

## 11. Treffen junger WissenschaftlerInnen an Wasserbauinstituten

---

# Analyse von Fliessgeschwindigkeiten und Abflusstiefen auf verschiedenen Typen von Blockrampen

Markus Studer und Anton Schleiss

### Zusammenfassung

Blockrampen werden eingesetzt, um gefährlichen Sohlenerosionen entgegenzuwirken und die Migration von Fischen zu erleichtern. Um die Durchgängigkeit für Fische zu gewährleisten, müssen hydraulische Kriterien wie maximale Fliessgeschwindigkeiten, minimale Abflusstiefen und maximale Wasserspiegelunterschiede erfüllt sein. Systematische Laborversuche wurden durchgeführt um diese für Forellen festgelegten Kriterien zu untersuchen. Statistische und räumliche Verteilungen von Fliessgeschwindigkeiten, Abflusstiefen und Verhältnisse von kinetischer Energie zur Abflusstiefe von verschiedenen Typen von Blockrampen wurden miteinander verglichen. Die Resultate haben gezeigt, dass monotone, uniforme Blockrampen die Kriterien der Forellennmigration selten erfüllen. Strukturierte Blockrampen sind einiges effizienter. Optimale Konditionen für die Fischdurchgängigkeit können jedoch nur bei Neigungen unter 6 % und Abflüssen unter 1 bis 1.5 m<sup>3</sup>/s/m erreicht werden.

### Abstract

Block ramps are used to protect rivers against dangerous bed erosion and to enhance fish migration. To ensure fish passage, hydraulic criteria like maximum flow velocities, minimal water depths and maximum water level differences must be fulfilled. A systematic laboratory study was performed in order to measure these hydraulic criteria fixed for trouts. Statistical and spatial distributions of velocities, water depths as well as the ratios of water depth and velocity head were compared for different types of block ramps. The results have revealed that uniform block ramps can rarely satisfy the criteria for fish migration. Structured block ramps are more efficient. Nevertheless optimum conditions for fish migration can only be reached for ramp slopes under 6 % and specific discharges below 1 to 1.5 m<sup>3</sup>/s/m.

### 1. Einleitung

Blockrampen werden eingesetzt, um gefährlichen Sohlenerosionen entgegenzuwirken und die Migration von Fischen zu erleichtern. Sie müssen gewisse Kriterien erfüllen, um die Durchgängigkeit für Fische zu gewährleisten. Systematische Laborversuche wurden durchgeführt, um diese für Forellen festgelegten hydraulischen Kriterien zu messen. Das Ziel war auf verschiedenen Typen von Blockrampen den maximalen Abfluss zu eruieren, bei dem die Durchgängigkeitskriterien eingehalten werden. Vier verschiedene Typen von Blockrampen wurden untersucht: eine klassisch gesetzte Rampe mit 10 % Neigung, eine aufgelöste Rampe mit Querriegeln und 6 % Neigung und zwei mäanderförmige Rampen mit 10 %, respektive 6 % Neigung. Es wurden statistische und räumliche Verteilungen der Fliessgeschwindigkeiten, Abflusstiefen

sowie der Verhältnisse von kinetischer Energie zur Abflusstiefe der untersuchten Blockrampen miteinander verglichen.

## 2. Modellversuche

### 2.1 Versuchseinrichtung

Die Versuche wurden in einer 7.7 m langen, 0.5 m breiten, 0.5 m tiefen und um 11 % geneigten, rechteckigen Rinne durchgeführt (Abb. 1). Die Morphologie der Rampen wurde mit gebrochenen Steinen ausgelegt. Um das Wasser nach dem Einlaufbehälter zu beruhigen, wurde ein 2.5 m langes Einlaufstreckenstück mit einer Neigung von 3.5 % installiert. Danach folgte die 3 m lange Rampe mit einer Neigung von 10 % bzw. 6 %.



Abbildung 1: Sicht auf Versuchskanal mit Blockrampe ohne Wasser (links), mit Wasser (rechts)

### 2.2 Messverfahren

Gemessen wurden die Topographie, der Wasserspiegel und die Fliessgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeiten wurden mit einem 1 cm hohen Messflügel gemessen, die Topographie und die Abflusstiefe mit einem Stechpegel. Die Messpunkte waren regelmässig in einem Raster von 12 x 3 cm auf der Rampe verteilt. Für kompliziertere Morphologien wurde das Raster auf 6 x 3 cm verfeinert. Dies ergab zwischen 390 und 675 Punkte pro Abfluss und Messparameter. Die Resultate wurden anschliessend auf einen Prototypen hochgerechnet (Massstab 1 : 25) um mit den Durchgängigkeitskriterien verglichen werden zu können.

### 2.3 Granulometrie

Eine gröbere Granulometrie von gebrochenen Steinen wurde für stärker beanspruchte Stellen wie die Querriegel oder die mäanderförmigen Rampen benutzt. Für weniger stark beanspruchte Stellen wie die gesamte klassisch gesetzte Rampe oder die Stellen zwischen den Querriegeln wurde eine feinere Granulometrie verwendet (Tab. 1).

Tabelle 1: Granulometrien der für die Rampenmorphologien verwendeten Blöcke (Prototypwerte in Klammern; Massstab 1 : 25)

Blockdurchmesser	D <sub>m</sub> [mm] ([m])	D <sub>30</sub> [mm] ([m])	D <sub>65</sub> [mm] ([m])	D <sub>90</sub> [mm] ([m])
Nicht exponierte Blöcke	36 (0.90)	35 (0.87)	38 (0.94)	40 (1.00)
Exponierte Blöcke	51(1.26)	49 (1.24)	52 (1.29)	53 (1.33)

## 2.4 Gemessene Durchgängigkeitskriterien

Für die Bestimmung der Durchgängigkeitskriterien der Blockrampen wurde die Forelle ausgewählt. Die entsprechenden Messkriterien waren die maximale Fließgeschwindigkeit ( $v_{\max} \leq 2$  m/s), die minimale Abflusstiefe ( $h_{\min} \geq 20$  cm), minimale Beckentiefen bei Step-pool-step-Systemen ( $h_{p, \min} \geq 60$  cm) sowie maximale Wasserspiegelunterschiede ( $\Delta h_{\max} \leq 20$  cm) gemäss (DVWK, 1996).

## 2.5 Morphologie der untersuchten Blockrampen

Es wurden vier Rampen untersucht. Die klassisch gesetzte Blockrampe hatte eine Neigung von 10 % und wurde wegen ihrer monotonen Morphologie **smooth type I (10 %)** genannt. Die aufgelöste strukturierte Rampe hatte eine Neigung von 6 % und wurde **transversal sill type II (6 %)** genannt. Die ans Oberwasser angrenzende Hälfte der Rampe bestand aus unregelmässigen Querriegeln, welche bis zu 7.7 m auseinander lagen (Abb. 2 oben links). Die ans Unterwasser angrenzende Hälfte der Rampe bestand aus regelmässigen geraden Querriegeln gemäss Gebler (1991), welche in Abständen von 2.8 bis 3.3 m auseinander lagen (Abb. 2 oben rechts). Die Gerinnesohle wurde mit Blöcken der feineren Granulometrie ausgelegt, die Querriegel mit der gröberen (Tab. 1). Die Querriegel hatten eine durchschnittliche Höhe von 0.75 m. Die Querriegel hatten eine durchschnittliche Höhe von 0.75 m.

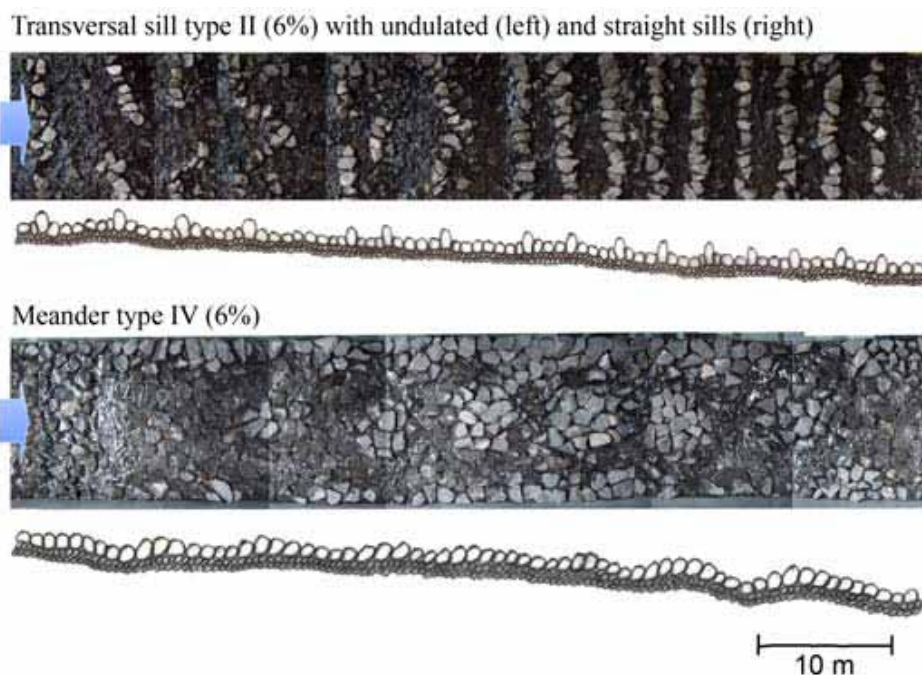


Abbildung 2: Situation und Längenprofil der Rampen transversal sill type II (6 %) und meander type IV (6 %)

Die mäandrierförmigen Typen entstanden durch das Anordnen der Steine zu einer Hügeltopographie, so dass auf der Rampe mäandrierförmige Kanäle entstanden. Der mäandrierförmige Rampentyp mit einer Neigung von 10 % wurde **meander type III (10 %)** genannt. Ihre Erhöhungen und Vertiefungen lagen durchschnittlich 0.4 m über bzw. unter dem mittleren Sohlenniveau. Die ersten 25 m der Rampe bestanden aus zwei Mäandern mit einer gegenseitigen Verschiebung von einer halben Phase. Der Rest der Rampe bestand lediglich aus einem Mäander. Die mittlere Amplitude der Mäandern betrug 3.75 m und die Wellenlänge 17 m. Der mäandrierförmige Rampentyp mit einer Neigung von 6 % wurde **meander type IV (6 %)** genannt (Abb. 2 unten). Die Anzahl

Erhöhungen wurde im Vergleich zu meander type III (10 %) erhöht, um über die gesamte Rampenlänge zwei gegenseitig um eine halbe Phase verschobene Mäander zu erhalten. Die Erhöhungen und Vertiefungen lagen durchschnittlich 0.6 m über bzw. unter dem mittleren Sohlenniveau. Die Amplitude und Wellenlänge der Mäander war dieselbe wie bei meander type III (10 %).

### 3. Resultate

#### 3.1 Morphologie

Anhand der Verteilungskurven (Abb. 3a) ist die monotone Verteilung des smooth type I gut ersichtlich. Die Morphologie (z-Werte) dieses Typs sind am schmalsten gestreut (Standardverteilung  $\pm 0.22$  m). Die kumulierte Verteilungskurve (Abb. 5a) weist für diesen Typ die steilste Steigung auf, was ebenfalls auf eine schmale Streuung hinweist. Die Streuung der Morphologie von type II (transversal sill) bis type IV (meander) liegt in derselben Grössenordnung, wobei type II geringfügig schmaler gestreut ist ( $\pm 0.38$  m) als type III ( $\pm 0.45$  m) und type IV ( $\pm 0.44$  m). Alle z-Werte von type IV liegen markant höher als die z-Werte der anderen Rampentypen. Dies kann damit erklärt werden, dass der Referenzpunkt für die z-Koordinatenberechnung von type IV tiefer lag als bei den anderen Typen.

#### 3.2 Abflusstiefen

Die Verteilung der Abflusstiefen entspricht der Verteilung der Morphologie. Die Abflusstiefen von smooth type I (10 %) haben die schmalste Verteilung ( $\pm 0.23$  m). Die Verteilungen der Abflusstiefen auf type II (transversal sill) bis type IV (meander) liegen in derselben Grössenordnung (Abb. 3b). Type II weist eine geringfügig schmalere Streuung ( $\pm 0.35$  m) auf als type III ( $\pm 0.41$  m) und IV ( $\pm 0.40$  m). Jedoch weisen transversal sill type II (6 %) und meander type IV (6 %) mit 0.90 und 0.94 m die grössten Mittelwerte auf. Bei einem spezifischen Abfluss von  $q = 1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  haben 89 % der Becken eine minimale Wassertiefe von 0.6 m. Für den spezifischen Abfluss von  $q = 2.7 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  erfüllen 97 % aller Becken dieses Kriterium. Der Versuch, welcher am meisten das Kriterium der minimalen Abflusstiefe von 0.2 m verletzt, generiert einen spezifischer Abfluss von  $q = 1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  auf der Rampe transversal sill type II (6 %). Dabei wird die minimale Abflusstiefe noch auf 86 % der Rampenfläche eingehalten. Für alle weiteren getesteten Abflüsse und Rampentypen ist die Einhaltung dieses Kriteriums besser.

#### 3.3 Fliessgeschwindigkeiten

Smooth Type I (10 %) hat mit 4.2 m/s die grösste mittlere Fliessgeschwindigkeit (Abb. 3c). Die Standardabweichung ist mit  $\pm 0.61$  m/s im Vergleich zu den andern Typen gering. Die breiteste Streuung kann bei meander type III (10 %) beobachtet werden ( $\pm 1.31$  m/s). Die mittlere Fliessgeschwindigkeit dieses Typs ist mit 3.2 m/s etwas höher als die Mittelwerte von transversal sill type II (6 %) und meander type IV (6 %), welche beide bei 3.0 m/s liegen. Bei Abbildung 4 sind die Flächen, wo die Passierbarkeitskriterien ( $v \leq 2$  m/s) erfüllt sind, mit einer dicken Linie umrahmt. Auf diesen Flächen ist eine Forellenmigration theoretisch möglich. Der Rampenteil mit regelmässigen Querriegeln (Abb. 4 oben rechts) ist leichter passierbar als der Teil mit unregelmässigen Querriegeln (Abb. 4 oben links). Auf meander type IV (6 %) ist der zentrale Teil der Rampe zwischen den Erhöhungen sowie der Rand der Rampe theoretisch für Forellen passierbar (Abb. 4 unten).

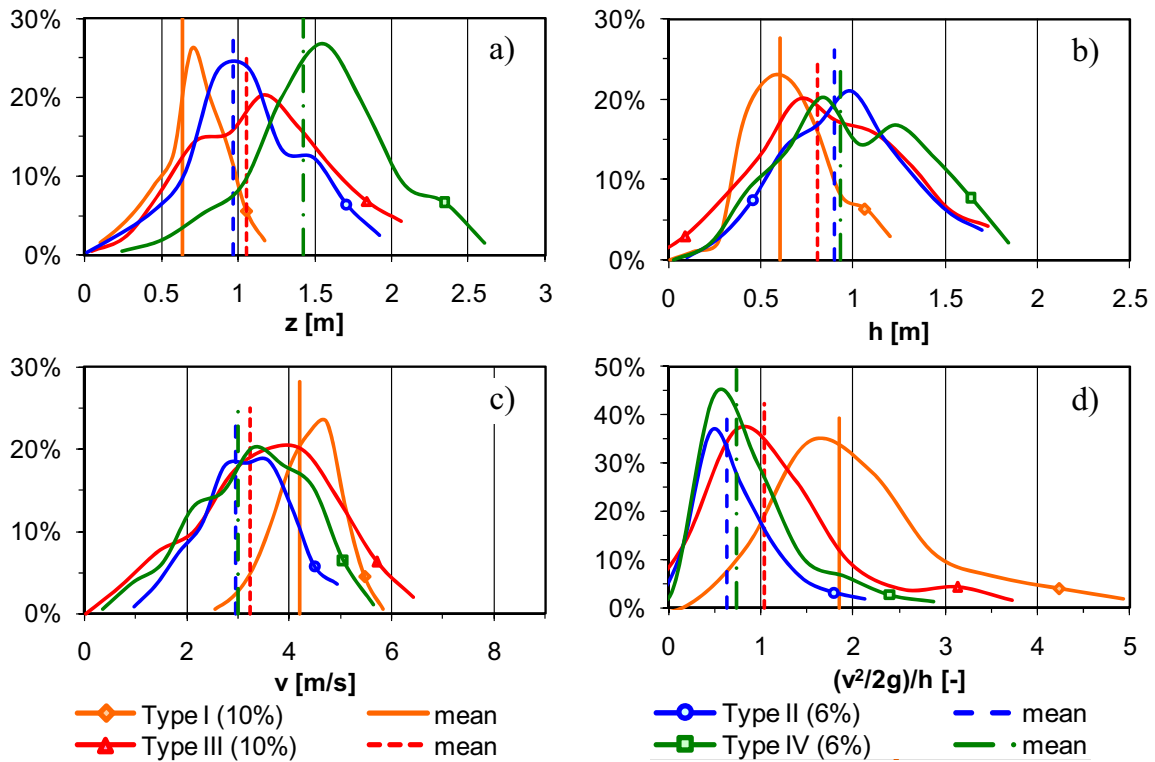


Abbildung 3: Verteilungskurven der Morphologie (a), Abflusstiefen (b), Fließgeschwindigkeiten (c) und Verhältnisse von kinetischer Energie zur Abflusstiefe (d) für den spezifischen Abfluss von  $2.7 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  und die Rampentypen I, II, III und IV.

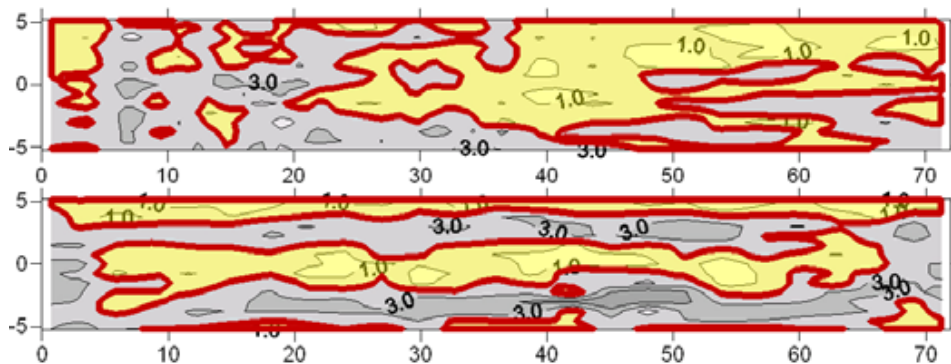


Abbildung 4: Konturplots der Fließgeschwindigkeiten in m/s für den spezifischen Abfluss von  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  von transversal sill type II (6 %, oben) und meander type IV (6 %, unten); dicke Linie bezeichnet Gebiete mit Fließgeschwindigkeiten  $\leq 2 \text{ m/s}$

### 3.4 Verhältnisse von kinetischer Energie zur Abflusstiefe

Die Verhältnisse der kinetischen Energie zur Abflusstiefe  $(v^2/2g)/h$  nehmen im Allgemeinen für höhere spezifische Abflüsse zu. Die Verhältnisse des smooth type I (10 %) sind am breitesten gestreut und weisen den höchsten Mittelwert auf. In Bezug auf die Fischpassierbarkeit gilt, je geringer das Verhältnis der kinetischen Energie zur Abflusstiefe, desto besser die Fischdurchgängigkeit. Bei den durchgeführten Versuchen weisen 95 % aller Messpunkte, welche sowohl das Kriterium der maximalen Fließgeschwindigkeit ( $\leq 2 \text{ m/s}$ ) als auch der minimalen Abflusstiefe ( $\geq 0.2 \text{ m}$ ) erfüllen, Verhältnisse zwischen 0 und 0.45 auf. Es wird deshalb angenommen, dass Verhältnisse oberhalb von 0.45 in Bezug auf die Durchgängigkeit Probleme darstellen können.

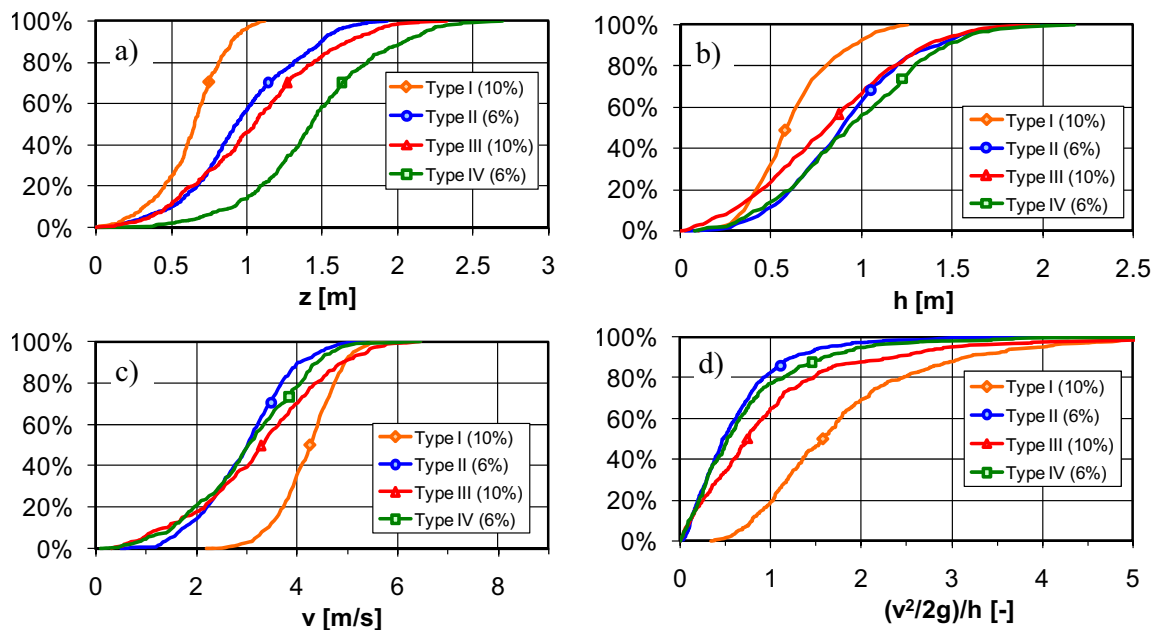


Abbildung 5: Kumulierte Verteilungskurven der Morphologie (a), Abflusstiefen (b), Fließgeschwindigkeiten (c) und Verhältnisse der kinetischen Energie zur Abflusstiefe (d) für den spezifischen Abfluss von 2.7 m<sup>3</sup>/s/m und die Rampentypen I, II, III und IV

#### 4. Schlussfolgerungen

Aus den gemessenen Abflussverhältnissen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden: Die klassisch gesetzte Blockrampe mit 10 % Neigung ist für die gemessenen Abflüsse ( $q=2.7-6.5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) nicht passierbar. Die aufgelöste strukturierte Rampe mit Querriegeln ist bis  $q=1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (unregelmässig) resp.  $q=2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (regelmässig) passierbar. Die mäanderförmige Rampe mit 6 % Neigung ist bis  $q=1.5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  passierbar und die mäanderförmige Rampe mit 10 % Neigung bis  $q=1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Es kann zusammengefasst werden, dass uniforme, monotone Blockrampen die Durchgängigkeitskriterien für Forellen kaum erfüllen können. Strukturierte Blockrampen sind besser. Optimale Konditionen für die Durchgängigkeit von Forellen können jedoch nur für Neigungen unter 6 % und spezifische Abflüsse unter 1 bis 1.5 m<sup>3</sup>/s/m erreicht werden.

Die vorliegende Arbeit wird im Rahmen des Forschungsprojektes Integrales Flussgebietsmanagement vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) unterstützt.

#### Bibliographie

- DVWK (1996). *Fischaufstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle*. Merkblätter zur Wasserwirtschaft. 232/1996. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), Bonn, Deutschland.
- Gebler, R.J. (1991). *Sohlrampen und Fischaufstiege*. Eigenverlag, D-7519 Walzbachtal, Deutschland.

#### Adresse der Autoren

Markus Studer und Prof. Dr. Anton Schleiss  
 Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)  
 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)  
 Station 18, 1015 Lausanne, Schweiz  
[markus.studer@epfl.ch](mailto:markus.studer@epfl.ch), [anton.schleiss@epfl.ch](mailto:anton.schleiss@epfl.ch)