Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 95 (2003)
Heft: 7-8

Artikel: Entsander von Wasserkraftanlagen
Autor: Ortmanns, Christoph / Volkart, Peter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939473

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: 23.08.2025

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

Entsander von Wasserkraftanlagen

Christoph Ortmanns, Peter Volkart

Bild 1. Typischer Langsandfang bestehend aus fünf parallel angeordneten, horizontal durchströmten Absetzbecken in Peru. Trotz unterschiedlicher Zuströmung sind die Becken identisch ausgelegt, was allenfalls problematisch sein könnte.

Einleitung

Bei der Entnahme von Wasser aus stehenden oder fliessenden Gewässern werden immer auch Stoffe in fester und gelöster Form mit in die Fassung geleitet. Von diesen Stoffen wirken sich die in fester Form auf den optimalen Betrieb der Wasserkraftanlage störend aus. Man unterscheidet im Wesentlichen schwimmende Feststoffe, wie z.B. Holz, Laub usw., an der Sohle des Fliessgewässers transportiertes Geschiebe und die in Schwebe transportierten Feststoffe. Das Eindringen dieser Stoffe in eine Wasserfassung sollte möglichst vollständig vermieden werden.

Schwimmende Feststoffe werden durch Anordnung von Rechen und/oder Tauchbalken gleich zu Beginn des Einlaufes abgewiesen. Für den Fall, dass bei Geschiebe führenden Hochwässern Wasser gefasst wird, muss die Fassung so gestaltet sein, dass sohlennah transportiertes Geschiebe nicht in die Fassung eindringen kann. Entsprechend hoch über der Sohle angeordnete Fassungen mit Geschiebeabzugskanälen und Spülvorrichtungen oder die Ausbildung als Umlenkfassung haben sich als gute Lösungen erwiesen. In extremen Fällen muss die Fassung bei Hochwasser geschlossen werden. Bei Fallrechenfassungen, den so genannten Tirolerfassungen, gelangen praktisch alle Feststoffe mit Korndurchmessern, die kleiner sind als die Abstände zwischen den Rechenstäben, in die Fassung. Schliesslich dringt der in Suspension transportierte Feststoff immer mit in eine Wasserfassung.

Der trotz Anordnung von Rechen und optimaler Geschiebe abweisender Fassungsgestaltung in die Fassung gelangte Feststoff kann sich in zweifacher Hinsicht störend auf den Betrieb der Wasserkraftanlage auswirken. Zum einen lagern sich Sandkörner in strömungsarmen Zonen des Leitungssystems, in späteren Ausgleichsbecken oder in Stauseen ab oder führen zum anderen zu Verschleisserscheinungen an den hydraulischen Anlagen. Dieser Materialabtrag an den Turbinen kann bei entsprechend hohen Feststoffkonzentrationen und grossen Fallhöhen erhebliche Revisionskosten verursachen, ja sogar die Wirtschaftlichkeit der gesamten Wasserkraftanlage in Frage stellen. Um Ablagerungen und Verschleiss an Turbinenbestandteilen zu verhindern, werden zur Abtrennung der Feststoffe Entsandungsanlagen gebaut. Eine einfache Kanalaufweitung vergrössert die Querschnittsfläche und verringert dadurch Fliessgeschwindigkeit und Turbulenz der Strömung. Durch Aufrechterhaltung dieses beruhigten Strömungsbereiches über eine bestimmte Länge L, können sich dann in Schwebe transportierte Partikel (Sand, Schluff) absetzen. Es wäre natürlich wünschenswert, liessen sich in solchen Sandfängen alle Feststoffe, bis hin zu kleinsten Partikeln absetzen. Erstaunlicherweise sind Entsander von Wasserkraftanlagen aber in der Schweiz sowie im Ausland so gut wie immer auf ein Kleinstkorn mit einem Durchmesser von etwa 0,3 mm ausgelegt. In manchen Fällen kann dieses Kleinstkorn zwischen d = 0,1 mm bis d = 0,5 mm schwanken. Dies hat im Wesentlichen drei Gründe:

Zum einen wurden Sandfänge schon vor dem Einsatz im Wasserkraftwerksbau, auf Abwasserreinigungsanlagen eingesetzt. Da man das Absetzten von organischen, faulfähigen Bestandteilen verhindern wollte, wurden Sandfänge so entwickelt, dass sich Sandkörner mit Durchmessern um 0,3 mm absetzen, die organischen Bestandteile mit Sinkgeschwindigkeiten, die etwas kleiner sind als die der Sandpartikel, aber durch den Sandfang hindurchtransportiert werden. Weiterhin haben Forschungen im Zusammenhang mit Strömungen in Sandfängen gezeigt, dass sich die Strömungsgeschwindigkeit und damit die Turbulenz verzögernd auf den Absetzvorgang auswirken, sodass selbst bei den für Sandfängen üblichen niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten von 0,1 bis 0,3 m/s ein Abtrennen von Partikeln mit Durchmessern unter 0,1 mm fast unmöglich wird. Ausserdem waren Turbinenhersteller der Meinung, dass der Verschleiss der hydraulischen Anlagenteile wie Francislaufräder, Leitapparat, Labyrinthringe, Peltonschaufeln und -düsen vor allem durch die Kornpartikel mit grösseren Durchmessern als 0,3 mm verursacht würden.

Der Langsandfang, Grundlagen der Bemessung

Üblicherweise werden Langsandfänge als horizontal durchströmte Becken mit vertikalen Seitenwänden und geneigter Sohle gebaut. Bei der Messung werden gewisse, in Bild 2 dargestellte, vereinfachende Massnahmen gemacht.

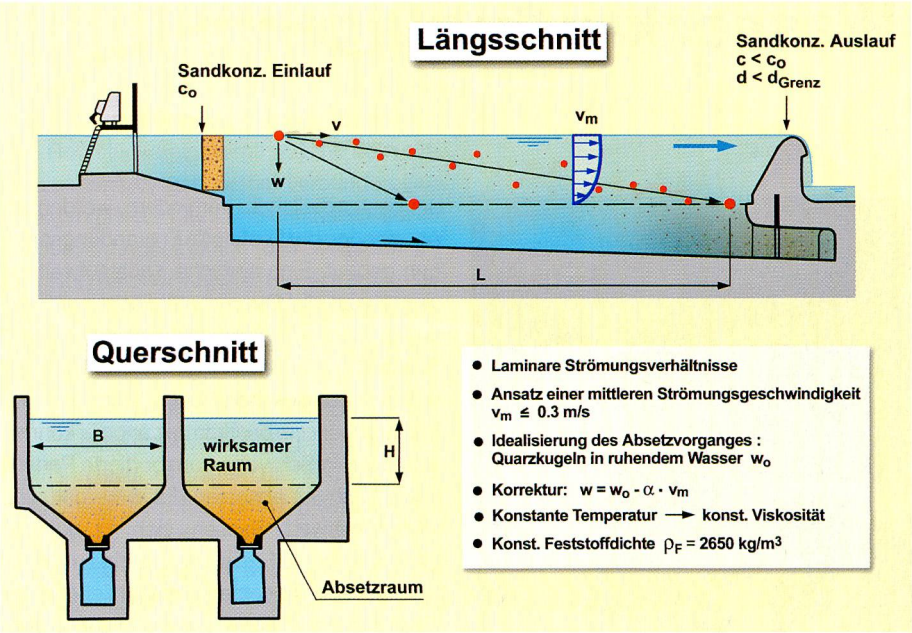

Bild 2. Idealisierter Längs- und Querschnitt eines Langsandfangs.

Für das gewählte Grenzkorn muss im ersten Schritt der Bemessung gewährleistet sein, dass es auf Grund der Schleppkraft des Wassers an der Sohle nicht weitertransportiert wird. Dazu beschränkt man die Fliessgeschwindigkeit im Sandfang auf Werte $v < v_{kritisch}$. Auf Grund seiner Untersuchungen gibt Camp (1945) die kritische Fliessgeschwindigkeit an zu: $v_{krit} = 13 \cdot \sqrt{d}$ [m/s, mit d in m]. Vischer, Huber (1993) und Mosonyi (1998) verwenden die gleiche Formel. Dies ergibt für die Fliessgeschwindigkeiten in Langsandfängen die Werte gemäss Tabelle 1.

d_{Grenz}	v_{krit}
[mm]	[m/s]
0,1	0,13
0,2	0,18
0,3	0,23
0,4	0,26
0,5	0,30

Tabelle 1. Maximale mittlere Strömungsgeschwindigkeit in Langsandfängen, zur Vermeidung des Weitertransportes bereits abgelagerter Partikel in Abhängigkeit des gewählten Grenzkornes.

Aus den Vorüberlegungen bezüglich des Grenzkornes d_{Grenz} und der einzuhaltenden kritischen Geschwindigkeit ergibt sich über $Q = v \cdot A$ der erforderliche Sandfangquerschnitt zu:

$$A = \frac{Q}{v_{krit}}$$

mit Q [m³/s] Durchfluss durch 1 Entsander
A [m²] Querschnittsfläche
v_{krit} [m/s] maximale, mittlere Strömungsgeschwindigkeit

Mit $A = B \cdot H$ ergeben sich die Querschnittsabmessungen, wobei Breite B und Tiefe H etwa gleich sein sollten. Mosonyi (1997) empfiehlt sogar ein Verhältnis B/H von 1/1,2, um ein gleichmässiges Durchströmen zu begünstigen. Die Sandfanglänge L erhält man aus der Überlegung, dass die Absetzzeit der Schwebstoffe der gewählten Korngrösse kleiner ist als die Durchflusszeit durch das Becken.

Mit $t_h = \frac{L}{v}$ und $t_v = \frac{H}{w}$ ergibt sich:

$$L = \frac{H}{w} \cdot v$$

Dabei bedeuten:

t_h [s] horizontale Aufenthaltszeit des Bemessungskorns
t_v [s] vertikale Aufenthaltszeit des Bemessungskorns
L [m] Sandfanglänge
w [m/s] Sinkgeschwindigkeit des Grenzkorns für turbulente Strömungsverhältnisse

Durch die Arbeiten von Camp und Dobbins (Camp 1945) wurde der verzögernde Einfluss der Turbulenz auf den Sedimentationsvorgang erstmals systematisch untersucht. Einen vereinfachten Ansatz findet man bei Mosonyi (1997). Dabei wird die empirisch bestimmte Sinkgeschwindigkeit w_0 der Sandkörner um den Faktor

$$\frac{0{,}132}{\sqrt{H}} \cdot v \quad \text{(v in [m/s], H in [m])}$$

reduziert. Somit ergibt sich die anzusetzende Sinkgeschwindigkeit w zu:

$$w = w_0 - \frac{0{,}132}{\sqrt{H}} \cdot v$$

Für einen typischen Durchfluss von Q = 6 m³/s ergeben sich dann die in Tabelle 2 dargestellten Werte.

Das Beispiel zeigt, dass horizontal durchströmte Sandfänge bei der Abscheidung von Korngrössen von 0,1 mm an ihre Grenzen stossen. Bei der Bemessung ist die Auslegung auf d_{Grenz} zwar naheliegend und einfach, sollte aber nicht einzige Bemessungsgrösse sein. Bild 3 zeigt zwei Kornverteilungskurven, wie sie beispielhaft an verschiedenen Wasserfassungen im Zulauf zu einem Entsander auftreten können. Kurve A steht dabei für eine feinkörnigere Verteilung, Kurve B eher für eine grobkörnigere mit einem Grösstkorn von etwa 1 cm, wie es nicht selten bei Fallrechenfassungen auftreten kann. Ein Entsander, der auf ein Grenzkorn von 0,3 mm bemessen worden wäre, würde im Falle der Kornverteilungskurve B etwa 75% der gesamten Feststoffe zurückhalten. Wären die Feststoffe aber gemäss Kurve A verteilt, würde der Sandfang lediglich 10% der gesamten Feststoffe zurückhalten. 90% der Feststoffe weisen Korndurchmesser auf, die kleiner als 0,3 mm sind und die sich nicht absetzen würden. Es sollte also, bei der Bemessung eines Sandfanges, auch auf die Kornverteilung und natürlich auf die Feststoffkonzentration geachtet werden, auch wenn die Datenbeschaffung mit grossem Aufwand verbunden ist. Hier liegt noch Optimierungspotenzial.

Optimierungen

Der Verschleiss an Turbinen hängt keineswegs nur von der Korngrösse der im Triebwasser verbleibenden Partikel ab, sondern wird vielmehr durch die Feststoffmenge,

d_{Grenz}	mittl. Fliessgeschwindigkeit	Querschnitt A	Länge
[mm]	[m/s]	[m²]	[m]
0,1	0,13	46	unendlich
0,2	0,18	33	105
0,3	0,23	26	70
0,4	0,26	23	36
0,5	0,30	20	29

Tabelle 2. Theoretischer Zusammenhang zwischen abzusetzendem Grenzkorn d_{Grenz} und erforderlichen Abmessungen des Entsanders.

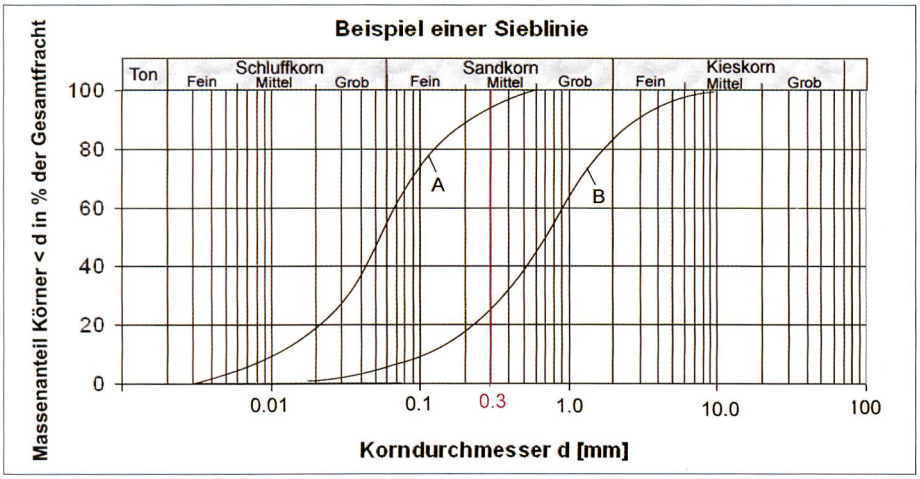

Bild 3. Beispiel einer feinkörnigeren (Linie A) und einer grobkörnigeren Sieblinie (Linie B).

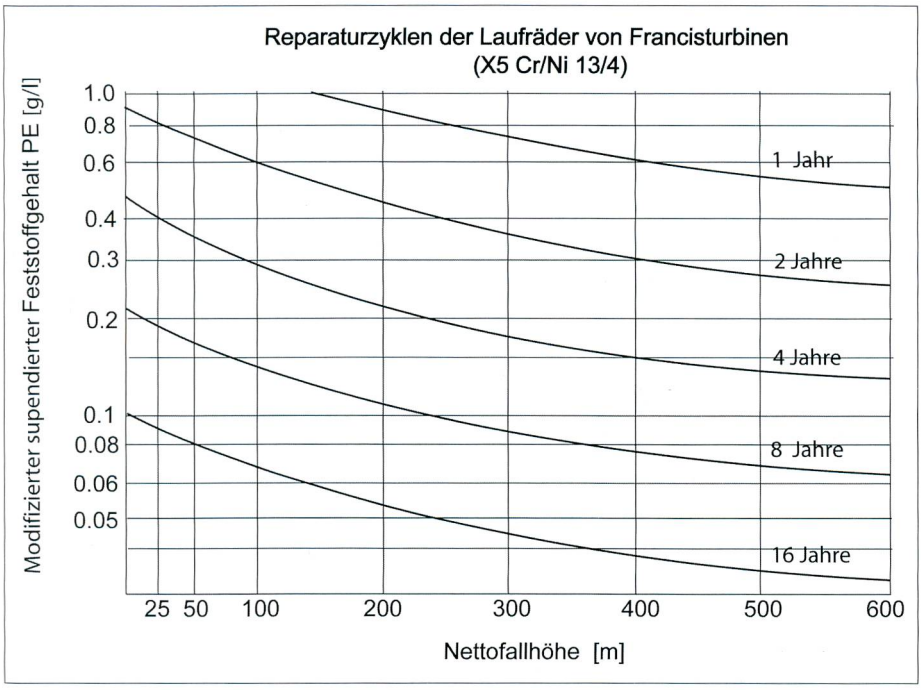

Bild 4. Zusammenhang zwischen modifiziertem suspendiertem Feststoffgehalt, Nettofallhöhe und Reparaturzyklus von Turbinenlaufrädern der Bauart Francis.

Kornverteilung, Form und Härte sowie massgeblich durch die relative Geschwindigkeit zwischen Wasser und Turbinenbauteil (wie Laufrad, Leitapparat, Düsennadeln...) bestimmt. Durch die 1990 veröffentlichte Studie von T. Nozaki können die Reparaturzyklen von Francis- und Peltonturbinen in Abhängigkeit der Feststoffbelastungen und Nettofallhöhen abgeschätzt werden. Aus Bild 4 geht hervor, wie sich für den nach Nozaki definierten modifizierten Feststoffgehalt PE [g/l] und die Nettofallhöhe die Reparaturzyklen für die Laufräder von Francisturbinen abschätzen lassen.

Durch PE werden die Einflüsse der Feststoffmenge, Korngrösse, Kornform, Kornhärte und des Turbinenmaterials berücksichtigt. Der modifizierte Feststoffgehalt ist folgendermassen definiert:

$$PE = P \cdot a \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

Es bedeuten:

P [g/l] Feststoffkonzentration im Wasser

a [–] Korngrössenkoeffizient

$$a = \frac{d}{0{,}05}$$

mit d in [mm]

k_1 [–] Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Kornform mit: $k_1 = 0{,}75$ für runde (kugelförmige) und $k = 1{,}25$ für eckige (scharfkantige) Körner

k_2 [–] Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Kornhärte
$k_2 = 1{,}0$ für Kornhärten > 3 (Härte nach Mohs)
$k_2 = 0{,}5$ für Kornhärten < 3 (Härte nach Mohs)

k_3 [–] Verschleisswiderstandsfaktor des Turbinenmaterials
$k_3 = 1{,}0$ für X5 13/4 Cr/Ni, für andere Materialien, siehe Nozaki (1990)

Aus Bild 4 geht hervor, wie stark sich die Feststoffkonzentration auf die Reparaturzyklen der Laufräder von Francisturbinen auswirkt. Um im Zuge eines wirtschaftlichen Entwurfes einer Entsandungsanlage die Feststoffkonzentration zu verringern, ist die Kenntnis der Kornverteilung wichtig. Nicht selten liegen suspendierte Feststoffgehalte in der Grössenordnung von 0,1 g/l im langjährigen Mittel mit Korndurchmessern unter 0,1 mm.

Spülsysteme

Der in den Langsandfängen abgesetzte Sand muss nach Überschreiten einer zulässigen Ablagerungshöhe ausgespült werden, um den wirksamen Querschnitt für die Sedimentation freizuhalten. Die Sandablagerungshöhen werden durch Messsonden ermittelt, welche vorteilhaft im ersten Viertel der Entsanderbecken angeordnet werden. Hofer (1979) zeigte, dass sich die höchsten Ablagerungen dort ergeben. Aus Sicherheitsgründen wird zusätzlich eine Sonde kurz vor dem Überlauf angeordnet, um zu verhindern, dass sich bei übermässigem Feststoffeintrag und Defekt der ersten Sonde der Sandfang füllt und ein Ausspülen unmöglich wird bzw. übermässig Feststoff in das Leitungssystem gerät. Unter den Sonden unterscheidet man solche, die, werden sie von Sand oder Feststoffen umgeben, eine Veränderung der Schwingungsfrequenz oder eine Verringerung eines radioaktiven Signals registrieren und anschliessend den Spülvorgang auslösen.

Beim Ausspülen des Sandes unterscheidet man Systeme, bei denen der Sand horizontal oder vertikal ausgespült wird. Beim horizontalen Spülsystem, auch als Büchi-System bezeichnet (siehe Bild 5), wird durch Öffnen eines Spülschützes bei abgesenktem Wasserspiegel ein schiessender Spülstrom erzeugt, der kraft seiner Turbulenz die Ablagerungen ausspült. Während des Spülvorganges kann kein Wasser gefasst werden. Dieses System zeichnet sich vor allem durch seine einfache Art aus und wird bei kleineren Gebirgsbachfassungen mit Ausbaudurchflüssen kleiner als 5 m^3/s eingesetzt.

Bei vertikalen Spülsystemen wird der abgelagerte Feststoff senkrecht in einen Spülkanal abgezogen. Das System der Firma Bieri (Bild 6) trennt den Absetzraum vom Spülkanal durch zwei übereinander liegende Lochplatten. Durch Servomotoren können diese gegeneinander verschoben werden und geben einen Spalt frei, durch den die Feststoffe in die Spülrinne dringen. Dieses System hat sich seit gut 50 Jahren bewährt, zeichnet sich vor allem durch einen minimalen Spülwasserbedarf aus und ist deshalb

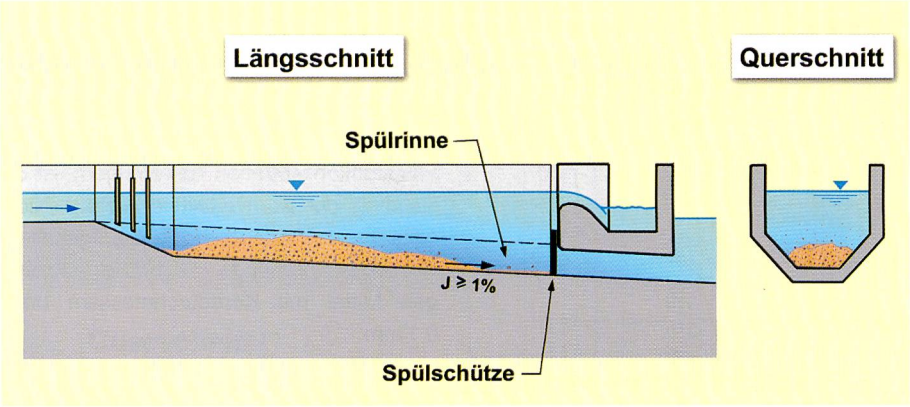

Bild 5. Horizontales Spülsystem nach Büchi. Seit 1910 eingesetzt.

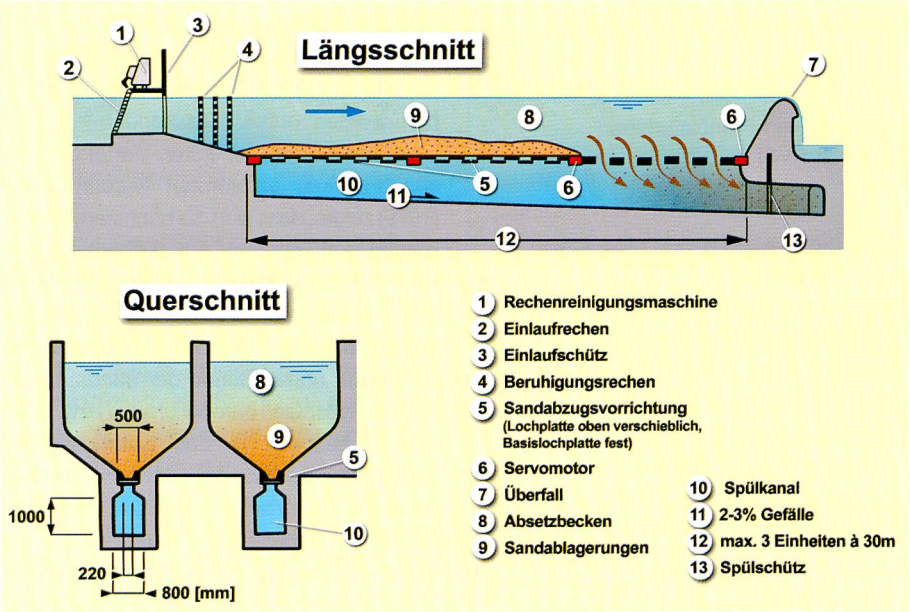

Bild 6. Vertikales Spülsystem nach Bieri. Seit 1950 eingesetzt.

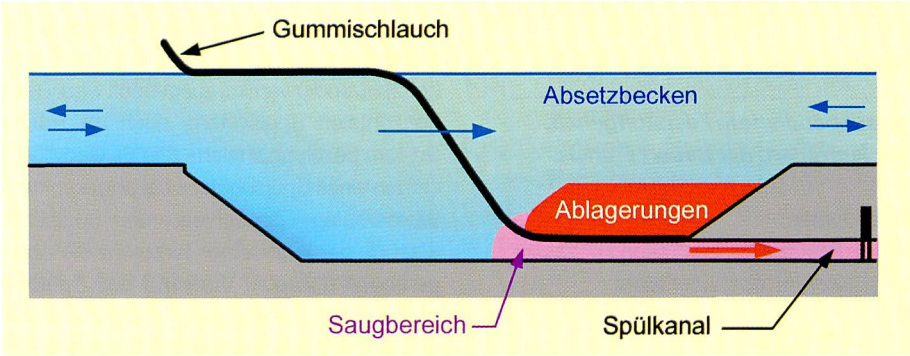

Bild 7. Vertikales Sandabzugssystem «Serpent Sediment Sluicing System».

das am häufigsten eingesetzte Spülsystem an schweizerischen Entsandungsanlagen.

Die hohen Investitionskosten, bedingt durch aufwendige, zum Teil verschleiss- und korrosionsanfällige hydromechanische Bauteile, haben dazu geführt, nach Lösungsmöglichkeiten zu suchen, die diese ersetzen.

Das Spülsystem «Serpent Sediment Sluicing System» (Bild 7) verschliesst den etwa 20–30 cm grossen Spalt an der Sohle des Sandfanges mit einem strapazierfähigen Gummischlauch, der durch Befüllen mit Luft an die Oberfläche schwimmt und die Öffnung zum Spülkanal freigibt. Diese norwegische Entwicklung würde die aufwendige Hydromechanik des konventionellen vertikalen Abzugssystems auf einfachste Art ersetzen.

Ausblick

Viele Entsander von Wasserkraftanlagen im Alpenraum weisen auffallend übereinstimmende Bauformen und Abmessungen auf, obschon Qualität und Quantität der Feststoffzufuhr sehr stark variieren. Offensichtlich galt das Augenmerk vor allem den beweglichen Spüleinrichtungen und weniger den tatsächlichen Strömungs- und Absetzvorgängen im Entsanderbecken. Ob die Geschwindigkeitsverteilung des Wassers im Entsander und die sich daraus ergebenden Turbulenzgrade der Strömung tatsächlich das Absetzen des Grenzkornes garantieren, darf in der Praxis mit einem gewissen Recht bezweifelt werden. Es sind Fälle bekannt, bei denen grosse Kies-Sand-Körner bis zum Turbinenlaufrad transportiert wurden und sogar die hochkarätige Schutzbeschichtung durchschlagen haben.

Hier nun setzt das PSEL Projekt Nr. 235 «Entsander von Wasserkraftanlagen» ein (PSEL = **P**rojekt und **S**tudienfonds der **El**ektrizitätswirschaft). Durch die Autoren des vorliegenden Artikels soll ein wirtschaftliches Optimum gefunden werden, bei dem das Verhältnis zwischen dem Aufwand für die Leistungssteigerung eines Entsanders und dem Ertrag aus tieferen Revisionskosten und erhöhter Flexibilität minimal ist. Daraus soll ein entsprechendes wirtschaftliches Grenzkorn resultieren, welches spezifisch für jeden Entsander zu bestimmen wäre. Dabei wird die interne Strömung im Entsanderbecken und deren Verbesserung eine nicht zu unterschätzende Rolle spielen.

Literatur

Camp T.R. (1945). Sedimentation and the Design of Settling Tanks. Transactions ASCE, Paper No. 2285: 895–936.

Drobir H. (1981). Entwurf von Wasserfassungen im Hochgebirge. Österreichische Wasserwirtschaft 33 (11/12): 243–253.

Krause M., Lang E., et al. (1996). Abschlussbericht F&E Projekt «Sandabrasion». NEFF Bericht Nr. STT.TB96.014 (unveröffentlicht).

Minor H. E., Moric P. (1996). Optimierung von Sandfängen dargestellt an der Wasserkraftanlage Kukule in Sri Lanka. Internationales Symposium: Verlandung von Stauseen und Stauhaltungen, Sedimentprobleme in Leitungen und Kanälen, VAW Zürich: S. 245–261.

Mosonyi E., Giesecke J. (1998). Wasserkraftanlagen. Berlin, Springer Verlag.

Nozaki T. (1990). Estimation of Repair Cycle of Turbine Due to Abrasion Caused by Suspended Sand and Determination of Desilting Basin Capacity (unveröffentlicht).

Vischer D., Huber A. (1993). Wasserbau. Berlin, Verlag Springer, 5. Auflage.

Anschrift der Verfasser

C. Ortmanns, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zentrum, CH-8092 Zürich, ortmanns@vaw.baug.ethz.ch

Dr. *P. Volkart,* Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zentrum, CH-8092 Zürich, volkart@vaw.baug.ethz.ch