Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 98 (2006)
Heft: 1

Artikel: Entsander von Wasserkraftanlagen
Autor: Ortmanns, Christoph / Volkart, Peter / Minor, Hans-Erwin
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939320

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: 13.07.2025

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

Entsander von Wasserkraftanlagen

■ *Christoph Ortmanns, Peter Volkart, Hans-Erwin Minor*

Wasserkraft
Wasserkraftanlagen allg.
Wasserbau Feststoffkanäle

Einleitung

Im Wasserkraftwerksbau werden Entsander gebaut, um den Anteil an Feststoffen (Kies, Sand, Schluff) im Triebwasserleitungssystem zu verringern. Dabei stellt der Anteil der in Suspension eingetragenen Feststoffe (Korndurchmesser zwischen ca. 10 und 500 μm) den weitaus grössten Anteil der gesamten Feststoffmenge dar, die über eine Wasserfassung in ein Triebwasserleitungssystem eingezogen wird. Ein Entsander ist nichts anderes als eine einfache Kanalaufweitung im Längs- und Querschnitt, in der die Strömung so weit beruhigt wird, dass suspendierte Feststoffpartikel, aufgrund ihrer gegenüber Wasser grösseren Dichte, zur Sandfangsohle sedimentieren können und dort liegen bleiben, siehe *Bild 1*. Die Leistungsfähigkeit des Entsanders hat einen bedeutenden Einfluss auf die unten liegenden hydraulischen Anlagenkomponenten, da die nicht sedimentierten Partikel zu Verschleissschäden an den Turbinenanlagen, Stollen und Leitungen führen, die bei Kraftwerken mit grossen Fallhöhen und/oder sehr grossen Feststoffkonzentrationen die Wirtschaftlichkeit der gesamten Wasserkraftwerksanlage gefährden. Das Absetzen von Partikeln gestaltet sich für feine Partikel, aufgrund der auch in Sandfängen immer noch turbulenten Strömung, zunehmend schwieriger bzw. führt zu immer grösseren Beckenquerschnitten und Beckenlängen. Das Wissen über die effektive Leistungsfähigkeit von Entsandern ist deshalb eine wichtige Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der gesamten Wasserkraftanlage. Im Rahmen des vom Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätsgesellschaft Schweiz (PSEL) mitfinanzierten Forschungsprojektes «Entsander von Wasserkaftanlagen» hat die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) die Strömungs- und Turbulenzverhältnisse an drei Entsanderanlagen in situ untersucht. In diesem Artikel wird zu Beginn der verschleissverursachende Einfluss der Feststoffe im Triebwasser auf die Turbinentypen Francis und Pelton quantifiziert. Anschliessend werden die praktisch durchgeführten Strömungsversuche und die daraus gewonnenen Erkenntnisse präsentiert.

Hydroabrasivverschleiss

Beim Betrieb von Turbinen in Wasserkraftwerken weist das zum Antrieb verwendete Wasser immer einen bestimmten Anteil an Feststoffen auf. Nach Giesecke, Mosonyi (1997) betragen die Feststoffkonzentrationen für Gebirgsbäche der Alpen durchschnittlich 2–10 g/l, für Flachlandflüsse 0,1–1 g/l. Für Flüsse im Einzugsgebiet des Himalajas können die Feststoffkonzentrationen in Zeiten des Monsuns dagegen Werte von über 80 g/l erreichen. Die Schäden, die durch den Transport von partikelbeladenen Flüssigkeiten an Turbinen auftreten, werden als Hydroabrasivverschleiss oder vereinfachend als Abrasion bezeichnet. Die beim Vorgang des Hydroabrasivverschleisses im Mikrobereich auftretenden Schadensmechanismen sind Furchung, Zerrüttung und Korrosion. Eine Verschleissverringerung kann zum einen durch den Einsatz resistenterer Materialien (siehe dazu Föhl, Sommer [2000], Schneider, Kächele [1999]) und durch ein hydraulisch günstiges Design der Turbinen erreicht werden. Zum anderen lässt sich durch den Bau von Entsandungsanlagen die Belastung des Triebwassers durch mineralische Feststoffpartikel verringern. Von den verschleissverursachenden Parametern sind die wichtigsten: die relative Geschwindigkeit zwischen Fluid und Turbinenbauteil, die Härte des Feststoffes im Verhältnis zur Härte des Turbinenmaterials, die Feststoffkonzentration in g/l und der Partikeldurchmesser bzw. die Kornverteilung der Feststoffe. Die Untersuchung des Einflusses der relativen Strömungsgeschwindigkeit v auf den Verschleiss V in hydraulischen Modell-

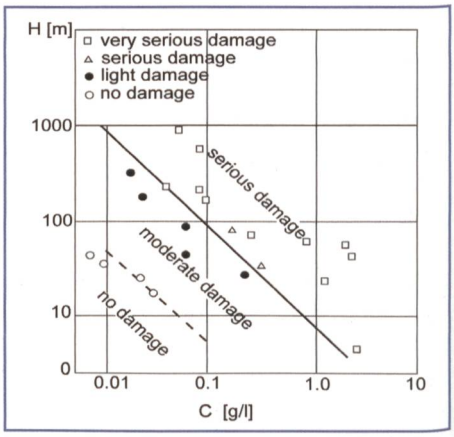

Bild 2. Zusammenhang zwischen Feststoffkonzentration C, Nettofallhöhe H und Verschleissrisiko, modifiziert nach Zu-Yan Mei (1996).

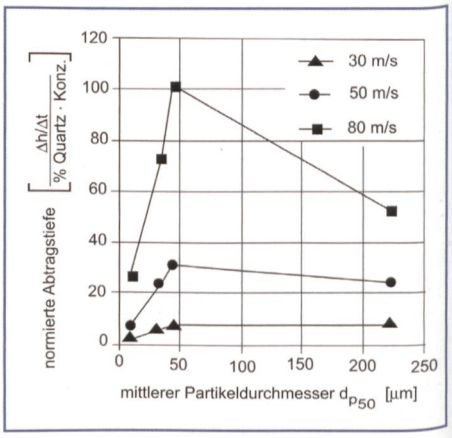

Bild 3. Zusammenhang zwischen mittlerem Partikeldurchmesser d_{p50} und normierter Abtragstiefe (Verschleiss), für relative Geschwindigkeiten zwischen feststoffhaltigem Wasser und Probekörper von 30–80 m/s. Die Abtragstiefe ist mit dem Anteil harter Bestandteile (prozentualer Quarzanteil der Gesamtkonzentration) normiert, aus Keiser (1999).

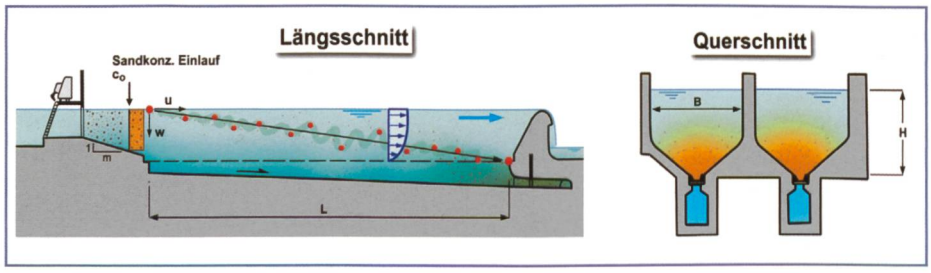

Bild 1. Längs- und Querschnitt durch einen Langsandfang.

versuchen der Firma Sulzer Hydro (Keiser, 1999) und Voith Siemens (Grosse, 1995) sowie in Natur durch Nozaki (1990), hat einen strengen exponentiellen Zusammenhang $V = K \cdot v^z$ ergeben. Der Exponent z erreicht je nach Turbinenbauteil (Peltonbecher, Düse, Nadel, Francislaufrad oder Leitapparat) Werte zwischen 1,5 und 3,4.

Bezüglich des Einflusses der Feststoffhärte führen nach Uetz (1986) nur die Partikel zu einer Materialschädigung, deren mineralische Härte grösser oder gleich der des Turbinenmaterials (X5 Cr/Ni 13/4) ist. Dies sind Partikel, die eine Härte nach Mohs grösser als 3 aufweisen.

Bezüglich des Zusammenhanges zwischen Feststoffkonzentration und Verschleiss haben die Modellversuche von Krause, Lang (1993) gezeigt, dass bei zunehmender Feststoffkonzentration im Triebwasser der Verschleiss linear zunimmt. Aus den Untersuchungen der Verschleisserscheinungen an zahlreichen chinesischen und ausländischen Wasserkraftanlagen hat Zu-Yan (1996) den in *Bild 2* dargestellten Einfluss der Feststoffkonzentration C [g/l] und der Nettofallhöhe H [m] auf die Intensität des Hydroabrasivverschleisses abgeleitet. Zur Gewährleistung eines wirtschaftlichen Betriebes sollte jeder Entwurf einer Wasserkraftanlage nach Zu-Yan (1996) demnach die Bedingung $H \cdot C \leq 7$ erfüllen.

Im Hinblick auf die Dimensionierung von Sandfängen ist vor allem der Einfluss der Partikelgrösse auf den Verschleiss der hydraulischen Anlagen von entscheidender Bedeutung. Die Modellversuche der Firma Sulzer-Hydro (Keiser, 1999) zeigen für die Geschwindigkeitsbereiche 30–80 m/s ein deutliches Maximum des Verschleisses bei Korngrössen von d_{p50} = 50 µm, siehe *Bild 3*. Unterhalb von 50 µm verringert sich der Verschleiss deutlich. Oberhalb bleibt er für Korngrössen zwischen 50 bis 200 µm konstant bzw. nimmt bei hohen Geschwindigkeiten (80 m/s) sogar leicht ab.

Jacoby et al. (1995) haben den Einfluss der Partikelgrösse auf den Verschleiss in hydraulischen Anlagen numerisch mittels large eddy simulation untersucht. Der Turbulenzgrad Tu wurde zu 3% gesetzt, die Wirbellängenskala L zu 0,3 m. Die Ergebnisse der Berechnungen für ein gekrümmtes rechteckiges Rohrstück, ähnlich dem des Leitapparates einer Francisturbine, sind in *Bild 4* dargestellt. Im linken Bild sind die Ergebnisse für die äussere, im rechten Bild für die untere (obere) Berandung des Rohrstückes angegeben. Aufgrund der hohen Zentrifugalkräfte können grobe Partikel mit Korndurchmessern grösser als d = 1,0 mm der starken Krümmung des Rohres nicht folgen und treffen früh auf die Rohrwand auf, entsprechend hoch ist der Verschleiss. Erstaunlicherweise nimmt der Verschleiss ab einem Verschleissminimum bei einer Korngrösse von 0,1 mm wieder zu, was auf den Einfluss der wandnahen Turbulenz zurückzuführen ist. Hohe Geschwindigkeiten führen erwartungsgemäss zu höheren Verschleissraten. Auf den Verschleiss an der unteren Berandung des untersuchten Rohrstückes wirken sich kleinere Kornfraktionen deutlich stärker aus als grössere (rechtes Bild). Partikel um 10 µm Korndurchmesser rufen einen ca. 10-mal so grossen Materialabtrag hervor wie 1000 µm grosse Partikel. Dies ist auf den Einfluss der Turbulenz zurückzuführen wonach kleinere Partikel den turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen, die in der turbulenten Grenzschicht erzeugt werden, folgen und so häufiger auf die Materialoberfläche auftreffen als grobe Partikel und dabei Spannungsspitzen an der Materialoberfläche erzeugen die auf Dauer das Material zerrütten.

Vor diesem Hintergrund soll hier betont werden, dass eine Verringerung des Hydroabrasivverschleisses hydraulischer Anlagen im Wesentlichen durch eine Verringerung der Feststoffkonzentration und durch ein Eliminieren von grossen Partikeln mit d > 1 mm erreicht wird. Nach den in den *Bildern 2* bis *4* dargestellten Erkenntnissen kann die allgemeine Meinung einer linearen Abnahme des Verschleisses mit abnehmenden Korndurchmessern nicht aufrechterhalten werden. Feine Partikel mit Korndurchmessern zwischen 30 und 600 µm müssen diesbezüglich mindestens gleich gewichtet werden. Da die Deformationsenergie der Partikel in der 3. Potenz mit dem Partikeldurchmesser zunimmt, sollten Partikel mit Korngrössen oberhalb von 1 mm niemals in ein Druckleitungssystem gelangen. Der Bau von Sandfängen soll deshalb zum einen das Abscheiden von Partikeln grösserer Durchmesser gewährleisten und zum anderen die im Fassungsbereich vorhandene Schwebstoffkonzentration verringern. Dies wird oftmals nicht in nennenswertem Masse erreicht, da sich die suspendierte Feststofffracht zu 60–100% aus Partikeln zusammensetzt, die Korngrössen unter 0,1 mm aufweisen.

Nozaki (1990) hat den Einfluss der verschleissverursachenden Parameter und der Nettofallhöhe auf die Häufigkeit der durchzuführenden Revisionsintervalle

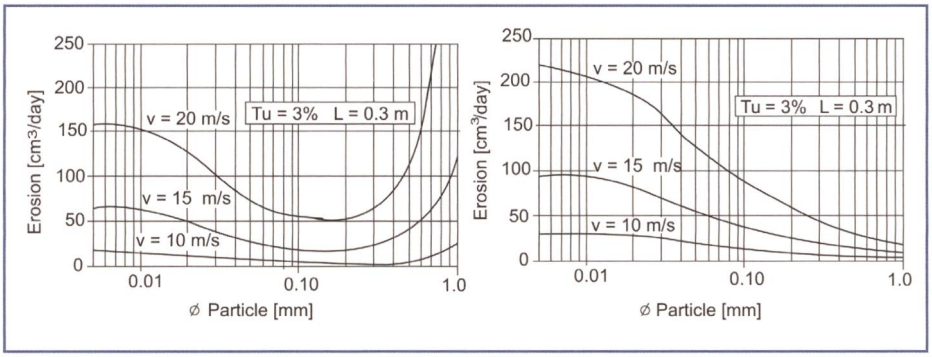

Bild 4. Zusammenhang zwischen Partikelgrösse und Verschleiss für die äussere (linkes Bild) und untere Berandung (rechtes Bild) eines gekrümmten rechteckigen Bauteils, für Relativgeschwindigkeiten v = 10, 15, 20 m/s zwischen Fluid und Bauteiloberfläche, aus Jacoby et al. (1995).

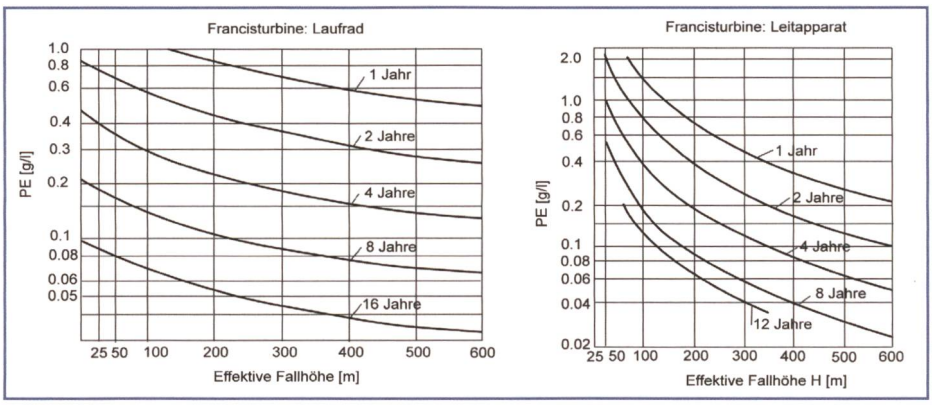

Bild 5. Reparaturzyklen der Laufräder (links) und des Leitapparates von Francisturbinen (rechts) aus 13 Cr 4 Ni, nach Nozaki (1990).

Kornform	k1
rund	0.75
eckig	1.00
äusserst scharfkantig	1.25
Kornhärte nach Mohs	**k2**
> 3	1.0
< 3	0.5
Turbinenmaterial	**k3**
13 Cr 4 Ni	1.0
Stahlguss	2.3
Bronze	4.0
Stellit	0.3
Korngrösse d [mm]	**a**
d = 0.05	a = 1.0
d > 0.05	a = d / 0.05

Francisturbine	z
Laufrad	3.0
Leitapparat, Spalt/Labyrinthring	2.5

Peltonturbine	z
Becher	1.5
Düse	2.5

Tabelle 1. Korrekturfaktoren nach Nozaki (1990).

Anlage	L [m]	B [m]	H [m]	Q [m³/s]	U [m/s]
Tavanasa	36.0	9.0	2.8	6	0.3 - 0.4
Pradella	60.0	7.5	6.9	8 - 9	0.2
Schweiben	28.1	4.5	5.84 - 6.96	0.6 - 3.6	0.03 - 0.16

Tabelle 2. Abmessungen der Versuchsanlagen.

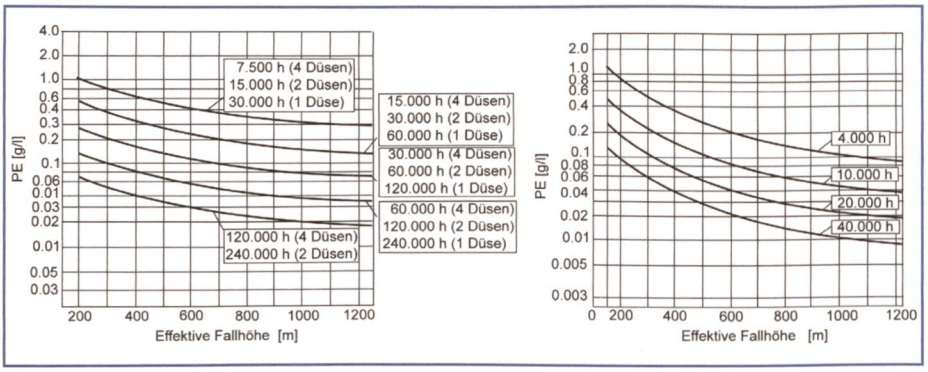

Bild 6. Reparaturzyklen der Becher (links) und der Düsen von Peltonturbinen (rechts) aus 13 Cr 4 Ni, nach Nozaki (1990).

der hydraulischen Anlagenkomponenten quantifiziert. Die der Studie zugrunde liegenden Daten wurden in den Jahren 1972 bis 1980 an 18 peruanischen Wasserkraftwerken in situ ermittelt. Nozaki (1990) gibt für den Materialverschleiss folgenden funktionalen Zusammenhang an: Verschleiss = f(PE, v^z), wobei PE den modifizierten suspendierten Sandgehalt in [g/l] repräsentiert, v die Relativgeschwindigkeit zwischen Wasser und Turbinenbauteil sowie z den Einfluss der Art der Bauteilumströmung.

PE wird über die Beziehung $PE = P \cdot a \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$ [g/l] bestimmt. P ist der mittlere Feststoffgehalt in Gramm pro Liter, der über die Triebwasserleitung auf die Turbinen gerät. Grundlage zur Bestimmung von P sollten langjährige Messreihen zum Feststoffgehalt bilden. Die Korrekturfaktoren a, k_1, k_2, k_3 und z sind in *Tabelle 1* angegeben.

Liegen für ein Projekt repräsentative Daten hinsichtlich des mittleren Feststoffgehaltes P sowie der Partikeleigenschaft (Grösse, Härte, Form) an der zu projektierenden Fassungsstelle vor, so lassen sich mit den Grafiken aus *Bild 5* und *Bild 6* die Revisionsintervalle bei bekannter Nettofallhöhe und entsprechend gewählter Turbinenart bestimmen. Eine Vergrösserung der Revisionsintervalle lässt sich demnach nur erreichen, indem der Feststoffgehalt durch den Bau von Sandfängen reduziert wird. Dabei wird der überwiegende Anteil der Feststoffe als suspendierter Feststoff in einen Entsander eingetragen. Nur ein Bruchteil gelangt im Falle vertikaler Fallrechenfassungen als Geschiebe in den Sandfang. Zur Reduktion der suspendierten Feststofffracht muss ein Entsander so bemessen werden, dass er feinste Partikel im Bereich von Bruchteilen von Millimetern aus dem Triebwasser abscheidet.

Da für solch feine Partikel der Einfluss der Strömungsturbulenz auf deren Sedimentation eine erhebliche Rolle spielt, ist zu klären, ob die bestehende Bemessungsvorschrift die tatsächliche Leistungsfähigkeit eines Entsanders für diesen Feinsandbereich korrekt erfasst. Strömungs- und Turbulenzmessungen an ausgeführten Entsandern sollen zeigen, ob und wie stark sich die tatsächlichen Strömungszustände von den idealisierten – die für eine Bemessung angenommen werden – unterscheiden.

Messungen an ausgeführten Anlagen

Dreidimensionale Strömungsmessungen mittels akustischer Dopplersonden (ADV) und Messungen der Schwebstoffkonzentrationen wurden an den Entsandern Tavanasa (Kraftwerke Ilanz), Pradella (Engadiner Kraftwerke) und Schweiben (Kraftwerke Mattmark) durchgeführt. Die geometrischen Beckenabmessungen und die während der einzelnen Messvarianten aufgetretenen Durchflüsse Q zusammen mit den mittleren Querschnittsgeschwindigkeiten U sind in *Tabelle 2* angegeben.

Die Messungen wurden unter stationär gleichförmigen Bedingungen durchgeführt, und zwar in Zeiträumen, an denen die Ausbauwassermengen und somit die grössten mittleren Strömungsgeschwindigkeiten U erreicht wurden.

Die Messungen geben Aufschluss über die tatsächlichen Strömungs- und Turbulenzverhältnisse in praktisch ausgeführten Entsandern. *Bild 7* zeigt die verwendete Messeinrichtung. Die Strömungsgeschwindigkeiten wurden mit ADV-Sonden mit einer Sampling-Frequenz von 25 Hz rasterförmig an mindestens 50 Messorten je Messquerschnitt aufgenommen. Die Abstände zwischen den einzelnen Messquerschnitten betrugen mindestens einen Zehntel der Beckenlänge. Die Strömungsgeschwindigkeiten u, v und w in x-, y- und z-Richtung liegen somit pro Entsander und durchgeführter Messvariante für ein dichtes Messraster (mindestens 500 Mess-orte je Becken) in hoher zeitlicher Auflösung vor.

Strömungsverhältnisse

Im Entsander Tavanasa wurden die dreidimensionalen Strömungsverhältnisse

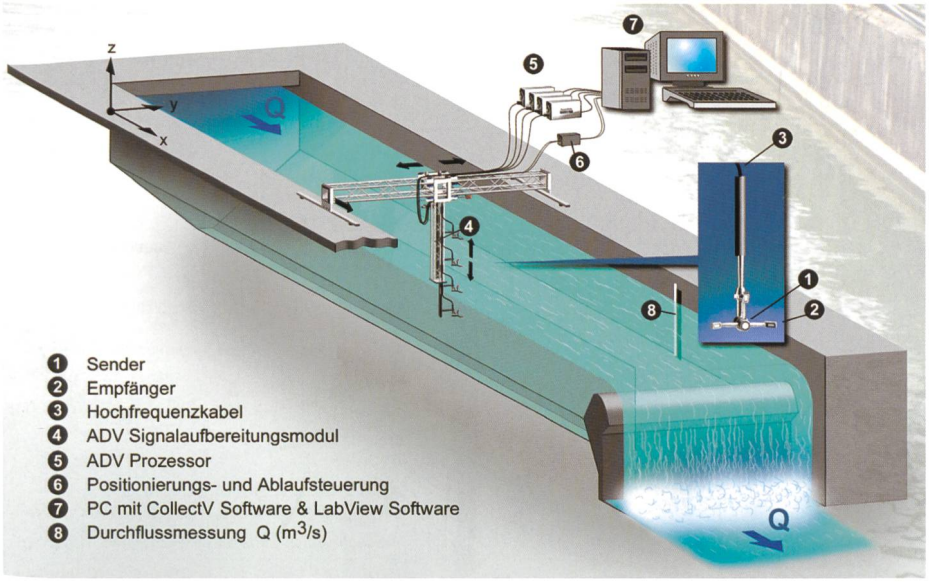

Bild 7. Messeinrichtung zur Bestimmung der dreidimensionalen Strömungs- und Turbulenzverhältnisse.

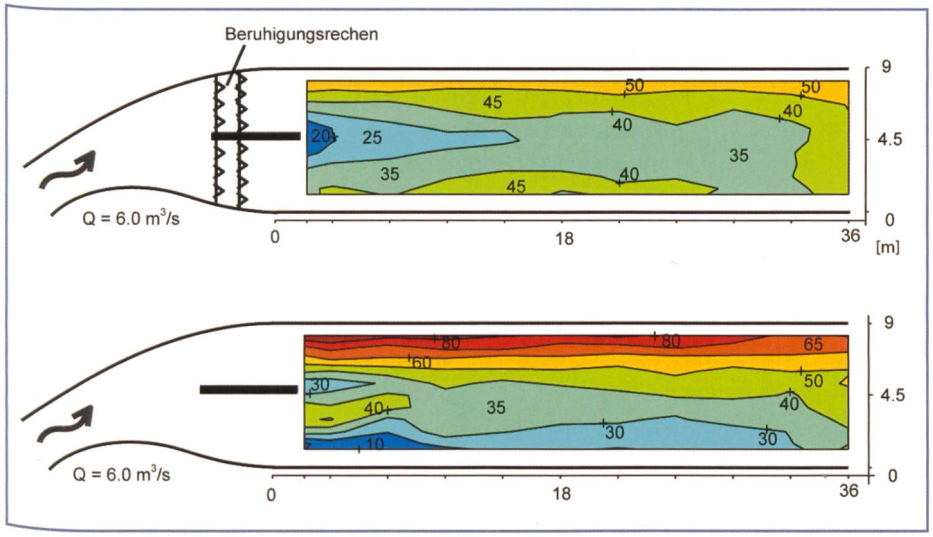

Bild 8. Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in [cm/s] im Entsander Tavanasa Q = 6 m³/s, U = 0,33 m/s. Durch den Einbau des zweireihigen Beruhigungsrechens wird eine deutliche Vergleichmässigung der Strömung erreicht.

in beiden Doppelbecken jeweils dreimal gemessen. Bei maximaler Sandablagerung, ohne Sandablagerungen und bei ausgebauten Beruhigungsrechen. In *Bild 8* sind die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten in Hauptströmungsrichtung im linken Entsanderbecken bei eingebauten (Bild oben) und ausgebauten Beruhigungsrechen dargestellt. Bei beiden Messungen entsprach die zufliessende Wassermenge mit Q = 6 m³/s dem Ausbaudurchfluss der Anlage. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit U betrug damit in beiden Becken 0,33 m/s. Auf den ersten Blick erkennt man, dass durch den Einbau der zweireihigen Beruhigungsrechen eine deutliche Strömungsvergleichmässigung erreicht wird. Durch den im Grundriss rechtsgekrümmten Zulaufkanal ergeben sich am linken Beckenrand deutlich grössere Geschwindigkeiten als am rechten Beckenrand. Es bildet sich eine dominante Hauptströmung aus, die das Becken am linken Beckenrand mit dem Zwei- bis Dreifachen der mittleren Strömungsgeschwindigkeit U durchläuft. Die beiden Strömungsbilder zeigen, dass eine gekrümmte Beckenanströmung eine Beschleunigung der Strömung an der Krümmungsaussenseite zur Folge hat, die sich durch das ganze Becken zieht. Selbst durch eine deutliche Verlängerung des Beckens liesse sich keine nennenswerte Vergleichmässigung der Strömung erzielen.

In *Bild 9* ist die dreidimensionale Strömungsstruktur im Entsander Schweiben in Form eines coneplots und drei contourplots dargestellt. Der Entsander Schweiben wird durch einen zweigeteilten Zulaufkanal mit dem gefassten Wasser des Schweib- und Riedbaches angeströmt.

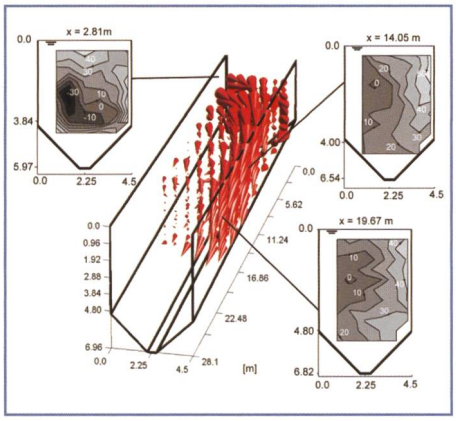

Bild 9. Dreidimensionale Strömungsstruktur im Entsander Schweiben. Die Kegel zeigen in Richtung des resultierenden Geschwindigkeitsvektors, ihre Grösse repräsentiert den Betrag der Geschwindigkeit. Am Beginn des Entsanders (x = 2,81 m) bildet sich eine starke Rücklaufströmung aus. Die asymmetrische Beckenanströmung verursacht deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten am linken Beckenrand (in Strömungsrichtung gesehen). Die Geschwindigkeiten sind in cm/s angegeben.

Die Wassermenge erreicht mit Q = 3,6 m³/s die Ausbauwassermenge. Allerdings beträgt die Wassermenge des Riedbaches (linker Zulaufkanal) das Dreifache der des Schweibbaches. Die Strömung in den Zulaufkanälen ist mit Froudezahlen über 1 schiessend. Durch die schiessenden Abflussverhältnisse, die asymmetrische Anströmung und den steilen Übergang vom Zulaufkanal zum Entsanderbecken, bildet sich trotz des dreireihigen Beruhigungsrechens eine deutliche Hauptströmung am linken Beckenrand über die gesamte Becken-länge aus. Durch den steilen Übergang vom Zulaufkanal zum Becken liegen die Geschwindigkeiten im Querschnitt x = 2,81 m an der Oberfläche deutlich über der mittleren Querschnittsgeschwindigkeit. An der Sohle bildet sich eine starke Rücklaufströmung aus. Die Messungen im Entsander Schweiben im Vergleich zu denen des Entsanders Tavanasa zeigen deutlich, dass eine Strömungsberuhigung und Vergleichmässigung bei asymmetrischer Beckenanströmung durch den Einbau von Beruhigungsrechen nur erzielt werden kann, wenn die Strömung dort bereits unterkritisch ist, also für Froudezahlen deutlich unter eins. Ebenfalls wird deutlich, dass sich bei ungünstiger Anströmung keine idealen Strömungsverhältnisse mehr über die gesamte Beckenlänge ausbilden, die jedoch bei jeder Sandfangbemessung angenommen werden.

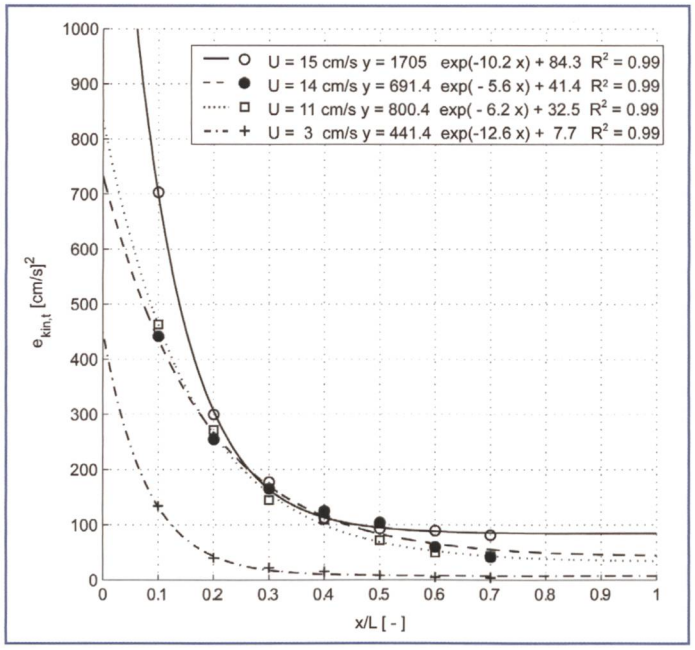

Bild 10. Darstellung der exponentiellen Abnahme der turbulenten kinetischen Energie $e_{kin,t}$ über die normierte Beckenlänge x/L am Entsander Schweiben, für 4 verschiedene mittlere Fliessgeschwindigkeiten U.

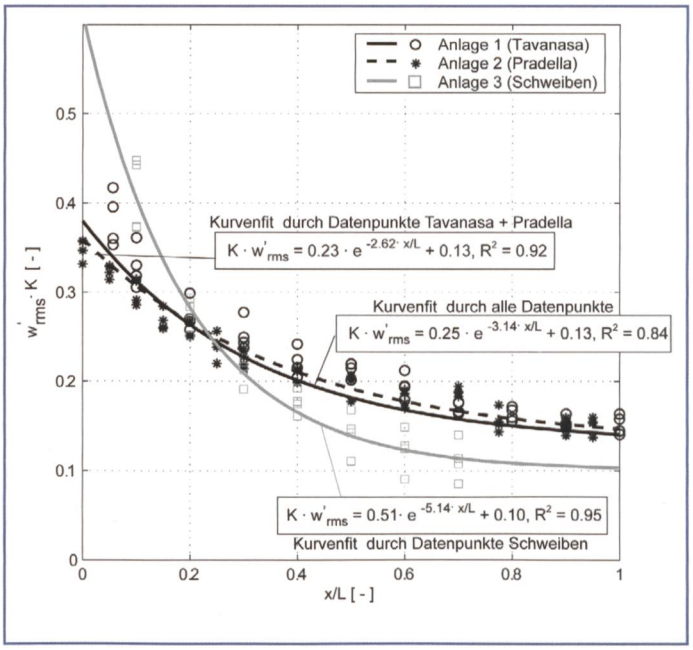

Bild 11. Darstellung der normierten vertikalen Turbulenzintensität w'_{rms} K über die relative Beckenlänge x/L. Die Normierungsparameter sind: U (U_E): Strömungsgeschwindigkeit im Sandfang (im Zulaufkanal), m: Neigung des vertikalen Übergangs vom Zulaufkanal zur Entsandersohle, g: Erdbeschleunigung, R: hydraulischer Radius des Sandfanges.

Turbulenzverhältnisse

Die klassische Bemessung von Entsandern berücksichtigt den verzögernden Einfluss der Strömungsturbulenz auf den Sedimentationsprozess lediglich, indem die Sinkgeschwindigkeit w_0 eines Partikels in stehendem Wasser um einen konstanten Betrag $\alpha \cdot U$ reduziert wird, siehe Giesecke, Mosonyi (1997) und Vischer, Huber (1993). Vereinfachend werden also ideale Strömungsverhältnisse und ein konstantes Turbulenzniveau über die gesamte Beckenlänge vorausgesetzt. In der Praxis weichen aber vor allem die Turbulenzverhältnisse erheblich von der theoretischen Annahme ab. Zur Verdeutlichung des Verlaufes der Beckenturbulenz im Entsander Schweiben sind in *Bild 10* die Messwerte der turbulenten kinetischen Energie für die Beckenquerschnitte x/L = 0,1 bis 0,7 für vier verschiedene Beckendurchflüsse dargestellt. Die turbulente kinetische Energie setzt sich aus den kinetischen Schwankungsenergien in allen drei Raumrichtungen zusammen und wird über folgende Gleichung berechnet:

$$e_{kin,t} = 0.5 \cdot (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

Sie berechnet sich also aus der Summe der Varianzen und einem Faktor von 0,5. Die turbulente kinetische Energie wird auf die Masseneinheit bezogen und hat deshalb die Einheit einer Geschwindigkeit zum Quadrat. Der Verlauf der turbulenten kinetischen Energie folgt bei allen vier Messvarianten einem strengen exponentiellen Kurvenverlauf. Die Energiehöhe ist am Beckenanfang mehr als zehnmal so hoch wie am Beckenende.

Für den Sedimentationsprozess von im Feinsandbereich liegenden Partikeln ist vor allem die Intensität der vertikalen Wirbelstrukturen von besonderem Interesse. Diese lässt sich durch die vertikale Turbulenzintensität

$$w'_{rms} = \sqrt{\overline{w'^2}}$$

quantitativ beschreiben. Der verzögernde Einfluss der Turbulenz auf die Sinkgeschwindigkeit w_0 eines Partikels wird in der Literatur z.B. bei Bagnold (1966) angegeben zu: $w = w_0 - w'_{rms}$. Die Sinkgeschwindigkeit eines Partikels in stehendem Wasser w_0 wird um den Einfluss der vertikalen Turbulenzintensität w'_{rms} reduziert. Um den tatsächlichen Verlauf der Strömungsturbulenz im Zuge einer praxisgerechteren Beckenbemessung zu berücksichtigen, wurde der Verlauf der vertikalen Turbulenzintensität w'_{rms} für alle an den drei Anlagen Tavanasa, Pradella und Schweiben durchgeführten Versuche normiert und in *Bild 11* dargestellt. Der Normierungsparameter K berücksichtigt die wesentlichen, turbulenzverursachenden Grössen Beckenströmungsgeschwindigkeit U, Strömungsgeschwindigkeit im Zulaufkanal U_E und die Steilheit m des vertikalen Überganges vom Zulaufkanal zum Entsander, g ist die Erdbeschleunigung und R der hydraulische Radius des vollen Sandfangquerschnittes. Der optimale Kurvenfit durch alle Datenpunkte hat sich für

$$K = \frac{1}{U^{0.4} \cdot U_E^{0.3}} \cdot m \cdot \frac{1}{(g \cdot R)^{0.15}} [m/s]$$

ergeben. Der Verlauf der normierten vertikalen Turbulenzintensität $K \cdot w'_{rms}$ lässt sich somit gut durch die Exponentialfunktion $K \cdot w'_{rms} = a \cdot e^{-b \cdot x/L} + c$ erfassen. Die Anpassung der Funktion an die Messdaten hat für a, b und c die Werte: a = 0,25, b = 3,14 und c = 0,13 ergeben. Es ist somit möglich für einen klassischen Langsandfang den Verlauf der vertikalen Turbulenzintensität zu bestimmen. Dazu müssen die mittlere Geschwindigkeit (U) im Sandfang, im Zulaufkanal (U_E) und die Neigung (m) des vertikalen Überganges vom Zulaufkanal zum Sandfang bekannt sein.

Beckenbemessung

Zu Beginn jeder Sandfangbemessung muss ein Grenzkorndurchmesser d_{Gr} festgelegt werden. Durch die Wahl eines wirtschaftlichen Revisionsintervalls ergibt sich je nach Turbinentyp aus den *Bildern 5* und *6* eine nicht zu überschreitende mittlere jährliche Feststoffkonzentration. Aus der Differenz zwischen angestrebter

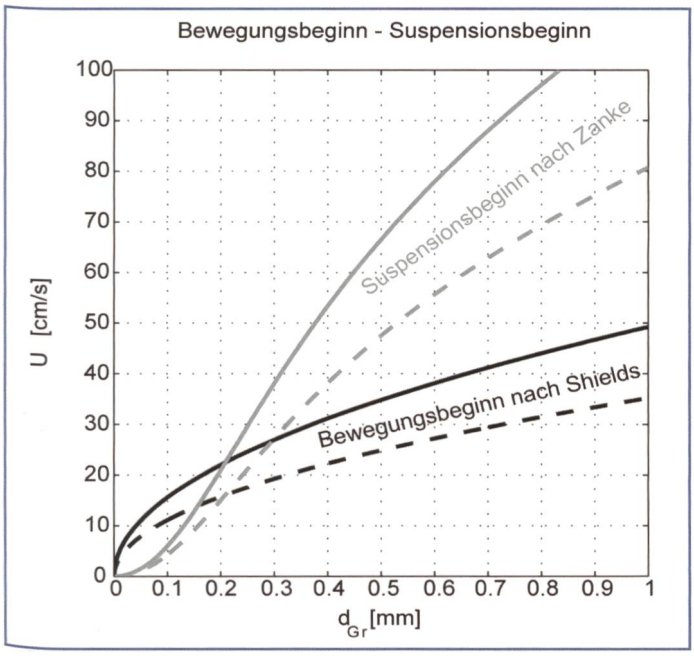

Bild 12. Mittlere Strömungsgeschwindigkeit U in Sandfängen, die in Abhängigkeit des Grenzkorndurchmessers d_{Gr} eingehalten werden muss, um Bewegungsbeginn bzw. Suspensionsbeginn zu vermeiden. Die gestrichelten Linien stellen eine untere, die durchgezogenen eine obere Grenze dar.

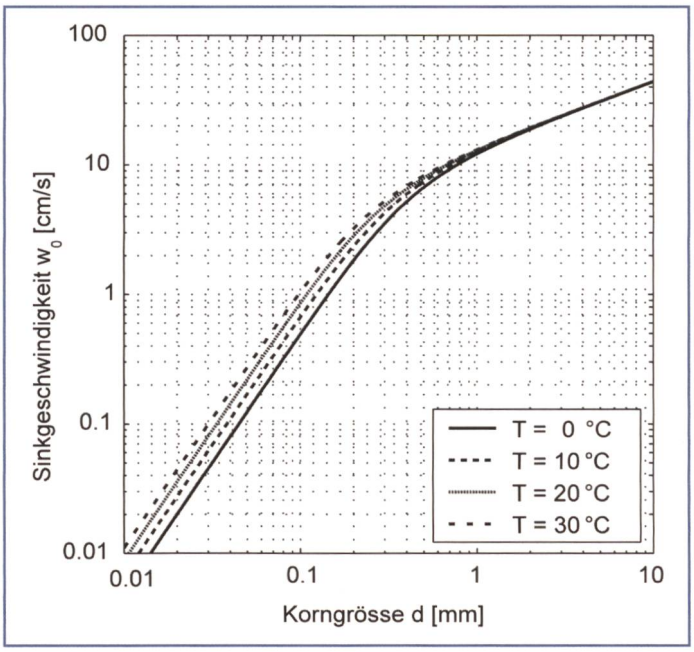

Bild 13. Sinkgeschwindigkeit von natürlichem Sediment in stehendem Wasser, nach Zanke (1982).

mittlerer jährlicher Feststoffkonzentration und der an der Fassungsstelle vorhandenen, ergibt sich über die zugehörige Kornverteilung das Grenzkorn d_{Gr}. Die Sandfangbemessung zielt auf ein Absetzen aller Partikel mit grösseren Korndurchmessern als d_{Gr} ab.

Nach Wahl des Grenzkorndurchmessers wird die mittlere Geschwindigkeit U im Sandfang so festgelegt, dass Partikel mit Durchmessern gleich oder grösser dem des Grenzkornes weder an der Sohle weitertransportiert werden, noch wieder in Suspension geraten. U kann in Abhängigkeit von d_{Gr} aus *Bild 12* abgelesen werden. Die Querschnittsfläche A ergibt sich aus der Kontinuitätsgleichung A = Q/U. Q ist die dem Entsander maximal zufliessende Wassermenge in m^3/s. Zur Bemessung der Beckenlänge eines Langsandfanges wird nun die Sinkgeschwindigkeit w_0 des Bemessungskornes um den Betrag der vertikalen Turbulenzintensität $w'_{rms}(x/L)$, die vom Beckenanfang zum Beckenende exponentiell abnimmt, reduziert, so dass sich die Sinkgeschwindigkeit für turbulente Strömungsverhältnisse in Langsandfängen zu $w = w_0 - w'_{rms}(x/L)$ ergibt. Ein hundertprozentiges Absetzen des gewünschten Grenzkornes wird erreicht, indem die horizontale Aufenthaltszeit $t_h = L/U$ des Partikels gleich der vertikalen Aufenthaltszeit $t_v = H/w$ gesetzt wird. Durch Einsetzen der Exponentialfunktion für $w'_{rms}(x/L)$ und Integration über die normierte Beckenlänge x/L ergibt sich eine einfache Bemessungsgleichung für die Beckenlänge L zu:

$$L = \frac{H \cdot U}{w_0 - \frac{0.21}{K}}.$$

Die Sinkgeschwindigkeit w_0 des Grenzkornes kann nach Zanke (1982) für natürliche Sedimente aus *Bild 13* abgelesen werden.

Literatur

Bagnold R. A. (1966): An approach to the sediment transport problem from general physics. Geological survey professional paper 422-I, U.S. Department of the Interior, 1–37.

Föhl J., Sommer J. (2000): Anforderungsgerechte Beschichtungen von Turbinenlaufrädern chinesischer Wasserkraftanlagen. Abschlussbericht, Staatliche Materialprüfanstalt (MPA) Universität Stuttgart.

Giesecke J., Mosonyi E. (1997): Wasserkraftwerke. Springer Verlag, Berlin, ISBN 3-540-60993-8.

Grosse G., Kächele T. (1995): Analysis of abrasion in hydraulic machinery. The International Journal on Hydropower & Dams, 2 (2), 34–39.

Jacoby G., Kächele T., Poschwatta M. (1995): Silt erosion in hydraulic machinery. In: Conf. proc. hydro power into the next century, Barcelona, 489–499.

Keiser W. (1999): Schäden an Laufrädern/Turbinen. Kurs Laufräder (unveröffentlicht), Sulzer Hydro.

Krause M., Lang E. (1993): Abschlussbericht F&E Projekt «Sandabrasion». NEFF Bericht Nr.: STT. TB93.002, Sulzer Innotec.

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.

Schneider C., Kächele T. (1999): Recent research results on predicting and preventing silt erosion. In: Proc. 1th int. conf.: Silting problems in hydro power plants, New Delhi, India, III/2–III/13.

Vischer D., Huber A. (1993): Wasserbau. Verlag Springer, 5. Auflage, Berlin, ISBN 3-540-56178-1.

Zanke U. (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung. Springer Verlag, Berlin, ISBN 0-387–11672-9.

Zu-Yan Mei (1996): Review of research on abrasion and cavitation of silt ladden flows through hydraulic turbines in China. In: Proc. of the XVIII IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Cavitation, Valencia, Spain, 641–650.

Adresse der Verfasser
Dipl. Ing. *C. Ortmanns*, Dr. *P. Volkart*,
Prof. Dr.-Ing. *H.-E. Minor*
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zentrum
CH-8092 Zürich
E-Mail-Kontakt: ortmanns@vaw.baug.ethz.ch