



Hydraulische Bemessung des Klaviertastenwehrs

Hydraulic design of Piano Key Weirs

Michael Pfister, Anton J. Schleiss

Kurzfassung

Freie Überfallwehre sind hydraulisch effizient und sicher im Betrieb. Die Überfallkapazität hängt dabei direkt von der hydraulisch aktiven Wehrlänge ab, welche beim Labyrinthwehr relativ zur konstruktiven Wehrbreite optimiert ist. Als Alternative zum bekannten Labyrinthwehr wurde in neuerer Zeit das Klaviertastenwehr entwickelt, welches gegenüber Labyrinthwehren Vorteile hinsichtlich hydraulischer Leistungsfähigkeit sowie Baukosten aufweist. Dank der vergleichsweise kleinen Aufstandsfläche sind Klaviertastenwehre vor allem eine effiziente und kostengünstige Lösung zur Erhöhung der Hochwasserabflusskapazität bei bestehenden Gewichtsstaumauern.

Aktuelle Forschungsergebnisse, resultierend aus umfangreichen Modellversuchen zu Klaviertastenwehren am *Laboratoire de Constructions Hydrauliques* (LCH) der EPFL, erlauben eine allgemeine Vorhersage der Abflusskapazität in Funktion der Wehrgeometrie. Diese wird im Artikel beschrieben, begleitet von Hinweisen zur Sensitivität des Klaviertastenwehrs bezüglich Verklausung.

Abstract

The Piano Key Weir (PKW) is a hydraulically attractive alternative to linear overflow weirs, increasing the unit discharge for similar heads and spillway widths. This advantage allows for operating dam reservoirs on an increased level and thereby provides an enhanced retention volume, resulting of the non-linear set-up of PKWs being folded back and forth to make repeating cycles or keys. PKWs are relatively novel structures, so that a comprehensive and systematic model test series is presented herein providing design equations. It turned out that primary and secondary parameters exist regarding the relative effect on the discharge rating curve. The main parameters having a significant effect on the capacity are the relative developed crest length and the relative head on the PKW. The secondary parameters of small but not negligible effect comprise the ratio of inlet and outlet key widths, the ratio of inlet and outlet key heights, the relative overhang lengths, and the relative height of the parapet walls.

1 Einleitung

Hochwasserentlastungsanlagen spielen eine zentrale Rolle für die Sicherheit von Talsperren. Eine ungenügende Hochwasserentlastungskapazität ist die Ursache von rund einem Drittel aller Talsperrenbrüche (Schleiss 2011a). Das Einlaufbauwerk einer Hochwasserentlastungsanlage kann geregelt ausgebildet werden, und ist entsprechend mit Kontrollorganen wie Klappen oder Segmenten ausgerüstet, oder ungeregelt, und besteht dann aus einem Überfallprofil. Geregelt Einlaufbauwerke verfügen über eine relativ hohe spezifische Abflusskapazität, während ungeregelte Einlaufbauwerke eine geringere Störungsanfälligkeit aufweisen.

Die Entlastungskapazität eines freien Kronenüberfalls ist direkt proportional zu dessen Länge, für eine gegebene oberwasserseitige Energiehöhe H . Um bei ungeregelten Überfallprofilen das Defizit der vergleichsweise geringen spezifischen Abflusskapazität zumindest teilweise zu kompensieren, kann die abgewinkelte Kronenlänge erhöht werden. Dazu werden traditionell gekrümmte oder fächerförmige Wehre verwendet. Als besonders effizient haben sich Labyrinthwehre herausgestellt (Lux und Hinchliff 1985, Tullis *et al.* 1995, Falvey 2003), welche bisher in grosser Anzahl erstellt wurden (Abb. 1). Diese werden meist dann verwendet, falls die verfügbare Wehrbreite oder der oberwasserseitige Überstau beschränkt sind.



Abb. 1: Lake Townsend Dam Labyrinthwehr (Foto Schnabel Engineering, USA)

Das Klaviertastenwehr stellt eine Weiterentwicklung des Labyrinthwehrs dar (Schleiss 2011b). Die Aufstandsfläche ist geringer als bei einem Labyrinthwehr, woraus Überhänge zum Unter- und Oberwasser hin resultieren (Abb. 2). Nebst

einer verbesserten hydraulischen Funktionsfähigkeit hat das Klaviertastenwehr somit den Vorteil, dass es auf äusserst beschränkten Aufstandsflächen, wie zum Beispiel auf Gewichtsmauern, installiert werden kann. Es stellt deshalb insbesondere eine effiziente und wirtschaftliche Lösung für die Erhöhung der Hochwasserentlastungskapazität von Gewichtsmauern dar.



(a)



(b)

Abb. 2: Klaviertastenwehre der Schwergewichtsmauern (a) L'Etroit F (Foto Sébastien Erpicum), und (b) Malarce F (Foto Michael Pfister)

Das erste Klaviertastenwehr wurde 2006 durch EDF (Electricité de France) bei der Talsperre Golours in Frankreich in Betrieb genommen (Laugier *et al.* 2013).

Dann folgten beinahe jährlich weitere Anlagen in Frankreich: St. Marc (2008), Etroit (2009, Abb. 2a), Gloriettes (2010), Escouloubre (2011), und Malarce (2013, Abb. 2b). Sämtliche Klaviertastenwehre wurden auf oder neben bestehenden, älteren Talsperren installiert, meist als Hilfs-Hochwasserentlastungsanlage, um die zentrale Entlastung zu ergänzen. Hier können Klaviertastenwehre ihre Vorteile am besten unter Beweis stellen: sie benötigen eine geringe Aufstandsfläche (z. B. auf einer Mauerkrone), stellen trotz einer kompakten Breite eine lange abgewinkelte Überfallkrone mit einer grosser Abflusskapazität bereit, und führen grosse spezifische Abflüsse unter einer vergleichsweise geringen Energiehöhe H ab. Trotz ihrer anspruchsvollen Geometrie sind Klaviertastenwehre günstig in der Erstellung, wie eine Baukostenaufstellung von Laugier *et al.* (2013) zeigt. Weitere französische Klaviertastenwehre sind in der Planung weit fortgeschritten oder in Bau: Campauleil, Charmines, Raviège, und Gage (Dugué *et al.* 2013). Andere Klaviertastenwehre sind weltweit bereits erstellt oder in Planung.

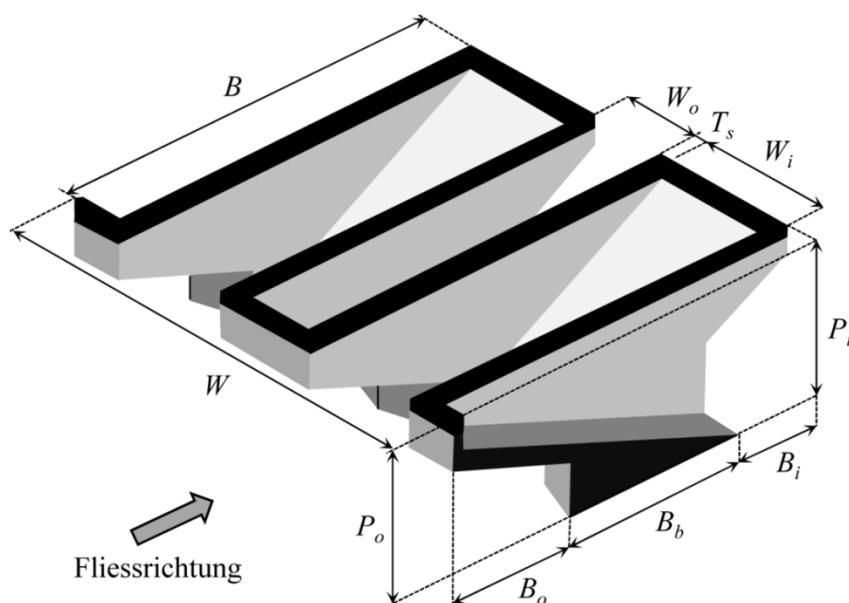


Abb. 3: Parameterdefinition beim Klaviertastenwehr (gemäss Pralong *et al.* 2011)

Häufig wird der A-Typ des Klaviertastenwehres gebaut, bei welchem die Einlauf- und Auslauftaste sowohl ober- wie auch unterwasserseitig überhängend sind. Die Nomenklatur nach Pralong *et al.* (2011) wird verwendet (Abb. 3), bei der B = Länge in Strömungsrichtung, L = Abwicklungslänge der Krone, P = vertikale Wehrhöhe, T_s = Wanddicke, R = Höhe einer allfälligen Brüstungsmauer, und W = Wehrbreite. Der Index i bezieht sich auf die Einlauftaste, d. h. die bei randvollem Reservoir benetzte Taste, und der Index o auf die Auslauftaste, d. h. die bei randvollem Reservoir trockene Taste.

2 Bemessung

2.1 Definition zur hydraulischen Bemessung

Die Abflusskapazität eines Klaviertastenwehrs lässt sich mit dem Abflusskoeffizienten C_P angeben (Kabiri-Samani und Javaheri 2012), mittels eines Wehransatzes (Machiels *et al.* 2013), oder als Vergleich des Klaviertastenwehr-Abflusses Q_P mit jenem eines linearen scharfkantigen Wehrs Q_S , namentlich als (Leite Ribeiro *et al.* 2012)

$$r = \frac{Q_P}{Q_S} \quad [1]$$

Unter Annahme von $C_s = 0,42$ (Hager und Schleiss 2009) folgt der Referenz-Abfluss über das scharfkantige, frontal angeströmte Wehr Q_S zu

$$Q_S = C_s W \sqrt{2gH}^{1.5} \quad [2]$$

Die Abflussbeziehung Q_P zu H wurde am LCH im Rahmen einer ausgedehnten Messkampagne am physikalischen Modell bestimmt (Leite Ribeiro *et al.* 2012). Insgesamt wurden 49 geometrische A-Typ Konfigurationen untersucht, welche 380 Messwerte lieferten. Die massgebenden Parameter wurden im folgenden Bereich variiert:

$$\begin{array}{ll} 1.50 \text{ m} \leq L \leq 3.50 \text{ m}, & 0.33 \text{ m} \leq B \leq 1.00 \text{ m}, \\ 0.10 \text{ m} \leq W_i \leq 0.20 \text{ m}, & 0.10 \text{ m} \leq W_o \leq 0.20 \text{ m}, \\ 0.10 \text{ m} \leq P_i \leq 0.28 \text{ m}, & 0.10 \text{ m} \leq P_o \leq 0.28 \text{ m}, \\ 0.07 \text{ m} \leq B_i \leq 0.40 \text{ m}, & 0.07 \text{ m} \leq B_o \leq 0.40 \text{ m}, \\ 0.00 \text{ m} \leq R \leq 0.06 \text{ m}, & 0.02 \text{ m} \leq H \leq 0.27 \text{ m}. \end{array}$$

Die beiden Werte $T_s = 0.02 \text{ m}$ und $W = 0.50 \text{ m}$ wurden konstant gehalten. Um Massstabseffekte auszuschliessen, blieben die Tests mit $H < 0.05 \text{ m}$ für die Datenauswertung unberücksichtigt.

2.2 Hydraulischer Effekt der primären Parameter

Den massgebenden Einfluss auf die PKW-Abflusskapazität hat die relative Abwicklungslänge. Diese wird als $(L-W)/W$ formuliert, um Gl. [1] Rechnung zu tragen. Ist nämlich $L = W$, so findet keine Erhöhung des Abflusses im Vergleich zu einem linearen scharfkantigen Wehr statt ($r = 1$), und $(L-W)/W = 0$. Zudem ist von Labyrinthwehren bekannt (Tullis *et al.* 1995), dass diese besonders für geringe Energiehöhen H effizient sind. Dann ist hydraulisch die volle Abwicklungslänge L aktiv, während für grosse H der Einfluss der Ecken den

Abfluss etwas reduziert. Entsprechend wird ein Parameter P_i/H eingeführt. Die Auswertung der Modelldaten legt folgende Normalisierung nahe (Leite Ribeiro *et al.* 2012)

$$\delta = \left(\frac{(L-W)P_i}{WH} \right)^{0.9} \quad [3]$$

Abb. 4a zeigt die aus den Messwerten Q_P bestimmten Parameter r als Funktion der Normalisierung nach Gl. [3]. Im Messbereich ($0 < \delta < 20$) lassen sich die Daten mit einem linearen Trend approximieren zu

$$r = 1 + 0.24\delta \quad [4]$$

Die Korrelation zwischen den Messdaten und der Vorhersage gemäss Gl. [4] beträgt $R^2 = 0.96$ für die eigenen Daten (Leite Ribeiro *et al.* 2012) und $R^2 = 0.98$ für die von Machiels *et al.* (2013) zur Verfügung gestellten Daten. Die Konstante 1 in Gl. [4] stellt die Vergleichbarkeit mit dem linearen scharfkantigen Wehr sicher (bei welchem $r = 1$ und $\delta = 0$, d. h. ohne relative Abflusserhöhung).

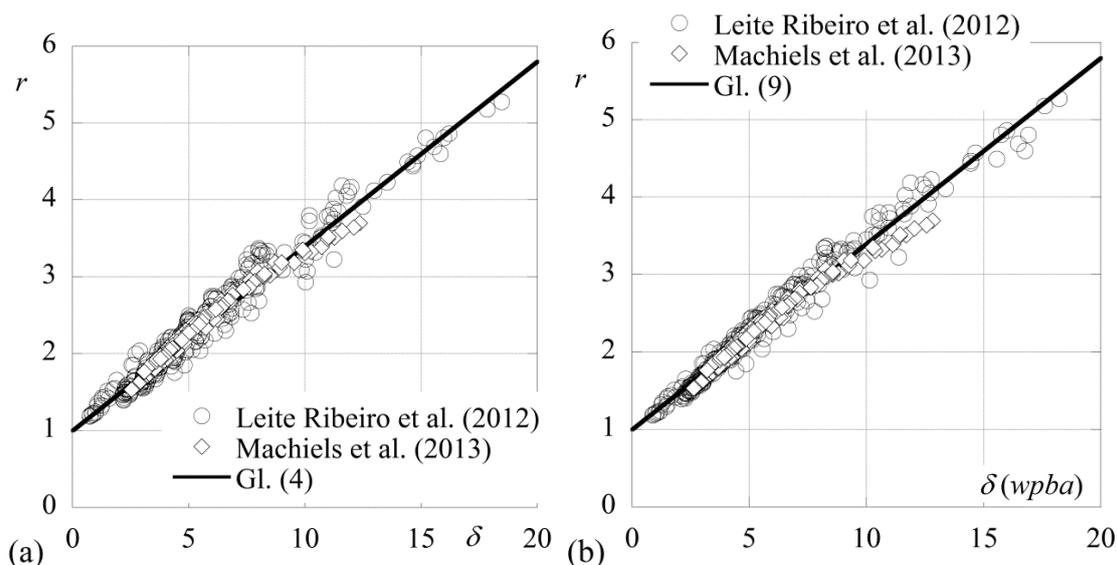


Abb. 4: Darstellung der vom Modell hergeleiteten Werte r mit den Normierungen gemäss (a) Gl. [4], und (b) Gl. [9] unter Berücksichtigung der Korrekturfaktoren für die effektive PKW-Gestalt (in Anlehnung an Pfister und Schleiss 2013)

2.3 Hydraulischer Effekt der sekundären Parameter

Die systemische Variation der Klaviertastenwehre hat gezeigt, dass sich geometrische Details auf die Abflusskapazität auswirken. Deren Effekt entspricht einem Faktor zwischen 0.9 und 1.2 anzuwenden auf δ nach Gl. [4], und ist damit im Gegensatz zu den primären Parametern gering. Aus

Modelldaten konnten nachfolgende Korrekturfaktoren abgeleitet werden (Leite Ribeiro *et al.* 2012):

Korrekturfaktor zum Einfluss der Tastenbreite

$$w = \left(\frac{W_i}{W_o} \right)^{0.05} \quad [5]$$

Korrekturfaktor zum Einfluss der Tastenhöhe

$$p = \left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{0.25} \quad [6]$$

Korrekturfaktor zum Einfluss der Überhanglänge

$$b = \left(0.3 + \frac{B_o + B_i}{B} \right)^{-0.50} \quad [7]$$

Korrekturfaktor zum Einfluss der Brüstungsmauern

$$a = 1 + \left(\frac{R_o}{P_o} \right)^{2.00} \quad [8]$$

Werden alle Korrekturfaktoren berücksichtigt, kann Gl. [4] erweitert werden zu

$$r = 1 + 0.24\delta(wpba) \quad [9]$$

Gleichung [9] und die eigenen Messdaten korrelieren mit $R^2 = 0.98$, und die vom Machiels *et al.* (2013) zur Verfügung gestellten Daten erneut mit $R^2 = 0.98$. Der Zuwachs an Korrelation mag gering erscheinen, gleichzeitig reduziert sich jedoch bei Anwendung von Gl. [9] hauptsächlich die Anzahl von Ausreißern. Dies ist in Abb. 4b ersichtlich, welche die aus den Messungen bestimmten Werte r mit der Normalisierung $\delta(wpba)$ vergleicht.

2.4 Wirtschaftlichkeit

Machiels (2012) beschreibt nebst hydraulischen Aspekten auch technische und wirtschaftliche Kenngrößen von Klaviertastenwehren:

- Wird ein Klaviertastenwehr auf eine bestehende Schwergewichtsmauer aufgesetzt, muss ein Teil der Mauerkrone entfernt und der See abgesenkt werden. Daraus resultiert ein Interesse, die Wehrhöhe klein zu halten. Niedrige Klaviertastenwehre mit $P_i/(W_o+W_i+2T_s) \approx 0.5$ entsprechen am

ehesten diesen Anforderungen. Allerdings sind dann die verbleibenden, hydraulisch wirksamen Parameter zu optimieren, so dass B_o/B_i bis zu 2.0, und $1.2 \leq W_i/W_o \leq 1.5$.

- Neu zu erstellende Anlagen weisen einen grösseren Freiraum in der Gestaltung auf. Entsprechend ist ein hohes Wehr mit $1 \leq P_i/(W_o+W_i+2T_s) \leq 1.3$ vorzuziehen, und infolge der Wirtschaftlichkeit $B_o/B_i = 1$ und $W_i/W_o = 1$.
- Die Kronenform sollte möglichst einem Halbkreis entsprechen (cylindrical weir). Aufgrund der meist hohen Anzahl an Zyklen wirkt sich dies kaum auf die Schalungskosten auf.

3 Beobachtungen zu Schwemmholz

Die Verklausung von Wehren beeinflusst deren Abflusskapazität. Diese wird unter dem Einfluss von Schwemmholz verringert, unter einer gleichzeitigen Erhöhung der oberwasserseitigen Energiehöhe. Beide Aspekte sind für die Dimensionierung von Wehren relevant, da sie insbesondere die Anlagensicherheit einer Talsperre betreffen.

Eine weitere Serie von Modellversuchen hat Aufschluss zum Verhalten von Schwemmholz auf Klaviertastenwehren gegeben (Abb. 5, Pfister *et al.* 2013). Drei unterschiedliche Klaviertastenwehre wurden getestet, mit jeweils unterschiedlichen Widerlagern. Das Oberwasser entsprach einem Stausee, mit einer vernachlässigbar kleinen Anströmgeschwindigkeit zum Wehr. Das Schwemmholz bestand aus Stämmen und Wurzelstöcken. Es wurden sowohl Einzelholzttests durchgeführt, als auch der Effekt von Schwemmholzhaufen bestimmt. Das Testprogramm hat spezifische Abflüsse bis $12.5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ und spezifische Schwemmholzfrachten bis $9 \text{ m}^3/\text{m}$ beinhaltet, mit W als Referenzbreite (Abb. 3).

Ohne auf weitere Einzelheiten einzugehen kann folgendes festgehalten werden:

- Einzelhölzer bleiben in der Regel auf dem Klaviertastenwehr liegen, falls Ihr Stammdurchmesser grösser oder gleich der kritischen Abflusstiefe ist. Wurzelstücke verklausen bei geringen Abflusstiefen bzw. Abflüssen.
- Schwemmholzhaufen bleiben bei spezifischen Abflüssen unter ungefähr $3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ immer liegen, und verklausen zumindest teilweise bis zu spezifischen Abflüssen von rund $12 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Der aus der Verklausung resultierende maximale Überstau beträgt typischerweise zwischen 0.1 und 0.2 m.
- Aufgrund der geringen Anströmungsgeschwindigkeit ist die Verklausung weder kompakt noch hoch, und entsprechend gut durch- und unterströmbar.



Abb. 5: Verklaustes Klaviertastenwehr im physikalischen Modell, Sicht vom Oberwasser (Foto LCH)

4 Zusammenfassung

Klaviertastenwehre bieten sich für die Erhöhung der Abflusskapazität bestehender unregelter Hochwasserentlastungsanlagen an. Nebst einem kleinen Platzbedarf und verhältnismässig geringen Baukosten weisen sie vor allem eine überproportionale Länge der Überfallkrone auf, was eine äusserst günstige Abflusskurve bewirkt. In anderen Worten ausgedrückt heisst das, dass ein grosser Abfluss unter einer geringen Energiehöhe abgeleitet werden kann. Dadurch können Speicherseen auf einem verhältnismässig hohen maximalen Betriebs-wasserspiegel bewirtschaftet werden.

Die Abflusskapazität von typischen Klaviertastenwehren des Typs A lässt sich mit den vorgestellten Gleichungen abschätzen. Die wichtigsten Parameter, welche die Abflusskapazität dominieren, sind die relative Abwicklungslänge und die relative Energiehöhe. Eine weitere, wenn auch geringere Steigerung des Abflusses lässt sich mit einer detaillierten Optimierung der Klaviertastenwehr-Geometrie bewirken.

Wie die meisten Wehrtypen sind auch Klaviertastenwehre anfällig auf Verklausung. Ihre Längsstruktur (in Strömungsrichtung gesehen) erlaubt jedoch eine teilweise Unterströmung des blockierten Schwemmholzes, weshalb sich die Abflusskapazität nicht massgeblich verringert. Modellversuche haben gezeigt, dass der aus Verklausung resultierende Überstau bloss zwischen 0.1 und 0.2 m beträgt.

Referenzen

- Dugué, V., Pfister, M., Hachem, F., Boillat, J.-L., Nagel, V., Laugier, F. (2013). Etude sur modèle physique du nouvel évacuateur de crue du barrage de Gage II. *La Houille Blanche*, 69(2), 31–38.
- Falvey, H.T. (2003). *Hydraulic design of Labyrinth weirs*. ASCE Press, Reston VA.
- Hager, W.H., Schleiss, A.J. (2009). *Constructions hydrauliques, Ecoulements stationnaires. Traité de Génie Civil 15*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- Kabiri-Samani, A., Javaheri, A. (2012). Discharge coefficient for free and submerged flow over Piano Key weirs. *J. Hydraulic Res.*, 50(1), 114–120.
- Laugier, F., Vermeulen J., Lefebvre, V. (2013). Overview of Piano Key Weirs experience developed at EDF during the past few years. *Labyrinth and Piano Key Weirs II*, CRC Press, Boca Raton, 213–226.
- Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A.J., Boillat, J.-L. (2012). Hydraulic design of A-type Piano Key weirs. *J. Hydraulic Res.*, 50(4), 400–408.
- Lux, F., Hinchliff, D. (1985). Design and construction of labyrinth spillways. 15th Congress ICOLD 4(Q59-R15), Lausanne, Switzerland, 249–274.

- Machiels, O. (2012). Experimental study of the hydraulic behaviour of piano key weirs. PhD Thesis. HECE Research Unit, University of Liège B. <http://hdl.handle.net/2268/128006>
- Machiels, O., Dewals, B., Archambeau, P., Piroton, M., Ercicum, S. (2013). An analytical approach for Piano Key weir hydraulic design. *Labyrinth and Piano Key Weirs II*, CRC Press, Boca Raton, 131–138.
- Pfister, M., Capobianco, D., Tullis, B., Schleiss, A.J. (2013). Debris blocking sensitivity of Piano Key weirs under reservoir type approach flow. *J. Hydraulic Engng.*, 139(11), 1134–1141.
- Pfister, M., Schleiss, A.J. (2013). Estimation of A-type Piano Key weir rating curve. *Labyrinth and Piano Key Weirs II*, CRC Press, Boca Raton, 139–147.
- Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B., Laugier, F., Ercicum, S., Machiels, O., Piroton, M., Boillat, J.L., Leite Ribeiro, M., Schleiss, A.J. (2011). A naming convention for the Piano Key weirs geometrical parameters. *Labyrinth and Piano Key Weirs I*, CRC Press, Boca Raton, 271–278.
- Schleiss, A.J. (2011a). Vom Labyrinth- zum Klaviertastenwehr. Festkolloquium, WHH – Wasserbau, Hydraulik, Hydrologie, VAW, ETH Zürich, VAW-Mitteilung 217, 19–36.
- Schleiss, A.J. (2011b). From labyrinth to piano key weirs: A historical review. *Labyrinth and Piano Key Weirs I*, CRC Press, Boca Raton, 3–15.
- Tullis, J.P., Amanian, N., Waldron, D. (1995). Design of labyrinth spillways. *J. Hydraulic Engng.*, 121(3), 247–255.

Adressen der Autoren

Dr. Michael Pfister (korrespondierender Autor)

Email: michael.pfister@epfl.ch

Prof. Dr. Anton J. Schleiss

Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Station 18

CH-1015 Lausanne