



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung

Schlussbericht 15.12.2017

Optimierung verschleissfester Materialien an Sedimentumleitstollen und wasserbaulichen Anlagen (Teil II)



ETH zürich



Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie

Datum: 15.12.2017

Ort: Bern

Auftraggeberin:

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

Auftragnehmerin:

ETH Zürich
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)
Hönggerberggring 26
CH-8093 Zürich
www.vaw.ethz.ch

Autoren:

Michelle Müller-Hagmann, ETH Zürich, mueller-hagmann@vaw.baug.ethz.ch
Dr. Ismail Albayrak, ETH Zürich, albayrak@vaw.baug.ethz.ch
Prof. Dr. Robert Boes, ETH Zürich, boes@vaw.baug.ethz.ch

BFE-Bereichsleitung:	Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung:	Dr. Klaus Jorde, klaus.jorde@kjconsult.net
BFE-Vertragsnummer:	SI/500731-02

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

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Zur nachhaltigen Bewirtschaftung von Stauanlagen ist ein umfassendes Sedimentmanagement erforderlich. Sedimentumleitstollen (*Sediment Bypass Tunnels* = SBTs) leiten Sedimente um die Sperre herum in den Unterlauf des Gewässers ab, stellen damit die vormals gestörte Sedimentdurchgängigkeit an Stauanlagen wieder her und stellen damit eine effiziente und ganzheitliche Massnahme gegen Stauräumverlandung dar. Dabei können aber aufgrund der hohen Fliessgeschwindigkeiten und Sedimenttransportraten Hydroabrasionsschäden an der SBT-Sohle auftreten und hohe Unterhaltskosten verursachen. Zur Optimierung des SBT-Betriebs hinsichtlich Beanspruchungsregime und Umleiteffizienz ist eine Echtzeitüberwachung der hydraulischen Betriebsbedingungen und des Sedimenttransports erforderlich. Der Geschiebetransport kann mittels einer Geophonanlage überwacht werden. Im SBT Solis wurde eine solche Anlage eingebaut und basierend auf Labor- und Feldversuchen kalibriert. Diese Studie konzentriert sich auf Letztere und analysiert die Ergebnisse beider Kalibrierungen. Die Feldkalibrierung umfasste drei Versuche mit zwei unterschiedlichen, uniformen Sedimentproben und einer Sedimentmischung. Da die Geschiebetransportrate während dieser Versuche diejenigen während des normalen SBT-Betriebs um eine bis zwei Grössenordnungen übertraf, wurde die Kalibrierung basierend auf den Ergebnissen der Laborversuche angepasst. Die schlussendlich resultierende Kalibrierung wurde verwendet, um die vom SBT Solis umgeleiteten Geschiebemengen zu quantifizieren.

Résumé

Une gestion globale des sédiments est nécessaire pour une utilisation durable des réservoirs. Les tunnels de dérivation des sédiments (*sediment bypass tunnels* = SBTs) détournent les flux chargés de sédiments autour du barrage, rétablissant ainsi la continuité des sédiments précédemment perturbée et représentant donc une mesure efficace et holistique contre la sédimentation des réservoirs. Cependant, des dommages d'hydroabrasion au radier de la SBT peuvent se produire et entraîner des travaux de réhabilitation coûteux. Afin d'optimiser le fonctionnement de la SBT en ce qui concerne le régime d'exploitation et l'efficacité du bypass, une surveillance en temps réel des conditions hydrauliques et du transport des sédiments est nécessaire. Le transport de sédiments peut être surveillé au moyen d'un système de géophone. Dans la SBT Solis, un tel dispositif a été installé et calibré sur la base d'essais en laboratoire et sur le champ. L'étalonnage sur site a impliqué trois essais avec deux distributions de la taille de grains uniformes différentes ainsi qu'un mélange de sédiments. Comme les taux de charge de sédiment au cours de ces essais ont été supérieurs d'un à deux ordres de grandeur à ceux des exploitations de SBT normales, l'étalonnage a été ajustée sur la base des résultats des tests de laboratoire. Enfin, l'étalonnage final a été utilisé pour quantifier les charges de sédiments déviées par la SBT Solis.

Abstract

A comprehensive sediment management is required for a sustainable use of reservoirs. Sediment bypass tunnels (SBTs) are an effective and holistic countermeasure against reservoir sedimentation. They convey sediment-laden flows around the dam, thus restoring the previously disturbed sediment continuity. However, high-speed sediment-laden flows in SBTs can cause hydroabrasive damages at the



tunnel inverts resulting in expensive refurbishment works. To optimize the SBT operation with regard to hydroabrasive impact and bypass efficiency, real-time monitoring of the hydraulic and sediment transport conditions is necessary. The bedload transport can be monitored by means of a Swiss Plate Geophone System (SPGS). In the Solis SBT such a device was installed and calibrated based on laboratory and field tests. The present study focuses on the latter and analyzes the results from both calibration tests. The field calibration involved three tests with two different uniform grain size distributions and one sediment mixture. As the bedload transport rates during the tests exceeded those for normal SBT operation by one to two orders of magnitude, the calibration was adapted based on the results of the laboratory calibration. Finally, the obtained calibration was used to quantify the bedload mass conveyed through the Solis SBT.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Abstract	3
1. Ausgangslage.....	6
2. Ziel der Arbeit	6
3. Vorgehen und Methode	7
3.1. Swiss Plate Geophone System.....	7
3.2. Sedimentproben.....	8
3.3. Versuchsablauf	9
4. Ergebnisse	10
5. Schlussfolgerungen und Ausblick.....	13
6. Referenzen	14
7. Anhang	15



1. Ausgangslage

Stauanlagen stellen wichtige Ressourcen bezüglich Energiegewinnung, Wasserversorgung und Hochwasserschutz dar. Vor dem Hintergrund des angestrebten Atomausstiegs, des prognostizierten Bevölkerungswachstums und der erwarteten Zunahme von Wetterextremen in der Schweiz gewinnen Stauanlagen zusätzlich an Bedeutung. Durch den stetigen Sedimenteintrag verlanden die Reservoirs aber zusehends und können im Extremfall sogar ein Sicherheitsrisiko darstellen.

Für den sicheren und nachhaltigen Betrieb von Wasserkraftanlagen ist ein situationsspezifisches Sedimentmanagement von zentraler Bedeutung (Boes *et al.* 2014, Kondolf *et al.* 2014). Sedimentumleitstollen (*Sediment Bypass Tunnels* = SBTs) können dabei ein wichtiges Instrument zur Verhinderung der Stauraumverlandung sein. Sie leiten Sedimente um die Sperre herum in den Unterlauf des Gewässers, stellen damit die vormals gestörte Sedimentdurchgängigkeit wieder her und reduzieren die Stauraumverlandung (Sumi *et al.* 2004). Das Sedimentdefizit im Unterlauf und die damit einhergehenden Probleme, wie Erosion, Verarmung der Morphologie und Reduktion der Habitatqualität bis hin zu Nährstoff- und Sedimentdefiziten in Küstenregionen, werden so gemindert (Syvitski *et al.* 2005, Kantoush and Sumi 2010, Fukuda *et al.* 2012, Fukuroi 2012, Kondolf *et al.* 2014, Facchini *et al.* 2015, Martin *et al.* 2015). Aufgrund der extremen Betriebsbedingungen im SBT mit hohen Fließgeschwindigkeiten und Sedimenttransportraten können allerdings massive Hydroabrasionsschäden an der SBT-Sohle auftreten und hohe Kosten für den Unterhalt verursachen.

Um den Betrieb von SBTs hinsichtlich Umleiteffizienz und Sohlabrasion zu optimieren, ist eine Echtzeitüberwachung nicht nur der hydraulischen Größen, sondern auch des Sedimenttransports erforderlich. Die Erfassung und Quantifizierung des Geschiebetransports stellt dabei die grösste Herausforderung dar. Geophonanlagen stellen hierfür ein geeignetes Mittel dar. Allerdings ist deren Kalibrierung sowie die Auswertung der Messdaten mit grösseren Unsicherheiten verbunden und nach wie vor Gegenstand laufender Forschung.

2. Ziel der Arbeit

Das primäre Ziel des vorliegenden Projektes liegt in der Kalibrierung der im SBT Solis eingebauten Geophonanlage vom Typ des *Swiss Plate Geophone System* (SPGS) sowie der Beurteilung der Kalibrierung aus systematischen Laborversuchen an der VAW. Damit können die durchgeleiteten Geschiebemengen und –korngrossen während des SBT-Betriebes kontinuierlich und in Echtzeit überwacht werden. Eine Quantifizierung der Geschiebevolumina und –korngrossen ist zudem zusammen mit der Bestimmung der auftretenden Hydroabrasionsschäden für die Weiterentwicklung von Abrasionsmodellen von grossem Nutzen. Schliesslich sollen die hiermit erarbeiteten Ergebnisse dazu beitragen, SBTs nicht nur hinsichtlich Umleiteffizienz, sondern auch hinsichtlich Hydroabrasionsschäden zu optimieren.

Die Technologie der Geophone ist standortspezifisch und verlangt nach individueller Kalibrierung. Daher können die hierin gewonnenen Erkenntnisse nicht vorbehaltlos auf andere Anlagen übertragen werden, jedoch als Grundlage oder zur Plausibilitätsüberprüfung für andere Anlagen dienen.

3. Vorgehen und Methode

Der Versuchsaufbau und die Methodik wurden in den Vorjahresberichten dieses Projektes, sowie im Schlussbericht eines weiteren BFE-Forschungsprojektes („Optimierung verschleissresistenter Materialien an Sedimentumleitstollen und wasserbaulicher Anlagen (Teil I)“, SI/500731-01) beschrieben. In diesem Bericht liegt der Fokus darauf auf der Technologie des SPGS sowie dem Setup der Feldkalibrierungsversuche.

3.1. Swiss Plate Geophone System

Das SPGS ist ein robustes Gerät, welches typischerweise zur Überwachung des Geschiebetransports in Gebirgsflüssen mit Fliessgeschwindigkeiten bis zu 6.5 m/s und Abflusstiefen von einigen Dezimetern eingesetzt wird. Es besteht aus elastisch gelagerten Stahlplatten ($L \times B \times H = 36 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$), an deren Unterseite Geophonsensoren (GS-20DX, hergestellt von „Geospace Technologies“, Houston, Texas) angebracht sind (Abbildung 1a). Diese Sensoren erfassen die bei der Überströmung der Platten durch Partikelaufläufe induzierten Vibrationen, geben diese als Spannung aus und ermöglichen so eine kontinuierliche indirekte Erfassung des Geschiebetransportes (Abbildung 1b). Indirekt bedeutet, dass aus den erhaltenen Spannungssignalen nicht ohne Weiteres auf die Geschiebefracht geschlossen werden kann, sondern für eine Umrechnung eine Kalibrierung mit anderen, meist direkten Methoden zur Geschiebeerfassung (z.B. mittels Fangkörben oder Absetzvolumina an Rückhaltebecken) erforderlich ist. Um Hintergrundrauschen und Vibrationen, die durch das fließende Wasser erzeugt werden, herauszufiltern, wurde ein Signalschwellwert (*threshold*) von 0.1 V in Übereinstimmung mit anderen Anwendungen definiert (Rickenmann *et al.* 2013, Chiari *et al.* 2016, Wyss 2016). Die entsprechende Detektionsgrenze liegt bei einer Korngrösse von $d = 20\text{--}30 \text{ mm}$.

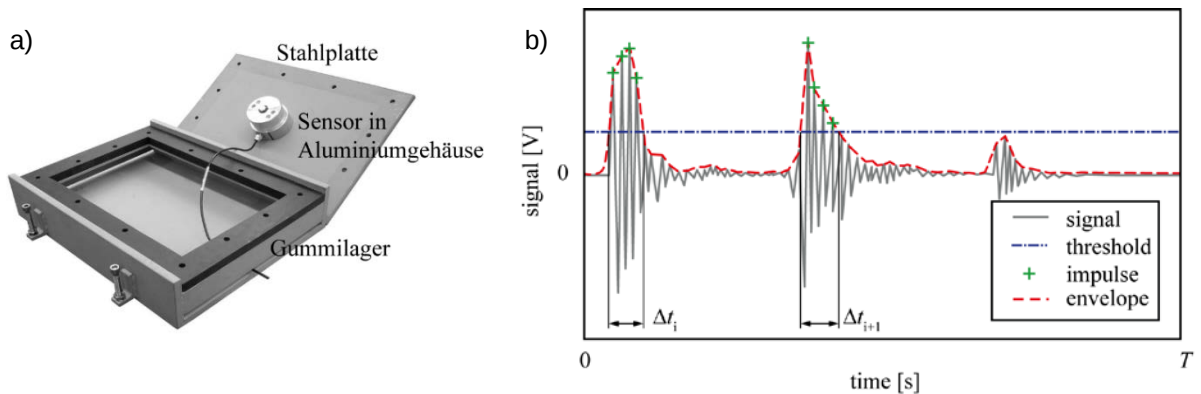


Abbildung 1: Geophoneinheit (a) und schematische Darstellung des Geophonsignals (b)

Überschreitet die Signalamplitude den Signalschwellwert, entspricht dies einem Impuls (Imp). Zwischen der Anzahl Impulse und der Geschiebemasse m besteht ein linearer Zusammenhang (Rickenmann *et al.* 2013). Der entsprechende Geschiebekoeffizient K_b folgt zu

$$K_b = \frac{\text{Imp}}{m} \quad (1)$$

Dieser Koeffizient hängt allerdings stark von der Anlagenkonstruktion, den Sedimenteigenschaften und den hydraulischen Betriebsbedingungen ab (Morach 2011, Rickenmann *et al.* 2013). Darum erfordert



diese Messtechnik eine standortspezifische Kalibrierung, welche idealerweise am Prototypen stattfindet, weil die realen Strömungsprozesse nur annäherungsweise im Labor nachgebildet werden können (Wyss 2016).

Um aus dem Signal zusätzlich Informationen zur Korngrößenverteilung zu extrahieren, führte Wyss (2016) die *Amplitude-Class-Method* ein (*AC-Method*). Diese Methode basiert auf dem Umstand, dass die Amplitude generell mit zunehmender Korngrösse zunimmt. Durch die Einführung mehrerer korngrößenabhängiger Signalschwellenwerte kann so die Geschiebefracht fraktionsweise bestimmt und eine Kornverteilungskurve erstellt werden.

Zur Erfassung des Geschiebetransports wurde im SBT Solis eine aus acht Messeinheiten bestehende Geophonanlage vom Typ SPGS eingebaut. Das SPGS wurde statt wie bisher üblich eben zur Sohle mit einer Neigung von 10° gegen die Fliessrichtung eingebaut, um die Detektionsrate unter den hohen Fliessgeschwindigkeiten von $U \sim 11$ m/s zu erhöhen (Morach 2011). Die Anlage wurde basierend auf Laborversuchen bei einer Fliessgeschwindigkeit von $U = 3$ m/s kalibriert, um kostenintensive und aufwändige Feldkalibrierungen zu vermeiden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 als „*Solis Lab*“ dargestellt. Für die Sedimente in Solis resultierte ein Geschiebekoeffizient von $K_b(U = 3 \text{ m/s}) = 10.1 \text{ 1/kg}$. Allerdings limitierte die Durchflusskapazität in den Versuchen im Laborgerinne das Untersuchungsfeld bezüglich den hydraulischen Bedingungen. Der erhaltene Geschiebekoeffizient wurde darum entsprechend den im SBT Solis herrschenden Fliessgeschwindigkeiten extrapoliert und zu $K_b(U = 11 \text{ m/s}) = 1.34 \text{ 1/kg}$ (Abbildung 6: „*Solis extrapolated*“) festgelegt. Die damit abgeschätzten Geschiebefrachten im SBT Solis lagen deutlich unter den auf physikalischen Modellversuchen basierenden Erwartungswerten (VAW 2010), so dass Zweifel an der Anwendbarkeit der Laborkalibrierung aufkamen. Deshalb wurde die Anlage im Rahmen dieses Teilprojekts zusätzlich mittels Feldversuchen kalibriert.

3.2. Sedimentproben

Um den Einfluss der Sedimenteigenschaften und der Partikelform zu berücksichtigen, aber auch aus ökonomischen und ökologischen Gründen (Transportdistanzen), wurde für die Versuche Material vom *Kieswerk Albula* in Tiefencastel verwendet. Das Kieswerk liegt an der Stauwurzel des Sees und fördert somit das identische Material, das durch den SBT abgeleitet wird. Insgesamt wurden drei Versuche mit jeweils 10 m^3 Sediment durchgeführt - zwei uniforme Proben und eine Sedimentmischung. Die entsprechenden Sieblinien der drei Proben sowie der Sedimente in Solis („*Solis nat.*“) sind in Abbildung 2 dargestellt. Die mittleren Korndurchmesser der drei Sedimentproben betragen $d_m = 25 \text{ mm}$, 45 mm und 210 mm .

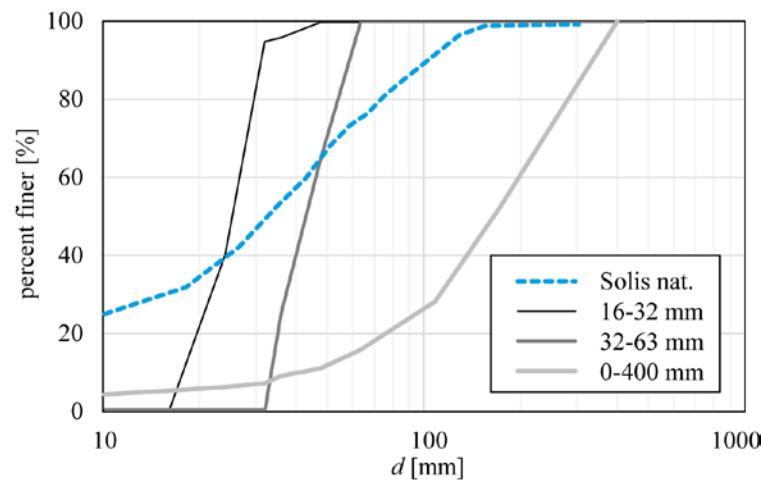


Abbildung 2: Sieblinien der Sedimentproben und der Sedimente in Solis

Damit sich möglichst realitätsnahe Sedimenttransportprozesse einstellen konnten, wurden die Sedimente am oberen Ende des SBT, d.h. beim SBT-Einlauf, positioniert. Die Sedimente wurden mittels Seitenkipper rückwärts rund 1 km vom Zufahrtstor beim Auslauf bis zum Einlauf des SBT transportiert, dort abgeladen und mit einem Bagger verteilt (Abbildung 3a und b). Um unerwünschte Abflusszustände durch abrupte Querschnittsänderungen zu vermeiden, wurde der oberwasserseitige Rand des 20 cm starken Sedimentkörpers keilförmig ausgebildet (Abbildung 3c).



Abbildung 3: (a) Seitenkipper beim Entladen, (b) Bagger beim Einbau des Sedimentkörpers, (c) Sedimentkörper vor dem Versuch mit oberwasserseitiger keilförmiger Anordnung (Blick in Fliessrichtung)

3.3. Versuchsablauf

Nach erfolgreichem Sedimenteinsatz wurde der SBT in Betrieb genommen. Dabei wurde der Sedimentkörper durch das eintretende Wasser erodiert und durch den SBT abgeführt. Sobald alle Sedimente das SPGS passiert hatten, wurde das Einlaufschütz des SBT wieder geschlossen. Dieser Vorgang wurde insgesamt dreimal, d.h. für jede Sedimentprobe einmal, durchgeführt.

Der Abfluss während der Versuche sollte möglichst dem normalen Betriebszustand des Stollens entsprechen, wobei aus wirtschaftlichen Gründen (Wasser- bzw. Produktionsverluste) ein Absinken des Seepiegels zu verhindern war. Zusammen mit den Betreibern der Kraftwerksanlage, dem *ewz Kraftwerke Mittelbünden*, hat man schliesslich einen Kompromiss bei einem Abfluss von $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ gefunden. Die für die Geophonmessung massgebenden Parameter wie Fliessgeschwindigkeit U und relative Kornüberdeckung h/d im SBT beim Geophon liegen damit für den Versuch und den Normalbetrieb in einem vergleichbaren Bereich (Tabelle 1).

Tabelle 1: Betriebsbedingungen im SBT Solis während Normalbetrieb und Feldkalibrierungs-Versuchen

	Normalbetrieb	Feldkalibrierung
Q [m ³ /s]	90 - 170	50
h [m]	2 - 3.6	1.16
U [m/s]	10.5 - 10.8	9.8
d [mm]	0 - 200	0 - 400
h/d [-]	10 - 100	3 - 40

4. Ergebnisse

Während der Feldkalibrierungsversuche wurden deutliche Konzentrationen des Geschiebetransports auf der rechten Stollen Seite beobachtet und durch die Geophonmessungen bestätigt (Abbildung 4a und b). Dies deutet auf ausgeprägte Effekte der oberstrom liegenden Stollenkurve auf die laterale Verteilung des Geschiebetransports hin. Die Geschiebekonzentrationen sind vergleichbar mit denjenigen bei normalem SBT-Betrieb und bestätigen, dass bei den Kalibrierungsversuchen realitätsnahe Transportcharakteristiken reproduziert werden konnten.

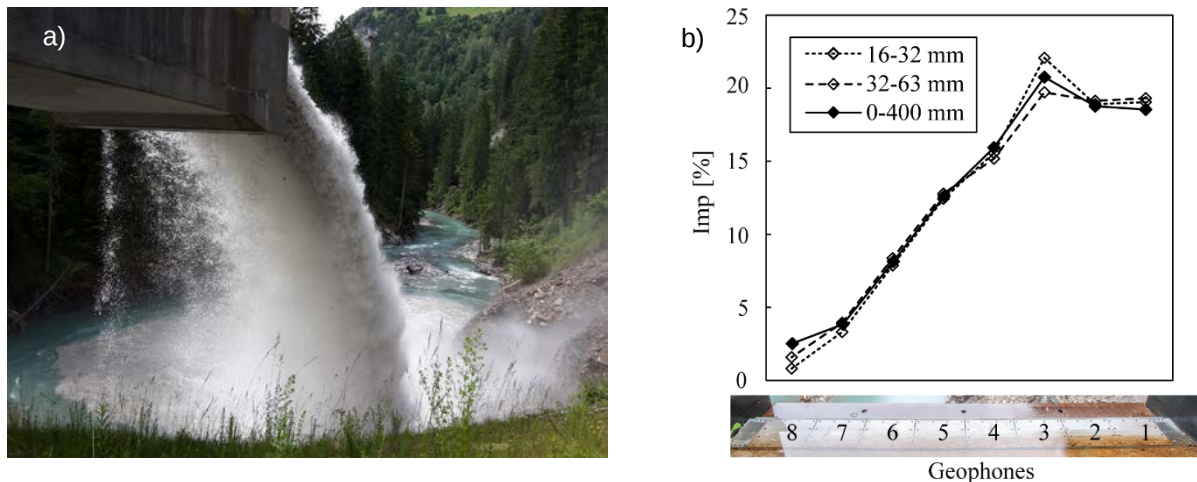


Abbildung 4: (a) Geschiebetransportkonzentration auf der rechten Seite beim Auslauf des SBT Solis während eines Feldkalibrierungsversuches, (b) Laterale Verteilung des Geschiebetransportes bei den drei Feldkalibrierungsversuchen

Die Geschiebekoeffizienten für jeden einzelnen Versuch der Feldkalibrierung („Solis SBT“) sind zusammen mit den Resultaten der Laborkalibrierung („Solis Lab.“) sowie einer früheren Laborstudie (Morach 2011) in Abbildung 5 als Funktion der Korngrösse dargestellt. Alle Versuche wurden mit einer Geophonneigung von 10° durchgeführt. Trotz unterschiedlicher Testbedingungen liegen die Resultate grundsätzlich in einem vergleichbaren Bereich und zeigen einen deutlichen Einfluss der Korngrösse. Die Detektionsgrenze liegt zwischen 22 und 36 mm. Mit zunehmender Korngrösse nimmt die Aufprallenergie der Geschiebekörner zu und führt so zu einem Anstieg von K_b . Bei einer weiteren Zunahme der

Korngrösse wechselt der Transportmodus der Geschiebekörner von „springend“ zu „rollend“ und „gleitend“, wodurch beim Kontakt mit der Geophonplatte weniger Energie übertragen wird und die K_b -Werte entsprechend absinken.

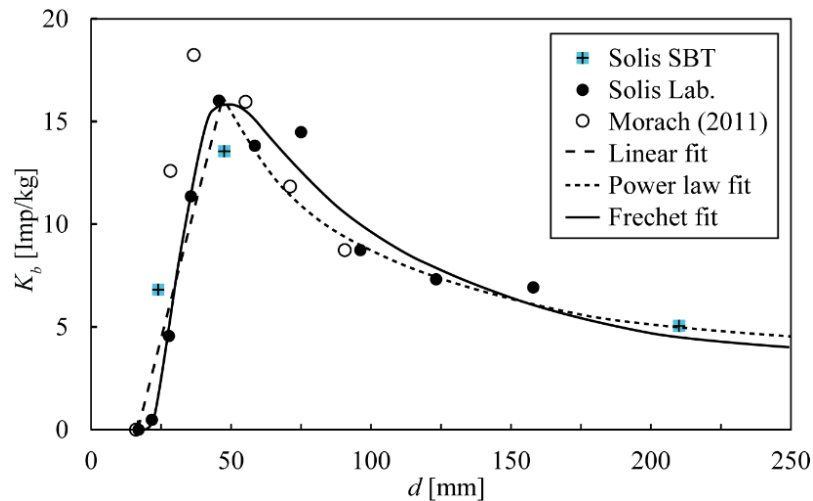


Abbildung 5: Geschiebekoeffizient in Abhängigkeit von d mit biomodaler sowie Frechet Annäherung

Die Daten der Feldkalibrierung wurden durch einen bi-modalen (linear aufsteigender und exponentiell abfallender Ast) sowie einen *Frechet Fit* angenähert. Basierend auf der Sieblinie für Solis („Solis nat.“ in Abbildung 2) wurde anschliessend ein mittlerer Geschiebekoeffizient von $K_b = 10.2 \text{ 1/kg}$ ermittelt. Dieser Wert stimmt in etwa mit den Ergebnissen der nicht extrapolierten Laborkalibrierung überein („Solis Lab“ in Abbildung 6). Abbildung 6 zeigt K_b als Funktion der mittleren Fliessgeschwindigkeit für die Labor- und Feldkalibrierungsversuche sowie für Literaturdaten (Morach 2011, Rickenmann *et al.* 2013). Während für die ebene Installation ($= 0^\circ$) K_b mit zunehmender Fliessgeschwindigkeit sinkt, lässt sich für den geneigten Einbau ($= 10^\circ$ gegen Fliessrichtung) keine Tendenz ausmachen (Abbildung 6). Dies deutet darauf hin, dass die fliessgeschwindigkeitsabhängige Kalibrierung (Abbildung 6, „Solis extrapolated“), wie sie in Kapitel 3.1 durchgeführt worden ist, durch die Neigung des Geophons um 10° gegen die Fliessrichtung hinfällig wird, und bestätigt das übereinstimmende Resultat der Labor- und Feldkalibrierung.

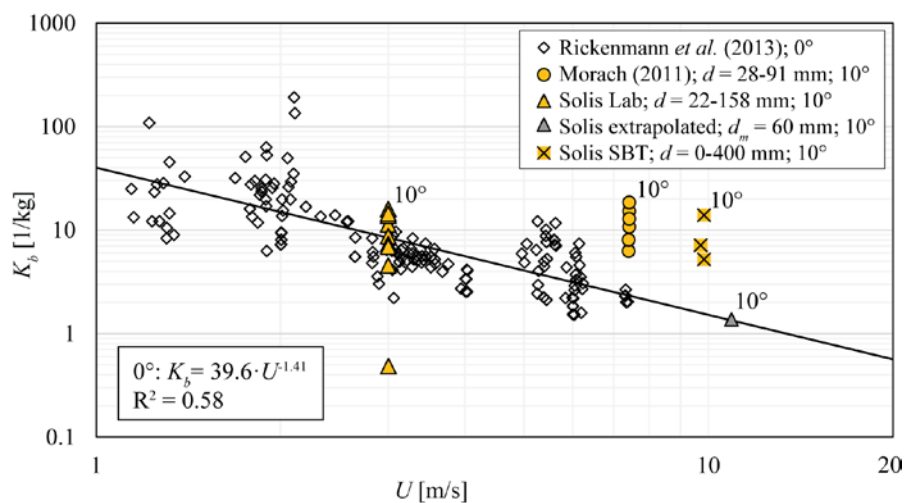


Abbildung 6: K_b als Funktion der Fliessgeschwindigkeit für unterschiedliche Geophonneigungen und Korngrössen

Jüngste Untersuchungen haben gezeigt, dass bei hohen Geschiebetransportraten eine Tendenz zur Signalsättigung auftritt (Wyss 2016, Koshiba *et al.* 2017). Wyss führte dazu den z_p -Wert ein. Er gibt an, wie lange die Signalumhüllende (*envelope*) den Detektionsgrenzwert überschreitet (Abbildung 1b):

$$z_p = \frac{\sum \Delta t_i}{T} \quad (2)$$

Da die mittleren z_p -Werte im Kalibrierungsversuch mit bis zu 0.3 die Werte für den Normalbetrieb um eine bis zwei Grössenordnungen übertrafen, muss der Geschiebekoeffizient entsprechend angepasst werden. Hierzu wurden die Ergebnisse aus den Labor- und Feldversuchen beigezogen. Trotz beachtlicher Streuung aufgrund des Korngrösseneffekts folgt der Trend:

$$K_b' = 0.60 \cdot K_b \cdot z_p^{-0.11} \quad (3)$$

mit einer Standardabweichung von $\pm\sigma = \pm 4.19$ 1/kg. Diese Formel dient zur Kalibrierung des SPGS im SBT Solis unter Berücksichtigung der Korngrössen und Signalsättigung. Zur Bestimmung der Geschiebetransportraten im SBT Solis wurde zunächst die Korngrössenverteilung mittels *AC-Method* bestimmt (Kapitel 3.1) und der entsprechende mittlere Geschiebekoeffizient K_b unter Berücksichtigung der Korngrössenverteilung berechnet. Mit diesem und dem Sättigungsgrad z_p wurde anschliessend der K_b' -Wert nach Gl. (3) bestimmt. Durch Integration der Geschiebetransportrate über die Zeit wurde schliesslich die Geschiebemenge für jeden SBT-Betrieb ermittelt. Weiterführende und detailliertere Angaben zu Auswertung und Resultaten können Albayrak *et al.* (2017), Mueller-Hagmann *et al.* (2017) und Müller-Hagmann (2017) entnommen werden.

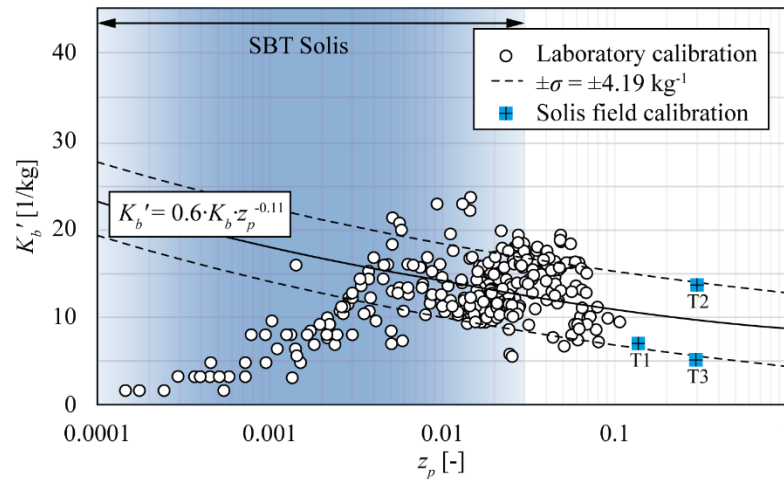


Abbildung 7: Geschiebekoeffizienten in Abhängigkeit von z_p für die Labor- wie auch Feldkalibrierungsversuche

Seit der Inbetriebnahme in 2012 war der SBT Solis neunmal in Betrieb und leitete im Mittel 200 m^3 Geschiebe (mit $d \geq 22 \text{ mm}$) um. Die Korngrössenverteilung des abgeführten Geschiebes war dabei signifikant feiner als ursprünglich angenommen. Das Resultat einer vereinfachten numerischen 1D-Geschiebetransport-Simulationen zeigte, dass die Geschiebetransportkapazität durch den Einstau beim SBT-Einlauf stark reduziert wurde. Folglich sanken Geschiebetransportrate und Korngrösse der transportierten Sedimente. Die Plausibilität dieser Ergebnisse wurde durch die geringen Abrasionen im SBT sowie der bathymetrisch bestimmten Sedimentablagerungen im Unterlauf des SBT (vergleiche Schlussbericht des BFE Projektes SI/501114-01) bestätigt.

Es ist davon auszugehen, dass sich der Verlandungskörper im Stausee Solis noch nicht im Gleichgewichtszustand befindet und es darum immer noch zu Sedimentablagerungen kommt. Dies führt zu einer relativ tiefen Umleiteffizienz. Durch die fortschreitende Annäherung des Verlandungskörpers hin zu einem neuen Gleichgewichtszustandes werden in Zukunft allerdings ein Anstieg der abgeführten Geschiebemenge sowie der Korngrössen und damit eine Steigerung der Umleiteffizienz erwartet. Weiter könnte durch ein angepasstes Betriebsregime mit tieferem Absenkziel des Stausees die Geschiebetransportkapazität im Zufluss und damit auch im SBT Solis erhöht werden.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Geophonanlage im SBT Solis wurde erfolgreich kalibriert. Die Resultate der Feldkalibrierung zeigten, dass die Laborkalibrierung realistische Resultate lieferte, obwohl die Feldbedingungen im Labor nur ansatzweise reproduziert werden konnten. Dies deutet darauf hin, dass der Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf den Geschiebekoeffizienten, wie er für die ebene Geophoninstallation beobachtet wurde, durch eine geneigte Installation deutlich reduziert oder gar unterbunden wird. Dies ist ein vielversprechendes Resultat, da somit künftig teure und aufwändige Feldkalibrierungen durch Laborkalibrierungen ersetzt werden könnten, ohne einen Genauigkeitsverlust in Kauf zu nehmen. Um diese Hypothese zu erhärten, sind allerdings weitere systematische Untersuchungen erforderlich.

Die Untersuchungen zeigten einen deutlichen Effekt der Signalsättigung auf die Kalibrierungsfunktion des Geophons. Um den Zusammenhang speziell für den Normalbetrieb des SBT verlässlich quantifizieren zu können, sind aber weitere Untersuchungen erforderlich. Dabei sollten die Geschiebetransportrate und die Korngrössenverteilung entsprechend dem typischen Anwendungsspektrum im SBT Solis variiert werden. Solche Versuche sind Bestandteile eines Anschlussprojekts (SI/501609-01, „Felduntersuchung von Hydraulik, Sedimenttransport und Hydroabrasion in Schweizer Sedimentumleitstollen“). Die gewonnenen Ergebnissen werden zu einem besseren Verständnis der SPGS-Geophonanlage beitragen und deren Anwendungsspektrum erweitern.

Durch die anlagenspezifische Kalibrierung des SPGS im SBT Solis konnten die Geschiebetransportraten sowie die Korngrössenverteilungen im SBT Solis zwischen 2012 und 2017 kontinuierlich überwacht werden. Die umgeleiteten Geschiebemengen lagen zwar unter den Erwartungen, stehen aber in einem plausiblen Verhältnis zu den baythimetrisch bestimmten Sedimentablagerungen im Unterlauf des SBT. Die geringen Abrasionen im SBT bestätigen zudem dieses Ergebnis. Da die aufgetretenen Abrasionen im Bereich der Messgenauigkeit des eingesetzten Lasers lagen, konnten die Zusammenhänge zwischen Beanspruchung, Materialeigenschaften und Abrasion bisher nicht quantifiziert und analysiert werden. Im Rahmen eines Anschlussprojektes soll darum der Beobachtungsdauer um weitere drei Jahre verlängert werden, um quantitative Analysen basierend auf gemessenen Abrasionen zu ermöglichen (SI/501609-01, „Felduntersuchung von Hydraulik, Sedimenttransport und Hydroabrasion in Schweizer Sedimentumleitstollen“).

Das vorliegende Projekt ist Bestandteil der Dissertation von M. Müller-Hagmann. Nach Abschluss der Dissertation wird diese voraussichtlich ab April 2018 in der ETH-Bibliothek sowie als VAW-Mitteilung in elektronischer Form frei zugänglich sein:

- <http://e-collection.library.ethz.ch/>
- <http://www.vaw.ethz.ch/das-institut/vaw-mitteilungen/2010-2019.html>



6. Referenzen

- Albayrak I., Mueller-Hagmann M., Boes R. M. (2017). Calibration of Swiss Plate Geophone System for bedload monitoring in a sediment bypass tunnel. *Proc. 2nd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels* (T. Sumi, ed.), paper FP16, Kyoto University, Japan.
- Boes R. M., Auel C., Hagmann M., Albayrak I. (2014). Sediment bypass tunnels to mitigate reservoir sedimentation and restore sediment continuity. *Proc. International Riverflow Conference* (A. J. Schleiss et al., eds.), Lausanne, Switzerland: 221-228.
- Chiari M., Berkold M., Jäger G., Hübel J. (2016). *Geschiebemesstelle im Suggadinbach (Vorarlberg)* ('Bedload monitoring station at Suggadinbach (Vorarlberg)'). Feststofftransport und Sedimentmanagement (Sediment transport and sediment management). *Verien der Diplomingenieure der Wildbach und Lawinenverbauung Österreichs*: 50-58.
- Facchini A., Siviglia A., Boes R. M. (2015). Downstream morphological impact of a sediment bypass tunnel - preliminary results and forthcoming actions. *Proc. First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zurich, Switzerland: 137-146.
- Fukuda T., Yamashita K., Osada K., Fukuoka S. (2012). Study on flushing mechanism of dam reservoir sedimentation and recovery of riffle-pool in downstream reach by a flushing bypass tunnel. *Proc. International Symposium on Dams for a changing World*, Kyoto, Japan.
- Fukuroi H. (2012). Damage from typhoon talas to civil engineering structures for hydropower and the effect of the sediment bypass system at Asahi dam. *Proc. International Symposium on Dams for a changing world*, Kyoto.
- Kantoush S. A., Sumi T. (2010). River morphology and sediment management strategies for sustainable reservoir in Japan and European Alps. *Annals of Disaster Prevention Research Institute*
- Kondolf G. M., Gao Y., Annandale G. W., Morris G. L., Jiang E., Zhang J., Cao Y., Carling P., Fu K., Guo Q., Hotchkiss R., Peteuli C., Sumi T., Wang H.-W., Wang Z., Wie Z., Wu B., Wu C., Yang C. T. (2014). Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future* 2 (5): 256-280. DOI: 10.1002/2013EF000184.
- Koshiba T., Auel C., Tsutsumi D., Kantoush S., Sumi T. (2017). Application of an impact plate - bedload transport measuring system for high-speed flows. *International Journal of Science and Research - Special Issue from the International Symposium on River Sedimentation* (submitted).
- Martin E. J., Doering M., Robinson C. T. (2015). Ecological effects of sediment bypass tunnels. *Proc. First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zurich, Switzerland: 147-156.
- Morach S. (2011). *Geschiebemesung mittels Geophonen bei hohen Fliessgeschwindigkeiten - Hydraulische Modellversuche* ('Bedload transport measurement at high flow velocities - hydraulic model tests'). *Master Thesis*, VAW, ETH Zurich, Switzerland (in German, unpublished).
- Mueller-Hagmann M., Albayrak I., Boes R. M. (2017). Field calibration of bedload monitoring system in a sediment bypass tunnel: Swiss plate geophone. *Proc. 37th IAHR World Congress*, Kuala Lumpur, Malaysia: 995-1004.
- Müller-Hagmann M. (2017). Hydroabrasion by high-speed sediment-laden flows in sediment bypass tunnels (tentative title). *VAW-Mitteilungen* 239 (R. Boes, ed.), also published as a Doctoral Thesis. Nr. 24291, ETH Zurich. ETH Zurich, Switzerland: (in preparation).
- Rickenmann D., Turowski J. M., Fritschi B., Wyss C., Laronne J., Barzilai R., Reid I., Kreisler A., Aigner



- J., Seitz H., Habersack H. (2013). Bedload transport measurements with impact plate geophones: comparison of sensor calibration in different gravel-bed streams. *Earth Surface Processes and Landforms* 39(7): 928-942.
- Sumi T., Okano M., Takata Y. (2004). Reservoir sedimentation management with bypass tunnels in Japan. *Proc. 9th International Symposium on River Sedimentation*, Yichang: 1036-1043.
- Syvitski J. P. M., Vörösmarty C. J., Kettner A. J., Green P. (2005). Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science* 308 (5720): 376-380. DOI: 10.1126/science. 1109454.
- VAW (2010). Geschiebumleitstollen Solis - Hydraulische Modellversuche ('Bedload bypass tunnel Solis - Hydraulic modell investigation'). *VAW Bericht* 4269, ETH Zürich, Switzerland (in German, unpublished).
- Wyss C. R. (2016). Sediment transport measurements with geophone sensors. *VAW-Mitteilungen* 234 (R. Boes, ed.), also published as a Doctoral Thesis. Nr. 23353, ETH Zurich. ETH Zurich, Switzerland.

7. Anhang

Folgendes wurde zum vorliegenden Projekt publiziert:

- Albayrak I., Mueller-Hagmann M., Boes R. M. (2017). Calibration of Swiss Plate Geophone System for bedload monitoring in a sediment bypass tunnel. *Proc. Second International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, paper FP16, Kyoto University, Japan.
- Hagmann M., Albayrak I., Boes R. M.. (2014). Untersuchung verschleissfester Materialien im Wasserbau mit einer Geschiebetransportüberwachung. *Proc. Internationales Symposium „Wasser- und Flussbau im Alpenraum“*, VAW-Mitteilungen 227 (R. Boes, ed.), ETH Zurich, Switzerland: 97-106.
- Hagmann M., Albayrak I., Boes R. M. (2015). Field research: Invert material resistance and sediment transport measurements. *Proc. First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. Boes, ed.), ETH Zurich, Switzerland: 123-136.
- Mueller-Hagmann, Albayrak I., Boes R. M. (2017). Field calibration of bedload monitoring system in a sediment bypass tunnel: Swiss plate geophone. *Proc. 37th IAHR World Congress*, Kuala Lumpur, Malaysia: 995-1004.



Calibration of Swiss Plate Geophone System for bedload monitoring in a sediment bypass tunnel

Ismail Albayrak, Michelle Mueller-Hagmann and Robert M. Boes

Abstract

Sediment bypass tunnels (SBTs) are one of the effective countermeasures against reservoir sedimentation for small to medium-sized mountainous reservoirs. They route sediment-laden flows around the dam, reduce sedimentation and improve morphology and ecology of downstream river reaches. However, high bedload transport rates in combination with high flow velocities cause severe hydroabrasion on the inverts of nearly all SBTs and hence considerable refurbishment costs. For optimized operation of SBTs with respect to sustainable sediment management and cost efficiency, continuous real-time monitoring of bedload transport is necessary. Bedload transport can be monitored indirectly by using passive sensors like geophones or hydrophones. However, these techniques require a site-specific calibration since they are affected by hydraulic conditions, particle size and shape. This study deals with the field calibration of the Swiss Plate Geophone System (SPGS) at the Solis SBT, Switzerland. The calibration procedure consisted of: (I) depositing 10 m³ of bedload material for each particle-size class inside the tunnel, (II) running the SBT with surplus inflow after a flood event when discharge is high, thereby keeping a high reservoir level to avoid bedload transport from the reservoir entering the SBT, and (III) recording and analysing the raw geophone signals. Three particle-size classes were chosen: 16 – 32 mm, 32 – 63 mm and 0 – 400 mm. In this paper, the details of the SGPS at Solis SBT and the results of the field calibration are presented, compared and discussed with the results from two previous laboratory calibrations.

Keywords: bedload monitoring, high speed flow, Swiss Plate Geophone System, calibration, sediment bypass tunnel

1 Introduction

Sediment bypass tunnels (SBTs) are an effective and holistic countermeasure against reservoir sedimentation (Sumi *et al.* 2004, Boes *et al.* 2014) by routing sediments around a dam. A major problem affecting nearly all SBTs is severe hydro-abrasion on the tunnel invert due to high bedload transport rates and high flow velocities (Fig. 1). Invert abrasion can cause considerable refurbishment and maintenance costs. In the scope of a research project initiated by VAW of ETH Zurich, the hydroabrasion resistance of various invert materials was investigated at three case study SBTs in Switzerland (Hagmann *et al.* 2015,

Mueller-Hagmann *et al.* 2017). The main goal of the project was to contribute to the sustainable use and design of SBTs suffering from severe hydroabrasion. To this end, abrasion depths and rates of the materials were quantified, hydraulic conditions were continuously monitored, and bedload transport rates were derived from the hydrographs at the case study SBTs. During operation of the Solis SBT located in Grisons, Eastern Swiss Alps, bedload transport was continuously monitored in real-time using the so-called Swiss Plate Geophone System (SPGS). The present study focusses on the calibration of the Solis SPGS.

The SPGS developed by the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL) is a robust device allowing for continuous bedload transport monitoring in a river (Rickenmann and McArde11 2007, Rickenmann and Fritschi 2010, Rickenmann *et al.* 2012, Rickenmann *et al.* 2013, Wyss *et al.* 2015, Koshiba *et al.* 2017). The plate is equipped with a geophone sensor which registers the vibrations of the plate, i.e. the vertical plate oscillations induced by impingement of passing particles. The number of impulses computed from the registered vibration signals correlates with the transported bedload mass. Using this correlation, i.e. calibration, bedload transport rates are estimated. However, calibration of a SPGS depends on flow velocity, particle size and shape, i.e. on site-specific conditions. Since prototype conditions cannot be reproduced in a laboratory, a field calibration is highly recommended.



Figure 1: Hydroabrasion examples: a) deep abrasion into the concrete invert and rock underground at the Val d'Ambra SBT (photo: M. Müller-Hagmann), b) hydroabrasive damages at the granite lining of the Pfaffensprung SBT (photo: VAW) (adapted from Mueller-Hagmann 2017)

2 Test set-up and procedure

2.1 Solis SBT

The Solis reservoir was commissioned in 1986. Its initial storage volume amounted to approx. $4.07 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ of which $1.46 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ are used for power generation (active volume) by the electric power company of Zurich (ewz). The Albula River and the tailrace water of the ewz hydropower plant (HPP) Tiefencastel feed the reservoir.

On average, the estimated annual sediment volume transported to the Solis reservoir is 135'000 m³ and the measured annual deposition volume is 110'000 m³, of which 31'500 m³ are excavated by a gravel plant (Mueller-Hagmann 2017). Until 2008, 25% of the reservoir storage capacity was lost due to sedimentation. To reduce the sedimentation and restore the interrupted sediment transport in the river reach, a 1 km long SBT with a slope of 1.9% was commissioned in 2012 (Fig. 2). Its intake structure is situated well below the reservoir drawdown level just downstream of the delta front location at the time of the SBT construction to stop the advancement of the latter towards the dam (Fig. 2). The inflows are therefore pressurized in normal SBT operation. The Solis SBT is planned to be put in operation at approach flow discharges of some 90 m³/s (representing a one-year flood discharge) to bypass incoming sediments (Auel *et al.* 2011). However, a recent operation was also performed for a lower flood discharge of 80 m³/s (Facchini *et al.* 2017). For an optimal bypass efficiency, the reservoir level has to be sufficiently lowered in advance of an incoming flood by turbinizing and/or releasing water through the bottom outlets. Only then the bed shear stresses are high enough to transport incoming bedload over the aggradation body of the delta to the SBT intake. The SBT operation needs to be carefully coordinated to avoid release surges in the tailwater of the dam.

Bedload particles entering the reservoir are diverted to the SBT intake by a guiding structure in the reservoir and then conveyed to the downstream river reach through the SBT (Fig. 2). With this design, the downstream part of the reservoir between the guiding structure and the dam is protected from sedimentation by both bedload and suspended load up to the SBT design discharge of 170 m³/s, representing a five-year flood. For larger floods, quasi all bedload is still diverted by the guiding structure into the SBT, while the discharge exceeding the SBT design capacity and the corresponding suspended load will be conveyed towards the dam. The SBT efficiency in terms of bedload diversion is thus close to 1.0 (Facchini *et al.* 2017).

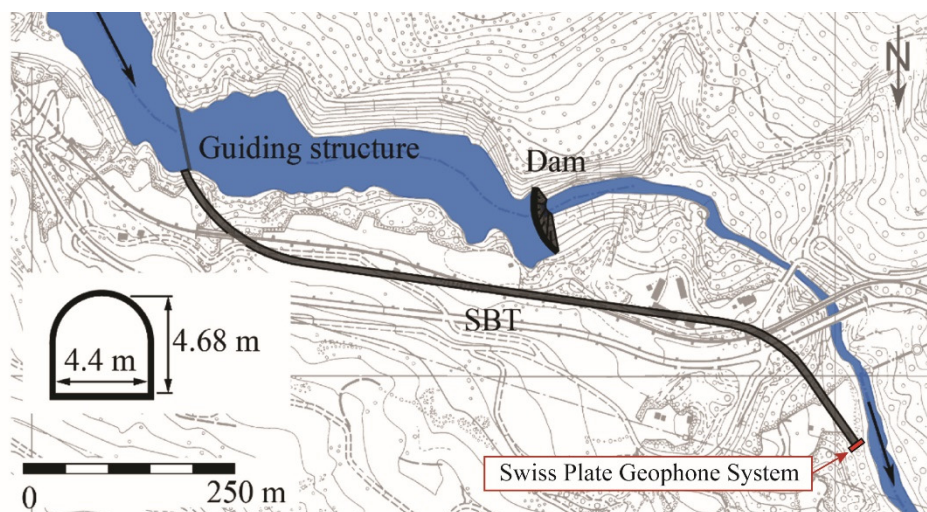


Figure 2: Overview of the Solis SBT with the dam (center), the guiding structure and intake (left) and the geophone system at the outlet (right) (adapted from Mueller-Hagmann 2017)

2.2 Swiss Plate Geophone System

The SPGS is a robust device allowing for continuous bedload transport monitoring (Rickenmann and Fritschi 2010, Koshiba *et al.* 2017) (Fig. 3a). It is typically used at a number of torrents and mountain streams with flow velocities up to 6.5 m/s and flow depth of a few decimeters, mainly in the Swiss and Austrian Alps. The device consists of an elastically bedded steel plate mounted flush to the channel bed. The plate is equipped with a geophone sensor (GS-20DX, manufactured by “Geospace Technologies”, Houston, Texas), encased by a waterproof aluminum housing (Fig. 3a). The plate is 36 cm long in flow direction, 50 cm wide and 1.5 cm thick. The bearing between the plate and the mounting steel box is made of rubber, serving to isolate vibrational energy generated in the surroundings.

The geophone sensor registers the vibrations of the geophone plate induced by impingement of passing particles at 10 kHz (Fig. 3a and b). To filter out background noise and vibrations generated by flowing water, a threshold signal value of 0.1 V is defined in accordance with other applications (Rickenmann *et al.* 2013, Wyss 2016, Chiari *et al.* 2016). However, this threshold value may vary depending on background noise and other electronic interferences (Morach 2011).

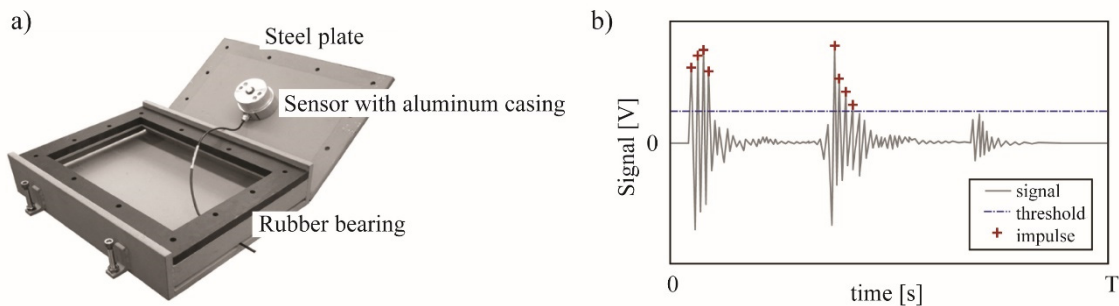


Figure 3: a) Swiss Plate Geophone System and b) schematic SPGS signal (adapted from Mueller-Hagmann *et al.* 2017)

An SPGS with eight units covering the entire tunnel width was implemented near the SBT outlet, 100 m downstream of a right hand bend (radius = 145 m, angle = 46.5°, Figs. 2 and 4a). A laboratory calibration was conducted before the implementation of the SPGS at the Solis SBT (Morach 2011). The results showed that particle detection rates increased with the inclination angle of the SPGS plate against the flow direction. Hence, the SPGS in Solis was accordingly implemented with an inclination angle of 10° (Fig. 4b). After the implementation, a further laboratory calibration similar to Morach’s (2011) was conducted. The first and the second laboratory calibrations are called ‘Morach’ and ‘Solis’ hereafter, respectively, and their results are compared in section 3.

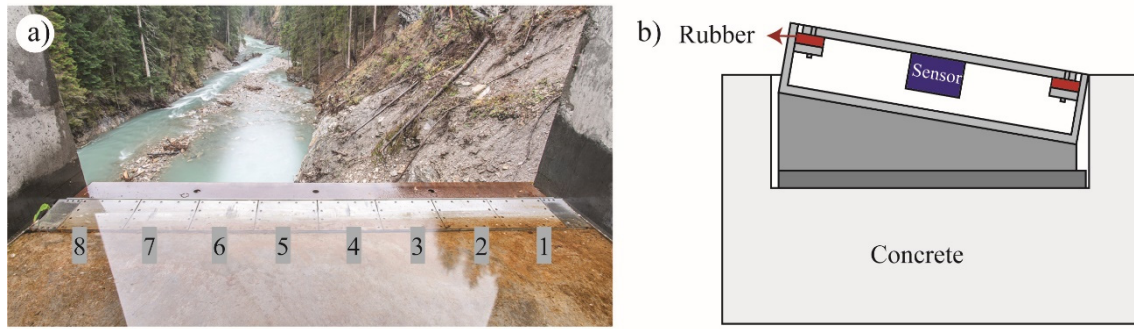


Figure 4: a) SPGS installed at the Solis SBT outlet consisting of eight geophones across the width, view in flow direction; b) Cross-section of a geophone, flow from right to left (adopted from Mueller-Hagmann *et al.* 2017)

2.3 Calibration coefficient K_b

The number of impulses Imp , above the threshold value (Fig. 3b) correlates linearly with bedload mass m (Rickenmann 1997, Rickenmann *et al.* 2012). The linear correlation coefficient is called ‘calibration coefficient K_b ’ and defined as:

$$K_b = \text{Imp} / m \text{ [1/kg]} \quad [1]$$

As flow conditions, particle size and shape affect the calibration coefficient, an *in-situ* calibration of SPGS is necessary (Rickenmann and McArdell 2007, Rickenmann *et al.* 2012, 2013, Wyss *et al.* 2014, 2015, 2016a and 2016b). In general, the calibration is based on monitored sediment deposition volumes in retention basins or on basket sampling of transported sediment (Rickenmann and McArdell 2008, Rickenmann *et al.* 2012, 2014, Wyss 2016). As both methods are not feasible at Solis SBT, a controlled *in-situ* calibration was conducted instead as described below.

2.4 Calibration procedure and sediment characteristics

Three sediment size classes were used to calibrate the Solis SPGS (Fig. 5a). Three calibration runs, one for each sediment size class, were conducted. During the calibration, the steps described below were followed:

- Deposition of 10 m³ of sediments downstream of the intake gate
- Operation of SBT at high reservoir level and signal recording
- Analysis of the raw SPGS signals

The SBT discharge was 50 m³/s to limit water loss from the reservoir. The corresponding average flow velocity was 9.8 m/s. The reservoir water level was kept high at some 0.85 m below the full supply level, so that bed shear stresses were too low to entrain settled sediments at the upstream of the SBT intake.

The sediments used for the calibration were taken from a gravel plant, located on the Albula at the reservoir head. The grain size distributions (GSD) were provided by the supplier and checked by line-sampling. The GSDs are listed in Table 1 and shown in Fig. 5a.

For each calibration run, the sediments were weighed at the gravel plant and transported to the study site by truck. The sediments were deposited in the tunnel at a distance of 20 m from the intake gate and mechanically spread across the whole tunnel width with a layer thickness of 20 cm and a wedged forehead (Fig. 5b).

Table 1: Sediment properties of the calibration runs and the natural Solis sediment

	Name	D [mm]	d_m [mm]	Volume [m ³]	Mass [t = 10 ³ kg]
Fine material	Calibration run 1	16-32 mm	25±2	10.01	15.3
Coarse material	Calibration run 2	32-63 mm	45±4	9.94	15.4
Mixture	Calibration run 3	0-400 mm	210±20	11.53	18.4
Solis natural	Solis GSD	0-300 mm	60	-	-

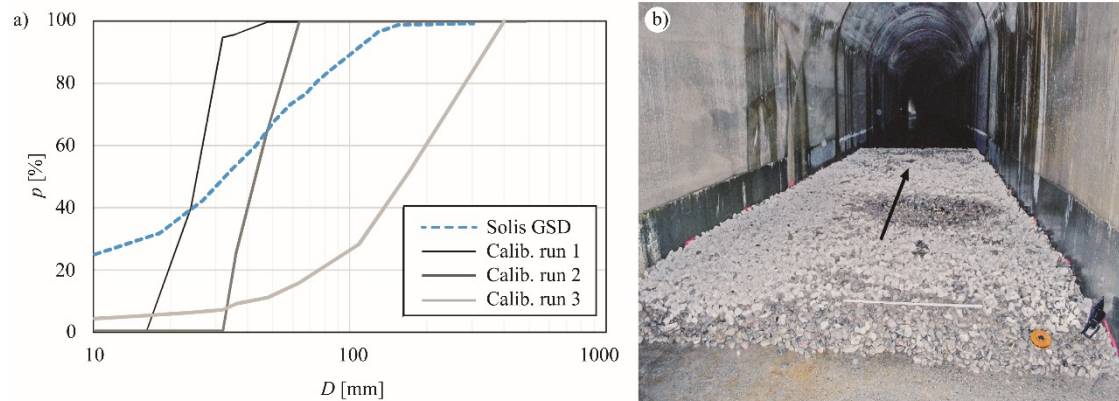


Figure 5: a) GSD of the calibration runs and the natural sediment at SBT Solis and b) photo of deposited sediments of size class 32 - 63 mm, view in flow direction (adapted from Mueller-Hagmann *et al.* 2017)

3 Results

An uneven bedload distribution across the tunnel width was observed during all three calibration runs. Figure 6a shows that sediment transport was concentrated at the right tunnel side (indicated by a darker flow area), and almost no particles were transported on the left side. The SPGS measurements confirm these observations (Figs. 6a and b) and indicate a strong effect of the upstream bend on the lateral sediment transport distribution. Figure 6b shows the relative number of registered impulses, i.e. the number of impulses per plate divided by the total number of impulses across the SBT width. The data collapse well irrespective of the calibration runs and thus GSDs. Similar lateral bedload transport distributions were measured with the SGPS during the previous SBT operations,

confirming that the SGPS calibration runs reproduced the sediment transport under real Solis SBT operating conditions.

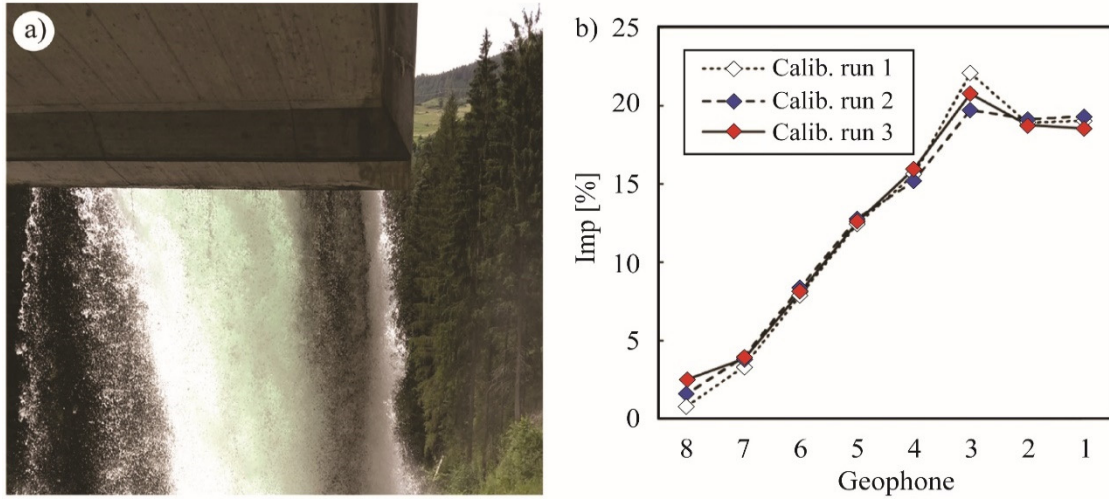


Figure 6: a) Photo from the outlet of Solis SBT during the calibration run 3 with $D=0-400$ mm and b) relative number of impulses registered by each geophone distributed across the tunnel width (adapted from Mueller-Hagmann *et al.* 2017)

The bedload calibration coefficient K_b determined for each calibration run is listed in Table 2. The present K_b values and the values obtained from Morach (2011) and the Solis laboratory calibrations are shown as a function of the corresponding grain size d_m in Figure 7. The mean flow velocity and specific gravimetric bedload transport rates of all three calibrations are listed in Table 3. The K_b values vary as a function of the grain size. Due to different hydraulic and bedload transport conditions of the calibrations, K_b values significantly scatter between the studies for the particles smaller than 50 mm. The difference between Morach's (2011) and the presented results may originate from the electric interferences causing a significantly higher background noise and amplified the signal, which bias the results, in particularly for small particles with low signal amplitudes in the range of the detection threshold. Regarding the particles larger than 50 mm, all K_b values are in a comparable range indicating that the effect of higher flow velocities on the K_b is reduced by higher bedload transport rates (Table 3). Note that increasing bedload transport rate causes overlapping of particle impacts on the plate, which results in signal damping and hence reduced number of impulses and K_b .

Table 2: Grain size and K_b based on the field calibration

	Calibration run 1	Calibration run 2	Calibration run 3
D (mm)	16 - 32	32 - 63	0 - 400
d_m (mm)	25 ± 2	45 ± 4	210 ± 20
K_b (1/kg)	6.80	13.6	5.05

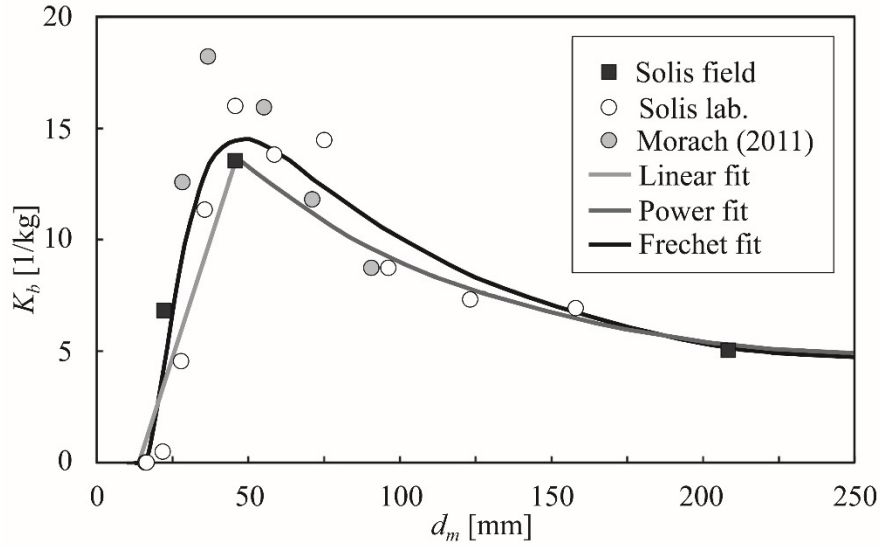


Figure 7: K_b values obtained from the Solis and Morach (2011) laboratory calibrations and the Solis field calibration as a function of d_m values with bimodal and Frechet fits of the field data (adapted from Mueller-Hagmann *et al.* 2017)

Table 3: Mean flow velocity U , and specific gravimetric bedload transport rates q_s of the Solis and Morach (2011) laboratory calibrations and the Solis field calibration

	Solis lab.	Morach (2011)	Solis field
U (m/s)	3	7.4	9.8
q_s (kg/s/m)	0.22 - 5.5 (mean 2.3)	6.7	68 - 83 (mean 74)

The data sets from the field and laboratory calibrations were fitted with (I) a bimodal function containing a linear (Eq. 2a) and a power fit (Eq. 2b) and (II) a Frechet distribution (Eq. 3). The values of the coefficients c_1 to c_8 were determined for each data set (Table 3).

$$K_b = c_1 \cdot D + c_2 \quad [2a]$$

$$K_b = c_3 \cdot D^{c_4} \quad [2b]$$

$$K_b = c_5 \times c_6 \times c_7 \times c_8^{c_7} \times \left(1 - e^{-\left(\frac{c_8}{D}\right)^{c_7}} \right)^{c_6-1} \times D^{(c_7+1)} \times e^{-\left(\frac{c_8}{D}\right)^{c_7}} \quad [3]$$

The K_b values to be used for the typical Solis SBT operating conditions were determined by applying a weighted averaging method based on the GSD of the Solis natural sediment (Table 1) using Eqs. (2a), (2b) and (3) with the corresponding coefficients c_1 to c_8 . Considering the expected GSD at Solis SBT, the K_b values determined from the field calibration vary from 9.6 to 10.8 1/kg, which are comparable to those obtained from the Solis laboratory calibration (Table 4). The K_b values determined from Morach's data

(2011) are 10% to 20% higher than those from the other two calibrations. This deviation is due to electrical interferences that occurred during Morach's (2011) experiments, resulting in a threshold value of 0.2 V for Morach (2011) instead of 0.1 V. Therefore, Morach's data are only used for a plausibility check of the field results. Overall, $K_b = (9.6+10.8)/2 = 10.2$ 1/kg, i.e. the averaged K_b value from the field calibration, is used to convert the recorded signals of the SPGS at Solis SBT to the bedload transport rates.

Table 4: Coefficients c_1 to c_8 obtained from the Bimodal and Frechet fits for the field and laboratory calibrations, coefficients of determination of the fits, and weighted averaged K_b for the expected GSD in Solis (Table 1)

	Bimodal fit						
	Linear fit			Power fit			K_b [1/kg]
	c_1	c_2	R^2	c_3	c_4	R^2	
Field Calib.	0.50	-6.7	0.92	175	-0.66	1.0	9.6
Solis Lab.	0.61	-11.4	0.98	344	-0.79	0.90	10.1
Morach	0.90	-13.8	0.99	367	-0.81	0.91	12.2

	Frechet fit					K_b [1/kg]
	c_5	c_6	c_7	c_8	R^2	
Field Calib.	15'000	0.044	1.85	48	0.93	10.8
Solis Lab.	7'800	0.054	2.77	43	0.98	10.7
Morach	2'200	0.279	2.4	40	0.99	11.6

4 Conclusions

A Swiss Plate Geophone System (SPGS) has been implemented at the Solis SBT for continuous and real time bedload transport monitoring. The system requires for a site-specific calibration. In this paper, the details of the SPGS at Solis SBT and the results of the field calibration are presented, compared and discussed with the results from two previous laboratory calibrations. Three calibration runs were conducted at Solis SBT, each having a different sediment size class. The present setup of the SPGS differs from the typical SPGS applications by an inclination of 10° against the bottom slope. The calibration coefficient K_b obtained from the field and laboratory calibrations did not show any dependency on the averaged flow velocity for the investigated range of velocities from 3 m/s to 10 m/s. A comparison between the field and laboratory calibrations reveals that K_b varies with particle size and hydraulic conditions. Therefore, a field calibration of the SPGS is recommended to limit the uncertainties in bedload transport prediction.

Furthermore, the weighted averaging method based on GSD is recommended to determine K_b .

The presented results are site-dependent and are only valid for the Solis SBT conditions and SPGS configuration. Based on the field calibration, the value of $K_b = 10.2 \text{ l/kg}$ is determined and used for the estimation of bedload transport rates at Solis SBT. To improve the accuracy of the calibration, further calibrations with more uniform and mixed sediment samples and a range of sediment transport rates similar to those during the typical SBT operations are needed.

Acknowledgements

The authors thank *swisselectric research*, *cemsuissse*, the Swiss Federal Office of Energy SFOE and the Lombardi Foundation for the financial support. Further thanks go to the staff of the electric power company of Zurich *ewz*, of the Swiss Federal Railways *SBB* and the *Kraftwerke Vorderrhein / axpo* for their purposeful and straightforward support during the planning and execution of this research project. This project is embedded into the framework of the Swiss Competence Center of Energy Research – Supply of Electricity (SCCER-SoE).

References

- Auel, C., Boes, R., Ziegler, T. & Oertli, C. (2011). Design and construction of the sediment bypass tunnel at Solis. *Hydropower and Dams* (3): 62-66.
- Boes, R.M., Auel C., Hagmann, M., Albayrak I. (2014). Sediment bypass tunnels to mitigate reservoir sedimentation and restore sediment continuity. *Proc. International Riverflow Conference* (A. J. Schleiss et al., eds.), Lausanne, Switzerland: 221-228.
- Chiari, M., Berkold, M., Jäger, G. & Hübel, J. (2016). Geschiebemeßstelle im Suggadinbach (Vorarlberg) ('Bedload monitoring station at Suggadinbach (Vorarlberg)'). *Feststofftransport und Sedimentmanagement* (Sediment transport and sediment management'). *Verien der Diplomingenieure der Wildbach und Lawinenverbauung Österreichs*: 50-58 (in German).
- Facchini, M., Siviglia, A., Boes, R.M. (2017). Downstream morphological effects of SBT releases: 1D numerical study and preliminary LiDAR data analysis. *Proc. 2nd Intl. Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, Kyoto, Japan.
- Hagmann, M., Albayrak, I. & Boes, R.M. (2015). Field research: Invert material resistance and sediment transport measurements. *Proc. 1st International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. M. Boes, ed.), ETH Zurich, Switzerland: 123-136.
- Koshiba, T., Auel, C., Tsutsumi, D., Kantoush, S. & Sumi, T. (2017). Application of an impact plate - bedload transport measuring system for high-speed flows. *International Journal of Sediment Research - Special Issue from the International Symposium on River Sedimentation* (submitted).
- Morach, S. (2011). Geschiebemeßung mittels Geophonen bei hohen Fließgeschwindigkeiten - Hydraulische Modellversuche ('Bedload transport measurement at high flow velocities - hydraulic model tests'). *Master Thesis*, VAW, ETH Zurich, Switzerland, (in German, unpublished).

- Mueller-Hagmann, M. (2017). Hydroabrasion by sediment-laden high-speed flows in sediment bypass tunnels (tentative title). *VAW-Mitteilungen* 239 (R. M. Boes, ed.), ETH Zurich, Switzerland: (in preparation).
- Mueller-Hagmann, M., Albayrak I., Boes R.M. (2017). Field calibration of bedload monitoring system in a sediment bypass tunnel: Swiss plate geophone. *E-proceedings of the 37th IAHR World Congress*, Kuala Lumpur, Malaysia (under review).
- Rickenmann, D. (1997). Sediment transport in Swiss torrents. *Earth Surface Processes and Landforms* 22 (10): 937-951.
- Rickenmann, D. & McARDell, B.W. (2007). Continuous measurement of sediment transport in the Erlenbach stream using piezoelectric bedload impact sensors. *Earth Surface Processes and Landforms* 32 (9): 1362-1378.
- Rickenmann, D. & McARDell, B.W. (2008). Calibration of piezoelectric bedload impact sensors in the Pitzbach mountain stream. *Geodinamica Acta* 21 (1-2): 35-51.
- Rickenmann, D. & Fritschi, B. (2010). Bedload transport measurements using piezoelectric impact sensors and geophones. *Proc. International Bedload-Surrogate Monitoring Workshop* (J. R. Gray et al., eds.).
- Rickenmann, D., Turowski, J. M., Fritschi, B., Klaiber, A. & Ludwig, A. (2012). Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers. *Earth Surface Processes and Landforms* 37 (9): 1000-1011.
- Rickenmann, D., Turowski, J.M., Fritschi, B., Wyss, C., Laronne, J., Barzilai, R., Reid, I., Kreisler, A., Aigner, J., Seitz, H. & Habersack, H. (2013). Bedload transport measurements with impact plate geophones: comparison of sensor calibration in different gravel-bed streams. *Earth Surface Processes and Landforms* 39 (7): 928-942.
- Rickenmann, D., Wyss, C.R., Turowski, J.M., Weitbrecht, V. & Boes, R.M. (2014). Geschiebemessungen mit Geophonsensoren: Ableitung der Kalibrierungsfunktion durch Messungen im Feld und Labor. ('Bedload transport measurement by geophon sensors: derivation of the calibration function by field and laboratory measurements'). *Proc. Wasserbausymposium "Wasserbau und Flussbau im Alpenraum"*, VAW-Mitteilung 227 (R. M. Boes, ed.), ETH Zurich, Switzerland: 355-366.
- Sumi, T., Okano, M. & Takata, Y. (2004). Reservoir sedimentation management with bypass tunnels in Japan. *Proc. 9th International Symposium on River Sedimentation*, Yichang: 1036-1043.
- Wyss, C.R. (2016). Sediment transport measurements with geophone sensors. *VAW-Mitteilungen* 234 (R. M. Boes, ed.), Also published as a Doctoral Thesis. Nr. 23353, ETH Zurich. Zurich, Switzerland.
- Wyss, C.R., Rickenmann, D., Fritschi, B., Weitbrecht, V. & Boes, R.M. (2014). Bedload grain size estimation from the indirect monitoring of bedload transport with Swiss plate geophones at the Erlenbach stream. *Proc. River Flow 2014* (A. Schleiss et al., eds.), Lausanne: 1907-1912.
- Wyss, C.R., Rickenmann, D., Fritschi, B., Turowski, J.M., Weitbrecht, V. & Boes R.M. (2015). Measuring bedload transport rates by grain-size fraction using the swiss plate geophone signal at the Erlenbach. *Journal of Hydraulic Engineering* 142 (5): 04016003 1-11.
- Wyss, C.R., Rickenmann, D., Fritschi, B., Turowski, J.M., Weitbrecht, V. & Boes R.M. (2016a). Laboratory flume experiments with the Swiss plate geophone bed load monitoring system: 1. Impulse counts and particle size identification. *Water Resources Research* 52 (10): 7744-7759.

Wyss, C.R., Rickenmann, D., Fritschi, B., Turowski, J.M., Weitbrecht, V., Travaglini, E., Bardou, E. & Boes, R.M. (2016b). Laboratory flume experiments with the Swiss plate geophone bed load monitoring system: 2. Application to field sites with direct bed load samples. *Water Resources Research* 52 (10): 7760-7778.

Authors

Ismail Albayrak (corresponding Author)

Michelle Mueller-Hagmann

Robert Michael Boes

Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, Switzerland

Email: albayrak@vaw.baug.ethz.ch.



Untersuchung verschleissfester Materialien im Wasserbau mit *in-situ*- Geschiebetransportmessung

*Investigation of wear-resistant materials at hydraulic structures:
In-situ measurements of sediment transport and invert abrasion*

M. Hagmann, I. Albayrak, R. M. Boes

Kurzfassung

Verschleiss im Wasserbau (oder auch Hydroabrasion) tritt auf, wenn Wasser mit oder ohne darin mitgeführte Feststoffe über eine feste Oberfläche fliesst und dabei Partikel aus dieser herauslöst. Diese Verschleissart stellt ein alltägliches, aber dennoch noch nicht zufriedenstellend gelöstes Problem dar und verursacht jährlich hohe Sanierungskosten. Bisher sind keine Empfehlungen oder Richtlinien für die Wahl von situationsspezifisch wirtschaftlichen Verschleiss-(schutz)schichten bekannt. Betreiber von Anlagen mit starkem Verschleiss sind auf der Suche nach wirtschaftlichen Auskleidungen oftmals gezwungen, immer wieder neue Materialien versuchsweise einzubauen, zu sanieren und wieder zu ersetzen. Mittels *in-situ* Versuchen im Sedimentumleitstollen Solis wird der Abrasionswiderstand verschiedener Materialien unter realen Betriebsbedingungen getestet. Dabei werden nicht nur die hydraulischen Einwirkungen, sondern auch der Sedimenttransport erfasst. Eine Notabsenkung während der Bauphase hat zu einer massgeblichen Veränderung des Sedimenttransport-Pfades im Stauraum geführt, weshalb es dort zu einer Zwischenspeicherung von Sediment kam und der Stollen beim ersten Betriebsereignis noch nicht im geplanten Mass Sedimente abgeführt hat, so dass Abrasionen ausgeblieben sind. Im Beitrag werden diese am Sedimentumleitstollens Solis gewonnenen Ergebnisse vorgestellt und Erfahrungen, die im Umleitstollen Pfaffensprung gemacht wurden, präsentiert.

Abstract

Wear in hydraulic structures is caused by mechanical stress due to contact between the solid surface and flowing water with or without particles. This type of wear (also named hydro-abrasion) represents a common problem not yet satisfactorily solved and regularly causes considerable maintenance cost. So far no recommendations or guidelines for the choice of site-specific and economic wear-resistant linings or coatings are available. Operators of hydraulic facilities facing severe abrasion problems are often forced to

implement, refurbish or replace different materials to experimentally (by trial and error) find a suitable and economic lining material. To address this problem, the present research project was initiated at VAW to systematically investigate the abrasion resistance of various invert materials and its relation to sediment load under different hydraulic conditions in the Solis sediment bypass tunnel in Grisons, Switzerland. The in-situ experiments involve measurements of instantaneous suspended- and bed-load transport, water depth, and discharge during every tunnel operation event, as well as laser-scanning of the surface abrasion of the invert afterwards. During the first operation of the tunnel in 2013 the sediment transport and the abrasion of the invert were not pronounced due to an incident during the construction phase. This led to a significant change of the sediment transport path in the Solis reservoir where the incoming yield is unintentionally buffered before being spilled through the bypass tunnel. In this article the results of the first operation of the Solis sediment bypass tunnel and the experiences gained in the bypass tunnel Pfaffensprung in Uri, Switzerland, are presented.

1 Einleitung

Verschleiss umfasst alle fortschreitenden Materialverluste an festen Oberflächen aufgrund von mechanischen Einwirkungen. Im Wasserbau beansprucht fliessendes Wasser und die darin mittransportierten Feststoffe das anstehende Material (Jacobs *et al.* 2001). Diese als Hydroabrasion bezeichnete Verschleissart verursacht hohe Unterhaltskosten und tritt typischerweise an Tosbecken, Wehrschwellen, Hochwasserentlastungen sowie Sedimentumleitstollen auf. Mit der Klimaveränderung wird nicht nur eine Zunahme der Spitzenabflüsse von Hochwassern, sondern auch ein Anstieg der Sedimentfracht erwartet, was die Problematik der Hydroabrasion verschärfen dürfte (KOHs 2007). Bisher fehlt es allerdings an Richtlinien, Empfehlungen oder Normen, die Planer und Betreiber von hydroabrasiv beanspruchten Anlagen helfen, geeignete Auskleidungsmaterialien und Auskleidungssysteme zu bestimmen.

Daher wurde an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) in Zürich bereits vor rund 15 Jahren eine Forschungsarbeit zum Thema durchgeführt und die Ergebnisse erfolgreich in der Praxis umgesetzt (Jacobs *et al.* 2001). In der Zwischenzeit hat sich die Messtechnik jedoch bedeutend weiterentwickelt und erlaubt eine detailliertere Überwachung der Betriebszustände. Zudem hat die Materialtechnologie in den vergangenen Jahren grosse Fortschritte gemacht und bietet ein deutlich grösseres Materialspektrum als noch in den 1990er-Jahren.

2 Ziel

Um die nach wie vor bestehende Wissenslücke weiter zu reduzieren und die neuen Möglichkeiten infolge technischer Entwicklungen zu überprüfen, wurde zwischenzeitlich eine weitere Forschungsarbeit gestartet (Hagmann *et al.* 2012). Ziel ist es, die Zusammenhänge zwischen Beanspruchung, Material-Eigenschaften und Abrasion zu untersuchen, verschleissresistente Materialien zu ermitteln und situationsspezifisch die über den gesamten Lebenszyklus betrachtet wirtschaftlichste Verkleidung zu bestimmen. Dazu werden *in-situ*-Versuche in den Schweizerischen Sedimentumleitstollen Solis (Kanton Graubünden) sowie Pfaffensprung (Kanton Uri) durchgeführt. Eine wichtige Rolle spielt dabei die messtechnische Erfassung der herrschenden Betriebsbedingungen im Allgemeinen und des Sedimenttransports im Speziellen.

3 *In-situ*-Versuche im Sedimentumleitstollen Solis

3.1 Versuchsanlage

Sedimentumleitstollen stellen gemäss Auel und Boes (2011) eine mögliche Massnahme gegen die Stauroverlandung an Talsperren dar. Sie leiten die zugeführten Sedimente um die Talsperre herum in den Unterlauf des Fliessgewässers, verhindern so ein Fortschreiten der Stauroverlandung und unterstützen den natürlichen Geschiebetransport im Gewässersystem. Dabei kommt es allerdings aufgrund der Kombination von hohen Fließgeschwindigkeiten und ausgeprägtem Feststofftransport zu vergleichsweise starken Verschleisserscheinungen, wodurch sich Umleitstollen für Feldversuche zur Hydroabrasion gut eignen.

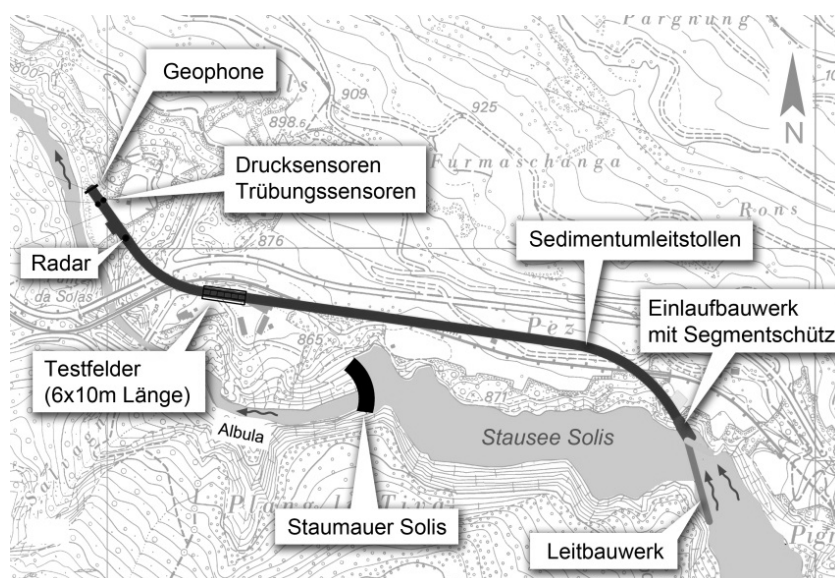


Abb. 1: Übersicht Sedimentumleitstollen Solis und Versuchsaufbau (Testfelder, Messtechnik)

Der Standort Solis hat sich zudem für *in-situ*-Versuche angeboten, da der Stollen bis 2012 noch im Bau war und somit die Testfelder wie auch die Installationen für die Messtechnik ohne grösseren Zusatzaufwand errichtet werden konnten (Abb. 1). Ausserdem konnte in diesem Stollen auch der Initialzustand problemlos erfasst werden. Der Stollen ist rund 1000 m lang, weist ein Gefälle von 1.9% auf und wird voraussichtlich durchschnittlich etwa einmal jährlich in Betrieb genommen, um sedimentreiche Zuflüsse während Hochwasserereignissen abzuführen.

3.2 Testfelder

Kern dieser Untersuchung bilden sechs 10 m lange und 4.4 m breite Testfelder an der Stollensohle, die mit unterschiedlichen Materialien ausgekleidet wurden (Abb. 1 und Abb. 2). Bei der Materialwahl galt, grundsätzlich ein möglichst breites Spektrum zu testen, wobei das dem Stollenbetreiber zumutbare Versagensrisiko die Wahl eingrenzte. Ausserdem sollten das Material, der Einbau und allfällige Sanierungen über den gesamten Lebenszyklus betrachtet wirtschaftlich sein. Um die Fortpflanzung einer Schädigung von einem Feld auf das benachbarte zu unterbinden, wurden die Testfelder analog zu Jacobs *et al.* (2001) mit Stahlprofilen abgegrenzt (Abb. 2).

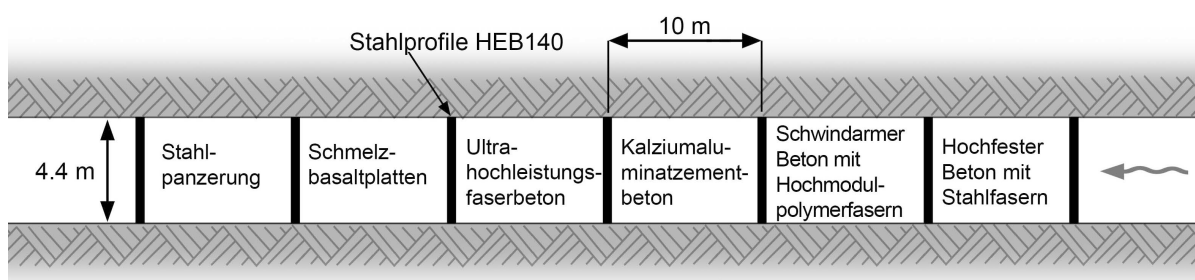


Abb. 2: Systematische Darstellung der durch Stahlprofile voneinander getrennten Testfelder im Sedimentumleitstollen in Solis.

Weitere Informationen über die eingesetzten Materialien sowie deren Festigkeitseigenschaften geben Hagmann *et al.* (2012).

3.3 Messtechnik

Die hydraulischen Betriebsbedingungen sowie der Sedimenttransport werden mittels synchronisierter Sensoren grundsätzlich im Minutenintervall aufgezeichnet. Die Abflusstiefe wird mittels Drucksensoren ("PR 26W", Keller AG, Winterthur, Schweiz), die in Aussparungen in den Tunnelwänden installiert wurden, der Schwebstoffgehalt mit Trübungssensoren ("Turbimax W CUS41", Endress + Hauser, Reinach, Schweiz) und der Geschiebetransport mittels einer an der VAW konstruierten Messanlage mit Geophonen auf Grundlage des „Swiss plate geophone system“ der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL

(Rickenmann *et al.* 2012, 2014) erfasst. Ausserdem stellt das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) als Betreiberin des Umleitstollens die Wasserstände im Stausee, die Einlaufschützenöffnungen, sowie die Fliesstiefen und die mittels Radar ("RQ 30", Sommer Messtechnik, Koblach, Österreich) gemessenen Fließgeschwindigkeiten wenige Meter oberstrom der Geophone (Abb. 1) zur Verfügung.

Der Abfluss wird über den Seepiegelstand und die Schützenöffnung rechnerisch und zusätzlich basierend auf den Drucksensor- und Fließgeschwindigkeitsmessungen bestimmt und schliesslich mit den Ergebnissen aus Laborversuchen an der VAW (Auel *et al.* 2010) verglichen. Die von der WSL entwickelten Geophone werden bisher typischerweise in Gebirgsbächen mit Fließgeschwindigkeiten bis zu wenigen Metern pro Sekunde eingesetzt (Rickenmann *et al.* 2012, 2014). Vorversuche im Labor haben gezeigt, dass für deutlich höhere Geschwindigkeiten bis zu 7.4 m/s mit einem gegen die Sohle geneigten Geophon bessere Messresultate erzielt werden (Morach 2011). Daher wurde für die Solis-Versuche eine Geophonanlage konstruiert, die grundsätzlich dem System der WSL entspricht, aber geneigt eingebaut werden kann (Abb. 3).

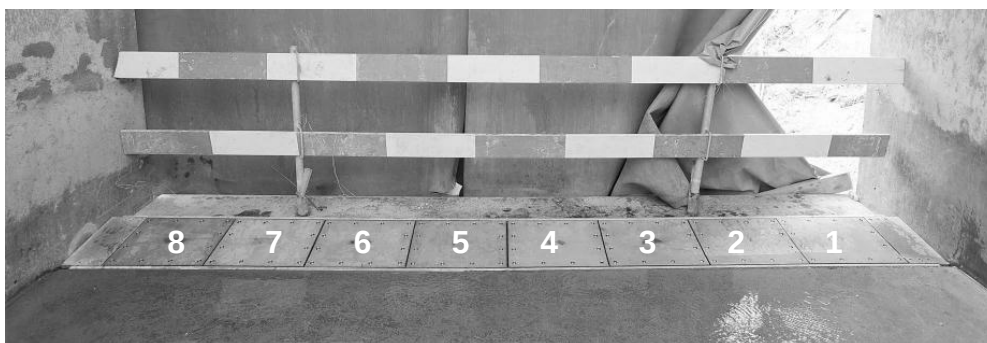


Abb. 3: Die um 10° geneigte Geophonanlage im Sedimentumleitstollen Solis, bestehend aus acht über die Stollenbreite verteilten Messeinheiten.

Die Unterkonstruktion besteht aus einem Stahlprofil (UPE400), dessen Neigung mit Keilen variiert werden kann. Darauf sind acht, auf Elastomeren („Chloropren-Elastomer“, Angst + Pfister AG, Zürich, Schweiz) gelagerte und mit jeweils einem Accelerometer („GS-20DX“, Geospace Technologies, Houston, Texas) versehene Stahlplatten (358 × 492 × 15 mm) befestigt. Die Neigung der Anlage gegen die Sohle beträgt 10°, die Messfrequenz 10.24 kHz.

Kontinuierliche Sedimenttransportmessungen erfordern in der Regel eine Kalibrierung. Bezüglich der Geschiebemessungen basiert diese auf einer Siebanalyse aus dem Solis-Reservoir und auf Vorversuchen im Labor. Zur Kalibrierung der Trübungssonden werden Schwebstoffproben sowie Trübungsmessungen an der ca. 1 km oberhalb der Stauwurzel des Solis-Reservoirs

gelegenen eidgenössischen Messstelle Tiefencastel und an einer privaten Messstelle des ewz im Unterwasserkanal des aus dem Speicher Solis gespeisten Kraftwerks Sils beigezogen.

Die Topographie der Stollensohle wird nach jedem messbaren Ereignis mit einem 3D-Laser-Scanner aufgenommen und die Abrasion aus einem Vergleich mit den vorigen Messungen bestimmt.

4 Ergebnisse

4.1 Umleitstollen Solis

Im Frühjahr 2013 war der Stollen während rund 16 Stunden in Betrieb und führte auf Grundlage der Schützenabflussberechnungen zwischen 80 und 95, kurzzeitig sogar bis zu 120 m³/s Wasser (Abb. 4a). Die Drucksensoren wurden nach dem Einbau getestet und funktionierten einwandfrei; während des Betriebs wurden aber unterschiedliche Werte zwischen der orographisch rechten und linken Seite gemessen (Abb. 4b).

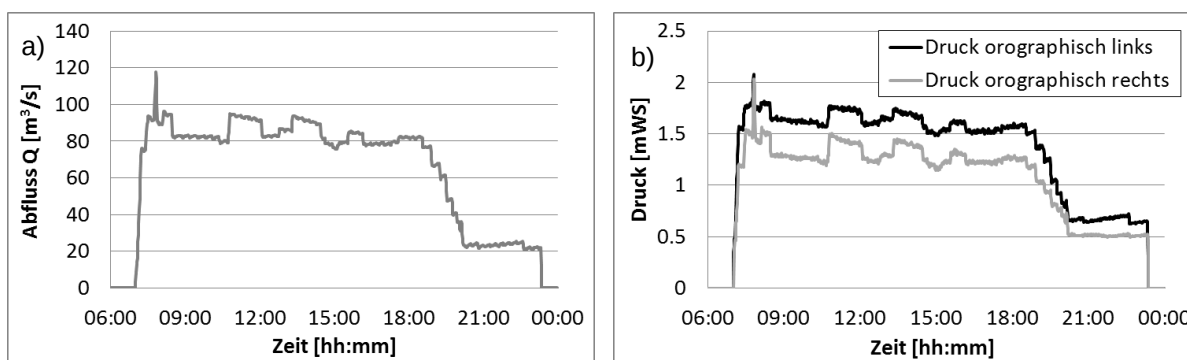


Abb. 4: (a) Berechneter Abfluss und (b) gemessene Wasserdrücke im Sedimentumleitstollen Solis beim ersten Betrieb am 3. Mai 2013

Nach der Schützenöffnung setzte der Geschiebetransport sofort ein, fiel aber schon nach wenigen Minuten stark ab und bewegte sich dann um zwei Zehnerpotenzen unter dem Anfangswert (Abb. 5a). Der Schwebstofftransport verhält sich zunächst ähnlich, wobei die Werte nach dem initialen Abfall wieder ansteigen und sich dann um das ursprüngliche Niveau herum bewegen. Die Geschiebefracht ist über die Stollenbreite ausgesprochen ungleich verteilt. Die Geophone, die auf der orographisch rechten Seite liegen, verzeichnen den Hauptanteil der transportierten Geschiebefracht, während auf der gegenüberliegenden Seite kaum Geschiebetransport registriert wurde (Abb. 5b).

Nach dem ersten Betrieb zeigte sich bei einer Begutachtung, dass die Stollensohle keine erkennbaren Abrasionen erfahren hat. Stattdessen hat sich ein kalkhaltiger Belag gebildet, der die Sohle grossflächig bedeckt, stellenweise

mehrerer Millimeter dick ist und eine raue Oberfläche aufweist (Abb. 6). Die eigentliche Oberfläche der Testfelder ist nur noch stellenweise erkennbar. Beim stahlfaserverstärkten Beton heben sich ausserdem die im Beton enthaltenen Stahlfasern durch dunkle, stängelförmige Verfärbungen ab.

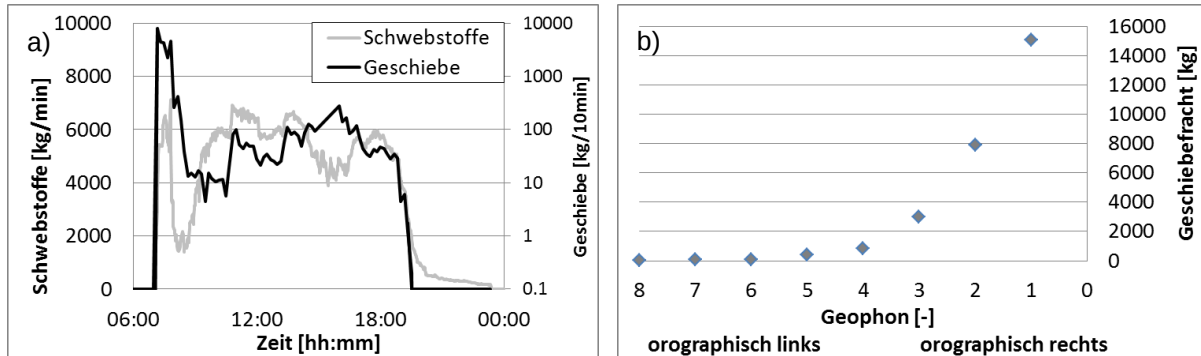


Abb. 5: Sedimenttransport im Sedimentumleitstollen Solis beim ersten Betrieb am 3. Mai 2013: (a) Ganglinie des Geschiebe- und des Schwebstofftransportes; (b) Querverteilung der gemessenen Fracht aufgeteilt nach Geophon

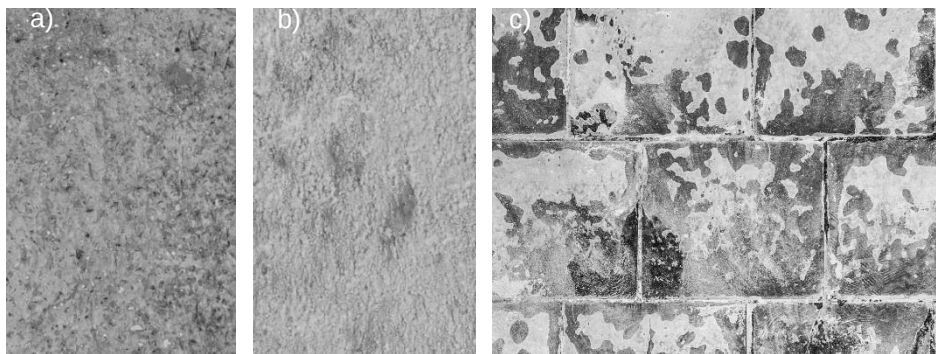


Abb. 6: Detailaufnahmen von zwei Testfeldern (40 × 25 cm resp. 40 × 50 cm), Fließrichtung von oben nach unten: (a) Die ursprüngliche Oberfläche des Betons ist nur noch an den dunkelgrauen Flecken erkennbar, dafür sind die hellgraue flächendeckende Ablagerung und die im Beton enthaltenen Stahlfasern gut sichtbar; (b) einige Millimeter starke Ablagerungen auf der Betonoberfläche mit rauer Struktur; (c) Ablagerungen auf Schmelzbasaltplatten.

4.2 Umleitstollen Pfaffensprung

Jährlich durchgeführte Abrasionsmessungen im Umleitstollen Pfaffensprung ergänzen die Datengrundlage dieses Forschungsprojekts. Beim Einbau von mittlerweile vier Testfeldern wurden Proben zur Festigkeitsermittlung entnommen und die Sohle im Initialzustand vermessen. Hier liegen bereits erste Ergebnisse von einem Beton- und einem Granitblockfeld vor. Die Abrasion des hochfesten Betons ist in Abb. 7a dargestellt, weist eine wellenförmige Struktur auf und beträgt im Mittel 1.5 cm. Beim Granit konzentriert sich der Materialverlust entlang dessen Blockfugen (Abb. 7b). Dort beträgt die Abrasion maximal

1 cm, während die mittlere Abrasion rund 3 mm und damit um ein fünffaches unter derjenigen des Betons liegt.

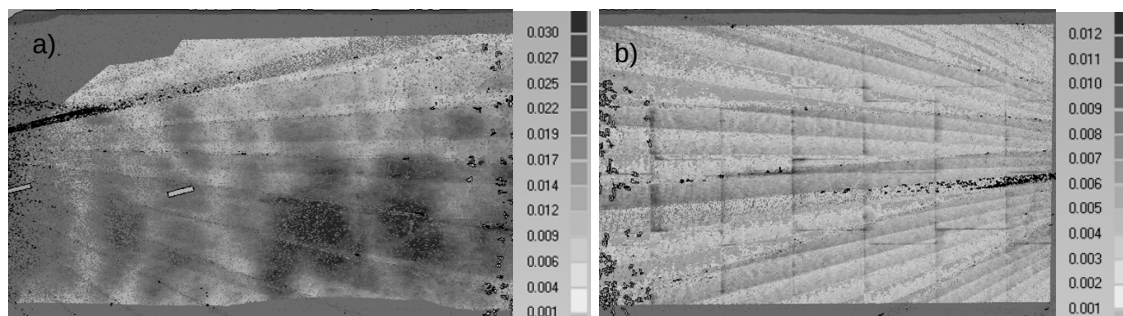


Abb. 7: Ergebnisse am Umleitstollen Pfaffensprung (UR, Schweiz) nach einer Betriebssaison, Fliessrichtung von links nach rechts: (a) Wellenförmige Abrasion an Betontestfeld; (b) Abrasion an Testfeld mit Granitblöcken vor allem entlang der Blockfugen

5 Diskussion

Die hydraulischen Betriebsbedingungen werden auf Grundlage des Seepiegelstands, der Schützenöffnung und der Druck- sowie Radarmessungen berechnet. Die Differenz der Drucksensormessungen ist auf die Wasserspiegelquerneigung infolge der ca. 100 m oberstrom der Messinstallation liegenden Kurve zurück zu führen. Ein weiteres Indiz dafür, dass die Betriebsbedingungen bei der Messstelle durch die Krümmung im Grundriss beeinflusst werden, stellt der ungleichmässig über den Querschnitt verteilte Geschiebetransport dar. Das Ausmass der Kurveneffekte wurde noch nicht abschliessend analysiert und bildet Gegenstand weiterer Untersuchungen, entspricht aber bzgl. Wasserspiegelquerneigung in etwa dem zu erwartenden Ausmass aufgrund der Fliehkräfte.

Die Kalibrierung des Geophons erfolgte im Labor, wobei die Betriebsbedingungen nicht optimal nachgebildet werden konnten. In weiteren Untersuchungen wird der Einfluss dieser Abweichungen ermittelt und für die Kalibrierung berücksichtigt. In Bezug auf die Korrelation von Trübung und Schwebstoffkonzentration liegen bisher ausreichend vertrauenswürdige Werte nur bei unter 0.5 g/l vor. Die Datengrundlage wird kontinuierlich erweitert, um auch bei hohen Schwebstoffkonzentrationen eine belastbare Kalibrierung zu ermöglichen.

Der Geschiebetransport im Umleitstollen Solis fiel bei der Inbetriebnahme im Mai 2013 geringer als ursprünglich erwartet aus. Die abrasionsresistente Stollensohle hat dadurch praktisch keine Abrasionen erfahren bzw. diese sind – falls vorhanden – stellenweise durch eine kalkhaltige Ablagerung verdeckt. Eine naheliegende Begründung für den geringen Geschiebetransport liegt bei der Umlagerung des Verlandungskörpers während einer Notabsenkung des Stausees. Diese muss durch erneute Verlandung im Reservoir zunächst

kompensiert werden, um das Niveau der Einlaufkote des Umleitstollens zu erreichen und Geschiebetransport durch den Stollen zu bewirken.

6 Zusammenfassung

Hydroabrasion ist im Wasserbau ein allgegenwärtiges, aber noch nicht zufriedenstellend gelöstes Problem und verursacht hohe Unterhaltskosten. Um die Zusammenhänge zwischen hydraulischer Beanspruchung, Sedimenttransport, Materialeigenschaften und Abrasion besser zu verstehen, werden *in-situ*-Versuche an Anlagen mit starker Hydroabrasion durchgeführt. Im Sedimentumleitstollen Solis werden bei Betrieb nicht nur die hydraulischen Bedingungen, sondern auch der für die Abrasion massgebende Sedimenttransport mittels Trübungssensoren und einer Geophonanlage kontinuierlich gemessen und die Abrasion der Stollensohle im Nachgang basierend auf Topographievermessungen bestimmt. Die Geophonanlage wurde mittels Laborversuchen kalibriert, wobei der Einfluss nicht exakt modellierbarer Versuchsbedingungen in weiteren Analysen untersucht wird.

Beim ersten Betrieb des Umleitstollens Solis ergaben die Drucksensoren an beiden Stollenparamenten deutlich unterschiedliche Werte, was auf die gekrümmte Linienführung des Stollens flussaufwärts zurückgeführt wird. Dies wird auch durch die gemessene unregelmässig über die Breite verteilte Geschiebeführung bestätigt. Aufgrund einer vorgängigen Notabsenkung des Reservoirs, die den Transportpfad der Sedimente massgeblich verändert hat, unterschritt die Sedimentfracht beim Erstbetrieb deutlich die ursprünglichen Erwartungen. Als Folge dessen blieben Abrasionen praktisch gänzlich aus.

Dafür konnten im Umleitstolle Pfaffensprung, wo ebenfalls Messkampagnen durchgeführt werden, erste Abrasionsmessungen gewonnen werden. Die Resultate weisen darauf hin, dass der Materialabtrag von Schwachstellen und Diskontinuitäten ausgeht, was durch Erfahrungen an anderen Anlagen bestätigt wird. Während der Materialverlust nach einem Betriebsjahr beim Beton eine wellenartige Struktur aufweist, sind bei Granitblockpflasterungen keine grossflächigen Abrasionen festgestellt worden. Vielmehr konzentriert sich der Verschleiss dort entlang der Fugen.

Danksagung

Das Forschungsprojekt wird finanziell unterstützt durch das *Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz)*, *swisselectric research*, das *Bundesamt für Energie (BfE)*, den *Verband der schweizerischen Zementindustrie (Cemuisse)* und die *Stiftung Lombardi Ingegneria*. Ausserdem stellen folgende Unternehmen Informationen und Erfahrungswerte zur Verfügung: das Kraftwerk Amsteg der

Schweizerischen Bundesbahn (Betreiberin des Umleitstollens Pfaffensprung), die *Axpo AG* (Betreiberin der Umleitstollen Runcahez und Hintersand, Schweiz) sowie *Flims Electric AG* (Betreiberin des Umleitstollens Ual da Mulin, Schweiz). Die Autoren bedanken sich bei allen Projektpartnern für die finanzielle und tatkräftige Unterstützung.

Referenzen

- Auel, C., Berchtold, T., Lais, A. (2010). Geschiebeumleitstollen Solis Hydraulische Modellversuche, *VAW-Bericht 4269*, VAW, ETH Zürich (unveröffentlicht).
- Auel C., Boes R. (2011). Sediment bypass tunnel design – review and outlook. *Proc. ICOLD Symposium "Dams under changing challenges"* (A.J. Schleiss & R.M. Boes, eds.), 79. ICOLD-Jahrestreffen, Luzern. Taylor & Francis, London, 403–412.
- Hagmann, M., Albayrak I., Boes R.M. (2012). Reduktion der Hydroabrasion bei Sedimentumleitstollen – In-situ-Versuche zur Optimierung der Abrasionsresistenz, *Proc. Wass.-Symp. „Wasser – Energie, Global denken – lokal handeln“* (G. Zenz, ed.), TU Graz, 91–97.
- Jacobs, F.; Winkler, K.; Hunkeler, F.; Volkart, P. (2001). Betonabrasion im Wasserbau. *VAW-Mitteilung 168* (H.-E. Minor, ed.), VAW, ETH Zürich.
- KOHS (2007). Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. *Wasser, Energie, Luft*, 99. Jahrgang, Heft 1, 55–60.
- Morach, S. (2011). Geschiebemessungen mittels Geophonanlage bei hohen Fließgeschwindigkeiten – Hydraulische Modellversuche. *Masterarbeit*, VAW, ETH Zürich (unveröffentlicht).
- Rickenmann, D., Wyss, C.R., Turowski, J.M., Weitbrecht, V., Boes, R.M. (2014). Geschiebemessungen mit Geophonsensoren: Ableitung der Kalibrierfunktion durch Messungen im Feld und Labor. *Proc. Symposium „Wasserbau und Flussbau im Alpenraum“*, VAW-Mitteilung Nr. 227/228 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zürich: eingereicht.
- Rickenmann, D., Turowski, J.M., Fritschi, B., Klaiber, A., Ludwig, A. (2012). Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers. *Earth surface processes and landforms*, 37. Jahrgang, Heft 9: 1000–1011.

Adressen der Autoren

Michelle Hagmann (korrespondierende Autorin)

Email: hagmann@vaw.baug.ethz.ch

Dr. Ismail Albayrak

Prof. Dr. Robert M. Boes

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich

Wolfgang-Pauli-Str. 27

CH-8093 Zürich



Field research: Invert material resistance and sediment transport measurements

Michelle Hagmann, Ismail Albayrak, Robert M. Boes

Abstract

Reservoir sedimentation is a global issue affecting water supply, energy production and flood protection. For a sustainable and safe reservoir operation sediment management is mandatory. Sediment Bypass Tunnels (SBTs) are an efficient and ecological favorable measure by diverting sediment-laden inflows around reservoirs. They may prevent reservoir sedimentation and restore the downstream river reach suffering from sediment deficit. However, high flow velocities and high sediment loads cause substantial hydroabrasion wear. In the project presented herein, the abrasion resistance of different materials is investigated under field operating conditions and compared to life cycle costs by means of *in-situ* experiments. Furthermore, supplementary laboratory experiments are conducted to determine abrasion resistance of investigated materials under controlled conditions and to check and investigate upscaling from laboratory results to field applications. The abrasion resistance of materials increases with their strength. However, since hydroabrasion is a self-intensifying process starting at vulnerabilities and irregularities, implementation and curing is as important as the choice of the material itself.

1 Introduction

SBTs are an effective measure against reservoir sedimentation and contribute to a sustainable use of storage capacity for water supply, energy production and flood control. They divert sediment-laden inflows around dams and thus may restore the natural sediment continuity that is disturbed by dam construction. Due to climate change and population growth sustainable sediment management at reservoirs gained increasing importance and SBTs have recently attracted growing attention, especially in mountainous regions in Asia and South America. However, SBTs are subjected to strong abrasion due to high flow velocities and sediment transport rates causing high annual maintenance expenses in the range of 1% of the investment costs (Auel 2014). An impressive example showing massive damages is the Palagnedra SBT in southern Switzerland (Vischer *et al.* 1997). After a flood event in 1978 the corresponding hydropower plant was shut down and the Melazza River was diverted through the SBT during the refurbishment period of 10 months (Delley 1988). The concrete invert was destroyed and the incision channel depth reached up to 2.7 m into the bedrock (Figure

1). In order to enhance the cost-effectiveness of SBTs suitable invert materials are indispensable.

Therefore a research project was initiated at the Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW) of ETH Zurich (Hagmann *et al.* 2012, Boes *et al.* 2014, Hagmann *et al.* 2014). The main objectives are to quantify the correlations between the hydraulic operation conditions, sediment load, invert material properties and measured hydroabrasion. To achieve this goal, *in-situ* experiments in Solis, Pfaffensprung and Runcahez SBTs are conducted.



Figure 1: Invert damages at the Palagnedra SBT (Canton Ticino, Switzerland) after an exceptional flood event in 1978 (IM Maggia Engineering AG)

Furthermore, the transferability of laboratory results to field scale is investigated in collaboration with the Institute of Construction Materials of TU Dresden, Germany. Therefore specimens of invert materials from Solis and Pfaffensprung SBTs have been tested in the laboratory and compared to their *in-situ* performance (Bellmann and Mechtcherine 2012, Mechtcherine *et al.* 2012). Finally, outputs of this project together with results of a precedent study on sediment transport and abrasion processes in SBTs (Auel 2014) will help operators of hydraulic systems facing abrasion problems by giving recommendations of SBT design, economical invert materials and their implementation. Herein, the experimental setups, the sediment transport monitoring system, and the recently obtained results are presented.

2 Instrumentation

2.1 Monitoring of hydraulic conditions

To adequately estimate the discharge in the tunnel, precise knowledge of the flow velocity and flow depth is needed. Pressure sensors are popular, competitive and robust devices for the determination of water depth under subcritical flow conditions. However, under the supercritical flow conditions prevailing in SBT, it is difficult to soundly mount these devices in tunnels without disturbing the measurements.

Another commonly used method for continuous and real-time monitoring of hydraulic operating conditions is the radar technique. This is a contact-free technique applicable also under supercritical flow conditions. It determines water levels by measuring time between sent and received pulses. Furthermore, it also measures surface flow velocity using the Doppler Effect. Finally, the discharge is determined based on the continuity equation and a site specific conversion factor adapted from water depth, cross section and surface flow velocity.

2.2 Sediment monitoring

Sediment load is divided into bed load and suspended load. For bedload monitoring there are various techniques available (Bogen and Møen 2001, Gottesfeld and Tunnicliffe 2003, Rickenmann and McArdell 2007, Møen *et al.* 2010). For the present research project, a robust, accurate and continuous real-time measurement technique is needed to monitor sediment load in SBTs. The Swiss plate geophone developed at the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL) fulfills these requirements (Rickenmann and McArdell 2007, Rickenmann *et al.* 2012, Wyss *et al.* 2014). The device consist of an elastically bedded (elastic polymer type “CR/SBR Standard 65±5”, manufactured by Angst + Pfister, Zurich, Switzerland) steel plate (S235; $l=492$ mm, $w=358$ mm, $t=15$ mm) mounted by a steel profile (S235, UPE400) flush to the channel invert (Figure 3). Bedload particles impinging the plate cause oscillations which are registered by a geophone sensor (Geospace GS-20DX, manufactured by Geospace Technologies, Houston, Texas) attached on the rear side of the plate within a waterproof casing. The sampling rate is 10 kHz and thus allows sampling of the plate oscillations.

When the signal voltage exceeds a certain threshold value corresponding to vibrations due to clear water background noise, an impulse is registered. The number of impulses correlates linearly with the sediment transport rate whereas the grain size distribution can be estimated based on the maximal amplitude value (Rickenmann *et al.* 2012, Wyss *et al.* 2014). However, correlation between registered signals and sediment transport rate, is strongly site-dependent. Hydraulic flow conditions, particle size distribution and particle shape affect the measurement signal. Therefore a calibration, in best case *in-situ*, is required for every single geophone system. Under controlled laboratory

conditions (mean flow velocity of 4 m/s, water depth of 10 cm) the threshold for detected grain was determined being between 2 and 3 cm for the horizontal arrangement of a geophone system. Furthermore, threshold grain size was significantly lowered by inclining the geophone 10° against the channel bottom slope (Morach 2011).

Turbidimeters are a popular and commonly used optical device for suspended sediment measurements at rivers, lakes, desilting basins and power plants (Grasso *et al.* 2005, Habersack *et al.* 2008). The devices register either the backscatter or the transmission of the emitted visible or infrared light. The signal output is turbidity and has to be converted to suspended sediment concentration using a calibration curve. Therefore, bottle samples are taken regularly from the river. Their calibration is affected by particle shape, size and color (Felix *et al.* 2013). Depending on particle properties the measurement range varies from several milligram per liter up to hundred grams per liter (Black and Rosenberg 1994, Wren *et al.* 2000).

2.3 Abrasion measurement

Abrasion can be measured either by hand using a leveling rule or by use of 3D-laser-technique. Jacobs *et al.* (2001) used the former to measure the abrasion in the Runcahez SBT. Also the abrasion at Asahi SBT, Japan and the abrasion in the Runcahez SBT is measured similarly (Jacobs and Hagmann 2015, Nakajima *et al.* 2015).

However, the advantage of a 3D-laser technique is the provision of high resolution surface maps. Furthermore the measurement process is much less time consuming compared to the leveling rule method. Maps obtained at different stages are used to evaluate temporal and spatial development of abrasion occurring on the surface. Depending on the specifications, 3D-lasers are applicable up to 100 m distance measurements with measurement errors around ± 2 mm. In order to obtain a surface map with high resolution and minimal errors around ± 1 mm, the measurements distance is kept in the range of 1.5 to 10 m.

3 Experimental setups and methodology

3.1 Solis SBT

The Solis SBT located in the Swiss Alps was commissioned in 2012 (Oertli 2009, Auel *et al.* 2011, Oertli and Auel 2015). The SBT intake is located 804.5 m asl. For SBT operation the reservoir level partially lowered (active storage volume: 823.75 and 816 m asl, target SBT operation level: 816 and 814.5 m asl) resulting in pressurized flow conditions at the intake. After the intake flow conditions change to supercritical free surface flow with flow velocities up to 11 m/s.

The SBT houses six test fields, each 10 m long, with different abrasion-resistant materials. Four concretes with different compressive strengths and mixtures, cast basalt tiles and steel plates were implemented directly upstream of the right bend (Hagmann *et*

al. 2012) (Figure 2). In combination with the high-performance concrete invert of Solis SBT, a total of seven different invert materials are tested. For separation of the single trial fields and for proper implementation, steel beams were installed at the end of every field.

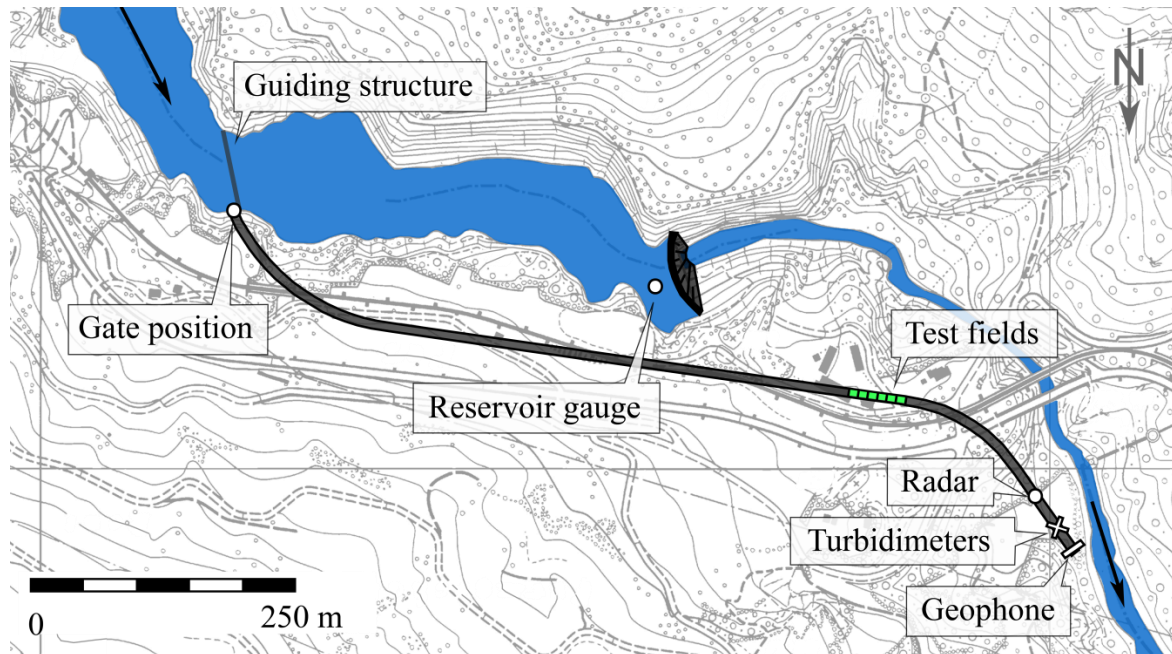


Figure 2: Overview of the Solis SBT with test fields and the instrumentation

Hydraulic conditions in the tunnel and reservoir are monitored using a radar system mounted on the tunnel ceiling (RQ-30, manufactured by Sommer Messtechnik, Koblach, Austria), two pressure sensors installed at both tunnel walls (Probe 26 W, manufactured by Keller AG, Winterthur, Switzerland), and a pressure transmitter measuring the reservoir level (MPA, manufactured by Rittmeyer, Baar, Switzerland), respectively. Furthermore, the position of the intake gate is observed by displacement transducers.

Both, the gate position and the reservoir water level are used in combination with hydraulic model test results (Auel *et al.* 2011) to estimate the discharge. These results can be compared to the measurements using the radar and pressure sensors in the tunnel. The sediment transport is monitored by two turbidimeters installed next to the pressure sensors in the side wall recesses (TubiMax W CUS41, manufactured by Endress+Hauser, Reinach, Switzerland) and by an in-house-constructed geophone system consisting of eight units at the SBT outlet (Figure 3). Generally, the sampling rate is 1/60 Hz, except for the geophones, where it is 10 kHz. The data acquisition is triggered by the SBT intake gate opening.

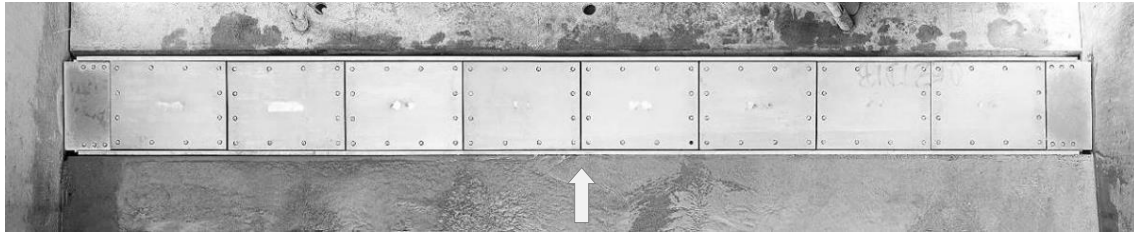


Figure 3: Picture of the geophone system consisting of eight units across the tunnel width, installed at the outlet of Solis SBT; flow direction from bottom to top

The surface of the tunnel invert is mapped by a laser scanner (FARO Focus 3D, manufactured by FARO, Lake Mary, United States). The first measurement was performed in 2012 after implementation. After every significant event provoking invert abrasion further scans are conducted.

3.2 Pfaffensprung SBT

The Pfaffensprung SBT located in the Swiss Alps was commissioned 1922 together with the Pfaffensprung reservoir erected for hydropower generation (SBZ 1943, Vischer *et al.* 1997, Müller 2015). The tunnel is in operation for over 100 days per year when the inflow exceeds the threshold discharge for bedload transport. The operating flow velocities lay between 15 and 17 m/s.

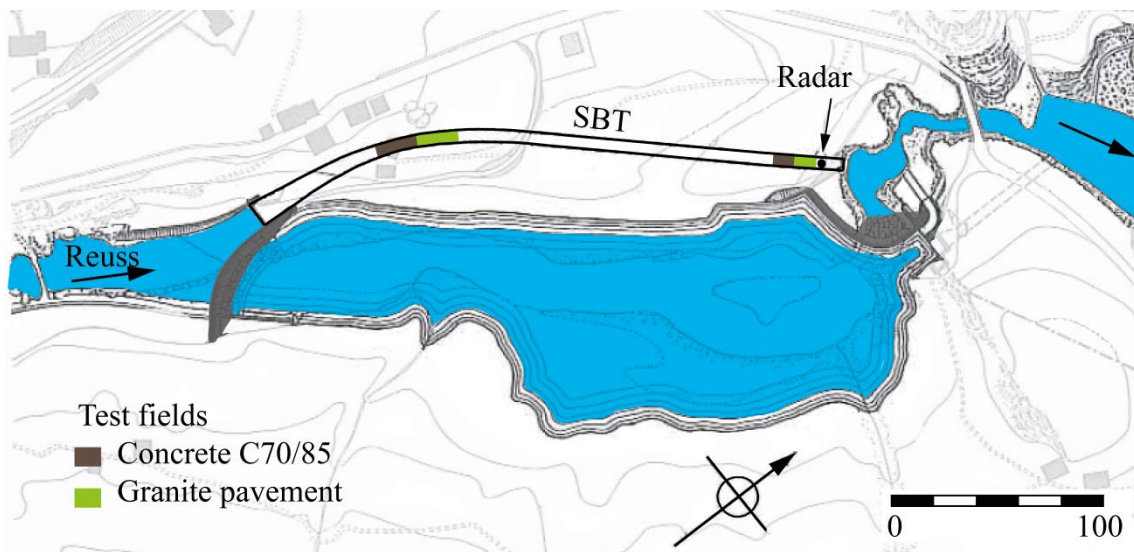


Figure 4: Overview of the Solis SBT with location of test fields and instrumentation

In the winter season 2011/12 and 2012/13 10 m long tests fields were implemented near the outlet and in the tunnel bend (Figure 4). They consist of a granite pavement and high-strength concrete with and without steel fibers. The original layer thickness was 30 cm. Compression strengths of granite and concretes are $f_c = 180$ MPa, 75 and 79 MPa, respectively. The hydraulic operating conditions are monitored by a radar mounted on the ceiling near the outlet (Vegaplug 54K, manufactured by Vega,

Pfäffikon, Switzerland) while the invert abrasion is determined based on measurements taken every winter season by a 3D-laser scanner (Z+F Imager 5006h, manufactured by Zoller + Fröhlich, Wangen im Allgäu, Germany).

3.3 Laboratory tests

To simulate hydroabrasion in the laboratory at controllable conditions a rotating drum developed at the Technical University of Dresden is used (Bellmann 2012, Mechtcherine *et al.* 2012). It consists of an octagonal rotating drum, feed with an abrasive charge and equipped with slab shaped specimens (300 mm × 300 mm × 50 mm). By changing abrasive particle size and rotation velocity, different flow and sediment load regimes are simulated (Bellmann 2012, Mechtcherine *et al.* 2012). The abrasion is determined both by weighing and laser scans providing the parameters abrasion rate, mass loss, and abrasion depth, respectively.

4 Results

4.1 Solis SBT

Since the commissioning, the Solis SBT was in operation four times. It was found that the sediment transport rate changed as a function of the reservoir level, corresponding to an increasing energy head, and suspended sediment rate scattered larger than bed load (Figure 5a and Figure 5b). With increasing reservoir level the bed shear stress upstream of the intake decreases due to the low flow velocity, and reduces the sediment transport capacity leading to lower sediment transport rates in the reservoir and thus in bypass tunnel itself. Reasons for the fluctuations are assumed to be generated by local erosions of the aggradation body.

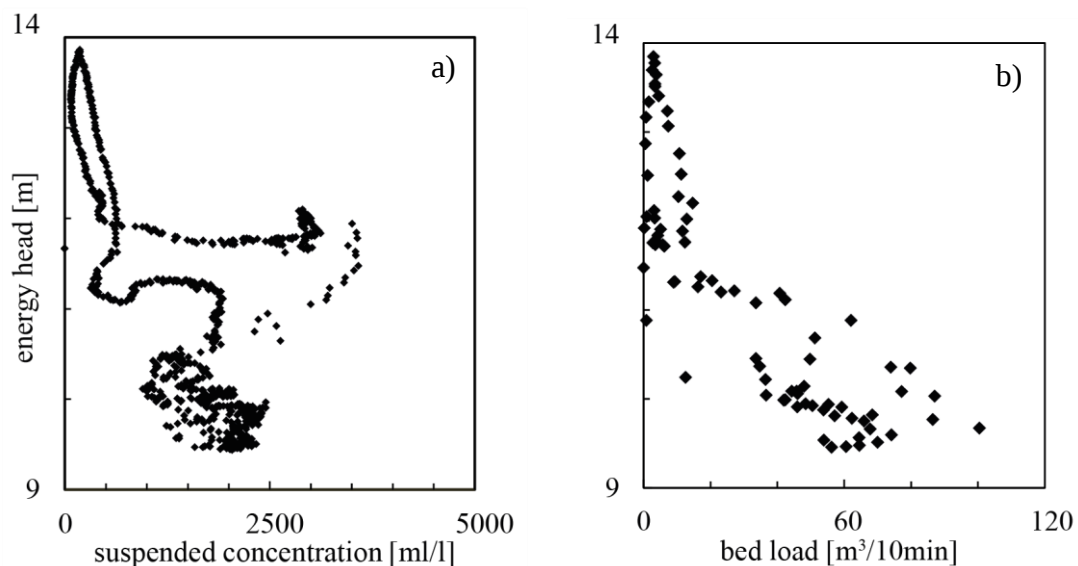


Figure 5: a) Suspended sediment concentration, and b) bed load transport rate depending on energy head during operation on 13th August 2014

Furthermore, the geophone system registered unevenly distributed bedload transport in the spanwise direction. Over 90% of the triggered bed load was transported on the orographic right tunnel side and showed an exponential distribution increasing towards the tunnel wall. This phenomenon resulted from the effect of the bend located 100 m upstream. It induces secondary flow currents causing sediment concentration at the inner side of the bend.

During the first three operations the measured bypassed sediment volume varied between 20'000 and 80'000 m³, but the portion of bed load was insignificant. Consequently, no abrasion was observed. However, during the operation in August 2014 the suspended and the bed load transport mass were considerable and first abrasion traces were observed. Although an abrasion measurement is yet to be done, visual inspections already showed that cast basalt plates suffered from abrasion at the upstream edges while the concrete fields generally experienced comprehensive abrasion following an undulating pattern. However, at the test fields equipped with high alumina cement concrete and ultra-high-performance fiber-reinforced concrete no abrasions were visible.

4.2 Pfaffensprung SBT

In 2012 and 2013 the Pfaffensprung SBT was in operation for 113 and 131 days, respectively and let all test fields suffer from hydroabrasion. Due to the tunnel bend, abrasion occurred more intensely on the orographic right side, especially for the older concrete near the outlet. Furthermore, comparison of the abrasion topography between 2012 and 2013 revealed that the abrasion pattern stayed similar but amplified and damages grew in streamwise direction (Figure 6a and Figure 6b).

The abrasion on the concrete test fields showed an undulating pattern, whereas the abrasion on the granite test fields were concentrated at the lateral joints and upstream edges of the tiles (Hagmann *et al.* 2014). The mean abrasion rates were 2 mm and 14 mm per year while the maximal abrasion rates were 15 and 35 mm per year for granite and concrete, respectively. Note that the maximal abrasion rates are decisive for SBB to define the refurbishment intervals.

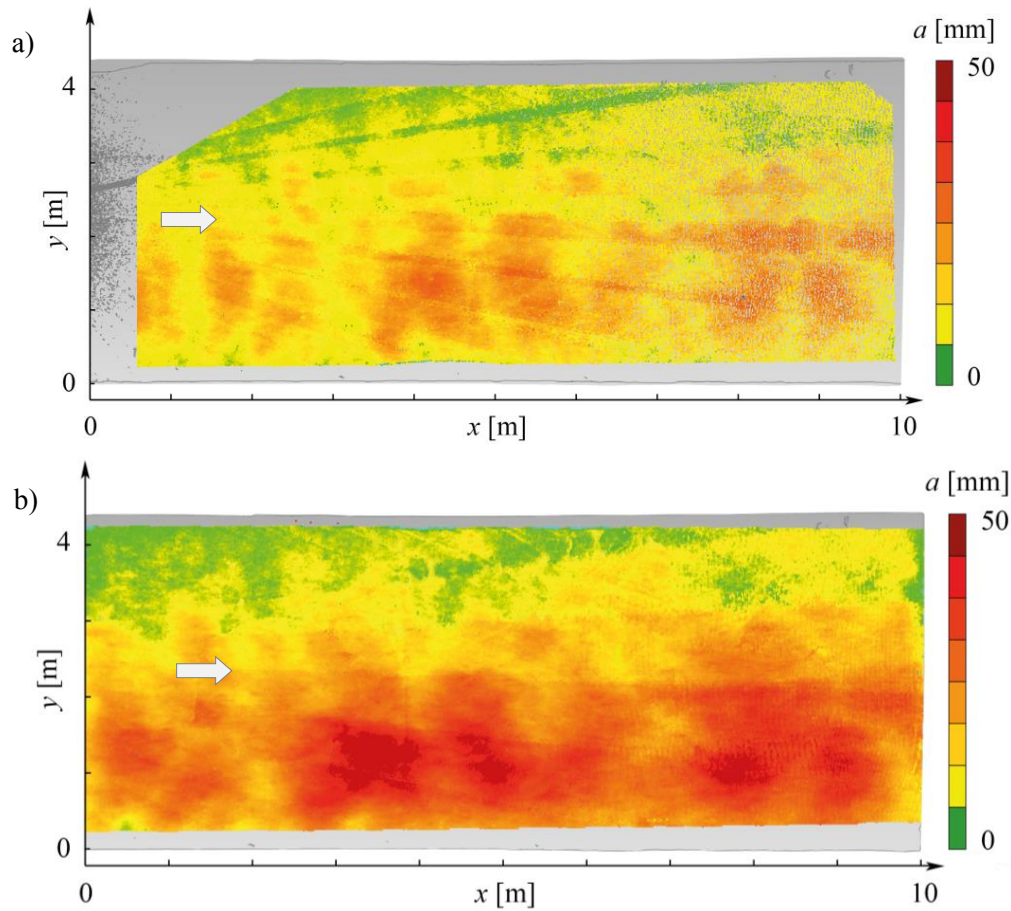


Figure 6: Abrasion of a high strength concrete test field in the Pfaffensprung SBT, a) after one year and b) after two year of operation, flow direction from left to right

4.3 Hydroabrasion drum

The concrete specimens taken from Pfaffensprung SBT were tested using the test drum described in Section 3.3. The tests were done using a mixture of 10 kg of water and 10 kg of steel spheres with a mean diameter of 5 mm. The rotation speed was 17 rotations per minute. Thereby the samples were stressed for 0.5454 s per rotation. The test duration was 58.8 h and the stress duration per sample was 9.09 h causing an abrasion rate of 1.1 mm/h (Figure 7). During the laboratory test a linear correlation between abrasion depth and stress duration was observed confirming former results (Auel 2014). Since the field abrasion was 14 mm per year, this laboratory test was able to reproduce the *in-situ* abrasion depth of a whole season in fast motion within less than 59 hours. Thus this testing procedure seems to be suitable for cross-comparison and determination of hydroabrasion resistance of different materials in respect of future applications. However, this promising result must be confirmed by further investigations.

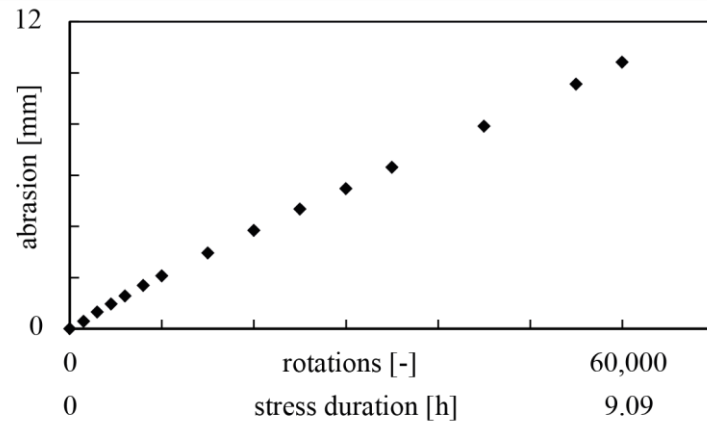


Figure 7: Hydroabrasion drum test results of high-strength concrete implemented in Pfaffensprung SBT; Abrasion as a function of both, stress duration and total number of rotations

5 Design recommendations

Since hydroabrasion is a self-intensifying process, invert irregularities and vulnerabilities or imprecise uneven invert implementation should be avoided or at least minimized in the design and implementation stages. Curves in plan-view should be avoided as sediment transport always occurs on the inner side of the curve due to the development of additional secondary currents. If they are inevitable, invert strengthening along the inner curve should be considered to cope with the increased specific sediment transport rates. Additionally, proper implementation and curing are preconditions for high resistant invert materials. At most sites the grain size distribution covers a large range resulting in a combination of two different particle size-dependent abrasion processes, grinding or impinging. Therefore, it is not possible to equip a facility with an optimum material persisting all operating conditions. Whenever damages appear and surface shows highly irregular pattern and protruding edges, refurbishment should be conducted in order to hinder fast growing damages. Further recommendations may be found in Boes *et al.* (2014).

6 Conclusions

Although hydroabrasion is an omnipresent issue in hydraulic engineering, only few standards or guidelines are available. The operators of facilities facing hydroabrasion wear often test the performance of different materials *in-situ*. However, in many cases even after decades of testing, the optimum lining material is not found. Recent investigations show that laboratory tests using a hydroabrasion drum are suitable to determine the hydroabrasion resistance of lining materials. These results confirm findings of other scientists (Jacobs *et al.* 2001, Kryżanowski *et al.* 2012). However, only a few investigations have been done, thus leaving a knowledge gap concerning the correct simulation of field conditions as well as the transferability of laboratory results to field scale. This requires further experiments.

The present field investigations reveal that monolithic materials exhibit undulating abrasion pattern which sometimes lead to incision channels or pot holes whereas modular materials have weak spots at the joints suffering the highest abrasion rates. Further it is found that hard materials persist suspended sediment. If the dominating abrasion process is caused by saltating particles, materials with high tensile strengths perform better than hard materials prone to brittle fracturing by absorbing the kinetic energy of the impacts. However, force-locked mounting and higher board thickness reduces the risk of fracturing significantly.

Acknowledgement

The authors thank swisselectric research, the Swiss Federal Office of Energy (SFOE), the Swiss association of the cement industry (cemsuisse), the foundation Lombardi Ingegneria, the power company of Zurich (ewz) and the Swiss Federal Railways for supporting the present research project.

References

- Auel C. (2014). Flow characteristics, particle motion and invert abrasion in sediment bypass tunnels. *VAW-Mitteilungen* 229 (R. M. Boes, ed.), ETH Zurich, Switzerland.
- Auel C., Boes R., Ziegler T., Oertli C. (2011). Design and construction of the sediment bypass tunnel at Solis. *Hydropower and Dams* (3): 62-66.
- Bellmann C. (2012). Deterioration of concrete subjected to hydro-abrasion. *Proc. 9th International PhD Symposium in Civil Engineering*, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germany.
- Bellmann C., Mechtcherine V. (2012). Experimental investigation into the deterioration of ordinary concrete subjected to hydro-abrasion. *Proc. MicroDurability*, PRO83, Amsterdam, Netherland.
- Black K., Rosenberg M. (1994). Suspended sand measurements in a turbulent environment: field comparison of optical and pump sampling techniques. *Coastal Engineering* 24 (1): 137-150.
- Boes R. M., Auel C., Hagmann M., Albayrak I. (2014). Sediment bypass tunnels to mitigate reservoir sedimentation and restore sediment continuity. *Proc. International Riverflow Conference* (A. J. Schleiss *et al.*, eds.), Lausanne, Switzerland: 221-228.
- Bogen J., Møen K. (2001). Bed load measurements with a new passive ultrasonic sensor. *Erosion and Sediment Transport Measurement: Technological and Methodological Advances, International Association of Hydrological Sciences*: 19-21.
- Delley P. (1988). Erosionsschäden am Umleitstollen Palagnedra und deren Sanierung ('Erosion damages at bypass tunnel Palagnedra and its rehabilitation'). *Proc. Internationales Symposium über Erosion, Abrasion und Kavitation im Wasserbau*, VAW-Mitteilung 99 (D. Vischer, ed.), VAW, ETH Zurich, Switzerland: 329-352.
- Felix D., Albayrak I., Boes R. M. (2013). Laboratory investigation on measuring suspended sediment by portable laser diffractometer (LISST) focusing on particle shape. *Geo-Marine Letters* 33 (6): 485-498.
- Gottesfeld A. S., Tunncliffe J. (2003). Bed load measurements with a passive magnetic induction device. *IAHS-Publication*: 211-221.

- Grasso D. A., Jakob A., Spreafico M. (2005). Abschätzung der Schwebstofffrachten mittels zweier Methoden. *Wasser Energie Luft* 99 (3): 273-280.
- Habersack H., Haimann M., Kerschbaumsteiner W., Lalk P. (2008). Schwebstoffe im Fließgewässer: Leitfaden zur Erfassung des Schwebstofftransportes ('Suspended sediment in waterscourse: guideline for registration of suspended sediment transport'), Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Vienna, Austria.
- Hagmann M., Albayrak I., Boes R. M. (2012). Reduktion der Hydroabrasion bei Sedimentumleitstollen - In-situ-Veruche zur Optimierung der Abrasionsresistenz ('Reduction of hydroabrasion at sediment bypass tunnels - In-situ experiments to optimize the abrasion resistance'). *Proc. Wasserbausymposium "Wasser - Energie, global denken - lokal handeln"* (G. Zenz, ed.), TU Graz, Austria: 91-97.
- Hagmann M., Albayrak I., Boes R. M. (2014). Untersuchung verschleissfester Materialien im Wasserbau mit einer Geschiebetransportüberwachung ('Investigation abrasion resistant materials at hydraulic structures with a bed load monitoring'). *Proc. Internationales Symposium „Wasser- und Flussbau im Alpenraum“*, VAW-Mitteilung 227 (R. M. Boes, ed.), ETH Zurich, Switzerland: 97-106.
- Jacobs F., Hagmann M. (2015). Sediment Bypass Tunnel Runcahez: Invert Abrasion 1995-2014. *Proc. First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. M. Boes, ed.), Zurich, Switzerland.
- Jacobs F., Winkeler W., Hinkeler F., Volkart P. (2001). Betonabrasion im Wasserbau ('Concrete abrasion at hydraulic structures'). *VAW-Mitteilung*(H.-E. Minor, ed.), ETH Zurich, Switzerland.
- Kryżanowski A., Mikoš M., Šušteršič J., Ukrainczyk V., Planinc I. (2012). Testing of concrete abrasion resistance in hydraulic htructures on the Lower Sava River. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering* 58 (4): 245-254.
- Mechtcherine V., Bellmann C., Helbig U., Horlacher H. B., Stamm J. (2012). Nachbildung der Hydroabrasionsbeanspruchung im Laborversuch Teil 1 - Experimentelle Untersuchung zu Schädigungsmechanismen im Beton ('Modeling hydroabrasive stress in the laboratory experiment, part 1 - experimental investigations of damage mechanisms in concrete'). *Bautechnik* 89 (5): 309-319.
- Møen K., Bogen J., Zuta J., Ade P., Esbensen K. (2010). Bedload measurement in rivers using passive acoustic sensors. *US Geological Survey Scientific Investigations Report* 5091: 336-351.
- Morach S. (2011). Geschiebemessung mittels Geophonen bei hohen Fliessgeschwindigkeiten - Hydraulische Modellversuche ('Bedload transport measurement at high flow velocities - hydraulic model tests'). *Master Thesis*, VAW, ETH Zurich, Switzerland, (unpublished).
- Müller B., Walker M. (2015). The Pfaffensprung sediment bypass tunnel: 95 years of experience. *Proc. First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 231 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zurich, Switzerland.
- Nakajima H., Otsubo Y., Omoto Y. (2015). Abrasion and corrective measurement of a sediment bypass system at Asahi Dam. *Proc. First international Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW Mitteilungen 232 (R. M. Boes, ed.), ETH Zurich, Switzerland.
- Oertli C. (2009). Entlandung des Stausees Solis durch einen Geschiebeumleitstollen. *Wasser Energie Luft* 101. Jahrgang, Heft 1: 5-9.

- Oertli C., Auel C. (2015). Solis sediment bypass tunnel: First operation experiences. *Proc. First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zurich, Switzerland.
- Rickenmann D., McArdeall B. W. (2007). Continuous measurement of sediment transport in the Erlenbach stream using piezoelectric bedload impact sensors. *Earth Surface Processes and Landforms* 32 (9): 1362-1378.
- Rickenmann D., Turowski J. M., Fritschi B., Klaiber A., Ludwig A. (2012). Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers. *Earth Surface Processes and Landforms* 37 (9): 1000-1011.
- SBZ (1943). Rekonstruktion des Umleittunnels am Pfaffensprung des Kraftwerks Amsteg der SBB. *Schweizerische Bauzeitung* 121: 41-42.
- Vischer D., Hager W. H., Casanova C., Joos B., Lier P., Martini O. (1997). Bypass tunnels to prevent reservoir sedimentation. *Proc. 19th ICOLD Congress* Q74 R37, Florence: 605-624.
- Wren D., Barkdoll B., Kuhnle R., Derrow R. (2000). Field techniques for suspended-sediment measurement. *Journal of Hydraulic Engineering* 126 (2): 97-104.
- Wyss C. R., Rickenmann D., Fritschi B., Weitbrecht V., Boes R. M. (2014). Bedload grain size estimation from the indirect monitoring of bedload transport with Swiss plate geophones at the Erlenbach stream. *Proc. River Flow 2014* (A. Schleiss *et al.*, eds.), Lausanne: 1907-1912.

Authors

Michelle Hagmann (corresponding Author)

Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich

Email: hagmann@vaw.baug.ethz.ch

Dr. Ismail Albayrak

Prof. Dr. R.M. Boes

Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich

FIELD CALIBRATION OF BEDLOAD MONITORING SYSTEM IN A SEDIMENT BYPASS TUNNEL: SWISS PLATE GEOPHONE

MICHELLE MUELLER-HAGMANN⁽¹⁾, ISMAIL ALBAYRAK⁽²⁾ & ROBERT MICHAEL BOES⁽³⁾

^(1,2,3)Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, ETH Zurich, Switzerland
mueller-hagmann@vaw.baug.ethz.ch; albayrak@vaw.baug.ethz.ch; boes@vaw.baug.ethz.ch

ABSTRACT

Under the impact of climate change, sediment transport in melting water draining from glacier basins and reservoir sedimentation tend to increase worldwide. As a consequence, three main problems arise: (1) the loss of reservoir storage volume for energy production, flood retention, water supply and irrigation; (2) increased hydro-abrasion at turbines and hydraulic structures; and (3) negative environmental impacts due to downstream sediment deficit. An effective countermeasure against reservoir sedimentation in small to medium-sized mountainous reservoirs is to route sediment around the dam by using a sediment bypass tunnel (SBT). A major problem affecting nearly all SBTs is severe hydro-abrasion on the tunnel invert due to high bed load transport rates in combination with high flow velocities. Depending on site-specific operating conditions and sediment properties, i.e. size, hardness and shape, invert abrasion can cause considerable refurbishment costs. For optimized operation of SBTs with respect to sustainable sediment management and cost efficiency, continuous real-time monitoring of bed load transport is necessary. Bed load transport can be monitored indirectly by using passive sensors like geophones or hydrophones. However, these techniques require a site-specific calibration depending on hydraulic conditions, particle-size and shape. This study deals with the field calibration of a so-called Swiss plate geophone system implemented at the outlet of Solis SBT located in Grisons in the Swiss Alps. The geophones with a sampling rate of 10 kHz are placed across the whole tunnel width and have an inclination of 10° against the invert slope. Three different particle size classes were tested 16-32 mm, 32-63 mm and 0-400 mm. The results indicate that calibration is independent from flow velocity due to the counter inclination of the geophones. However, a certain degree of signal saturation due to high bed load transport rate occurred and hence a further investigation is needed.

Keywords: Swiss plate geophone; bedload measurements; geophone calibration; sediment bypass tunnel; reservoir sedimentation.

1 INTRODUCTION

The role of sediment management considering sustainable and cost-effective operation and maintenance of hydraulic structures has been disregarded for a long time. However, sediment transport in watercourses increases due to the impact of climate change and promotes related problems such as a loss of storage volume for energy production, flood retention, water supply and irrigation, an increase of hydro-abrasive wear at turbines and hydraulic structures and negative environmental impact in the downstream due to the interrupted sediment transport by the dam (Sumi et al., 2004; Boes et al., 2014; Kondolf et al., 2014). Therefore, a holistic sediment management approach at hydraulic structures, in particular at reservoirs is globally required.

One of the effective and holistic countermeasures against reservoir sedimentation is to route sediment around a dam by using a sediment bypass tunnel (SBT). It restores the natural sediment transport and hence not only reduces reservoir sedimentation but also sediment deficit related problems in the downstream such as river bed incision, ground water lowering, degradation of eco-morphology, reduction of habitat quality and even nutrient and sediment deficit in coastal regions (Syvitski et al., 2005; Kantoush and Sumi, 2010; Fukuda et al., 2012; Fukuroi, 2012; Kondolf et al., 2014; Facchini et al., 2015; Martin et al., 2015). A major problem affecting nearly all SBTs is severe hydro-abrasion on the tunnel invert due to the high bed load transport rates in combination with high flow velocities (Figure 1). Depending on site-specific operating conditions and sediment properties, i.e. size, hardness and shape, invert abrasion can cause considerable refurbishment costs.

For optimized operation of SBTs with respect to sustainable sediment management and cost efficiency, continuous real-time monitoring of hydraulic operating conditions and sediment transport is required. The latter includes suspended sediment load and bed load and can be monitored by turbidity sensors and the Swiss Plate Geophone System (SPGS) described below, respectively. The number of impulses computed from the registered SPGS signals correlates with the transported bed load mass.

Using this relation, i.e. a calibration, bed load transport rates are estimated. Since flow velocity, particle-size and shape affect the calibration and because laboratory calibration cannot adequately reproduce prototype conditions, site-specific calibration in the field is highly recommended.

In the scope of a research project on the invert hydro-abrasion in SBTs, a field calibration of a SPGS was conducted. This system has been implemented at the outlet of Solis SBT located in Grisons in the Swiss Alps. The present study reports the results of the calibration and compares them with the results from two laboratory calibrations of the same system.



Figure 1. Hydroabrasion examples, a) abrasion at Val d'Ambra SBT (CH) into the concrete lining and rock underground (M. Müller-Hagmann), b) incision channels of the reinforced concrete lining of Asahi SBT (JP) (KEPCO, 2012), hydroabrasive damages at c) cast basalt tiles in Runchez SBT (CH) (M. Müller-Hagmann) and d) at the granite lining of Pfaffensprung SBT (CH) (VAW).

2 TEST SET-UP AND PROCEDURE

2.1 Solis SBT

The Solis reservoir located in the Swiss Alps was commissioned in 1986 and stores approximately $4.07 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ of which $1.46 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ are useful storage capacity for power generation by the electric power company of Zurich (ewz). Compared to the mean annual runoff of $853 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, the reservoir volume and the capacity inflow ratio of 0.0048 are small. The reservoir is fed by the Albula River and the reservoir head is located one kilometer downstream of the confluence with the Julia River.

Estimated annual transported and deposited sediment volumes in the Solis reservoir are on average $103'000 \text{ m}^3$ and $80'000 \text{ m}^3$, respectively. After twelve years of operation, 20% of the reservoir storage capacity was lost due to sedimentation, which significantly affects hydropower operation. Assuming a constant aggradation rate, the aggradation body was expected to reach the dam by 2012 and would consequently have endangered the operation safety of the dam (Auel et al., 2011; Oertli & Auel, 2015). To reduce the sedimentation and restore the interrupted sediment transport in the river reach, a one-kilometer long SBT was constructed (Figure 2) and commissioned in 2012. The function of the SBT is to bypass incoming sediments during flood events. Bed load particles enter the reservoir and propagate towards a guiding structure in the reservoir, which diverts bed load to the SBT intake structure to be routed around the dam (Figure 2). With this design, the lower part of the reservoir between the guiding structure and the dam is protected from

sedimentation by both bed load and suspended load up to the SBT design discharge of $170 \text{ m}^3/\text{s}$, representing a five-year flood when the SBT is in operation. For reservoir inflows exceeding the design discharge, all the bed load is diverted to the SBT intake, whereas a part of the suspended load is conveyed towards the dam with the surplus flow passing the guiding structure. If not conveyed via the power waterway, the bottom outlet or the spillway to the tailwater, a considerable amount of fines may thus settle in the lower part of the reservoir, which is periodically flushed through the bottom outlet.

Since the SBT intake is located below the drawdown level, the inflow is pressurized and no acceleration section is required. After the intake, the SBT flow is decelerated but remains supercritical with Froude number $F \approx 1.7$ and an average flow velocity of $U \approx 11 \text{ m/s}$. Hence, a sufficient sediment transport capacity is ensured along the whole tunnel. The bottom slope of the SBT is 1.9%, and the arched cross sectional area amounts to 18.5 m^2 .

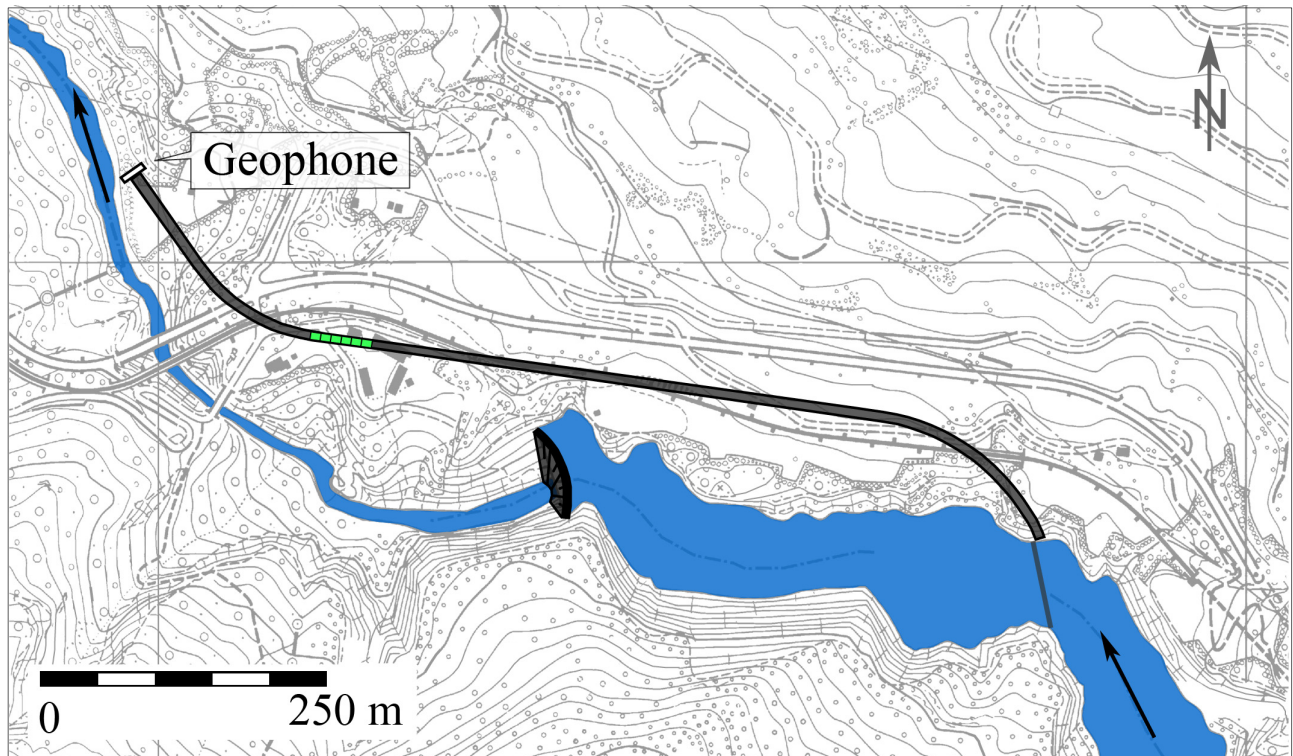


Figure 2. Overview of the Solis SBT with the dam (center), the guiding structure and intake (right) and the geophone system at the outlet (left).

2.2 Swiss plate geophone system

The SPGS developed by the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL) is a robust device allowing for continuous bed load transport monitoring (Rickenmann & Fritsch, 2010; Koshiba et al., 2017). There is a long-time experience with SPGS at a number of torrents and mountain streams with flow velocities up to 5 m/s and flow depth of a few decimeters, mainly in the Swiss and Austrian Alps. The submersible device consists of an elastically bedded steel plate mounted flush to the channel bed. The plate is equipped with a geophone sensor (shown in Figure 3a: GS-20DX, manufactured by “Geospace Technologies”, Houston, Texas), encased by a waterproof aluminum housing (Figure 3b). The length of the plate in flow direction is 36 cm , the width is 50 cm and the thickness is 1.5 cm . The bearing between the steel plate and the mounting steel box is made of rubber (elastomer type CR/SRB-standard 65 ± 5 , manufactured by “Angst + Pfister”, Zurich, Switzerland). Besides signal damping issues, this bearing serves for isolation of vibrational energy generated in the surroundings.

The sensor does not directly measure bed load transport, but registers the vibration signals of the geophone plate, i.e. the vertical plate oscillations induced by impingement of passing particles. The signal output is a voltage with a sampling frequency of 10 kHz (Figure 4). To filter out background noise and vibrations generated by clear water discharge, a threshold signal value of 0.1 V is defined in accordance with other applications (Rickenmann et al., 2013; Wyss, 2016; Chiari et al., 2016). However, this threshold value can be changed depending on background noise and other electronic interferences (Morach, 2011).

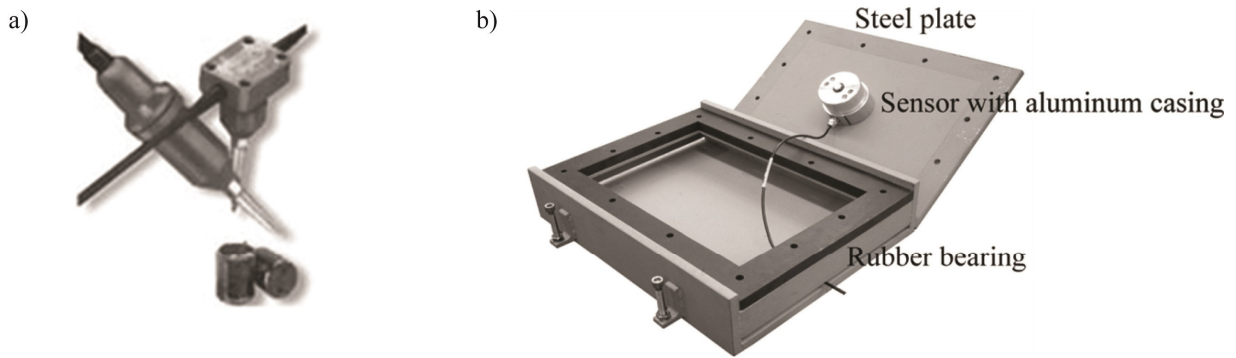


Figure 3. SPGS: a) geophone sensor (courtesy of Geospace Technologies) and b) open measuring unit showing steel plate and waterproof aluminum housing of the sensor.

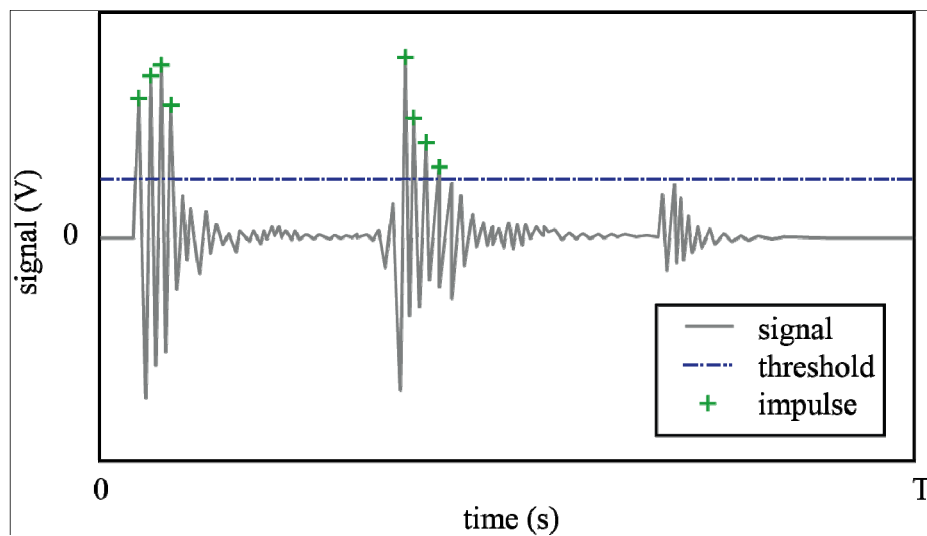


Figure 4. Schematic geophone signal.

2.3 Calibration coefficient K_b

The number of impulses Imp above the threshold value (Figure 4) correlates linearly with bed load mass m (Rickenmann 1997, Rickenmann et al. 2012). The linear correlation coefficient between impulses and bedload mass K_b is used to estimate sediment transport rate. It constitutes a calibration coefficient and is defined as:

$$K_b = \frac{Imp}{m} \quad (1/kg) \quad [1]$$

Recent investigations reveal that not only sediment transport rate but also grain size information can be extracted from the amplitude of the geophone signals (Wyss et al., 2014; Wyss, 2016; Wyss et al., 2016a). Since the calibration coefficient is affected by flow conditions, grain size and shape, a site-specific calibration is required (Rickenmann and McArdell, 2007; Rickenmann et al., 2012; Rickenmann et al., 2013; Wyss et al., 2014; Wyss et al., 2015; Wyss et al., 2016a and 2016b). The calibration is generally based on monitored sediment deposition volumes in retention basins or on basket sampling of transported sediment (Rickenmann and McArdell, 2008; Rickenmann et al., 2012; Rickenmann et al., 2014; Wyss, 2016). However, as none of these methods is possible at Solis SBT, a field test described in Section 2.2. was performed to calibrate the geophone system at the Solis SBT.

The SPGS was implemented near the SBT outlet, 100 m downstream of a right hand bend (radius = 145 m, angle = 46.5°, Figure 2). In order to capture not only temporal but also spatial variations of bed load transport, the SPGS at Solis SBT consists of 8 units covering the entire tunnel width (Figure 5a). In contrast to the general geophone applications, the flow regime in the Solis SBT is supercritical. To address this issues, a laboratory investigation was conducted before the implementation of the SPGS in the Solis SBT (Morach, 2011). The tests revealed that particle detection rates increased when inclining the geophone plate against the flow direction compared to the horizontal mounting. Thus, the geophone system in Solis was accordingly implemented with an inclination angle of 10° (Figure 5b). After the implementation, further laboratory tests

similar to Morach (2011) were conducted, the results of which are compared with the present results in Section 3.

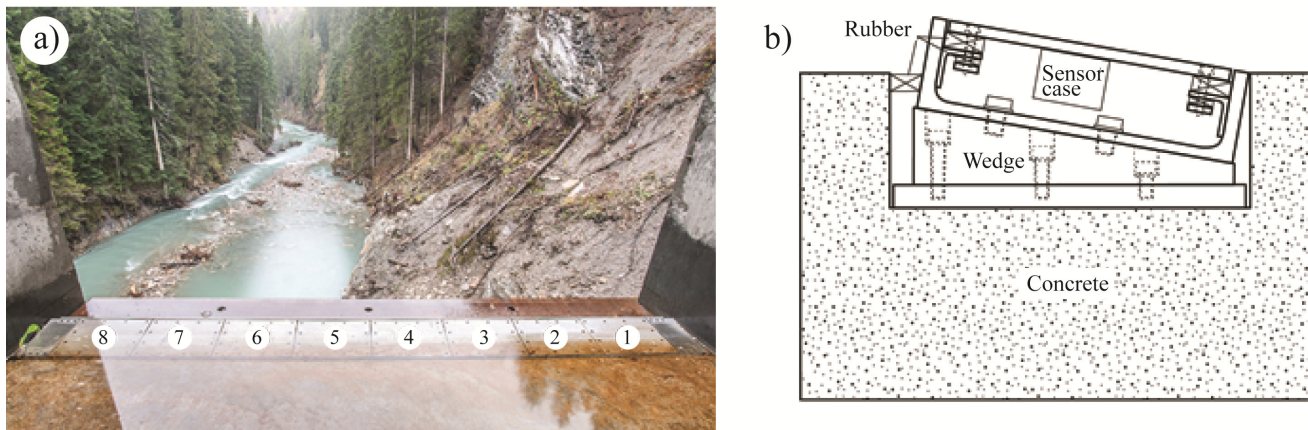


Figure 5. a) Counter-inclined SPGS installed at the Solis SBT outlet; view in flow direction; b) Cross section of the geophone construction (flow from right to left).

2.4 Procedure and characteristics of sediments used

The Solis SPGS (Figure 5a) was calibrated using three sediment grain size classes. Three test runs, one for each sediment size class, were conducted. The calibration procedure consisted of: (I) placing of a 10 m³ sediment deposit volume downstream of the intake gate, (II) SBT operation and signal recording, and (III) analysis of the raw geophone signals. The sediment deposit was located at the inlet in order to achieve characteristic bedload transport of typical SBT operation. To limit water loss from the reservoir, a discharge of 50 m³/s was selected. To avoid additional sediment transport from the reservoir, the reservoir level was kept high (i.e. 0.83-0.85 m below the full supply level), so that bed shear stresses were too low to entrain settled sediments. The sediments used for the geophone calibration were taken from a gravel plant, located on the Albula at the reservoir head so that the sediment properties were identical to the sediment transported through the SBT in typical operations. The grain size distributions (GSD) were provided by the supplier and checked by line-sampling (Table 1 and Figure 6a). Based on the latter, the corresponding gravimetric GSD was calculated according to Fehr (1987). Therefore, the fraction of the particles smaller than 16 mm was assumed to 15%. For each test run, the sediments were weighed at the gravel plant and transported to the test site by truck. Due to limited space, a side- and back-dumper was used. At a distance of 20 m from the intake, the sediments were damped and distributed by a small excavator. The sediment deposition covered the whole tunnel width with a layer thickness of 20 cm and a wedged forehead (Figure 6b).

Table 1. Sediment of the calibration test runs and the natural Solis sediment.

	Name	D (mm)	d_m (mm)	Volume (m ³)	Mass (to)
Fine material	Test 1	16-32 mm	25±2	10.01	15.3
Coarse material	Test 2	32-63 mm	45±4	9.94	15.4
Mixture	Test 3	0-400 mm	210±20	11.53	18.4
Solis natural (assumed)	Solis GSD	0-300 mm	60	-	-

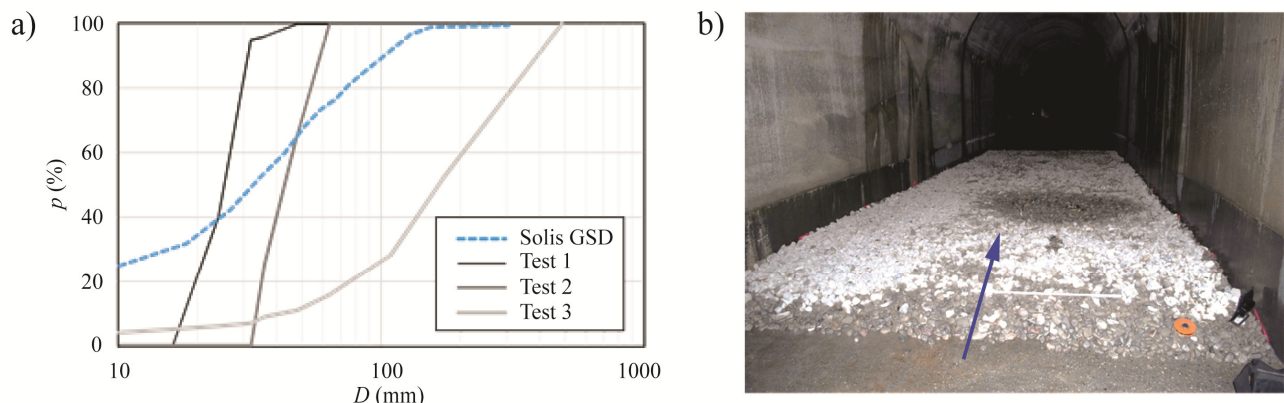


Figure 6. a) GSD of the natural sediments flushed through the SBT and of the sediments used for geophone field calibration; b) photo of damped sediments of size class 32-63 mm, view in flow direction.

3 RESULTS ON THE CALIBRATION COEFFICIENT K_b

Figure 7a shows the sediment-laden flow at the SBT outlet structure, depicting that: (1) bed load distribution across the tunnel width was uneven during all three test runs, (2) sediment transport was concentrated at the right tunnel side, see darker flow area, and (3) almost no particles were transported on the left side. These qualitative observations were confirmed by the quantitative geophone measurements indicating a strong effect of the upstream bend on the lateral sediment transport distribution (Figure 7b). The relative number of registered impulses, i.e. the number of impulses per plate divided by the total number of impulses across the SBT width, collapses well independent from test run and thus GSD (Figure 7b). During normal SBT operation, similar lateral bed load transport distributions were measured, which confirms that the geophone calibration tests reproduced the real sediment transport conditions in the Solis SBT.

The bedload calibration coefficient K_b was determined for each test run (Table 2). Figure 8 shows K_b versus grain size D for the Solis field and laboratory calibration tests as well as Morach's (2011) tests. The geophone can detect the particles with a size above $D = 16$ mm and thus around this threshold particle size, K_b is approx. zero (Figure 8). As expected, K_b varies with particle size (Morach, 2011; Wyss, 2016). Despite different hydraulic and bed load transport conditions, all K_b values are in a comparable range, in particular for particles larger than 50 mm. For $D \approx 25$ mm the K_b value of the field calibration is higher than for the laboratory calibration, while it is the contrary for $D \approx 45$ mm. This is attributed to the higher flow velocity prevailing in the Solis SBT. The difference between Morach's (2011) and the presented results may originate from electric interferences affecting Morach's experiments. Her measurements exhibit a significantly higher background noise, which can amplify the signal and hence bias the results, in particularly for small sediment with low amplitudes in the range of the detection threshold.

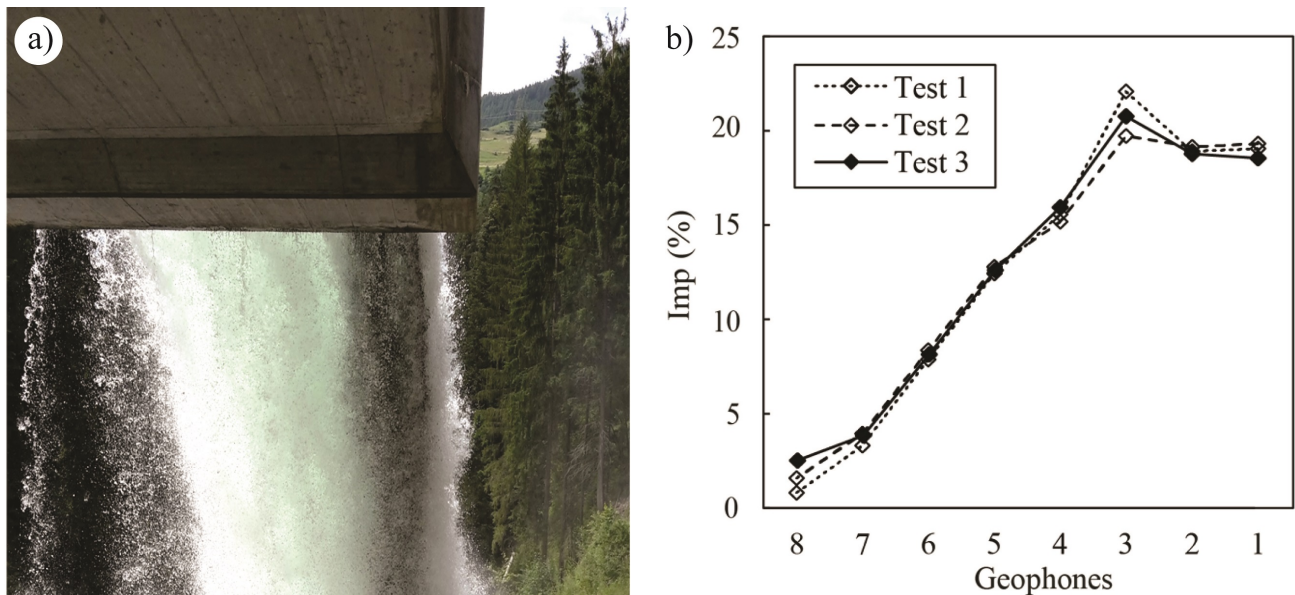


Figure 7. a) SBT outlet with clear water and black sediment jet on the right side during the test run 3 with $D=0-400$ mm, view in flow direction from underneath the SBT outlet; b) relative number of impulses registered by each geophone plate.

Table 2. Grain size and K_b based on the field calibration.

	Test 1	Test 2	Test 3
D (mm)	16-32	32-63	0-400
d_m (mm)	25 ± 2	45 ± 4	210 ± 20
K_b (1/kg)	6.80	13.6	5.05

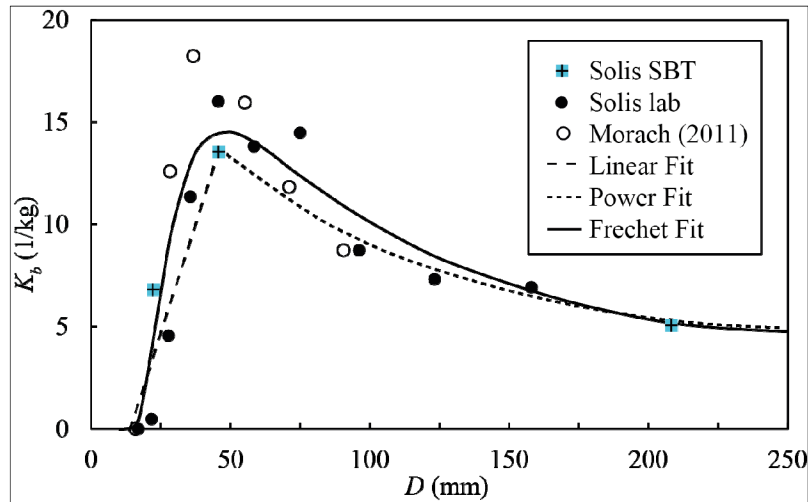


Figure 8. K_b versus D for the laboratory and field calibration as well as Morach's (2011) results with a bimodal correlation as well as a Frechet fit for the field data.

The data sets from the field and laboratory calibrations were fitted with (I) a bimodal function containing a linear raising (Equation [2a]) and a power law falling limb (Equation [2b]) and (II) a Frechet distribution (Equation [3]), which was already successfully applied by Wyss (Wyss, 2016; Wyss et al., 2016a, b), where c_1 to c_8 are the coefficients determined for each data set (Table 3).

$$K_b = c_1 \cdot D + c_2 \quad [2a]$$

$$K_b = c_3 \cdot D^{c_4} \quad [2b]$$

$$K_b = c_5 \cdot c_6 \cdot c_7 \cdot c_8^{c_7} \left[1 - e^{-\left(\frac{c_8}{D}\right)^{c_7}} \right]^{c_6-1} \cdot D^{(c_7+1)} \cdot e^{-\left(\frac{c_8}{D}\right)^{c_7}} \quad [3]$$

The K_b values to be used for the typical Solis SBT operating conditions, i.e. outside the calibration tests presented herein, were determined by applying a weighted averaging method based on the GSD of the Solis natural sediment (Table 1) using Eqs. [2a], [2b] and [3] with the corresponding coefficients c_1 to c_8 . Considering only the expected GSD at Solis, K_b values determined from the field calibration vary from 9.6 to 10.8 1/kg, which are comparable to those obtained from the laboratory calibration tests (Table 3). The K_b values determined from Morach's (2011) test data are 10 to 20% higher than those from the other two calibrations (Table 3). This difference is attributed to different impulse threshold values among the calibration tests, i.e. 0.2 V for Morach (2011) and 0.1 V for the other two calibrations. Therefore, these results are only used for a plausibility check confirming the field results. Finally, $K_b = (9.6+10.8)/2 = 10.2$ 1/kg, i.e. the averaged K_b from the field calibration, is used for the Solis SBT SPGS.

The bimodal (Eqs. [2a] and [2b]) and the Frechet fits (Eq. [3]) were also applied to the GSD of Test 3 (Figure 6a) to verify the applicability of the weighted averaging method. The calculated K_b values for Test 3 are 5.1 1/kg and 5.8 1/kg and deviate by only 1 and 15%, respectively, from $K_b = 5.05$ 1/kg directly obtained from the field calibration (Table 2). This result confirms that for a given GSD the method using either bimodal or Frechet fits results in a good prediction of K_b .

Table 3. Bimodal and Frechet fits for the field and laboratory calibration as well as for Morach's (2011) data describing the correlation between K_b and D with the corresponding coefficients of determination and resulting weighted averaged K_b for the expected GSD in Solis (Table 1)

	Bimodal fit						Frechet fit						
	Linear fit			Power fit			K_b	c_5	c_6	c_7	c_8	R^2	K_b
	c_1	c_2	R^2	c_3	c_4	R^2	(1/kg)						(1/kg)
Field	0.5	-6.7	0.92	175	-0.66	1.0	9.6	15'000	0.044	1.85	48	0.93	10.8
Lab	0.6	-11.4	0.98	344	-0.79	0.90	10.1	7'800	0.054	2.77	43	0.98	10.7
Morach	0.9	-13.8	0.99	367	-0.81	0.91	12.2	2'200	0.279	2.4	40	0.99	11.6

The effect of geophone inclination on the calibration coefficient K_b is analyzed by comparing the present laboratory and field data as well as Morach's (2011) data (10° inclination) with the data from Rickenmann et al. (2013) (approximately 0° inclination). In Figure 9 the K_b values of the particles with $D > 16$ mm are plotted as a function of average flow velocities. Rickenmann et al. (2013) data feature a decreasing trend with increasing flow velocity, whereas the rest of the data does not show a velocity dependency. This difference can be attributed to the geophone inclination. However, to support this hypothesis, further tests with different relative grain submergence, grain size, sediment transport rates and impulse counting thresholds values are required.

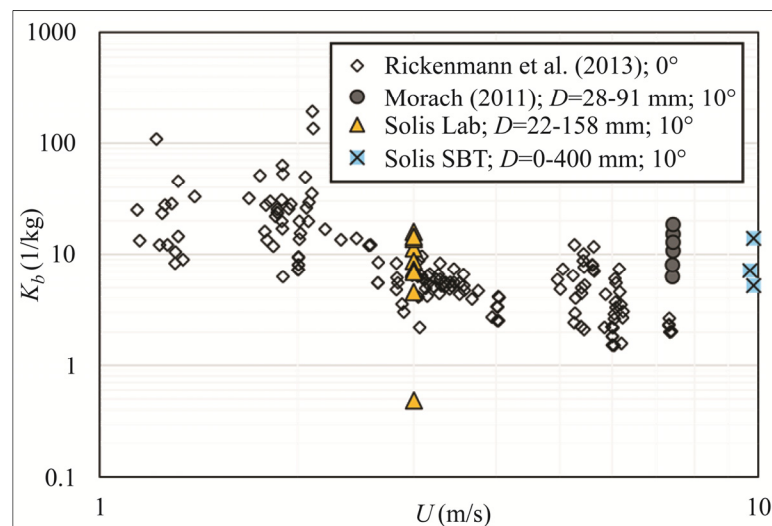


Figure 9. K_b as a function of mean flow velocity and geophone inclination; data from Rickenmann et al. (2013), Morach (2011) and from laboratory as well as field calibration experiments for the Solis SBT

4 CONCLUSIONS

A Swiss plate geophone system (SPGS) at Solis SBT was calibrated with three sediment size classes under field conditions. This system differs from the typical SPGS applications by an inclination of 10° against the bottom slope. The results are compared with those from two laboratory calibration tests with the same inclination and literature data for approximately 0° inclination slightly varying depending on the river bed slope. The calibration coefficient K_b obtained from the laboratory and field tests did not show any dependency on averaged flow velocity, while the literature values indicate a decreasing trend with increasing flow velocity. This leads to a general conclusion that the geophone inclination affects K_b . A comparison between the laboratory and field tests reveals that K_b varies with particle size, relative particle submergence and hydraulic conditions. Therefore, a field calibration of the SPGS is recommended to limit the uncertainties in bed load transport prediction. Furthermore, the weighted averaging method based on GSD is recommended to determine K_b .

The presented results are site-dependent and are only valid for the Solis SBT conditions and SPGS configuration. Based on the results of the laboratory and field calibrations, $K_b = 10.2$ 1/kg was found for the geophone system at the Solis SBT. To improve the accuracy of the calibration, further tests with more uniform and mixed sediment samples and a range of sediment transport rates similar to typical SBT operation are needed.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank *swisselectric research*, *cemsuisse*, the Swiss Federal Office of Energy SFOE and Fondazione Lombardi Ingegneria for the financial support. Further thanks go to the staff of the electric power company of Zurich ewz and of the Swiss Federal Railways SBB for their purposeful and straightforward support during the planning and execution of this research project. This project is embedded into the framework of the Swiss Competence Center of Energy Research – Supply of Electricity (SCCER-SoE).

REFERENCES

- Auel, C., Boes, R., Ziegler, T. & Oertli, C. (2011). Design and Construction of the Sediment Bypass Tunnel at Solis. *Hydropower and Dams* 3, 62-66.
- Boes, R.M., Auel C., Hagmann, M. & Albayrak I. (2014). Sediment Bypass Tunnels to Mitigate Reservoir Sedimentation and Restore Sediment Continuity. *Proceedings of International River flow Conference* (A. J. Schleiss et al., eds.), Lausanne, Switzerland, 221-228.
- Chiari, M., Berkold, M., Jäger, G. & Hübel, J. (2016). Geschiebemesstelle im Suggadinbach (Vorarlberg) ('Bedload monitoring station at Suggadinbach (Vorarlberg)'). *Feststofftransport und Sedimentmanagement* (Sediment transport and sediment management'). *Verien der Diplomingenieure der Wildbach und Lawinenverbauung Österreichs*, 50-58.
- Facchini, A., Siviglia, A. & Boes, R.M. (2015). Downstream Morphological Impact of a Sediment Bypass Tunnel - Preliminary Results and Forthcoming Actions. *Proceedings of First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zurich, Switzerland: 137-146.
- Fehr, R. (1987). *Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen* ('Bed load analysis of Mountain Rivers'). VAW-Mitteilungen 92 (D. Vischer, ed.), VAW ETH Zurich, Switzerland.
- Fukuda, T., Yamashita, K., Osada, K. & Fukuoka, S. (2012). Study on Flushing Mechanism of Dam Reservoir Sedimentation and Recovery of Riffle-Pool in Downstream Reach By a Flushing Bypass Tunnel. *Proceedings of International Symposium on Dams for a changing World*, Kyoto, Japan.
- Fukuroi, H. (2012). Damage from Typhoon Talas to Civil Engineering Structures for Hydropower and the Effect of the Sediment Bypass System at Asahi dam. *Proc. International Symposium on Dams for a changing world*, Kyoto.
- Hagmann, M., Albayrak, I. & Boes, R.M. (2015). Field Research: Invert material resistance and sediment transport measurements. *Proc. First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. M. Boes, ed.), ETH Zurich, Switzerland: 123-136.
- Jacobs, F. & Hagmann, M. (2015). Sediment Bypass Tunnel Runcahez: Invert Abrasion 1995-2014. *Proceedings of First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. M. Boes, ed.), Zurich, Switzerland: 211-222.
- Kantoush, S.A. & Sumi, T. (2010). *River Morphology and Sediment Management Strategies for Sustainable Reservoir in Japan and European Alps*. Annuals of Disaster Prevention Research Institute.
- KEPCO (2012). *Sediment Bypass System at Asahi Dam*, Powerpoint Presentation 12.06.2012, Japan. The Kansai Electric Power Co. (KEPCO).
- Kondolf, G.M., Gao, Y., Annandale, G.W., Morris, G.L., Jiang, E., Zhang, J., Cao, Y., Carling, P., Fu, K., Guo, Q., Hotchkiss, R., Peteuli, C., Sumi, T., Wang, H.W., Wang, Z., Wie, Z., Wu, B., Wu, C. & Yang, C.T. (2014). Sustainable Sediment Management in Reservoirs and Regulated Rivers: Experiences from Five Continents. *Earth's Future* 2(5), 256-280.
- Koshiha, T., Auel, C., Tsutsumi, D., Kantoush, S. & Sumi, T. (2017). Application of an Impact Plate - Bedload Transport Measuring System for High-Speed Flows. *International Journal of Science and Research - Special Issue from the International Symposium on River Sedimentation*, Submitted.
- Martin, E.J., Doering, M. & Robinson, C.T. (2015). Ecological Effects of Sediment Bypass Tunnels. *Proceedings of First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zurich, Switzerland, 147-156.
- Morach, S. (2011). Geschiebemesung mittels Geophonen bei hohen Fließgeschwindigkeiten - Hydraulische Modellversuche ('Bedload transport measurement at high flow velocities - hydraulic model tests'). *Master Thesis*, VAW, ETH Zurich, Switzerland.
- Müller, B. & Walker, M. (2015). The Pfaffensprung Sediment Bypass Tunnel: 95 Years of Experience. *Proc. First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zurich, Switzerland, 247-258.
- Oertli, C. & Auel, C. (2015). Solis Sediment Bypass Tunnel: First Operation Experiences. *Proceedings of First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zurich, Switzerland: 223-234.
- Rickenmann, D. (1997). Sediment Transport in Swiss Torrents. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22(10), 937-951.

- Rickenmann, D. & McArdell, B.W. (2007). Continuous Measurement of Sediment Transport in the Erlenbach Stream Using Piezoelectric Bedload Impact Sensors. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(9), 1362-1378.
- Rickenmann, D. & McArdell, B.W. (2008). Calibration of Piezoelectric Bedload Impact Sensors in the Pitzbach mountain stream. *Geodinamica Acta*, 21(1-2), 35-51.
- Rickenmann, D. & Fritschi, B. (2010). Bedload Transport Measurements Using Piezoelectric Impact Sensors and Geophones. *Proceedings International Bedload-Surrogate Monitoring Workshop*, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2010-5091.
- Rickenmann, D., Turowski, J. M., Fritschi, B., Klaiber, A. & Ludwig, A. (2012). Bedload Transport Measurements at the Erlenbach Stream with Geophones and Automated Basket Samplers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(9), 1000-1011.
- Rickenmann, D., Turowski, J.M., Fritschi, B., Wyss, C., Laronne, J., Barzilai, R., Reid, I., Kreisler, A., Aigner, J., Seitz, H. & Habersack, H. (2013). Bedload Transport Measurements with Impact Plate Geophones: Comparison of Sensor Calibration in Different Gravel-Bed Streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(7), 928-942.
- Rickenmann, D., Wyss, C.R., Turowski, J.M., Weitbrecht, V. & Boes, R.M. (2014). Geschiebemessungen mit Geophonsensoren: Ableitung der Kalibrierungsfunktion durch Messungen im Feld und Labor. ('Bedload transport measurement by geophon sensors: derivation of the calibration function by field and laboratory measurements'). *Proceedings Wasserbausymposium "Wasserbau und Flussbau im Alpenraum"*, VAW-Mitteilung 227, ETH Zurich, Switzerland, 355-366.
- Sumi, T., Okano, M. & Takata, Y. (2004). Reservoir Sedimentation Management with Bypass Tunnels in Japan. *Proceedings of 9th International Symposium on River Sedimentation*, Yichang, 1036-1043.
- Syvitski, J. P.M., Vörösmarty, C.J., Kettner, A.J. & Green, P. (2005). Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean. *Science*, 308(5720), 376-380.
- VAW (2010). *Geschiebumeleitstollen Solis - Hydraulische Modellversuche ('Bedload bypass tunnel Solis - Hydraulic modell investigation')*. VAW Bericht 4269, ETH Zürich, Switzerland.
- Wyss, C.R., Rickenmann, D., Fritschi, B., Weitbrecht, V. & Boes, R.M. (2014). Bedload Grain Size Estimation from the Indirect Monitoring of Bedload Transport with Swiss Plate Geophones at the Erlenbach Stream. *Proceedings of River Flow 2014*, Lausanne, 1907-1912.
- Wyss, C.R., Rickenmann, D., Fritschi, B., Turowski, J.M., Weitbrecht, V. & Boes R.M. (2015). Measuring Bedload Transport Rates by Grain-Size Fraction Using the Swiss Plate Geophone Signal at the Erlenbach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(5), 1-11.
- Wyss, C.R. (2016). Sediment Transport Measurements with Geophone Sensors. VAW-Mitteilungen 234 (R. M. Boes, ed.), Also Published as a *Doctoral Thesis*. Nr. 23353, ETH Zurich. ETH Zurich, Switzerland.
- Wyss, C.R., Rickenmann, D., Fritschi, B., Turowski, J.M., Weitbrecht, V. & Boes R.M. (2016a). Laboratory Flume Experiments With the Swiss Plate Geophone Bed Load Monitoring System: 1. Impulse Counts and Particle Size Identification. *Water Resources Research*, 52(10), 7744-7759.
- Wyss, C.R., Rickenmann, D., Fritschi, B., Turowski, J.M., Weitbrecht, V., Travaglini, E., Bardou, E. & Boes, R.M. (2016b). Laboratory Flume Experiments with The Swiss Plate Geophone Bed Load Monitoring System: 2. Application to field sites with direct bed load samples. *Water Resources Research*, 52(10), 7760-7778.