



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 15.11.2013

Entwurf und Bemessung von Sedimentumleitstollen

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wasserkraft
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

swisselectric research
Seilerstrasse 3
Postfach 7950
CH-3001 Bern

Auftragnehmer:

ETH Zürich
Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie (VAW)
Wolfgang-Pauli-Strasse 27
8093 Zürich

Autoren:

Christian Auel, VAW, auel@vaw.baug.ethz.ch

Dr. Ismail Albayrak, VAW, albayrak@vaw.baug.ethz.ch
Prof. Dr. Robert Boes, VAW, boes@vaw.baug.ethz.ch

BFE-Bereichsleiter:	Dr. Michael Moser
BFE-Programmleiter:	Dr. Klaus Jorde
BFE-Vertragsnummer:	SI/500643-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Schiessender Abfluss tritt in vielen wasserbaulichen Anlagen auf, wie z.B. Schussrinnen, Auslassorganen von Talsperren, Wehren und Umleitstollen. Bei diesen Bauwerken sind infolge hoher Fließgeschwindigkeiten und bei Umleitstollen ebenfalls grossem Geschiebetrieb Kavitations- und Abrasionschäden zu erwarten. Sedimentumleitstollen sind eine sehr effektive Massnahme, um die Akkumulation von Sedimenten im Stausee signifikant zu minimieren. Bei Hochwasser wird der Umleitstollen geöffnet und das sedimenthaltige Wasser um die Talsperre herum in das Unterwasser geleitet. Dennoch ist die Anzahl von Sedimentumleitstollen weltweit bis heute aufgrund hoher Investitions- und vor allem Unterhaltskosten begrenzt. An der VAW wurde dieses Forschungsprojekt im Jahr 2011 initialisiert, um vertiefte Erkenntnisse in die Prozesse bei hoch schiessendem Abfluss mit Geschiebetransport zu erlangen und Entwurfskriterien für die Bemessung von Umleitstollen zu entwickeln. Das Forschungsprojekt beinhaltet drei verschiedene Versuchsreihen: (1) die Analyse der Turbulenz, (2) die Analyse der Sedimentbewegung, und (3) die Entwicklung der Sohlenabrasion infolge Sedimenttransports bei schiessendem Abfluss. Diese Versuchsreihen geben Einblick in die hydraulischen Prozesse in Sedimentumleitstollen und betrachten die Interaktion von sich fortbewegendem Sediment und dem Abrasionsprozess der Sohle.

Abstract

Supercritical open-channel flows occur in many hydraulic structures including spillways, dam outlets, weirs, and bypass tunnels. Due to high flow velocities and high sediment flux severe problems such as cavitation and abrasion damages are expected, particularly in sediment bypass tunnels. Given the fact that sedimentation affects the majority of worldwide reservoirs, sediment bypass tunnels as a countermeasure become more and more important. These are an effective means to decrease reservoir sedimentation by bypassing the sediments into the dam tailwater during floods. However, hydroabrasion on tunnel inverts causes significant annual maintenance cost. To enhance the use of sediment bypass tunnels as an effective countermeasure against reservoir sedimentation, the presented research project was initiated at VAW in early 2011. The main goal is to establish general design criteria for optimal hydraulic conditions to avoid sediment depositions in the tunnel and to keep the invert abrasion damages occurring in most existing tunnels at a minimum. The project is divided in three single test series investigating the (1) mean and turbulent flow characteristics, (2) particle motion, and (3) invert abrasion caused by sediment transport. Besides new insights in the three listed topics, paramount interest is given to their interrelations. Knowledge of the flow characteristics is indispensable to analyze the particle motion and to amplify the invert abrasion phenomena in super critical open-channel flows.

Ausgangslage

Viele Talsperren im alpinen Raum wie auch weltweit sind bereits seit Jahrzehnten in Betrieb. Bei typischen mittleren Verlandungsraten von 1 bis 2% des Stauraums pro Jahr sind dementsprechend viele Speicher bereits zu einem grossen Teil mit Sedimenten gefüllt bzw. werden es in naher Zukunft sein. Die Verlandung der Stauseen führt zu einer Vielzahl von Problemen, wie die Minderung des zur Energiegewinnung bzw. für die Wasserversorgung nutzbaren Volumens, die Minderung des Retentionsraums bei Hochwasserereignissen, die Gefährdung der Betriebssicherheit infolge Verlegens der Auslassorgane und die verstärkte Turbinenabrasion infolge erhöhter spezifischer Schwebstoffkonzentration.

Verschiedene Massnahmen gegen die Stauraumverlandung werden weltweit angewandt. Sie lassen sich prinzipiell in die drei Kategorien Reduktion des Sediments im Einzugsgebiet, Sedimentumleitung und Sedimententnahme einteilen. Dieses Forschungsprojekt befasst sich mit der Sedimentumleitung mittels Sedimentumleitstollen. Der Umleitstollen ist eine effektive Massnahme, um die Akkumulation von Sedimenten im Stausee signifikant zu minimieren. Bei Hochwasser wird der Umleitstollen geöffnet und das sedimenthaltige Wasser um die Talsperre herum in das Unterwasser geleitet. Auch aus ökologischer Sicht ist der Umleitstollen von grossem Vorteil, da er den natürlichen Geschiebetrieb des Flusssystems im Hochwasserfall wieder herstellt. Dennoch ist die Anzahl von Sedimentumleitstollen weltweit bis heute aufgrund hoher Investitions- und vor allem Unterhaltskosten begrenzt. Das grösste Problem aller existierenden Stollen ist die starke Abrasion der Sohle infolge der hohen Fließgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s in Kombination mit einer grossen Sedimentfracht. In Abb. 1 sind die Abrasionsschäden zweier Schweizer Sedimentumleitstollen dargestellt. In Abb. 1a ist eine 1 bis 2 m tiefe Abrasionsrinne im Stollen Palagnedra (Tessin) zu erkennen. In Abb. 1b sind flächige Abrasionsschäden im Umleitstollen Pfaffensprung (Uri) sichtbar.

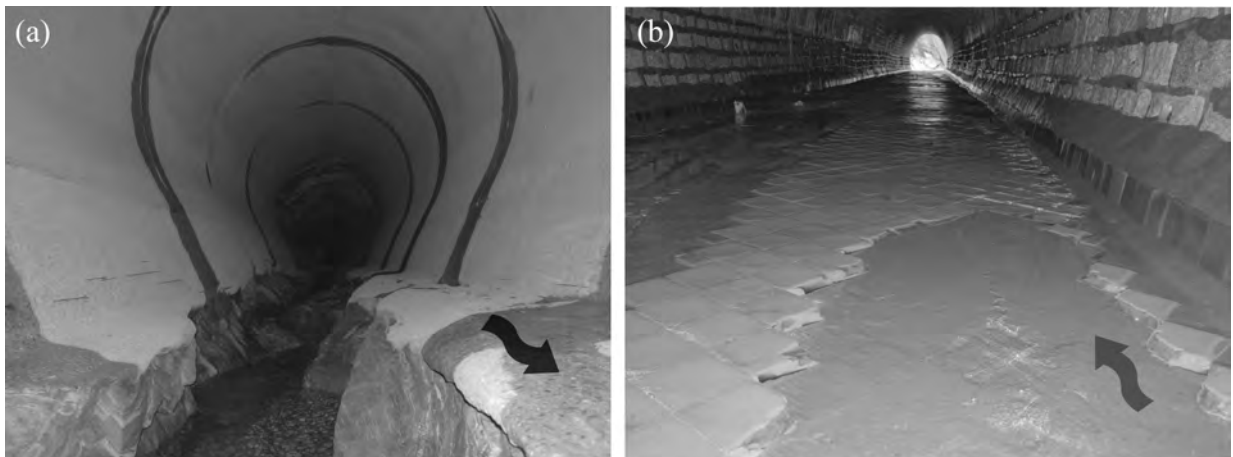


Abb. 1: a) Abrasionsrinne im Sedimentumleitstollen Palagnedra (Tessin). b) flächige Abrasionsschäden im Sedimentumleitstollen Pfaffensprung (Uri).

Ziel der Arbeit

Die Forschungsarbeit soll den Talsperrenbetreibern dank Entwurfskriterien zu optimierten Sedimentumleitstollen eine nachhaltige Massnahme zur Aufrechterhaltung des Nutzvolumens von Stauseen an die Hand geben. Das Forschungsprojekt ist in drei verschiedene Versuchsreihen untergliedert, die im Labor der VAW durchgeführt wurden:

- (1) die Analyse der Turbulenz bei schiessendem Abfluss,
- (2) die Analyse der Sedimentbewegung bei schiessendem Abfluss, und
- (3) die Entwicklung der Sohlenabrasion infolge Sedimenttransports bei schiessendem Abfluss.

Diese Versuchsreihen geben Einblick in die hydraulischen Prozesse in Sedimentumleitstollen und betrachten die Interaktion von sich fortbewegendem Sediment und den Abrasionsprozess der Sohle.

Vorgehen und Methode

In grossskaligen Laborversuchen erfolgt eine systematische Untersuchung der Parameter Durchfluss, Sedimentfracht Q_s , Längsgefälle S , Fortbewegungsart des Sediments und Abrasionstiefe der Stollensohle. Die Versuchsrinne hat eine Länge von 13.50 m und ist 0.30 m breit (Abb. 2). Der maximale Durchfluss im Modell beträgt 250 l/s, die Rinne kann zwischen $S = 0.01$ und 0.04 geneigt werden. Die Sedimentfracht wird in einem Bereich von 50 bis 800 g/s mittels einer Sedimentdotiermaschine hinzugegeben. Alle Versuche werden unter stationären Bedingungen durchgeführt, der Abfluss erfolgt im Freispiegel. Die Skalierung des Modells erfolgt mit der Modellähnlichkeit nach Froude. Der Modellmassstab beträgt etwa 1:15, verglichen mit typischen Abmessungen von existierenden Sedimentumleitstollen. Die abradierbare Sohle des Stollens wird mittels eines spröden Mörtels simuliert.

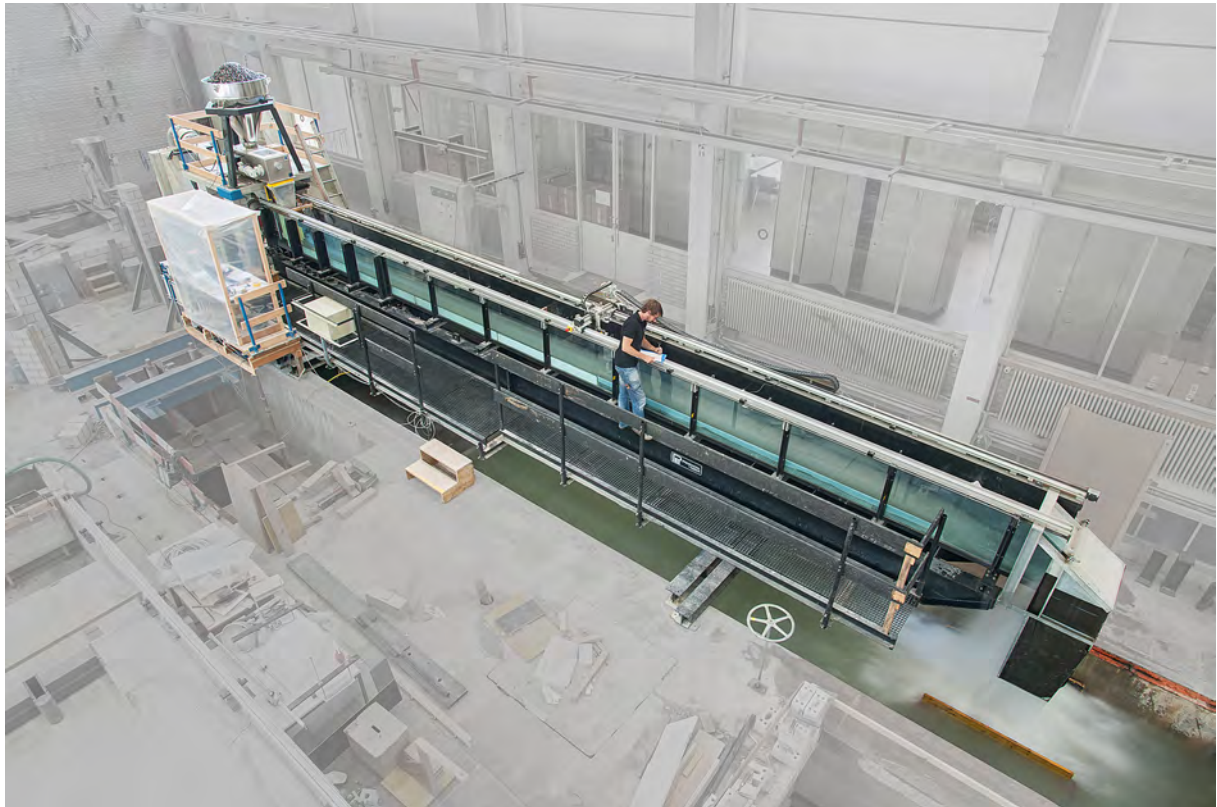


Abb. 2: 13.5 m lange Versuchsrinne an der VAW.

Ergebnisse

1. Versuchsreihe

In der ersten Versuchsreihe wurde die mittlere und turbulente Fließcharakteristik des schiessenden Abflusses bei drei verschiedenen Froude Zahlen und drei verschiedenen Abflusstiefen mittels eines 2D-LDA Systems in einem Querprofil der Versuchsrinne analysiert (Abb. 3). In Abb. 4 ist beispielhaft das longitudinale und vertikale Geschwindigkeitsprofil bei einer Abflusstiefe $h = 100$ mm und den Froudezahlen $F = 2, 4$ und 8 dargestellt. Charakteristisch für diese Abflüsse ist der Wandeinfluss, der eine ausgeprägte Sekundärströmung verursacht (dargestellt als Pfeile). Aus diesem Grund befindet sich die maximale Geschwindigkeit U nicht nahe der Wasseroberfläche, sondern bei ca. 60% der Abflusstiefe.

Neben den Geschwindigkeitsprofilen wurden ebenfalls die Turbulenzintensitäten, die Reynolds-Schubspannungen sowie die Sohl Schubspannungen ausgewertet. Gerade letztere sind für das Verständnis des Sedimenttransports im Umleitstollen von zentraler Bedeutung. Detaillierte Ergebnisse können zwei Veröffentlichungen entnommen werden. Ein Konferenz Beitrag ist im Sommer 2013 erschienen (Albayrak *et al.* 2013), ein *peer-reviewed journal paper* ist zur Veröffentlichung akzeptiert (Auel *et al.* 2013).

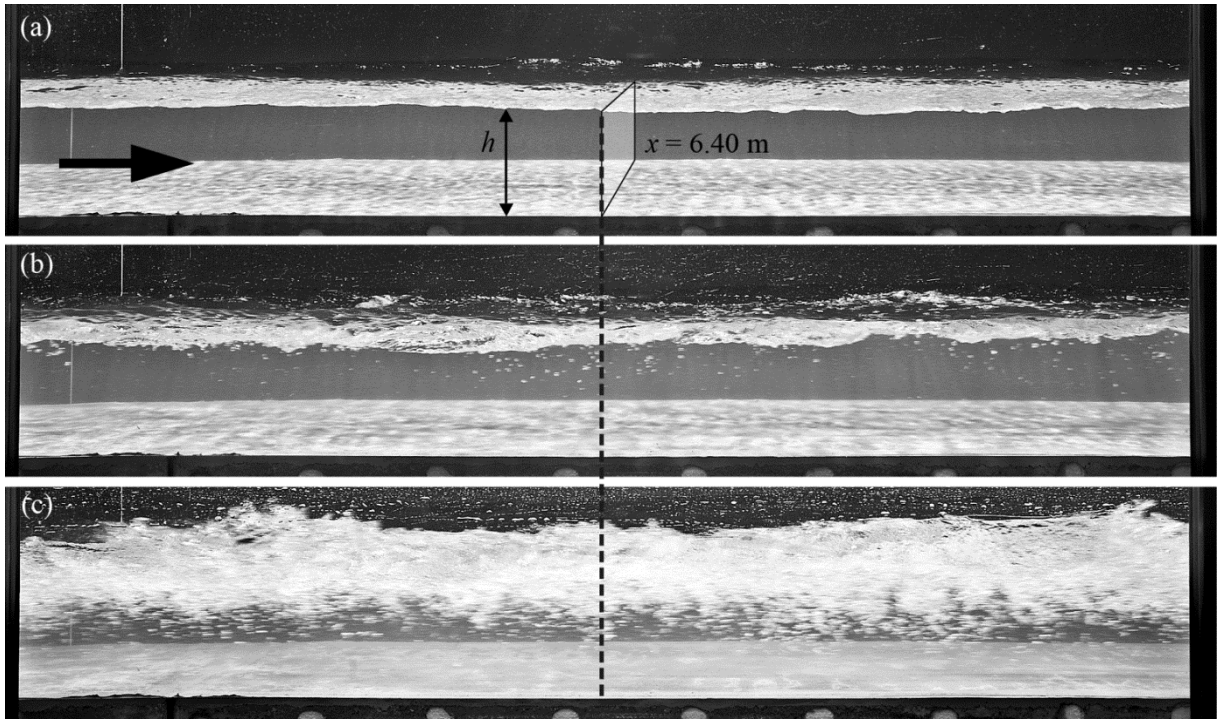


Abb. 3: Abfluss in der Versuchsrinne bei einer Abflusstiefe $h = 100$ mm und einer Froudezahl von a) $F = 2$, b) $F = 4$ und c) $F = 8$. In a) ist das vermessene Querprofil skizziert.

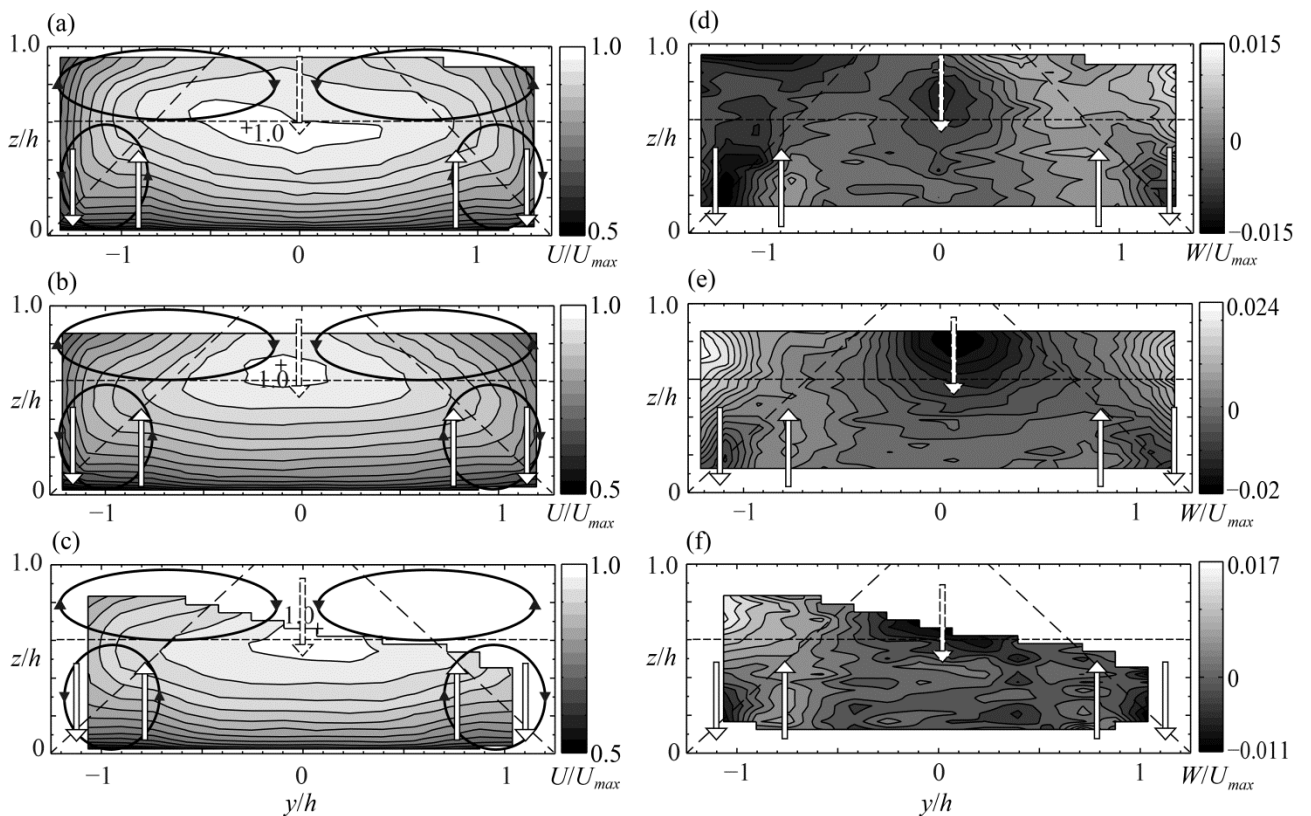


Abb. 4: Normiertes longitudinales und vertikales Geschwindigkeitsprofil U und V über die Breite der Versuchsrinne. Abflusstiefe $h = 100$ mm. a) U für Froudezahl $F = 2$, b) U für $F = 4$, c) U für $F = 8$, d) V für $F = 2$, e) V für $F = 4$, f) V für $F = 8$.

2. Versuchsreihe

In der zweiten Versuchsreihe wurde mittels einer *High Speed*-Kamera bei einer Bildfrequenz von 240 Hz insgesamt etwa 5'400 Einzeltests durchgeführt. Bei dieser Versuchsreihe mit Einzelsedimentkörnern und Glaskugeln identischen Durchmessers lag der Fokus auf dem Transportmodus des Ein-

zelkorns (Abb. 5). Folgende Parameter wurden variiert: Abflusstiefe $h = 50$ und 100 mm, Sohlgefälle $S = 0.01$ und 0.04 . $F = 1.25$ sowie $F = 1.5 - 6.0$ in 0.5 Schritten und Partikeldurchmesser $D = 5, 10$ und 18 mm. Mit Hilfe eines *Particle Tracking*-Verfahrens (PTV) wurde analysiert, ob der Stein bzw. die Kugel sich rollend, springend oder in Schwebel fortbewegt. Die Sprunglänge und -höhe sowie die Aufprallgeschwindigkeit des Partikels wurden ausgewertet.

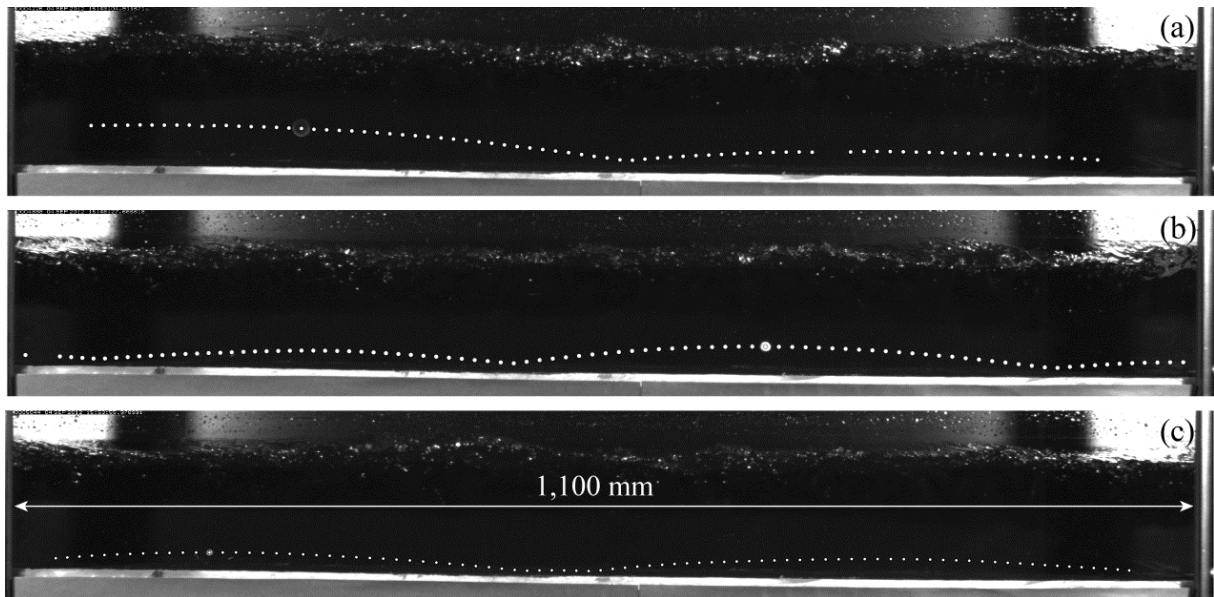


Abb. 5: *High Speed*-Kamera-Aufnahme. Resultierende Trajektorien einer Glaskugel bei einer Abflusstiefe von 100 mm, einer Froudezahl $F = 4$ und einem Gefälle $S = 0.01$. a) Durchmesser $D = 17.5$ mm, b) $D = 10.3$ mm, c) $D = 5.4$ mm.

In Abb. 6 sind einige Ergebnisse dargestellt. Abb. 6a zeigt einen linearen Zusammenhang von Sprunglänge zu -höhe. Abb. 6b zeigt einen linearen Zusammenhang der Aufprallgeschwindigkeit des Partikels zur Fließgeschwindigkeit des Wassers, hier dargestellt als Sohl Schubspannungsgeschwindigkeit U_* .

Eine detaillierte Auswertung aller Daten ist in Bearbeitung und eine entsprechende Publikation in Vorbereitung (Auel et al. 2014).

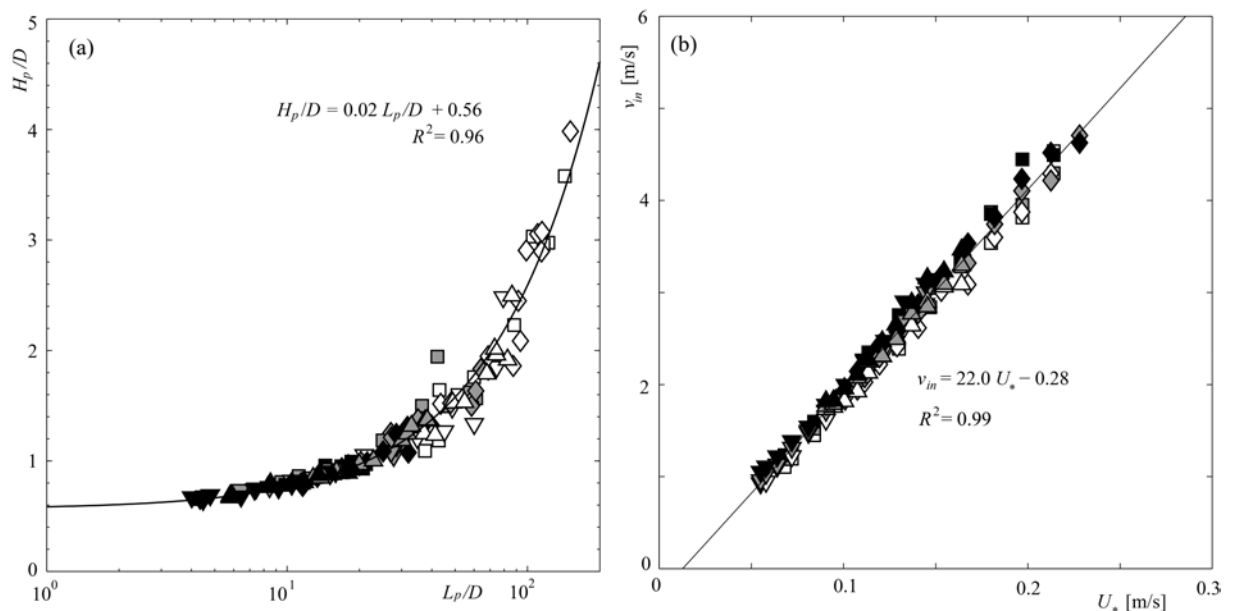


Abb. 6: Daten aller Glaskugelversuche. Schwarz $D = 17.5$ mm, grau $D = 10.3$ mm, weiss $D = 5.4$ mm. a) normierte Sprunglänge L_p über Sprunghöhe H_p . b) Aufprallgeschwindigkeit v_{in} über Sohl Schubspannungsgeschwindigkeit U_* .

3. Versuchsreihe

In einer dritten Versuchsreihe wird die Abrasion der Stollensohle untersucht. Als leicht abradierbares Ersatzmaterial wurden zwei Mörtelmischungen verwendet, die im Verlauf des Versuchs Verschleissererscheinungen aufweisen. Bei diesen Versuchen werden nicht Einzelkörner, sondern die Sedimentfracht betrachtet. Durch eine automatisierte Zugabe des Geschiebes wird der Einfluss der Sedimentfracht auf den Abrasionsprozess detailliert analysiert. Insgesamt wurden 18 Versuche durchgeführt, wobei die Abflusstiefe ($h = 50$ und 100 mm), das Gefälle ($S = 0.01$ und 0.04), die Sedimentfracht ($Q_s = 50 - 800$ g/s) und der Korndurchmesser ($D = 5 - 18$ mm) variiert wurden.

In Abb. 7 ist ein Oberflächenscan nach insgesamt 930 min Versuchsdauer dargestellt. Zu erkennen sind zwei parallele Abrasionsrinnen, die sich entlang der Wände entwickeln. Daraus lässt sich schließen, dass der Sedimenttransport in einem geraden Kanal vermehrt an den Aussenwänden stattfindet, was mit den Ergebnissen der Sohlschubspannungsverteilung aus der ersten Versuchsreihe übereinstimmt.

Detaillierte Auswertungen über mittlere und maximale Abrasionstiefen und deren Muster werden zurzeit durchgeführt und sollen im Frühjahr 2014 veröffentlicht werden.

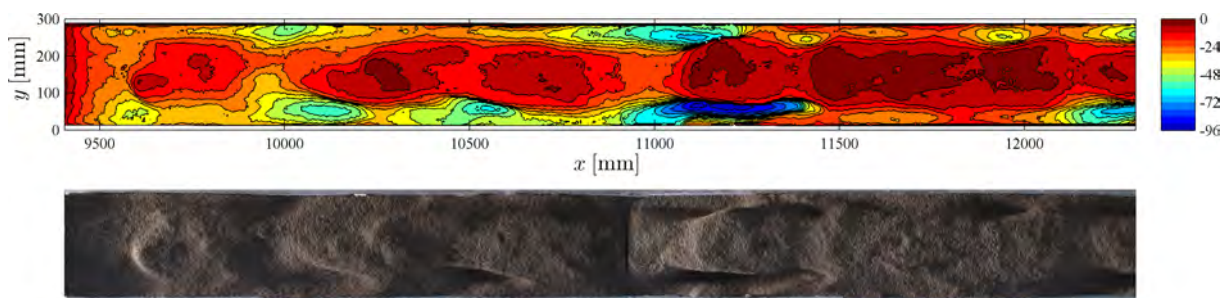


Abb. 7: Oberflächenscan und Foto einer 3 m langen abradierten Strecke nach 930 min Versuchsdauer unter folgender Belastung: $F = 2$, $h = 100$ mm, $Q_s = 200$ g/s, $S = 0.04$, und $D = 11.2$ mm.

Diskussion / Erkenntnisse

In den Jahren 2012 und 2013 wurden systematische Versuchsreihen im Labor durchgeführt und jeweils die Parameter Durchfluss, Abflusstiefe, Sedimentfracht und -korngroße sowie Längsgefälle variiert. Die Versuchsreihen wurden im Sommer 2013 abgeschlossen. Die Ergebnisse werden zurzeit im Rahmen einer Dissertation zusammengefasst und sollen im Frühjahr 2014 zur Verfügung stehen. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen einen Einblick in die Turbulenzcharakteristik, die Partikelfortbewegung und den Sedimenttransport in hoch schiessenden Abflüssen auf festem geradem Untergrund zu. In der Forschung wurde dieses Thema bisher nur wenig bzw. nicht behandelt, da der Fokus meist auf alluvialen beweglichen Sohlen liegt. Zudem ist die Interaktion mit der Sohle, also die Entstehung von Abrasionsmustern, bisher ebenfalls meistens im Bereich der Flussmorphologie untersucht worden. Durch Kombination der drei untersuchten Versuchsreihen lassen sich demnach nicht nur neue Erkenntnisse der Prozesse in Sedimentumleitstollen herleiten, sondern das Forschungsprojekt trägt allgemein zur Grundlagenforschung von Transportvorgängen und Abrasionsprozessen bei hoch schiessenden Abflüssen bei.

Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss

Der Abschluss der Forschungsarbeit ist für das Frühjahr 2014 geplant. Eine Veröffentlichung der zweiten Versuchsreihe in einer begutachteten Fachzeitschrift soll zeitnah erfolgen. Eine weitere Veröffentlichung, welche die Abrasionsprozesse umfasst, ist geplant. Des Weiteren sind Veröffentlichungen zusammen mit japanischen Forschern auf diesem Gebiet geplant, bei denen der Fokus auf den japanischen Umleitstollen liegt.

Ein internationaler Workshop, der die Thematik Bemessung und Entwurf von sowie Schäden in Sedimentumleitstollen aufgreift, ist für Frühjahr 2015 in Zürich geplant.

Referenzen

2014

Auel C. (2014). Turbulence characteristics, particle motion and invert abrasion in sediment bypass tunnels. *PhD thesis*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, in preparation.

Auel C., Albayrak I., Boes R.M. (2014). Particle motion in supercritical open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, in preparation.

2013

Auel C., Albayrak I., Boes R.M. (2013). Turbulence characteristics in supercritical open-channel flows: Effects of Froude number and aspect ratio. *Journal of Hydraulic Engineering*, published online 8th November 2013. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000841](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000841)

Albayrak I., Auel C., Boes R.M. (2013). Supercritical flow in sediment bypass tunnels. *Proc. 12th Int. Symposium on River Sedimentation - Advances in River Sediment Research* (S. Fukuoka, H. Nakagawa, T. Sumi, H. Zhang, eds.), Kyoto, Japan. ISBN 978-1-138-00062-9, Taylor and Francis, London, UK, 1867-1875.

2012

Auel C., Albayrak I., Boes R.M. (2012). Hydraulische Modellierung der Hydroabrasion. *Proc. Internationales Wasserbausymposium*, TU Graz (G. Zenz, ed.), 353-360.

Auel C., Boes R.M. (2012). Sustainable reservoir management using sediment bypass tunnels. *Proc. 24th ICOLD Congress*. Q92 R16. Kyoto, Japan, 224-241.

Hagmann M., Auel C., Albayrak I., Boes R.M. (2012). Hydroabrasion in Sedimentumleitstollen. *Proc. 35. Dresdner Wasserbaukolloquium*. "Staubauwerke - Planen, Bauen, Betreiben". Wasserbauliche Mitteilungen Heft 47, TU Dresden, 95-104.

2011

Auel C., Boes R.M. (2011a). Sediment bypass tunnel design – review and outlook. *Proc. ICOLD Symposium - Dams under changing challenges* (Schleiss and Boes, eds.), 79th Annual Meeting of ICOLD, Lucerne, Switzerland. ISBN 978-0-514-68267-1, Taylor and Francis, London, UK, 403-412.

Auel C., Boes R.M. (2011b). Sediment bypass tunnel design - hydraulic model tests. *Proc. Hydro 2011 - Practical solutions for a sustainable future*, No.29.03. Aqua-Media International Ltd. Prague, Czech Republic.

Auel C., Boes R., Ziegler T., Oertli C. (2011). Design and construction of the sediment bypass tunnel at Solis. *Intl. Journal on Hydropower and Dams* 18(3): 62-66.