, si possible en temps réel, en tant que données de base pour l'exploitation et la planification des travaux de révision optimisées.

Le présent article décrit des méthodes actuelles pour la surveillance des solides en suspension et la nécessité d'étalonner les instruments, de préférence sous des conditions contrôlées en laboratoire. En plus, des approches pour diminuer l'hydro-abrasion, particulièrement l'option d'une exploitation économiquement optimisée entre autres par rapport à l'usure actuelle, c'est-à-dire l'arrêt des machines pendant des pointes de transport solide en suspension, sont discutées.

1. Einleitung

Der vorliegende Artikel bezieht sich auf einen am 8.11.2012 in Horw im Rahmen der Fachtagung Wasserkraft des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbands (SWV) gehaltenen Vortrag.

1.1 Hydroabrasion an Wasserkraftanlagen

Hydroabrasivverschleiss wird nach DIN 50320 (1979) definiert als Schaden an Oberflächen von Bau- und Anlagenteilen, der durch den Transport von Feststoffpartikeln in Flüssigkeiten auftritt. Verallgemeinert werden in diesem Zusammenhang oft die Begriffe der (Hydro-)Abrasion und der Erosion verwendet. Die Wasserkraft ist räumlich und zeitlich unterschiedlich stark von Hydroabrasivverschleiss betroffen. Bei Wasserkraftwerken an Gewässern mit hohem Feststoffgehalt, wie sie typischerweise im Gebirge dominant sind, tritt Hydroabrasion vor allem an Anlagen mit grossen Fallhöhen und ohne grösseren Kopfspeicher (Laufkraftwerke) auf, wo sich der Grossteil der als Schwebstoffe mittransportierten Feinanteile der Sedimente nicht in Speichern oder Entsandern absetzt und im Triebwasser mittransportiert wird. Zeitlich beschränkt sich der Verschleiss auf die sog. Schwebstoffsaison, also auf die Zeiten hohen Feststofftransportes während Schnee- und Gletscherschmelze bzw. während (oft nur kurz andauernden) Hochwassern, z.B. nach Gewitterereignissen. Peltonturbinen sind am meisten betroffen, da diese bei grossen Fallhöhen eingesetzt werden und die Beanspruchung der Turbinenbauteile infolge der hohen Strahlgeschwindigkeiten gross ist. Am meisten werden die Haupt- und Nebenschneiden der Peltonbecher beschädigt, an denen der eintretende Wasserstrahl aufgeteilt wird *(Bild 1)*. Die anfangs scharfen Mittelschneiden und Bechereintrittskanten werden im Lauf des Betriebs zunehmend breiter, was zu Sekundärströmungen führt, die Kavitationserosion zur Folge haben können. Bei unbeschichteten Laufrädern kommt es weiter zu flächigem Abtrag im Bechergrund. Die Auswirkungen werden schliesslich für den Betreiber anhand von Produktionsverlusten infolge Wirkungsgradabnahmen spürbar.

Die wesentlichen Faktoren für Hydroabrasionsschäden an Wasserturbinen (Sulzer Hydro 1996 in DWA 2006, Winkler et al. 2011) sind die

- Relativgeschwindigkeit u zwischen Strömung und Turbinenbauteil,
- in der Regel zeitlich sehr veränderliche Schwebstoffkonzentration C,
- zeitlich ebenfalls veränderliche Partikelgrösse,
- für ein gegebenes Einzugsgebiet eher

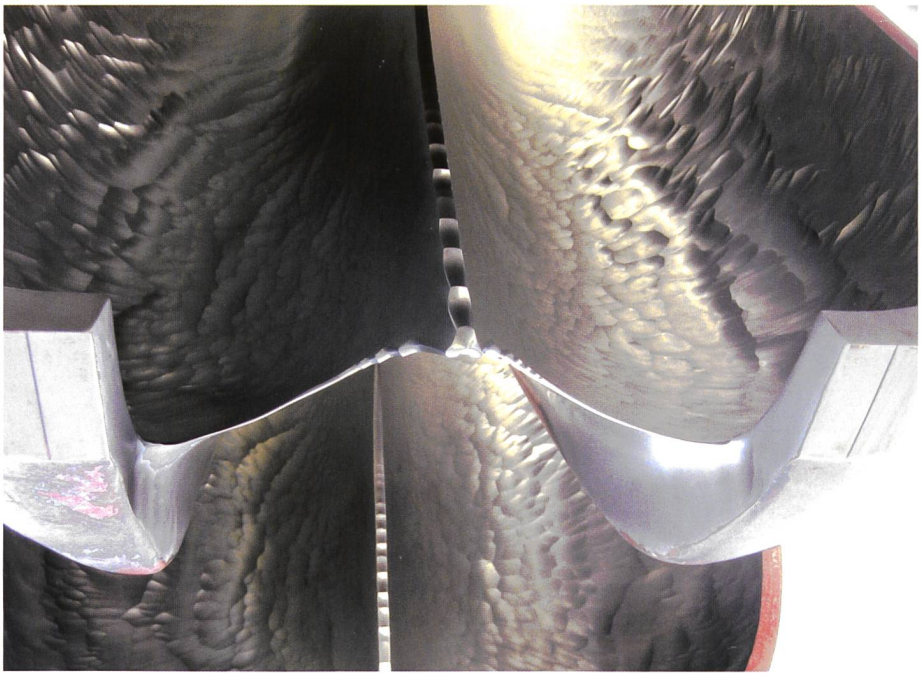

Bild 1. Becher eines unbeschichteten Pelton-Laufrads mit Verschleiss-Schäden (Ausstellungsobjekt bei der Staumauer Emosson, Foto: VAW).

konstante Partikelform (insbesondere kantige Partikel),

- Partikelhärte (vor allem Mohshärte grösser 6, d.h. Quarz- und Feldspatgehalt, da diese Minerale härter sind als das übliche Turbinengrundmaterial).

Um den Prozess des Hydroabrasivverschleisses besser zu verstehen, müssen die Schwebstoffeigenschaften im Triebwasser, der Materialverlust an den Turbinen und die Wirkungsgradreduktion quantifiziert werden. Solche Datensätze können zum Verifizieren und Weiterentwickeln von Prognosemodellen des Turbinenverschleisses (z.B. Nozaki 1990, Sulzer Hydro 1996 in DWA 2006) verwendet werden. Dazu wurde ein interdisziplinäres Forschungsprojekt von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich initiiert, im Rahmen dessen gemeinsam mit dem Kompetenzzentrum Fluidmechanik & Hydromaschinen der Hochschule Luzern sowie den Gommerkraftwerken (GKW), der BKW FMB Energie AG, Bern, und der Andritz Hydro AG, Kriens, u.a. Prototyp-Untersuchungen an einer bestehenden Kraftwerksanlage (KW Fieschertal, Wallis) durchgeführt werden. Die dabei verwendeten Messeinrichtungen für das Monitoring von Schwebstoffen wurden vorgängig im Labor in einem Mischtank mit verschiedenen Partikelsorten untersucht, bevor sie im Sommer 2012 an der Wasserkraftanlage Fieschertal im Wallis, einer stark von Hydroabrasivverschleiss betroffenen Hochdruckanlage mit stark vergletschertem Einzugsgebiet ohne Speichersee, basierend auf Vorarbeiten von Abgottspon (2011) eingebaut wurden. Die nachfolgend gezeigten ersten Resultate des laufenden Forschungsprojekts beziehen sich sowohl auf die Labor- als auch Prototypversuche (Felix et al. 2012a und b).

1.2 Lösungsansätze zur Minderung des Hydroabrasivverschleisses

Zur Verminderung des Hydroabrasivverschleisses gibt es verschiedene Ansätze, die entweder eine Verringerung der Beanspruchung oder eine Erhöhung des Widerstands bewirken:

a. Optimierung der Feststoffabscheidung (baulich) und des Turbinendesigns (elektromechanisch) (Verringerung der Einwirkungen),
b. Verbesserung der Turbinenmaterialien, z.B. mittels den heute üblichen rund 300 µm starken Wolframkarbid-Beschichtungen (Erhöhung des Widerstands),
c. Verschleissoptimierte Betriebsweise (Verringerung der Einwirkungen).

Die Schwebstoffbelastung (Konzentrationen und Partikelgrössen) kann bei Neuanlagen in einem gewissen Mass über die Absetzwirkung von Entsandern bzw. Kopfspeichern (Massnahmentyp a) beeinflusst werden (Ortmanns 2006). Solchen Anlagen zur Feststoffabscheidung sind aber wirtschaftliche, z.T. auch räumlich-topographische Grenzen gesetzt. Für bestehende Anlagen kann eine verbesserte Feststoffabscheidung in der Regel nur mit beträchtlichem bautechnischen Aufwand erreicht werden. Weitere Parameter wie Kornhärte, -form und Relativgeschwindigkeit zwischen Strömung und Laufrad spielen zwar, wie oben erwähnt, ebenfalls eine Rolle hinsichtlich Verschleiss, können aber praktisch nicht beeinflusst werden, da sie durch die Geologie des Einzugsgebiets bzw. die Fallhöhe (Lage von Fassungen und Maschinenhäusern) gegeben sind. Da der Massnahmentyp b trotz fallweise deutlicher Erhöhung der Turbinen-Standzeiten oft nicht allein das erhoffte Ergebnis bringt (und auch die Laufradrevisionen deutlich aufwändiger macht), soll der Fokus in diesem Beitrag auf einen verschleissoptimierten Anlagenbetrieb (Massnahmentyp c) gelegt werden. Als Voraussetzung dazu müssen die wichtigen Einflussgrössen des Hydroabrasivverschleisses, insbesondere die Partikelkonzentration und -grösse, in Echtzeit bekannt sein, was besondere Anforderungen an die Messtechnik stellt.

Ein kontinuierliches Schwebstoffmonitoring und vorübergehende Kraftwerksabstellungen aufgrund temporär hoher Stromgestehungskosten infolge starkem Hydroabrasivverschleiss sind bei Wasserkraftanlagen noch die Ausnahme. Temporäre Kraftwerksabschaltungen oder das vorübergehende Ausleiten von Fassungen werden bisher vor allem während starkem Geschiebetrieb, der den Betrieb der Wasserkraftanlage erschwert oder verunmöglicht, praktiziert (z.B. mit Geschiebe aufgefüllte oder überschüttete Fassungen).

2. Methoden des Schwebstoffmonitorings

Beim Schwebstoffmonitoring ist zunächst zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Messmethoden zu unterscheiden. Zu letzteren zählen klassische Schöpfproben, bei denen mit einem Schöpfgefäss von Hand ein Wasservolumen entnommen wird und entweder mittels Imhoff-Trichter oder im Nachgang im Labor mittels Filtrierung und/oder Ofentrocknung die Schwebstoffkonzentration und ggf. die Korngrössenverteilung bestimmt werden. Eine Weiterentwicklung sind automatische Probennahmegeräte, welche mittels einer Pumpe z.B. bis zu 24 Flaschen abfüllen *(Bild 2)*. Der Zeitpunkt der Entnahme kann durch einen Computer gesteuert werden, beispielsweise auch als Funktion der Trübung, die dann mit einem anderen Gerät in Echtzeit gemessen werden muss.

Kontinuierliche Schwebstoffmessungen sind im Wesentlichen auf optischem oder akustischem Weg durchführbar. Zu den optischen Geräten zählen die

Bild 2. Programmierbarer Wasserprobennehmer, im Bild mit abgehobenem Deckel, mit Pumpe und Vorrichtung zum Füllen von bis zu 24 Flaschen (Foto: VAW).

weithin eingesetzten Trübungssonden, sei es nach dem Streu- oder Durchlichtverfahren. Die Ausgabe der Messwerte erfolgt hierbei in Trübungseinheiten (z.B. FNU = Formazine Nephelometric Unit; CU = Concentration Unit). Bei konstanten und bekannten Partikeleigenschaften (insbesondere Grösse und Form) können die Messwerte von Trübungssonden in eine Schwebstoff-Massenkonzentrationen (z.B. [mg/l]) umgerechnet werden, bzw. diese Kalibrierung kann im zugehörigen Messumformer hinterlegt werden. In der Realität ist aber insbesondere die Partikelgrösse zeitlich oft sehr variabel, was ohne zusätzliche Informationen zu beträchtlichen Unsicherheiten bei der Bestimmung der Schwebstoffkonzentration führen kann. Anhand von Schöpfproben können die kontinuierlichen Messungen von Trübungssonden besser interpretiert werden.

Eine andere optische Messmethode, die Laserdiffraktometrie, ermöglicht neben der Konzentrationsmessung zusätzlich die Bestimmung von Partikelgrössen und deren Verteilung. Dabei wird ein Laserstrahl durch die Wasser-Sediment-Suspension gesendet und die an den Partikeln gestreute Strahlung auf verschiedenen Ringen detektiert. Über das gemessene Streuungsmuster lassen sich die Partikelgrössenverteilung und die Volumenkonzentration der Partikel bestimmen, welche das gemessene Streuungsmuster verursacht hätten (Agrawal et al. 2011). Das im KW Fieschertal – nach Wissen der Autoren erstmals an einer Schweizer Wasserkraftanlage – installierte in-situ Laserdiffraktometer (LISST-100X, Typ C) weist einen nominellen Korngrössenmessbereich von 2.5 bis 500 µm auf.

Bei Wasserkraftwerken wird der turbinierte Volumenstrom oft mit akustischer Durchflussmessung bestimmt. Dabei werden Ultraschallpulse diagonal durch die Druckleitung geschickt. Wenn das Wasser Schwebstoffe enthält, wird das Empfangssignal in Funktion der Schwebstoffkonzentration und der Partikelgrösse abgeschwächt. Da solche Einrichtungen für die akustische Durchflussmessung in vielen Kraftwerken vorhanden sind, ist – basierend auf der Amplitudendämpfung – zumindest ein qualitatives Schwebstoffmonitoring im Sinne von Warnungen für den Kraftwerksbetrieb denkbar. Diese Methode wird derzeit im Rahmen des Forschungsprojekts weiter untersucht.

3. Kalibrierung von Schwebstoffmessgeräten

Wie oben ausgeführt ist eine Kalibrierung von kontinuierlichen Schwebstoffmessgeräten unumgänglich, wenn eine der Realität nahe kommende Massenkonzentration C bestimmt werden soll. Die in der Regel gemessenen Trübungswerte müssen dazu zunächst in die Einheit einer Massenkonzentration umgerechnet werden, was besonders mit der Korngrösse und -form, aber auch mit den optischen Eigenschaften (z.B. Farbe) der Partikelminerale (Gippel 1995, Sutherland et al. 2000) variiert. Für die Laborversuche wurden mineralische Partikel *(Bild 3)*, die kommerziell erhältlich und mit den Partikeln in Fieschertal vergleichbar sind (Granitge-

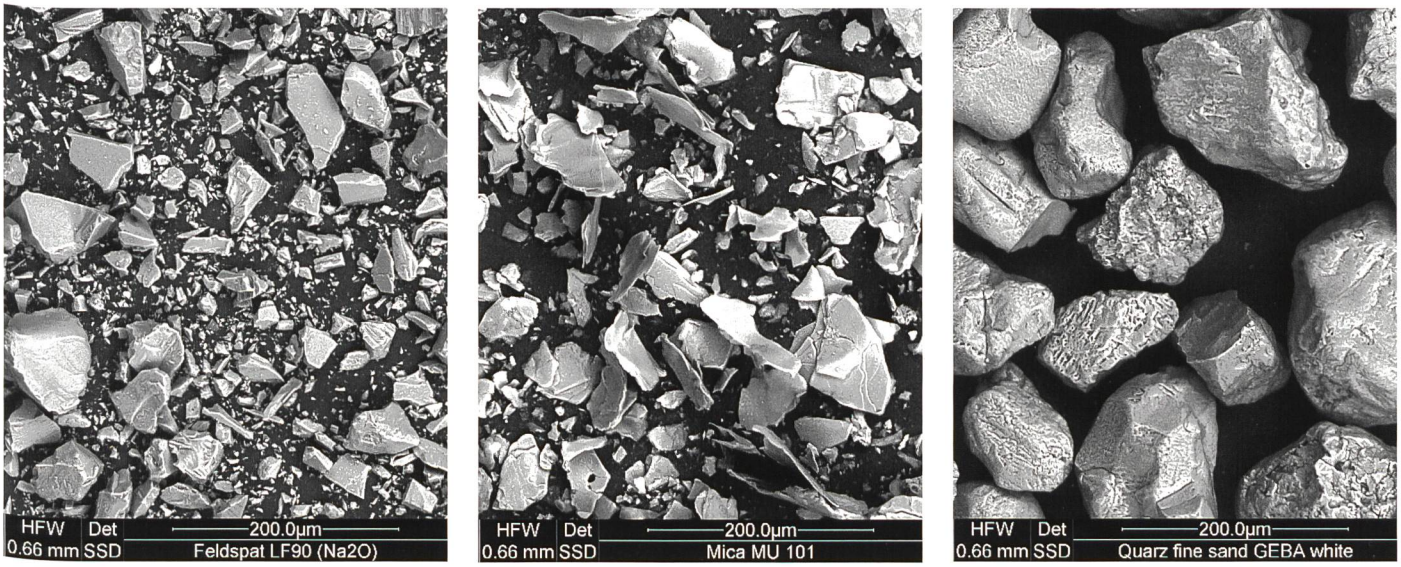

Bild 3. Mineralische Partikel, welche in den Laborversuchen betreffend Schwebstoffmessung verwendet wurden: Feldspatpulver (links, d_{50} = 34 µm), Glimmerpulver (Mitte, «d_{50}» = 45 µm) und Quarzfeinsand (rechts, d_{50} = 147 µm) (Bilder: VAW und IfB, ETH Zürich).

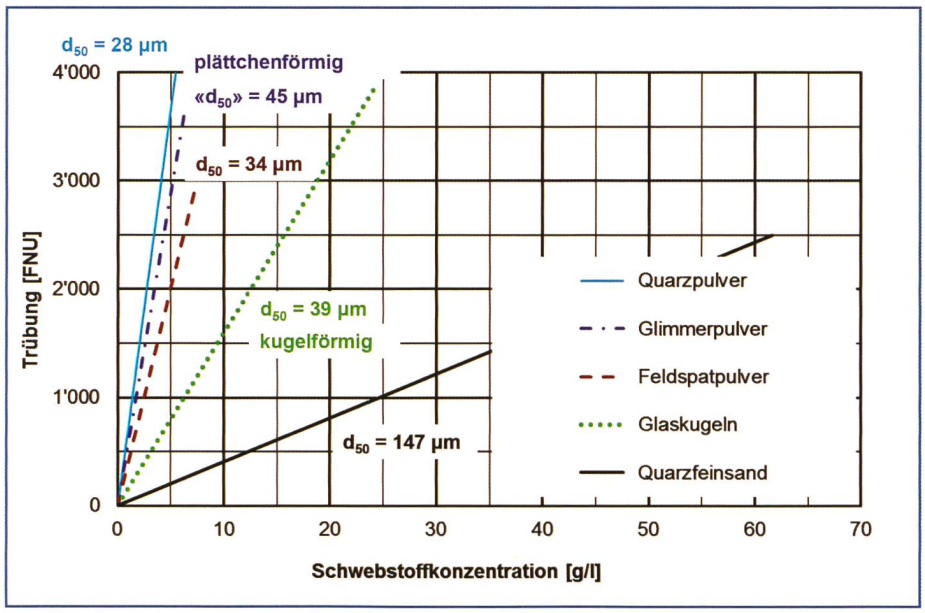

Bild 4. Trübungswerte, welche mit einer Trübungssonde (Hach-Lange Solitax ts-line sc) in Suspensionen mit verschiedenen Partikelsorten gemessen wurden (nach Felix et al. 2012a).

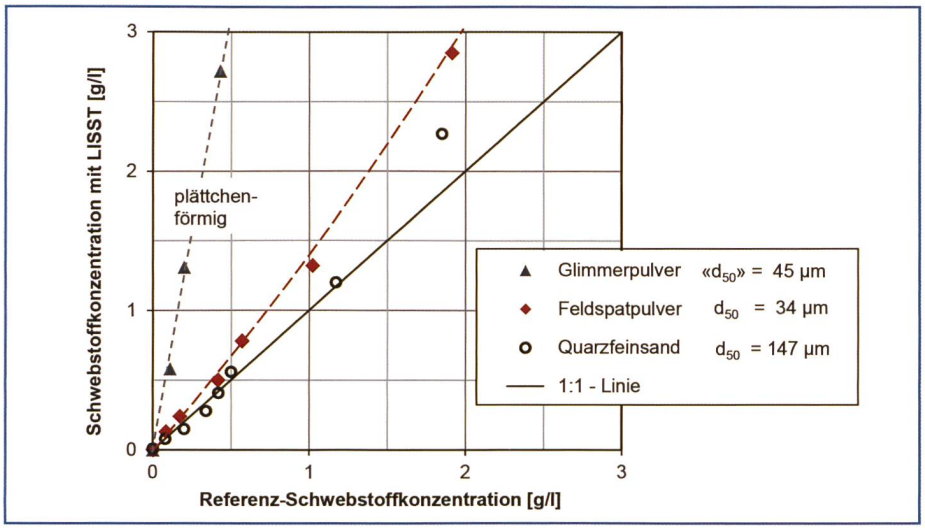

Bild 5. Mit einem tragbaren Laserdiffraktometer (Sequoia LISST-100X) bestimmte Schwebstoffkonzentrationen im Vergleich zur Referenz-Konzentration (nach Felix et al. 2012b).

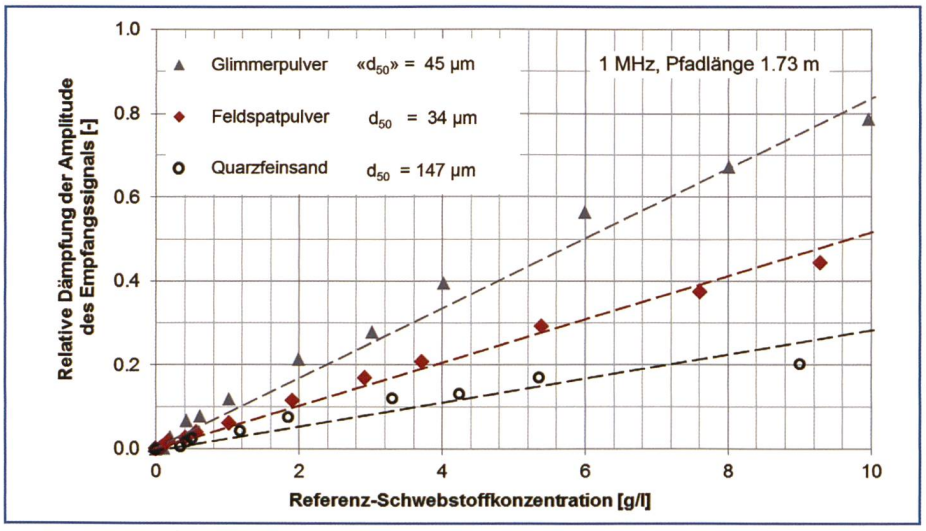

Bild 6. Relative Dämpfung von akustischen Ultraschallsignalen (akustische Durchflussmesseinrichtung, Rittmeyer) im Vergleich zur Referenz-Konzentration (nach Felix et al. 2012b).

biet mit Quarz, Feldspat und Glimmer), sowie Feinsedimente vom Unterwasserkanal des KW Fieschertal verwendet. Für Referenzzwecke kamen auch Glaskugeln zum Einsatz. Die bei *Bild 3* angegebenen Massen-Median-Korndurchmesser d_{50} stammen von Messungen mit einem nicht tragbaren Laserdiffraktometer am Institut für Geotechnik (IGT) der ETH Zürich, welche als Referenz verwendet wurden. *Bild 3* wurde mittels Rasterelektronenmikroskop am Institut für Baustoffe (IfB) der ETH Zürich aufgenommen. Weitere Angaben zu den durchgeführten Laborversuchen sind in Felix et al. (2012a und b) publiziert.

Bild 4 zeigt den deutlichen Einfluss der Korngrösse auf die Trübung. Die Korngrösse wird hier durch den Massen-Median-Durchmesser d_{50} ausgedrückt. Weiter sind in *Bild 4* Einflüsse der Partikelform zu erkennen, z.B. bei Vergleich der Linien für Glimmerpulver mit plättchenförmigen Partikeln und für Glaskugeln, die beide etwa denselben d_{50}-Wert aufweisen.

In *Bild 5* sind mit dem tragbaren Laserdiffraktometer gemessene Schwebstoffkonzentrationen im Vergleich zu den Referenz-Konzentrationen dargestellt. Letztere wurden durch Wägung von ofengetrockneten Schöpfproben, die auf der Höhe der Instrumente aus dem Mischtank bei den jeweiligen Konzentrationsstufen entnommen wurden, bestimmt. Beim Laserdiffraktometer ist die Bestimmung der Schwebstoffkonzentration theoretisch nicht von der Korngrösse abhängig. Dies wird durch die Punkte von Quarzfeinsand und Feldspatpulver, welche trotz unterschiedlichen Korndurchmessern in *Bild 5* relativ nahe beieinander liegen, bestätigt. Das Vorhandensein von feinen Partikeln, die kleiner sind als der Bereich der messbaren Partikel (< 2.5 µm), kann aber dazu führen, dass die Schwebstoffkonzentration überschätzt wird. Auch bei der Laserdiffraktometrie führt eine Kornform, welche stark von der in der Auswertungssoftware zugrunde gelegten abweicht, zu Fehlern bei der Bestimmung der Schwebstoffkonzentration. Die Streuung der Versuchsdaten, insbesondere bei gröberen Partikeln, kann den lokalen und zeitlichen Konzentrationsunterschieden in der turbulenten Suspension zugeschrieben werden. Es ist bemerkenswert, dass beim Laserdiffraktometer lediglich mit Verwendung der Werkkalibrierung, d.h. unter Annahme von unregelmässig geformten Partikeln mit einer Dichte von 2.65 t/m^3, die dargestellten Schwebstoffkonzentrationen resultierten, die mit Ausnahme des Glimmers relativ nahe an den erwarteten

Schwebstoffkonzentrationswerten liegen (1:1-Linie).

Auch die akustische Messmethode ist bei der Konzentrationsbestimmung nicht frei vom Effekt der genannten Partikeleigenschaften, was aus *Bild 6* hervorgeht, jedoch sind die Unterschiede zwischen den Kalibrierkurven geringer als bei Trübungssonden.

Bild 7 verdeutlicht, dass bei der Messung der Partikelgrössen mittels tragbarem Laserdiffraktometer die Breite der Korngrössenverteilung, d.h. die Stufung, gut erkannt wurde. Die Messwerte liegen sowohl für Feldspatpulver als auch für Quarzfeinsand in der richtigen Grössenordnung. Im Fall von Glimmerpulver mit der speziellen plattigen Partikelform gibt es eine systematische Abweichung von den Referenzmessungen, wobei zu bedenken ist, dass die Definition des «Durchmessers» eines plattigen Teilchens unklar ist. Zu den Referenzmessungen (durchgeführt mit nicht-tragbarem Laserdiffraktometer am IGT der ETH Zürich) ist zu bemerken, dass diese Proben zu Beginn der Versuchsreihen von den Behältern der Partikelsorten trocken entnommen wurden. Die Abweichungen zwischen den im Mischtank gemessenen Korngrössenverteilungen von den Referenzmessungen, insbesondere bei gröberen Fraktionen, sind vermutlich dem Phänomen zuzuschreiben, dass im Mischtank gröbere Partikel trotz Rührwerk tendenziell im unteren Bereich der Wassersäule, unterhalb des Messkopfs des Laserdiffraktometers, vorhanden waren (vertikales Konzentrationsprofil) oder nicht vollständig in Schwebe gehalten werden konnten.

4. Option temporärer Turbinenabschaltungen während Schwebstoffspitzen

Wie in Abschnitt 1 beschrieben, sind für den Hydroabrasivverschleiss von Turbinen insbesondere die Schwebstoffkonzentrationen (bzw. -frachten) und Partikelgrössen massgebend. Stark erhöhte Konzentrationen im Triebwasser kommen in der Regel bei grösseren Abflussereignissen vor, z.B. nach Starkregen wie Gewittern, und weisen meist eine kurze Dauer auf. Die in *Bild 8* und *Bild 9* zu erkennenden Konzentrationsspitzen am Kraftwerk Dorferbach in Tirol, Österreich, haben beispielsweise typische Dauern von wenigen Stunden, innerhalb derer eine vergleichbare Sedimentfracht über die Turbine abgeleitet wird wie bei Normalbetrieb während mehrerer Tage. Um diese Schweb-

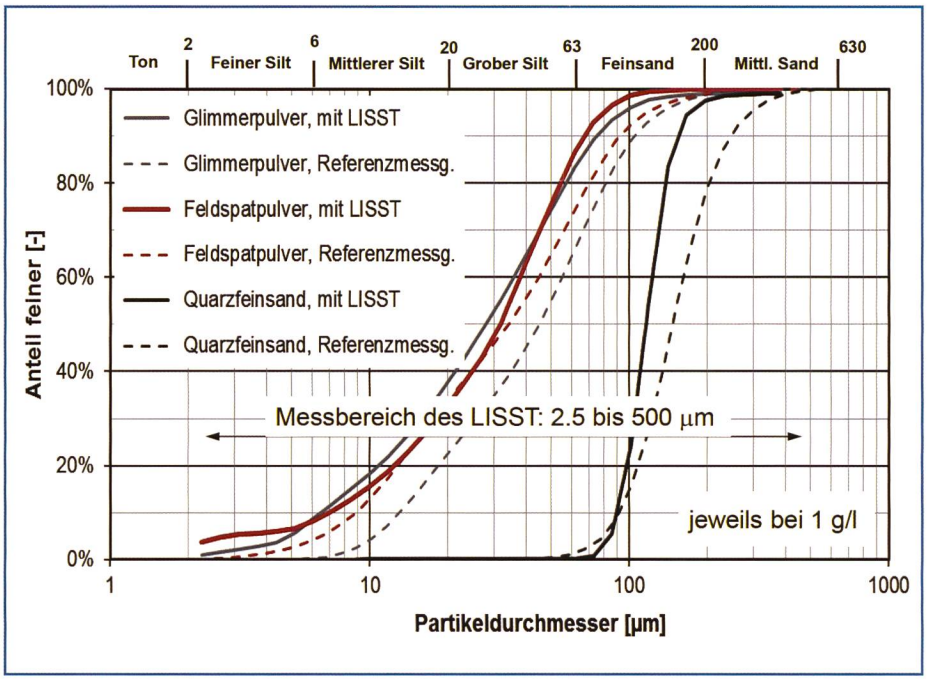

Bild 7. Mit tragbarem Laserdiffraktometer (Sequoia LISST-100X) ermittelte Korngrössenverteilung im Vergleich zu Referenz-Messungen (nach Felix et al. 2012b).

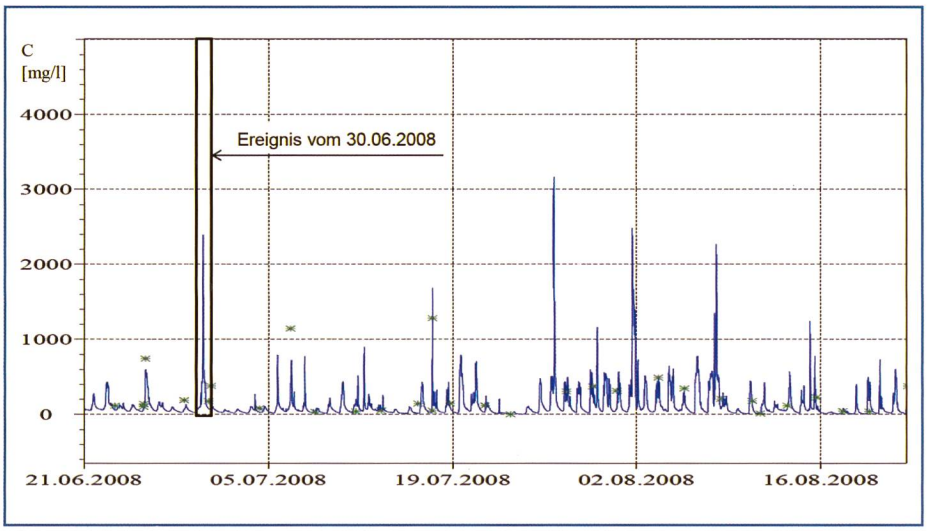

Bild 8. Verlauf der Schwebstoffkonzentration im Triebwasser des KW Dorferbach im Sommer 2008, (–) Daten der Trübungssonde nach Kalibrierung anhand von (*) Einzelproben (nach Boes 2010).

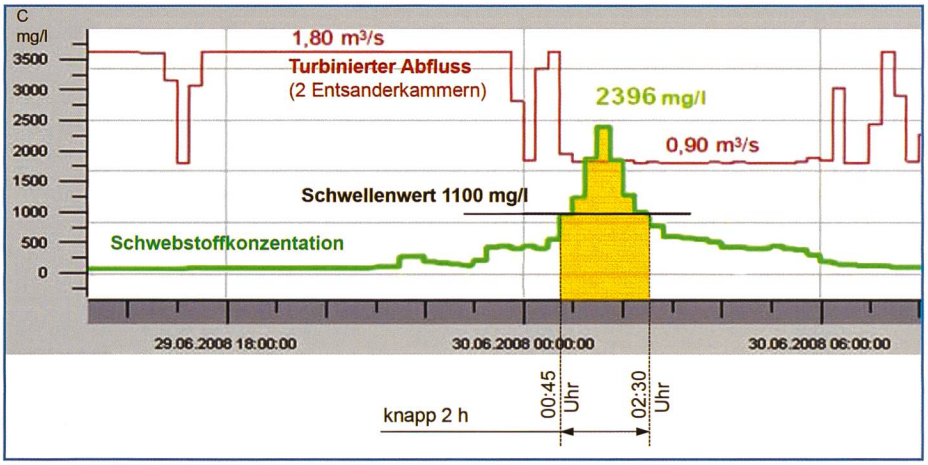

Bild 9. Verlauf der Schwebstoffkonzentration (linke Achse, gemessen mit kalibrierter Trübungssonde, Ausschnitt aus Bild 8) und des Turbinendurchflusses Ende Juni 2008 und Angabe des Schwellenwerts für die vorübergehende Ausserbetriebnahme des KW Dorferbach (Quelle: TIWAG).

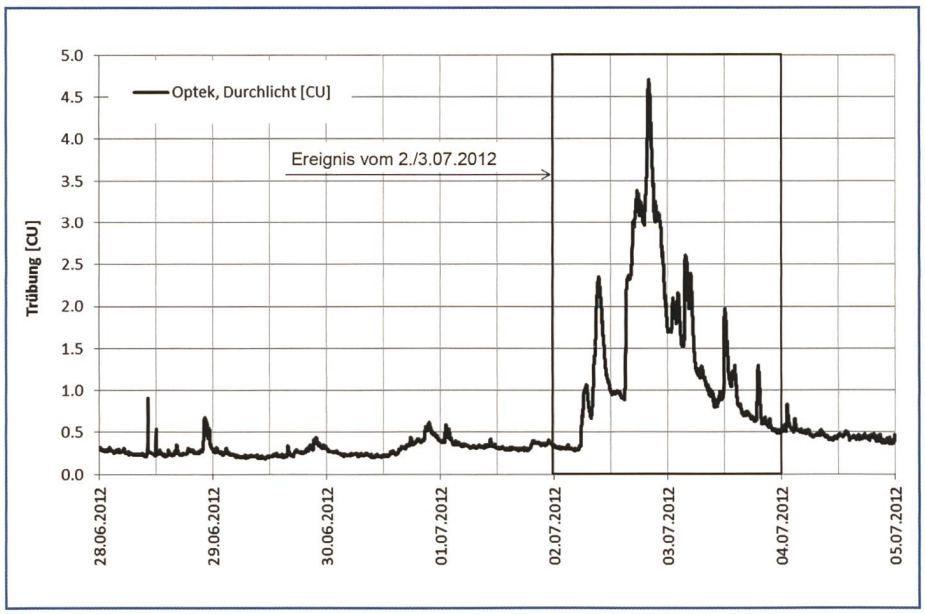

Bild 10. Verlauf der Trübung als Indikator für die Schwebstoffkonzentration im Triebwasser des KW Fieschertal Ende Juni/Anfang Juli 2012.

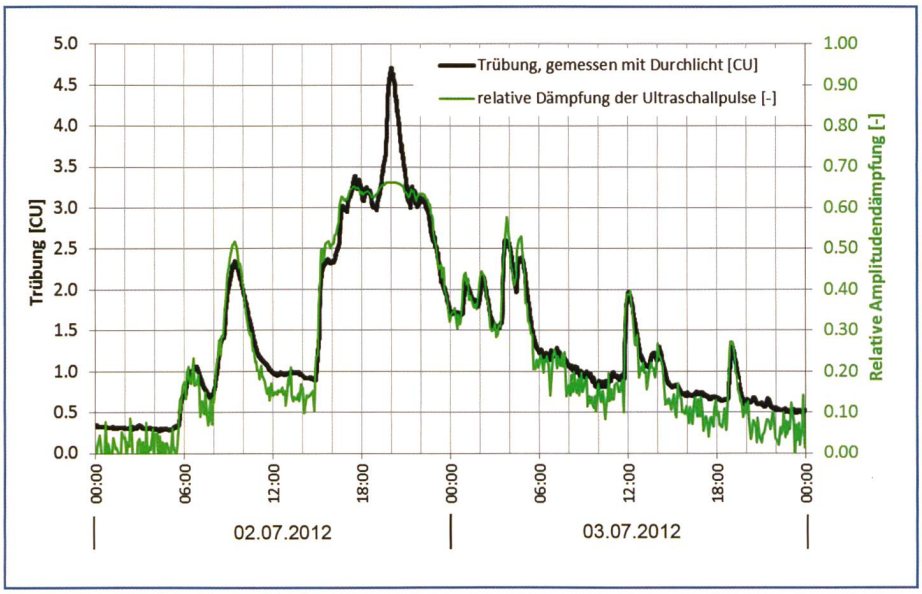

Bild 11. Verlauf der Trübung (linke Achse, Ausschnitt aus Bild 10) und der relativen Amplitudendämpfung von akustischen Ultraschallsignalen (rechte Achse) im Triebwasser des KW Fieschertal Anfang Juli 2012 (nach Felix et al. 2012b).

stoffbelastung zu reduzieren, liegt es daher nahe, eine von Hydroabrasion betroffene Wasserkraftanlage bei hoher Schwebstoffführung kurzzeitig ausser Betrieb zu nehmen, sofern dies von den übergeordneten Randbedingungen her möglich ist (Kraftwerkspark, Verbundnetz, Produktionsverpflichtungen, usw.). Dies bedingt jedoch einerseits ein verlässliches und kontinuierliches Schwebstoffmonitoring (Bishwakarma & Støle 2008), andererseits die Kenntnis von Grenzwerten bezüglich Konzentration und idealerweise auch der Korngrösse.

Die Grenz- oder Schwellenwerte sind eine Frage der betriebswirtschaftlichen Optimierung (vor allem Verlust an produzierter Energie während Turbinenabschaltungen vs. Einsparungen bei Laufradrevisionen), zu deren Beantwortung der quantitative Zusammenhang zwischen den oben erwähnten Parametern und dem Hydroabrasivverschleiss an Turbinen bzw. dessen Auswirkungen (Wirkungsgradminderung) bekannt sein muss, was – wie einleitend erwähnt – noch Gegenstand der Forschung ist. Auf Grundlage von kontinuierlichen Schwebstoffdaten sowie von Verschleissmessdaten, die in einem zeitlich engen Raster während der Sedimentsaison 2008 erhoben wurden, wurde für das KW Dorferbach ein Konzentrationsgrenzwert von 1100 mg/l im Triebwasser festgelegt, bei dessen Überschreiten das Kraftwerk ausser Betrieb genommen wird (Boes 2010). Mit dieser Massnahme konnten die Hydroabrasionsschäden markant reduziert werden (Götsch 2012). In diesem Fall erlaubte das umfangreiche Schwebstoff- und Verschleiss-Monitoring eine anlagenspezifische Kalibrierung eines Verschleiss-Prognosemodells und eine rechnerische Abschätzung der Entwicklung der Mittelschneidenbreiten des Peltonlaufrads in Abhängigkeit der Schwebstoffkonzentration. Dabei wurde ein empirisch gefundener Zusammenhang zwischen der Schwebstoffkonzentration und dem mittleren Partikeldurchmesser verwendet (Boes 2010).

Vom Triebwasser des KW Fieschertal liegen erste Schwebstoffdaten vor. Ein seltenes Hochwasserereignis (ca. 30- bis 50-Jährlichkeit im Goms) führte Anfang Juli 2012 zu extremen Schwebstoffkonzentrationen von mindestens 68 g/l in der Spitze (auf Grundlage von Schöpfproben ermittelt), was zu erheblichen Schädigungen der beschichteten, schon eine zeitlang in Betrieb stehenden Turbinenlaufräder führte. In *Bild 10* und *Bild 11* ist der zeitliche Verlauf der mittels Durchlichtverfahren gemessenen Trübung dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Trübung von den üblichen rund 0.2 bis 0.5 CU während des Ereignisses bis auf 4.7 CU anstieg, also um das rund 10-Fache *(Bild 10)*. *Bild 11* lässt zudem die gute Übereinstimmung der Trübungswerte mit der relativen Amplitudendämpfung der Ultraschallpulse erkennen. Dass die absolute Spitze mittels der akustischen Methode nicht aufgezeichnet werden konnte, hängt mit der vorhandenen Pfadlänge und der verwendeten Sendefrequenz zusammen. Von Mitte April 2012 bis unmittelbar nach diesem Hochwasser hat der Turbinenwirkungsgrad gemäss Indexwirkungsgradmessungen, die noch ausgewertet werden, relativ stark abgenommen. Es ist zu vermuten, dass ein Grossteil der Wirkungsgradabnahme in dieser Periode allein durch dieses Ereignis verursacht wurde.

Für den Fall derartiger Schwebstofftransportereignisse sollen hier exemplarisch zwei denkbare Varianten einer auch hinsichtlich aktuellem Turbinenverschleiss optimierten Betriebsweise des KW Fieschertal aufgezeigt werden. Die in *Bild 12* angenommenen Grenzwerte bezüglich Schwebstoffführung des Triebwassers beruhen vorerst auf der Beobachtung des Schwebstoffaufkommens in «normalen Sommerverhältnissen» und darauf aufgesetzten ereignisbedingten Schwebstofftransportspitzen. Im ersten fiktiven Szenario mit einem Trübungs-Schwellenwert von 3.0 CU für das Abstel-

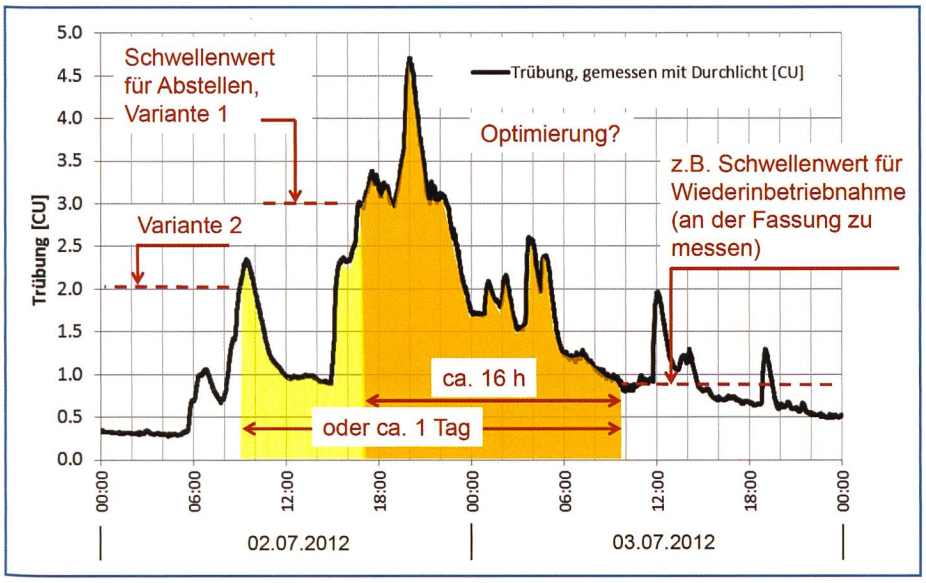

Bild 12. Verlauf der Trübung Anfang Juli 2012 (Ausschnitt aus Bild 10) und angenommene Schwellenwerte für die Ausser- und Wiederinbetriebnahme des KW Fieschertal in zwei fiktiven Szenarien.

len der beiden Maschinen, die nach dem Unterschreiten von 0.9 CU wieder in Betrieb genommen würden, würde die Anlage rund 16 h nicht produzieren. In einem zweiten Szenario würde die Anlage bereits b ei Überschreiten von 2.0 CU ausser Betrieb genommen, so dass die Turbinen mit weniger Schwebstoffen als bei Szenario 1 belastet würden. Mit demselben Grenzwert für die Wiederinbetriebnahme käme man auf einen Stillstand während rund eines Tages.

Die entsprechenden Produktionsausfälle würden sich bei einer Ausbauleistung des KW Fieschertal von 64 MW unter Ansatz eines Energiepreises von 60 CHF/MWh in den beiden oben genannten Szenarien auf gut 60 bzw. 90 kCHF belaufen. Obwohl dies zunächst hoch erscheinen mag, relativieren sich diese Werte bei einem Vergleich mit typischen Revisionskosten von mehreren 100 kCHF für derartige Pelton-Laufräder. Zudem verursacht ein Laufradwechsel, der infolge eines unvorhergesehenen Schwebstoffereignisses während der Volllastzeit erforderlich wird, bei einem Zeitbedarf von rund 16 h bei diesem Laufkraftwerk Produktionsausfallkosten von gut 30 kCHF. Laufradwechsel erfolgen normalerweise während der Niederwasserperiode, wenn eine Maschine ohne Produktionsausfall ausser Betrieb genommen werden kann.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Schwebstoffe für eine solche Betriebsweise nicht nur im Triebwasser, sondern auch an der Wasserfassung gemessen werden müssen, um die Wiederinbetriebsetzung des Kraftwerks in Abhängigkeit des aktuellen Schwebstoffaufkommens im Gewässer zu ermöglichen, da ja nach dem Abstellen der Turbinen kein Wasser mehr im Triebwasserweg fliesst. Weiter sei erwähnt, dass die Wiederinbetriebnahme einer grösseren Kraftwerksanlage, die bei hoher Schwebstoffkonzentration ausser Betrieb genommen wurde, mit einigem Arbeitsaufwand verbunden sein kann (z.B. Entfernen von Ablagerungen in Hilfseinrichtungen). Der Aufwand für die Wiederinbetriebsetzung nach einer sedimentbedingten Abschaltung sollte aber gegenüber den vermiedenen Schäden in der Regel nicht ins Gewicht fallen.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Es besteht ein zunehmender Bedarf an praxistauglichen Messeinrichtungen zur Echtzeit-Erfassung des Schwebstoffaufkommens (Konzentration und Korngrössenverteilung) nicht nur an Wasserkraftanlagen, sondern auch an Fliessgewässern und Seen. Die hier vorgestellten Schwebstoffmessmethoden lassen sich neben einer hinsichtlich dem aktuellen Turbinenverschleiss wirtschaftlich optimierten Betriebsweise von Hochdruck-Wasserkraftanlagen auch im Zusammenhang mit dem Sedimentmanagement an Stauanlagen und Seen sowie zur Untersuchung ökologischer Fragestellungen einsetzen. Die meisten der dabei zum Einsatz kommenden Messgeräte benötigen eine auf die am Einsatzort vorhandenen Schwebstoffe abgestimmte Kalibrierung, welche vorzugsweise vorgängig im Labor unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt wird.

Die heutzutage auch für in-situ-Messungen verfügbare Methode der Laserdiffraktometrie ermöglicht es, die Schwebstoffkonzentration bei wechselnden Partikeleigenschaften genauer zu bestimmen und Informationen über die Korngrössen zu gewinnen, was für den Hydroabrasivverschleiss ein wichtiger Parameter ist. Weiter können akustische Durchflussmessungen, wie sie an zahlreichen Wasserkraftwerken vorhanden sind, durch geringfügige Anpassungen zumindest für ein qualitatives Schwebstoffmonitoring verwendet werden, was den Vorteil einer Messung direkt im Triebwasserweg mit sich bringt.

Die durchgeführten Laborversuche werden weiter ausgewertet und die Untersuchungen an der Kraftwerksanlage weitergeführt. Neben den Schwebstoffmessungen werden auch die Schädigung der Turbinen und die Wirkungsgradänderungen periodisch erfasst.

Ein verschleissoptimierter Betrieb von Wasserkraftanlagen erfordert eine langjährige Datengrundlage und eine anlagenspezifische Betrachtung des Gesamtsystems über den Lebenszyklus. Schlussendlich sollen die Forschungsergebnisse zur Effizienzsteigerung der Wasserkraft beitragen.

Verdankung

Das Forschungsprojekt wird durch swisselectric research, das Schweizer Bundesamt für Energie (BFE) und die Gommerkraftwerke (GKW) finanziell unterstützt. Die Autoren bedanken sich bei diesen sowie den weiteren eingangs genannten Projektpartnern für ihr Engagement und für die Unterstützung bei der Durchführung der Laborversuche und der Felddatenerhebung. Ein weiterer Dank geht an die Firma Sigrist Photometer, Ennetbürgen, welche ein Trübungsmessgerät für die Laboruntersuchungen zur Verfügung gestellt hat, sowie die Firma Rittmeyer, Baar, für die Unterstützung betreffend der akustischen Messmethode.

Literatur

Abgottspon, A. (2011): Messung abrasiver Partikel in Wasserkraftanlagen. Masterarbeit (unveröffentlicht), CC Fluidmechanik & Hydromaschinen, Hochschule Luzern.

Agrawal, Y., Mikkelsen, O.A., Pottsmith, H.C. (2011). Sediment monitoring technology for turbine erosion and reservoir siltation applications. Proc. Hydro 2011 Conference, Aqua-Media Intl. Ltd., Prague, Czech Republic.

Bishwakarma, M.B., Støle, H. (2008). Realtime 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.

DIN 50320 (1979). Verschleiss; Begriffe, Systemanalyse von Verschleissvorgängen, Gliederung des Verschleissgebietes. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin.

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

Felix, D., Albayrak, I., Boes, R.M. (2012a). Schwebstoffmonitoring und Verschleiss an Peltonturbinen am Fallbeispiel Fieschertal – Vorbereitende Laborversuche zu Partikelmessmethoden. Proc. Wasserbausymposium, TU Graz (G. Zenz, ed.), A15: 117–124.

Felix D., Albayrak I., Abgottspon A., Boes R., Gruber P. (2012b). Suspended Sediment and Pelton Turbine Wear Monitoring: Experimental Investigation of various Optical and Acoustic Devices and Beginning of the Case Study at HPP Fieschertal. Proc. 17th Intl. Seminar on Hydropower Plants (Viennahydro), ISBN 978-3-9501937-8-7. Wien, 483–494.

Gippel, C.J. (1995). Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. Hydrological Processes 9: 83–97.

Götsch, H. (2012). Private Kommunikation.

Nozaki, T. (1990). Estimation of repair cycle of turbine due to abrasion caused by suspended sand and determination of desilting basin capacity. Report Japan International Cooperation Agency, Tokyo.

Ortmanns, C. (2006). Entsander von Wasserkraftanlagen. Mitteilung 193, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (H.-E. Minor, ed.), ETH Zürich.

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.

Winkler, K., Dekumbis, R., Rentschler, M., Parkinson, E., Garcin, H. (2011). Understanding hydro-abrasive erosion, Proc. Hydro 2011 Conference, Aqua-Media Intl. Ltd., Prague, Czech Republic.

Anschrift der Verfasser
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, CH-8092 Zürich
Prof. Dr. *Robert M. Boes*
boes@vaw.baug.ethz.ch
David Felix, felix@vaw.baug.ethz.ch
Dr. *Ismail Albayrak*
albayrak@vaw.baug.ethz.ch