

Zeitschrift:	Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber:	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band:	93 (2001)
Heft:	11-12
Artikel:	Werden durchlaufende Sedimentpartikel in hydraulischen Maschinen fragmentiert?
Autor:	Blaser, Stefan / Bühler, Johannes
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-939931

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: 24.02.2026

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

Werden durchlaufende Sedimentpartikel in hydraulischen Maschinen fragmentiert?

■ Stefan Blaser und Johannes Bühler

Zusammenfassung

Es wird untersucht, ob und wie stark die hydraulischen Turbomaschinen der Kraftwerke Oberhasli das im Wasser enthaltene Sediment zerkleinern. Dazu wurden Messungen der Wassertrübung auf der Hochdruck- und Niederdruckseite der Maschinen in den Kraftwerken Innertkirchen 1 und Grimsel 2 durchgeführt. Zusätzlich wurden an der Hochdruck- und Niederdruckseite der Maschinen Wasserproben entnommen und die Korngrößenverteilungen des darin enthaltenen Sedimentes bestimmt. Die Resultate lassen den Schluss, dass das Turbinieren oder Pumpen des Wassers die Trübung signifikant verstärken würde oder eine wesentliche Fragmentierung der Partikel zur Folge hätte, nicht zu. Theoretische Abschätzungen deuten ferner darauf hin, dass nur ein kleiner Teil der Sedimentpartikel, die durch die Maschinen laufen, auf die Metalloberflächen trifft.

hier in gekürzter Form dargestellt werden. In dieser Studie wurde die Frage angegangen, ob und wie stark die Maschinen der KWO das im Wasser enthaltene Sediment zerkleinern. Dazu wurden zwei Messkampagnen in KWO-Werken durchgeführt, in denen die Trübung des Wassers vor und nach den Maschinen über mehrere Tage gemessen wurde. Die Trübungsmessungen geben vor allem Aufschluss über den Anteil an Partikeln im Wasser, die etwa im Größenbereich $0,5 \mu\text{m}$ bis $2 \mu\text{m}$ liegen, da nach der Theorie der Streuung von Licht an suspendierten Partikeln zu erwarten ist, dass besonders diese Partikelfraktionen zur Lichtstreuung und somit zu einer Trübung des Wassers beitragen. Sehr grosse und sehr kleine Partikel sind wesentlich weniger «optisch aktiv» [3, 4]. Zusätzlich zu den Trübungsmessungen wurden an verschiedenen Tagen an der Hochdruck- und Niederdruckseite Wasserproben entnommen und die Korngrößenverteilung der Sedimentpartikel im Labor des Instituts für Geotechnik der ETH-Hönggerberg bestimmt und miteinander verglichen.

Für die messtechnischen Untersuchungen wurden die beiden leistungsstärksten Kraftwerke der KWO ausgewählt: das KW Innertkirchen 1 (Ik 1) und das Umwälz-

werk Grimsel 2 (Gr 2). Das Wasser, welches von der Handeck her durch Stollen Richtung Innertkirchen geführt wird, trifft aus einer Fallhöhe von rund 670 m auf die fünf Pelton-turbinen im Ik 1 und wird dann in die Aare geleitet. Als Mischwasser stammt es aus verschiedenen Stauseen vor allem im Grimselgebiet und ist üblicherweise bereits durch Maschinen auf der Grimsel und in der Handeck gelaufen, bevor es im Ik 1 turbiert wird, vgl. Bild 1.

Im Umwälzwerk Gr 2 werden vier Maschinen benutzt, die je aus einer Francisturbine und einem auf derselben Welle laufenden Pumpenrad bestehen. Mit derselben Maschine kann demnach entweder Wasser aus dem Oberaarsee turbiniert oder Wasser aus dem Grimselsee in den Oberaarsee hochgepumpt werden. Gemäss den Betriebsdaten der KWO ist die jährliche Gesamtwassermenge, die im Mittel in den Oberaarsee hochgepumpt wird, kleiner als die mittlere Wassermenge, die Richtung Gelmer- und Räterichsbodensee abfliesst. Daraus folgt, dass ein Sedimentteilchen im Mittel höchstens einmal durch eine Pumpe im Gr 2 läuft, bevor es in die unteren Seen gelangt. Demnach sollte ein allfälliger Einfluss der Maschinen auf die Korngrößenverteilung der durchlaufenden Parti-

1. Einleitung

Gemäss Beobachtungen von Anwohnern und Fischern ist der Brienzersee in letzter Zeit trüber geworden, d.h. auf Grund einer vermehrten Streuung des in den See eindringenden Lichtes hat sich die Sichttiefe verringert. Eine mögliche Ursache für diese Entwicklung könnte der Umstand sein, dass das aus den Stauseen im Grimsel- und Sustengebiet stammende Sediment beim Turbinieren oder Pumpen durch die Maschinen der Kraftwerke Oberhasli (KWO) zerkleinert wird. Als Folge davon hätten die Sedimentpartikel eine kleinere Sinkgeschwindigkeit und blieben deshalb näher an der Wasseroberfläche, wenn sie in den Brienzersee gelangt sind. Durch die erhöhte Konzentration von feinem Sediment in den oberen Seeschichten erschiene somit der See trüber. Zweifellos findet eine Interaktion zwischen einem Teil des Sedimentes und den Turbinen statt, was z.B. zu sichtbaren Abrasionsschäden an den Schaufeln [1] führt. Allerdings ist bis jetzt kaum untersucht worden, in welchem Mass auch das Sediment durch diese Interaktion beschädigt wird.

Im Auftrag des Gewässer- und Bodenschutzbüros des Kantons Bern wurde eine Studie [2] durchgeführt, deren Resultate

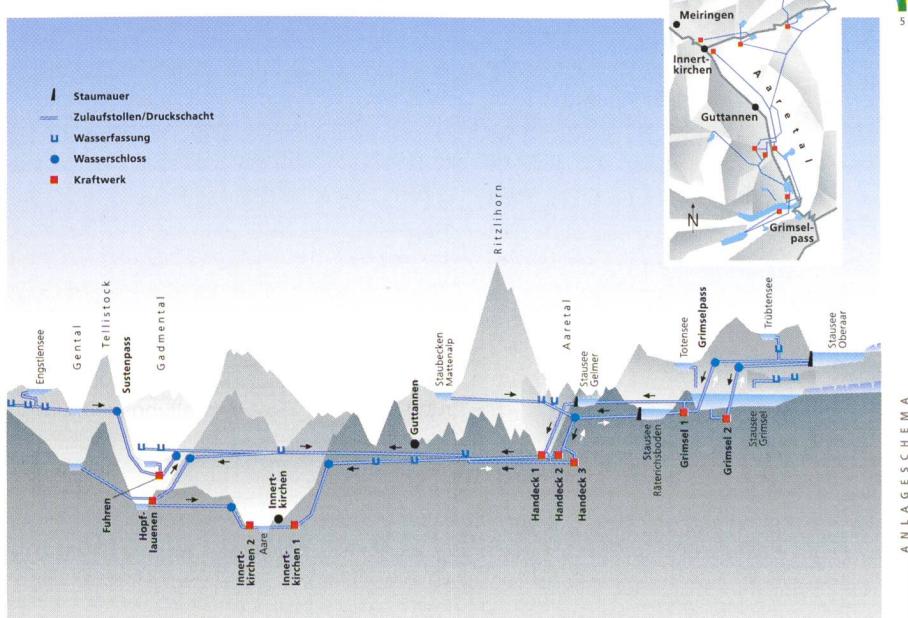


Bild 1. Anlagen der KWO (entnommen aus dem Prospekt «KWO Grimselstrom» der Kraftwerke Oberhasli AG, 3862 Innertkirchen, vgl. www.grimselstrom.ch).

kel im Gr 2 auch erkennbar sein, wenn nur das Wasser vor und nach den Maschinen verglichen, also nur ein einziger Durchlauf erfasst wird.

Ferner ist zu bemerken, dass das meiste durch die Pumpen des Gr 2 verarbeitete Wasser erstmals durch eine Maschine läuft, d. h. dass die darin enthaltenen Partikel und Flocken noch nicht beschädigt sind. Andererseits ist zu erwarten, dass die Sedimentteilchen in den Maschinen des Ik 1 einer grösseren hydromechanischen Beanspruchung ausgesetzt sind als im Gr 2, da ein höheres Gefälle genutzt wird und die dort installierten Pelonturbinen einen schlechteren hydraulischen Wirkungsgrad aufweisen als die Francisturbinen im Gr 2.

Um die Frage, ob eine stark turbulente Strömung die Sedimentpartikel zu zerkleinern vermag, noch unter möglichst extremen Bedingungen zu klären, wurden nebst den Wasserproben von der Hochdruck- und Niederdruckseite der Maschinen auch Proben aus einer speziell angefertigten Düse entnommen, die direkt an der Hochdruckseite der Maschinen angeschlossen war und das Wasser auf Atmosphärendruck entspannte. Da in diesem Fall der gesamte Druck und die gesamte hydraulische Leistung ohne Stromerzeugung auf einer kurzen Strecke innerhalb und nach der Düse abgebaut wurden, waren noch grössere auf die Partikel wirkende Kräfte zu erwarten als in den Maschinen. Die Korngrössenverteilungen in den stärker beanspruchten Proben aus der Düse konnten so mit denjenigen in den Proben von der Niederdruckseite der Maschinen verglichen werden.

2. Methodik und Versuchsaufbau

Bei der Messung der Wassertrübung in den Werken Ik 1 und Gr 2 lief abwechselungsweise Wasser, welches vor beziehungsweise nach den Maschinen abgezweigt wurde, durch dieselbe Trübungsmesszelle, vgl. Bild 2. In dieser befand sich der Trübungssensor (Light Back-Scattering Sensor, Sea Tech Inc.), der die Rückstreuung von Licht bei 880 nm als Mass für die Trübung des Wassers ermittelte. Die Umschaltung der Wasseraufzehr wurde durch Einbau eines 2-Wege-Ventils mit drei Anschlüssen bewerkstelligt, welches durch eine Zeituhr mit eingebautem Relais alle 1280 Sekunden geschaltet wurde.

Das Ausgangssignal des Trübesensors wurde auf einem Daten-Logger (CR10, Campbell Scientific Inc.) aufgezeichnet, welcher alle 5 Min. 20 Sek. den Mittelwert von zehn in dieser Zeitspanne gemessenen Werten abspeicherte.

Wegen des Druckes bis zu 70 bar, der auf der Hochdruckseite der Maschinen herrscht, wurde dort das Wasser durch eine 6×4 -mm-Leitung von 450 m Länge entnommen (50 m Kupferrohr, 400 m Kunststoffrohr). Dadurch konnte auf Grund der Wandreibung in dieser Leitung eine allmähliche Druckverringerung gewährleistet werden; dies war wichtig, um das im Wasser vorhandene Sediment nicht grossen hydromechanischen Kräften auszusetzen.

Um im Experiment zu untersuchen, ob der Anteil zerborstener Partikel mit der Stärke der hydromechanischen Beanspruchung merklich zunimmt, wurde zeitweilig Probewasser aus der Düse mit einem Ausstrittsloch von 1 mm Durchmesser entnommen, die direkt auf den Anschlusshahn auf der Hochdruckseite montiert war, vgl. Bild 3. Solche Düsen werden in der Hochdruckerosion bzw. -reinigung eingesetzt. So entsprechen die in Bild 3 gezeigten Abmessungen des Düseneinlaufes denen einer beim europäischen Komitee für Normung CEN beantragten Norm-Düse für Hochdruckerosion/-reinigung (private Mitteilung von Frank Zimmermann, VAW, ETH-Zürich). Für unsere Versuche wurde auf der Niederdruckseite (links im Bild) ein $1\frac{1}{4}$ "-Gewindeanschluss angebracht. In diesen wurde eine Serto-Verschraubung von 6,5 mm Bohrung und 50 mm Länge bis zum Anschlag eingedreht, und das Wasser wurde anschliessend durch einen kurzen 4-mm-Schlauch in die Messflaschen geleitet.

Während der Messkampagnen wurden vor und nach den Maschinen mehrmals Wasserproben entnommen und später im Labor analysiert. Die Korngrössenverteilungen wurden mit Hilfe eines Microtrac FRA, XRA 410 (Leeds & Northrup) ermittelt. Diese Apparatur bestimmt durch Lichtstreuung den Volumenanteil der in einer Wasserprobe enthaltenen Partikel in Abhängigkeit von ihrer Grösse. Zur Bestimmung der Volumenverteilung V in Abhängigkeit der Korngrösse d wird der ausmessbare Bereich, der zwischen $0,12 \mu\text{m}$ und $704 \mu\text{m}$ liegt, in 50 Grössenklassen Δd auf einer logarithmischen Skala eingeteilt. Der Wert $V(d)$ gibt also den Anteil an, den die Partikel im Bereich d und $(d+\Delta d)$ am Gesamtvolume ausmachen. Durch Aufsummierung der Werte $V(d)$ wird die kumulierte Volumenverteilung gewonnen.

Die Trübung der Wasserproben wurde mit einem Turbidimeter HACH 2100N, in der Einheit NTU (Nephelometric Turbidity Unit) bestimmt.

3. Zusammensetzung des Sedimentes, Partikel-Morphologie

Die Korngrössenanalysen der Sedimentteilchen zeigten, dass diese etwa im Grössenbereich zwischen $0,3 \mu\text{m}$ und $50 \mu\text{m}$ lagen. In den Korngrössenverteilungen waren je ein Maximum bei etwa $0,8 \mu\text{m}$ und bei etwa $3,5 \mu\text{m}$ erkennbar, vgl. Bild 4a. Die durch Verdampfung bestimmte Gesamtkonzentration der Partikel im Wasser lag typischerweise zwischen 60 mg/l und 100 mg/l .

Mittels Röntgendiffraktion, welche durch das Institut für Geotechnik, ETHZ, durchgeführt wurde, konnten in Wasserproben aus dem Gr 2 hauptsächlich Quarz, Feldspäte, Kalzit, die Tonminerale Illit und Chlорit und wenige Wechsellegerungsminerale (Illit/Smektit) nachgewiesen werden [5]. Quarz, Feldspäte (vermutlich Microklin) und das Tonmineral Illit waren zu gleichen Anteilen vorhanden. Der grösste Teil des Kalzits dürfte erst bei der zur Röntgenanalyse notwendigen Verdunstung der Wasserproben entstanden sein.

Zur Untersuchung der gut sedimentierbaren (d. h. grösseren) Teilchen wurde das Wasser nach der Trübungsmessung in der Messzelle in ein Absetzbecken geleitet. Die Korngrössenverteilungen der im Laufe der Messkampagne im Ik 1 abgesetzten Partikel wiesen nur noch ein Maximum bei $3,5 \mu\text{m}$ auf, vgl. Bild 4b. Die Röntgendiffraktion zeigte, dass sehr viel Quarz und Feldspäte, aber im Gegensatz zu den Proben von der Hochdruckseite im Gr 2 nur wenig Kalzit und Tonminerale vorhanden waren.

Bild 5 zeigt eine am Institut für Festkörperphysik, ETHZ, mittels Rasterelektronenmikroskop gemachte Aufnahme von Sedimentteilchen, die aus Probewasser herausgefiltert wurden (Porengröße des Filters $0,45 \mu\text{m}$). Die Sedimentteilchen sind in der Grösse unterschiedlich, weisen aber tendenziell eine plättchenartige Form auf. Zwischen Proben, die von der Hoch- und Niederdruckseite sowie aus der Düse beim Ik 1 entnommen wurden, war anhand der REM-Aufnahmen kein qualitativer Unterschied in der Partikel-Morphologie zu erkennen. Bei allen drei Proben waren grössere Partikel ($\approx 5 \mu\text{m}$) zu sehen.

4. Resultate aus den Trübungsmessungen

Im Ik 1 konnten vom 27. November bis 4. Dezember 2000 Trübungsmessungen an der Maschine 1 durchgeführt werden. Die KWO liess dazu während dieser Zeit die Turbine zwar mit variierender Leistung, aber doch permanent laufen. Dies hatte den Vorteil,

dass zu jeder Zeit Wasser durch die Messzelle strömte und deshalb keine Probleme mit Luftblasen innerhalb der Messzelle auftraten.

Im Gr 2 lief die Messkampagne vom 4. bis 18. Dezember 2000. Auf der Hochdruckseite wurde das Wasser, welches durch die Messzelle geführt wurde, aus einem Anschlusshahn entnommen, der sich am Hauptstrang vor den Abzweigungen zu den einzelnen Maschinen befindet. Auch auf der Niederdruckseite wurde Wasser von der gemeinsamen Leitung abgezweigt. Dies erlaubte es, den Gesamteffekt der vier Maschinengruppen auf die Trübung zu untersuchen, unabhängig davon, wie viel Wasser gerade verarbeitet wurde.

Im Umwälzwerk Gr 2 wird nebst dem Turbinenbetrieb auch Wasser aus dem Grimselsee in den Oberaarsee hoch gepumpt. Die gemessenen Trübungsdaten wurden deshalb anhand der KWO-Betriebsdaten gemäss den beiden Zuständen «Turbinieren»

und «Pumpen» in zwei Datensätze aufgespalten. Dabei wurden die Messzyklen, welche nicht vollständig zu einem dieser beiden Betriebszustände gehörten, weggelassen.

Der Daten-Logger war in beiden Werken so programmiert, dass in einer Periode von 320 Sekunden das Signal vom Trübungsmeßgerät 10-mal gelesen und dann der entsprechende Mittelwert abgespeichert wurde. Nach 1280 Sekunden schaltete jeweils das Relais um, sodass immer abwechselnd Wasser von der Hochdruck- und Niederdruckseite durch die Messzelle strömte. (Die Schaltperiode musste gross genug gewählt werden, um die Messzelle vollständig mit dem zu messenden Wasser zu füllen.) Somit dauerte ein ganzer Messzyklus 2560 Sekunden und setzte sich aus den vier Messwerten $\tau_{ND,1}$, $\tau_{ND,2}$, $\tau_{ND,3}$, $\tau_{ND,4}$ für die Niederdruckseite und aus den vier Messwerten $\tau_{HD,1}$, $\tau_{HD,2}$, $\tau_{HD,3}$, $\tau_{HD,4}$ für die Hochdruckseite zusammen.

Die Mittelung dieser acht Werte über alle Messzyklen liefert den mittleren Verlauf der Trübung innerhalb eines Messzyklus. Wie aus Bild 6a hervorgeht, sind bei den Daten vom lk 1 die Mittelwerte für die Hochdruckseite etwas tiefer als die für die Niederdruckseite, verglichen aber mit den Standardabweichungen der Messwerte (natürliche Schwankungen) ist der Unterschied gering.

Ein ähnlicher mittlerer Verlauf eines Messzyklus ergibt sich für die Daten vom Gr 2 sowohl für den Pump- als auch Turbinenbetrieb, Bild 6b. Weiter ist erkennbar, dass der Grimselsee offenbar etwas trüber als der Oberaarsee ist, da die Trübungsdaten beim Pumpbetrieb, bei welchem Wasser vom Grimselsee in den Oberaarsee gepumpt wird, höher sind als beim Turbinenbetrieb.

Es ist bemerkenswert, dass im Gr 2 bei *beiden* Betriebszuständen das Wasser auf der Niederdruckseite etwas trüber ist als auf der Hochdruckseite, obschon es beim

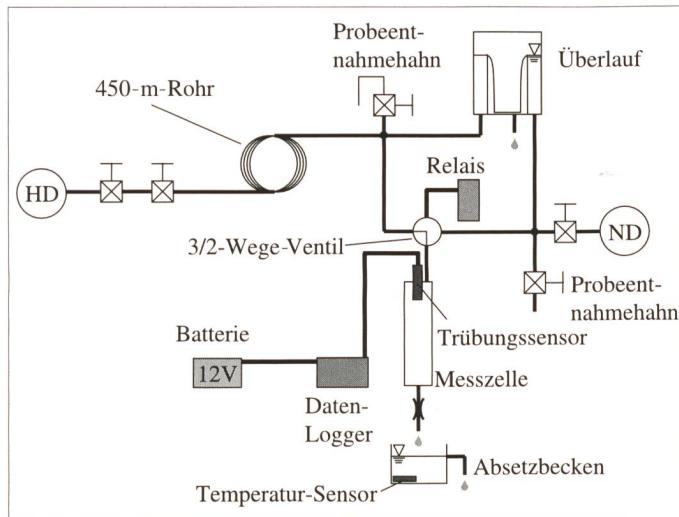


Bild 2. Versuchsaufbau für die kontinuierliche Trübungsmessung. HD und ND stehen für die Hochdruck- bzw. Niederdruckseite der Maschinen.

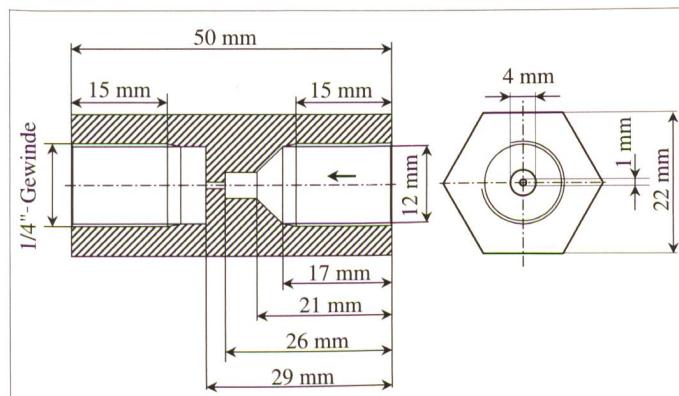


Bild 3. Dimensionen der Düse. Der Pfeil in der Mitte gibt die Strömungsrichtung an.

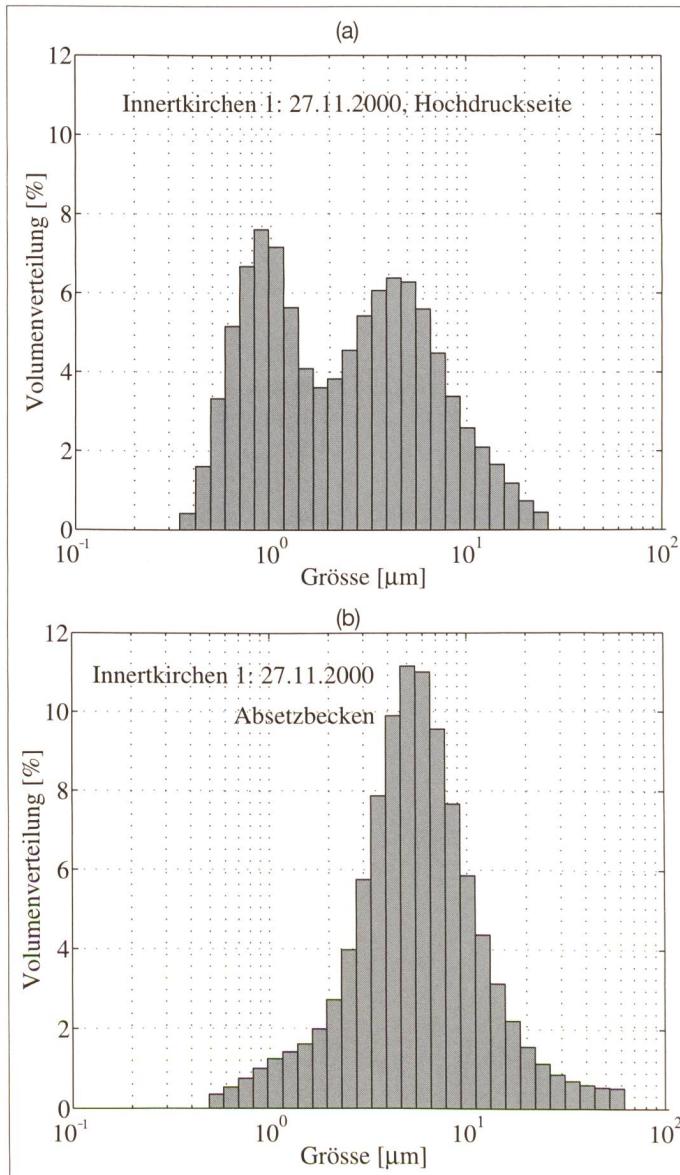


Bild 4. Korngrößenverteilung für eine Probe (a) von der HD-Seite und (b) aus dem Absetzbecken im lk 1.

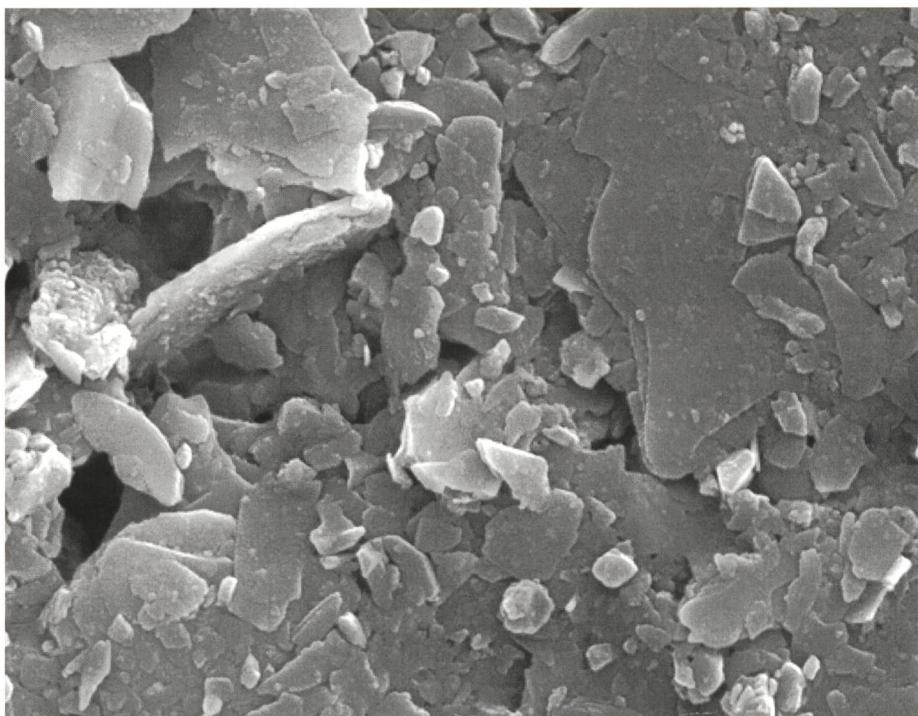


Bild 5. REM-Aufnahme von Sedimentteilchen aus einer Wasserprobe vom Ik 1. Zur Aufbereitung wurde das Probenwasser mit einem Filter der Porengröße 0,45 µm filtriert und ein Teil aus dem Filter herausgeschnitten. Die Breite des Bildes entspricht einer Länge von 11,9 µm.

Pumpbetrieb in der umgekehrten Richtung fliessst. Wenn also das Pumpen eine verstärkte Trübung des Wassers bewirken würde, müssten die Werte auf der Hochdruckseite grösser sein als die auf der Niederdruckseite und nicht umgekehrt, wie in Bild 6b. Da dies aber nicht der Fall ist, schliessen wir daraus, dass die Unterschiede zwischen ND und HD nicht von den Maschinen herrühren, sondern andere Effekte dominant sind. Auf der Hochdruckseite wurde das Wasser vom Hauptstrang abgezweigt und dann durch ein etwa 15 m langes Stahlrohr mit Innendurchmesser von 15 mm zum Anschlusshahn der 450-m-Rohrleitung geführt. Auf der Niederdruckseite hingegen war der Anschlusshahn direkt am Hauptstrang angebracht. Es ist deshalb möglich, dass sich schwerere Partikel infolge der kleineren Strömungsgeschwindigkeiten im Stahlrohr absetzen konnten und dadurch auf der HD-Seite systematisch eine zu kleine Trübung gemessen wurde. Auch im Ik 1 könnten sich in der Rohrverzweigung zur Entnahme von HD-Wasser Partikel abgesetzt haben.

Nebst Mittelung über die Absolutwerte der Trübung wurden auch die jeweiligen Verhältnisse $\tau_{ND,4}/\tau_{HD,4}$ über alle Messzyklen gemittelt, wobei für die drei Datensätze jeweils ein Wert von $1,02 \pm 0,04$ resultierte. Das Wasser an der Niederdruckseite scheint etwa 2 % trüber zu sein als jenes von der Hochdruckseite, aber die Abweichung vom

neutralen Wert 1 ist deutlich kleiner als die Standardabweichung. Daraus schätzen wir, dass ein allfälliger Effekt, den die Maschinen auf die Wassertrübung haben könnten, maximal 2 % ist.

Auch bei den Wasserproben, die im Ik 1 und Gr 2 entnommen wurden, konnte bei den mit dem HACH-Turbidimeter gemessenen Werten für die Trübung kein signifikanter Unterschied zwischen den Proben von der Hochdruck- und Niederdruckseite sowie aus der Düse nachgewiesen werden.

Aus den Trübungsmessungen in den beiden Werken lässt sich demnach schliessen, dass die Differenzen zwischen den Trübungswerten vor und nach der Maschine innerhalb der natürlichen, statistischen Schwankungen liegen. Die Daten deuten nicht darauf hin, dass die Interaktion des Wassers mit den Maschinen – sowohl Turbinen als auch Pumpen – eine signifikant verstärkte Trübung bewirkt.

5. Vergleich der Korngrößenverteilungen bei Turbinenbetrieb

Für die Untersuchung der Korngrößen wurden im Ik 1 insgesamt 35 Wasserproben genommen (13 auf der Hochdruckseite, 13 auf der Niederdruckseite, 9 aus der Düse) und 19 Proben (8 HD, 8 ND, 3 D) im Gr 2 während des Turbinenbetriebes. Bild 7 zeigt Beispiele von Verteilungen, wie sie typischerweise gemessen wurden.

Generell zeigte sich, dass keine Partikel unter einer Grösse von $d_{min} \approx 0,30 \mu m$ detektiert wurden, und dies unabhängig davon, ob das Probewasser vor oder nach der Turbine oder aus der Düse entnommen wurde. Die obere Grenze der Partikelgrösse lag bei etwa $d_{max} \approx 35 \mu m$.

Charakteristisch für alle Proben war, dass die Verteilung zwei ausgeprägte Maxima aufwies: ein erstes bei $d_1 \approx 0,8 \mu m$ und ein zweites bei $d_2 \approx 3,2 \mu m$. Dieser «Doppel-Peak» ist vermutlich auf die Inhomogenität in der Partikelzusammensetzung zurückzuführen, vgl. Abschnitt 3.

Um die einzelnen Proben besser quantitativ vergleichen zu können, wurden folgende Grössen aus den einzelnen Verteilungen bestimmt:

d_{10}, d_{50}, d_{90} : Partikelgrösse, bis zu welcher 10 % bzw. 50 % bzw. 90 % des Gesamtvolumens der Partikel enthalten sind,

d_1 : Partikelgrösse, bei der die Volumenverteilung das erste lokale Maximum mit Wert V_1 erreicht,

d_2 : Partikelgrösse, bei der die Volumenverteilung das zweite lokale Maximum mit Wert V_2 erreicht.

Es zeigt sich, dass die Schwankungen für die Werte von d_{10} und d_{50} innerhalb der einzelnen Proben, welche am selben Tag genommen wurden, gering sind; nur d_{90} fluktuiert manchmal etwas stärker. Bezüglich des Vergleichs von Hochdruck- und Niederdruckseite weichen die einzelnen Verhältnisse von den Werten $d_{10,ND}/d_{10,HD}$, $d_{50,ND}/d_{50,HD}$ usw. nicht signifikant von eins ab. Auch die Düse hat keinen merklichen Effekt auf die entsprechenden Verhältnisse, vgl. Tabelle 1.

Der Vergleich von V_1 mit V_2 zeigt, dass durch das Turbinieren keine Verschiebung der Korngrößenverteilungen zu kleineren Partikelgrössen hin ersichtlich ist. Es zeigt sich sogar, dass der Volumenanteil V_1 der kleineren Partikel mit $d \approx 0,8 \mu m$ im turbinierten Wasser im Mittel etwas kleiner war als im nicht turbinierten. Bei den Proben vom Ik 1 war das erste Maximum V_1 in allen drei Fällen, ND, HD und Düse, etwas grösser als das zweite V_2 . Bei den Proben vom Gr 2 war das erste Maximum fast doppelt so hoch als das zweite.

Neben der Korngrößenanalyse wurde bei drei Proben auch die Gesamtoberfläche bestimmt. Eine Fragmentierung der Sedimentteilchen hätte nämlich zur Folge, dass sich zusammen mit der Anzahl der Partikel pro Volumen auch die Gesamtoberfläche vergrössern würde. Eine Methode zur Oberflächenbestimmung ist die «BET-Analyse», bei der durch Tieftemperatur-Adsorption von Stickstoff und Auswertung nach BET (Brunauer, Emmett und Teller) die Oberfläche

einer Probe in Einheiten von m^2/g bestimmt wird. Zu diesem Zweck wurden am 18. Dezember 2000 im Gr 2 von der Hochdruck- und Niederdruckseite und aus der Düse je rund 9 Liter Probewasser entnommen und am selben Tag zur Verdampfung im Trockenschrank bei 60 °C untergebracht.

Die BET-Analyse des Trockenrückstandes wurde anschliessend durch das Institut für Geotechnik der ETHZ durchgeführt und lieferte folgende Resultate [5]: $11,9 \pm 0,2 \text{ m}^2/\text{g}$ für die HD-Probe, $12,4 \pm 0,2 \text{ m}^2/\text{g}$ für die ND-Probe und $12,6 \pm 0,2 \text{ m}^2/\text{g}$ für die Düsen-Probe. Die Unterschiede zwischen den Messwerten liegen hier ausserhalb des Streubereiches. Die Proben von der Niederdruckseite und aus der Düse weisen eine etwas grössere Oberfläche auf, enthalten also im Mittel mehr kleinere Partikel als die Probe von der Hochdruckseite.

Die BET-Methode war zu aufwendig für eine routinemässige Untersuchung der Proben. Hingegen lässt sich aus den Korngrössenverteilungen ebenfalls die Oberfläche A in Einheiten von m^2/kg abschätzen

$$A \propto \sum_d V(d) / \rho_p d, \quad (1)$$

wobei ρ_p die Dichte des Partikels ist.

Tabelle 2 zeigt, dass die Bestimmung von A mit Hilfe von Gleichung 1 für die drei Proben ein mit der BET-Analyse konsistentes Resultat liefert. Berechnet man nun für die anderen Wasserproben die entsprechenden Verhältnisse $A_{\text{ND}}/A_{\text{HD}}$ und $A_{\text{D}}/A_{\text{HD}}$, so wird ersichtlich, dass sie etwas kleiner als eins sind, vgl. Tabelle 2. Anhand der Korngrössenanalysen lässt sich also bei den Proben, welche vom turbinierten Wasser bzw. aus der Düse entnommen wurden, keine systematische Vergrösserung der Gesamtoberfläche erkennen.

Zusammenfassend können wir auf Grund der Korngrössenanalyse schliessen, dass nach dem Turbinieren kein signifikanter Unterschied – weder in der Form der Grösseverteilungskurve der Partikel noch bezüglich einer Verschiebung zu kleineren Werten hin – ersichtlich ist. Auch ist im Mittel keine Vergrösserung der Gesamtoberfläche des Sedimentes erkennbar.

6. Abschätzungen

Obwohl die sichtbaren Abrasionsschäden an Schaufeln darauf schliessen lassen, dass eine Interaktion zwischen Sediment und Maschine stattfindet, ist aus den Daten trotzdem keine Veränderung in der Trübung oder in den Korngrössenverteilungen zu erkennen. Um diesen Umstand zu verstehen, soll im Folgenden abgeschätzt werden, wie gross die Wahrscheinlichkeit überhaupt ist, dass ein Partikel

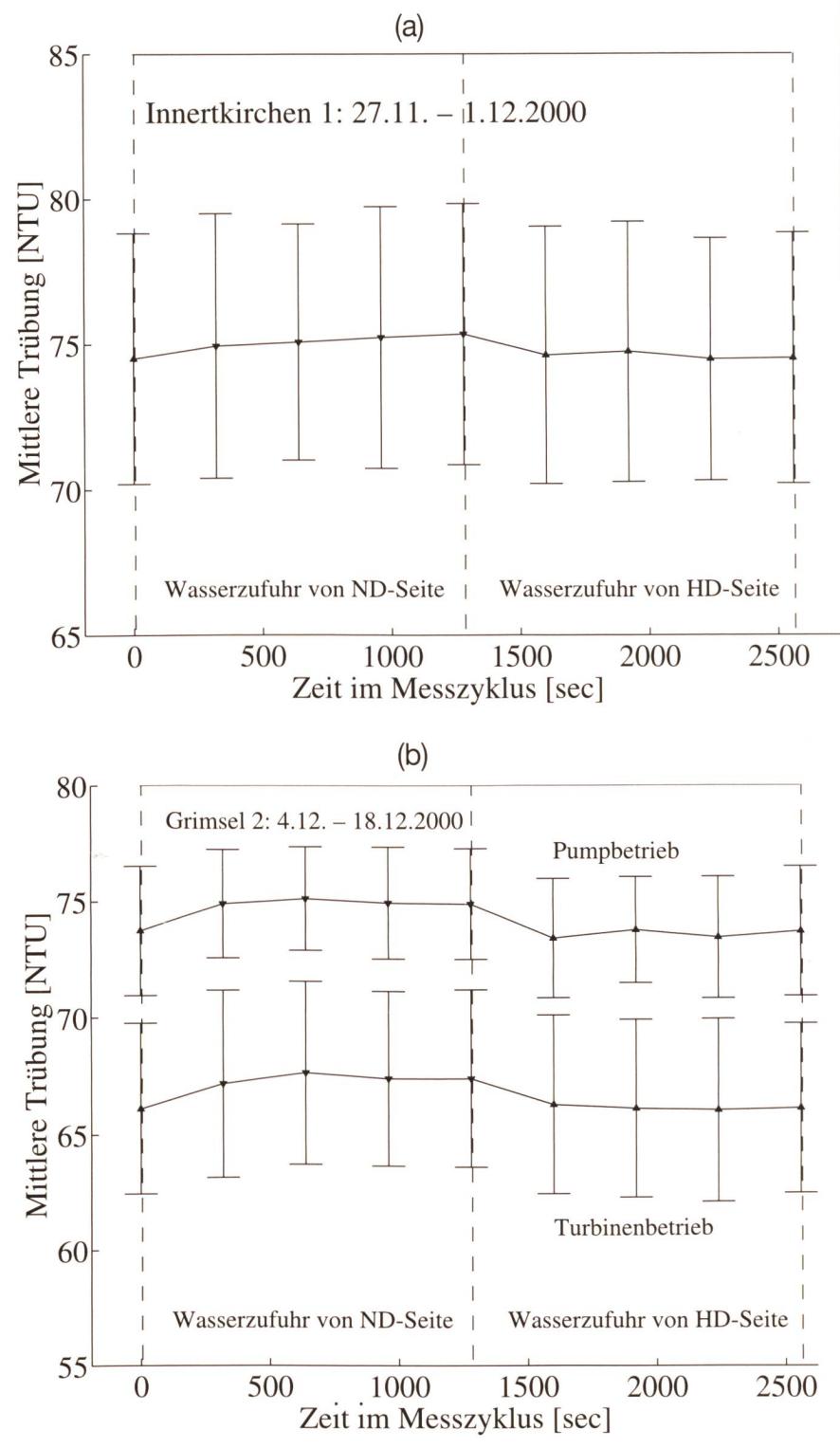


Bild 6. Mittlerer Verlauf eines Zyklus für die Daten (a) vom Ikk 1 und (b) vom Gr 2.
Der erste und letzte Wert in einer Figur sind jeweils identisch. Die vertikalen Balken entsprechen den Standardabweichungen der Messwerte; die Zeitpunkte, bei welchen das Relais umschaltet, sind durch gestrichelte Vertikallinien markiert.

auf die Oberfläche des Bechers einer Pelton-turbine trifft.

Bei der Umlenkung des aus der Düse tretenden Strahles werden die Partikel wegen der auftretenden Zentripetalkraft zur Oberfläche des Bechers hin getrieben. Zur Vereinfachung der Geometrie nehmen wir an, dass ein Strahl mit der Geschwindigkeit u horizontal

auf einen stationären Becher mit einem Querschnitt gemäss Bild 8 trifft. Weiter sei die Strömung eben, d.h. sie sehe auf jeder Höhe z gleich aus.

Näherungsweise ist die tangentiale Geschwindigkeit der Partikel in der xy -Ebene gleich der Strömungsgeschwindigkeit. In radialer Richtung wirkt die Zentripetalkraft F_z

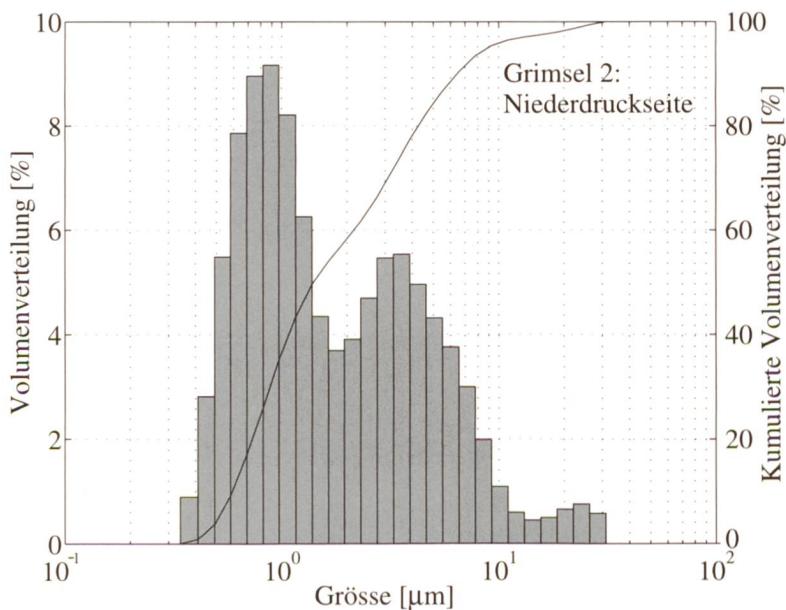
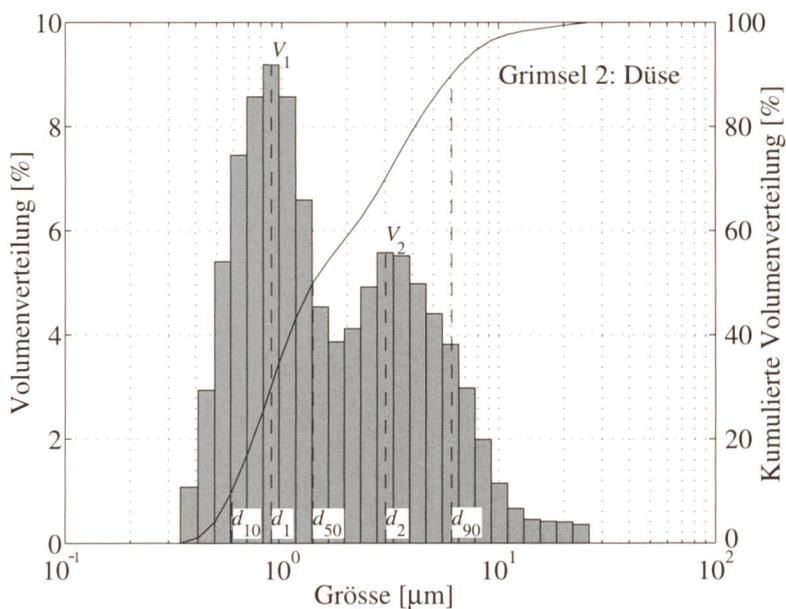
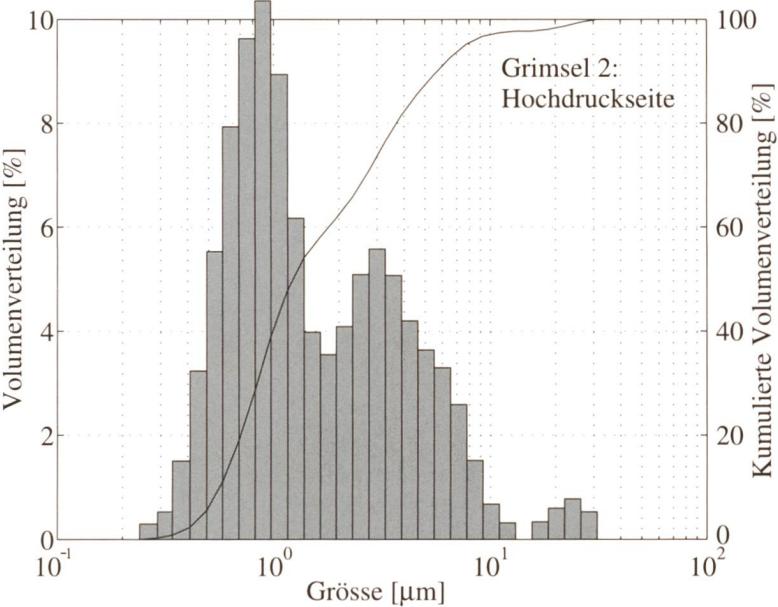


Bild 7. Korngrößenverteilung der Proben vom 5. Dezember 2000 vom Gr 2 bei Turbinenbetrieb von der Hochdruckseite, von der Düse und von der Niederdruckseite. Die ausgezogene Kurve gibt die kumulierte Volumenverteilung an.

die Stokessche Widerstandskraft entgegen. Nach dem Auftreffen des Strahls gilt in guter Näherung

$$F_z = \frac{\pi d^3 (\rho_p - \rho) u^2}{6r_0} = 3\pi\mu d \frac{dr(t)}{dt}, \quad (2)$$

wobei ρ die Dichte und μ die dynamische Viskosität von Wasser ist, und d der Durchmesser eines Partikels.

Die Lösung von Gleichung 2 ist gegeben durch $r(t) = r_0 + tF_z/3\pi\mu d$, wobei als Anfangsbedingung $r(t=0) = r_0$ gilt. Wird nun r innerhalb der Zeitdauer T , während der ein Partikel der Beschleunigung ausgesetzt ist, grösser als der Radius R des Bechers, so trifft das Partikel auf die Becheroberfläche. Aus dieser Bedingung, $r(t=T) > R$, lässt sich schliesslich die maximale Distanz $R - r_0$ bestimmen, mit der ein Partikel von der Becher-

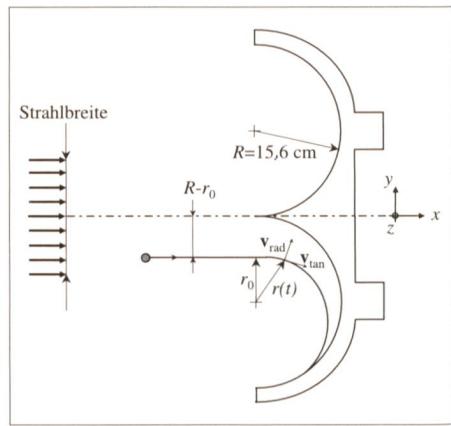


Bild 8. Schnitt durch einen vereinfachten Becher eines Peltonrades und Trajektorie eines Partikels. Je nach Lage des Schnittes variiert die Strahlbreite zwischen 0 und dem Maximum von 20 cm.

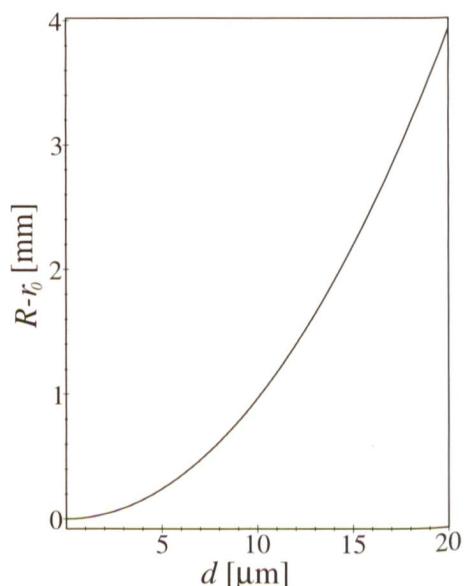


Bild 9. Auf die Oberfläche prallende Partikel als Funktion der Grösse d : Partikel, welche weniger als $R - r_0$ von der Bechermitte entfernt sind, treffen auf die Becheroberfläche.

Parameter	Mittelwert und Standardabweichung	
	Innertkirchen 1	Grimsel 2
$d_{10,ND}/d_{10,HD}$	$1,03 \pm 0,08$	$0,99 \pm 0,05$
$d_{50,ND}/d_{50,HD}$	$1,06 \pm 0,18$	$1,04 \pm 0,04$
$d_{90,ND}/d_{90,HD}$	$1,13 \pm 0,22$	$1,04 \pm 0,12$
$d_{10,D}/d_{10,HD}$	$1,03 \pm 0,07$	$0,99 \pm 0,06$
$d_{50,D}/d_{50,HD}$	$1,05 \pm 0,11$	$1,04 \pm 0,09$
$d_{90,D}/d_{90,HD}$	$1,05 \pm 0,18$	$1,00 \pm 0,06$
$d_{1,ND}/d_{1,HD}$	$0,99 \pm 0,10$	$1,01 \pm 0,13$
$d_{1,D}/d_{1,HD}$	$1,00 \pm 0,08$	$1,00 \pm 0,01$
$d_{2,ND}/d_{2,HD}$	$1,02 \pm 0,13$	$1,13 \pm 0,19$
$d_{2,D}/d_{2,HD}$	$1,12 \pm 0,22$	$1,13 \pm 0,11$
$V_{1,ND}/V_{1,HD}$	$0,97 \pm 0,08$	$0,93 \pm 0,04$
$V_{1,D}/V_{1,HD}$	$0,99 \pm 0,06$	$0,93 \pm 0,08$
$V_{2,ND}/V_{2,HD}$	$0,98 \pm 0,09$	$1,05 \pm 0,07$
$V_{2,D}/V_{2,HD}$	$0,98 \pm 0,07$	$1,02 \pm 0,02$

Tabelle 1. Werte für die einzelnen Parameter gemittelt über die jeweiligen Proben der drei Fälle HD, ND und Düse.

Probe	Gr 2, 18.12.2000		Innertkirchen 1	Grimsel 2
	nach BET	aus Gl. (1)	aus Gl. (1)	aus Gl. (1)
A_{ND}/A_{HD}	$1,04 \pm 0,02$	1,04	$0,98 \pm 0,09$	$0,99 \pm 0,04$
A_D/A_{HD}	$1,06 \pm 0,02$	1,05	$0,97 \pm 0,07$	$0,99 \pm 0,07$

Tabelle 2. Verhältnisse der Oberflächen für die Proben ND zu HD (zweitunterste Zeile) und Düse zu HD (unterste Zeile). In der zweiten und dritten Spalte stehen die Werte für die drei Proben, bei denen die BET-Analyse gemacht wurde. In der vierten und fünften Spalte stehen die Mittelwerte und Standardabweichungen für alle Wasserproben vom lk 1 bzw. Gr 2.

mitte entfernt sein darf, damit es noch auf die Oberfläche trifft.

In den expliziten Berechnungen setzen wir $T \equiv \pi R/u$, $u = 50 \text{ m/s}$, $\rho_p = 2,65 \text{ g/cm}^3$ (Dichte eines Partikels), $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ (Dichte von Wasser) und $R \equiv 15,6 \text{ cm}$. Wie aus Bild 9 hervorgeht, können nur Partikel, die nahe der Bechermitte einlaufen, auf die Oberfläche prallen: Ein Partikel der Grösse $d = 20 \mu\text{m}$ z.B. trifft auf die Oberfläche, wenn sein $R - r_0$ kleiner als $0,39 \text{ cm}$ ist, im Vergleich dazu beträgt der Radius des Wasserstrahls $R_S = 10 \text{ cm}$.

Nehmen wir an, dass die Partikel homogen über den kreisrunden Querschnitt des einlaufenden Wasserstrahls verteilt sind, so befinden sich die auf den Becher auftreffenden Partikel etwa innerhalb eines Querschnitts der Breite $2(R - r_0)$ und der Länge $2R_S$. Die entsprechende Fläche ist $A_p = 4R_S(R - r_0)$. Dies bedeutet, dass $A_p/\pi R_S^2$ dem Anteil derjenigen Partikel entspricht, welche die Oberfläche des Bechers erreichen können. Daraus folgt, dass weniger als 5 % der Partikel mit $d = 20 \mu\text{m}$ mit der Oberfläche in Kontakt kommen. Für kleinere Partikel ist der Anteil noch kleiner.

Aus den Abschätzungen lässt sich daher schliessen, dass prozentual nur sehr

wenige der durchlaufenden Partikel auf die Becheroberfläche treffen. Nur solche, die sich nahe der Bechermitte befinden und schwer genug sind, gelangen bis zur Oberfläche und können beim Aufprall zerkleinert oder beschädigt werden.

7. Schlussfolgerungen

Mit den hier angewendeten Messmethoden konnte kein signifikanter Unterschied in den Trübungswerten zwischen dem Wasser auf der Hochdruck- und Niederdruckseite der Maschinen in den Kraftwerken Innertkirchen 1 und Grimsel 2 nachgewiesen werden. Die Unterschiede liegen innerhalb des natürlichen Streubereiches der Trübung. Auf Grund der Grösse der Messfehler schätzen wir, dass ein allfälliger Effekt, den die Maschinen auf die Trübung haben könnten, kleiner als 2 % ist. Auch die Korngrössenanalysen der Sedimentteilchen zeigten keine wesentlichen Unterschiede: Die Proben vom turbinisierten Wasser wiesen im Mittel weder eine verminderte Anzahl von grossen Partikeln noch eine vermehrte Anzahl von kleinen Partikeln auf. Auch mit Hilfe einer Düse, die noch grössere hydromechanische Kräfte auf die Partikel erzeugen sollte als die Maschinen,

konnte keine Fragmentierung der Partikel nachgewiesen werden.

Die Resultate aus den angewendeten Methoden erhärten somit die Hypothese nicht, dass die Maschinen der KWO die Sedimentteilchen signifikant zerkleinern oder die Trübung merklich erhöhen. Auf Grund grober Abschätzungen finden wir weiter, dass von der Gesamtheit der Sedimentpartikel nur ein kleiner Anteil auf die Oberfläche prallt.

Die beobachtete Zunahme der Trübung im Brienzersee ist demnach mit einer Fragmentierung der in den KWO-Werken durchlaufenden Sedimentpartikel nicht erkläbar. In weiteren Studien ist geplant, andere mögliche Ursachen zu untersuchen.

Dank

Die Autoren danken der KWO für ihre hilfreiche Unterstützung in den messtechnischen Untersuchungen und für die Betriebsdaten. Weiter danken wir den ETH-Angehörigen G. Kahr, D. Braun und A. Hofmann für ihre Mithilfe bei den Labor-Analysen sowie J. Wuest und M. Schurter von der Eawag für die Benutzung ihrer Messinstrumente. Wir danken auch P. Wägli vom Institut für Festkörperphysik für die REM-Aufnahmen und G. Kahr vom Institut für Geotechnik für die BET-Analysen und die Röntgendiffraktometer-Aufnahmen. T. Staubli, Hochschule Technik + Architektur Luzern, Horw, und M. Casey, Sulzer Innotec, Winterthur, standen uns mit ihrer Expertise über hydraulische Maschinen zur Seite. Die Studie wurde finanziell unterstützt vom Gewässer- und Bodenschutzlabor des Kantons Bern.

Literatur

- [1] M. Krause und H. Grein: «Abrasion Research and Prevention», Sulzer Technical Review 2 (1993), 30–36.
- [2] S. Blaser und J. Bühler: Experimentelle Untersuchungen zum hydromechanischen Einfluss der Maschinen der Kraftwerke Oberhasli auf die Wassertrübung, Studie, Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH Zürich, 2001.
- [3] R. J. Davies-Colley, W. N. Vant und D. G. Smith: Colour and clarity of natural waters, Ellis Horwood, New York, 1993.
- [4] J. T. O. Kirk: Light and photosynthesis in aquatic ecosystems, Cambridge University Press, Cambridge, 1994.
- [5] R. H. Stengel und G. Kahr: BET-Oberflächen und XRD-Messungen an Trockenrückständen von Trübungsproben, Bericht Nr. 4586, Institut für Geotechnik, ETH Zürich, 2001.

Anschrift der Verfasser

Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich
Dr. Stefan Blaser, E-Mail: blaser@ihw.baug.ethz.ch
Dr. Johannes Bühler,
E-Mail: buhler@ihw.baug.ethz.ch