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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 109 (2017)

Heft: 2

Artikel: Weiterleitung von Feinsedimenten via Triebwasser als Massnahme gegen die Stauraumverlandung

Autor: Felix, David / Albaryak, Isamil / Boes, Robert

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941612

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: 13.12.2025

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

Weiterleitung von Feinsedimenten via Triebwasser als Massnahme gegen die Stauraumverlandung

David Felix, Ismail Albayrak, Robert Boes

Zusammenfassung

Mittel- und langfristig ist es bei vielen Stauanlagen erforderlich, weitere Massnahmen gegen deren Verlandung zu ergreifen. Im Falle von Wasserkraftanlagen besteht die Möglichkeit, Feinsedimente über den Triebwasserweg und somit durch die Turbinen weiterzuleiten.

Über längere Zeiträume können so beträchtliche Sedimentmengen weitergeleitet werden. Dabei ist vorteilhaft, dass relativ hohe Schwebstoffkonzentrationen unterstrom von Speichern und Produktionsverluste infolge Spülungen vermieden werden. Nachteilig sind erhöhte Kosten infolge stärkerem Hydroabrasiv-Verschleiss an Turbinen bzw. infolge von Massnahmen, um die Turbinen auf eine erhöhte Sedimentbelastung auszulegen. Es wird empfohlen, die akzeptierbare Konzentration und Grösse der Gesteinspartikel im Triebwasser in einem ersten Schritt aufgrund der Fachliteratur sowie Kennwerten des Einzugsgebiets und der Anlage abzuschätzen. In einem zweiten Schritt wird empfohlen, diese Werte aufgrund von Versuchen an der betreffenden Anlage anzupassen. Dabei ist das Ziel, die Gesamtanlage, bestehend aus baulichen und maschinellen Anlagen, auch hinsichtlich der Feinsedimente und ihrer Auswirkungen mittel- und langfristig zu optimieren.

Résumé

A moyen et à long terme il faut prendre des mesures additionnelles contre l'alluvionnement à beaucoup des retenues. Pour les aménagements hydroélectriques, l'évacuation des sédiments fins par les voies des eaux motrices et par conséquence à travers les turbines est une option.

De cette manière, des quantités considérables de sédiments peuvent être évacuées pendant de longues périodes en évitant des concentrations de sédiments en suspension élevées en aval des retenues et des pertes d'eau dues aux purges. Par contre, des couts élevés pour les révisions de turbines dues à l'érosion hydro-abrasive ou pour des mesures augmentant leur résistance à ce type d'usure sont à prévoir. Il est recommandé d'estimer des valeurs acceptables concernant la concentration et la taille des particules minérales dans un premier pas à base de la littérature spécialisée en considérant des paramètres caractéristiques du bassin versant et de l'aménagement. Ensuite, il est recommandé d'adapter ces valeurs basé sur des essais sur site. L'objectif est d'optimiser l'ensemble d'un aménagement hydroélectrique, y compris les retenues et les machines hydrauliques, à moyen et à long terme aussi par rapport aux sédiments fins.

1. Einleitung

1.1 Sedimente an Wasserkraftanlagen

Der Umgang mit Sedimenten an Wasserkraftanlagen ist eine Herausforderung für Betreiber, beratende Ingenieure, Turbinenhersteller, Behörden, Verbände und weitere Beteiligte. Häufig geht es um folgende Aspekte:

- Verschleiss an Turbinen und Pumpen sowie an stahl- und wasserbaulichen Anlageteilen
- Speicherverlandung und Sedimentdefizit im Unterwasser
- ökologische Aspekte (insbesondere bei Spülungen)

Im Gegensatz zum Verschleiss an Turbinen ist die Speicherverlandung meist ein langfristiges Problem mit übergeordneten Auswirkungen. Mit dem Gletscherrückzug *(Bild 1a)* und dem Rückgang von Permafrost in den Alpen gewinnt das Thema «Sedimente an Wasserkraftanlagen» an Bedeutung, weil einerseits mehr Sedimente anfallen können und andererseits auch neue Wasserkraftanlagen in oder nahe von ehemals vergletscherten Gebieten gebaut werden könnten. Da es sich bei einem Grossteil der von Flüssen transportierten Sedimente um feinkörniges Material (Ton, Silt und Feinsand) handelt, ist der Umgang mit Feinsedimenten von besonderer Bedeutung.

1.2 Turbinenverschleiss

Schwebstoffe, die im Triebwasser von Wasserkraftanlagen enthalten sind, können zu Hydroabrasiv-Verschleiss an Turbinen führen (*Bilder 1b* und *1c*). Dadurch sinkt deren Wirkungsgrad und allenfalls deren Verfügbarkeit, die Elektrizitätsproduktion nimmt ab, und die Kosten für Unterhalt und Erneuerung der elektromechanischen Ausrüstung nehmen zu. Turbinenverschleiss ist insbesondere bei Mittel- und Hochdruckwasserkraftanlagen ohne Speicherseen ein technisch, wirtschaftlich und energiewirtschaftlich bedeutender Aspekt (*Abgottspon et al.* 2016a). Bei solchen Kraftwerken wird üblicherweise in Anlagen zur Reduktion der Sedimentfracht (Entsander) und/oder in die Auslegung der Turbinen für hohe Sedimentbelastungen (Turbinendesign und Beschichtungen) investiert (z. B. *Wedmark* 2014).

1.3 Stauraumverlandung

Bei Wasserkraftanlagen mit Speicherseen setzt sich ein Grossteil der durch die Zuflüsse eingetragenen Gesteinspartikel in den Seen ab. Bei Speichern, deren Stauvolumen im Vergleich zum jährlichen Zuflussvolumen gross ist, sedimentieren nicht nur Kies und Sand in der Nähe der Flussmündungen (Delta), sondern auch feinere Partikel (Silt). Das Triebwasser enthält dann lediglich relativ geringe Konzentrationen von Ton- oder Feinsilt-Partikeln, und der Hydroabrasiv-Verschleiss an Turbinen ist gering. Mittel- und langfristig wird aber bei solchen Kraftwerksanlagen die Verlandung der Stauseen zum Problem, wenn die Sedimentablagerungen die Speicherfunktion und die Nachhaltigkeit des flexiblen Betriebs sowie die Auslassorgane und somit

die Betriebssicherheit tangieren (*Schleiss et al.* 2010, *Boes* und *Hagmann* 2015). In Flusssystemen ist es aus übergeordneter Sicht und gemäss aktueller Gewässerschutzgesetzgebung meist wünschenswert bzw. erforderlich, Sedimente möglichst weiterzuleiten (Sedimentdurchgängigkeit).

2. Massnahmen gegen die Stauraumverlandung

Die Stauraumverlandung kann bekanntlich durch zahlreiche Massnahmen *(Bild 2)* vorbeugend oder im Nachhinein reduziert werden (*ICOLD* 1989, *Boes* und *Hagmann* 2015, *Chamoun et al.* 2016, *Schleiss et al.* 2016, *Auel* und *Boes* 2017). Die Machbarkeit und die wirtschaftliche Tragbarkeit von solchen Gegenmassnahmen hängt vor allem vom jährlichen Wasser- und Sedimentzufluss im Vergleich zum Speichervolumen, von der Anlagenkonzeption, den Sedimenteigenschaften sowie von zahlreichen Randbedingungen wie Zugänglichkeit, Topografie, Konzessionsbestimmungen und ökologischen Anforderungen ab.

Bei periodischen Spülungen – die in der Regel eine Seespiegelabsenkung erfordern – können je nach Verdünnung unterstrom von Sperren hohe Schwebstoffkonzentrationen (Suspended Sediment Concentration SSC) auftreten (*ICOLD* 1999, *BUWAL* 1994). Um diese zu reduzieren, um Seespiegelabsenkungen zu vermeiden und weil kohäsive Feinsedimente nicht ohne Weiteres grossflächig gespült werden können, wird bei einigen Stauhaltungen eine Sedimentförderung mittels Saugbagger *(hydro-suction)* oder Druckluftheber *(airlift)* gewählt. Von einem Ponton aus werden über längere Zeiträume Feinsedimentablagerungen mit einem Spül-/Schneidkopf gelöst, in ein steigendes Rohr angesaugt und über eine flexible Leitung wegbefördert (*Hotchkiss* und *Huang* 1995, *Morris* und *Fan* 1997, *Schüttrumpf* und *Detering* 2011, *Shrestha* 2012, *Jacobsen* und *Chimenez* 2015). Wenn der Auslauf der Förderleitung unterhalb des Wasserspiegels z. B. am Sperrenfuss angeordnet wird, kann der Höhenunterschied für die Sedimentförderung genutzt werden *(Bild 3)*. Im Fall von Restwasserstrecken unterstrom von Speichern würden so aber relativ hohe SSC resultieren, die in der Schweiz in der Regel unzulässig wären.

Wenn bei Ausleitungskraftwerken Feinsedimente nicht ins Unterwasser von Sperren, sondern in den Triebwasserweg gefördert werden, können hohe SSC in der Restwasserstrecke und Produktionsverluste infolge Spülungen vermieden werden, aber die Turbinen sind stärker durch Sedimente belastet und es kann zu Feinsedimentablagerungen im Triebwassersystem kommen. Im Folgenden wird diese Möglichkeit näher betrachtet.

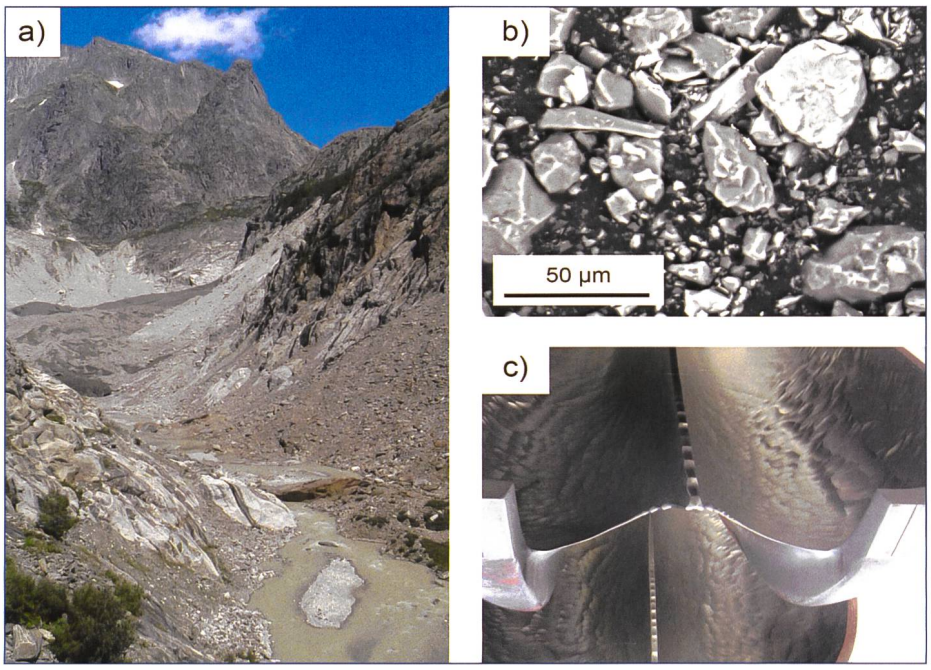

Bild 1. a) Transport von Grob- und Feinsediment unterstrom eines sich zurückziehenden Gletschers (Fieschergletscher, Bild: VAW 2014), b) Mikroskopaufnahme von abrasiven Schwebstoffpartikeln (Bild: VAW 2013) und c) abgenutztes unbeschichtetes Laufrad einer Pelton-Turbine (Ausstellungsobjekt bei der Stauanlage Emosson, Bild: VAW 2011).

Massnahmen gegen die Verlandung

Sedimenteintrag reduzieren

- Reduktion der Erosion auf Böden und Böschungen sowie in Fliessgewässern
- Sedimentrückhalt oberstrom der Sperre
- Speicher im Nebenschluss anordnen
- Sedimentumleitstollen / -kanäle mit Einlauf an der Stauwurzel
- Überleitungen mit Entsandern ausrüsten und während hohem Sedimentaufkommen ausleiten

Sedimentaustrag erhöhen

Sedimente durchleiten (ohne Absetzen)

- Sedimentreiches Wasser (Dichteströme oder aktiv in Schwebe gehaltene Feinsedimente) via Auslässe, Umleitstollen mit Einlauf im Stauraum oder **Triebwasserwege**
- Bei abgesenktem Seespiegel durch Tiefauslässe

Sedimentablagerungen entfernen

- Spülung bei abgesenktem Seespiegel durch Tiefauslässe oder Umleitstollen mit Einlauf im Stauraum
- Nassförderung an den Sperrenfuss, in **Triebwasserwege**, andere Stauräume oder in Deponie
- Trockenbaggerung mit LKW-Transport

Weitere Möglichkeiten

- Grossen Totraum einplanen
- Sedimentumlagerung im Speicher
- Sperre erhöhen u. Auslassorgane höherlegen

Umnutzung (vom Speicher- zum Laufwasserkraftwerk)

Rückbau der Sperre und Ablagerungen erodieren lassen

Bild 2. Massnahmen gegen die Stauraumverlandung (nach Schleiss et al. 2010, Boes und Hagmann 2015, Auel und Boes 2017).

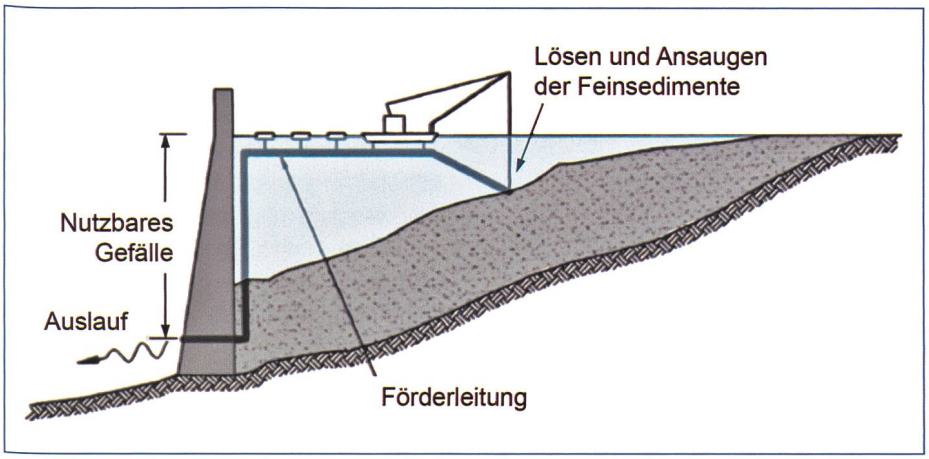

Bild 3. Entfernung von Feinsedimentablagerungen aus Stauräumen mittels hydraulischer Förderung bzw. Saugbaggerung und Abgabe in die Restwasserstrecke (nach Eftekharzadeh 1991 in Hotchkiss und Huang 1995).

3. Feinsedimentweiterleitung über den Triebwasserweg

3.1 Möglichkeiten zur Erhöhung der SSC im Triebwasser

Die SSC im Triebwasser und somit der Sedimentaustrag aus einem Speicher können erhöht werden, indem Feinsedimente wie erwähnt vom Seegrund gelöst und über eine Leitung vor oder in Triebwassereinläufe gefördert werden. Dabei ist vorteilhaft, dass der räumliche Bereich der Sedimententnahme und der Förderstrom gesteuert werden können.

Weiter kann das Absetzen von Feinsedimenten in Sperrennähe durch erhöhte Turbulenz bzw. eine lokale Aufwärtsströmung reduziert werden. Diese kann durch Wasserstrahlen (*Jenzer Althaus et al.* 2008, *Jenzer Althaus* 2011) oder Luftblasen induziert werden (*DWA* 2006). Es wird erwartet, dass so mit einem relativ geringen Energieaufwand ein grösserer Anteil der in den See eingetragenen Feinsedimentfracht ins Triebwasser gelangt und weiterbefördert wird.

Mit geeigneter Ausgestaltung von Triebwassereinlaufbauwerken kann zeitweise stark feinsedimenthaltiges Wasser, welches periodisch in Form von Trübeströmen in die Nähe von Talsperren und Triebwassereinläufe gelangen kann, über den Triebwasserweg abgeleitet werden. Für diese Option sind relativ grosse Turbinendurchflüsse günstig (z. B. grosse Francis-Turbinen); die Wirkung dieser Massnahme dürfte aber aufgrund des zeitlich beschränkten Auftretens von Trübeströmen beschränkt sein.

Bei seichten Speichern kann erwogen werden, am Rand des Stauraums einen Durchflusskorridor (Bypasskanal) mit einem Damm abzugrenzen und lediglich nahe der Sperre eine Verbindung zum Speicher offenzulassen (*Heller et al.* 2016). Es wird erwartet, dass sich so weniger Feinsedimente im Speicher absetzen.

3.2 Wirksamkeit und Machbarkeit

Bei einem Turbinendurchfluss von beispielsweise 10 m^3/s und einer durchschnittlichen SSC im Triebwasser von z. B. 0.5 g/l, werden pro Stunde 18 t Sediment abgeführt. Dies entspricht bei beispielsweise 8 h Volllastbetrieb pro Tag einer Sedimentmenge von 144 t pro Tag, oder 22 000 t während einer Schwebstoffsaison von rund 5 Monaten. Mit einer Lagerungsdichte der Sedimente von 1.8 t/m^3 können so jährlich rund 12 000 m^3 eines Stauraums freigehalten werden. Demgegenüber würde die Ausbaggerung einer solchen Kubatur mit Transport der abgetrockneten Sedimente auf der Strasse ca. 1200 Fahrten von Vierachslastwagen (mit 18 t Nutzlast) erfordern.

Wenn im Vorfluter unterstrom der Wasserrückgabe SSC akzeptiert werden, die in der Grössenordnung der natürlichen SSC (vor dem Bau von Speicherseen) liegen, können über Jahre etwa so viel Sedimente aus einem Speicher abgeführt werden wie eingetragen werden, d. h., es ist ein nachhaltiger Betrieb – auch über eine Konzessionsdauer hinaus – möglich. Für drei Jahresspeicher in der Schweiz (Luzzone, Grimsel, Mauvoisin) schätzten *Althaus et al.* (2008) die im Mittel resultierenden SSC bei vollständiger Weiterleitung der eingetragenen Sedimente auf 0.9 bis 2 g/l. In Wasserkraftanlagen, z. B. im Himalaya und in den Anden, treten während der abflussreichen Zeit derartige oder sogar höhere SSC im Triebwasser auf, und Turbinen können wirtschaftlich betrieben werden, wenn auch mit erhöhtem Verschleiss und speziellen Gegenmassnahmen (*Singh et al.* 2013, *Espinoza* 2016). Am KW Fieschertal im Wallis betrug in den Jahren 2012 bis 2014 die mittlere SSC 0.5 g/l, und pro Maschinengruppe bzw. Laufrad wurden jährlich ca. 20 000 bis 60 000 t Feinsedimente turbiniert (*Felix et al.* 2016c). Mit Schleifen und Nachbeschichten der Mittelschneiden und Bechereintrittskanten der Pelton-Laufräder vor Ort in jedem Winter kann in diesem Kraftwerk ein Laufrad in der Regel mehrere Jahre im Einsatz bleiben, bis eine grössere Revision im Herstellerwerk fällig wird. Die gemessenen Wirkungsgradabnahmen lagen dabei unter 1 % (*Abgottspon et al.* 2016b).

3.3 Begrenzung des Turbinenverschleisses

Bei einer erhöhten SSC im Triebwasser ist, wie oben erwähnt, höherer Turbinenverschleiss zu erwarten. Folgende Voraussetzungen sind günstig für einen relativ geringen Verschleiss (IEC 62364 2013):

- Geringe bis mittlere Fallhöhen, d. h. weniger hohe relative Fliessgeschwindigkeiten
- Relativ feine Partikel, d. h. Ton und Feinsilt (d <20 µm) gemäss *DWA* (2006), oder d < ca. 80 µm für Pelton-Turbinen gemäss *Winkler et al.* (2011)
- Grosser Anteil von Partikeln mit Mohshärte <4.5 bzw. <6.5, d. h. weniger hart als üblicher Turbinenstahl bzw. Wolframkarbidbeschichtungen
- Volllastbetrieb, der zu weniger Verschleiss pro produzierter kWh führt
- Auf hohe Schwebstoffbelastungen ausgelegte Turbinen bzw. -teile

Für Letzteres können bei der Planung von Neuanlagen oder bei Umbauprojekten folgende Massnahmen geprüft und ergriffen werden (*Grein* und *Krause* 1994, IEC 62364 2013, *Wedmark* 2014):

- Beschichtungen von wasserberührten Turbinenteilen
- Angepasste geometrische Auslegung (z. B. dickere Bauteile)
- Möglichst einfache Austauschbarkeit von erosionsbeanspruchten Teilen
- Spezielle Lösungen für Dichtungen oder Lagerzapfen von Francis-Leitschaufeln
- Separate Kühlwasserkreisläufe mit Klarwasser und Wärmetauschern im Unterwasser

Meist sind Sedimentablagerungen in der Nähe von Sperren und Triebwassereinläufen als Erstes zu entfernen. In mittleren und grösseren Speichern sind die Ablagerungen in diesen Bereichen in der Regel feinkörnig. Dies ist günstig für die Sedimentweiterleitung über den Triebwasserweg, da feine Sedimente weniger Verschleiss verursachen als gröbere. Falls bei der Förderung von Seeablagerungen auch Grob-

sand, Kies oder gar Steine enthalten sind, die unverhältnismässig grosse Schäden an Turbinen verursachen würden, können diese gröberen Komponenten in einer Separieranlage ausgeschieden und als Baumaterial verwendet oder andernorts im Reservoir deponiert werden.

Wasserkraftwerk (*Fluss*) Speicher, Land (Literaturquelle)	Speicher-volumen aktuell (ursprüngl.)	Brutto-fall-höhe	Ausbau durch-fluss Q_d	Zulässiger Anstieg der SSC im Vorfluter	Sediment-rückgabe-rate Q_s
KW Kubel (*Sitter*), Gübsensee, Schweiz (*De Cesare et al.* 2008)	1.1 Mio m³ (1.5 Mio m³)	97 m	16 m³/s	0 im Winter, 0.2 g/l sonst	270 t/Tag (Testbetrieb)
KW Walgauwerk (*Ill*), Ausgleichs-becken Rodund, Österreich (*Sollerer* und *Matt* 2013)	1.8 Mio m³ (2.1 Mio m³)	162 m	68 m³/s	0 falls $SSC_{ref} \leq 0.05$ g/l, 0.2 g/l falls $0.05 < SSC_{ref} < 0.2$ g/l 1.5* SSC_{ref} falls $SSC_{ref} \geq 0.2$ g/l	1'170 t/Tag ≤ 4'800 m³/Tag
KW Langenegg, Bolgenachspeicher, Österreich (*DWA* 2006)	6.5 Mio m³ (8.4 Mio m³)	280 m	32 m³/s	Praktizierte Rückgabe mit 0.02 bis 0.2 g/l (vor allem bei hohen natürlichen Abflüssen) lag unter den zulässigen SSC	praktiziert ≤ 500 t/Tag (80'000 t/Jahr)

Tabelle 1. Beispiele von Wasserkraftanlagen, bei denen Feinsedimente aus Speicherseen mobilisiert und über den Triebwasserweg dosiert weitergegeben wurden (nach Felix et al. 2016d).

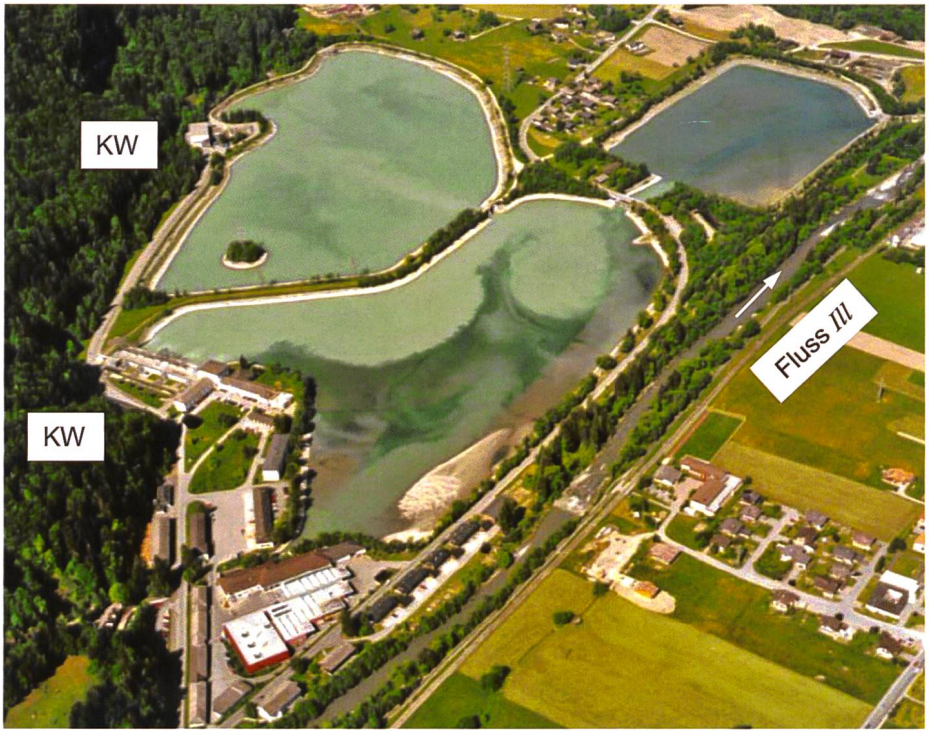

Bild 4. Ausgleichsbecken Rodund in Österreich (Vorarlberg) mit Eintrag von Gletscherschliff durch die Oberliegerkraftwerke und von teils gröberen Sedimenten durch die Wasserfassung an der Ill (Sollerer und Matt 2013).

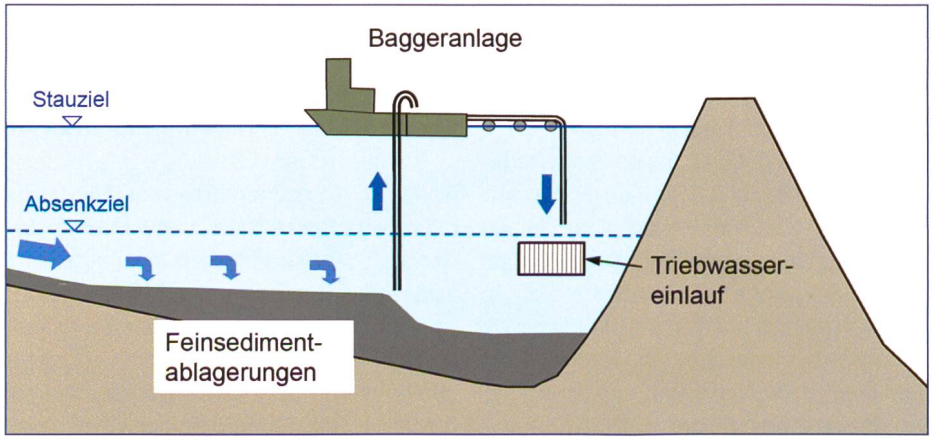

Bild 5. Schema der Entlandung des Speichers Bolgenach in Österreich (Vorarlberg) (Vigl und Pürer 1996).

3.4 Beispiele

In *Tabelle 1* sind drei Beispiele von Wasserkraftanlagen zusammengestellt, bei denen Feinsedimente aus relativ kleinen Speichern mittels Saugbagger oder Druckluftheber mobilisiert und dosiert über die Triebwasserleitung weitergegeben wurden (*Bilder 4* und *5*). Diese Anlagen sind mit Francis-Turbinen ausgerüstet und haben kleine bis mittlere Fallhöhen. Die aus ökologischer Sicht zulässigen Erhöhungen der SSC im Vorfluter unterstrom der Wasserrückgabe wurden von Umweltfachstellen der Behörden fallspezifisch, je nach Saison und abhängig von der aktuellen SSC in der Restwasserstrecke oberstrom der Wasserrückgabe (SSC_{ref}) festgelegt. Im zweiten Beispiel in *Tabelle 1* wurde eine ausgesprochen dynamische Feinsedimentdotierung gewählt. Wenn die Saugbaggeranlage mit voller Leistung betrieben wurde, konnten 200 m³ Sedimentablagerungen pro Stunde entfernt werden, was bei Ausbaudurchfluss einer SSC von 1.4 g/l im Triebwasser entspricht. Mit dieser Art der Sedimentweitergabe waren die resultierenden SSC im Vorfluter ähnlich wie im natürlichen Zustand vor dem Bau der oberstrom liegenden Talsperren.

Bei aussergewöhnlich tiefen Seespiegelabsenkungen oder See-Entleerungen, z. B. für Bauarbeiten und Kontrollen an Sperren oder im Stauraum, traten in anderen Fallbeispielen je nach Sedimentablagerungen und Einsatz des Grundablasses relative hohe SSC im Triebwasser auf, und es wurden relativ grobe Gesteinspartikel transportiert, welche zu starkem Turbinenverschleiss führten. In der Schlussphase der Pegelabsenkung des Speichers Gepatsch im Winter 2015/2016 mit einer Feinsedimentfracht von rund 15 000 t wurde in den unbeschichteten Laufradbechern einer Pelton-Turbine im KW Kaunertal eine Erosionstiefe von im Durchschnitt ca. 2.5 mm gemessen (*Fernandes et al.* 2016).

4. Anlagespezifische Optimierung

Für geringe Unterhalts- bzw. Anschaffungskosten der hydraulischen Maschinen sind tiefe SSC und keine groben Partikel im Triebwasser wünschenswert, was bei Wasserkraftanlagen mit grossen Speichern in einer ersten Phase auch an sedimentreichen Flüssen in der Regel der Fall ist. Um der Speicherverlandung entgegenzuwirken, kann es sinnvoll sein, die SSC im Triebwasser wie erwähnt zu erhöhen *(Bild 6)*. Vorausgesetzt, dass die zulässige SSC im Triebwasser nicht durch ökologische Anforderungen im Unterwasser begrenzt wird

(z. B. innerhalb einer Kraftwerkskaskade oder mit natürlichen relativ hohen SSC), sind in einer wirtschaftlichen Optimierung folgende Elemente anlagespezifisch abzuwägen:

- Wert des erhaltenen bzw. wiederhergestellten Stauraumvolumens
- Kosten für die Feinsedimentverlagerung vom Speicher ins Triebwasser
- Kosten für zusätzliche Revisionen oder Ertüchtigungen der Turbinen
- Allfällige Mindererträge durch Wirkungsgradabnahmen infolge Verschleiss

Für die Festlegung der SSC und der Partikelgrösse im Triebwasser, welche aus wirtschaftlicher Sicht bezüglich des Turbinenverschleisses vertretbar sind, können erste Abschätzungen mit Kennwerten der Anlage und des Einzugsgebiets aufgrund von Vergleichen mit Fallbeispielen oder aufgrund von Berechnungsmodellen in der Literatur oder in Zusammenarbeit mit Turbinenherstellern gemacht werden.

Für unbeschichtete Francis-Turbinen können die Erosionstiefen an verschiedenen Stellen innerhalb einer Turbine in Funktion der sogenannten Particle Load mittels der Richtlinie *IEC 62364* (2013) abgeschätzt werden, wobei die Unsicherheit aufgrund der beschränkten Anzahl verfügbarer Felddatensätze noch relativ hoch ist. Für Pelton-Turbinen enthält diese Richtlinie keine Koeffizienten für die Abschätzung der Erosionstiefen (*Winkler et al.* 2010). Für beschichtete Pelton-Turbinen wurden die Koeffizienten im IEC-Erosionsmodell aufgrund der Daten aus der Fallstudie am KW Fieschertal (2012–2014) soweit wie möglich bestimmt (*Felix et al.* 2016a). Es wurde ein Schwellenwert der Particle Load bestimmt, bis zu welchem die Hartbeschichtung auf den Schneiden nur wenig beschädigt wird und mit relativ geringem Aufwand vor Ort repariert werden kann. Weiter wurden im Fallbeispiel Fieschertal die spezifischen Kosten infolge Turbinenverschleiss auf ca. 7 CHF pro Tonne Feinsediment geschätzt (*Abgottspon et al.* 2016a). Die relativen Mittelschneidenbreiten sind hinsichtlich Wirkungsgradänderungen besonders relevant (*Maldet* 2008). *Boes* (2010) kalibrierte das Erosionsmodell von *Sulzer* (1996), welches in *DWA* (2006) beschrieben ist, für die Vorhersage der Mittelschneidenbreite an Pelton-Laufrädern im KW Dorferbach aufgrund von Messungen der SSC und der Turbinenerosion.

Für die Abschätzung der zu erwartenden Turbinenerosion und Wirkungsgradänderungen sind Betriebserfahrungen und Messungen von Referenzanlagen mit möglichst ähnlichen Bedingungen wertvoll. Am aussagekräftigsten sind Versuche an der betreffenden Wasserkraftanlage über mehrere Monate oder Jahre, bei denen

- die SSC (und eventuell die Partikelgrössen) im Triebwasser schrittweise gesteigert
- die Turbinenerosion und die Wirkungsgradminderungen parallel erfasst werden
- die entsprechenden monetären Auswirkungen ermittelt und
- allfällige Massnahmen zur Reduktion des Turbinenverschleisses umgesetzt werden

Für die Quantifizierung der SSC, Partikelgrössen, Turbinenerosion und Wirkungsgradänderungen stehen praxiserprobte Messtechniken zur Verfügung (*Boes et al.* 2013, *Abgottspon et al.* 2016a, b; *Felix et al.* 2016b).

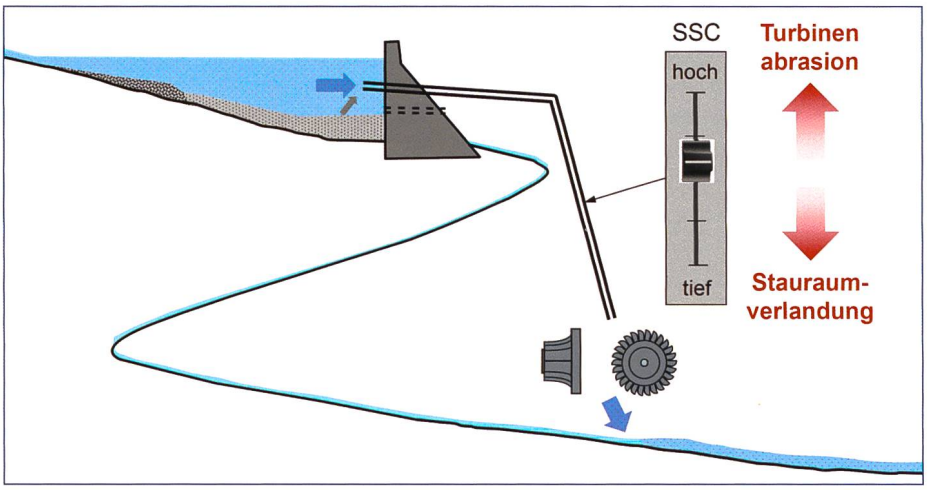

Bild 6. Erhöhung der Schwebstoffkonzentration (SSC) im Triebwasser als Massnahme gegen die Speicherverlandung unter Inkaufnahme von stärkerem Turbinenverschleiss (nach Felix et al. 2016d).

5. Schlussfolgerungen

Bei Wasserkraftanlagen mit Speichern wird empfohlen, die Möglichkeit der Weiterleitung von Feinsedimenten über den Triebwasserweg vermehrt zu prüfen. So kann der Speicherverlandung entgegengewirkt und die Durchgängigkeit für Feinsedimente, die den Grossteil der Sedimentfracht ausmachen, verbessert werden. Im Vergleich zu periodischen Stauraumspülungen und Sedimentrückgaben in Restwasserstrecken können mit dieser Art der häufigen oder quasi-kontinuierlichen Sedimentweiterleitung die SSC tiefer gehalten und Produktionsverluste infolge Spülungen vermieden werden. Mit einer variablen und kontrollierten Feinsedimentförderung kann ein naturnahes Schwebstofftransportregime im Unterwasser wiederhergestellt werden.

Dabei ist an den Turbinen erhöhter Hydroabrasiv-Verschleiss in Kauf zu nehmen bzw. die Turbinen sind auf höhere Sedimentbelastungen auszulegen. Gestützt auf rechnerische Abschätzungen, Betriebserfahrungen und Messresultate von Feldversuchen, kann die Gesamtanlage, d. h. die hydraulischen Maschinen und die baulichen Anlagen, auch hinsichtlich der Sedimente und ihrer Auswirkungen mittel- und langfristig optimiert werden.

6. Ausblick

Für bessere Voraussagen der Auswirkungen von Feinsedimenten auf Pelton- und Francis-Turbinen, d. h. Erosionssschäden und Wirkungsgradminderungen an Hoch- und Mitteldruckwasserkraftanlagen, werden weitere Studien im Feld, im Labor und mittels numerischer Simulationen empfohlen. Insbesondere zum Einfluss der Partikelgrösse und zu beschichteten Turbinenbauteilen besteht weiterer Forschungsbedarf. Um Betriebs- und Investitionsentscheidungen auf aktueller und verlässlicher Grundlage zu fällen, ist es ratsam, bereits entwickelte und erprobte Messsysteme für die relevanten Grössen vermehrt einzusetzen.

Weiter wird angeregt zu prüfen, ob die Mehraufwendungen eines Kraftwerksbetreibers für die beschriebene Art der naturnahen Feinsedimentweiterleitung teilweise über die Mittel zur Reduktion der negativen Auswirkungen der Wasserkraftnutzung (0.1 Rp/kWh gemäss Energiegesetz Art. 15a^{bis}) finanziert werden könnten, wie dies für Massnahmen zur Verbesserung des Geschiebehaushalts an durch Wasserkraftanlagen beeinträchtigten Fliessgewässern der Fall ist.

Verdankung

Die Erarbeitung dieses Artikels wurde durch den Forschungsfonds des Schweizerischen Talsperrenkomitees gefördert. Das erwähnte

Forschungsprojekt der VAW der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit der Hochschule Luzern am KW Fieschertal wurde durch swisselectric research, das Schweizer Bundesamt für Energie (BFE) und die Gommerkraftwerke AG (gkw) sowie durch Industriepartner (Turbinen- und Messgerätehersteller) unterstützt. Die Forschungsarbeiten der VAW zu den erwähnten Themen sind in das Schweizerische Kompetenzzentrum für Energieforschung im Bereich Strombereitstellung (SCCER-SoE) eingebettet. Die Autoren bedanken sich bei allen Projektbeteiligten für ihr Engagement.

Literatur

Abgottspon, A., Felix, D., Boes, R., Staubli, T. (2016a). Schwebstoffe, hydro-abrasiver Verschleiss und Wirkungsgradänderungen an Peltonturbinen – Ein Forschungsprojekt am KW Fieschertal. «Wasser Energie Luft»108(1): 9–24.

Abgottspon, A., Staubli, T., Felix, D. (2016b). Erosion of Pelton buckets and changes in turbine efficiency measured in the HPP Fieschertal. IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 49, 122008.

Auel, C., Boes, R. (2017). Sedimentumleitstollen – eine nachhaltige Massnahme gegen Stauraumverlandung. WasserWirtschaft 107(4): 42–47.

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., Felix, D., Albayrak, I. (2013). Schwebstoffmonitoring zum verschleissoptimierten Betrieb von Hochdruck-Wasserkraftanlagen. «Wasser Energie Luft» 105(1): 35–42.

Boes, R. M., Hagmann, M. (2015). Sedimentation countermeasures – examples from Switzerland. Proc. 1st Intl. Workshop on Sediment Bypass Tunnels, VAW-Mitteilung 232 (Boes R., ed.), ETH Zürich: 193–210.

BUWAL (1994). Ökologische Folgen von Stauraumspülungen. Schriftenreihe Umwelt 219; Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

Chamoun, S., De Cesare, G., Schleiss, A. J. (2016). Managing reservoir sedimentation by venting turbidity currents: A review. Intl. J. of Sediment Research 31(3): 195–204.

De Cesare, G., Baumann, R., Zuglian, R., Binder, F. (2008). Sedimentausleitung aus dem Speicher Gübsensee über die Triebwasserleitung. VAW-Mitteilung 207 (Minor, H.-E., ed.), ETH Zürich: 317–326 sowie in «Wasser Energie Luft»101(3): 203–206.

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

Espinoza, A. M. (2016). Managing Sediment in Peru's Pativilca River Basin (HPP Cahua). Hydro Review Worldwide 24(4): 24–29.

Felix, D., Abgottspon, A., Albayrak, I., Boes, R. M. (2016a). Hydro-abrasive erosion on coated Pelton runners: Partial calibration of the IEC model based on measurements in HPP Fieschertal. IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 49, 122009.

Felix, D., Albayrak, I., Abgottspon, A., Boes, R. M. (2016b). Real-time measurements of suspended sediment concentration and particle size using five techniques. IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 49, 122006.

Felix, D., Albayrak, I., Abgottspon, A., Boes, R. M. (2016c). Suspended sediment measurements and calculation of the particle load at HPP Fieschertal. IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 49, 122007.

Felix, D., Albayrak, I., Abgottspon, A., Boes, R. M. (2016d). Optimization of hydropower plants with respect to fine sediment focusing on turbine switch-offs during floods. IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 49, 122011.

Fernandes, J. N., Boes, R. M., Titzschkau, M., Hammer, A., Haun, S., Schletterer, M. (2016). Suspended sediment concentrations and turbine wear during the drawdown of two Alpine reservoirs. Proc. Hydro Conference, Montreux, Schweiz.

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

Heller, P., Mailler, B., Feller, I., Blasi, F., Lafrikh, S., Kolly, J.-C. (2016). Solutions constructives au problème d'ensablement du lac du Vernex sur la Sarine à Rossinière. «Wasser Energie Luft» 108(2): 87–93.

Hotchkiss, R.H., Huang, X. (1995). Hydrosuction sediment-removal systems (HSRS): Principles and field test. J. of Hydraulic Engineering 121(6): 479–489.

ICOLD (1989). Sedimentation control of reservoirs. Bulletin 67, International Commission on Large Dams, Paris.

ICOLD (1999). Dealing with reservoir sedimentation. Bulletin 115, International Commission on Large Dams, Paris.

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

Jacobsen, T., Jiménez, A. (2015). Recent experiences from sediment removal projects. Proc. Hydro Conference, Bordeaux, Frankreich.

Jenzer Althaus, J., De Cesare, G., Schleiss, A. (2008). Abführung von Feinsedimenten über Triebwassersysteme als nachhaltige Massnahme gegen die Stauraumverlandung. VAW-Mitteilung 207 (Minor, H.-E., ed.), ETH Zürich: 349–359.

Jenzer Althaus, J. (2011). Sediment evacuation from reservoirs through intakes by jet induced flow. PhD thesis no. 4927. Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), EPFL Lausanne.

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

Morris, G. L., Fan, J. (1997). Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs and Watersheds for Sustainable Use. McGraw-Hill, New York.

Schleiss, A., De Cesare, G., Jenzer Althaus, J. (2010). Verlandung der Stauseen gefährdet die nachhaltige Nutzung der Wasserkraft. «Wasser Energie Luft» 102(1): 31–40.

Schleiss, A. J., Franca, M. J., Juez, C., De Cesare, G. (2016). Reservoir sedimentation. J. of Hydraulic Research 54(6): 595–614.

Schüttrumpf, H., Detering, M. (2011). Innovative sediment handling to restore reservoir capacity. Dams and reservoirs under changing challenges, Schleiss A. J., Boes R. M. (eds.), CRC Press: 345–352.

Shrestha, H. S. (2012). Application of Hydrosuction Sediment Removal System (HSRS) on peaking ponds. Hydro Nepal 11: 43–48.

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 J. of Hydraulic Eng. 19(1): 1–10.

Sollerer, F., Matt, P. (2013). Sediment management of reservoirs – sediment discharge in dependence on the suspended load concentration in the run-off water. Proc. Hydro Conference, Innsbruck, Österreich.

Vigl, L., Pürer, E. (1996). Speicher Bolgenach – Feststoffbewirtschaftungskonzept und erforderliche Massnahmen. VAW-Mitteilung 142 (Vischer D., ed.), ETH Zürich: 223–230.

Wedmark, A. (2014). Living with particle abrasion. Proc. Hydro Conference, Cernobbio, Italien.

Winkler, K., Dekumbis, R., Rentschler, M., Parkinson, E., Garcin, H. (2011). Understanding hydroabrasive erosion. Proc. Hydro Conference, Prag, Tschechische Republik.

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

Anschrift der Verfasser

David Felix, felix@vaw.baug.ethz.ch
Dr. *Ismail Albayrak*, albayrak@vaw.baug.ethz.ch
Prof. Dr. *Robert Boes*, boes@vaw.baug.ethz.ch
ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)
CH-8093 Zürich