

Hydraulische Modellierung der Hydroabrasion

C.Auel¹, I. Albayrak¹ und R.M. Boes¹

¹ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW),
Gloriastrasse 37/39, 8092 Zürich, SCHWEIZ

E-Mail: auel@vaw.baug.ethz.ch

Kurzfassung

Hydroabrasion tritt im alpinen Raum hauptsächlich bei Wasserbauwerken auf, die durch hohe Fließgeschwindigkeiten und große Sedimentfrachten belastet werden. Dies sind beispielsweise Wehrschwelen in Flüssen, Wasserfassungen von Wasserkraftwerken und vor allem Sedimentumleitstollen. Letztere dienen dazu sedimentreiche Hochwasserspitzen um die Talsperre herum in den Unterlauf des Flusses zu leiten. Sie verhindern so eine fortschreitende Verlandung des Stauraums.

Es gibt verschiedene Konzepte, dem Problem der Hydroabrasion entgegen zu wirken. Einerseits kann der Umleitstollen hydraulisch optimiert werden, um die Einwirkung auf die Sohle zu minimieren. Auf der anderen Seite kann deren Widerstand verbessert werden. An der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich werden zur Zeit zwei Forschungsarbeiten durchgeführt, die sich jeweils diesen Aspekten widmen. Dieser Beitrag befasst sich mit der hydraulischen Optimierung von Sedimentumleitstollen mit Hilfe von großskaligen Laborversuchen.

In insgesamt drei Versuchsreihen werden die Mittelwert- und Turbulenz-Fließcharakteristik von schießendem Abfluss in einer Versuchsrinne mittels eines Laser-Doppler Anemometrie-Systems (LDA) aufgenommen, die Fortbewegungsart des Sediments mittels eines High-Speed Kamera-Systems analysiert sowie die Abrasion der Stollensohle untersucht. In Abhängigkeit des Sohlgefälles, des Durchflusses, der Größe und Menge der Sedimentfracht erfolgt die Fortbewegung des Sedimentkorns hüpfend, rollend oder gleitend und verursacht unterschiedliche Abrasionserscheinungen in der Stollensohle. Die Ergebnisse der LDA Experimente zeigen, dass, abhängig vom Verhältnis Gerinnebreite zur Abflusstiefe, Sekundärströmungen auftreten. Diese Sekundärströmungen beeinflussen im untersuchten Froude-Zahlenbereich 2, 4 und 8 das longitudinale Strömungsprofil sowie die Verteilung der Sohlen- bzw. Reynolds-Schubspannungen und der Turbulenzintensität und somit letztlich die Fortbewegungsart des Sedimentkorns in der Wassersäule.

Mittels der drei Versuchsreihen sollen bestmögliche hydraulische Bedingungen für Sedimentumleitstollen gefunden werden, um die Hydroabrasion und somit die Unterhaltskosten signifikant zu minimieren.

Einleitung

Die Verlandung von Stauseen stellt zunehmend ein betriebliches Problem dar, zu dessen Vermeidung bzw. Verminderung insbesondere zukünftig hohe Kosten anfallen. Viele Talsperren im alpinen Raum wie auch weltweit sind bereits Mitte des letzten Jahrhunderts in Betrieb genommen worden. Bei typischen mittleren Verlandungsraten von jährlich 1 bis 2% des Stauraums sind viele Speicher bereits zur Hälfte mit Sedimenten gefüllt bzw. werden es in naher Zukunft sein [1]. Die Verlandung der Stauseen führt zu einer Vielzahl von Problemen, wie Minderung des zur Energiegewinnung bzw. für die Wasserversorgung nutzbaren Volumens, Minderung des Retentionsraums bei Hochwasserereignissen, Gefährdung der Betriebssicherheit infolge Verlegens der Auslassorgane und verstärkte Turbinenabrasion infolge erhöhter spezifischer Schwebstoffkonzentration. Der Klimawandel lässt durch die hydrologischen und

morphologischen Veränderungen die Thematik noch stärker in den Vordergrund rücken [2]. Das Neubaupotential von Speicheranlagen in der Schweiz ist nahezu ausgeschöpft. Umso mehr liegt der Schwerpunkt bei der Sanierung und dem Ausbau bestehender Anlagen, wobei das übergeordnete Ziel immer eine nachhaltige und somit auch wirtschaftliche Betriebsführung ist.

Der Verlandungsproblematik kann auf verschiedenen Arten begegnet werden, wie beispielsweise durch Ausbaggerung der Sedimente, Spülen der Sedimente durch den Grundablass im Freispiegel oder unter Druck, Durchleiten der Trübströme durch die Talsperre oder Umleiten der Sedimente durch einen Stollen. Detaillierte Angaben über die verschiedenen Maßnahmen können [3] entnommen werden.

Sedimentumleitstollen

Sedimentumleitstollen leiten die sedimenthaltigen Hochwasser um die Talsperre herum in das Unterwasser und verhindern somit die fortschreitende Akkumulation im Stauraum. Sie bestehen im Allgemeinen aus einem Leitbauwerk, einem Einlaufbauwerk und dem eigentlichen Transportbauwerk (Abbildung 1).

Prinzipiell können zwei Typen von Umleitstollen unterschieden werden. Entweder das Einlaufbauwerk befindet sich im Bereich der Stauwurzel (Abbildung 1a). Der Einlauf erfolgt in diesem Fall im Freispiegel. Oder der Einlauf befindet sich im Stausee und erfolgt unter Druck (Abbildung 1b). Das Leitbauwerk fasst während Hochwasserereignissen das sedimenthaltige Wasser und leitet es in Richtung Einlaufbauwerk. Durch den anschließenden Umleitstollen wird das Wasser mitsamt den Sedimenten in das Unterwasser der Sperre geführt. Die Verlandung wird dadurch verhindert bzw. maßgeblich reduziert. Als positiver Nebeneffekt unterstützen die Sedimentumleitstollen die Durchgängigkeit des Geschiebes und führen somit zu einer ökologischen Aufwertung.

Die Zahl der Sedimentumleitstollen ist weltweit infolge der hohen Bau- und vor allem Unterhaltskosten noch gering. In der Schweiz und in Japan existieren jeweils sieben Sedimentumleitstollen bzw. befinden sich zurzeit im Bau [4, 5]. Von zehn existierenden Stollen sind die hydraulischen Parameter Sohlengefälle, Fließgeschwindigkeit, spezifischer Ausbaudurchfluss und Froudezahl in Abbildung 2 grafisch dargestellt (Daten aus [3]).

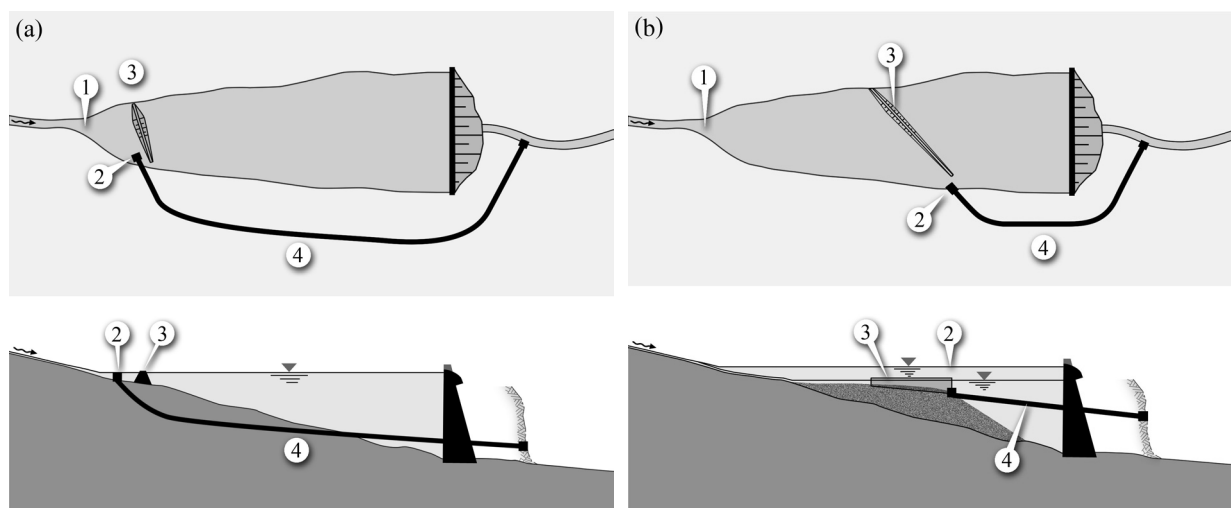


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Sedimentumleitstollens in Situation und Schnitt. (a) Einlauf im Freispiegel. (b) Einlauf unter Druck. 1) Stauwurzel, 2) Einlauf, 3) Leitbauwerk, 4) Umleitstollen. [3].

Hydroabrasion

Die hohen Fließgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s in Kombination mit der großen Sedimentfracht führen im Sedimentumleitstollen, wie auch bei vielen anderen Anlagen im Wasserbau, trotz Verschleißschichten aus hochfestem Beton oder Schmelzbasaltplatten zu starker Hydroabrasion und verursachen hohe Unterhaltskosten [3].

Die Hydroabrasion der Sohle wird durch die schleifende, rollende bzw. hüpfende Bewegung des Sedimentkorns verursacht. Das Gefälle der Stollensohle, der Sedimentkorn Durchmesser, die Kornform sowie die Fracht bestimmen maßgeblich diesen Prozess. Je steiler das Gefälle ausgeführt wird, desto grösser ist die Fließgeschwindigkeit und das Korn tendiert eher zu einer hüpfenden Bewegung. Die Aufprallenergie ist bei dieser Bewegung grösser als bei der schleifenden bzw. rollenden Bewegung. Allerdings ist die Sprunglänge des Korns ebenfalls grösser, somit wird die durch das Korn beanspruchte Fläche der Sohle kleiner. Die Kornform beeinflusst ebenfalls maßgeblich die Fortbewegungsart des Sediments. Runde Steine tendieren eher zum Rollen, längliche eher zum Hüpfen. Die transportierte Fracht beeinflusst die Fortbewegungsart ebenfalls. Bei geringem Sedimenttransport behindern sich die Steine gegenseitig kaum, die Aufprallenergie auf die Sohle ist tendenziell grösser. Bei hoher Sedimentfracht bedeckt eine sich langsam fortbewegende Schicht die Sohle und schützt diese vor der Beanspruchung. Man spricht vom sog. *Tools and Cover Effect* [6].

Diese sich wechselseitig beeinflussenden Prozesse werden detailliert in dieser Forschungsarbeit untersucht.

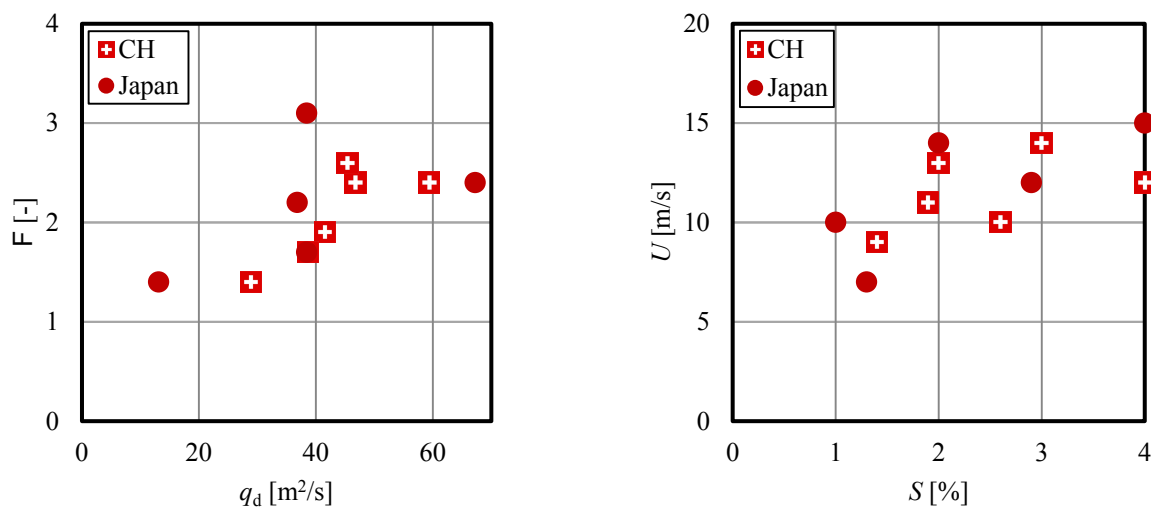


Abbildung 2: Hydraulische Parameter existierender Sedimentumleitstollen in der Schweiz und in Japan. F = Froudezahl, q_d = spezifischer Ausbaudurchfluss, U = Normalabflussgeschwindigkeit, S = Sohlengefälle. [3].

Hydraulische Modellversuche

Versuchsanlage

In großskaligen Laborversuchen erfolgt eine systematische Untersuchung der Parameter Längsgefälle, Durchfluss, Sedimentfracht, Korngröße, Kornform, Fortbewegungsart des Sediments und Abrasionstiefe der Stollensohle. Die Versuchsrinne hat eine Länge von 14 m und ist 0.30 m breit (Abbildung 3). Der Übergang im Einlauf der Rinne von der Rohrströmung auf den schießenden Freispiegelabfluss erfolgt in einer sog. Strahlbox [7]. Der maximale Durchfluss im Modell beträgt 250 l/s, die Rinne kann zwischen 1 und 4% geneigt werden. Die Se-

dimentfracht wird in einem Bereich von 10 bis 1000 g/s mittels einer Sedimentdotiermaschine hinzugegeben. Alle Versuche werden unter stationären Bedingungen durchgeführt. Die Skalierung des Modells erfolgt mit der Modellähnlichkeit nach Froude. Der Modellmaßstab beträgt etwa 1:15 verglichen mit typischen Abmessungen existierender Sedimentumleitstollen (vgl. Abbildung 2).

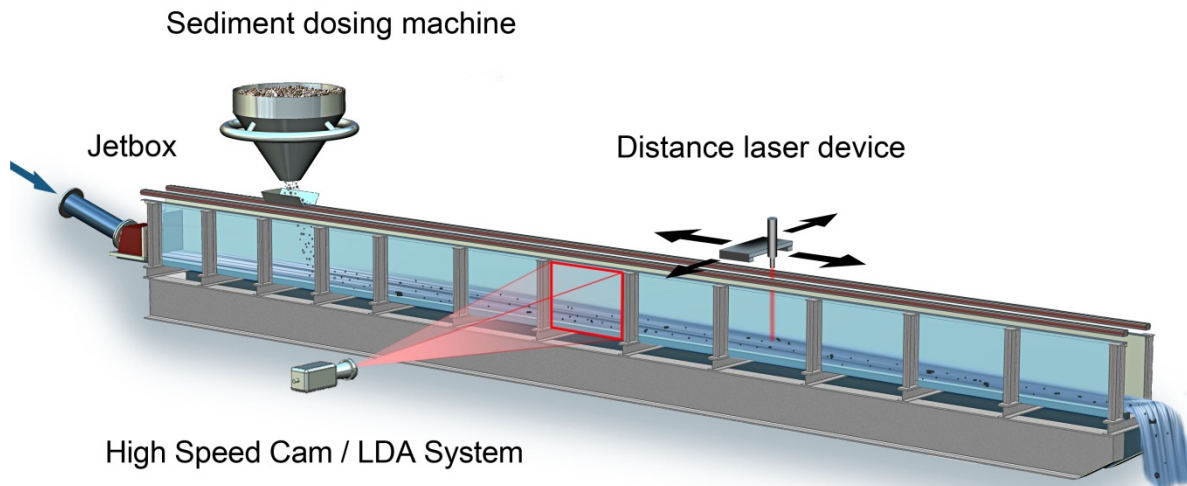


Abbildung 3: Schema des hydraulischen Modells. Fließrichtung von links nach rechts.

Mittelwert- und Turbulenz-Fließcharakteristik

In einer ersten Versuchsreihe wurde die Mittelwert- und Turbulenz-Fließcharakteristik des schießenden Abflusses in der Versuchsrinne in insgesamt neun Versuchen detailliert untersucht. Bei den drei Einlauf-Abflusstiefen $h_o = 25, 50$ und 100 mm wurden jeweils die drei Einlauf-Froudezahlen $F_o = 2, 4$ und 8 systematisch variiert. Die angegebenen Werte beziehen sich dabei auf den Austritt des Wassers aus der Strahlbox, bzw. den Eintritt des schießenden Freispiegelabflusses in die Rinne. Mit einem 2D-LDA-System der Firma DANTEC Dynamics wurden die lokalen, zeitlich fluktuierenden longitudinalen und vertikalen Geschwindigkeiten gemessen. Das aufgenommene Querprofil befindet sich 6.40 m unterstrom der Strahlbox. Je nach Froude-Zahl liegt Normal- resp. verzögerter Abfluss vor. Pro Versuch wurden bis zu 575 Messpunkte aufgezeichnet.

In Tabelle 1 sind die charakteristischen Fließparameter für vier durchgeführte Versuche bei einem Gefälle der Versuchsrinne von $S = 1\%$ gelistet. In Abbildung 4 sind die longitudinalen Fließgeschwindigkeiten U für eine Abflusstiefe von $h_o = 100$ mm und Einlauf-Froudezahlen von $F_o = 2$ bzw. $F_o = 4$ angegeben, in Abbildung 5 entsprechend für eine Abflusstiefe von $h_o = 50$ mm und Einlauf-Froudezahlen von $F_o = 2$ bzw. $F_o = 4$. Bei steigender Froude-Zahl sind ein fluktuierender Wasserspiegel sowie ein erhöhter Selbstbelüftungsprozess zu verzeichnen. Aus diesem Grund sind die Messwerte nahe der Wasserspiegeloberfläche, bzw. in Fließrichtung links betrachtet, nicht verwertbar.

Das longitudinale Strömungsprofil ist, gespiegelt an der Mittelachse, bei allen untersuchten Testreihen symmetrisch (vgl. Abbildung 4 und 5). Das Verhältnis von Gerinnebreite zur Abflusstiefe b/h in Abbildung 4 beträgt 2.8 resp. 2.6 . Die maximalen Fließgeschwindigkeiten befinden sich im Bereich von 0.5 bis $0.6 h$ (sog. *velocity-dip phenomenon*). Die Berandung hat demnach einen Einfluss auf die Strömung und verursacht einen dreidimensionalen Strömungsverlauf mit einer ausgeprägten nach unten gerichteten Sekundärströmung in Gerinneachse, die das *velocity-dip phenomenon* verursacht (vgl. [8]). Die in diesem Paper nicht dargestellte Sohlen- und Reynolds-Schubspannungs-verteilung weist ebenfalls auf den drei-

dimensionalen Verlauf hin.

In Abbildung 5 beträgt das Seitenverhältnis $b/h = 5.6$ resp. 4.5 und befindet sich somit im Übergangsbereich zwischen einer 2D und 3D Strömung. Nach [9] liegt der kritische Wert zwischen 5 und 6. Die maximale Fließgeschwindigkeit befindet sich im oberen Bereich nahe der Wasseroberfläche. Das *velocity-dip phenomenon* ist hier nicht zu erkennen. Der Effekt der Sekundärströmung ist gering, es handelt sich daher um eine zweidimensionale Strömung. Dennoch ist eine Beeinflussung der Sohlen- und Reynolds-Schubspannungsverteilung durch die Strömung erkennbar (in diesem Paper nicht dargestellt).

Tabelle 1: Charakteristische Fließparameter für $S = 1\%$, berechnete und gemessene Werte.

h_o	F_o	h	U	U_{max}	F	R	b/h
[mm]	[-]	[mm]	[m/s]	[m/s]	[-]	[-]	[-]
50	2	54	1.3	1.70	1.8	$2.1 \cdot 10^5$	5.6
50	4	66	2.1	2.77	2.7	$3.9 \cdot 10^5$	4.5
100	2	106	1.9	2.25	1.8	$4.7 \cdot 10^5$	2.8
100	4	117	3.4	4.12	3.2	$8.9 \cdot 10^5$	2.6

h_o = Einlauf-Abflusstiefe . F_o = Einlauf-Froudezahl. h , U_{bulk} , U_{max} , F , Reynoldszahl R und b/h beziehen sich auf das vermessene Profil 6.40 m nach der Strahlbox. U_{max} und h sind gemessene Werte. F , R und $U = Q/(b \cdot h)$ sind berechnete Werte.

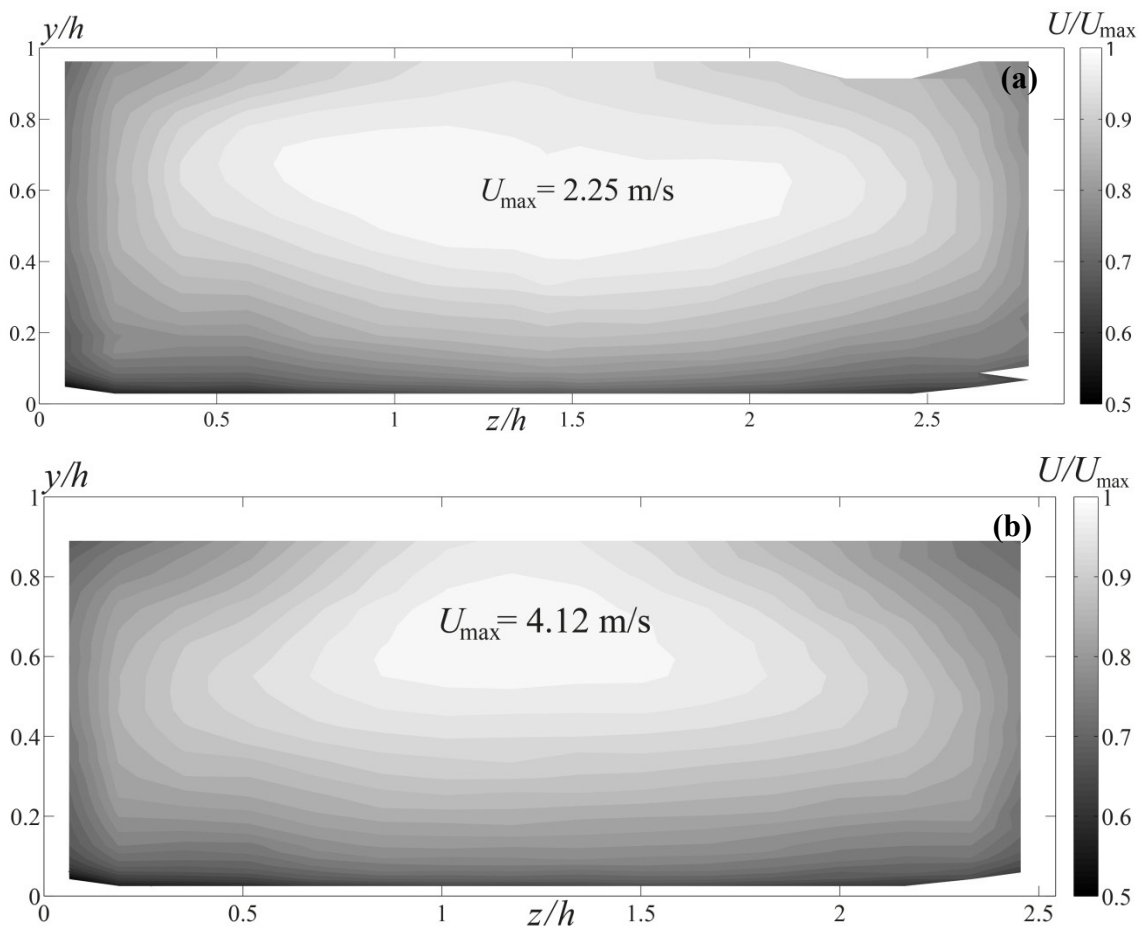


Abbildung 4: Longitudinale Geschwindigkeitsverteilung U im Querprofil 6.40 m nach der Strahlbox. Blick gegen die Fließrichtung; y = vertikale Koordinate, z = Koordinate quer zur Fließrichtung; h = Abflusstiefe. (a) $F_o = 2$ und $h_o = 100$ mm. (b) $F_o = 4$ und $h_o = 100$ mm.

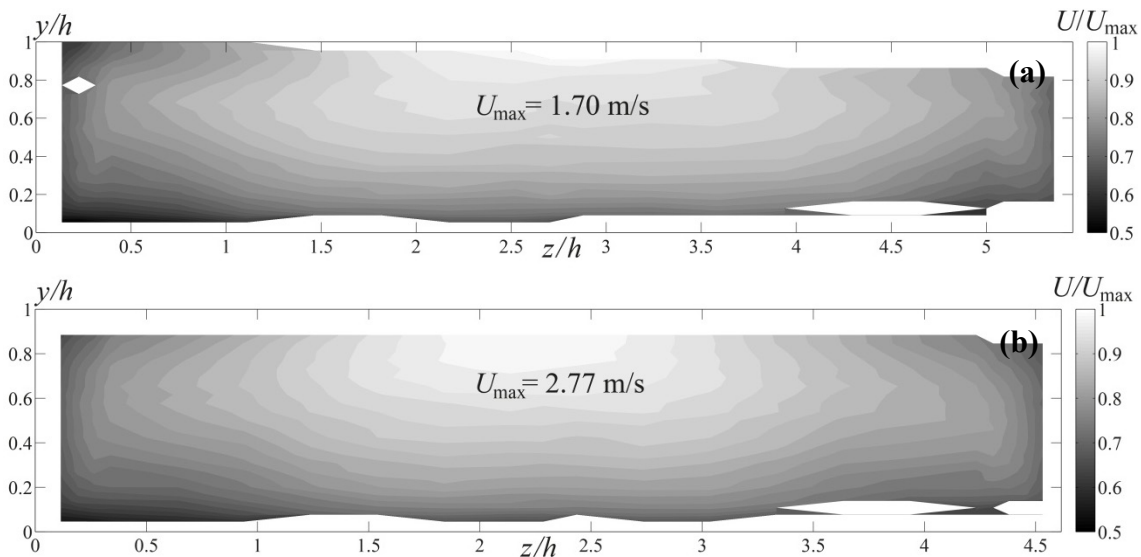


Abbildung 5: Longitudinale Geschwindigkeitsverteilung U im Querprofil 6.40 m nach der Strahlbox. Blick gegen die Fließrichtung; y = vertikale Koordinate, z = Koordinate quer zur Fließrichtung; h = Abflusstiefe. (a) $F_o = 2$ und $h_o = 50$ mm. (b) $F_o = 4$ und $h_o = 50$ mm.

Fortbewegungsart des Sediments

In einer zweiten Versuchsreihe wird die Fortbewegungsart des Sediments mittels eines High-Speed Kamera-Systems detailliert untersucht. Die PCO-edge 5 Megapixel Kamera leistet bei voller Auflösung von 2650 x 2160 pxl eine Bildrate von 100 Hz im *rolling shutter* bzw. 50 Hz im *global shutter* Betrieb. Die Versuchsläufe werden bei 2650 x 400 pxl mit einer Bildrate von 240 Hz im *global shutter* Betrieb aufgenommen.

Die Fortbewegungsart lässt sich unterteilen in eine rollende Bewegung (das Sedimentkorn ist im Kontakt mit der Sohle, beinhaltet ebenfalls die schleifende Bewegung), eine hüpfende oder springende Bewegung (das sich bewegende Sedimentkorn springt von der Sohle ab) und Fortbewegung in Suspension (Sedimentkörner werden während der Abwärtsbewegung wieder vertikal nach oben beschleunigt) [12]. Mittels *Particle Tracking*-Verfahren werden die Parameter Sprunglänge, Sprunghöhe, Aufprallwinkel, Rotation des Kornes und Fortbewegungsgeschwindigkeit bei jedem Versuch ermittelt. Variiert werden das Gefälle, die Einlauf-Froudezahl, die Abflusstiefe, der Sedimentkorndurchmesser, die Sedimentfracht und die Sedimentform. Neben natürlichem Sediment werden ebenfalls sphärische Glaskugeln identischen Durchmessers verwendet. Insgesamt werden etwa 240 verschiedene Versuchsläufe jeweils bis zu 100-mal durchgeführt. In Abbildung 6 sind drei aufeinanderfolgende Fotos (1/24 s) eines Versuchs bei einer Einlauf-Froudezahl $F_o = 2$ und einer Abflusstiefe $h_o = 100$ mm dargestellt. Die Sedimentkörner bewegen sich zum Großteil schleifend und rollend, teilweise leicht hüpfend fort. In Abbildung 7 sind drei aufeinanderfolgende Fotos eines Versuchs bei einer Einlauf-Froudezahl $F_o = 4$ und einer Abflusstiefe $h_o = 100$ mm dargestellt. Die Sedimentkörner bewegen sich hier zum Grossteil rollend und hüpfend fort.

Abrasion der Sohle

In einer dritten Versuchsreihe wird die Abrasion der Stollensohle vertieft analysiert. Ein Teil der Sohle des hydraulischen Modells wird durch ein sprödes Sand-Zementgemisch ersetzt. Systematisch variiert werden wiederum das Gefälle, die Einlauf-Froudezahl, die Abflusstiefe, der Sedimentkorndurchmesser und die Sedimentfracht. Die Abrasion wird mittels eines Distanzlasers vermessen. Ähnliche Versuche wurden im Rahmen von flussmorphologischen Fragestellungen von [10, 11] durchgeführt.

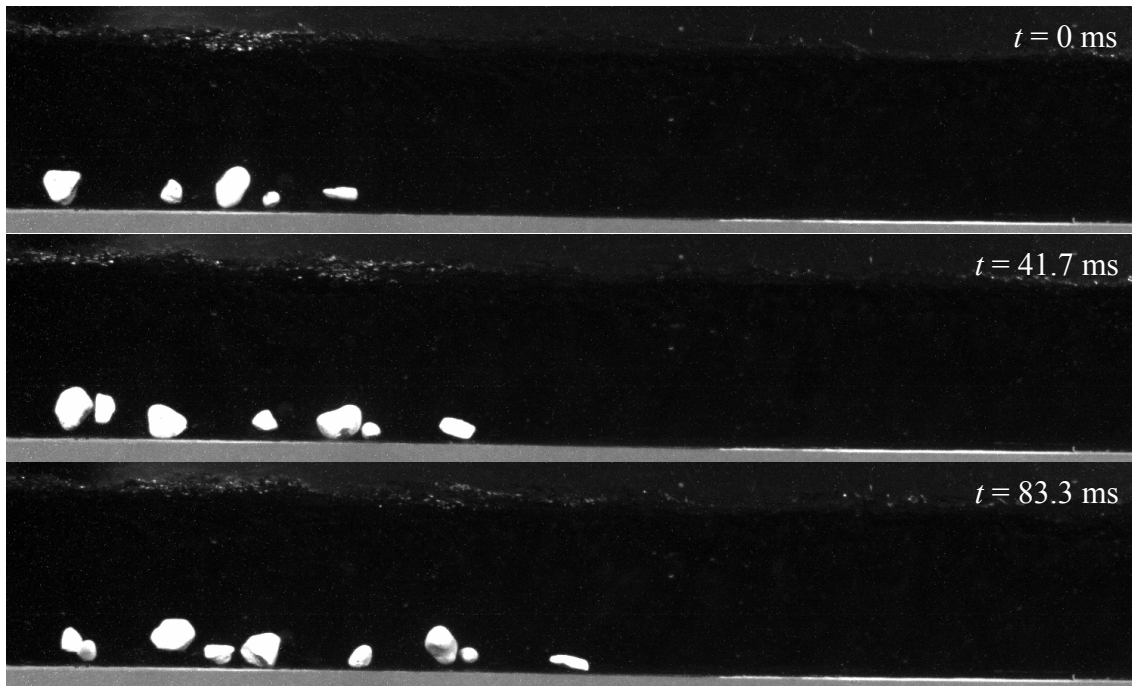


Abbildung 6: Sedimenttransport im hydraulischen Modell. Aufnahme mit 240 Hz. Auflösung 2650 x 400 pxl. $S = 1\%$, $F_o = 2$, $h_o = 100 \text{ mm}$. Sedimentkorndurchmesser $d_m = 5$ bzw. 11 mm (2 Kornklassen). Schleifende und rollende Fortbewegung der Sedimentkörner.

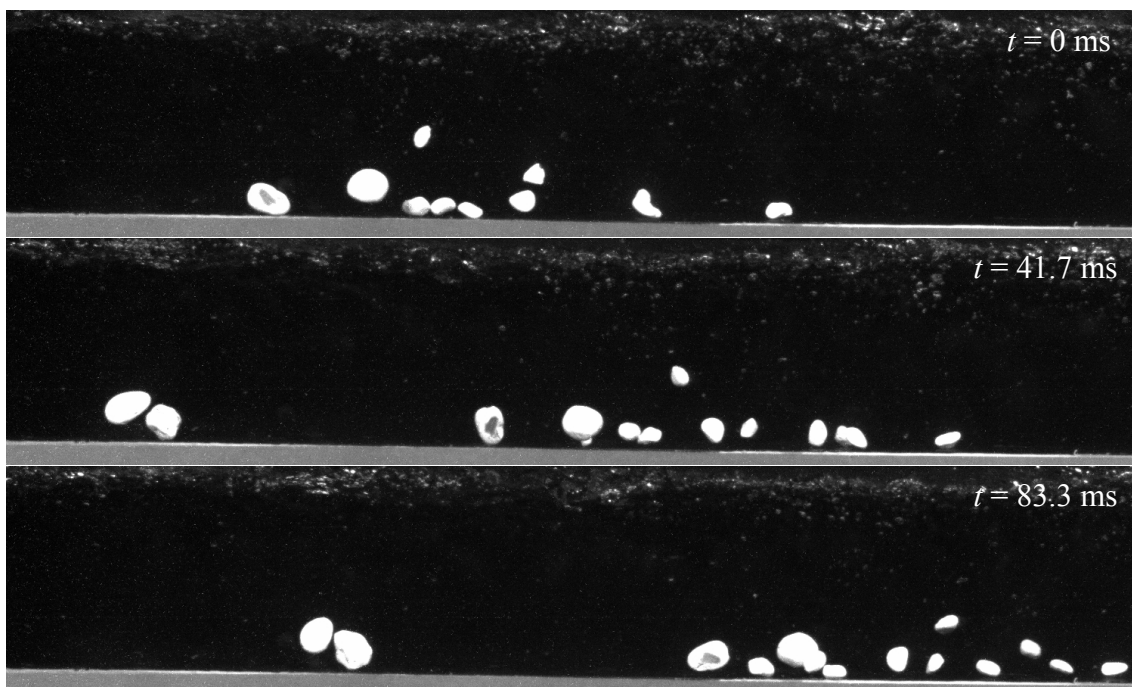


Abbildung 7: Sedimenttransport im hydraulischen Modell. Aufnahme mit 240 Hz. Auflösung 2650 x 400 pxl. $S = 1\%$, $F_o = 4$, $h_o = 100 \text{ mm}$. Sedimentkorndurchmesser $d_m = 5$ bzw. 11 mm (2 Kornklassen). Hüpfende und rollende Fortbewegung der Sedimentkörner.

Schlussfolgerungen und Ausblick

In großskaligen Modellversuchen im Labor der VAW erfolgt eine systematische Untersuchung der Parameter Längsgefälle, Durchfluss, Sedimentfracht, Korngröße, Kornform, Fortbewegungsart des Sediments und Abrasionstiefe der Stollensohle. Es werden drei Versuchs-

reihen durchgeführt, welche die Mittelwert- und Turbulenz- Fließcharakteristik der Strömung im Stollen, den Sedimenttransport auf fester Sohle und die Hydroabrasion der Sohle detailliert betrachten. Die Ergebnisse der LDA Experimente zeigen, dass, abhängig vom Verhältnis Gerinnebreite zur Abflusstiefe, Sekundärströmungen auftreten. Diese Sekundärströmungen beeinflussen im untersuchten Froude-Zahlenbereich 2, 4 und 8 das longitudinale Strömungsprofil sowie die Verteilung der Sohlen- bzw. Reynolds-Schubspannungen und der Turbulenzintensität und somit letztlich die Fortbewegungsart des Sedimentkorns in der Wassersäule. Mittels der drei Versuchsreihen sollen bestmögliche hydraulische Bedingungen für Sedimentumleitstollen gefunden werden, um die Hydroabrasion und somit die Unterhaltskosten signifikant zu minimieren.

Das Forschungsprojekt befindet sich im Mai 2012 in der zweiten Versuchsphase. Der Abschluss der Arbeit ist Ende 2013 geplant.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung des Forschungsprojekts durch swisselectric research und das Bundesamt für Energie.

Quellenverzeichnis

- [1] Schleiss A., Oehy C. (2002). Verlandung von Stauseen und Nachhaltigkeit. Wasser, Energie, Luft, 94(7/8), pp. 227-234.
- [2] KOHS (2007). Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. Wasser Energie Luft, 99(1), pp. 55-60.
- [3] Auel C., Boes R. (2011). Sediment bypass tunnel design – review and outlook. Proc. 79th Annual Meeting of ICOLD "Dams and Reservoirs under Changing Challenges". Lucerne, Switzerland. Taylor & Francis, London, pp. 403-412.
- [4] Sumi T., Okano M., Takata Y. (2004). Reservoir sedimentation management with bypass tunnels in Japan. Proc. 9th International Symposium on River Sedimentation, Yichang, China, pp. 1036-1043.
- [5] Vischer D., Hager W.H., Casanova C., Joos B., Lier P., Martini O. (1997). Bypass tunnels to prevent reservoir sedimentation. Q. 74 R. 37, Proc. 19th Congress of the International Commission on Large Dams (ICOLD), Florence, Italy.
- [6] Sklar L.S., Dietrich W.E. (2004). A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load. Water Resources Research, 40(6).
- [7] Schwalt M., Hager W.H. (1992). Die Strahlbox. Schweizer Ingenieur und Architekt, 110(27-28), pp. 547-549.
- [8] Albayrak I., Lemmin U. (2011). Secondary Currents and Corresponding Surface Velocity Patterns in a Turbulent Open-Channel Flow over a Rough Bed. Journal of Hydraulic Engineering-ASCE, 137(11), pp. 1318-1334.
- [9] Nezu I., Nakagawa H. (1993). Turbulence in open-channel flows, A. A. Balkema, Rotterdam.
- [10] Finnegan N.J., Sklar L.S., Fuller, T.K. (2007). Interplay of sediment supply, river incision, and channel morphology revealed by the transient evolution of an experimental bedrock channel. Journal of Geophysical Research-Earth Surface 112(F3).
- [11] Johnson J.P., Whipple K.X. (2010). Evaluating the controls of shear stress, sediment supply, alluvial cover, and channel morphology on experimental bedrock incision rate. Journal of Geophysical Research-Earth Surface 115.
- [12] Abbott J.E., Francis J.R. (1977). Saltation and Suspension Trajectories of Solid Grains in a Water Stream. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 284, No. 1321, pp. 225-254.