

## 11. Treffen junger WissenschaftlerInnen an Wasserbauinstituten

---

### **Entlandung des Stausees Solis mit Hilfe eines Geschiebeumleitstollens – hydraulische Modellversuche**

Christian Auel

#### **Zusammenfassung**

Das Reservoir der Talsperre Solis in Graubünden wurde 1986 vom Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) in Betrieb genommen. Bei Hochwasserereignissen werden grosse Sedimentmengen in den Stausee transportiert. Über 25 % des ursprünglichen Reservoirvolumens sind bereits verlandet. Aus diesem Grund plant ewz den Bau eines Geschiebeumleitstollens, der das bei Hochwasser ankommende Sediment um die Talsperre herum in Richtung Unterwasser leitet. Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich untersucht und optimiert in einem hydraulischen Modell den projektierten Umleitstollen. Bei Hochwasser wird der Stausee auf den minimalen Betriebswasserspiegel abgesenkt, der Verlandungskörper liegt grösstenteils frei, das Sediment erodiert. Mit Hilfe einer Leitkonstruktion wird die Strömung in Richtung Einlaufbauwerk des Stollens gelenkt und der Abfluss sowie das Geschiebe durch diesen geleitet. Bei Abflüssen, die die Ausbaupazität des Stollens ( $HQ_5$ ) überschreiten, wird die überschüssige Strömung in den vorderen Bereich des Sees in Richtung Grundablass abgeführt. Das Geschiebe wird dennoch nahezu vollständig in den Stollen eingeleitet. Bei Hochwasser mit Schwemmholaufkommen wird mit Hilfe einer Tauchwand sowie einer Teillableitung des Hochwasserabflusses in den vorderen Seebereich verhindert, dass Schwemholz in den Umleitstollen eingezogen wird.

#### **Abstract**

The Solis reservoir is located in the Alps in Grisons, Switzerland, and operated since 1986 by the electric power company of Zurich (ewz). During flood events Solis reservoir is subjected to high sediment aggradation. Since the construction of the dam, more than one fourth of the original reservoir volume was filled with sediments from upstream mountain torrents. To solve this problem, ewz plans the construction of a bypass tunnel to flush away the incoming sediments. The intake structure and the bypass tunnel are investigated and optimized in a hydraulic model at the laboratory of hydraulics, hydrology and glaciology (VAW) of the ETH Zurich. In case of flood events, the flow is led to the intake by help of a guiding structure. The discharge and the sediments are flushed through the tunnel. In case of higher floods than the design capacity of the tunnel, a part of the discharge passes the intake towards the bottom outlets, with all the sediments still being flushed through the bypass tunnel. In the event of driftwood, suction of the wood into the intake structure has to be avoided. A skimming wall leads the wood away towards the front area of the reservoir where removal is possible.

## **1. Einleitung**

Das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich beauftragte die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie im Frühjahr 2008 mit der Optimierung des geplanten Geschiebeumleitstollens im Stausee Solis mit Hilfe eines hydraulischen Modells. In diesem Beitrag wird das Projekt näher erläutert, das Variantenstudium der ewz kurz aufgeführt und anschliessend die hydraulischen Modellversuche an der VAW beschrieben sowie deren Ergebnisse zusammengefasst.

## **2. Übersicht und Problemstellung**

Die 1986 erstellte Stauanlage Solis liegt in der Schweiz im Kanton Graubünden, stromab des Ortes Tiefencastel. Das ursprüngliche Gesamtvolumen des Stausees betrug lediglich 4.1 Mio. m<sup>3</sup>, bei einer Fläche des Sees von knapp 24 ha. Das Einzugsgebiet ist mit rund 900 km<sup>2</sup> dahingegen sehr gross. Der Stausee hat bei Vollstau eine Länge von 2.6 km, eine mittlere Breite von nur 90 m und somit einen fjordartigen Charakter. Jährlich werden im Mittel rund 110'000 m<sup>3</sup> Sedimente in den Stausee eingetragen, wobei die Grösse des Eintrags von Jahr zu Jahr differiert und stark abhängig von der Grösse des auftretenden Hochwassers ist. Rund 30'000 m<sup>3</sup> Material im Jahr werden im Stauwurzelbereich durch ein Kieswerk entnommen. Im Reservoir bildet sich eine Verlandungsfront, die bei jedem Hochwasser in Richtung Talsperre wandert. Noch hat der Böschungsfuss des Verlandungskörpers die Talsperre nicht erreicht. Allerdings lagern sich Feinsedimente auf der Böschung ab, die bereits bis zu den Grundablässen vorgedrungen sind. Zwei grundsätzliche Probleme ergeben sich für den Betreiber ewz infolge der Stauraumverlandung. Zum Einen verringern sich das Stauvolumen, respektive das Nutzvolumen des Sees. Seit Inbetriebnahme 1986 reduzierte sich das nutzbare Volumen von 1.46 Mio. m<sup>3</sup> auf heute knapp 1 Mio. m<sup>3</sup>. Zum Anderen besteht die Gefahr des Zulegens der Entlastungsorgane. Bereits heute sind die Grundablässe mit Feinmaterial bedeckt, ein Heranwachsen der Böschungsfront mit größerem Geschiebeanteil bis an die Talsperre würde die Betriebssicherheit der Anlage gefährden.

## **3. Lösungsansätze der Verlandungsproblematik**

In der Literatur sind einige Lösungsansätze zu finden, um einer fortschreitenden Verlandung entgegenzuwirken (Sloff 1991, Vischer 1996 a, 1996 b). Seitens ewz wurden im Vorfeld der Modelluntersuchungen verschiedene Lösungsansätze ausgearbeitet:

1. Baggerung der Sedimente
2. Vollständige Absenkung des Sees, verbunden mit einer Spülung durch die Grundablässe
3. Absenkung des Stausees auf die Kote des minimalen Betriebswasserspiegels, verbunden mit einer Spülung durch die Grundablässe
4. Absenkung des Stausees auf die Kote des minimalen Betriebswasserspiegels, verbunden mit einer Spülung durch einen Geschiebeumleitstollen

Die erste Variante erscheint aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht nicht sinnvoll. Die zweite Variante wird verworfen, da die Kapazität der Grundablässe im Freispiegelabfluss gering ist, sowie ein enormer wirtschaftlicher Verlust infolge der jeweiligen Leerung zu verzeichnen wäre. Variante 3 wurde an der VAW

(Lais et al 2008) in einem hydraulischen Modell untersucht. Infolge der Absenkung wird der Verlandungskörper freigelegt, der Abfluss ist frei fliessend und transportiert das eingetragene Sediment bis zur neuen Stauwurzel. Das Material wird über den Verlandungskopf hinaus in den Totraum des Sees vor der Talsperre umgelagert. Das Sediment wird durch die Grundablässe gespült. Aus technischer und hydraulischer Sicht ist dieser Lösungsansatz möglich, seitens ewz werden die Risiken (Verklauserung oder Blockierung der Organe u. a.) allerdings als zu hoch eingestuft.

Aus diesem Grund wird an der VAW ebenfalls Variante 4, die Spülung mittels eines Geschiebeumleitstollens, untersucht. Ein knapp 900 m langer Geschiebeumleitstollen führt, ausgehend von der rechten Talflanke, vorbei an der Staumauer in die stromab liegende Schynschlucht (Abb. 1). Das Einlaufbauwerk befindet sich 450 m oberhalb der Sperre. Der Einlauf in den Stollen erfolgt unter Druck. Eine Drucksegmentschütze reguliert den Abfluss, der nach der Schütze im Freispiegelregime abgeführt wird. Die Ausbaupkapazität des Umleitstollens beträgt  $170 \text{ m}^3/\text{s}$  und entspricht dem fünfjährigen Hochwasser.

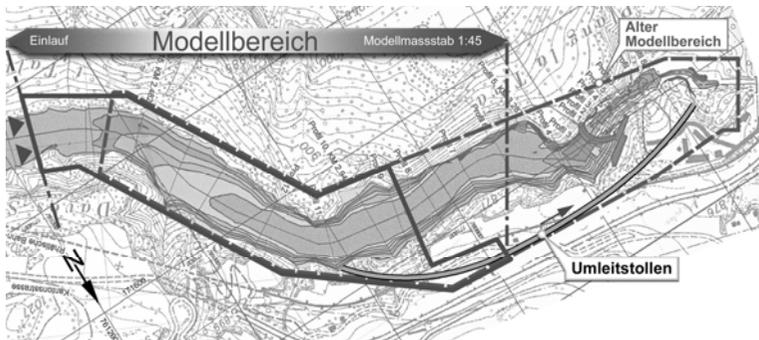


Abbildung 1: Topografischer Ausschnitt des Stausees Schwarz, durchgezogen: Projektperimeter der aktuellen Untersuchung. Grau, gestrichelt: Projektperimeter der abgeschlossenen Untersuchung (Lais et al. 2008). Fliessrichtung ist von links nach rechts. Der Begriff Einlauf bezeichnet den Einlauf in das Modell. Der Einlauf in den Umleitstollen befindet sich an der rechten Talflanke in Bildmitte, die Bogenstaumauer auf der rechten Seite des Bildes

Auch diese Variante bedingt, wie Variante 3, eine Vorabsenkung des Sees, um den Verlandungskörper freizulegen und das von oberstrom eingetragene Geschiebe bis in das Einlaufbauwerk weiter zu transportieren. Die Herausforderung in diesem Projekt liegt darin, dass der Stollen auch bei Hochwasserereignissen betrieben werden soll, die über die Kapazität des Stollens hinaus gehen. Bei Hochwasser grösser als das  $HQ_5$  wird der überschüssige Abfluss in den vorderen Bereich des Stausees weitergeleitet und durch die Grundablässe abgezogen oder turbinert. Das Geschiebe soll bei grossen Hochwassern dennoch nahezu vollständig durch den Umleitstollen abgeführt werden und nicht in den vorderen Bereich des Stausees gelangen.

#### 4. Hydraulisches Modell

Die VAW wurde beauftragt, den Lösungsansatz der Spülung mittels eines Geschiebeumleitstollens zu untersuchen und zu optimieren. Der Fokus liegt in erster Linie auf der Optimierung der Strömungsbedingungen in Richtung des

Einlaufbauwerks, um sowohl den Abfluss als auch das transportierte Geschiebe in Richtung des Einlaufbauwerks zu lenken. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Optimierung des Bauwerks selbst, sowie in einer weiterführenden Versuchsreihe auf der Problematik der Verklauung des Einlaufes infolge Schwemmhölzes bei Hochwasser.

Das hydraulische Modell bildet einen 700 m langen Ausschnitt des Stausees im Massstab 1:45 ab. Abbildung 1 zeigt den modellierten Teil des Reservoirs. Abgebildet wird der Stausee 1'200 m bis 520 m oberhalb der Talsperre. Die Talsperre selbst ist für die Untersuchung nicht von Bedeutung und wird deshalb nicht nachgebildet. Zudem werden die ersten 200 m des Geschiebeumleitstollens sowie das Einlaufbauwerk mit der Drucksegmentschütze abgebildet (Abb. 2).



*Abbildung 2: Einlaufbauwerk mit anschliessendem Geschiebeumleitstollen*

Das Modell basiert auf dem Ähnlichkeitsgesetz von Froude, da eine Strömung auf freier Oberfläche simuliert wird. Die Trägheitskraft sowie die Gewichtskraft sind demnach die dominierenden Kräfte. Vorausgesetzt werden turbulente Verhältnisse in der nachgebildeten Strömung. Das Geschiebe wird nach Zarn (1992) modellähnlich skaliert und mittels einer Geschiebedotiermaschine zugegeben. Der Zufluss in das Modell, sowie der Abfluss aus dem Modell werden mittels magnetisch-induktiven Durchflussmessern (MID) ermittelt. Der Seespiegel wird mittels Ultraschall gemessen. Die Morphologieentwicklung wird jeweils nach einer Versuchsreihe mittels eines Laserscans untersucht. In Abbildung 3 ist in einer Übersicht das hydraulische Modell dargestellt.

## **5. Resultate**

Untersucht wurden Zuflüsse in den Stausee von  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  (unter  $HQ_1$ ),  $170 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $HQ_5$ ) und  $280 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $HQ_{100}$ ). Der Zufluss ist stationär, der Seespiegel wird bei jeder Versuchsreihe konstant gehalten.

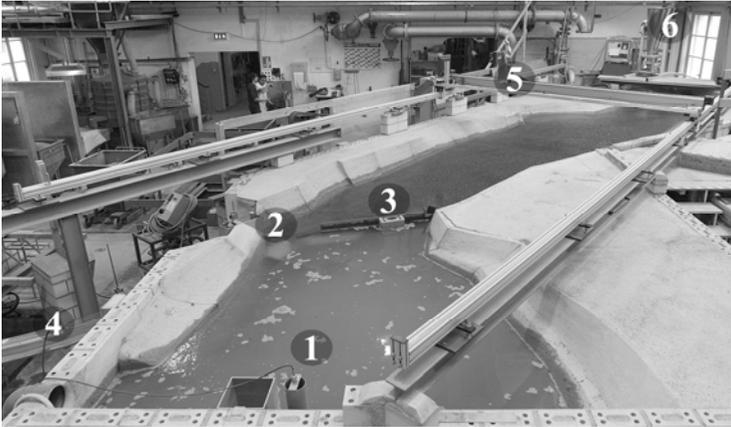


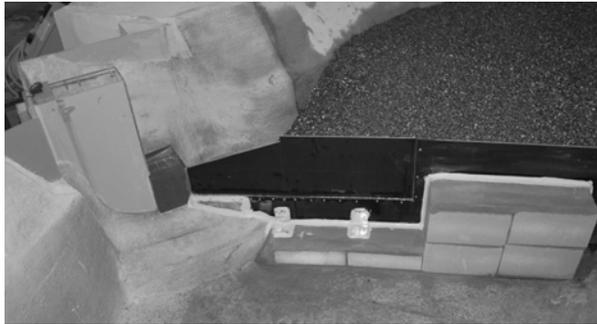
Abbildung 3: Modellübersicht. Blick in Richtung oberstrom. 1) Ultraschall 2) Einlaufbereich 3) Leitkonstruktion 4) Geschiebeumleitstollen 5) Laser 6) Geschiebedotiermaschine

### 5.1 Geschiebeeintrag in den vorderen Seebereich

Wie in Abschnitt 3 erläutert, besteht die Herausforderung des Projekts bei Hochwasserzuflüssen, die die Ausbaupazität des Umleitstollens (HQ<sub>5</sub>) überschreiten. Der überschüssige Abfluss passiert das Einlaufbauwerk des Stollens und wird in Richtung Grundablass abgeführt. Das Sediment muss dennoch vollständig in den Stollen eingeleitet werden. Dies wird durch die Errichtung einer Leitkonstruktion erreicht, die das Geschiebe in Richtung Einlaufstollenportal leitet. In Abbildung 4 ist eine Leitkonstruktion dargestellt, die diagonal auf einer Breite von 80 m über den See führt. Durch eine Öffnung (respektive durch einen abgesenkten Abschnitt dieser Leitvorrichtung) nahe dem Einlaufbauwerk soll derjenige Anteil des Abflusses in den vorderen Teil des Stausees abgeleitet werden, der die Ausbaupazität des Umleitstollens überschreitet.

Der Austrag durch die Öffnung der Leitkonstruktion variiert, abhängig von der Grösse des Zuflusses und der Richtung der Anströmung. Bei Zuflüssen unter 170 m<sup>3</sup>/s wird der gesamte Abfluss vollständig durch den Stollen abgeleitet. Es entsteht demzufolge keine signifikante Strömung in den vorderen Seebereich. Aus diesem Grund ist auch der Austrag von Geschiebe in den vorderen See marginal.

Bei einem Grossteil der Versuche wird die Strömung und somit auch das Geschiebe entlang der rechten Talflanke auf direktem Weg in Richtung Einlaufbauwerk geleitet. Aufgrund einer sich stetig ändernden Morphologie wird bei einigen Versuchen die Leitkonstruktion allerdings orthogonal angeströmt. Infolgedessen bildet sich eine starke Strömung entlang der Leitkonstruktion, sowohl zu Kolkerscheinungen entlang der Konstruktion selbst, als auch einen vermehrten Austrag von Geschiebe von bis zu 15 % des gesamten Geschiebeaufkommens durch die Öffnung in der Leitkonstruktion verursacht.



*Abbildung 4: Einlaufbauwerk und Leitkonstruktion. Blick Richtung oberstrom. Die Öffnung in der Leitkonstruktion ist in diesem Fall dreieckförmig ausgeführt*

Um die Strömung auf der rechten Uferseite zu fokussieren, werden am linken Ufer nicht überströmbare deklinante Buhnen gebaut, die die Strömung auf die rechte Seite des Sees lenken. Mit dieser Massnahme können die Kolkiefen an der Leitkonstruktion sowie der Austrag in den vorderen Seebereich gemindert werden.

### *5.2 In Strömung ausgerichteter Schüttdamm als Leitkonstruktion*

Ausgehend von der Massnahme mittels Buhnen die Strömung zu lenken, entstand die Idee einen Damm zu erstellen, der die Strömung fixiert und immer in Richtung Einlaufbauwerk führt (Abb. 5). Das Geschiebe wird nun auch bei grossen Hochwassern vollständig durch den Umleitstollen geleitet. Der Austrag in den vorderen Teil des Sees beschränkt sich auf den Feinanteil des Sediments. Dieser Anteil schwankt, abhängig von der Böschungsneigung des Verlandungskörpers vor dem Einlaufbauwerk und der Turbulenz vor dem Einlauf, in einem sehr niedrigen Bereich (0 bis 4 %).

### *5.3 Hydraulik des Einlaufbauwerks und des Stollens*

Der Einlauf in den Stollen erfolgt unter Druck, das Bauwerk ist in Form einer Einlauftrumpete gestaltet (Abb. 2). Die Decke sowie die Seitenwände sind strömungsgünstig ausgerundet, die Sohle wird horizontal ausgeführt. Im Anschluss an die Einlauftrumpete befindet sich die Drucksegmentschütze. Hinter der Schütze beginnt der Umleitstollen im Torbogenprofil mit einer 50 m langen, 1 % geneigten Verzögerungsstrecke, welche an die eine 1.8 % geneigte Kurve anschliesst. Zu Beginn der Untersuchungen bildeten sich bei grossen Abflüssen hinter der Schütze Stosswellen, die ein Zuschlagen des Stollens und einen Übergang auf Druckabfluss befürchten liessen. Hauptgrund der Entstehung dieser Stosswellen war die asymmetrische Anströmung auf das Einlaufbauwerk, infolge der diagonal über den See geführten Leitkonstruktion (Abb. 3 und 4) sowie die Topografie im Nahbereich des Einlaufbauwerks. Durch die in Kapitel 5.2 beschriebene Ausrichtung der Leitkonstruktion in Strömungsrichtung sowie die Verfüllung einer Ausbuchtung auf der rechten Talflanke im Nahbereich des Einlaufs (Abb. 5) konnte das Problem der Stosswellenbildung behoben werden. Von grosser Bedeutung ist dabei eine symmetrische Ausrichtung der Leitkonstruktion mit der rechten Talflanke, um eine gleichmässige Anströmung in den Einlaufbereich zu gewährleisten.



Abbildung 5: Einlaufbereich des Umleitstollens mit Leitkonstruktion. Blick in Richtung oberstrom. 1) Einlaufbereich 2) Öffnung in der Leitkonstruktion 3) Leitkonstruktion als Schüttdamm 4) Verfüllung der Ausbuchtung auf der rechten Talflanke

#### 5.4 Schwemmholz

Bei Hochwasser besteht die Gefahr, dass grosse Mengen an Schwemmholz im Einzugsgebiet mobilisiert und in das Reservoir eingetragen werden. Bisher gelangt Schwemmholz bis zur Staumauer und wird dort über die Hochwasserentlastungsanlage in das Unterwasser abgeführt. Bei Betrieb des Geschiebeumleitstollens während eines Hochwasserereignisses besteht die Gefahr, dass das ankommende Schwemmholz in den Stollen gelangt, dort verklaut und den Querschnitt verlegt. Aus Gründen der Betriebssicherheit soll der Einzug von Schwemmholz in den Stollen signifikant vermindert werden. In Abbildung 6 ist der Lösungsansatz dargestellt, der eine Weiterleitung des Schwemmholzes in den vorderen Bereich des Sees ermöglicht. Er beruht auf zwei Massnahmen:

- Zum Einen richtet eine Tauchwand die Oberflächenströmung aus und leitet das von oberstrom ankommende Schwemmholz am Einlaufbauwerk vorbei.
- Zum Anderen wird bei einem Hochwasser mit Schwemmholzaufkommen ein Teilabfluss von mindestens  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  in den vorderen Bereich des Sees geleitet, um eine Strömung zu erzeugen, die das Schwemmholz am Einlaufbauwerk vorbeiführt. Dies erfordert ein Monitoring im Bereich des Einlaufs, um im Fall von Schwemmholzeintrag in den Stausee schnell reagieren zu können.

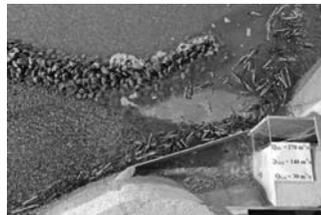


Abb. 6: Einlaufbereich während eines Schwemmholzversuchs. Strömung mit ankommendem Schwemmholz von links nach rechts. Abfluss von oberstrom:  $170 \text{ m}^3/\text{s}$ , Abfluss durch den Umleitstollen:  $140 \text{ m}^3/\text{s}$ , Abfluss in den vorderen Bereich des Sees:  $30 \text{ m}^3/\text{s}$

## 6. Schlussfolgerungen

Das Reservoir der Talsperre Solis im Kanton Graubünden ist seit Inbetriebnahme vor 20 Jahren zu über einem Viertel verlandet. Der Betreiber ewz möchte mittels eines Geschiebeumleitstollens das neu bei Hochwasser eingetragene Geschiebe durch den Stollen in das Unterwasser der Talsperre leiten. Die VAW hat sich dieser Problematik angenommen und mit Hilfe eines hydraulischen Modells ein Konzept erarbeitet, dass folgenden Anforderungen gerecht wird:

- Nahezu 100 % des bei Hochwasser an der Sohle transportierten Sediments wird durch den Umleitstollen geleitet.
- Der Betrieb des Umleitstollens ist auch bei Hochwassern, die die Ausbaukapazität des Umleitstollens übersteigen, möglich. Der überschüssige Teilstrom wird in Richtung Staumauer geleitet. Das Geschiebe wird dennoch nahezu vollständig in den Umleitstollen eingezogen.
- Anfallendes Schwemmholz wird in Richtung Talsperre abgewiesen, ohne dass signifikante Mengen in den Stollen gelangen.

## Bibliographie

- Lais, A., Berchtold, T., und Mache, N.** (2008). *Entlandung Stausee Solis – hydraulische Modellversuche zum Variantenstudium ewz*. VAW Bericht 4243 (unveröffentlicht), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), H.-E. Minor, Hrsg. ETH Zürich, Schweiz
- Stoff, C. J.** (1991). Reservoir sedimentation: a literature survey. Communications on hydraulic and geotechnical engineering, Report No. 91-2, Delft University of Technology, The Netherlands
- Vischer, D.** (1996 a). *Internationales Symposium - Verlandung von Stauseen und Stauhaltungen, Sedimentprobleme in Leitungen und Kanälen Teil 1*. Mitteilungen 142, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), D. Vischer, Hrsg. ETH Zürich, Schweiz
- Vischer, D.** (1996 b). *Internationales Symposium - Verlandung von Stauseen und Stauhaltungen, Sedimentprobleme in Leitungen und Kanälen Teil 2*. Mitteilungen 143, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), D. Vischer, Hrsg. ETH Zürich, Schweiz
- Zarn, B.** (1992). *Lokale Gerinneaufweitung, eine Massnahme zur Sohlenstabilisierung der Emme bei Utzendorf*. Mitteilungen 118, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), D. Vischer, Hrsg. ETH Zürich, Schweiz

## Adresse des Autors

Christian Auel

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH)

Gloriastrasse 37/39, 8092 Zürich, Schweiz

[auel@vaw.baug.ethz.ch](mailto:auel@vaw.baug.ethz.ch)