

Hydroabrasion in Sedimentumleitstollen

Michelle Hagmann
Christian Auel
Ismail Albayrak
Robert M. Boes

Sedimentumleitstollen leiten die sedimentreichen Hochwasserspitzen um die Talsperre herum in den Unterlauf des Flusses und verhindern so eine fortschreitende Verlandung des Stauraums. Aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeiten und großen Sedimentfrachten in Umleitstollen weisen diese starke Verschleißerscheinungen auf, die zu hohen Unterhaltskosten führen. Es gibt verschiedene Konzepte um diesem Problem entgegen zu wirken. Einerseits kann der Umleitstollen hydraulisch optimiert werden, um die Belastung auf die Sohle zu minimieren. Auf der anderen Seite kann der Widerstand der Stollensohle verbessert werden. An der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich werden zur Zeit zwei Forschungsarbeiten durchgeführt, die sich diesen zwei Aspekten widmen. In großskaligen Laborversuchen erfolgt eine systematische Untersuchung und Optimierung der maßgebenden Parameter wie Fortbewegungsart des Sediments und Abrasionstiefe der Stollensohle. Anhand von Prototypversuchen im neu errichteten Sedimentumleitstollen Solis in Graubünden (Schweiz) werden die Zusammenhänge zwischen Beanspruchung, Materialeigenschaften und Abrasion im Prototyp ermittelt. Darauf basierend können Empfehlungen bezüglich Materialwahl, konstruktiver Durchbildung und Dimensionierung abgegeben und so zu einer nachhaltigen und wirtschaftlichen Wasserbewirtschaftung in Stauseen beigetragen werden.

Keywords: Stauraumverlandung, Sedimentumleitstollen, Sedimenttransport, hydraulische Modellversuche, Prototypversuche

1 Ausgangslage

Talsperren erfüllen vielfältige Funktionen. Sie dienen als Speicher für die Energieerzeugung, leisten durch die Bereitstellung von Retentionsvolumen einen wichtigen Beitrag zum Hochwasserschutz und tragen zur Gewährleistung der Wasserversorgung bei. Vor allem bei Hochwasser sind die Zuflüsse aber stark sedimenthaltig und führen zu Verlandungen, welche im weltweiten Durchschnitt jährlich 1 bis 2% des Stauvolumens betragen können (*Schleiss & Oehy 2002*).

Über die Jahrzehnte der Betriebsdauer verlandet so der Stauraum zunehmend, was zu zahlreichen Problemen führt. Die genannten Funktionen werden nicht mehr wunschgemäß erfüllt und die Betriebssicherheit gefährdet. Der Klimawandel lässt durch die hydrologischen und morphologischen Veränderungen die Thematik noch stärker in den Vordergrund rücken (KOHS 2007). Das Neubaupotential von Speichieranlagen in der Schweiz ist nahezu ausgeschöpft. Umso mehr liegt der Schwerpunkt bei der Sanierung und dem Ausbau bestehender Anlagen, wobei das übergeordnete Ziel immer die nachhaltige und wirtschaftliche Betriebsführung ist.

Der Verlandungsproblematik kann auf verschiedenen Arten begegnet werden, wie beispielsweise die Ausbaggerung der Sedimente, das Spülen der Sedimente durch den Grundablass im Freispiegel oder unter Druck, das Durchleiten der Trübströme durch die Talsperre oder das Umleiten der Sedimente durch einen Sedimentumleitstollen. Detaillierte Angaben über die verschiedenen Maßnahmen können *Auel & Boes* (2011a) entnommen werden.

2 Sedimentumleitstollen

Sedimentumleitstollen leiten die sedimenthaltigen Hochwasser um die Talsperre herum in das Unterwasser und verhindern somit die fortschreitende Akkumulation der Sedimente im Stauraum. Der Sedimentumleitstollen besteht generell aus einem Leitbauwerk, einem Einlauf und dem Umleitstollen selbst (Abbildung 1).

Prinzipiell können zwei Typen von Umleitstollen unterschieden werden. Entweder das Einlaufbauwerk befindet sich bei der Stauwurzel (Abbildung 1a) und der Einlauf erfolgt im Freispiegel, oder der Einlauf befindet sich im Stausee und erfolgt unter Druck (Abbildung 1b). Das Leitbauwerk fasst während Hochwasserereignissen sedimentreiche Abflüsse und leitet sie in Richtung Einlaufbauwerk. Durch den anschließenden Umleitstollen wird das Wasser mitsamt den Sedimenten im Unterwasser der Sperre wieder an das Flusssystem abgegeben. Die Verlandung wird dadurch verhindert bzw. maßgeblich reduziert. Als positiver Nebeneffekt unterstützen die Sedimentumleitstollen das Gleichgewicht des Geschiebehaushalts und führen zu einer ökologischen Aufwertung.

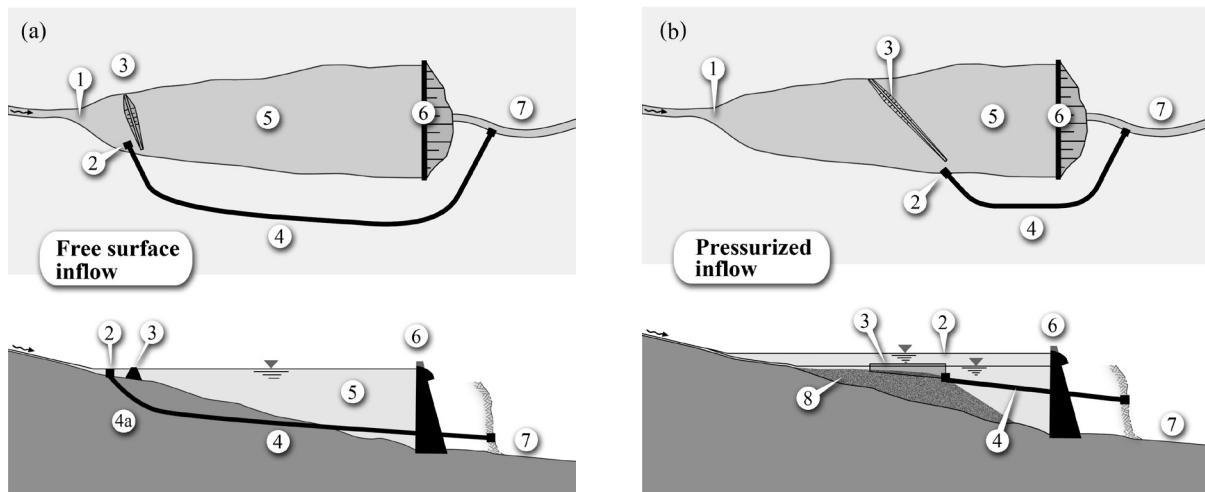


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Sedimentumleitstollens in Situation und Schnitt. a) Einlauf im Freispiegel. b) Einlauf unter Druck. 1) Stauwurzel, 2) Einlauf, 3) Leitbauwerk, 4) Umleitstollen, 4a) Beschleunigungsstrecke, 5) Stausee, 6) Talsperre, 7) Unterwasser, 8) Verlandungskörper. (Auel & Boes 2011b).

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 Verschleißschutzschichten zu starken Abreibungen und verursachen hohe Unterhaltskosten (Abbildung 2). Zusammen mit den ebenfalls großen Investitionskosten sind dies die Gründe, weshalb es weltweit erst rund ein Duzend solcher Anlagen gibt. Entsprechend spärlich sind die Erfahrungen.

Sedimentumleitstollen können nur wirtschaftlich und nachhaltig betrieben werden, wenn sie zum einen hydraulisch optimal konzipiert sind und zum anderen über eine bestmögliche Abstimmung zwischen Auskleidung und konstruktiver Durchbildung verfügen. An der VAW der ETH Zürich sind aus diesen Gründen im letzten Jahr zwei Forschungsprojekte gestartet worden, die diese Wissenslücke schließen sollen.

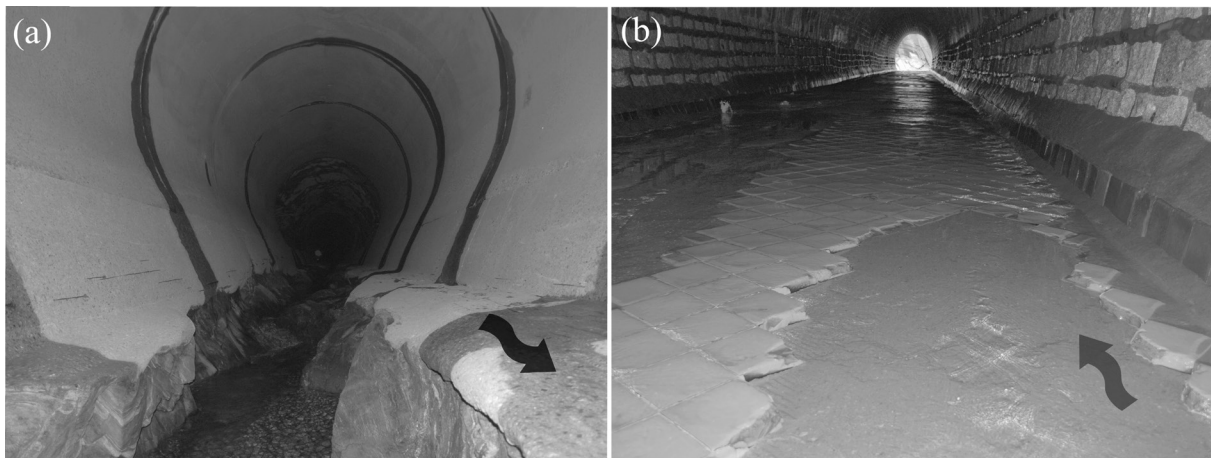


Abbildung 2: a) Sedimentumleitstollen Palagnedra, Tessin, Schweiz. 1 bis 2 m tiefe Abrasionsrinne in der Betonsohle. b) Sedimentumleitstollen Pfaffensprung, Uri, Schweiz. Flächige Abplatzungen der Schmelzbasaltplatten. (Auel & Boes 2011b).

4 Stand der Forschung

Weltweit sind bisher erst wenige Sedimentumleitstollen in Betrieb bzw. im Bau. In der Schweiz existieren bereits fünf Stollen, die für die Geschiebedurchleitung bei Staueen genutzt werden (Vischer *et al.* 1997, Auel & Boes 2011a). Der Sedimentumleitstollen Solis ist zurzeit im Bau (Auel *et al.* 2011). In Japan sind sechs Projekte bekannt, die im Bau oder in der Planung sind (Sumi *et al.* 2004, Kantoush & Sumi 2010).

Im Wasserbau existieren viele Bauwerke oder Bauwerksteile, wie Hochwasserentlastungen, Grundablässe, Bauumleitstollen und Tosbecken, die großen Fließgeschwindigkeiten und/oder starkem Geschiebetrieb ausgesetzt sind. Bei Sedimentumleitstollen treten beide Beanspruchungen gleichzeitig auf, führen zu starkem Verschleiß und verursachen hohe Unterhaltskosten. Analogien ergeben sich zudem mit Hochwasser-Entlastungstollen, da diese Abflüsse zeitweise auch große Sedimentfrachten mit sich führen. Als Beispiele seien der Hochwasserumleitstollen Randa an der Mattersvispa im Wallis (Schweiz), der Umleitstollen der Rovana im Vallemaggia, Tessin (Schweiz) sowie der kürzlich vollendete Entlastungstollen des Unteren Grindelwaldgletschers im Berner Oberland genannt (Werder *et al.* 2010).

Weder für die Auskleidung im Speziellen noch für die Bemessung im Allgemeinen existieren generell gültige Empfehlungen. Es fehlt eine systematische Darstellung der relevanten Überlegungen und Entwurfskriterien unter Berücksichti-

gung der durch die hohen Fließgeschwindigkeiten verursachten Abrasion einerseits und der Verhinderung von Geschiebeablagerungen im Stollen andererseits. Zudem liegen erst wenige Erfahrungen vor.

In einem Projekt aus der angewandten Forschung an der VAW wurde ein Sedimentumleitstollen am Stausee Solis untersucht (Oertli 2009, Auel et al. 2010a, 2010b, 2011). Der Zulauf in Richtung Stollen, der Stolleneinlauf sowie der Sedimentumleitstollen selbst wurden hydraulisch optimiert, mit dem Ziel, die Sedimente möglichst vollständig um den verbleibenden nutzbaren Stauraum herum zu leiten.

Am Umleitstollen Runcahez in Graubünden (Schweiz) wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes der VAW in Zusammenarbeit mit der *Technischen Forschung und Beratung für Zement und Beton* (TFB AG) Untersuchungen zur Betonabrasion durchgeführt (Jacobs et al. 2001). Im Bericht werden Hinweise zu widerstandsfähigeren Betonrezepturen gegeben. Allerdings war in den Prototypversuchen keine Quantifizierung der Sohlbeanspruchungen durch das transportierte Geschiebe möglich, und es wurden ausschließlich Betone als Abrasionsschutz untersucht.

Bezüglich Materialtechnologie und der Hydroabrasion an Wasserbauwerken sind die Arbeiten von Haroske (2000), Vogel & Müller (2009) sowie die Arbeiten von Helbig (Helbig et al. 2005, Helbig & Horlacher 2007, Helbig et al. 2009) zu erwähnen, die zwar verschiedene Betone mittels Laboruntersuchungen untereinander vergleichen, die Korrelation der Abrasion mit der in situ auftretenden Beanspruchung allerdings nicht untersuchen konnten.

5 Forschungsarbeiten an der VAW

Für einen nachhaltigen Betrieb von Wasserkraftanlagen ist vor allem im alpinen Raum der Umgang mit den in natürlichen Fließgewässern transportierten mineralischen Feststoffen von entscheidender Bedeutung. Zur Reduktion der Abrasionsschäden an Sedimentumleitstollen können die Beanspruchungen einerseits durch eine hydraulische Optimierung reduziert oder andererseits die Widerstandsfähigkeit durch eine optimale Abstimmung von Materialwahl und Einbaumethode erhöht werden. Das übergeordnete Ziel ist es, durch die Abgabe von Dimensionierungs- und Auskleidungsempfehlungen einen Beitrag zum nachhaltigen und wirtschaftlichen Betrieb wasserbaulicher Anlagen mit starker Hydroabrasion zu leisten.

In der Forschungsarbeit *Entwurf und Bemessung von Sedimentumleitstollen* erfolgt in großskaligen Laborversuchen eine systematische Untersuchung der maßgebenden Parameter, wie u.a. die Fortbewegungsart des Sediments und die Abrasionstiefe der Stollensohle. Ziel dieser Arbeit ist ein besseres Prozessverständnis der Sedimentfortbewegung im Stollen sowie eine Optimierung des hydraulischen Entwurfs, um die Abrasion maßgeblich zu minimieren.

In einer weiteren Forschungsarbeit *Optimierung verschleißfester Materialien an Sedimentumleitstollen und wasserbaulichen Anlagen* sollen mittels Prototypversuchen die materialtechnologischen Wissenslücken reduziert werden. Dazu werden im zurzeit im Bau befindlichen Sedimentumleitstollen Solis in Graubünden in der Schweiz sechs Testfelder mit unterschiedlichen abrasionsresistenten Materialien eingebaut. Die Beanspruchung dieser Testfelder wird in den Betriebsphasen durch kontinuierliche Messungen erfasst. Nach jedem Ereignis wird die Oberfläche der Testfelder vermessen. So können Einwirkungen und Widerstände der Testmaterialien einander gegenübergestellt und die Korrelationen zwischen transportiertem Geschiebe, Abflusszustand und Abrasion ermittelt werden. Die Ergebnisse der Prototypversuche werden durch eine systematische Auswertung der Erfahrungen bei anderen Anlagen in der Schweiz (Jacobs et al. 2001) und früheren Untersuchungen zu Abrasion im Wasserbau ergänzt (Haroske 2000, Helbig et al. 2005, Helbig & Horlacher 2007, Helbig et al. 2009).

6 Methodik

In der ersten Forschungsarbeit erfolgt in großskaligen Laborversuchen eine systematische Untersuchung der Parameter Durchfluss, Sedimentfracht, Längsgefälle, Fortbewegungsart des Sediments und Abrasionstiefe der Stollensohle. Die Versuchsrinne hat eine Länge von 14 m und ist 0.30 m breit (Abbildung 3). Der maximale Durchfluss im Modell beträgt 250 l/s, die Rinne kann zwischen 1 und 4% geneigt werden. Die Sedimentfracht wird in einem Bereich von 10 bis 1000 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 (vgl. Auel & Boes 2011a). Die Sohle des Stollens wird mittels eines spröden Sand-Zementgemisches simuliert. Ähnliche Versuche wurden im Rahmen von flussmorphologischen Fragenstel-

lungen von *Finnegan et al.* (2007) und *Johnson & Whipple* (2007, 2010) durchgeführt.

In einer ersten Versuchsreihe werden die Turbulenzcharakteristika des schießenden Abflusses in der Versuchsrinne bei verschiedenen Froude-Zahlen sowie die Fortbewegungsart des Sediments mittels eines Laser-Doppler Anemometrie-Systems (LDA) bzw. eines High-Speed Kamera-Systems systematisch untersucht. Abhängig von der Größe der Sedimentfracht, dem Längsgefälle und dem Durchfluss erfolgt die Fortbewegung des Sedimentkorns hüpfend, rollend oder gleitend. In einer zweiten Versuchsreihe wird die Abrasion der Stollensohle bei variierenden Durchflüssen, Längsgefällen und Sedimentfrachten untersucht und die möglichst optimale Konfiguration eruiert.

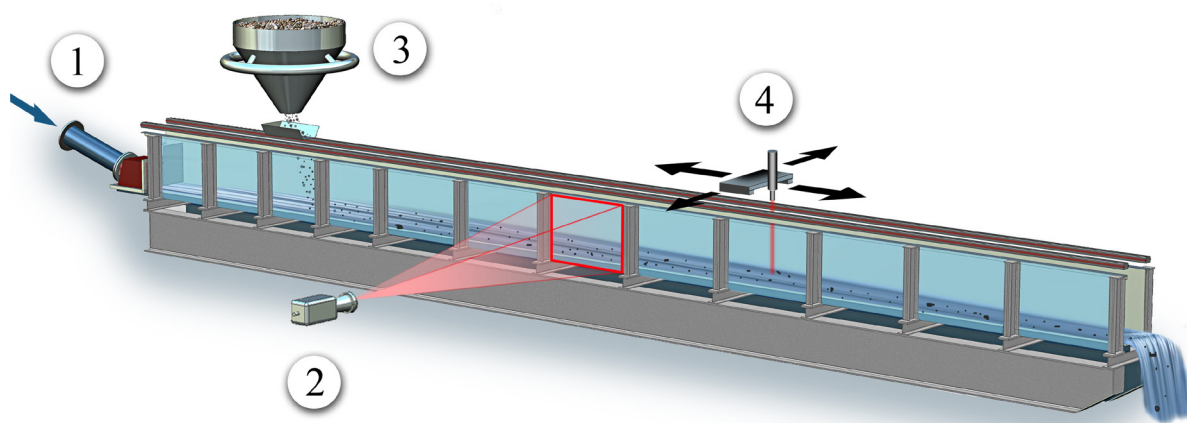


Abbildung 3: Schema des hydraulischen Modells. Fließrichtung von links nach rechts. 1) Einlauf mit max. 250 l/s. 2) High-Speed Kamera System, 3) Sedimentdosiermaschine, 4) Distanzlaser.

Die Prototypversuche am Sedimentumleitstollen in Solis laufen über vier Jahre, um möglichst aussagekräftige Resultate zu erhalten. Zur Minimierung sekundärer Strömungseffekte werden die sechs Testfelder am Ende eines geraden Stollenabschnitts vor der Rechtskurve eingebaut (Abbildung 4).

Vier verschiedene hochfeste Spezialbetone, sowie Basalt- und Stahlplatten bilden die Auskleidungsmaterialien. Zusammen mit dem im übrigen Stollen eingebauten, hochfesten Beton können somit sieben verschiedene Materialien auf ihre Widerstandsfähigkeit untersucht werden. Neben Pegel- und Abflussmessungen wird zur Ermittlung der Beanspruchung auch der Sedimenttransport mittels einer Geophonanlage überwacht (*Rickenmann & Fritschi* 2010, *Auel & Boes* 2011b).

Nach jedem Ereignis wird die Sohlenoberfläche mittels Laserscanner vermessen, die Abrasion quantifiziert und in Relation zur Beanspruchung gesetzt.

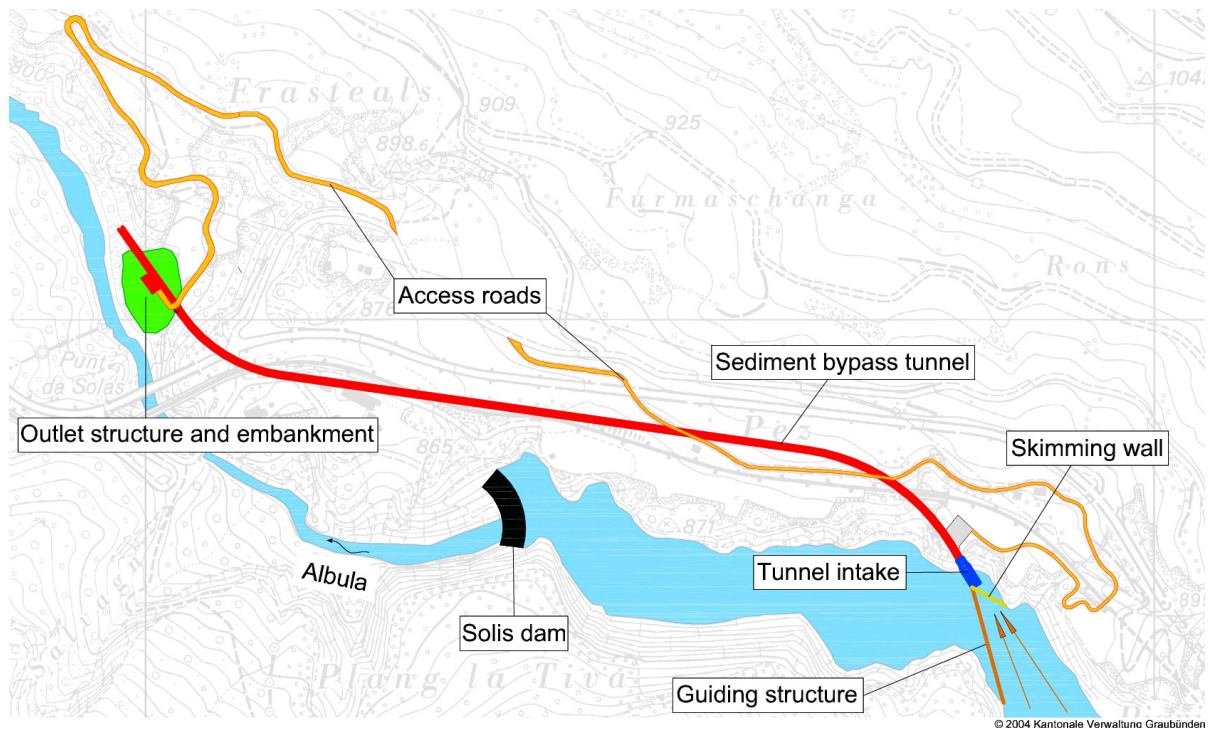


Abbildung 4: Situation des Sedimentumleitstollen Solis (Auel et al. 2011).

7 Ausblick

Die hydraulischen Modellversuche der ersten Forschungsarbeit werden im Jahr 2012 bis einschließlich in das Frühjahr des Jahres 2013 durchgeführt. Resultate der einzelnen Versuchsreihen werden zeitnah publiziert.

Der Sedimentumleitstollen Solis befindet sich derzeit noch im Bau. Der Abschluss der Bauarbeiten ist bis Juni 2012 geplant. Die Testfelder und Messinstrumente werden im Frühjahr 2012 eingebaut. Während der von Mai bis September dauernden Hochwasserphase wird der Stollen voraussichtlich ein erstes Mal betrieben werden. Erste Auswertungen und Ergebnisse werden gegen Ende 2012 erwartet. Zu Beginn der Versuchskampagne werden kleine Abrasionsraten unter einem Millimeter erwartet. Es ist daher möglich, dass aussagekräftige Ergebnisse erst gegen Ende der Forschungsarbeit vorliegen.

8 Literatur

- Auel, C.; Berchtold, T.; Boes, R. (2010a). Entlandung des Stausees Solis mittels Geschiebeumleitstollen. *Wasserwirtschaft*, Heft 4/2010. S. 117-119; ebenfalls publiziert in Proc. 15. Deutsches Talsperrensymposium, Mitteilung 158, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen: 1-7.
- Auel, C.; Berchtold, T.; Boes, R. (2010b). Sediment Management in the Solis Reservoir Using a Bypass Tunnel. Proc. of the 8th ICOLD European Club Symposium, Verlag der Technischen Universität Graz, Innsbruck, Austria: 438-443.
- Auel, C.; Boes, R. (2011a). Sediment bypass tunnel design – review and outlook. Proc. 79th Annual Meeting of ICOLD "Dams and Reservoirs under Changing Challenges". Lucerne, Switzerland. Taylor & Francis, London: 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. *Hydropower and Dams*. 18(3). Aqua-Media International Ltd: 62-66.
- 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).
- Haroske, G. (2000). Hydroabrasionsverschleiss von Betonoberflächen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Beuth, Berlin.
- Helbig, U.; Horlacher, H.-B.; Schmutterer, C.; Engler, T. (2005). Möglichkeiten der Festigkeit abrasionsbeanspruchter Betonoberflächen bei wasserbaulichen Anlagen. *Bautechnik* 82, Heft 12: 869-877.
- Helbig, U. & Horlacher, H.-B. (2007). Ein Approximationsverfahren zur rechnerischen Bestimmung des Hydroabrasionsverschleisses an überströmten Betonoberflächen. *Bautechnik* 84, Heft 12: 854-861.
- Helbig, U., Horlacher, H.-B. & Stamm, J. (2009). Auswirkungen der Hydroabrasion auf die Oberflächenrauheit überströmter Betonoberflächen. *Bautechnik* 86, Heft 4: 11-219.
- Jacobs, F.; Winkler, K.; Hunkeler, F.; Volkart, P. (2001). Betonabrasion im Wasserbau. VAW-Mitteilung Nr. 168, Herausgeber: H.-E. Minor, ETH Zürich.
- Johnson, J.P.; Whipple, K.X. (2007). Feedbacks between erosion and sediment transport in experimental bedrock channels. *Earth Surface Processes And Landforms* 32(7): 1048-1062.
- 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.
- Kantoush, S.; Sumi, T. (2010). River morphology and sediment management strategies for sustainable reservoir in Japan and Switzerland. *Annuals of Disaster Prevention Research Institute*, No. 53 B. Kyoto, Japan.
- KOHS (2007). Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. *Wasser Energie Luft*, 99. Jahrgang, Heft 1: 55-60.

- Oertli, C. (2009). Entlandung des Stausees Solis durch einen Geschiebeumleitstollen. *Wasser Energie Luft*, 101. Jahrgang, Heft 1: 5-9.
- Rickenmann, D.; Fritschi, B. (2010). Bedload transport measurements using Piezoelectric impact sensors and geophones. In *Bedload Surrogate Monitoring Techniques*. Gray JR, Laronne JB, Marr JD (eds). USGS Scientific Investigation Report.
- Schleiss, A.; Oehy, C. (2002). Verlandung von Stauseen und Nachhaltigkeit. *Wasser, Energie, Luft*, 94(7/8): 227-234.
- Sumi, T.; Okano, M.; Takata, Y. (2004). Reservoir sedimentation management with bypass tunnels in Japan. *Proc. 9th International Symposium on River Sedimentation*, Yi-chang, China: 1036-1043.
- 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.
- Vogel, M.; Müller, H. (2009). Hydroabrasivverschleiss bei wasserbaulichen Anlagen. *BAW Kolloquium Baustoffe und Bauausführung im Verkehrswasserbau*. Bundesamt für Wasserbau, Karlsruhe.
- Werder, M.A.; Bauder, A.; Funk, M.; Keusen, H.-R. (2010). Hazard assessment investigations in connection with the formation of a lake on the tongue of Unterer Grindelwaldgletscher, Bernese Alps, Switzerland. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10: 227-237.

Autoren:

MSc ETH Bau-Ing. Michelle Hagmann
Dipl. Ing. Christian Auel
Dr. Ismail Albayrak
Prof. Dr. Robert M. Boes

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

Tel.: +41 44 632 41 55
Fax: +41 44 632 11 92
E-Mail: hagmann@vaw.baug.ethz.ch
ael@vaw.baug.ethz.ch
albayrak@vaw.baug.ethz.ch
boes@vaw.baug.ethz.ch