

Vom Labyrinth- zum Klaviertastenwehr

A. J. Schleiss

Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse

Zusammenfassung

Unregulierte freie Überfallwehre sind hydraulisch effizient und sicher im Betrieb. Da die Überfallkapazität direkt von der Länge des Wehres abhängt, wurde vor längerer Zeit das Labyrinthwehr entwickelt. Dessen hydraulische Funktionsweise unter dem Einfluss der verschiedenen geometrischen Parameter ist recht gut bekannt. Die Auslegung basiert jedoch immer noch auf experimentell bestimmten und verallgemeinerten Bemessungsdiagrammen.

Das in den letzten Jahren eingeführte Klaviertastenwehr weist gegenüber traditionellen Labyrinthwehren klare Vorteile hinsichtlich hydraulischer Leistungsfähigkeit sowie Baukosten auf. Dank der kleinen Aufstandsfläche sind die Klaviertastenwehre eine effiziente sowie kostengünstige Lösung für die Erhöhung der Hochwasserabflusskapazität bei Gewichtsstauanlagen. Bis heute sind jedoch erst überschlägige Bemessungsregeln entwickelt worden, welche noch nicht verallgemeinert werden können. Die laufende Forschung für dieses komplexe Bauwerk ist eine Herausforderung für viele Wissenschaftler weltweit. In den letzten Jahren wurden trotz dieser Kenntnislücke mehrere Prototypen gebaut, welche die Hochwasserkapazität bei bestehenden Stauanlagen wirksam erhöhen.

Summary

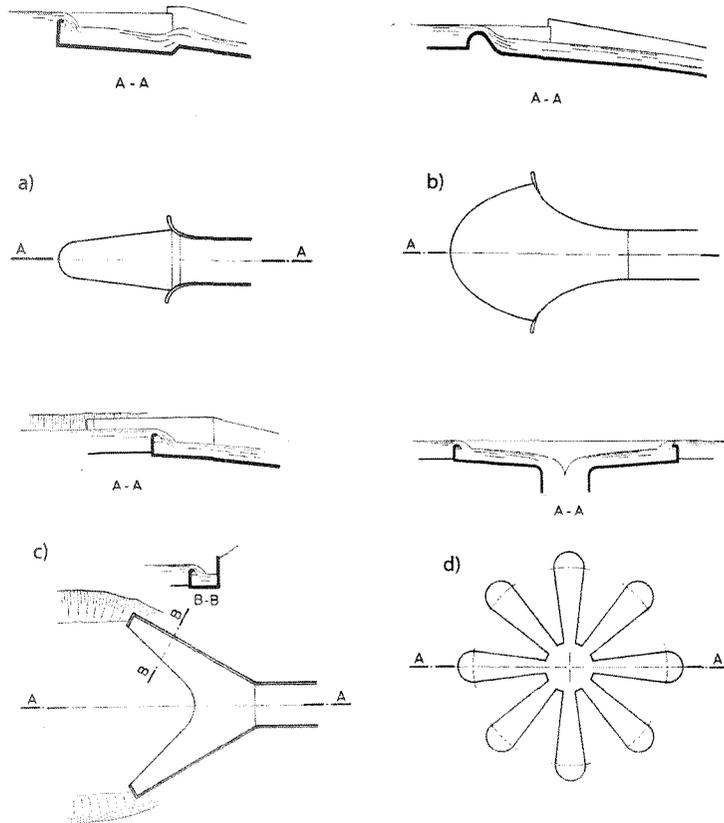
Free crest spillways are hydraulically efficient and safe in operation. Since their discharge capacity is directly proportional to the crest length several types have been developed with the purpose to increase the length of the latter. Among these types traditional labyrinth weir spillways have been studied and used for a long time. Their hydraulic performance and the effect of the involved geometrical parameters are well known. Nevertheless, their design still bases on experimentally derived and generalized performance curves.

The recently introduced Piano Key weirs present clear advantages regarding hydraulic performance and construction costs compared to classical labyrinth weirs. Especially its small footprint makes the Piano Key weir an efficient and cost effective solution for the increase of the flood release capacity at existing concrete gravity dams. Until today only preliminary design procedures are available which cannot yet be generalized. The ongoing research on this complex hydraulic structure is a challenge for many scientists all over the world. Despite of this, several prototypes have been installed successfully over the last years on existing dams, which enhance efficiently the flood release capacity.

1 Einführung

Hochwasserentlastungen spielen eine bedeutende Rolle für die Sicherheit von Talsperren. Eine ungenügende Hochwasserentlastungskapazität ist die Ursache von rund einem Drittel aller Talsperrenbrüche.

Die Entlastungskapazität eines freien Kronenüberfalles für eine bestimmte oberwasserseitige Energiehöhe ist direkt proportional zu dessen Länge. Die Länge eines freien Überfalles kann erhöht werden indem anstelle von geradlinigen gekrümmte oder zig-zag-förmige Wehre verwendet werden.

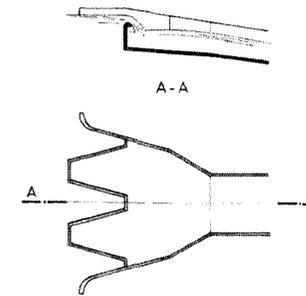


Figur 1 Gekrümmte oder zig-zag-förmige Wehre (ICOLD, 1994): a) Entenschnabelwehr, b) Fächerwehr c) Y – Wehr. d) Margaritenwehr.

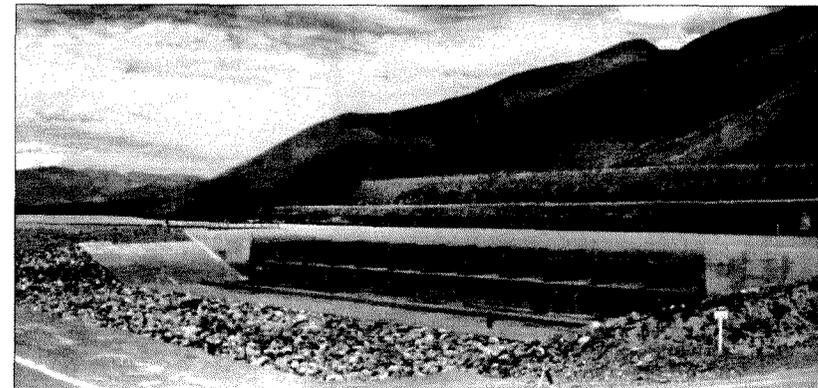
Für eine bestimmte Energiehöhe nimmt der Überfallabfluss dementsprechend mit der Wehrlänge zu. Mit dem Ziele den Überfallabfluss zu erhöhen wurden vorerst folgende Wehrgeometrien entwickelt (Figur 1):

- a) Entenschnabel- oder Badewannenwehr
- b) Fächerwehr
- c) Y-Wehr
- d) Margaritenwehr

In einem weiteren Schritt wurden in den vierziger Jahren des letzten Jahrhunderts die Labyrinthwehre entworfen (Figur 2). Nach 2000 wurde das sogenannte Klaviertastenwehr eingeführt welches eine Weiterentwicklung des traditionellen Labyrinthwehres darstellt. Der vorliegende Artikel gibt einen historischen Überblick über die Entwicklung und die Auslegung von Labyrinth- sowie Klaviertastenwehre.



Figur 2 Anordnung und Längsschnitt durch ein Labyrinthwehr (ICOLD, 1994).



Figur 3 Labyrinthwehr am Ohau River in Neusecland, am Verbindungskanal zwischen den Kraftwerken Ohau B und C gelegen.

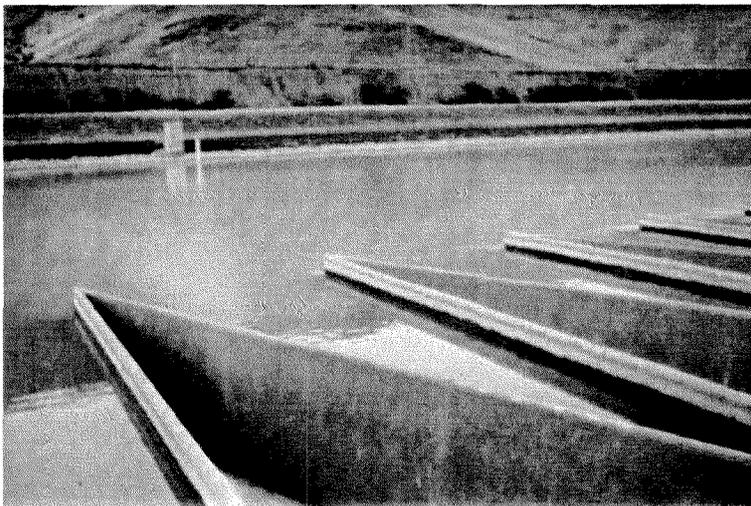
2 Labyrinthwehre

2.1 Anwendung und Typen von Labyrinthwehren

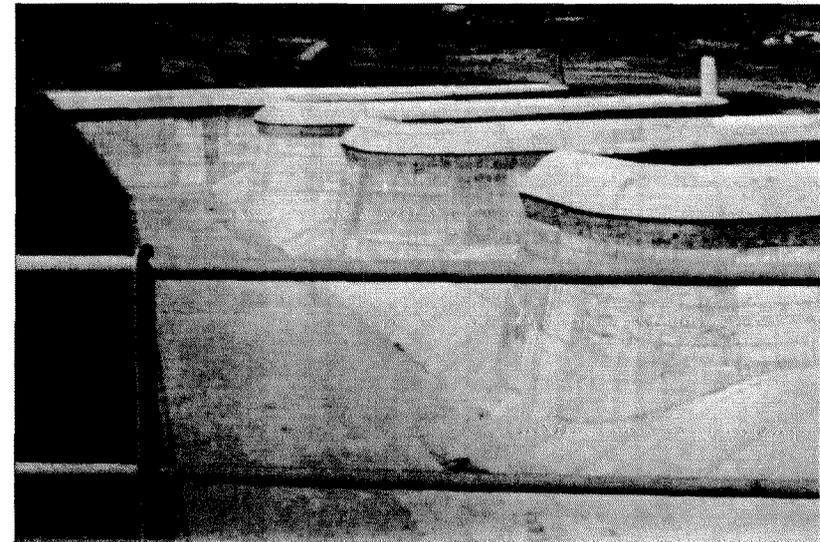
Labyrinthwehre haben bei relativ geringen Überfall- resp. Energiehöhen eine grosse Abflusskapazität. In erster Linie werden sie verwendet wenn die verfügbare Wehrbreite oder der mögliche oberwasserseitige Überstau beschränkt sind (Lux & Hinchliff, 1985). Weil Labyrinthwehre im Vergleich zu mit Schützen kontrollierten Überfallwehren relativ kostengünstig sind, werden sie oft bei Talsperren zur Stauvolumenerhöhungen verwendet. Sie kommen aber bei bestehenden Talsperren, insbesondere bei Gewichtsmauern, auch zur Erhöhung der Hochwasserentlastungskapazität zur Anwendung. Labyrinthwehre werden auch als seitliche Kanalentlastungen und bei Laufwasserkraftwerken verwendet (Figur 3). Im Weiteren können sie zur Energieumwandlung in Wasserversorgungs- und -entsorgungsanlagen zur Be- und Entlüftung des Wassers dienen (Falvey, 2003). Einen Überblick über die Charakteristiken von bestehenden Labyrinthwehren ist in Lux & Hinchliff (1985) sowie in Pinto Magalhães (1985) zu finden.

Labyrinthwehre sind dadurch gekennzeichnet, dass die Wehrkrone nicht geradlinig sondern gefaltet ist, wobei sich folgende Geometrien resp. Zyklen regelmässig wiederholen:

- U-förmige oder rechteckförmige Labyrintheinheiten
- V-förmige oder dreieckförmige Labyrintheinheiten (Figur 4)
- Trapezförmige Labyrintheinheiten (Figur 5)



Figur 4 V- oder dreieckförmiges Labyrinthwehr der Wasserkraftanlage Ohau C in Neuseeland.



Figur 5 Trapezförmiges Labyrinthwehr der Cimbia Talsperre in Italien.

Je nach Ausbildung kann die Überfallkrone folgendes Profil aufweisen (Falvey, 2003):

- scharfkantig
- breitkronig
- viertelkreisförmig gerundet
- halbkreisförmig gerundet
- hydrodynamisch geformt (Standardwehr)

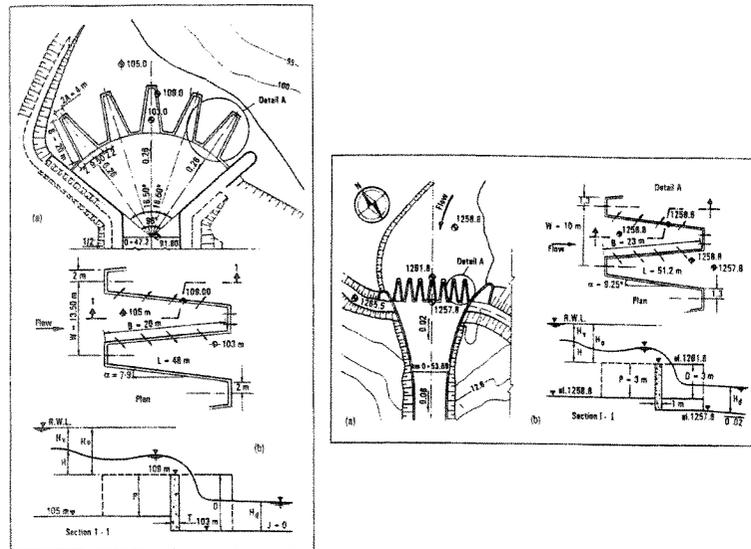
Im Grundriss verläuft das Labyrinthwehr meistens geradlinig und eher selten gekrümmt, wie aus Figur 6 ersichtlich.

2.2 Abflussphasen auf Labyrinthwehren

Wie in der Einleitung erwähnt, ist der Überfallabfluss direkt proportional zur Kronenlänge des Labyrinthwehres solange die Überfall- resp. oberwasserseitige Energiehöhe relativ gering bleibt. Bei ansteigender, oberwasserseitiger Energiehöhe werden verschiedene Abflussphasen durchlaufen, beginnend bei einem vollständig belüfteten Überfallstrahl, gefolgt von einem teilweise belüfteten Überfallstrahl und einer Übergangsphase, bevor schliesslich der Überfallstrahl nicht mehr belüftet ist (Lux & Hinchliff, 1985).

In der vollständig belüfteten Phase fällt der Strahl frei über die ganze Länge der Überfallkrone des Labyrinthwehres. Die Wehrhöhe sowie die Unterwassertiefe haben

keinen Einfluss auf den Überfallabfluss, welche derjenigen des entsprechenden abgewinkelten Wehres entspricht.



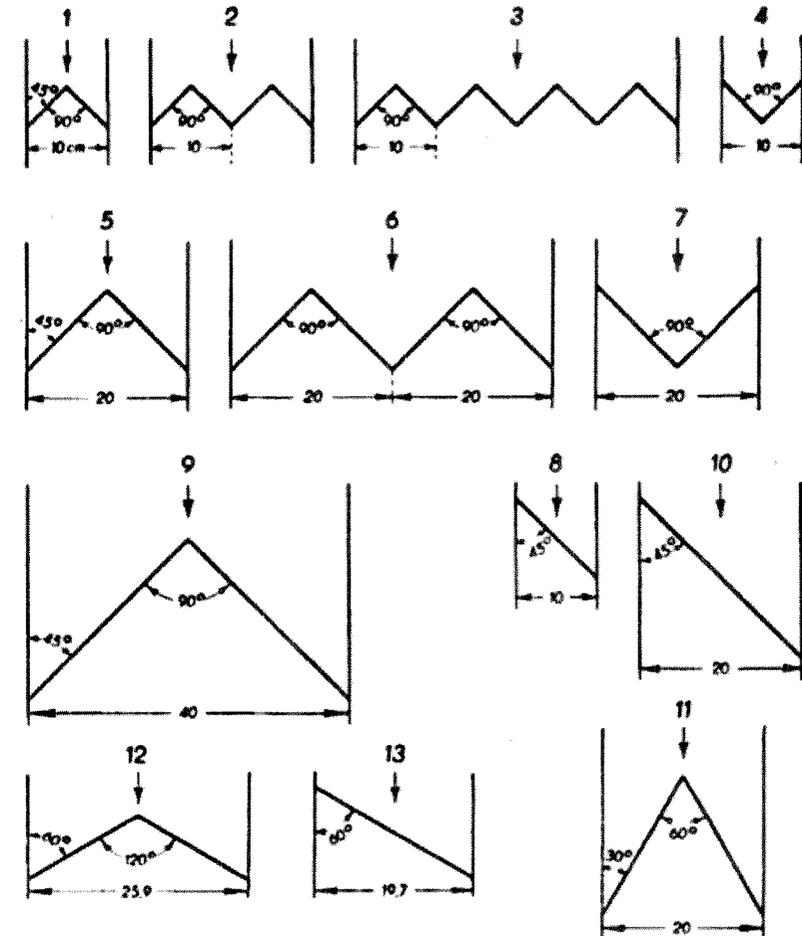
Figur 6 Gekrümmtes Labyrinthwehr der Kizilcapinar Talsperre (links) und geradliniges Labyrinthwehr der Sarioglan Talsperre (rechts) in der Türkei (Yildiz & Üzücek, 1996).

Mit steigender Überfallhöhe wird die Belüftung infolge der sich gegenseitig beeinflussenden Überfallstrahlen sowie durch den steigenden Unterwasserspiegel beeinträchtigt. Eine stabile eingeschlossene Lufttasche wird entlang der Wehrkrone beobachtet. Mit weiter steigender Überfallhöhe wird der Überfallstrahl an verschiedenen Stellen zunehmend unterdrückt und die stabile Lufttasche in verschiedene Teile aufgebrochen, welche sich pulsierend entlang der Seitenwände stromaufwärts bewegen. Der Beginn dieser Abflussphase ist im Labor schwierig zu beobachten, aber klar aus der Kurve des Abflussbeiwertes ersichtlich (Figur 9). Schlussendlich kann die Luft nicht mehr unter die Überfallstrahlen eindringen, da sich diese kreuzen. Ein vollständiger Einstau des Labyrinthwehres entsteht sobald die Unterwassertiefe die Wehrkrone erreicht. Die Abflusskapazität des Labyrinthwehres nimmt dann schnell ab um schliesslich diejenige eines geradlinigen Wehres zu erreichen, allerdings mit einem geringeren Überfallbeiwert. Diese Phase muss bei der Bemessung vermieden werden da sie sich durch ein schnelles Ansteigen des Oberwasserspiegels auszeichnet.

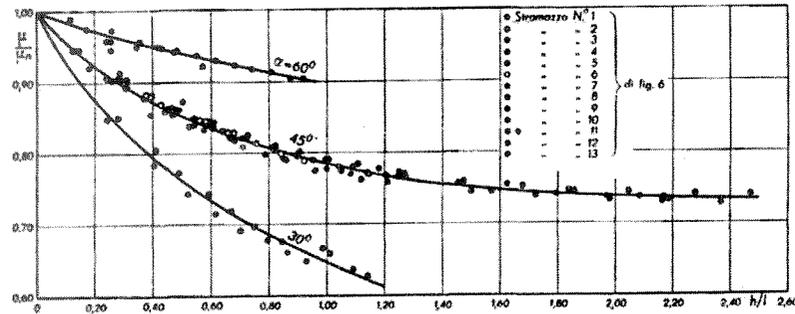
2.3 Bestimmung der Abflusskapazität eines Labyrinthwehres

Die Abflussverhältnisse bei einem Labyrinthwehr sind äusserst komplex da der Abfluss ausgesprochen dreidimensional ist und von vielen Parametern abhängt. Deshalb sind systematische Laborversuche zur Bestimmung des Einflusses der verschiedenen Para-

meter auf die Abflusskapazität notwendig. Die vermutlich ersten dokumentierten Laborversuche wurden von Gentilini (1941) in Italien durchgeführt. Er untersuchte systematisch verschiedene Anordnungen von dreiecksförmigen Labyrinthwehren und verglich sie mit gradlinigen, zur Fliessrichtung senkrechten oder geneigten Wehren (Figur 7). Er untersuchte das Verhältnis des Abflussbeiwertes zwischen dem Bazin/Rehbock für geradlinige Wehre mit dem Abflussbeiwert der verschiedenen untersuchten Zig-Zag-Wehre für verschiedene Verhältnisse von Energie- und Wehrhöhe (Figur 8).



Figur 7 Von Gentilini (1941) untersuchte geneigte und gefaltete Wehranordnungen.



Figur 8 Abflussbeiwertverhältnis μ/μ_n als Funktion der Energiehöhe h im Vergleich zur Wehrhöhe l ($\mu = q/(2g)^{1/2} h^{3/2}$, μ_n entspricht dem Überfallbeiwert des geradlinigen Wehres gemäss Bazin/Rehbock (Gentilini, 1941). Untersuchte Konfigurationen No 1 to 13 gemäss Figur 2-4. Die Originalbezeichnungen wurden beibehalten.

Es dauerte mehr als 30 Jahre bevor an Labyrinthwehren erste Untersuchungen von Taylor (1968) durchgeführt wurden mit dem Ziel, allgemein gültige Bemessungsgrundlagen zu ermitteln (Hay and Taylor, 1970). Darvas (1971) stützte sich auf die Resultate von hydraulischen Modellversuchen für die Hochwasserentlastungsanlagen der Talsperren Avon und Woronora in den USA um die Bemessungsregeln zu erweitern, indem er Bemessungskurven für die Bestimmung der Abflusskapazität erstellte.

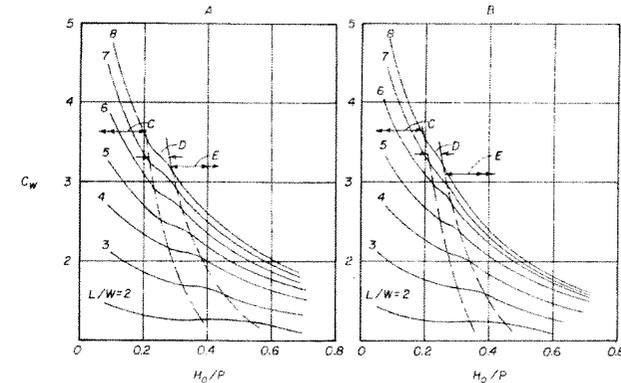
Später wurden vom USBR weitere Laborversuche durchgeführt, da die Abmessung des Labyrinthwehres des Ute Dammes ausserhalb des Anwendungsbereiches der Studie von Taylor lagen (Houston, 1982). Es ist zu erwähnen, dass Taylor seine Versuche mit der Wassertiefe h oberhalb Wehres ausgewertet hatte anstatt mit der Energiehöhe H_t (oder H_o) wie bei den Versuchen vom USBR. Beim Vergleich von verschiedenen hydraulischen Modellversuchen müssen die Daten bezüglich der Energiehöhe oberhalb des Wehres verglichen werden, da die Zulaufgeschwindigkeit im Kanal nicht vernachlässigbar ist ($H_t = h + V^2/2g$). Einen Überblick über die USBR-Versuche findet sich in Lux & Hinchliff (1985). Dabei wurden die Abflussbeiwerte C_w wie folgt definiert:

$$Q = C_w \left(\frac{W}{P} \right) W H_o \sqrt{g H_o} \quad (1)$$

wobei Q dem Abfluss pro Labyrintheinheit (-windung oder -zyklus), W der Breite der Labyrintheinheit, P der oberwasserseitigen Wehrhöhe und H_o der oberwasserseitigen Energiehöhe entsprechen. Die Korrekturkonstante k hat einen Wert von 0.18 für dreiecksförmige und 0.10 für trapezförmige Labyrinthwehre ($A/W = 0.0765$). Die Kronenlänge L pro Labyrintheinheitsbreite W beträgt:

$$L = 4 A + 2 B \quad (2)$$

dabei ist A die halbe Länge der Stirnseite (auch Apex genannt) des Labyrinthwehres und B die Länge der Seitenwand. Bemessungskurven für viertelkreisförmige Überfallkronen wurden entwickelt (Figur 9). Der totale Abfluss Q , des Labyrinthwehres ergibt sich durch die Multiplikation von Q mit der Anzahl der Labyrintheinheiten n . In Gl. (1) kann anstelle der Labyrintheinheitsbreite W auch die totale Wehrbreite W_t eingesetzt werden.



Figur 9 Bemessungskurven für Labyrinthwehre mit viertelkreisförmig gerundeten Kronen: (A) dreiecksförmige Labyrinthwehre (links); (B) trapezförmige Labyrinthwehre (rechts); (C) Phase des belüfteten Überfallstrahles, (D) Übergangsphase und (E) vollständig unterdrückter, unbelüfteter Überfallstrahl (Lux & Hinchliff, 1985).

Magalhães Pinto (1985) ergänzte die Bemessungsdiagramme von Darvas (1971) indem er einen dimensionslosen Abflussbeiwert aufgrund von zusätzlichen Laborversuchen einführte. Ihre gemessenen Abflüsse waren systematisch tiefer als diejenigen von Darvas (1971), insbesondere für hohe Werte von H_o/P .

Basierend auf umfassenden Laborversuchen am Utah Water Research Laboratory (UWRL) entwickelten Tullis et al. (1995) eine vereinfachte Bemessungsmethode, welche auf der klassischen Gleichung eines Standardwehres beruht:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L_c \sqrt{2g} H_t^{3/2} \quad (3)$$

wobei Q dem Abfluss über das Labyrinthwehr, C_d dem dimensionslosen Abflussbeiwert sowie H_t der oberwasserseitigen Energiehöhe entspricht. Sie ersetzen jedoch die totale Wehrlänge L_c in Gl. (3) mit einer effektiven Wehrlänge L_e . Dieser Ansatz berücksichtigt, dass die Stirnseite des Labyrinthwehres einen grossen Einfluss auf die Abflusseffizienz hat. Er ist somit besser physikalisch begründet als wenn alle Einflüsse im Sinne eines „black box“-Ansatzes im Abflussbeiwert eingepackt werden. Falvey (2003) bevorzugt in seiner ausführlichen Zusammenfassung und Diskussion der bekannten Veröffentlichungen zu Labyrinthwehren klar diese Bemessungsmethode. Tullis et al. (2005) führten weitere Versuche durch um die hydraulische Funktionsfähigkeit

von dreiecksförmigen Labyrinthwehren mit Seitenwandwinkeln von 7° und 8° zu optimieren.

Der Einfluss der Unterwassertiefe auf die dimensionslose Beziehung zwischen Energiehöhe und Wehrabfluss wurde von Tullis et al. (2007) untersucht. Lopez et al. (2008) betrachteten auch den Einfluss der Unterwassertiefe auf die Energieumwandlung unterstrom eines Labyrinthwehres. Khode et al. (2010) führten Versuche mit Seitenwandwinkel von 21° , 26° und 30° durch, um die lineare Interpolation der C_d Kurven von Tullis zwischen 25° und 35° zu überprüfen.

Crookston (2010) untersuchte kürzlich 32 neue Labyrinthwehrmodelle am UWRL. Die gemessenen Abflussbeiwerte für viertelkreisgerundete Wehrkronen und Seitenwandwinkel $6^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$ wurden mit den Werten von Tullis et al. (1995) sowie Willmore (2004) verglichen. Für die Ermittlung der Abflussbeziehung von Labyrinthwehren wurden von Crookston & Tullis (2011) verbesserte C_d Werte vorgeschlagen. Dabei wird der Effizienz der Labyrintheinheitsbreite als neuer Parameter eingeführt, welcher eine schnelle Bestimmung der Abflusskapazität für verschiedene Geometrien von Labyrinthwehren erlaubt.

2.4 Hydraulische und strukturelle Bemessungsempfehlungen

Wegen seiner Geometrie und der grossen Abflusskapazität ist ein Labyrinthwehr besonders anfällig auf die Anströmungsverhältnisse (Lux & Hinchliff, 1985). Die Anströmung sollte möglichst senkrecht zur Wehrachse sein.

Die Bestimmung der Frontwandlänge (Apex) des Labyrinthwehres ergibt sich aus einem optimalen Kompromiss zwischen einem trapezförmigen Labyrinthwehr, welches baulich einfacher zu erstellen ist und eine geringere gegenseitige Beeinflussung der Überfallstrahlen bewirkt, und einem dreiecksförmigen Labyrinthwehr, welches weniger Anströmverluste verursacht. Die Anströmung der an die Ufer grenzenden Labyrintheinheiten ist auch von grosser Bedeutung. Effizient sind vertikale Ufermauern (Houston, 1982), welche leicht gekrümmt sind und mit dem Seitenwandwinkel an das Labyrinthwehr angeschlossen sind (siehe Figur 6 rechts). Wenn das Labyrinthwehr soweit als möglich in den Stauraum verschoben wird, können die Eintrittsverluste stark verringert werden, da die Zuströmung nicht kanalisiert werden muss bevor sie das Wehr erreicht.

Der Abfluss unterstrom des Labyrinthwehres sollte schiessend sein. Falls dies nicht möglich ist, sollte das Labyrinthwehr so bemessen werden, dass das Verhältnis H_o/P in die vollständig belüfteten Abflussphase zu liegen kommt (Phase C in Figur 9).

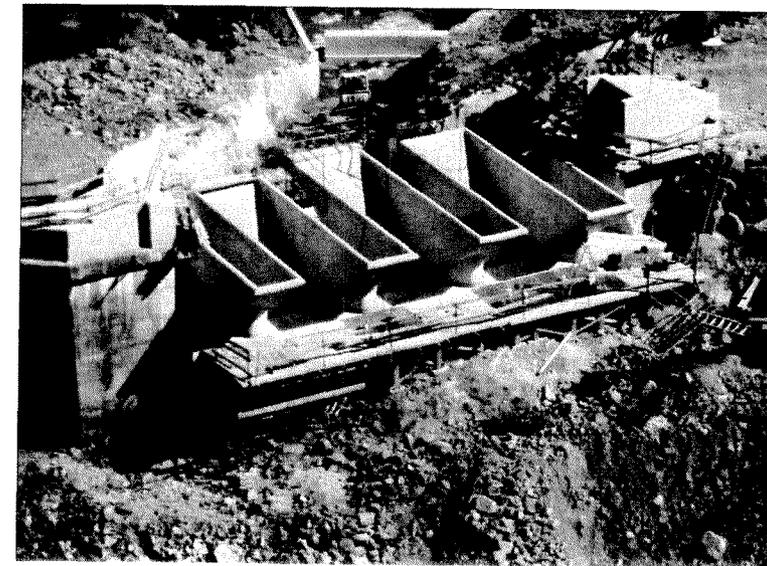
Die Wahl der Anzahl der Windungen resp. Labyrintheinheiten beeinflusst die gegenseitige Interaktion der Überfallstrahlen. Deshalb sollte für normale Betriebsbedingungen das vertikale Geometrieverhältnis W/P für trapezförmige Labyrinthwehre grösser als 2.0 und für dreiecksförmige Labyrinthwehre grösser als 2.5 sein (Hay & Taylor, 1970). Bei kleinen Überfallhöhen kann sich der Strahl periodisch an der Überfallkrone anlegen und ablösen, was Vibrationen auf das Bauwerk übertragen und Lärm verursachen kann. Eine Gegenmassnahme ist die Anordnung von Strahlaufreissern. Falls die Labyrinthwände genügend dick sind kann zudem eine Strahlbelüftung eingebaut wer-

den. Weitere Empfehlungen für die strukturelle Bemessung und den Bau finden sich in Lux & Hinchliff (1985).

3 Klaviertastenwehre

3.1 Anwendung und Typen von Klaviertastenwehren

Die kürzlich entwickelten, sogenannten Klaviertastenwehre (Piano Key weirs) stellen eine besondere Ausbildung eines traditionellen Labyrinthwehres dar. Im Grundriss handelt es sich um eine rechtecksförmige Anordnung (Figur 10). Im Gegensatz zum rechteckförmigen Labyrinthwehr sind die Frontwände (Apex) aber nicht vertikal sondern jeweils gegen das Unter- und Oberwasser hin geneigt. Diese Anordnung gleicht Klaviertasten, was dem Wehr seinen Namen gegeben hat. Entsprechend der gewählten Neigungen der Einlauf- und Auslaufstufen resp. -zellen weist das Wehr einen bestimmten oberwasserseitigen und unterwasserseitigen Überhang auf. Daraus resultiert eine im Vergleich zu einem rechteckförmigen Labyrinthwehr deutlich kleinere Aufstandsfläche. Neben einer verbesserten hydraulischen Funktionsfähigkeit hat das Klaviertastenwehr somit den Vorteil, dass es auf äusserst beschränkten Fundationsflächen, wie zum Beispiel auf Gewichtsmauern, installiert werden kann. Es stellt deshalb eine effiziente und wirtschaftliche Lösung für die Erhöhung der Hochwasserentlastungskapazität von Gewichtsmauern dar.



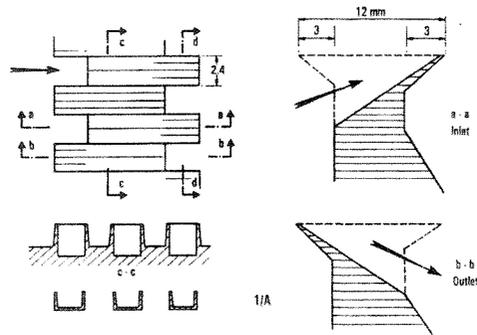
Figur 10 Bau des Klaviertastenwehres der Talsperre Gloriettes in Frankreich (Photo: EDF).

Das erste Klaviertastenwehr wurde 2006 bei der Talsperre Colours in Frankreich in Betrieb genommen (Laugier, 2007). Seitdem wurde es auch zur Erhöhung der Hochwasserentlastungskapazität bei drei anderen EDF-Talsperren verwendet, nämlich St. Marc (2008), Etroit (2009) and Gloriettes (2010). Klaviertastenwehre können leicht mit Treppenschussrinnen kombiniert werden, was zu einer vorteilhaften Energieumwandlung führt (Bieri et al., 2009). Über Erfahrungen mit diesen vier in Frankreich erfolgreich in Betrieb genommenen Klaviertastenwehre berichten Laugier et al. (2009) und Vermenten et al. (2011). Weitere Klaviertastenwehre sind zurzeit in Vietnam (Chi Hien et al., 2006), Indien (Sharma & Singhal, 2008) sowie Frankreich in Planung resp. im Bau (Gage, Malarce and La Raviège).

Ursprünglich wurden zwei verschiedene Typen von Klaviertastenwehre entwickelt (Lempérière & Ouamane, 2003):

Konfiguration A: Die Einlauf- und Auslaufzellen resp. -zellen (Apex) sind sowohl ober- wie auch unterwasserseitig überhängend (Figur 11). Dadurch ergibt sich ein ausbalanciertes Bauwerk, welches mit vorgespanntem Beton erstellt und bis zu spezifischen Abflüssen von $20 \text{ m}^3/(\text{sm})$ betrieben werden kann. Die relativ kleine Aufstandsfläche erlaubt, dass diese Konfiguration wie bereits erwähnt leicht auf die Krone von bestehenden Gewichtsmauern aufgesetzt werden kann um die Hochwasserentlastungskapazität zu erhöhen.

Konfiguration B: Die Einlauf- und Auslaufzellen resp. -zellen (Apex) haben nur einen Überhang gegen das Oberwasser hin (Figur 12). Die Wasserdruckbelastungen des Bauwerkes sind so für hohe spezifische Abflüsse geringer. Deshalb ist diese Anordnung vor allem bei Neubauprojekten interessant. Spezifische Abflüsse bis zu $100 \text{ m}^3/(\text{sm})$ sind möglich.



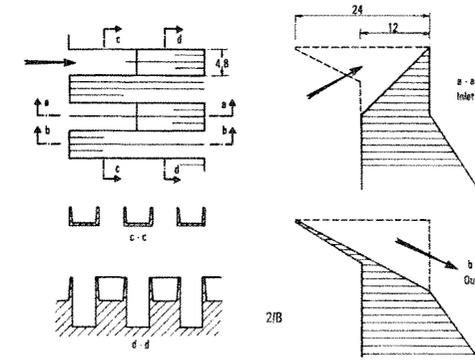
Figur 11 Konfiguration A eines Klaviertastenwehres (gemäss Lempérière & Ouamane, 2003).

Basierend auf diesen zwei Grundanordnungen wurden viele verschiedene Ausführungsvarianten entwickelt, wie zum Beispiel:

a) Brüstungsmauern: Wenn kleine vertikale Brüstungsmauern auf der Überfallkrone angeordnet werden funktioniert das Klaviertastenwehr vorerst für kleine Energiehöhen wie ein rechteckförmiges Labyrinthwehr. Die Brüstungsmauer erhöht die Abflusskapazität der Einlaufzelle weil die Zuströmbedingungen verbessert werden und das Volumen der Auslaufzelle vergrößert wird (Vermeulen et al., 2011).

b) Breite von Ein- und Auslaufzelle: Wird für die Einlaufzelle eine grössere Breite als für die Auslaufzelle gewählt, kann das Abflussvermögen gesteigert werden (Le Doucen et al., 2009).

c) Seitenwandwinkel: Eine bezüglich der Fliessrichtung abgewinkelte Seitenwand verengt die Einlaufzelle und erweitert die Auslaufzelle, wodurch die Abflusskapazität verbessert wird.



Figur 12 Konfiguration B eines Klaviertastenwehres (gemäss Lempérière & Ouamane, 2003).

3.2 Abflussphasen auf Klaviertastenwehren

Grundsätzlich können auf den Klaviertastenwehren ähnliche Abflussphasen wie auf traditionellen Labyrinthwehren beobachtet werden. Bei kleinen Energiehöhen ergibt sich ebenfalls ein Übergang von einem anliegenden zu einem abspringenden Überfallstrahl an verschiedenen Stellen auf dem Klaviertastenwehr (Machiels et al., 2009b). Bei grossen Energiehöhen wird die unterwasserseitige Überfallkrone der Einlaufzelle stärker beaufschlagt als der Überfall auf den Seitenwänden. Andererseits wird die oberwasserseitige Überfallkrone der Auslaufzelle sowohl für geringe wie auch grosse Energiehöhen gleichmässig beaufschlagt. Mit steigender Energiehöhe entsteht von der Unterwasserseite her ein kritischer Querschnitt entlang der Einlaufzelle.

3.3 Bestimmung der Abflusskapazität eines Klaviertastenwehres

Im Falle eines Klaviertastenwehres beeinflussen deutlich mehr geometrische Parameter den drei-dimensionalen Abflusszustand als bei einem Labyrinthwehr. Deswegen müssen vorerst eine grosse Anzahl von systematischen Modellversuchen durchgeführt werden, bevor allgemein gültige Bemessungsregeln entwickelt werden können.

Erste überschlägige Bemessungsempfehlungen wurden von Lempérière & Ouamane (2003) sowie Ouamane & Lempérière (2006) veröffentlicht, welche auf hydraulischen Modellversuchen beruhen die an der Universität Biskra (Algerien) sowie an der Universität Roorkee (Indien) durchgeführt wurden (Lempérière et al., 2003). Inzwischen wurden weitere systematische Modellversuche am EDF Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (EDF-LNHE Chatou) in Frankreich (Cicéro et al., 2010), am Laboratoire d'Hydrologie, Hydrodynamique Appliquée & Constructions Hydrauliques (HACH), Université de Liège, Belgien (Machiels et al., 2009a) sowie am Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH-EPFL) in Lausanne, Schweiz durchgeführt (Le Doucen et al., 2009). Weitere Versuche sind in diesen Instituten zurzeit immer noch im Gange um eine umfassende Datenbank für den Einfluss der verschiedenen geometrischen Parameter zu erstellen.

Wie bei den traditionellen Labyrinthwehren können grundsätzlich zwei Ansätze für die Bestimmung der Abflusskapazität in Betracht gezogen werden.

Der erste Ansatz beruht auf der Abflussgleichung eines Standardwehres und berücksichtigt den Einfluss aller Parameter eines Klaviertastenwehres in einem einzigen, entsprechend formuliertem Abflussbeiwert:

$$Q = C_w L_w \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (4)$$

wobei Q der Abfluss, H der oberwasserseitigen Energiehöhe und C_w dem globalen Abflussbeiwert entspricht. Im diesem Sinne haben Machiels et al. (2009a,b) verschiedene Bemessungskurven für C_w als Funktion des Verhältnisses H/P erstellt.

Ein zweiter Ansatz basiert auf dem Konzept der effektiven Wehrlänge (Leite Ribeiro et al., 2007, 2009). Dabei wird ein Abflussvergrößerungsfaktor r des Klaviertastenwehres im Vergleich zu einem scharfkantigen Standardwehr wie folgt definiert:

$$r = \frac{Q_{PKW}}{Q_w} = \frac{C_d L_{eff} \sqrt{2g} H^{3/2}}{C_d W \sqrt{2g} H^{3/2}} = \frac{L_{eff}}{W} \quad (5)$$

W entspricht der totalen Breite des Klaviertastenwehres. Der Abflussbeiwert des scharfkantigen Wehres kann in guter Näherung als konstant mit $C_d = 0.42$ angenommen werden (Hager & Schleiss, 2009).

Basierend auf verschiedenen Konfigurationen, welche im hydraulischen Modellversuch für die Talsperren Saint-Marc und Gloriettes in Frankreich untersucht wurden, konnte folgender Zusammenhang gefunden werden (Leite Ribeiro et al., 2009):

$$r = \frac{L_{eff}}{W} = \frac{1}{\left(\frac{H}{W} + \frac{1}{\sqrt{\frac{L_w}{W}} - 1} \right)^n} \quad (6)$$

Für die zwei erwähnten Klaviertastenwehre variierten die Exponenten n der Gl. (6) zwischen 7.5 und 14.5, je nach geometrischer Ausgestaltung. Die Resultate der Modellversuche für verschiedene Prototypen erlaubten weitere Empfehlungen für die Bemessung (Leite Ribeiro et al., 2011).

Weitere vertiefte Auswertungen der systematischen Modellversuche sind nötig, um allgemein anwendbare Bemessungsregeln zu erarbeiten, welche alle komplexen geometrischen Grössen eines Klaviertastenwehres berücksichtigen. Der erste, eher klassische Ansatz eines angepassten Abflussbeiwertes scheint etwas leichter zugänglich zu sein. Der Ansatz mit der effektiven Wehrlänge ist physikalisch besser begründet aber schwieriger umzusetzen. Eine Kombination der beiden Ansätze ist allenfalls erfolgversprechend.

3.4 Vergleich von Labyrinth- mit Klaviertastenwehren

Klaviertastenwehre weisen im direkten Vergleich zu klassischen rechteckförmigen Labyrinthwehre höhere Abflussbeiwerte auf (Anderson & Tullis, 2011). Dies ist auch für den Vergleich mit trapezförmigen Labyrinthwehren der Fall. Gegenüber einem Labyrinthwehr kann ein Klaviertastenwehr die Abflusskapazität um bis zu 20% steigern (Blancher et al., 2011).

Schlussendlich ergeben sich mit einem Klaviertastenwehr erhebliche Einsparungen beim Bau im Vergleich zu einem Labyrinthwehr.

3.5 Weitere Entwicklungen

Wie im Abschnitt 3.1 beschrieben hat das Klaviertastenwehr eine Vielzahl von geometrischen Optionen, welche in Zukunft systematisch untersucht werden müssen. Erfolgversprechend ist insbesondere der Seitenwandwinkel, welcher eine konvergente Einlaufzelle bewirkt.

Eine weitere, noch nicht untersuchte Möglichkeit besteht darin, die vertikalen Seitenwände zu neigen, wodurch die Breite der Einlaufzelle vergrössert wird. Zudem könnte das frühe Abspringen des Überlaufstrahles sowie eine bessere Belüftung gewährleistet werden.

4 Schlussfolgerungen

Die hydraulische Funktionsweise von klassischen Labyrinthwehren wird seit langem studiert und ist somit gut bekannt. Trotzdem sind allgemein gültige Bemessungsgleichungen, welche alle massgebenden geometrischen Parameter berücksichtigen, immer noch nicht verfügbar. Die Bemessung muss immer noch auf verallgemeinerten Bemessungskurven beruhen welche aus hydraulischen Modellversuchen ermittelt wurden.

Für die seit kurzem entwickelten Klaviertastenwehre sind selbst solche allgemein gültigen Bemessungskurven noch nicht verfügbar. Weitere systematische hydraulische Modellversuche sind immer noch erforderlich, welche mit alternativen Parameteranaly-

sen ausgewertet werden müssen. Die Komplexität von Abfluss und Geometrie eines Klaviertastenwehres ist eine faszinierende Herausforderung für die zukünftige experimentelle und numerische Forschung.

Referenzen

- Anderson, R. M. and Tullis B. P. 2011. Influence of Piano Key Weir Geometry on Discharge. Proc. of International Conference on Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2011), 9-11 February 2011, Liège, Belgium, Erpicum et al. (eds), ISBN 978-0-415-682282-4.
- Bieri, M., Leite Ribeiro, M., Boillat, J.-L., and Schleiss, A.J. 2009. Réhabilitation de la capacité d'évacuation des crues – intégration de PK-Weir sur des barrages existants. Proc., Colloque CFBR-SHF, Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues (CD-ROM), Paris, France.
- Blancher, B., Montarros, F. and Laugier, F. 2011. Hydraulic comparison between piano-keys weir and labyrinth spillways. Proc. of International Conference on Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2011), 9-11 February 2011, Liège, Belgium, Erpicum et al. (eds), ISBN 978-0-415-682282-4.
- Chi Hien, T., Thanh Son, H. and Ho Ta Khanh, M. 2006. Results of some "Piano Keys" weir hydraulic model tests in Vietnam. Proc., 22nd Congress of Large Dams, Question 87, Response 39. Barcelona, Spain. Volume IV, 581-595.
- Cicéro, G.M., Guene, C., Luck, M., Pinchard, T., Lochu, A., and Brousse, P.H. 2010. Experimental optimization of a piano key weir to increase the spillway capacity of the Malarce dam. 1st IAHR European Congress, Edinburgh, 4-6 mai 2010.
- Crookston, B. M. 2010. Labyrinth weirs. Ph.D. Dissertation. Utah State University, Logan, Utah.
- Crookston, B. M. and Tullis B. P. 2011. Hydraulic characteristics of labyrinth weirs. Proc. of International Conference on Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2011), 9-11 February 2011, Liège, Belgium, Erpicum et al. (eds), ISBN 978-0-415-682282-4.
- Darvas, L. A. 1971. Discussion of "Performance and Design of Labyrinth Weirs. Journal of the Hydraulics Division, 97(8), 1246-1251.
- Falvey, H.T. 2003. Hydraulic Design of Labyrinth Weirs. ASCE Press, Reston, VA, United States.
- Gentilini, B. 1941. Stramazzi con cresta a panta obliqua e a zig-zag. Memorie e studi dell'Istituto di Idraulica e Costruzioni Idrauliche del Regio Politecnico di Milano. No. 48. (in Italian).
- Hager, W., and Schleiss, A.J. 2009. Traité de Génie Civil, Volume 15 – Constructions Hydrauliques - Ecoulements Stationnaires. Presses polytechniques et universitaires romandes, Switzerland.
- Hay, N., and Taylor, G. 1970. Performance and design of labyrinth weirs. Journal of the Hydraulics Division, 96(11), 2337-2357.

- Houston, K. 1982. Hydraulic model study of ute dam labyrinth spillway Report No. GR-82-7. U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- ICOLD, 1994. Technical Dictionary on Dams.
- Khode, B. V., Tembhurkar, A. R., Porey, D. and Ingle, R. N. 2010. Improving Discharge Capacity over Spillway by Labyrinth Weir. World Applied Sciences Journal 10(6): 709-714.
- Lempérière, F., and Ouamane, A. 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. Hydropower & Dams, 7 (5): 144-149.
- Lempérière, F., Sharma, N., Mourya, R. N., Shukla R. and Gupta, U. P. 2003. Experimental Study on Labyrinth Spillways. Proc. International Conference on Engineering of Dams and Appurtenant Works Including Power Houses & Transmission Systems (CD-ROM), New Delhi, India.
- Leite Ribeiro, M., Boillat, J.-L., Schleiss, A., Laugier, F. and Albalat, C. 2007. Rehabilitation of St-Marc Dam - Experimental Optimization of a Piano Key Weir. Proc., 32nd Congress of IAHR (CD-ROM), Venice, Italy.
- Laugier, F. 2007. Design and construction of the first Piano Key Weir (PKW) spillway at the Goulours dam. Hydropower & Dams, 14 (5): 94-101.
- Laugier, F., Lochu, A., Gille, C., Leite Ribeiro, M. and Boillat, J.-L. 2009. Design and construction of a labyrinth PKW spillway at St-Marc dam, France. Hydropower & Dams, 16 (5): 100-107.
- Le Doucen, O., Ribeiro, M.L., Boillat, J.-L., Schleiss, A. J. and Laugier, F. 2009. Etude paramétrique de la capacité des PK-Weirs. Modèles physiques hydrauliques – outils indispensables du XXIe siècle, SHF, Lyon.
- Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J.-L., Schleiss, A., Delorme, F. and Laugier, F. 2009. Hydraulic capacity improvement of existing spillways – Design of piano key weirs. Proc., 23rd Congress of Large Dams. Question 90, Response 43 (CD-ROM), Brasília, Brazil.
- Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J.-L., Schleiss, A.J., G. Singhal, G. and Sharma, N. 2011. Analyses of the discharge capacity of Piano Key Weirs. American Society of Civil Engineering, Journal of Hydraulic Engineering (accepted for publication in 2011).
- Lopez, R., Matos, J. and Melo, J. 2008. Characteristic depths and energy dissipation downstream of a labyrinth weir. 2nd Int. Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, Pisa, Italia.
- Lux, F. and Hinchliff, D. 1985. Design and construction of labyrinth spillways. 15th Congress ICOLD, Vol. IV, Q59-R15, Lausanne, Switzerland, 249-274.
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B.J. and Piroton, M. 2009a. Analyse expérimentale du fonctionnement hydraulique des déversoirs en touches de piano. Colloque CFBR-SHF: "Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues", Paris, France.
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B. J. and Piroton, M. 2009b. Large scale experimental study of piano key weirs. Proc., 33rd Congress of IAHR (CD-ROM), Vancouver, Canada.

- Magalhães Pinto, A. 1985. Labyrinth-weir spillways. 15th Congress ICOLD, Vol. IV, Q59-R24, Lausanne, Switzerland, 395-407.
- Ouamane, A. and Lempérière, F. 2006. Design of a new economic shape of weir. Proc. International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century, Barcelona, Spain. 463-470.
- Sharma, N., and Singhal, G. 2008. A dam safety solution by Piano Key Weir for enhanced spillway capacity. Proc., International Conference on Hydrovision, Sacramento, United States.
- Taylor, G. 1968. The performance of labyrinths weirs. PhD thesis. University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom.
- Tullis, J. P., Amanian, N., and Waldron, D. 1995. Design of Labyrinth Spillways. Journal of Hydraulic Engineering, 121(3), 247-255.
- Tullis, B.P., Willmore, C.M. and Wolfhope, J.S. 2005. Improving performance of low head labyrinth weir. American Society of Civil Engineering, Journal of Hydraulic Engineering, 173: 418-426.
- Tullis, B., Young, J., and Chandler, M. 2007. Head-discharge relationships for submerged labyrinth weirs. American Society of Civil Engineering, Journal of Hydraulic Engineering 133(3), 248-254.
- Vermeulen, J., Laugier, F., Faramond, L. and Gille, C. 2011. Lessons learnt from design and construction of EDF first Piano Key Weirs. Proc. of International Conference on Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2011), 9-11 February 2011, Liège, Belgium, Erpicum et al. (eds), ISBN 978-0-415-682282-4.
- Willmore, C. 2004. Hydraulic characteristics of labyrinth weirs. M.S. Report, Utah State University, Logan, Utah.
- Yildiz, D. and Üzücek, E. 1996. Modelling the performance of labyrinth spillways. Hydropower & Dams, 3 (3): 71-76.

Hinweis

Der vorliegende Artikel entspricht einer leicht ergänzten deutschen Fassung eines englischen Beitrages zum *International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2011), 9-11 February 2011, Liège, Belgium, Erpicum et al. (eds), ISBN 978-0-415-682282-4, pp. 3-15.*