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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 102 (2010)

Heft: 2

Artikel: Kontinuierliche Messung von Schwebstoffkonzentration und -korngrössenverteilung im Triebwasser und Quantifizierung der Hydroabrasion an einer Peltonturbine

Autor: Boes, Robert

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941649

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: 10.07.2025

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

Kontinuierliche Messung von Schwebstoffkonzentration und -korngrössenverteilung im Triebwasser und Quantifizierung der Hydroabrasion an einer Peltonturbine

Robert Boes

Zusammenfassung

An der Hochdruckwasserkraftanlage am Dorferbach in Osttirol, Österreich, wurde im Sommer 2007, kurz nach der Inbetriebnahme, ein ungewöhnlich starker Hydroabrasiv-Verschleiss festgestellt. Es handelt sich um eine 10 MW-Anlage ohne Kopfspeicher mit einer Bruttofallhöhe von 686 m in einem stark vergletscherten Einzugsgebiet. Zur Beobachtung der Schwebstoffe im Triebwasser wurde ein umfangreiches Messprogramm durchgeführt, wobei auch ein Laserdiffraktometer in situ eingesetzt wurde. Dieses Messgerät erlaubt, nebst der Schwebstoffkonzentration auch die Korngrössenverteilung kontinuierlich zu erfassen.

Basierend auf den Schwebstoffdaten und Messdaten der Abrasion am Pelton-Laufrad konnte eine Gleichung zur Prognostizierung des Turbinenverschleisses für die anlagespezifischen Verhältnisse kalibriert werden. Wenn die Schwebstoffkonzentration im Triebwasser 1.1 g/l überschreitet, wie z.B. bei Sommergewittern, ist es aus betriebswirtschaftlicher Sicht vorteilhaft, den Kraftwerksbetrieb für wenige Stunden zu unterbrechen.

Da im vorliegenden Fall auch mit einer Beschichtung des Laufrads die relativ rasche Abnutzung der Mittelschneiden der Becher nicht vermieden werden kann und sich die Absetzleistung des Entsanders durch einen Ausbau nicht wesentlich steigern lässt, bleibt als prüfenswerte Massnahme zur Reduktion des Hydroabrasiv-Verschleisses der Bau eines kleinen Kopfspeichers. Damit würden sich die Konzentration und die Korndurchmesser der turbinierten Schwebstoffe merklich reduzieren lassen.

Résumé

L'aménagement hydroélectrique à haute chute de Dorferbach au Tyrol oriental en Autriche a subit des dégâts d'abrasion inhabituellement forts en été 2007 après sa mise en service. Il s'agît d'un aménagement de 10 MW au fil de l'eau avec une chute brute de 686 m situé dans un bassin versant fortement englacé. Afin d'ausculter le transport solide en suspension dans l'eau turbinée, une campagne de mesure en appliquant aussi la diffraction laser in situ a été effectuée. Cette technique de mesure permet non seulement de mesurer continuellement la concentration des particules solides mais aussi la distribution de la taille des particules.

Sur la base des données des solides en suspension et des mesures d'abrasion de la roue Pelton une équation pour la prévision de l'usure de la turbine a pu être calibrée pour ces conditions spécifiques. Si la concentration des particules solides en suspension dans l'eau turbinée dépasse 1.1 g/l, par exemple lors des orages, il apparait plus économique d'interrompre le turbinage durant quelques heures.

Vu que dans le cas de cet aménagement même un revêtement de la roue Pelton ne peut pas suffisamment empêcher une abrasion de la lame centrale des augets et la capacité de sédimentation du dessableur ne peut pas être considérablement améliorée, seule la construction d'une petite retenue dans la zone de captage peut servir à réduire les dégâts d'abrasion. Cette mesure conduirait à une reduction notable de la concentration et de la taille des particules solides dans l'eau turbinée.

1. Einleitung

Das österreichische Energieversorgungsunternehmen TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG betreibt seit Herbst 2006 in Osttirol ein 10-MW-Wasserkraftwerk am Dorferbach in der Gemeinde Prägraten. Die Wasserfassung auf einer Höhe von gut 2000 m ü. M. besteht aus einem konventionellen Tiroler Wehr mit Fallrechen und einem anschliessenden Doppelkammer-Langsandfang. Die Bruttofallhöhe bis zur vertikalachsigen Peltonturbine mit 1000 U/min. und vier Düsen beträgt 686 Meter. Näheres zu Auslegung und Bau des KW Dorferbach kann Boes et al. (2009) und Moser & Boes (2008) entnommen werden.

Im Sommer 2007, der ersten Periode mit Geschiebe- und Schwebstofftrieb nach Inbetriebnahme des Kraftwerks, wurde ein ungewöhnlich hoher Turbinenverschleiss festgestellt, der eine überdurchschnittlich schnell eintretende Wirkungsgradabnahme verursachte. Deshalb wurde noch im Laufe des Jahres 2007 ein zeitlich hoch aufgelöstes Messprogramm sowohl bezüglich des Sedimenteintrags in die Triebwasserleitung als auch der Turbinenabrasion gestartet, um die Einflussfaktoren für den Verschleiss näher zu analysieren und Gegenmassnahmen abzuleiten.

2. Wasserfassung und Entsander

2.1 Hydrologische und genehmigungsrechtliche Randbedingungen

Das Einzugsgebiet des Dorferbaches weist eine Fläche von rund 27 km^2 und einen Vergletscherungsgrad von etwa 50% auf. Das Abflussregime ist dementsprechend glazial, mit einem charakteristischen Schönwetter-Tagesgang im Sommerhalbjahr, einem Abflussmaximum im Juli und einer

ausgeprägten Niederwasserführung im Winter. Der Schwankungskoeffizient der höchsten und niedrigsten Monatsmittel, ausgedrückt als Verhältnis der Pardé-Koeffizienten für Juli und Februar, beträgt beispielsweise 42.3. Ein weiteres Merkmal von derartigen Gletscherbächen ist das an warmen Tagen gräulich getrübte Wasser, die sogenannte Gletschermilch. Diese Trübung entsteht durch feine Gesteinspartikel am Gletscherbett, die durch den Gletscher zerrieben wurden und im Bachwasser in Suspension mittransportiert werden.

Unter derartigen Bedingungen für ein Ausleitkraftwerk erscheint der Bau eines Ausgleichspeichers sinnvoll, um das Wasserdargebot auch in der langen Niederwasserperiode energiewirtschaftlich gut nutzen zu können und den Feststoffeintrag ins Triebwasser in der Sedimentsaison zu reduzieren. Für die Errichtung eines Speichers im Hauptschluss eines Gewässers sind umfangreiche ökologische Untersuchungen zu verschiedenen Jahreszeiten und entsprechende Unterlagen und Nachweise für das naturschutzrechtliche Verfahren erforderlich. Beim KW Dorferbach musste aus Gründen der Genehmigungsfristen auf einen Kopfspeicher verzichtet werden, da das dazu erforderliche Genehmigungsverfahren nicht in der für die Erlangung der Einspeisetarife nach dem österreichischen Ökostromgesetz erforderlichen Zeit möglich war.

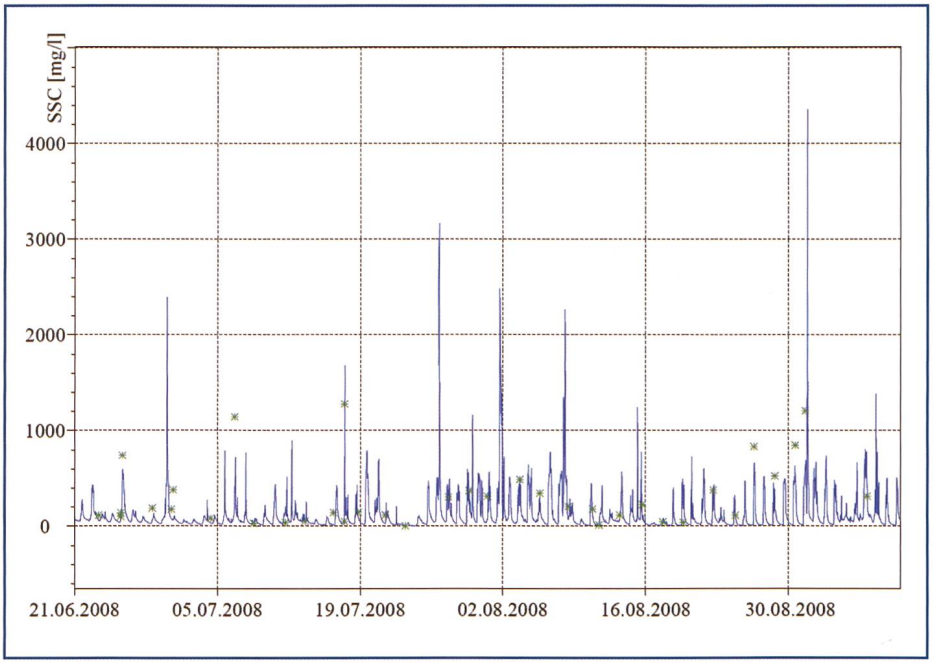

Bild 1. Verlauf der Schwebstoffkonzentration im Triebwasser des KW Dorferbach im Sommer 2008, (–) Daten der Trübungssonde nach Kalibrierung mit (☆) Einzelproben.

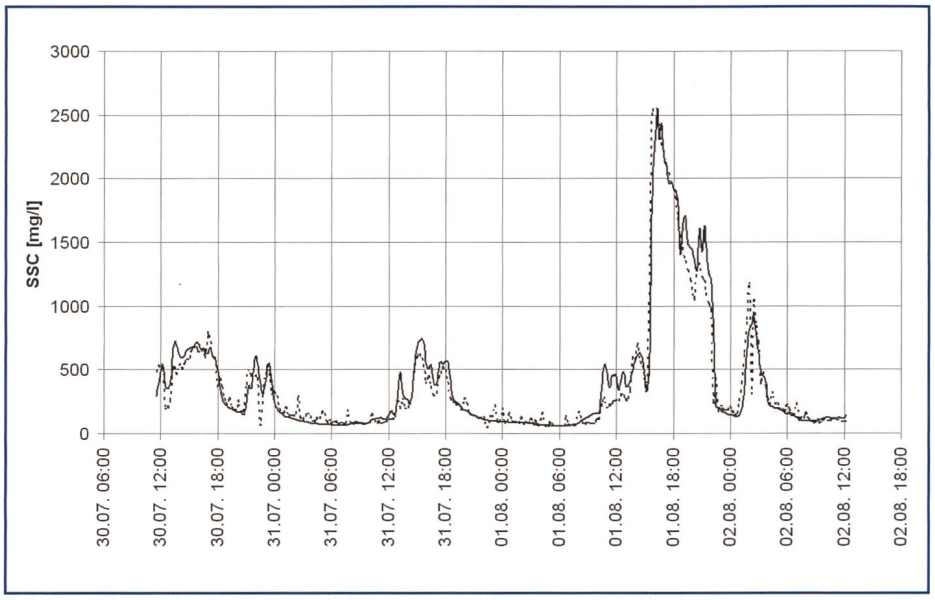

Bild 2. Verlauf der Schwebstoffkonzentration im Triebwasser des KW Dorferbach vom 30.7. bis 2.8.2008, gemessen mit (–) Trübungssonde und (...) Laserdiffraktometer.

2.2 Auslegung der Entsanderanlage

Die Entsanderanlage mit einer Ausbauwassermenge von 1.8 m^3/s wurde nach der klassischen Methode (Vischer & Huber 1993, Zanke 1982) auf einen Grenzkorndurchmesser von 300 μm bei 5 bis 10°C Wassertemperatur bemessen. Dies entspricht dem für Hochdruck-Ausleitungskraftwerke der TIWAG üblichen Entwurf. Bei der Berechnung der Sinkgeschwindigkeit des Grenzkorns wurde eine Abminderung zur Berücksichtigung hoher Sedimentkonzentrationen berücksichtigt (Oliver 1961, in Ortmanns 2006). Die Länge der Entsanderkammern (Länge des wirksamen Raums zwischen Ende Absturz nach Einlaufschütz und Kammerende) beträgt 26 m.

Die Spülungen (System Büchi) werden automatisch ausgelöst, wenn die Sedimentauflast auf die in der Sohle des Entsanders angeordneten Druckmembranen einen voreingestellten Grenzwert überschreitet. Die turbinierte Wassermenge wird dann auf die Hälfte reduziert, um die noch durchströmte Kammer nicht zu überlasten, so dass auch während der Spülungen das Bemessungskorn abgesetzt werden kann. Bei starkem Geschiebeaufkommen kann es vorkommen, dass sich die durchströmte Kammer noch während des ca. 15-minütigen Spülvorgangs der anderen Kammer stark mit Geschiebe füllt. Wird in diesen Fällen ein zweiter Grenzwert überschritten, wird auch in dieser Kammer die Spülung ausgelöst, und das Turbinieren muss unterbrochen werden.

Von beiden Entsanderkammern gelangt das Triebwasser nach Durchströmen eines horizontalen Feinrechens über eine kleine Ausgleichskammer in die 4.4 km lange Druckleitung aus duktilen Sphäroguss-Rohren (DN 800).

3. Messprogramm

Zur detaillierten Untersuchung der Schwebstoffführung im Triebwasser und der Abrasion des Pelton-Laufrads wurde ein umfangreiches Messprogramm durchgeführt. Dazu wurde in der Ausgleichskammer nach dem Entsander eine Sonde zur Trübungsmessung installiert. Weiter wurde von dieser Stelle eine Schlauchleitung in die Spülschützenkammer geführt, mittels welcher Proben des Triebwassers abgepumpt werden konnten. Diese Proben wurden einerseits an Ort kontinuierlich mit einem Laserdiffraktometer analysiert, andererseits wurden Einzelproben für Laboruntersuchungen entnommen.

Die Trübungsmesswerte werden bekanntlich aufgrund von Kalibrierung mit

Einzelproben als Mass für die Schwebstoffkonzentration (*suspended sediment concentration,* SSC) verwendet. Mit einem Laserdiffraktometer kann ebenfalls die Schwebstoffkonzentration bestimmt werden. Der bedeutende Vorteil beim Einsatz des Laserdiffraktometers besteht darin, dass es auch die Kornverteilung der Gesteinspartikel im Triebwasser kontinuierlich registriert.

Die minütlichen Trübungsmesswerte wurden in 15-Minuten-Intervallen gemittelt und abgespeichert, während mit dem Laserdiffraktometer die SSC in der Regel alle 15 Minuten über 30 Sekunden gemittelt gemessen wurde. Gestützt auf Lewis (1996), der zeigte, dass ein 10-Minuten-Intervall für einen kleinen, sehr schnell auf Niederschläge reagierenden Gebirgsbach in Kalifornien angemessen war, wurde dieses Intervall als ausreichend kurz für eine laufende Beobachtung der SSC betrachtet.

Zur Kalibrierung des Zusammenhangs Trübung/Feststoffkonzentration wurden regelmässig über die ganze Schwebstoffsaison 2008 konventionelle Schöpfproben (Punktmessung mittels Pumpe) entnommen und die SSC und Korngrössenverteilung in einem Labor mittels der Verdampfungsmethode bzw. mit einem Laserdiffraktometer bestimmt. Einzelne Proben wurden auch hinsichtlich ihrer mineralogischen Zusammensetzung, ihres Rundungsgrades und der Mohs-Härte analysiert, um die Abrasivität zu bewerten.

Alle drei betrachteten Messmethoden (Trübungssonde, Laserdiffraktometer, Einzelproben) beziehen sich auf das Triebwasser in der Mitte der Ausgleichskammer. Aufgrund i) der turbulenten Durchmischung, ii) der relativen Messtiefe von rund 18% über der Sohle und iii) der relativ feinen Korngrössen (hauptsächlich Feinsand und Silt), kann gemäss Dendy et al. (1979) davon ausgegangen werden, dass die Punktmessungen die räumlich gemittelten Verhältnisse gut wiedergeben.

Um nebst der Schwebstoffkonzentration des Triebwassers auch diejenige des natürlichen Bachwassers zu erfassen, wurde weiter eine Trübungssonde im Zufluss zum Wehr installiert. Auch diese Messdaten wurden anhand von Laborauswertungen einzelner Schöpfproben kalibriert.

Die Momentanwerte des mit einem Ultraschall-Durchflussmessgerät gemessenen Triebwasserdurchflusses und der aus Druckmessdaten im Krafthaus berechneten Nettofallhöhen h^{net} wurden gemittelt über 15-Minuten-Intervalle abgespeichert.

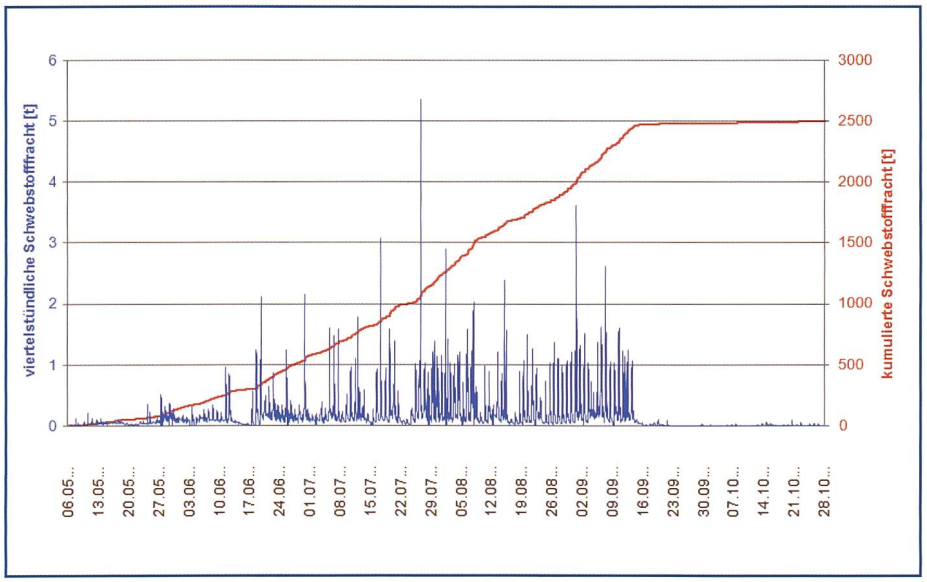

Bild 3. Viertelstündliche (-- blaue Kurve) und kumulierte (– rote Kurve) Schwebstofffrachten im Triebwasserweg des KW Dorferbach in der Schwebstoffsaison 2008.

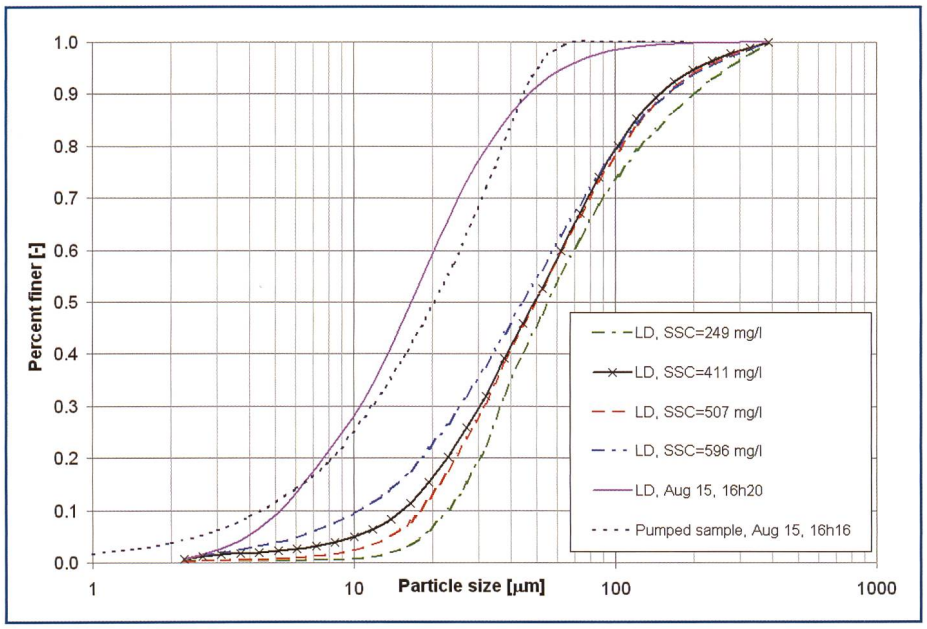

Bild 4. Typische Korngrössenverteilung im Triebwasser des KW Dorferbach aus einer (...) Einzelprobe (Labor) und aus Laserdiffraktometer-Daten (in situ).

Am Turbinenlaufrad des KW Dorferbach wurden wöchentlich bis zweiwöchentlich Messungen der Laufradbechergeometrie einschliesslich der Mittel- und Nebenschneiden durchgeführt, um Aussagen über die zeitliche Entwicklung der Abrasionsraten machen zu können und den beobachteten Verschleiss mit den Einwirkungsgrössen zu korrelieren.

4. Instrumentierung und Messmethoden

4.1 Streulichtverfahren

Zur Erfassung des Schwebstoffaufkommens werden oft Sonden eingesetzt, welche die Trübung nach dem Streulichtverfahren (SLV) messen. Für die kontinuierliche Beobachtung der Schwebstoffkonzentration beim KW Dorferbach kam eine Sonde *Solitax ts-line (Hach-Lange GmbH)* zur Anwendung. Ein Sensor misst die Streuung von Lichtwellen an Partikeln im Wasser (Agrawal & Pottsmith 2002), und die Intensität des gestreuten Lichts im Verhältnis zu derjenigen des einfallenden Lichts wird dann einem Konzentrationswert zugeordnet. Die Bedienung der Trübungssensoren ist einfach; ein grosser Nachteil ist allerdings, dass die Instrumente werkmässig mit nahezu monodispersen und monochromen Standard-Pulvern bekannter Partikelgrössen kalibriert werden. Für Triebwassersysteme, in denen die Korngrössen der Schwebstoffe zwischen einigen wenigen und Hunderten von µm liegen und die

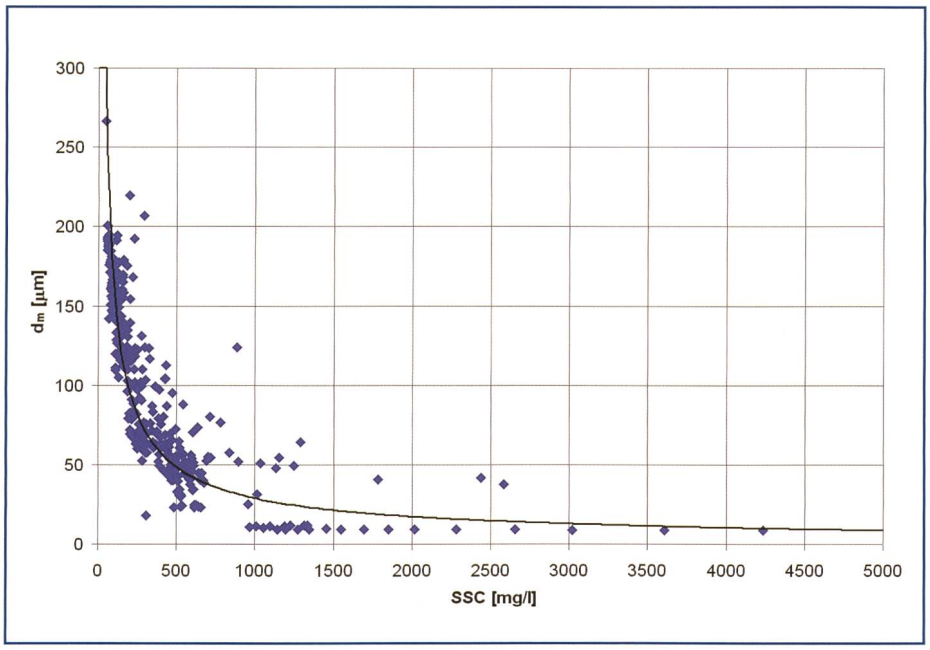

Bild 5. Mittlerer Korndurchmesser d_m in Abhängigkeit der Schwebstoffkonzentration SSC aus Laserdiffraktometer-Daten, (–) Näherung durch Gl. (1).

Körner aus unterschiedlichen Mineralien zusammengesetzt sind, ist diese Messmethode mit erheblichen Ungenauigkeiten behaftet. Es besteht nämlich eine lineare Abhängigkeit der SLV-Kalibration von der Korngrösse und eine weitere Abhängigkeit von der Farbe der Partikelminerale (Gippel 1995, Sutherland et al. 2000).

Messergebnisse von Trübungssonden sollen daher immer mit SSC aus konventionellen Schöpfproben, welche über die Messperiode verteilt entnommen werden, kalibriert werden (Morris & Fan 1998). Diese Probenwerte werden in der Regel als «wahr» betrachtet. Gemäss Gippel (1995) ergeben sich die besten Korrelationen, wenn ein breiter Konzentrationsbereich abgedeckt wurde sowie in Umgebungen mit relativ konstanten Partikeleigenschaften, z.B. in kleinen Einzugsgebieten. Beide Bedingungen waren in der vorliegenden Untersuchung grundsätzlich erfüllt.

4.2 Laserdiffraktion

Laserdiffraktion, auch als Laserbeugungsverfahren bekannt, ist eine Messmethode, bei der das Beugungsspektrum eines an einer Partikelschar abgelenkten Laserstrahlbündels mittels ringförmiger Detektoren in der Brennebene einer Optik in verschiedenen Streuwinkeln gemessen wird. Diese Messsignale werden anschliessend in eine Partikelgrössenverteilung umgerechnet. Veränderungen der Korngrösse oder Farbe der Schwebstoffe beeinträchtigen die Messungen der Konzentration nicht (Agrawal & Pottsmith 2005). Dies gilt genau genommen aber nur für kugelförmige Körner. Abweichungen von der Kugelform verringern die Messgenauigkeit, da andere Beugungsmuster entstehen (Agrawal & Pottsmith 2002).

Bei der hier beschriebenen Felduntersuchung kam ein neuartiger tragbarer *LISST-Stream-Side-Sensor (Sequoia Scientific Inc.)* zum Einsatz. Triebwasser wurde von der Ausgleichskammer durch das in der benachbarten Spülschützenkammer im Trockenen aufgestellte Gerät gepumpt, und die Korngrössenverteilung wurde in 32 Grössenklassen zwischen 2 und 387 µm registriert. Aus den Konzentrationen in den einzelnen Grössenklassen wurde die Gesamtschwebstoffkonzentration (SSC) berechnet und abgespeichert. Da die Korndichte nicht mittels Laserdiffraktion bestimmt werden kann, geschieht die SSC-Ausgabe in Form einer Volumenkonzentration (µl/l). Diese wurde im vorliegenden Fall mit einer Korndichte von 2.7 kg/l in eine Massenkonzentration (mg/l) umgerechnet. Die mit diesem Gerät maximal messbare SSC liegt bei ca. 4000 bis 5000 mg/l. Damit die Messungen durch allfälligen Algenbewuchs der Geräteoptik nicht verfälscht werden, ermöglicht ein eingebautes Klarwasserspülsystem die automatische Nullpunktrückstellung. Dies kann entweder vor jeder Beprobung oder nach einem festgelegten Intervall erfolgen. Da das glaziale Abflussregime des Dorferbaches mit niedrigen Wassertemperaturen und hohem Gehalt an anorganischer Materie den Algenbewuchs hemmt, kam es zu keinen Problemen mit dem so genannten *biofouling* der Geräteoptik.

5. Messergebnisse und Auswertung

5.1 Schwebstoffkonzentration (SSC)

Bild 1 zeigt den Verlauf der mit der Trübungssonde gemessenen SSC nach Kalibrierung mit den Laborwerten aus Einzelproben (☆-Symbol) im Sommer 2008. Die Einzelwerte stimmen in der Regel mit der kontinuierlichen SLV-Kurve gut überein. Aus *Bild 1* und *Bild 2* ist zu entnehmen, dass die SSC sowohl mit den für glaziale Abflussregime typischen Tagesgängen als auch mit Hochwassern zeitlich stark variiert. Während die mittlere SSC in den Sommermonaten etwa 150 mg/l beträgt, kann sie von wenig über Null bis zu mehreren Tausend mg/l schwanken, analog zu Messdaten von Schweizerischen Wasserkraftwerken in vergletscherten Einzugsgebieten (Krause et al. 1998).

Da das Laserdiffraktometer aufgrund technischer Probleme mit der Pumpe nur für eine relativ kurze Zeit von einigen Tagen plausible Ergebnisse zu SSC lieferte, wurden diese Daten statt mit wenigen Einzelproben mit den geeichten SLV-Werten kalibriert. *Bild 2* vergleicht die kalibrierten SSC der Trübungssonde und des Laserdiffraktometers während drei Sommertagen. Es ist neben der allgemein guten Übereinstimmung zu erkennen, dass die Laserbeugungs-Daten stärker schwanken als die Daten der Trübungssonde. Dies kann der 15-Minuten-Mittelung der Trübungsdaten zugeschrieben werden, während mit dem Laserdiffraktometer nur einmal in 15 Minuten über 30 s gemessen wurde.

5.2 Schwebstofffracht

Die über den Triebwasserweg transportierte Schwebstofffracht ergibt sich durch Multiplikation der SSC mit dem Turbinendurchfluss in 15-Minuten-Intervallen. *Bild 3* zeigt sowohl die 15-Minuten-Frachten als auch die Gesamtfracht in der Schwebstoffsaison vom 6.5. bis 28.10.2008. Von Ende Mai bis Mitte September 2008 wurden bedeutende Mengen an Schwebstoffen transportiert, bis die Schwebstoffführung im Spätsommer mit einem frühen Kälteeinbruch abrupt endete. Während die mittlere viertelstündliche Belastung im Triebwasser über die gesamte Saison gesehen 150 kg (740 kg im Dorferbach) und in der Gletscherschmelz-Periode (Mitte Juli bis Mitte September) bis zu 280 kg beträgt, können Spitzenwerte 2000 kg oder während Hochwasser sogar 5000 kg (45 000 kg im Dorferbach) überschreiten.

Der Gradient der Gesamtfracht-

kurve in *Bild 3* zeigt die Sedimenttransportrate über den Triebwasserweg, die Anfang August am höchsten war. In Summe wurden von Anfang Mai bis Ende Oktober 2008 rund 9100 t an Schwebstoffen im Dorferbach transportiert, von denen rund 2500 t *(Bild 3)* über den Triebwasserweg weitertransportiert wurden. Gut ein Viertel der Schwebstofffracht des Dorferbaches gelangte im Betrachtungszeitraum also in den Triebwasserweg, was unter dem Verhältnis der genutzten Triebwasserfracht zur Zuflussfracht von rund 40% lag.

5.3 Korngrössenverteilung

Zur Plausibilitätskontrolle der mittels Laserdiffraktion in situ bestimmten Korngrössenverteilungen ist in *Bild 4* ein Vergleich mit der Korngrössenverteilung einer gleichzeitig entnommenen Einzelprobe dargestellt. Die Übereinstimmung ist trotz kleinerer Unterschiede sowohl bei den kleinsten als auch bei den grössten Kornklassen gut. Diese kleineren Unterschiede werden der Begrenzung des Messbereichs des Laserdiffraktometers im unteren (> 2 μm) bzw. der Laboranalyse im oberen Korngrössenbereich (≤ 192 μm) zugeschrieben. *Bild 4* zeigt weiter einige Korngrössenverteilungen im Triebwasser des KW Dorferbach für typische Schwebstoffkonzentrationen zwischen ca. 250 und 600 mg/l. Trotz unterschiedlicher Konzentrationen zeigen die Kornverteilungskurven ähnliche Verläufe mit einem typischen d_{50} zwischen 44 und 56 μm und einem d_{90} von 150 bis 200 μm. Die Schwebstoffe bestehen demnach grösstenteils aus Silt und zu einem geringeren Teil aus Feinsand. Die Ähnlichkeit der Korngrössenverteilungen wird auch durch eine enge Streuung $\sigma = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$ zwischen 2.5 und 5 ausgedrückt. Gemäss Morris & Fan (1998) ist das Fehlen von grobem Material eher günstig für den Einsatz von Trübungssonden.

Für sämtliche gemessene Korngrössenverteilungen nimmt der mittlere Durchmesser d_m signifikant mit zunehmender SSC ab *(Bild 5)*. Das heisst, dass relativ trübe bzw. stark schwebstoffhaltige Abflüsse im Wesentlichen durch eine deutliche Zunahme von Feinteilen charakterisiert werden. Wird der Grösstwert des mittleren Korndurchmessers mit dem Grenzkorn des Entsanders von 300 μm begrenzt, erhält man für d_m in Abhängigkeit der Schwebstoffkonzentration SSC folgende Beziehungen ($R^2 = 0.79$, *Bild 5*)

$$d_m\,[\mu m] = 300 \quad \text{für SSC} \leq 45\ \text{mg/l}. \qquad (1a)$$

$$d_m\,[\mu m] = 5200\,(\text{SSC}\,[\text{mg/l}])^{-0,75} \quad \text{für SSC} > 45\ \text{mg/l}. \qquad (1b)$$

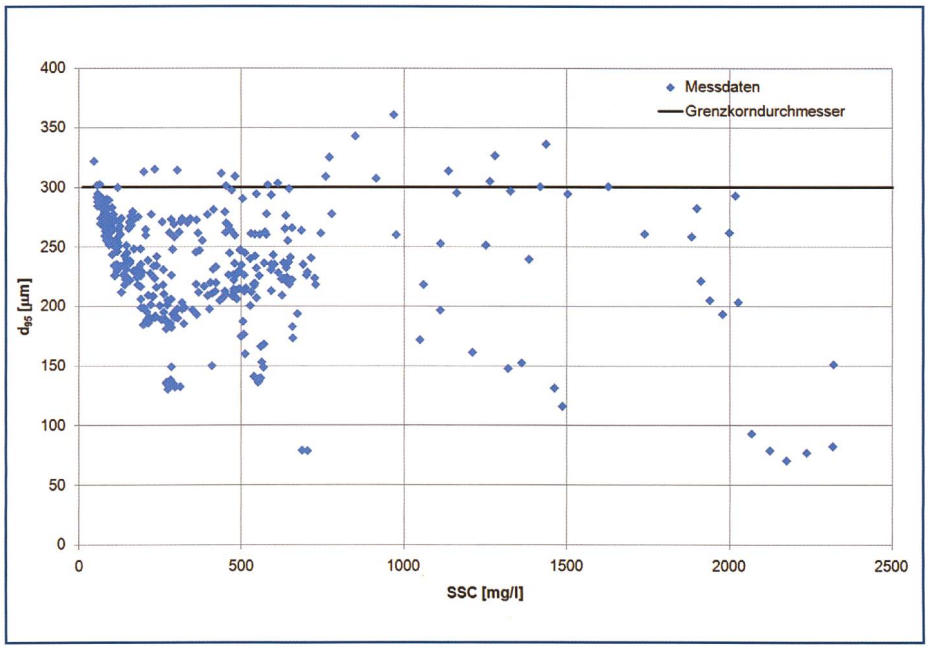

Bild 6. Korndurchmesser d95 in Abhängigkeit der Schwebstoffkonzentration aus Laserdiffraktometer-Daten.

Das Bemessungs-Grenzkorn des Entsanders von 300 μm wird in der Regel von mindestens 95% der Schwebstofffracht im Triebwasser unterschritten *(Bild 6)*. Nur bei 6% der 376 gemessenen Kornverteilungen liegt d_{95} über dem Grenzkorn. Es kann daher von einem entwurfsgemäss funktionierenden Entsander gesprochen werden. *Bild 6* zeigt weiter, dass die Abnahme von d_{95} mit zunehmendem SSC weniger deutlich ausfällt als für d_m aus *Bild 5*.

6. Turbinenverschleiss

2008 wurden im Krafthaus Dorferbach drei verschiedene Laufräder aus konventionellem CrNi 13/4 Stahl als Grundmaterial getestet, wovon zwei (R2 und R3) mit 300 μm Wolframkarbid beschichtet waren und eines (R1) nach einer Reparaturschweissung unbeschichtet blieb. Insgesamt wurden von März bis Oktober 17 Messungen der Bechergeometrien durchgeführt.

Der Hydroabrasiv-Verschleiss von Turbinen hängt auch von ihrem hydraulischen Design ab (Bishwakarma & Støle 2008). Die Hauptparameter für den Verschleiss W (Materialabtrag in μm pro Betriebsstunde) an Peltonturbinen sind im Allgemeinen die relative Strahlgeschwindigkeit u', die Schwebstoffkonzentration *SSC*, der Quarzgehalt z, die Kornform und -grösse d_{50} oder d_m, die Anzahl Düsen n_n und Becher n_b und das Turbinenmaterial (Nozaki 1990, Sulzer Hydro 1996). Für gegebene Kornform (hier: eckig) und Turbinenmaterial (CrNi 13/4) kann W durch die Sulzer-Hydro-Formel (1996) als $W = k\,(u')^{3.023}\,SSC\,z\,f(d_{50})\,n_n/n_b$ ausgedrückt werden, wobei k eine Konstante und $f(d_{50})$ in der Regel ein Polynom 4. Ordnung ist. Die relative Strahlgeschwindigkeit u' wurde aus der Strahlgeschwindigkeit $(2gh_{net})^{1/2}$ abzüglich der Umfangsgeschwindigkeit des Laufrads berechnet.

Als massgeblicher Parameter für den Verschleiss stellte sich beim KW Dorferbach die Mittelschneidenbreite heraus, wo die Wolframkarbid-Beschichtung relativ schnell erodierte *(Bild 7)*, so dass alle Laufräder dort als unbeschichtet angesehen wurden. Die mit Wolframkarbid beschichteten Düsennadeln und -ringe waren deutlich weniger von Abrasion betroffen. Eine Mittelschneidenbreite von 6 bis 8 mm wird als kritisches Mass für die Einsatzdauer eines Laufrades am KW Dorferbach angesehen, da bei weiteren Betriebsstunden der Instandsetzungsaufwand überproportional steigt.

Mit einem mittleren Quarzgehalt von $z = 0.5$ gemäss den mineralogischen Untersuchungsergebnissen, $n_n = 4$, $n_b = 22$, $k = 10^{-7}$ und $f(d_m) = a\,d_m^{\,b}$, mit den Koeffizienten $a = 144$ und $b = -0.5$, wurde der Hydroabrasiv-Verschleiss basierend auf den Messdaten angenähert als

$$W\,[\mu m/h] = 1.31 \cdot 10^{-6}\,(u')^3\,SSC\,(d_m)^{-1/2}. \qquad (2)$$

Einsetzen der Gleichung (1) in (2) ergibt

$$W\,[\mu m/h] = 7.56 \cdot 10^{-8}\,(u')^3\,SSC \quad \text{für SSC} \leq 45\ \text{mg/l} \qquad (3a)$$

Bild 7. Laufrad 2 (mit Wolframkarbid-Beschichtung) nach 80 Volllasttagen während der Schwebstoffsaison.

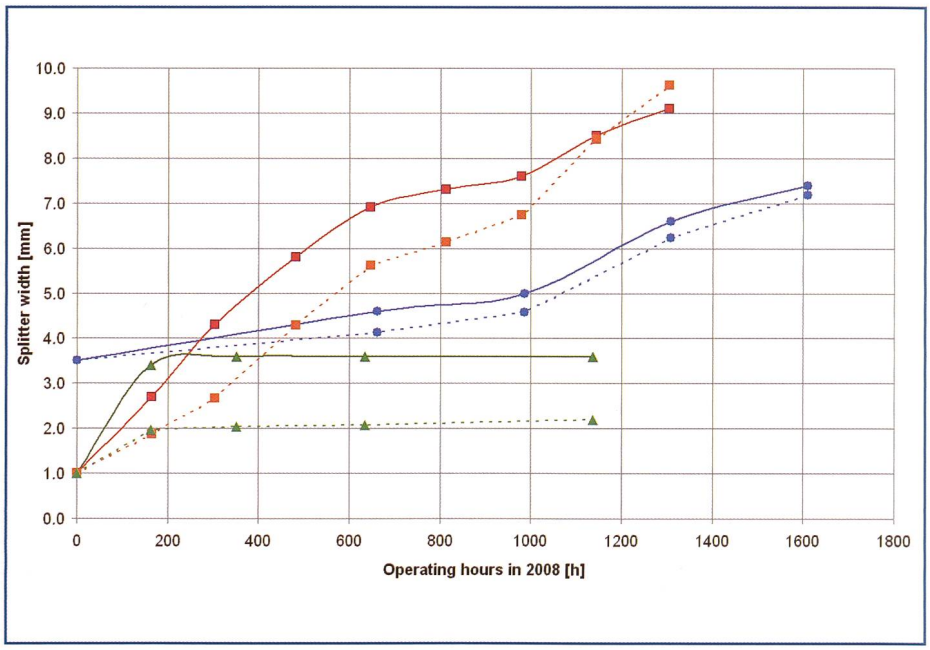

Bild 8. Entwicklung der Mittelschneidenbreite in Abhängigkeit der Betriebsstunden am KW Dorferbach von Mai bis Oktober 2008, (–) gemessene Daten und (...) berechnet nach Gl. (3), bei Laufrad (■) 1, (●) 2 und (▲) 3. Laufräder 2 und 3 sind beschichtet.

$$W\,[\mu m/h] = 1.82 \cdot 10^{-8}\,(u')^3\,SSC^{1.375} \quad \text{für SSC} > 45\ mg/l. \qquad (3b)$$

Während der überproportionale Einfluss der relativen Strahlgeschwindigkeit u' auf den Verschleiss für eine gegebene Fallhöhe und Turbine nicht beeinflussbar ist, kann die Schwebstoffkonzentration SSC des Triebwassers in einem gewissen Ausmass mittels geeigneter Kopfbauwerke gegenüber der natürlichen Schwebstoffkonzentration des Bachwassers reduziert werden.

Bild 8 zeigt die zeitliche Entwicklung des gemessenen Verschleisses und die Näherungen nach Gl. (3) für alle getesteten Laufräder. In Anbetracht der grossen Zahl der involvierten Parameter und ihrer Schwankungen wird die Übereinstimmung des gemessenen und des berechneten Verschleisses als gut angesehen. Beim Laufrad R3 ist die zeitliche Entwicklung ausser für den ersten Messpunkt auch gut angenähert, was möglicherweise auf einen Messfehler bei der ersten Turbineninspektion zurückzuführen ist.

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

7.1 Optimierte Betriebsführung

Durch eine umfangreiche Messkampagne, in welcher auch ein Laserdiffraktometer in situ eingesetzt wurde, konnten die Schwebstoffe im Triebwasser und die entsprechenden Abrasionsschäden an der Turbine an einem alpinen Hochdruck-Laufwasserkraftwerk erfasst werden.

Die Gl. (3) erlaubt eine Prognose der Verbreiterung der Mittelschneiden des Pelton-Laufrades für die Verhältnisse des KW Dorferbach. Durch die gefundene Beziehung zwischen der im Triebwasser gemessenen SSC und dem Turbinenverschleiss kann die Betriebsführung des Kraftwerks ereignisbasiert auf das Schwebstoffaufkommen abgestimmt werden. Eine betriebswirtschaftliche Optimierung unter Berücksichtigung des Erzeugungsausfalls und der Einsparungen bei der Laufradsanierung ergab auf Grundlage der Daten der Sedimentsaison 2008, dass für Einzelereignisse mit SSC über 1100 mg/l im Triebwasser eine kurzfristige Ausserbetriebnahme des Kraftwerkes zur Begrenzung der Abrasionsschäden an der Turbine zu empfehlen ist. Bei Sommergewittern ist es oft genügend, den Betrieb während nur ein bis zwei Stunden einzustellen. Die Trübungsmesssonde und das Laserdiffraktometer in der Ausgleichskammer nach dem Entsander werden weiter betrieben.

7.2 Option Bau eines Kopfspeichers

Die Beschichtung des Laufrades mit Wolframkarbid hat sich insgesamt bewährt; die Mittelschneiden können damit jedoch nicht nachhaltig vor Abrasion geschützt werden. Zur Verlangsamung des Laufradverschleisses, aber auch zur Verminderung der Sekundärschäden an den Düsen, der Ringleitung und der Druckleitung, sollte vielmehr die Schwebstoffkonzentration im Triebwasser vermindert werden.

Ein Grenzkorn von beispielsweise 200 µm, welches durch Zubau zweier weiterer baugleicher Entsanderkammern rechnerisch erreichbar wäre, würde wegen des flachen Verlaufes der Schwebstoffkorngrössenverteilung im oberen Bereich *(Bild 4)* nur eine geringe Verminderung der Schwebstofffracht um wenige Massen-% bewirken.

Kann das Grenzkorn hingegen mittels eines Kopfspeichers auf z.B. 100 µm, und damit die Schwebstofffracht um rund 20% verringert werden *(Bild 4)*, wären nach Gl. (3) spezifische Verschleissminderungen in Bezug auf die Mittelschneide von 26% zu erwarten. Unter den Annahmen, dass i) das Jahr 2008 mittleren Verhältnissen entspricht (sichere Annahme bei Vergleich mit den geringeren Feststofffrachten 2007) und ii) sich mit einem Kopfspeicher die Schwebstofffracht bzw. -konzentration im Triebwasser um 20% verringert, würde sich die Einsatzzeit eines Laufrades (= Kehrwert des Verschleissmasses W) rechnerisch um [1/(1-0.26)–1] = 35% verlängern.

Zur Reduktion der Abrasionsprobleme durch Feststoffe im Triebwasser ist insbesondere bei einer Hochdruckwasserkraftanlage eine Kombination des Fachwissens von Bau- und Maschineningenieuren erforderlich, um sowohl die Anlagenkonzeption als auch die Betriebsführung zu optimieren.

Literatur

Agrawal, Y.C. & Pottsmith, H.C. (2002). Laser diffraction method: New sediment sensors. Sequoia Scientific, Inc., USA, http://www.sequoiasci.com.

Agrawal, Y.C. & Pottsmith, H.C. (2005). Turbine erosion – lasers warn of abrasive sediments. Proc. HYDRO 2005 Conference, Villach, Austria.

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

Boes, R., Senn, G. & Rudig, W. (2009). Erfahrungen bei Bau, Inbetriebsetzung und Probebetrieb einer 10-MW-Hochdruckanlage der TIWAG. Wasser, Energie, Luft 101(1): 43–47.

Dendy, F.E., Allen, P.B. & Piest, R.F. (1979). Chapter 4: Sedimentation. Field manual for research in agricultural hydrology, Agricultural Handbook 224, USDA, Washington D.C.

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

Krause, M., Lang, E. et al. (1996). Abschlussbericht F&E-Projekt Sandabrasion. NEFF-Bericht Nr. STT.TB96.014, Sulzer Innotec.

Lewis, J. (1996). Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation. Water Resources Research 6(5): 1357–1366.

Morris, G.L. & Fan, J. (1998). Reservoir sedimentation handbook, McGraw-Hill, New York.

Moser, A. & Boes, R. (2008). Einsatz duktiler Gussrohre für alpine Triebwasserleitungen – Wasserkraftwerk Dorferbach der TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG. Gussrohr-Technik FGR 42: 78–82.

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, Ch. (2006). Entsander von Wasserkraftanlagen. Mitteilung 193, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.

Sulzer Hydro (1996). Ein semiempirisches 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.

Vischer, D.L. & Huber, A. (1993). Wasserbau. Springer-Verlag, Berlin.

Zanke, U. (1982). Grundlagen der Sedimentbewegung. Springer-Verlag, Berlin.

Anschrift des Verfassers
Prof. Dr. *Robert Boes*, Direktor;
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Gloriastrasse 37/39, CH-8092 Zürich
boes@vaw.baug.ethz.ch
www.vaw.ethz.ch
ehemals TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG, Innsbruck, Österreich