



Schlussbericht 30.11.2015

---

## **Optimierung verschleissresistenter Materialien an Sedimentumleitstollen und wasserbaulichen Anlagen (Teil I)**

Optimizing hydroabrasive-resistant materials at  
sediment bypass tunnels and hydraulic  
structures (Part I)

---



Auslauf des Sedimentumleitstollens Solis (Photo: VAW)



# ETH zürich



Versuchsanstalt für Wasserbau,  
Hydrologie und Glaziologie

**Datum: 30.11.2015**

**Ort: Bern**

**Auftraggeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Wasserkraft  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Kofinanzierung:**

cemsuisse – Verband der Schweizerischen Cementindustrie, CH-3001 Bern  
ewz - Kraftwerke Mittellanden, CH-7411 Sils i. D.  
Fondazione Lombardi, CH-6648 Minusio  
swisselectric research, CH-3001 Bern

**Auftragnehmerin:**

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

**Autoren:**

Michelle Hagmann, VAW, [hagmann@vaw.baug.ethz.ch](mailto:hagmann@vaw.baug.ethz.ch)  
Dr. Ismail Albayrak, VAW, [albayrak@vaw.baug.ethz.ch](mailto:albayrak@vaw.baug.ethz.ch)  
Prof. Dr. Robert Boes, VAW, [boes@vaw.baug.ethz.ch](mailto:boes@vaw.baug.ethz.ch)

**BFE-Bereichsleitung:**

Dr. Michael Moser, [michael.moser@bfe.admin.ch](mailto:michael.moser@bfe.admin.ch)

**BFE-Programmleitung:**

Dr. Klaus Jorde, [klaus.jorde@kjconsult.net](mailto:klaus.jorde@kjconsult.net)

**BFE-Vertragsnummer:**

SI/500731-01

**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](mailto:contact@bfe.admin.ch) · [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)



## Zusammenfassung

Hohe Fliessgeschwindigkeiten und Sedimenttransport können an Sedimentumleitstollen (Sediment Bypass Tunnels, SBTs) und anderen Wasserbauten beträchtliche Verschleisschäden und hohe Kosten verursachen. Im vorliegenden Projekt wurde das Problem der Hydroabrasion mit systematischen Feld- und Laborversuchen untersucht. Die Zusammenhänge zwischen Strömung, Sedimenttransport, Materialeigenschaften und Abrasion wurden in den SBTs Solis, Pfaffensprung und Runcahez in der Schweiz untersucht. Die eingebauten Testfelder aus verschiedenen abrasionsbeständigen Materialien wie Spezialbetone, Basalt, Stahl und Granit wurden mittels mehrerer 3d-Laserscans vermessen, um die Abrasion zu quantifizieren. Der Abrasionswiderstand von Proben aus den SBTs wurde im Labor bestimmt. Die Abflussbedingungen in den SBTs wurden kontinuierlich überwacht. Der Sedimenttransport wurde im SBT Solis mittels einer Geophon-Anlage und Trübungssonden gemessen. Die Ergebnisse des Projekts werden über [www.vaw.ethz.ch](http://www.vaw.ethz.ch) als Dissertation veröffentlicht. Die Ergebnisse dienen dazu, geeignete Auskleidungsmaterialien zu wählen, ihre Lebensdauer abzuschätzen und wasserbauliche Anlagen unter günstigen hydraulischen Bedingungen zu betreiben. Dies trägt zur wirtschaftlichen und nachhaltigen Nutzung der Wasserkraft bei.

## Résumé

Des grandes vitesses d'écoulement et des sédiments peuvent engendrer des dégâts d'abrasion et des coûts considérables aux galeries de dérivation de sédiments (Sediment Bypass Tunnels, SBTs) et à d'autres structures hydrauliques. Ce problème a été abordé dans le présent projet par des essais systématiques *in-situ* et en laboratoire. Les relations entre les conditions hydrauliques, le transport des sédiments, les propriétés des matériaux et l'abrasion ont été analysées dans les SBTs de Solis, Pfaffensprung et Runcahez en Suisse. Les champs d'essai en différents types de bétons à haute performance, basalte, acier et granite, incorporées dans les SBTs, ont été mesurés par 3d-laser-scanning pour quantifier l'abrasion. La résistance à l'abrasion des échantillons des SBTs a été déterminée en laboratoire. Les conditions hydrauliques ont été surveillées aux trois sites. A Solis, le transport de sédiments a été mesuré en utilisant un système de géophones et des turbidimètres. Les résultats du projet seront publiés dans une thèse de doctorat sur [www.vaw.ethz.ch](http://www.vaw.ethz.ch). Les résultats serviront à choisir des matériaux de revêtement adéquats, estimer leur durée de vie et exploiter les aménagements à des conditions hydrauliques favorables. Ceci contribuera à exploiter le potentiel hydraulique d'une manière économique et durable.

## Abstract

High flow velocities and sediment transport can cause severe hydro-abrasion at Sediment Bypass Tunnels (SBTs) and hydraulic structures leading to high maintenance costs. In the present project the hydro-abrasion problem is addressed by systematic *in-situ* and laboratory investigations. The relationships between hydraulic conditions, sediment transport, material properties and abrasion were investigated in Solis, Pfaffensprung and Runcahez SBTs in Switzerland. The test fields with different abrasion resistant materials, i.e. special concretes, basalt, steel plates and granite, implemented in the SBTs were regularly scanned with a 3D-laserscanner to quantify the abrasion. The abrasion resistance of the samples from the SBTs was determined in the laboratory. The hydraulic conditions were monitored at the SBTs. Sediment transport was measured using a geophone system and turbidimeters at the Solis SBT.. The results of the project will be published as a Doctoral Dissertation on [www.vaw.ethz.ch](http://www.vaw.ethz.ch). The results will serve as a basis to choose suitable invert materials, to estimate their lifetimes and to operate the structures at favourable hydraulic conditions. This contributes to the cost-efficient and sustainable use of hydropower.



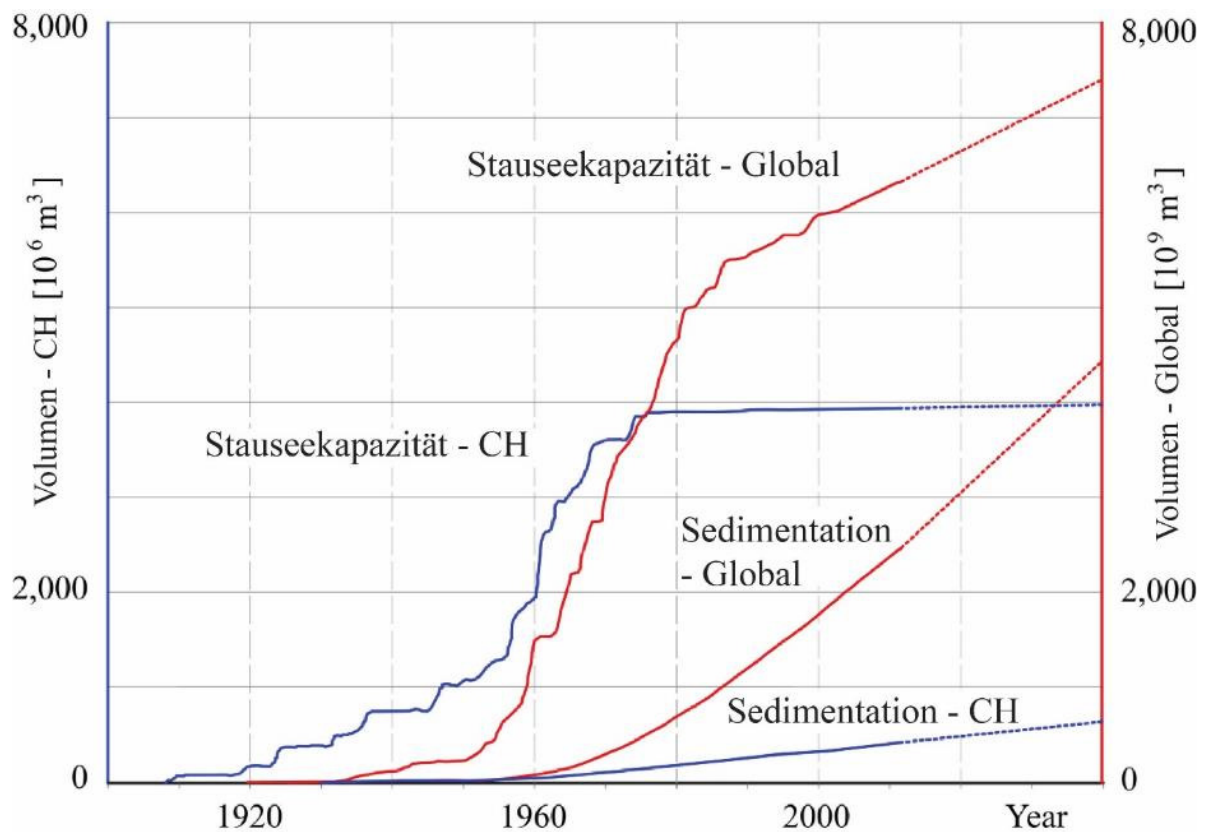
# Inhaltsverzeichnis

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Ausgangslage.....</b>                                      | <b>5</b>  |
| <b>2. Ziel der Arbeit .....</b>                                  | <b>9</b>  |
| <b>3. Vorgehen und Methode .....</b>                             | <b>9</b>  |
| 3.1. In-situ Versuche im SBT Solis .....                         | 9         |
| 3.1.1. Testfelder .....                                          | 9         |
| 3.1.2. Messtechnik .....                                         | 12        |
| 3.2. In-situ Versuche im SBT Pfaffensprung.....                  | 13        |
| 3.3. In-situ Versuche im SBT Runcahez .....                      | 15        |
| 3.4. Laborversuche zur Bestimmung des Abrasionswiderstands ..... | 17        |
| <b>4. Ergebnisse und Diskussion .....</b>                        | <b>18</b> |
| 4.1. In-situ Versuche im SBT Solis .....                         | 18        |
| 4.2. In-situ Versuche im SBT Pfaffensprung.....                  | 21        |
| 4.3. In-situ Versuche im SBT Runcahez .....                      | 23        |
| 4.4. Laborversuche zur Bestimmung des Abrasionswiderstands ..... | 24        |
| 4.5. Erster internationaler SBT-Workshop .....                   | 25        |
| <b>5. Schlussfolgerungen.....</b>                                | <b>26</b> |
| <b>6. Ausblick .....</b>                                         | <b>27</b> |
| 6.1. In-situ Versuche .....                                      | 27        |
| 6.2. Laborversuche .....                                         | 28        |
| 6.3. Abrasionsmodelle.....                                       | 28        |
| 6.4. Empfehlungen und weitere Dokumentation .....                | 28        |
| <b>Referenzen .....</b>                                          | <b>28</b> |
| <b>Anhang .....</b>                                              | <b>31</b> |

# 1. Ausgangslage

Seit Mitte des letzten Jahrhunderts ist weltweit eine grosse Zahl an Talsperren errichtet und in Betrieb genommen worden (Abb.1). Durch den Sedimenteintrag verlandet das Speichervolumen im Laufe der Betriebsdauer. Global beträgt die mittlere Verlandungsrate gemäss verschiedenen Quellen zwischen 0.5 und 2% (White 2001, Schleiss und Oehy 2002, Basson 2009, ICOLD 2009, Schleiss et al. 2010, Sumi und Kantoush 2011, Wisser et al. 2013). Die Sedimentationsrate übersteigt den Kapazitätzuwachs und reduziert das effektiv nutzbare Speichervolumen. Dies führt zu verschiedenen Problemen: es kommt zu Einbussen bei der Energieproduktion, das Hochwasserretentionsvolumen wird kleiner und die Betriebssicherheit wird durch Verlegungen der Betriebsorgane und die verstärkte Abrasion gefährdet. Im Extremfall kann sogar die Stabilität der Sperre gefährdet werden.

Eine nachhaltige Speicherbewirtschaftung ist somit nur mit einem geeigneten Sedimentmanagement möglich und fordert innovative Lösungsansätze.

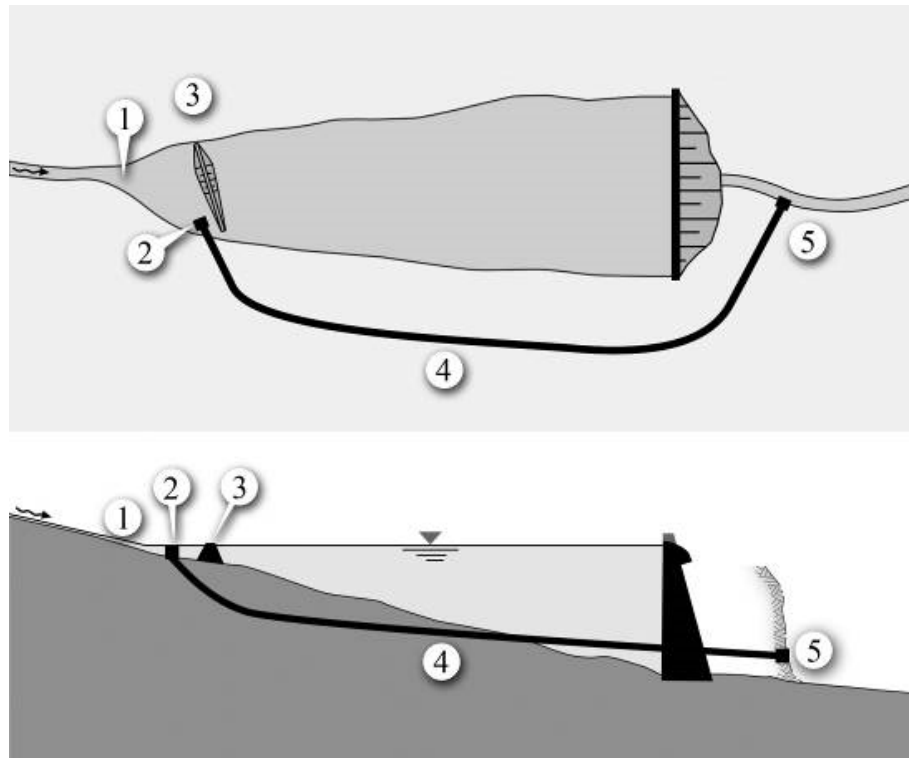


**Abbildung 1:** Entwicklung der globalen Speicherkapazität und des Verlandungsvolumens über die Zeit nach Oehy (2003)

Vor dem Hintergrund des Bevölkerungswachstums, des ansteigenden Wasser und Energieverbrauchs, der steigenden Nachfrage nach Energie aus erneuerbaren Ressourcen und der Klimaveränderung gewinnt der Umgang mit Sedimenten an Stauanlagen an Bedeutung.

Sedimentumleitstollen (englisch: Sediment Bypass Tunnels, SBTs) stellen eine effiziente und nachhaltige Massnahme gegen die Stauraumverlandung dar. Bei hohen Sedimentkonzentrationen im

Zufluss, wird dieser vom Leitbauwerk zum Einlaufbauwerk des SBT gelenkt, durch den SBT um den Speicher geleitet und im Unterlauf wieder in den Fluss eingespeist (Abb. 2). Damit wird nicht nur der Speicher effizient gegen Verlandung geschützt, sondern gleichzeitig die Sedimentdurchgängigkeit wieder hergestellt, was die Ökomorphologie des unterstrom liegenden Gewässerbereichs aufwertet.



**Abbildung 2:** Schema eines Sedimentumleitstollens mit 1) Stauwurzel des Speichers, 2) Einlaufbauwerk, 3) Leitbauwerk, 4) Sedimentumleitstollen, 5) Auslaufbauwerk (VAW, ETH Zürich)

Da vielerorts die Problematik der Speicherverlandung erst langsam in das Bewusstsein der Betreiber von Stauanlagen dringt, und Investitionen in SBT sowie deren Unterhalt kostenintensiv sind, gibt es weltweit bisher nur eine kleine dokumentierte Anzahl solcher Anlagen (Tabelle 1). Die meisten davon befinden sich in der Schweiz oder Japan und wurden innerhalb der letzten 50 Jahre erstellt. Es liegen relativ wenig Erfahrungen bezüglich Planung und Betrieb von SBT vor. Dennoch weisen die bereits bestehenden Anlagen gute Durchleit-Effizienzen auf (Vischer et al. 1997, Fukuroi 2012, Sumi et al. 2012). Es wird erwartet, dass bereits in naher Zukunft die Zahl der SBT markant ansteigen wird und der Bedarf an Empfehlungen für die Bemessung und Materialwahl von Auskleidungen zunimmt.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Sedimentumleitstollen und den meisten übrigen wasserbaulichen Anlagen besteht in der Art der Beanspruchung. Während im Wasserbau viele Bauwerke wie Hochwasserentlastungen, Grundablässe, Baumleitstollen und Tosbecken existieren, die entweder hohen Fließgeschwindigkeiten oder starkem Geschiebetrieb ausgesetzt sind, treten bei SBT beide Beanspruchungen gleichzeitig auf. Analogien ergeben sich für Wildbachsperrn und Spülkanäle von Entsanderanlagen sowie bei Hochwasserentlastungstollen und Stauraumspülungen durch den Grundablass, wo die Abflüsse grosse Fließgeschwindigkeiten aufweisen und zeitweise hohe Sedimentfrachten mit sich führen. Diese Betriebsbedingungen führen zu massivem Verschleiss, der als Hydroabrasion bezeichnet wird.

**Tabelle 1:** Bestehende Sedimentumleitstollen an Talsperren weltweit

|    | Land | Name          | Erbaut | Einzugsgebiet      | Speichervolumen    | Speicherkennziffer |
|----|------|---------------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|
|    |      |               |        | [km <sup>2</sup> ] | [Mm <sup>3</sup> ] | [-]                |
| 1  | CH   | Egschi        | 1949   | 109                | 0.51               | 0.0067             |
| 2  | CH   | Palagnedra    | 1978   | 138                | 4.8                | 0.019              |
| 3  | CH   | Pfaffensprung | 1922   | 390                | 0.17               | 0.0003             |
| 4  | CH   | Rempen        | 1986   | 25                 | 0.48               | 0.003              |
| 5  | CH   | Runcahez      | 1962   | 56                 | 0.44               | 0.006              |
| 6  | CH   | Solis         | 2012   | 878                | 4.1                | 0.0044             |
| 7  | CH   | Ual da Mulin  | 1963   | 25                 | 0.06               | 0.0012             |
| 8  | J    | Asahi         | 1998   | 39                 | 15.5               | 0.194              |
| 9  | J    | Koshiibu      | 2013   | 288                | 58.0               | ~0.23              |
| 10 | J    | Matsukawa     | im Bau | 60                 | 7.4                | n.a.               |
| 11 | J    | Miwa          | 2004   | 311                | 30.0               | ~0.065             |
| 12 | J    | Nunobiki      | 1908   | 10                 | 0.76               | n.a.               |
| 13 | F    | Jotty         | 1949   | n.a.               | 0.7                | n.a.               |
| 14 | F    | Rizzanase     | 2012   | n.a.               | 1.3                | n.a.               |

Speicherkennziffer = Speichervolumen / Jahresabflussfracht

Aufgrund der spärlichen Erfahrungen im Umgang mit Hydroabrasion existieren weder für die Bemessung im Allgemeinen noch für die Auskleidung von SBT im Speziellen generell gültige Empfehlungen (Auel und Boes 2011). Betreiber von wasserbaulichen Anlagen mit starkem Hydroabrasions-Verschleiss sind gezwungen, regelmässig neue Auskleidungskonzepte testweise einzubauen, zu sanieren und wieder zu ersetzen, oft jedoch ohne die gewünschte Widerstandsfähigkeit erzielen zu können (Abb. 3). Der Verschleiss ist oftmals nach wie vor hoch und verursacht teure Revisionen (Kataoka 2000, Auel und Boes 2011, Boes et al. 2014, Hagmann et al. 2015).

Mit den Klimaveränderungen werden nicht nur eine Zunahme von Spitzenabflüssen, sondern auch grössere Sedimentfrachten erwartet, was sich im Schweizer Alpenraum, insbesondere in vergletscherten Einzugsgebieten, bereits manifestiert. Die bisher nicht zufriedenstellend gelöste Problematik der Hydroabrasion im Wasserbau ganz allgemein und an SBT in Speziellen wird sich folglich weiter intensivieren (KOHS 2007). Um diesem Bedarf Rechnung zu tragen, wurde die hier vorgestellte Forschungsarbeit initiiert.

Da die im Feld (unter Prototypbedingungen) vorkommenden Prozesse nur bedingt im Labor simuliert werden können, wurde für diese Forschungsarbeit der Fokus auf in-situ Versuche gelegt.



**Abbildung 3:** a) Abradierte Betonsohle und b) beschädigte Basaltauskleidung im Einlauf des SBT Runcahez, GR, Schweiz (VAW, ETH Zürich), c) mehrere Meter tiefe Abrasion im SBT Palagnedra, TI, Schweiz (VAW, ETH Zürich), d) Abrasionsrinne in der Granitauskleidung im SBT Egschi, GR, Schweiz (sopr AG)

## 2. Ziel der Arbeit

Das Ziel der Forschungsarbeit besteht darin, die Zusammenhänge zwischen Beanspruchung (Abflusszustand, Sedimenttransport, Sedimenteigenschaften), Materialeigenschaften und Abrasion (Schadensarten und Ausmass) anhand von Feldversuchen zu untersuchen und zu quantifizieren.

Zusätzlich wird untersucht, unter welchen Bedingungen Laborversuche die *in-situ*-Prozesse der Hydroabrasion abzubilden vermögen. Ziel ist, mittels Hydroabrasionsversuchen im Labor einerseits Verschleissraten geplanter Anlagen abzuschätzen und andererseits das unter den gegebenen Umständen widerstandsfähigste und/ oder wirtschaftlichste Material ermitteln zu können.

Mit den Datensätzen aus den Felduntersuchungen sollen bestehende Abrasionsmodelle soweit möglich kalibriert werden. Es sollen Angaben zur Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Materialien unter Berücksichtigung ihrer Lebensdauer ermittelt werden.

Für die praktische Anwendung soll ein Leitfaden zusammengestellt werden, welcher Empfehlungen zu Entwurf, Bemessung, Konstruktion, Materialwahl, Betriebsregime und Unterhaltskonzept für SBTs enthält. Dies soll Planer und Betreiber von Anlagen, die starkem Hydroabrasiv-Verschleiss ausgesetzt sind, dabei unterstützen, wirtschaftliche und nachhaltige Lösungen zu finden. Damit soll letztlich ein Beitrag zur nachhaltigen, sicheren und effizienten Energieversorgung aus Wasserkraft geleistet werden.

## 3. Vorgehen und Methode

### 3.1. In-situ Versuche im SBT Solis

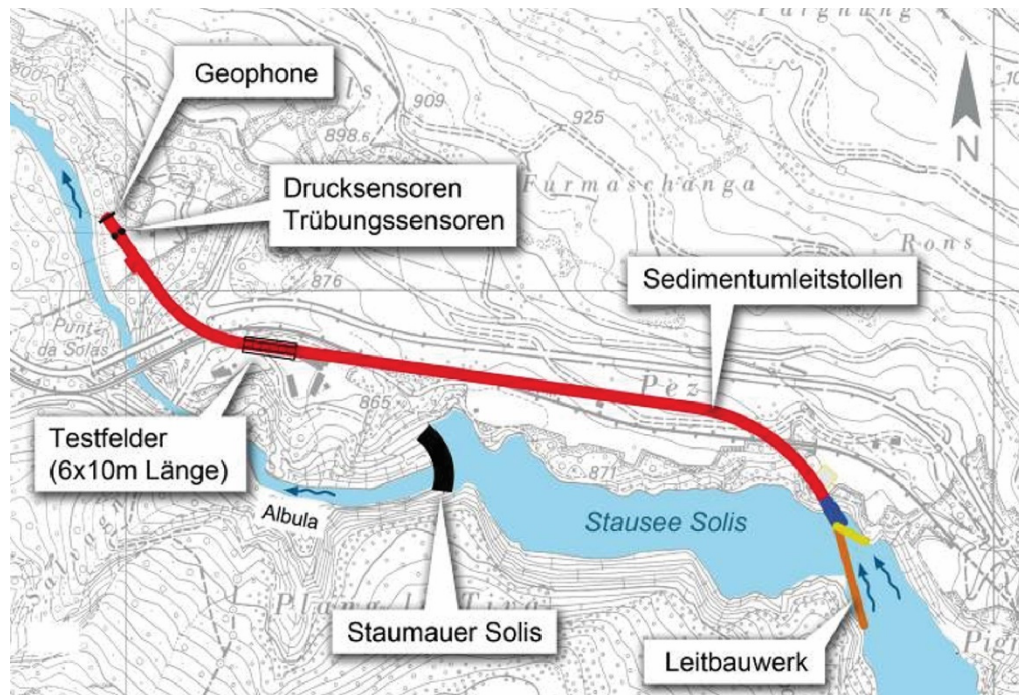
Der SBT Solis befindet sich an der gleichnamigen Stauanlage an der Albula zwischen Tiefencastel und Thusis im Kanton Graubünden. Im Jahr 2012, als der SBT Solis noch im Bau war, konnte ein Versuchsaufbau bestehend aus einer Messinstallation und Materialtestfeldern installiert werden (Abb. 4 und 5). Damit kann der Widerstand verschiedener Materialien unter realen Betriebsbedingungen untersucht und das Prozessverständnis verbessert werden. Der Stollen ist rund 1'000 m lang, weist ein Gefälle von 1.9% auf und wird durchschnittlich einmal jährlich in Betrieb genommen, um sedimentreiches Wasser während Hochwasserereignissen abzuführen. Im SBT Solis treten Flissgeschwindigkeiten bis zu 11 m/s auf. Der mittlere Durchmesser der Geschiebekomponenten beträgt rund 6 cm.

#### 3.1.1. Testfelder

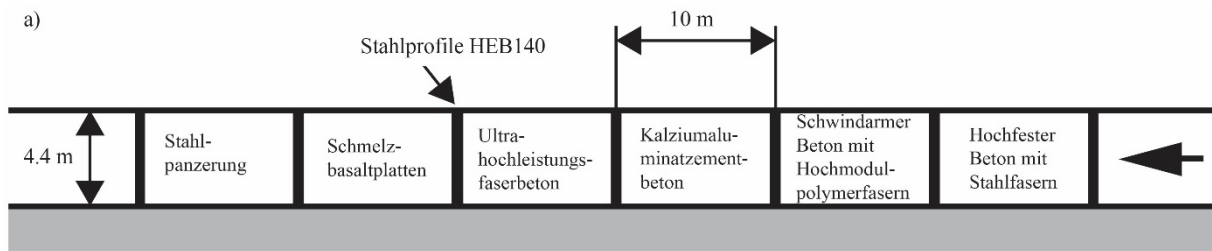
Bereits im Jahr 2011 wurden Vorversuche für den Einsatz einer Geophon-Anlage zur Erfassung des Geschiebetransportes durchgeführt (Rickenmann und Fritschi 2010, Morach 2011). Anschliessend wurde die Geophon-Anlage konstruiert und das Messsystem entwickelt. Mit Unterstützung eines Beton-Spezialisten wurde die Materialisierung der Testfelder bestimmt. Grundsätzlich sollte ein möglichst grosses Spektrum an Materialien getestet werden, wobei die finanziellen Möglichkeiten und das Versagensrisiko, vor allem bei unkonventionellen Materialien wie Holz oder Kautschuk, die Materialwahl einschränkte. Schliesslich fiel die Wahl auf vier verschiedenen Betone, eine Schmelzbasaltplästerung und eine Stahlpanzerung (Abb. 6 und Tabelle 2). Wie bei Jacobs et al. (2001) wurden zwischen den Testfeldern Stahlprofile eingebaut, mit der Absicht, die Ausbreitung von zukünftigen Schäden von einem Testfeld ins nächste zu begrenzen (Abb. 6).



**Abbildung 4:** Der Auslauf des SBT Solis und sein Standort (VAW, ETH Zürich)



**Abbildung 5:** Übersicht über den SBT Solis mit den von der VAW installierten Messsystemen und Testfeldern



**Abbildung 6:** a) Schematische Darstellung der im SBT Solis eingebauten Testfelder, b) C50/60 mit 3 kg/m<sup>3</sup> HMPF und Schwindreduktionsmittel, c) Schmelzbasaltplatten, d) Stahlpanzerung mit selbstverdichtendem Beton verfüllt (VAW, ETH Zürich)

**Tabelle 2:** In den Testfeldern des SBT Solis eingebaute Materialien mit Einbaudicken und Festigkeitskennwerten

| Material                                                                             | Dicke/ Geometrie                  | Druckfestigkeit                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Normale Auskleidung:<br>C70/85 mit 45 kg Stahlfasern/m <sup>3</sup>                  | d = 0.3 m                         | $f_{cm,28d} = 101 \text{ MPa}$     |
| C55/67 mit 60 kg Stahlfasern/m <sup>3</sup>                                          | d = 0.3 m                         | $f_{cm,28d} = 79 \text{ MPa}$      |
| C50/60 mit 3 kg/m <sup>3</sup> Hoch-Modul-Polymer-Fasern und Schwindreduktionsmittel | d = 0.3 m                         | $f_{cm,28d} = 85 \text{ MPa}$      |
| Aluminat-Zementbeton                                                                 | d = 0.15 m                        | $f_{cm,28d} = 86 \text{ MPa}$      |
| Ultrahochleistungsfaserbeton                                                         | d = 0.08 m                        | $f_{cm,28d} = 133 \text{ MPa}$     |
| Schmelzbasaltplatten                                                                 | 200 * 200 * 50 mm                 | $f_{cm,28d} = 300-450 \text{ MPa}$ |
| Stahlpanzerung mit selbst verdichtendem Beton verfüllt                               | S235, 20 mm<br>SVB C35/45, 280 mm | $f_y = 235 \text{ MPa}$            |



### 3.1.2. Messtechnik

Die hydraulischen Betriebsbedingungen sowie der Sedimenttransport werden grundsätzlich im Minutenintervall aufgezeichnet. Die Abflusstiefe wird mittels Drucksensoren ("PR 26W", Keller AG, Winterthur, Schweiz), die in Aussparungen in den Tunnelwänden installiert wurden, gemessen. Der Schwebstoffgehalt wird mit Trübungssensoren ("Turbimax W CUS41", Endress + Hauser, Reinach, Schweiz) erfasst. Der Geschiebetransport wird mittels einer Geophon-Messanlage überwacht. Diese Anlage wurde an der VAW auf Grundlage des „Swiss plate geophone system“ der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL (Rickenmann et al. 2012, 2014) konstruiert. Ausserdem stellt das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) als Betreiberin des SBT der VAW die Messdaten der Wasserstände im Stausee, die Position bzw. die Öffnungshöhe der Einlaufschützen, sowie die Abflusstiefe und die Fliessgeschwindigkeit im SBT wenige Meter oberstrom der Geophon-Anlage zur Verfügung. Die Abflusstiefe und die Fliessgeschwindigkeit werden mittels Radar ("RQ 30", Sommer Messtechnik, Koblach, Österreich) gemessen.

Der Abfluss wird ausgehend vom Seepiegel und der Position der Einlaufschütze berechnet, zusätzlich basierend auf den Druckmessungen bestimmt und schliesslich mit der Radarmessung sowie den Ergebnissen aus Laborversuchen an der VAW (Auel *et al.* 2010) verglichen.

Die Technologie der Geophone zur Erfassung des Geschiebetransports wurde an der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) massgeblich entwickelt (Rickenmann und Fritschi 2010). Es handelt sich dabei um eine indirekte Messung des Geschiebetransports. Dafür werden in die Sohle eines Kanals elastisch gelagerte Stahlplatten eingebaut, an deren Unterseite ein Geophon (Beschleunigungsmessgerät) befestigt ist. Bei Sedimenttransport werden die Platten durch die Sedimentkörner zu Schwingungen angeregt, die durch die Sensoren registriert werden.

Die WSL setzt Geophone in Gebirgsbächen ein, wo normalerweise Abflusstiefen von wenigen Zentimetern bis Dezimetern und Fliessgeschwindigkeiten bis einige m/s herrschen. Im SBT Solis treten aber andere Abflussbedingungen auf. In Vorversuchen wurde das Verhalten der Geophone unter schiessendem Abfluss und Fliessgeschwindigkeiten bis zu 7 m/s untersucht (Morach 2011). Dabei wurde festgestellt, dass eine Neigung des Geophons von 10° gegenüber der Stollensohle zu deutlich besseren Messresultaten führt. Für den Einsatz im SBT Solis wurde 2011 darum erstmals eine geneigte Geophon-Anlage entwickelt, konstruiert und eingebaut (Abb. 7).

Zur Überprüfung der Robustheit des Messsignals wurden standardisierte Fallversuche mit einer mit Kautschuk umhüllten Stahlkugel durchgeführt. Unmittelbar nach dem Einbau der Geophon-Anlage im Jahre 2012 fand dieser Test erstmals statt und wurde im November 2014 wiederholt. Obwohl die Anlage mittlerweile schon einige Gebrauchsspuren aufweist, deuten die Auswertungen darauf hin, dass das Messsignal im Bereich des natürlichen Geschiebetransportes nicht wesentliche Änderungen aufweist.

Im Frühjahr 2013 wurden Laborversuche für die Kalibrierung der Geophon-Anlage durchgeführt. Da die im Feld herrschenden Abflussbedingungen (Fliessgeschwindigkeiten bis 11 m/s und Abflusstiefen bis 3.5 m) im Labor nicht modelliert werden können und die Kalibrierung von standort-spezifischen Faktoren abhängt, ist die Labor-Kalibrierung der Geophon-Anlage ungenau. Im Rahmen des Projekts 'Optimierung verschleissresistenter Materialien an Sedimentumleitstollen und wasserbaulichen Anlagen (Teil II)', soll die Kalibrierung der Geophon-Anlage mittels Feldversuch verbessert werden. Danach sollen die bisher im SBT Solis registrierten Geophon-Messdaten erneut ausgewertet werden.

Die Topographie der Stollensohle wird nach jedem messbaren Ereignis mit einem 3D-Laser Scanner aufgenommen. Durch Vergleich solcher Aufnahmen wird die Abrasion bestimmt.



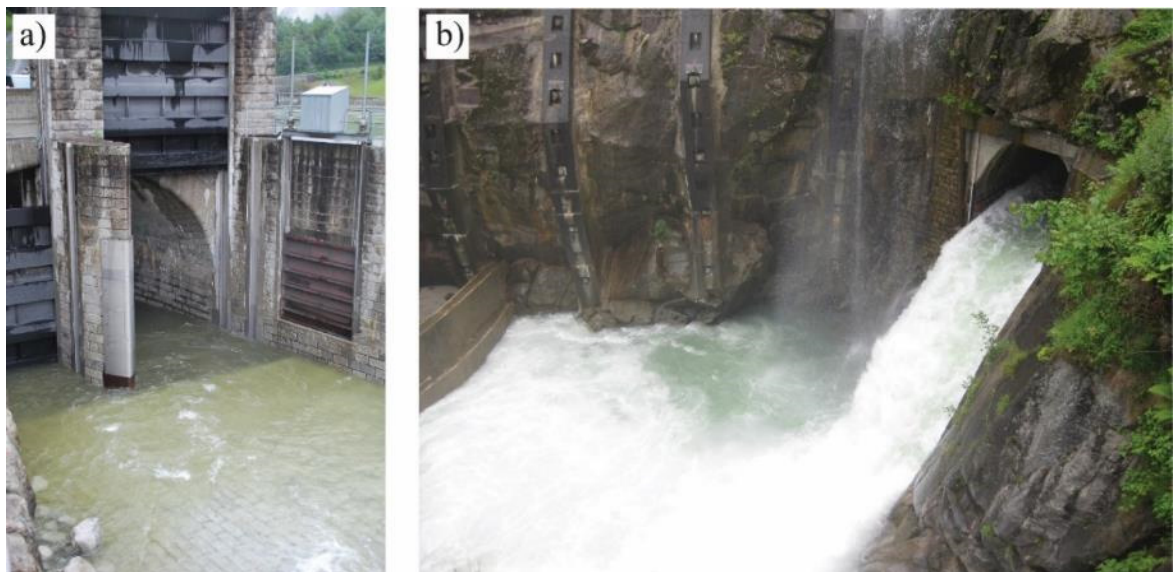
**Abbildung 7:** Geophon-Anlage im SBT Solis unmittelbar nach dem Einbau 2012 (VAW, ETH Zürich)

### 3.2. In-situ Versuche im SBT Pfaffensprung

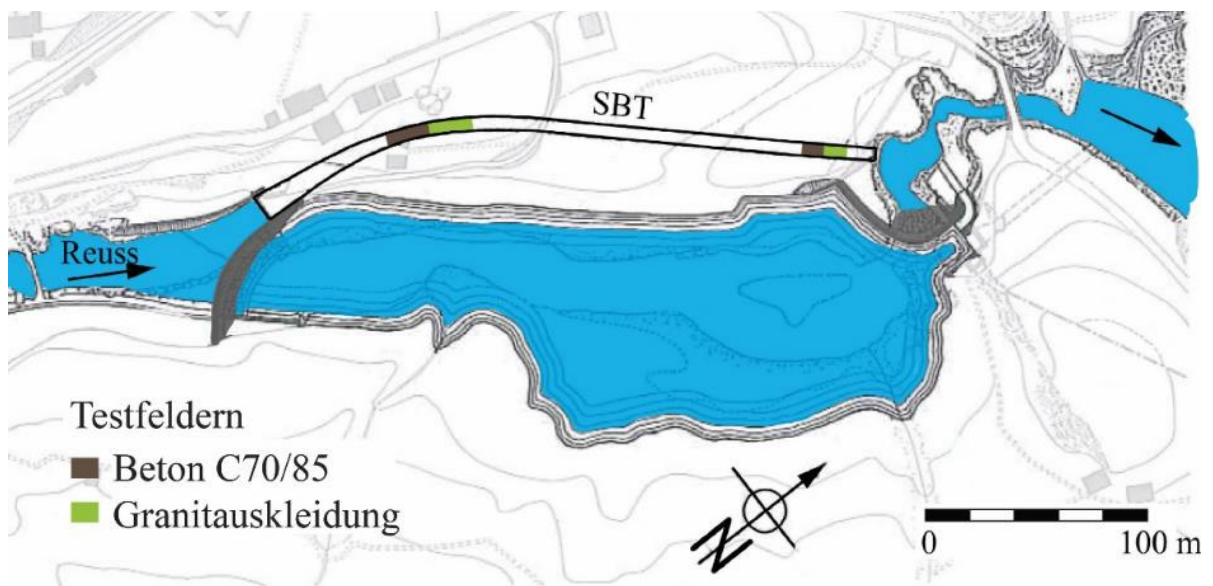
Der SBT Pfaffensprung wurde 1922 im Kanton Uri beim gleichnamigen Ausgleichsbecken an der Reuss bei Wassen erbaut. Der Einlauf dieses SBT (Abb. 8a) liegt beim Einlauf der Reuss ins Ausgleichsbecken. Der SBT ist 280 m lang und verläuft in der linksufrigen Talflanke (Abb. 9). Er mündet unterstrom der Staumauer in die Reuss (Abb. 8b). Dieser SBT ist normalerweise über 100 Tage pro Jahr in Betrieb, wenn der Abfluss in der Reuss den mittleren Abfluss überschreitet. Im SBT treten Fließgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s auf. Der mittlere Durchmesser der Geschiebekomponenten wird auf 25 cm und die jährlich transportierte Geschiebemenge auf 90'000 m<sup>3</sup> geschätzt.

In den Wintern 2011/12 und 2012/13 wurden 10 m lange Testfelder im Bereich der Kurve und nahe des Auslaufs des SBT erstellt (Abb. 9). Die Testfelder bestehen aus Granit-Pflasterung oder hochfestem Beton mit oder ohne Stahlfasern (Tab. 3).

Die hydraulischen Betriebsbedingungen werden mittels Messung der Wasserspiegellage nahe des Auslaufs überwacht. Dafür wurde in der Stollenfirste eine abwärts messende Radarsonde montiert (*Vegapuls 54K*, von Vega, Pfäffikon, Schweiz). Die Abrasion an der Stollensohle wird mittels 3d-Laserscans, die jeden Winter durchgeführt werden, bestimmt. Dafür wird ein *Z+F Imager 5006h* (Zoller + Fröhlich, Wangen im Allgäu, Deutschland) eingesetzt.



**Abbildung 8:** a) Einlauf und b) Auslauf des SBT Pfaffensprung (Bilder: VAW, ETH Zürich)



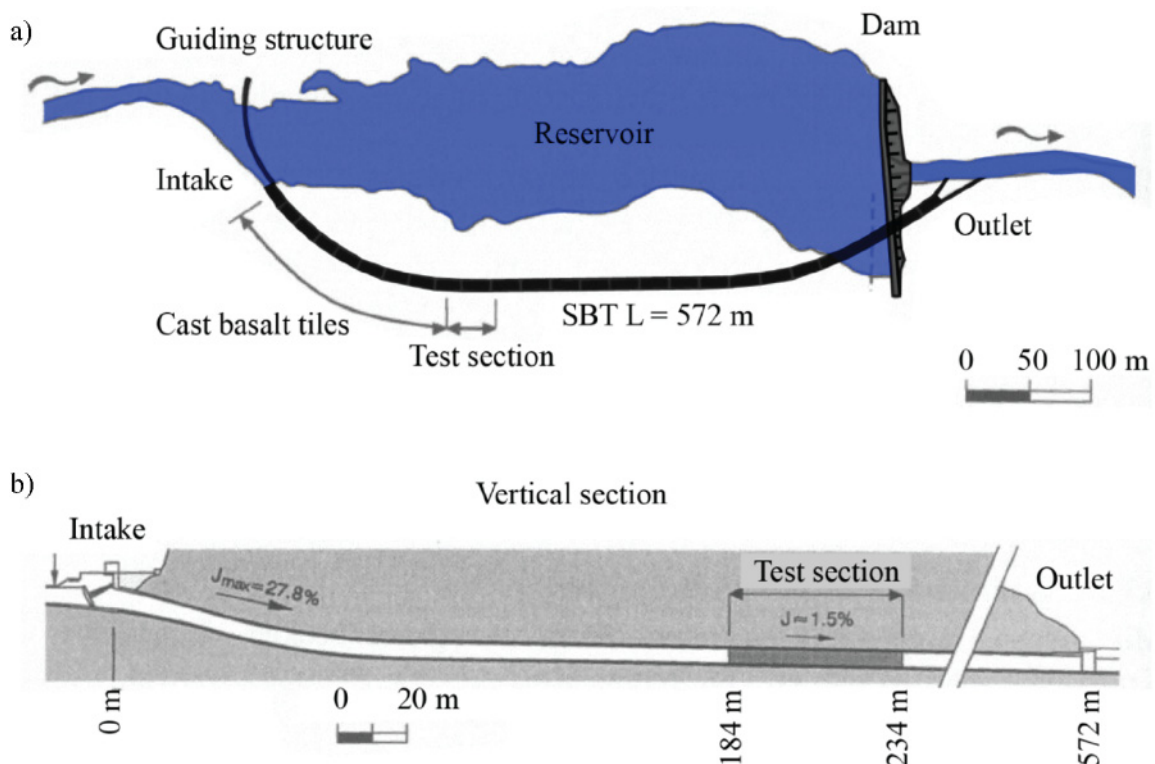
**Abbildung 9:** Übersicht über den SBT Solis mit den Testfeldern

**Tabelle 3:** In den Testfeldern des SBT Pfaffensprung eingebaute Materialien mit Einbaudicken

| Material                                            | Einbau-Jahr | Abmessungen                   | Druckfestigkeit                |
|-----------------------------------------------------|-------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Beton 1, C70/85                                     | 2013        | d = 30 cm                     | $f_{cm,28d} = 75 \text{ MPa}$  |
| Beton 2, C70/85 mit 40kg Stahlfasern/m <sup>3</sup> | 2012        | d = 30 cm                     | $f_{cm,28d} = 108 \text{ MPa}$ |
| Granit 1, 2                                         | 2013, 2012  | d = 30 cm<br>Blöcke 1 m x 1 m | $f_{cm} = 200 \text{ MPa}$     |

### 3.3. In-situ Versuche im SBT Runcahez

Der SBT Runcahez befindet sich im Kanton Graubünden am Somvixer Rhein beim gleichnamigen Ausgleichsbecken (Abb. 10). Das Ausgleichsbecken ist Teil der Wasserkraftanlagen, die von der Kraftwerke Vorderrhein AG betrieben werden. Der SBT wurde 1962 in Betrieb genommen.



**Abbildung 10:** a) Übersicht und b) Vertikalschnitt des SBT Runcahez und Lage der Testfelder (test section) (Jacobs et al. 2001)

Der SBT Runcahez wurde im Mittel 2.3-mal pro Jahr in Betrieb genommen; die jährliche Betriebsdauer beträgt lediglich 12.3 h (Daten der Periode 1962 – 1999). Die dort typischerweise transportierten Geschiebekomponenten haben folgende Durchmesser:  $d_{50} = 0.16 \text{ m}$ ,  $d_m = 0.23 \text{ m}$ ,  $d_{90} = 0.53 \text{ m}$  und



$d_{\max} = 1.20$  m. Dieser SBT ist ein Beispiel für kurze jährliche Betriebszeiten und grobe Geschiebekomponenten.

Im Jahr 1994 wurden Testfelder aus verschiedenen Betonsorten gemäss Tabelle 4 im SBT Runcahez eingebaut (Jacobs *et al.* 2001). Jede Betonsorte wurde im 3.8 m breiten Stollen auf einer Testfeldlänge von 10 m eingebaut. Zwischen jedem Testfeld wurde vor dem Betonieren ein Stahlträger eingebaut mit der Absicht, die Ausbreitung zukünftiger Schäden von einem Testfeld ins nächste zu limitieren. Die Eigenschaften der Betone wurden an separat hergestellten Probekörpern geprüft (Tabelle 5). Die Prüfung zeigte, dass die angestrebten Eigenschaften erfüllt wurden.

Von 1995 bis 1999 wurden die Oberflächen von allen fünf Testfeldern jährlich geodätisch vermessen und visuell inspiziert (Jacobs *et al.* 2001). Eine weitere Inspektion und Vermessung (Nivellement) wurden von Hagmann in den Jahren 2012 bzw. 2014 durchgeführt.

**Tabelle 4:** Beschreibung und Zusammensetzung der Betontypen, die im SBT Runcahez eingebaut wurden, gemäss Jacobs *et al.* (2001); \* Dreikomponenten-Polymer EMACO APS T 2040; \*\*gerundetes Flusskies

| Betontyp                                 | Beton mit Silicastaub               | Hochfester Beton                             | Stahlfaserbeton                                                  | Walzbeton                                                                 | Polymer-Beton                           |
|------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Abkürzung                                | SC                                  | HPC                                          | SFC                                                              | RCC                                                                       | PC                                      |
| Angestrebte Eigenschaften                | Sehr hohe Festigkeit, hoher E-Modul | Hohe Festigkeit, aber nicht zu hoher E-Modul | Sehr hohe Festigkeit, hoher E-Modul, Fasern für Rissüberbrückung | Mittlere Festigkeit und E-Modul, für einfachen Einbau auf grossen Flächen | Mittlere Festigkeit und kleiner E-Modul |
| Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]        | 450                                 | 500                                          | 480                                                              | 400                                                                       | 1060 *                                  |
| Wasser/Zement-Wert                       | 0.32                                | 0.30                                         | 0.30                                                             | 0.32                                                                      | -                                       |
| Zusätze [kg/m <sup>3</sup> ]             | Silicastaub: 40                     | -                                            | Silicastaub: 24<br>Stahlfasern: 45                               | -                                                                         |                                         |
| Flusssand 0/4 mm [kg/m <sup>3</sup> ]    | 563                                 | 565                                          | 559                                                              | 656                                                                       | 250                                     |
| Basalt-Kies 3/15 mm [kg/m <sup>3</sup> ] | 1505                                | 1432                                         | 1405                                                             | 1452                                                                      | 1250 **                                 |

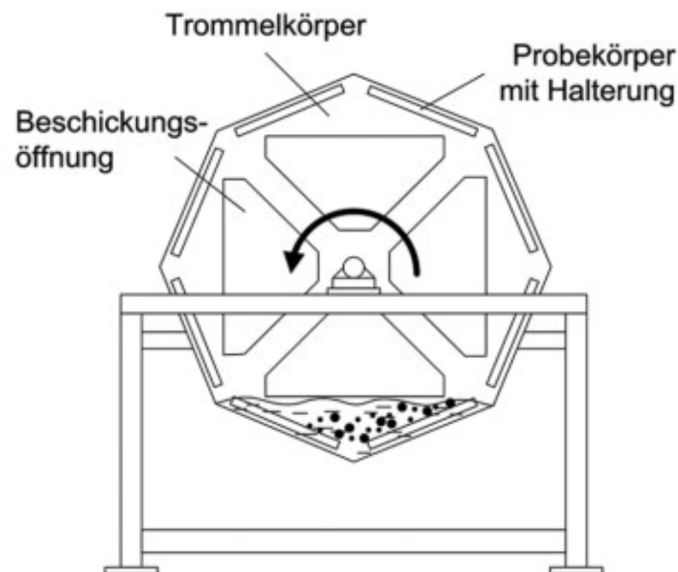
**Tabelle 5:** Eigenschaften der Betontypen, die im SBT Runcahez eingebaut wurden, gemäss Jacobs *et al.* (2001); die Werte beziehen sich auf Messungen 90 Tage nach dem Einbau.

| Betontyp                                   | Beton mit Silicastaub | Hochfester Beton | Stahlfaserbeton | Walzbeton | Polymer-Beton |
|--------------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|-----------|---------------|
| Würfeldruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] | 109 ± 4               | 94 ± 3           | 114 ± 2         | 68 ± 12   | 68 ± 4        |
| E-Modul [kN/mm <sup>2</sup> ]              | 57 ± 1                | 56 ± 1           | 58 ± 1          | 51 ± 4    | 13 ± 2        |
| Spaltzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]    | 12 ± 1                | 10 ± 1           | 12 ± 2          | 9 ± 2     | 14 ± 1        |
| Bruchenergie [J/m <sup>2</sup> ]           | 210 ± 35              | 209 ± 35         | 1019 ± 412      | 143 ± 64  | 867 ± 93      |
| Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]                | 2683 ± 18             | 2655 ± 58        | 2726 ± 6        | 2568 ± 39 | 2360 ± 17     |

### 3.4. Laborversuche zur Bestimmung des Abrasionswiderstands

Zur Bestimmung der Verschleissbeständigkeit der verwendeten Materialien arbeitet die VAW mit dem Institut für Baustoffe der Technischen Universität Dresden zusammen. Ziel ist es, den Abrasionswiderstand der im Feld verbauten Materialien im Labor zu bestimmen und zu überprüfen, unter welchen Bedingungen die Labormessungen auf Anwendungen im Feld übertragbar sind. So könnten Laborversuche in Zukunft dazu beitragen, wirtschaftliche Materialien geplanter wasserbaulicher Anlagen im Voraus zu bestimmen und deren Lebensdauer abzuschätzen.

Hierzu wurden nach der Erstellung der Testfelder in den SBT Solis und Pfaffensprung Proben gewonnen, um damit im Labor Abrasionstests in der „Dresdener Trommel“ durchzuführen (Haroske 1998, Bellmann et al. 2012, Mechtcherine et al. 2012). Die Versuchseinrichtung ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Probekörper werden im Innern der Trommel an deren Umfang montiert. Die Abrasionstests wurden mit einer Mischung aus 10 kg Wasser und 10 kg Stahlkugeln mit einem mittleren Durchmesser von 5 mm durchgeführt. Mit 17 Umdrehungen pro Minute wurden die Proben bei jeder Umdrehung während ca. 0.5 Sekunden belastet. Bei einer Testdauer von 58.8 h waren die Proben während 9.1 h der Abrasionsbelastung ausgesetzt. Nach vorgegebenen Belastungsintervallen wurden die Versuche jeweils unterbrochen, um die Materialverluste und die Gefügeschädigung an den Proben zu ermitteln.



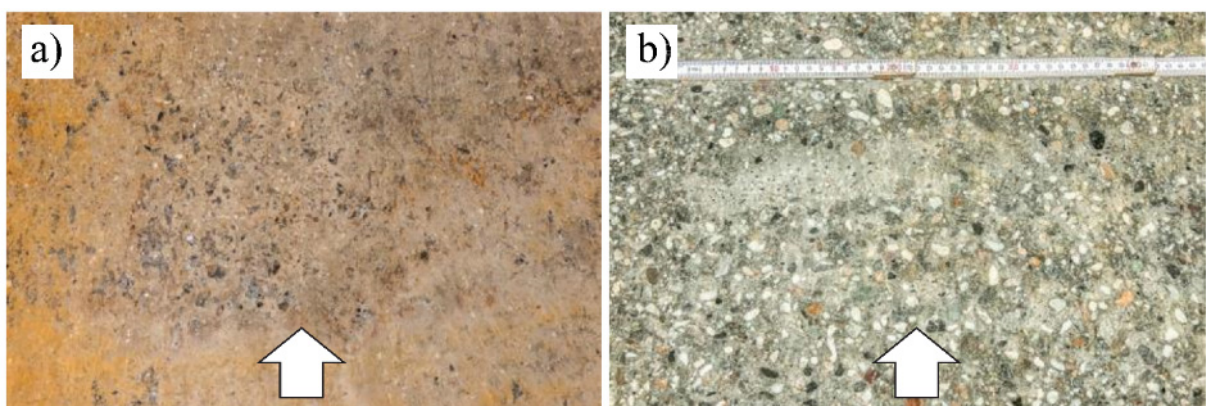
**Abbildung 11:** Schema der Trommel für die Abrasionsversuche nach Bania (1989) und Mechtcherine *et al.* (2012).

## 4. Ergebnisse und Diskussion

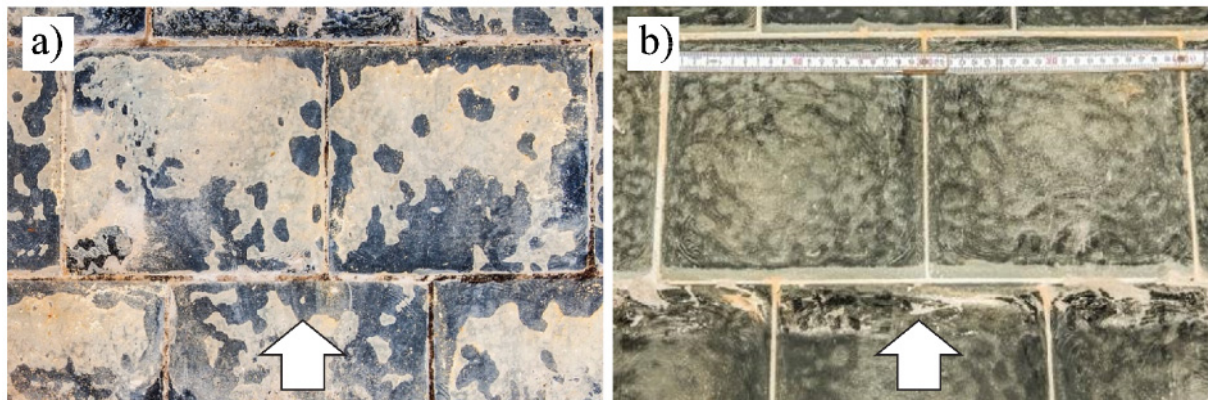
### 4.1. In-situ Versuche im SBT Solis

Der SBT Solis war seit Bauvollendung im 2012 bis 2015 viermal während durchschnittlich 11 Stunden in Betrieb. Gemäss ersten Abschätzungen wurden total zwischen 20'000 und 80'000 m<sup>3</sup> Sedimente aus dem Stausee Solis abgeleitet. Während der ersten drei Ereignisse war die Sedimentfracht deutlich kleiner als erwartet. Gründe dafür waren einerseits eine Stauseeregulierung, die hinsichtlich des SBT-Betriebs nicht optimal war, andererseits eine Havarie während der Bauphase. Dabei war es zu einem Grundbruch der Baugrube gekommen, der eine kurzfristige Absenkung des Stausees erforderlich machte. Dadurch wurde der Verlandungskörper in unmittelbarer Nähe des SBT-Einlaufes abgetragen und umgelagert und es gelangten relativ viele Sedimente in den Einlauf des SBT und wurden herausgespült. Bei der folgenden Inbetriebnahme des SBT lag der Seespiegel jedoch deutlich über dem SBT-Betriebspegel, so dass die für den Sedimenttransport erforderlichen Sohlschubspannungen nur für kleine Korndurchmesser erreicht wurden und deshalb relativ wenig Sedimente in den SBT transportiert wurde.

Dem geringen Sedimenttransport entsprechend traten im SBT bisher wenig Abrasionsschäden auf. Nach den ersten Inbetriebnahmen wurden nicht einmal die Ausfällungen aus dem Bergwasser von der Sohle abgetragen (Abb. 12 und 13). Erst nach dem Hochwasserereignis im August 2014 traten visuell erkennbare Abrasionen auf. Die Ausfällungen aus dem Bergwasser, die vorher die Stollensohle fast flächendeckend überzogen haben, wurden dabei abgetragen. Ausserdem sind bei den meisten Testfeldern deutliche Abrasionsspuren erkennbar. Während beim Stahl einzelne Kratzer und Einschläge sichtbar sind, wurden bei der Basaltpflasterung der glänzende Überzug an allen oberstrom liegenden Plattenkanten abgetragen (Abb. 13b). Bei den Betonfeldern zeigt sich ein unterschiedliches Verhalten: Während bei einigen Feldern die Zementhaut immer noch intakt zu sein scheint, weisen andere flächendeckende Abrasionen auf, so dass die Betonzuschlagstoffe erkennbar sind.



**Abbildung 12:** Detailaufnahmen (ca. 50 cm breit) des Betontestfeldes mit Schwindreduktionsmittel und Hochmodulpolymerfasern im SBT Solis, a) grau-gelbliche Ausfällungen überziehen beinahe die gesamte Oberfläche nach den ersten beiden Betriebsjahren (Aufnahme vom 06.11.2013, VAW), b) beim Ereignis 2014 wurde nicht nur die Ausfällungen, sondern auch die Zementhaut grossflächig abradert, die Betonzuschlagstoffe wurden sichtbar (Aufnahme vom 28.08.2014 VAW)

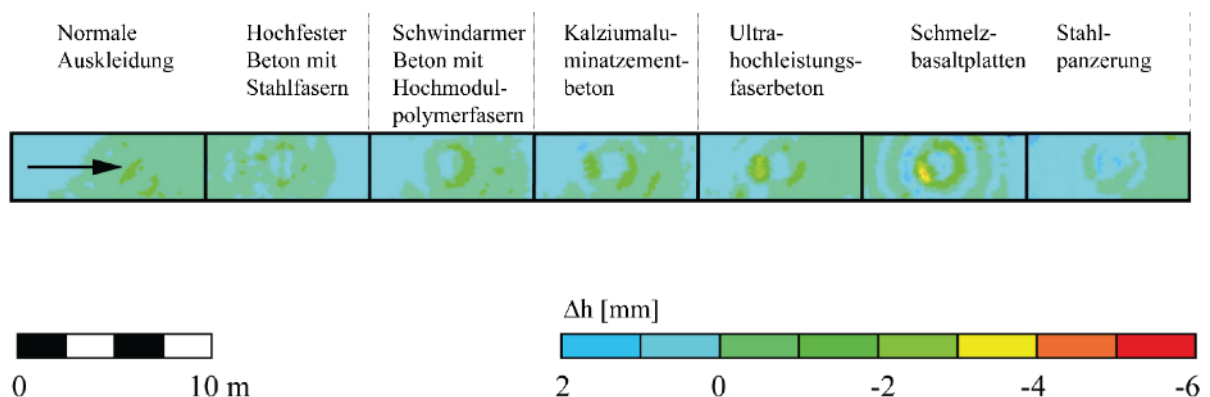


**Abbildung 13:** Detailaufnahmen (ca. 50 cm breit) der Basaltplattenpflasterung im SBT Solis, a) stellenweise abgetragene, grau-gelbliche Ausfällungen aus dem Bergwasser überziehen die Basaltplatten nach den ersten beiden Betriebsjahren (Aufnahme vom 06.11.2013, VAW), b) beim Ereignis 2014 wurden die Ausfällungen entfernt und die oberstromseitigen Plattenränder wurden leicht abradert, was an der hellen Verfärbung erkennbar ist (Aufnahme vom 28.08.2014, VAW)

Nach dem Einbau der Testfelder im Jahr 2012 wurde die anfängliche Oberflächengeometrie der Testfelder durch die Firma Meisser Vermessungen aufgenommen. In Abbildung 14 ist das Resultat dieser Vermessung dargestellt. Die Höhen sind als Differenzen  $\Delta h$  in Bezug auf die mittlere Höhe angegeben. Die Höhendifferenzen in den Testfeldern sind kleiner als  $\pm 4$  mm, was bedeutet, dass diese sehr sorgfältig eingebaut wurden. Die in einigen Feldern sichtbaren kreisförmigen Muster sind eine Folge des Vermessungsverfahrens (Messunsicherheit).

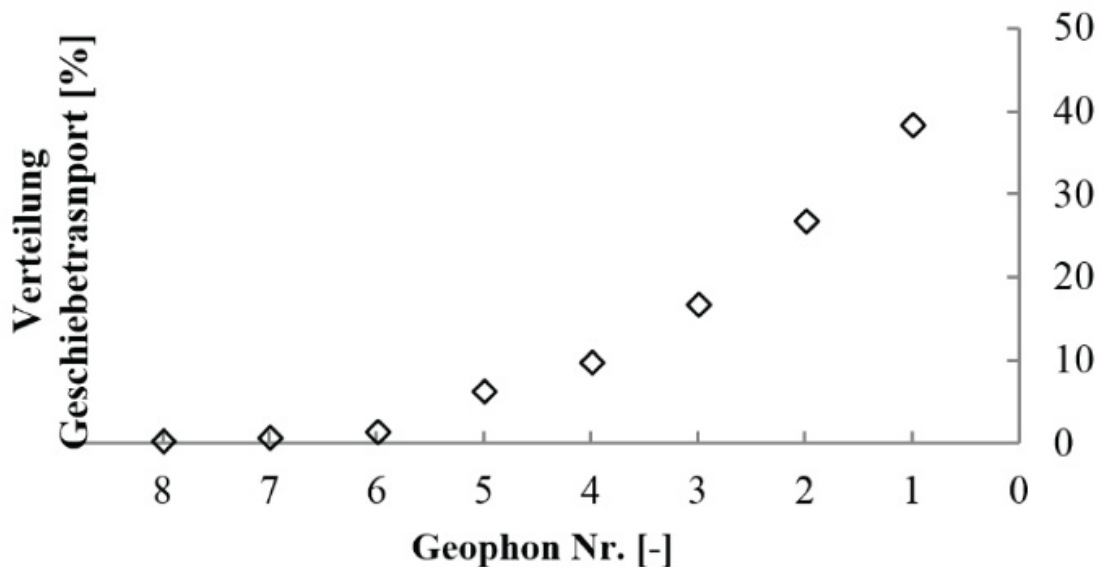
Um die im Jahr 2014 visuell festgestellte Abrasion zu quantifizieren, wurde im Jahr 2015 ein zweiter Laserscan durch die Firma Meisser Vermessungen durchgeführt. Es konnten aber keine signifikanten Abrasionstiefen ermittelt werden, weil die Höhendifferenzen zwischen den beiden gemessenen Oberflächen im Bereich der Messunsicherheit der Laserscans lagen.

Im Jahr 2015 traten bisher an der Albula keine Hochwasser auf und der SBT Solis war nicht in Betrieb. Gemäss bisheriger Auswertung der Geophon-Daten wird die Geschiebefracht von 2012 bis 2015 auf 5'200 Tonnen geschätzt. Dieser Belastung haben alle untersuchten Materialien bisher ohne messbare Abrasion gut standgehalten.



**Abbildung 14:** Höhenmodell der Testfelder im SBT Solis aufgenommen mit 3D-Laserscanner im Dezember 2012

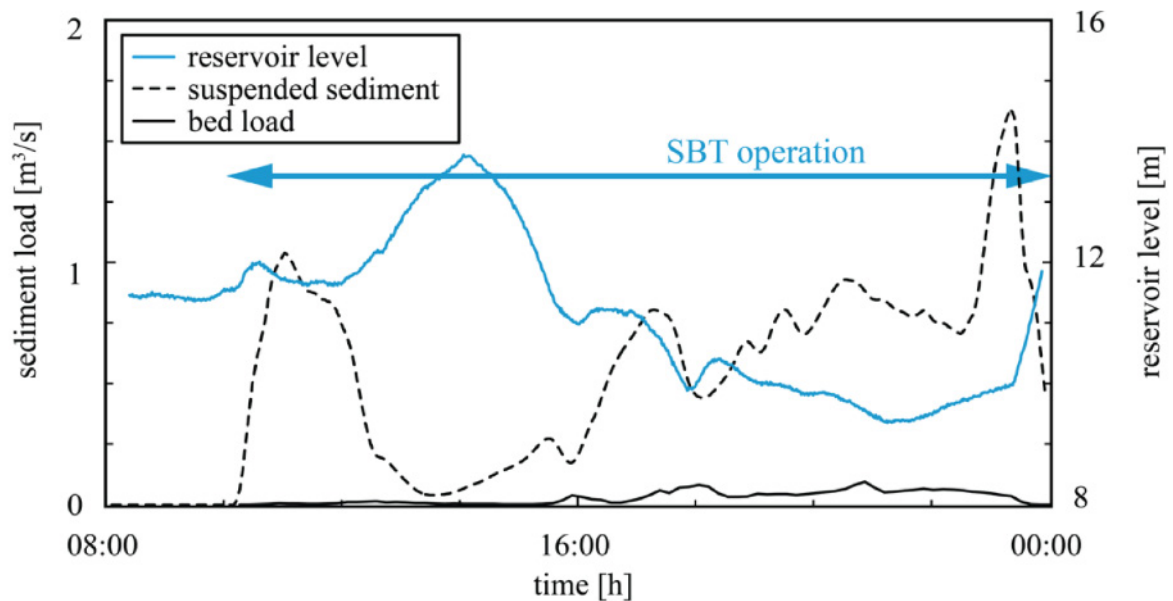
Während die Betriebsbedingungen von Ereignis zu Ereignis und sogar auch während einzelnen Ereignissen ändern, folgt der Geschiebetransport im SBT einem bestimmten räumlichen Muster. Die Geophon-Anlage registriert jeweils mehr Geschiebetransport auf der orographisch rechten Stollenseite (Abb. 15).



**Abbildung 15:** Verteilung des Geschiebetransports über die Stollenbreite, gemessen am Auslauf des SBT Solis mit der Geophon-Anlage bestehend aus 8 Geophonen.

Die rund 100 m oberstrom der Geophon-Anlage liegende Rechtskurve im SBT (Abb. 5) induziert eine Sekundärströmung, die das Geschiebe auf der Kurveninnenseite konzentriert. Die Testfelder liegen oberstrom dieser Kurve und werden daher nicht von dieser beeinflusst. Einige Hundert Meter weiter oberstrom weist der Stollen eine weitere Kurve auf; bisher deutet nichts darauf hin, dass diese im Bereich der Testfelder zu einer Konzentration des Geschiebetransports auf einer Stollenseite führen würde.

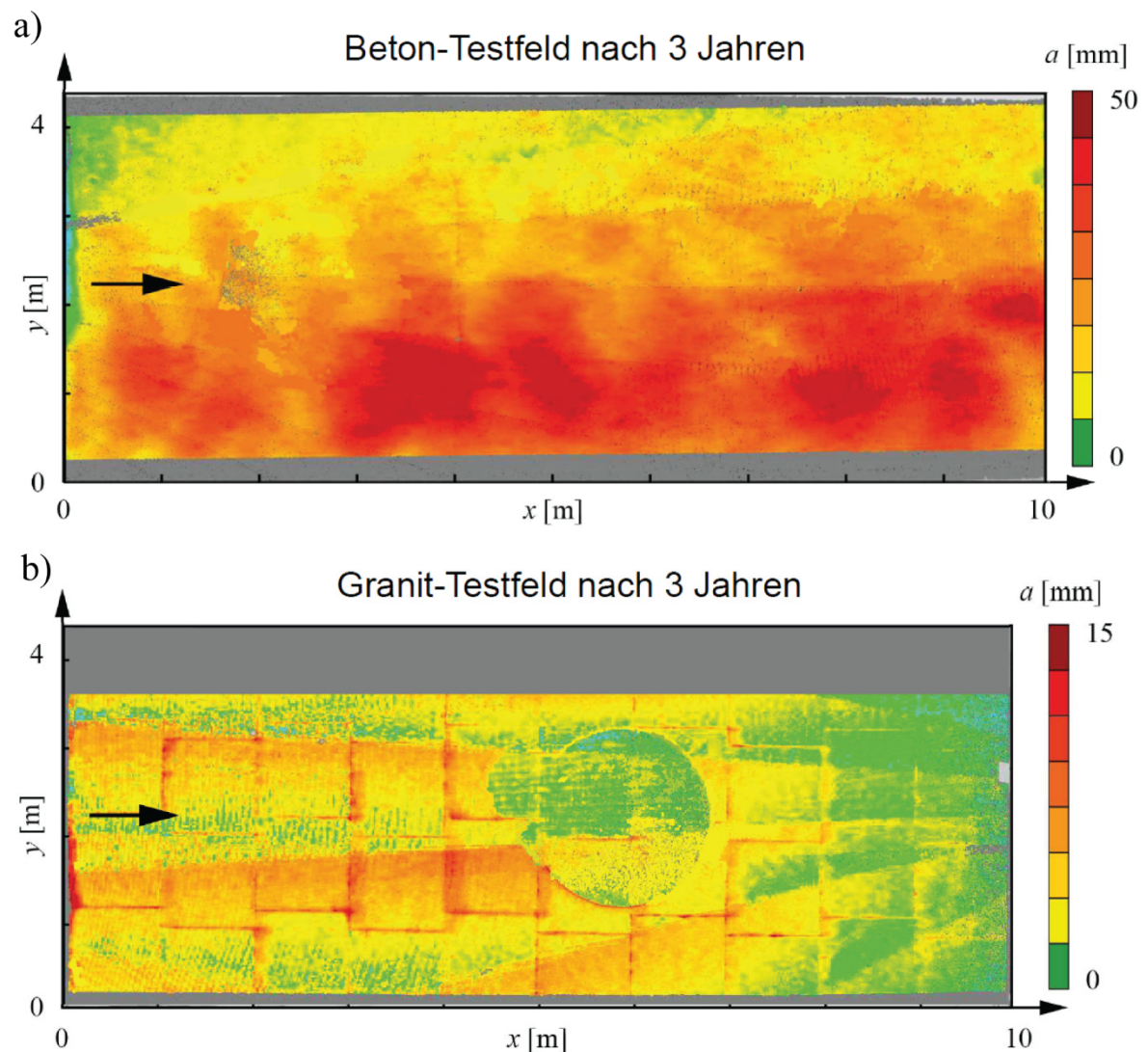
In Abbildung 16 sind die Ganglinien der volumetrischen Schwebstoff- und der Geschiebetransportrate im SBT Solis sowie des Seepegels während des Hochwasserereignisses vom 13.08.2014 dargestellt. Dieses Ereignis war seit Fertigstellung des SBT bisher das grösste. Wie erwartet, wurde bei tiefem Seepegel mehr Geschiebe in und durch den SBT transportiert. Gemäss Geophon-Daten gab es drei Spitzen in der Geschiebetransportrate, die mit stärkeren Absenkungen des Seepegels zu tun haben. Die Trübungsmessungen zeigten, dass die Schwebstofftransportrate einen ähnlichen Verlauf wie diejenige des Geschiebes aufweist, aber die Spitzen der Schwebstofftransportrate früher auftreten als jene des Geschiebetransports. Zusätzlich wurden zu Beginn des Hochwasserereignisses schon Schwebstoffe durch den SBT transportiert, als der Seepegel noch nicht abgesenkt war.



**Abbildung 16:** Ganglinien der Schwebstoff- und der Geschiebetransportrate im SBT Solis sowie des Seepegels während des Hochwasserereignisses vom 13.08.2014 (nach Albayrak *et al.* 2015)

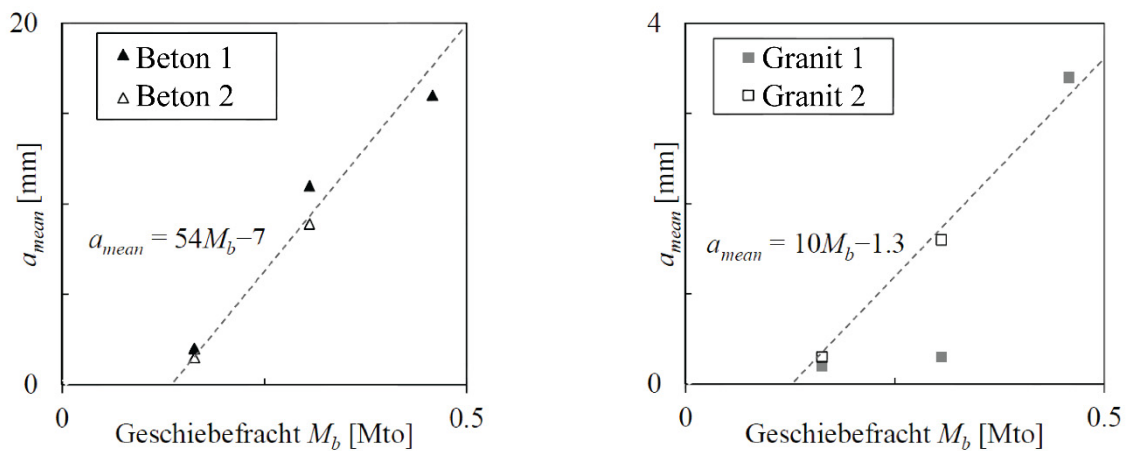
## 4.2. In-situ Versuche im SBT Pfaffensprung

Beim SBT Pfaffensprung zeigte sich, dass die Testfelder mit Granitauskleidung widerstandsfähiger gegen Hydroabrasion sind als diejenigen aus hochfestem Beton. Die mittleren Abrasionstiefen über drei Sedimentsaisons betragen beim Granit 1.3 mm und beim Beton 10 mm pro Jahr. Allerdings sind die Abrasionsmuster unterschiedlich. Während Beton relativ gleichmässig abradiert wird und ein wellenförmiges Abrasionsmuster aufweist (Abb. 17a), treten die Materialverluste beim Granit konzentriert entlang der strömungsparallelen Fugen und oberstromseitigen Plattenrändern auf (Abb. 17b). Die lokalen Maxima der Abrasionen, die auch für die Lebensdauer der Auskleidung entscheidend sind, betragen bei dieser Anlage pro Jahr 17 mm beim Beton und 5 mm beim Granit.



**Abbildung 17:** Ermittelte Abrasionstiefen nach drei Betriebsjahren an den 10 m langen und 4.4 m breiten Testfeldern im SBT Pfaffensprung. Das strahlenförmige Muster stammt vom Messgerät, das sich während einer Aufnahme regelmässig justiert (Messunsicherheit). a) Betontestfeld mit wellenförmiger Abrasion, auf der orographisch rechten Seite verstärkt durch die kurveninduzierte Konzentration des Sedimenttransports; b) Granittestfeld mit stärkerer Abrasion an den oberwasserseitigen Plattenkanten und Längsfugen

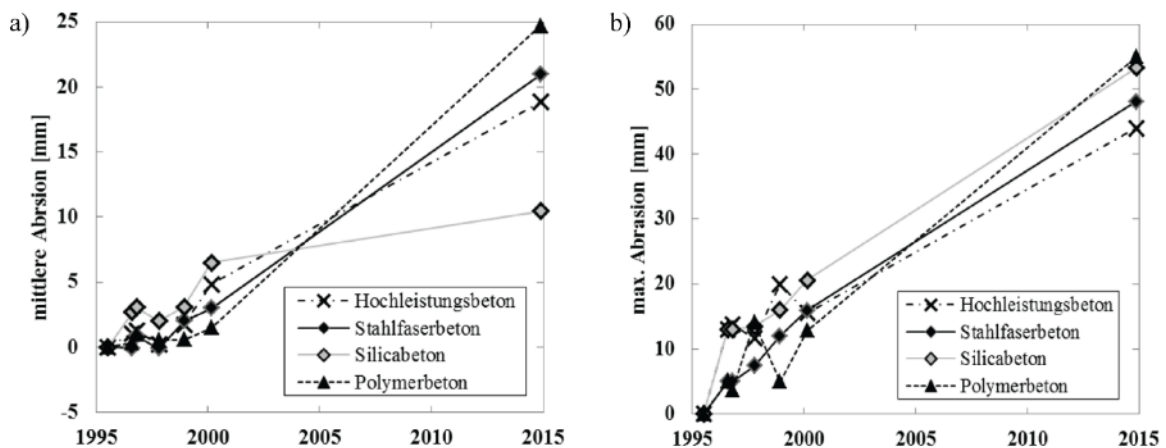
In Abb. 18 werden die Abrasionen in Abhängigkeit der kumulierten Geschiebefrachten für Beton und Granit dargestellt. Offenbar gibt es eine Grenz-Geschiebefracht, ab der erst nennenswert Abrasionen eintreten. Diese scheint unter Berücksichtigung der Datenlage für beide Materialien ähnlich gross zu sein. Nach den bisherigen Ergebnissen hat der Granit für den Fall SBT Pfaffensprung ein etwa  $5^{1/2}$ -mal grösseres Widerstandsverhalten im Vergleich zum dortigen C70/85 Beton. Diese Aussagen sind jedoch aufgrund der nach wie vor dünnen Datenlage mit Vorsicht zu verwenden.



**Abbildung 18:** Mittlere Abrasion in Abhängigkeit der kumulierten Geschiebefrachten für Beton und Granit

### 4.3. In-situ Versuche im SBT Runcahez

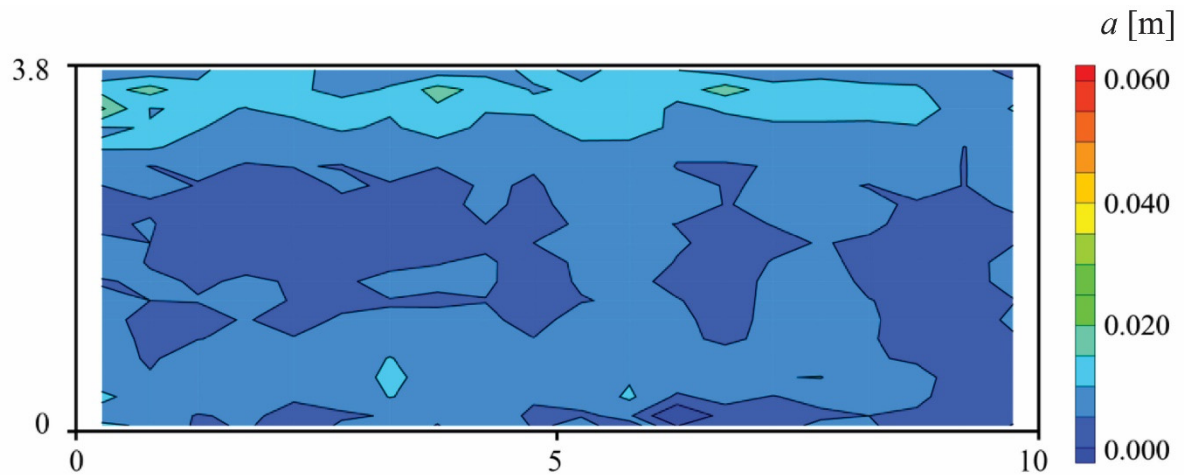
Im SBT Runcahez ist dank der früheren Untersuchungen von Jacobs *et al.* (2001) und der Wiederaufnahme der Untersuchungen im Rahmen des vorliegenden Projekts erstmals eine in-situ Messreihe zur Hydroabrasion über 20 Jahre verfügbar. Die mittleren und maximalen Abrasionstiefen an den fünf Testfeldern mit verschiedenen Betonen sind in Abbildung 19 dargestellt. Im Mittel beträgt die jährliche Abrasion ca. 1 mm, wobei der Beton mit Silicastaub nur um 0.5 mm pro Jahr abgetragen wurde. Betrachtet man die lokalen Maxima der Abrasionen, zeigt sich ein einheitlicheres Bild mit jährlichen Abrasionsraten von  $2.5 \pm 0.25$  mm.



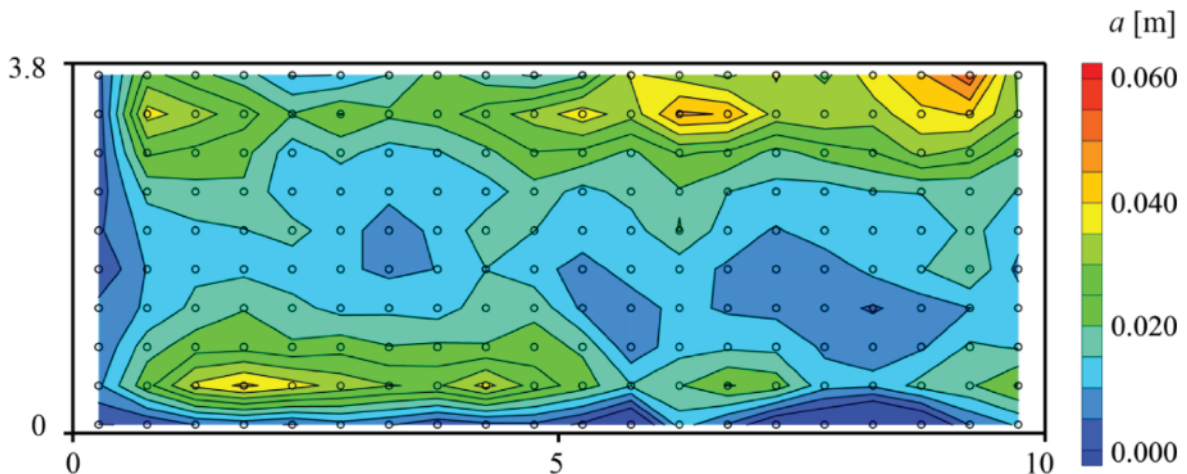
**Abbildung 19:** Abrasionen gemessen auf den Testfeldern im SBT Runcahez, a) Mittelwerte, b) Maximalwerte

Abb. 20 und 21 zeigen die Verteilungen der Abrasionstiefen im Testfeld mit dem Silicabeton nach 5 bzw. 20 Jahren nach dem Einbau (Jacobs und Hagmann 2015). Die Abrasionsmuster sind ähnlich und wurden im Lauf der Zeit ausgeprägter, wie es für Abrasion als ein selbstverstärkender Schädigungsprozess typisch ist. Besonders in Abb. 21 sind die typischen Erosionsrinnen nahe den

Seitenwänden gut erkennbar, welche auf Spitzen der Sohlschubspannungen bei 3d-Strömungen mit relativ kleinen Breiten-Abflusstiefen-Verhältnissen schliessen lassen (Auel 2014). Durch den dadurch konzentrierten Geschiebetransport in diesen Rinnen verstärkt sich dort die lokale Abrasion mit zunehmender Dauer.



**Abbildung 20:** Verteilung der gemessenen Abrasionstiefen über 5 Jahre (1995 - 1999) in der Draufsicht auf das Testfeld mit Silicabeton im SBT Runcahez

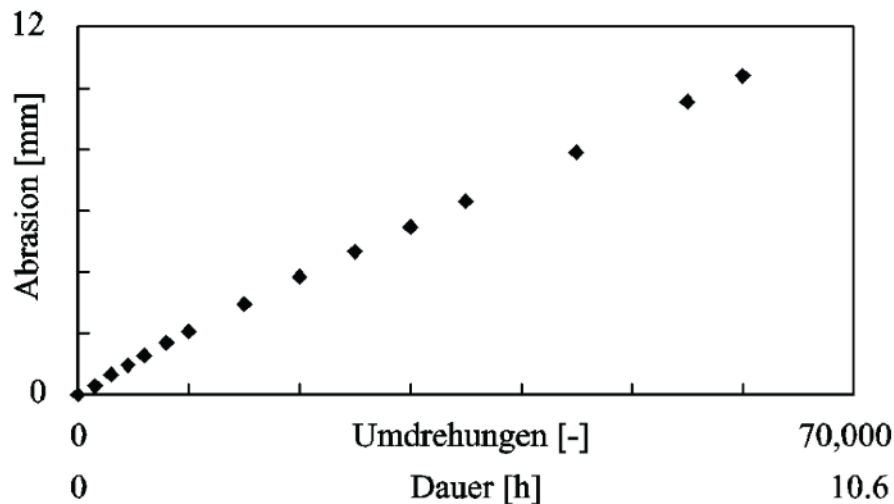


**Abbildung 21:** Verteilung der gemessenen Abrasionstiefen über 20 Jahre (1995 - 2014) in der Draufsicht auf das Testfeld mit Silicabeton im SBT Runcahez; die Kreissymbole stellen die Messpunkte dar

#### 4.4. Laborversuche zur Bestimmung des Abrasionswiderstands

Die Laboruntersuchungen zum Abrasionswiderstand von Betonproben aus den SBT Pfaffensprung zeigten eine lineare Zunahme der Abrasionstiefe in Funktion der Belastungszeit (Abb. 22). Dies entspricht den Resultaten von früheren Untersuchungen (Auel 2014). Im Labor wurde in einer Beanspruchungszeit von 9.1 h (entspricht einer Testdauer von 59 h) eine Abrasion von ca. 10 mm gemessen, was einer mittlere Abrasionsrate von 1.1 mm/h entspricht.

Am selben Material trat im Feld während einer Schwebstofftransportsaison eine Abrasion von 14 mm auf. Mit dem Trommelversuch kann also der Abrasionswiderstand im Labor deutlich schneller als im Feld ermittelt werden. Der Trommelversuch kann für den Quervergleich des Abrasionswiderstands, mindestens von gewissen Materialien, eingesetzt werden. Die Umrechnung zwischen dem Abrasionswiderstand in Feld- und Labormessungen ist noch weiter zu untersuchen.



**Abbildung 22:** Resultat eines Hydroabrasionstests im Labor an Probekörpern aus hochfestem Beton mit der gleichen Rezeptur wie für die Betontestfelder im SBT Pfaffensprung

## 4.5. Erster internationaler SBT-Workshop

Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich richtete vom 27. bis 29. April 2015 die erste internationale Tagung zu Sedimentumleitstollen aus (1<sup>st</sup> International Workshop on Sediment Bypass Tunnels). Die Organisation erfolgte in Zusammenarbeit mit der Universität Kyoto, *Disaster Prevention Research Institute*, Japan, und ewz, Elektrizitätswerk der Stadt Zürich. Prof. Dr. R. M. Boes, Dr. I. Albayrak und M. Hagmann waren Mitglieder des Organisationskomitees und des wissenschaftlichen Komitees. Weitere Mitarbeiter der VAW waren im wissenschaftlichen Komitee tätig.

In diesem Workshop präsentierten Dr. R. M. Boes, Dr. I. Albayrak und M. Hagmann verschiedene Beiträge, unter anderem auch vorläufige Ergebnisse aus diesem Projekt. Die entsprechenden schriftlichen Beiträge (z.B. Hagmann et al. 2015, Jacobs und Hagmann 2015) wurden im Tagungsband (Boes 2015) publiziert. Der Tagungsband kann kostenlos von der folgenden Homepage heruntergeladen werden:

[http://www.vaw.ethz.ch/publications/vaw\\_reports/2010-2019](http://www.vaw.ethz.ch/publications/vaw_reports/2010-2019)

Im Workshop tauschten 89 Teilnehmer aus 12 Ländern ihre Erfahrungen und neueste Forschungsergebnisse aus. 10 SBT-Fallstudien aus Ecuador, Frankreich, Japan, Pakistan, der Schweiz und Taiwan wurden präsentiert und diskutiert. Nach dem eineinhalb-tägigen Vortrags- und Diskussionsteil an der ETH in Zürich wurden den Teilnehmern eine Exkursion zu drei SBTs (Solis GR, Palagnedra TI und Pfaffensprung UR) in der Schweiz angeboten (Abb. 23).

Die Teilnehmerschaft setzte sich aus Vertretern von Ingenieurbüros (43%), Forschungsinstitutionen (32%), Betreibern von Wasserkraftanlagen (18%) und Behörden (7%) zusammen. Der Workshop



entsprach einem Bedürfnis der in diesem Bereich tätigen Fachleute und wurde von den Teilnehmern positiv bewertet.



**Abbildung 23:** Teilnehmer der Exkursion im Rahmen des 1. Internationalen SBT-Workshops, der vom 27.-29.04.2015 stattfand und wesentlich von der VAW der ETH Zürich mitorganisiert wurde (Bild: VAW)

## 5. Schlussfolgerungen

Aus der vorliegenden Untersuchungen können folgende Erkenntnisse formuliert werden:

- Abrasion ist ein selbstverstärkender Schädigungsprozess.
- Auf monolithischen Baustoffen (z.B. Beton) treten wellige Abrasionsmuster auf, die sich zu Rinnen oder lokalen Vertiefungen entwickeln können, während bei modularen Bauelementen (Schmelzbasaltplatten, Granitblöcke) die Abrasion vorwiegend an den Plattenkanten konzentriert auftritt und die Fugen Schwachstellen darstellen.
- Bei modularen Bauelementen kann das Versagensrisiko durch kraftschlüssiges Verlegen im Verband und durch das Verwenden von dickeren Bauteilen verringert werden.
- Feinsedimente, die vorwiegend in Suspension transportiert werden, verursachen im Gegensatz zur Geschiebefracht keine nennenswerte Abrasion in SBTs.
- Geschiebekomponenten werden je nach ihrer Grösse und je nach Eigenschaften der Strömung vorwiegend hüpfend und rollend oder gleitend transportiert, was zu aufprallartiger oder schleifender Beanspruchung der Sohle führt.
- Harte Sohlmaterialien sind anfällig auf Stösse (Sprödbbruch) und eignen sich deshalb besser, wenn Geschiebekomponenten vorwiegend gleitend transportiert werden; Materialien mit hoher



Zugfestigkeit hingegen können die Energie von aufprallenden Geschiebekomponenten besser absorbieren.

Für Planung, Bau und Unterhalt von SBTs werden derzeit folgende generelle Empfehlungen gegeben:

- In der horizontalen Linienführung von SBTs sollen Kurven soweit als möglich vermieden werden, da Kurven zu einer Konzentration des Geschiebetransports auf der Kurveninnenseite und in unterstrom liegenden Stollenabschnitten führen. Falls Kurven unvermeidbar sind, sollen die Radien möglichst gross gewählt und eine verstärkte Auskleidung der stärker beanspruchten Bereiche geprüft werden.
- Da die Korngrössenverteilung des Geschiebematerials in der Regel relativ breit ist und SBTs bei verschiedenen Abflussbedingungen betrieben werden können, werden Geschiebekomponenten in der Regel hüpfend, gleitend und rollend transportiert. Es ist ein Sohlmaterial zu wählen, das verschiedenen Beanspruchungsarten standhält.
- Die Oberfläche der Stollensohle ist möglichst eben und gleichmässig einzubauen, da geometrische Abweichungen, Unregelmässigkeiten und Schwachstellen stärkere Abrasion verursachen können. Bei der Planung und Bauausführung sollen entsprechende qualitätssichernde Massnahmen vorgesehen werden.
- Zum Erreichen hoher Abrasionswiderstände ist auf eine fachgerechte Bauausführung und eine geeignete Nachbehandlung zu achten.
- Wenn Abrasionsschäden, z.B. unregelmässige Oberflächen, vorstehende Kanten oder ausgewaschene Fugen sichtbar werden, wird empfohlen, die Schäden zu reparieren, um weitere, schnell wachsende Abrasionsschäden und Sekundärschäden zu vermeiden. Weitere Empfehlungen sind in Boes et al. (2014) enthalten.

## 6. Ausblick

### 6.1. In-situ Versuche

#### SBT Solis

Die Versuche am SBT Solis werden weitergeführt, um die Datenbasis zu erweitern. Die Datenbasis ist aufgrund unvorhersehbarer Ereignisse in den ersten Betriebsjahren und aufgrund nicht beeinflussbarer Umstände (unregelmässiges Auftreten von Hochwassern) noch wenig aussagekräftig.

Im Rahmen eines andern durch das BFE geförderten Projekts mit dem Titel 'Einfluss des Sedimenttransports durch Umleitstollen auf die Hydroabrasion der Stollensohle und auf die Ökomorphologie im Unterwasser', soll voraussichtlich Ende 2016 ein weiterer Laserscan der Testfelder im SBT Solis durchgeführt werden. Die Durchführung der Messung hängt von den hydrologischen Bedingungen ab.

Im Rahmen des zweiten Teils des vorliegenden Projekts mit dem Titel 'Optimierung verschleissresistenter Materialien an Sedimentumleitstollen und wasserbaulichen Anlagen (Teil II)' soll die Kalibrierung der Geophon-Anlage im SBT Solis verbessert werden. Dafür ist ein Feldversuch geplant, der bei abklingendem Hochwasser möglichst bis im Sommer 2016 durchgeführt werden soll. Es ist vorgesehen, nach der *in-situ* Kalibrierung die Geophon-Rohdaten von 2012 bis 2015 erneut auszuwerten.



### **SBT Pfaffensprung**

Die Messungen werden im Jahr 2016 fortgesetzt. Da am SBT Pfaffensprung keine Messeinrichtung für den Geschiebetransport vorhanden ist, werden Geschiebefrachten basierend auf den gemessenen Abflusstiefen und mit Annahme typischer Durchmesser der Geschiebekomponenten rechnerisch abgeschätzt.

### **SBT Runcahez**

Es ist vorgesehen, die Testfelder im SBT Runcahez nach grösseren Hochwasserereignissen erneut zu vermessen. Die Geschiebefrachten werden basierend auf Abflussdaten einer nahe gelegenen bestehenden Messstation und Aufzeichnungen der SBT-Betriebsdauern rechnerisch abgeschätzt.

## **6.2. Laborversuche**

Weitere Resultate der Hydroabrasions-Laborversuche der Probekörper vom SBT Pfaffensprung und Solis werden im Jahr 2016 aus Dresden erwartet. Die ermittelten Abrasionsraten sollen den im Feld gemessenen Materialverlusten gegenübergestellt werden. Durch einen Vergleich der Schädigungsstrukturen im Feld mit denjenigen im Labor kann untersucht werden, wie realitätsnah die im Feld auftretenden Prozesse im Labor-Trommelversuch simuliert werden können.

## **6.3. Abrasionsmodelle**

Es ist vorgesehen, die Resultate der Prototypversuche an den SBT Solis, Pfaffensprung und Runcahez sowie der Hydroabrasions-Laborversuche weiter systematisch auszuwerten. Sie sollen für die Kalibrierung verschiedener Abrasionsmodelle wie diejenigen von Sklar und Dietrich (2004), Huang und Yuan (2006), Helbig und Horlacher (2007), Helbig et al. (2012) und Auel et al. (2015) verwendet werden.

## **6.4. Empfehlungen und weitere Dokumentation**

Schliesslich soll der im Kapitel „Zielsetzung“ genannte Leitfaden mit Empfehlungen für die praktische Anwendung zusammengestellt werden. Dieser Leitfaden kann neben den SBT auch auf andere Bauteile im Wasserbau, die starker Hydroabrasion ausgesetzt sind, sinngemäss angewendet werden.

Die vorliegende Forschungsarbeit ist Bestandteil der Dissertation von M. Hagmann. Nach Abschluss der Dissertation, voraussichtlich im Sommer 2016, wird die Dissertationsschrift in der ETH-Bibliothek sowie als VAW-Mitteilung in elektronischer Form frei zugänglich sein:

<http://e-collection.library.ethz.ch/search.php>

<http://www.vaw.ethz.ch>

## **Referenzen**

Albayrak I., Felix D., Hagmann M., Boes R.M. (2015). Suspended Sediment and Bed Load Transport Monitoring Techniques. 38. *Dresdner Wasserbaukolloquium, Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen Heft 53*: 405-414.



- Auel C. (2014). Flow characteristics, particle motion and invert abrasion in sediment bypass tunnels. *Doctoral Thesis*, VAW-Mitteilung 229 (R. Boes, ed.), ETH Zürich.
- Auel C., Boes R. M. (2011). Sediment bypass tunnel design - review and outlook. *Proc. ICOLD Symposium "Dams under changing challenges"*, (A. J. Schleiss & R. M. Boes, eds.), 79<sup>th</sup> Annual Meeting, Lucerne. Taylor & Francis, London: 403-412.
- Auel C., Hagmann M., Boes R. M., Albayrak I. (2015). Optimizing the sustainability of sediment bypass tunnels to counter reservoirs sedimentation. *ICOLD 25<sup>th</sup> Annual Meeting*, Stavanger, Norway.
- Auel, C.; Berchtold, T.; Boes, R. (2010). Sediment Management in the Solis Reservoir Using a Bypass Tunnel. *Proc. of the 8<sup>th</sup> ICOLD European Club Symposium*, Verlag der Technischen Universität Graz, Innsbruck, Austria: 438-443.
- Bania A. (1989). Bestimmung des Abriebes und der Erosion von Betonen mittels eines Gesteinstoff-Wassergemisches. *Doctoral Thesis* TH Wismar.
- Basson G. R. (2009). Management of siltation in existing and new reservoirs. General Report Q. 89. *Proc. 23<sup>rd</sup> Congress of the CIGB-ICOLD*, Brasilia, Brazil.
- Bellmann C., Mechtcherine V. (2012). Experimental investigation into the deterioration of ordinary concrete subjected to hydro-abrasion. *Proc. MicroDurability*, PRO83, Amsterdam, Netherland.
- 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. Schleiss et al., eds.), Lausanne: 221-228.
- Boes, R.M. (2015, ed.). *Proc. 1<sup>st</sup> Intl. Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilung 232, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- 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. Intl. Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilung 232, Boes, R.M., ed., VAW, ETH Zürich: 123-135.
- Haroske G. (1998). Beitrag zum Hydroabrasionsverschleiss von Betonoberflächen. *Doctoral Thesis* Rostock.
- Helbig U., Horlacher H.-B. (2007). Ein Approximationsverfahren zur rechnerischen Bestimmung des Hydroabrasionsverschleisses an überströmten Betonoberflächen. *Bautechnik* 84(12): 854-861.
- Helbig U., Horlacher H., Stamm J., Bellmann C., Butler M., Mechtcherine V. (2012). Nachbildung der Hydroabrasionsbeanspruchung im Laborversuch Teil 2 - Korrelation mit Verschleisswerten und Prognoseansätze. *Bautechnik* 89(5): 320-330.
- Huang X.-B., Yuan Y.-Z. (2006). Mechanism and prediction of material abrasion in high-velocity sediment-laden flow. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B* 18(6): 760-764.
- ICOLD (2009). Sedimentation and Sustainable use of Reservoirs and River Systems. *Bulletin 147*, International Commission on Large Dams, Paris, France.
- Jacobs F., Hagmann, M. (2015). Sediment Bypass Tunnel Runcahez: Invert Abrasion 1995-2014. *Proc. Intl. Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilung 232, Boes, R.M., ed., VAW, ETH Zürich: 211-221.
- Jacobs F., Winkeler W., Hinkeler F., Volkart P. (2001). Betonabrasion im Wasserbau ('Concrete abrasion at hydraulic structures'). *VAW-Mitteilung 168*. (H.-E. Minor, ed.), VAW, ETH Zürich.



- Kataoka K. (2000). An overview of sediment bypassing operation in Asahi reservoir. *International workshop and symposium on reservoir sedimentation management*, Toyama, Japan.
- KOHS (2007). Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. *Wasser, Energie, Luft* 99(1): 55-60.
- 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. *Bautechnik* 89(5): 309-319.
- Morach S. (2011). Geschiebemessung mittels Geophonen bei hohen Fliessgeschwindigkeiten - Hydraulische Modellversuche. *Master Thesis VAW*, ETH Zurich (unpublished).
- Oehy C. (2003). Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents. *Doctoral Thesis* 2684, Laboratoire de Construction Hydrauliques (LCH), EPF Lausanne.
- 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.), US Geological Survey Scientific Investigation 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. (2014). 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.
- Schleiss A., De Cesare G., Jenzer Althaus J. (2010). Verlandung von Stauseen gefährdet die nachhaltige Nutzung der Wasserkraft. *Wasser Energie Luft* 102(1): 31-40.
- Schleiss A., Oehy C. (2002). Verlandung von Stauseen und Nachhaltigkeit. *Wasser Energie Luft* 94(7/8): 227-234.
- Sklar L. S., Dietrich W. E. (2004). A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load. *Water Resources Research* 40(6).
- Sumi T., Kantoush S., Suzuki S. (2012). Performance of Miwa dam sediment bypass tunnel: Evaluation of upstream and downstream state and bypass efficiency. Q92 R 38. *Proc. 24<sup>th</sup> ICOLD Congress Kyoto*: 576-596.
- Sumi T., Kantoush S. A. (2011). Comprehensive sediment management strategies in Japan: sediment bypass tunnels. *Proc. 34<sup>th</sup> IHAR World Congress Brisbane*: 1803-1810.
- Vischer D., Hager W. H., Casanova C., Joos B., Lier P., Martini O. (1997). Bypass tunnels to prevent reservoir sedimentation. *Proc. 19<sup>th</sup> ICOLD Congress Q74 R37*, Florence. 605-624.
- White R. (2001). Evacuation of sediments from reservoirs. London, Thomas Telfors Limited.
- Wisser D., Frolkin S., Hagen S., Bierkens M. F. (2013). Beyond peak reservoir storage? A global estimate of declining water storage capacity in large reservoirs. *Water Resources Research* 49(9): 5732-5739.



## Anhang

Die folgenden beigelegten Dokumente geben weitere Informationen zum vorliegenden Forschungsprojekt, vorwiegend bezüglich Ergebnissen aus dem Jahr 2015:

- Albayrak *et al.* (2015): Suspended Sediment and Bed Load Transport Monitoring Techniques.
- Hagmann *et al.* (2015): Field research: Invert material resistance and sediment transport measurements (mit Beispielen von SBT Solis und SBT Pfaffensprung).
- Jacobs und Hagmann (2015): Sediment Bypass Tunnel Runcahez: Invert Abrasion 1995-2014.
- Programm des SBT-Workshops vom April 2015