

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Author's Postprint

**Belzner, Fabian; Merkel, Jennifer; Pfrommer, Udo; Gebhardt, Michael; Thorenz, Carsten**

## **Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße**

WasserWirtschaft

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104560>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Belzner, Fabian; Merkel, Jennifer; Pfrommer, Udo; Gebhardt, Michael; Thorenz, Carsten (2016): Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße. In: WasserWirtschaft Jg. 106 (5/2016). S. 37-42.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## **Autorenfassung**

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz: Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße, 2016

---

**Erstveröffentlichung in WasserWirtschaft 5 (2016), S. 37-42.**

Für eine korrekte Zitierbarkeit ist die Seitennummerierung der Originalveröffentlichung für jede Seite kenntlich gemacht.

S. 37

# **Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße**

Fabian Belzner, Jennifer Merkel, Udo Pfrommer, Michael Gebhardt und Carsten Thorenz

Bewegliche Wehre verursachen hohe laufende Kosten. Um den Unterhaltungsaufwand zu reduzieren, wäre es attraktiv, bewegliche Wehre durch feste zu ersetzen. Labyrinth-Wehre und Piano-Key-Wehre sind dafür besonders erfolgversprechende Typen, da ihre Kronenlänge einem Vielfachen ihrer Einbaubreite entspricht und dadurch eine deutlich höhere Leistungsfähigkeit als bei anderen festen Wehren erreicht wird. Obwohl die Forschung an Labyrinth- und Piano-Key-Wehren in den letzten Jahren stark zugenommen hat, gibt es kaum Erfahrungen mit Labyrinth- oder Piano-Key-Wehren unter Rückstau einfluss, wie er oft an einer Bundeswasserstraße vorliegt. Im Fokus der Untersuchungen stand daher die Frage, ob der hydraulische Vorteil dieser Wehre auch bei rückstau beeinflussten Verhältnissen gegeben ist.

## **1 Einleitung**

Bewegliche Wehre erlauben bis zu einem bestimmten Abfluss die Regelung des Oberwasserstandes auf ein vorgegebenes Stauziel sowie die Steuerung des Abflusses beispielsweise zur Mindestwasserabgabe. Im Zuständigkeitsbereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) gibt es etwa 320 Wehranlagen, zumeist bewegliche Wehre mit Verschlüssen unterschiedlichster Bauart. Von den Wehranlagen befindet sich etwa ein Drittel im sog. Nebennetz, das nicht mehr oder nur noch in geringem Umfang für den Güterverkehr benötigt wird. Aus Sicht der Schifffahrt können hier die Anforderungen an Mindestwasserstände gesenkt und eine größere Variabilität der Wasserstände in Kauf genommen werden. Daher gibt es gegenwärtig Überlegungen, bewegliche Wehre außerhalb des Kernnetzes durch feste Wehre zu ersetzen, die in Bau und Unterhaltung günstiger sind und im laufenden Betrieb keinerlei Bedienung erfordern. In Frage kommen hierfür bereits etablierte Wehrtypen, wie Streichwehre oder Sohlenrampen, sowie neuere Wehrtypen, wie Labyrinth-Wehre (LW) oder Piano-Key-Wehre (PKW). Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) führt derzeit Untersuchungen durch, um die Eignung fester Wehrtypen an potentiellen Standorten der WSV zu bewerten, die hydraulischen Grundlagen bereitzustellen und Standards für Musterlösungen zu entwickeln.

## **Autorenfassung**

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz: Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße, 2016

---

## **2 Allgemeine Betrachtungen**

### **2.1 Überströmte Wehre**

Der Abfluss über ein Kontrollbauwerk kann als freier oder rückgestauter Abfluss erfolgen. Freier Abfluss liegt dann vor, wenn der Oberwasserstand lediglich von der Geometrie des Bauwerks und von der Anströmgeschwindigkeit, nicht aber vom Unterwasserstand abhängig ist. Der Abfluss  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] kann für diesen Fall in Abhängigkeit von einem dimensionslosen Überfallbeiwert  $\mu$  [-], der Oberwasserenergiehöhe  $H_1$  [m] und der Überfallbreite  $B$  [m] mit der Formel von Du Buat beschrieben werden:

$$Q_{\text{frei}} = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot B \cdot \sqrt{2g} \cdot H_1^{3/2} \quad (1)$$

Im Gegensatz zur Formel von Poleni wird bei Du Buat der Einfluss der Zulaufbedingungen über die Geschwindigkeitshöhe berücksichtigt und damit die Energieüberfallhöhe  $H_1$  anstatt der Überfallhöhe  $h_1$  [m] verwendet [1]. Beide Überfallbeiwerte können aber eindeutig ineinander überführt werden. Mit steigendem Unterwasserstand kommt es bei gleich bleibendem Abfluss zu einer Erhöhung der Überfallenergiehöhe  $H_1$ , die dann eine Funktion des Überfallbeiwerts  $\mu$  und der Energiehöhe im Unterwasser  $H_2$  ist.

### **2.2 Labyrinth- und Piano-Key-Wehre**

Der Abfluss über ein Wehr ist nach Gl. (1) bei konstanter Energiehöhe  $H_1$  proportional zur Länge der Überfallkrone  $B$ : Mit einer Verdopplung der Überfalllänge kann eine Verdopplung des Abflusses erreicht werden. Durch die höhere Leistungsfähigkeit weisen Streichwehre bei Abflussschwankungen geringere Schwankungen im Oberwasser auf als senkrecht angeströmte feste Wehre. Streichwehre können aber aufgrund des Platzbedarfs und der örtlichen Randbedingungen nicht immer realisiert werden. Mit einer gekrümmten oder gefalteten Überfallkrone (Bild 1) kann eine höhere hydraulische Leistungsfähigkeit bei gleich bleibender lichter Weite erzielt werden.

Die einfachste Form eines Wehrs mit gefalteter Überfallkrone stellt das Labyrinth-Wehr (Bild 2b und c) dar. Es wurde in den 1940er-Jahren entwickelt. Aufgrund seiner einfachen Geometrie ist es unkompliziert herzustellen, benötigt jedoch in Fließrichtung eine relativ große Aufstandsfläche.

Eine Weiterentwicklung des Labyrinth-Wehrs ist das Piano-Key- oder Kla-

## Autorenfassung

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz: Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße, 2016

---

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz:  
Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen  
einer Bundeswasserstraße.  
WasserWirtschaft 5 (2016), S. 37-42.

S. 38

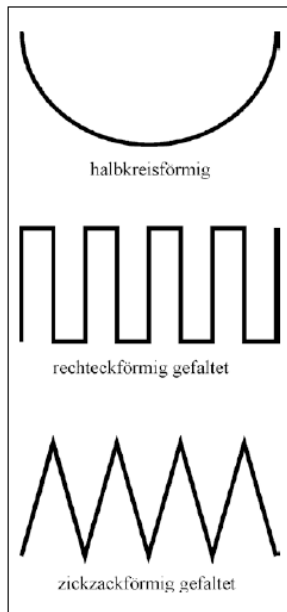


Bild 1: Verschiedene Kronenformen zur Erhöhung der Überfalllänge bei gleichbleibenderlichter Weite (Quelle: BAW)

viertasten-Wehr (Bild 2a). Im Gegensatz zum Labyrinth-Wehr sind hier die ober- und unterwasserseitigen Wände nicht vertikal ausgebildet, sondern zum Ober- bzw. Unterwasser hin geneigt. Durch die reduzierte Aufstandsfläche eignet sich das Piano-Key-Wehr damit besonders für Talsperren, bei denen der zur Verfügung stehende Raum durch die Kronenbreite limitiert ist.

Die Forschungsaktivitäten an Labyrinth- und Piano-Key-Wehren haben in den letzten Jahren stark zugenommen. Insbesondere in Frankreich werden zahlreiche Hochwasserentlastungsanlagen an Talsperren mit Piano-Key-Wehren ertüchtigt, um den gestiegenen Bemessungshochwasserabflüssen Rechnung zu tragen. Gegenüber senkrecht angeströmten Überfallschwelen kann hier die hydraulische Leistungsfähigkeit um das fünf- bis siebenfache erhöht werden.

Bild 3 zeigt die Staumauer Barrage de Charmines am Fluss L'Oignin in Frankreich. Die bestehende Hochwasserentlastungsanlage wurde hier durch zwei Piano-Key-Wehre ersetzt, die für ein 10 000-jährliches Hochwasser dimensioniert wurden.

## Autorenfassung

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz: Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße, 2016

---

Die zyklisch wiederkehrenden Einheiten der Labyrinth- und Piano-Key-Wehre werden als „Keys“ bezeichnet: „Inlet-Keys“ sind zum Oberwasser und „Outlet-Keys“ zum Unterwasser geöffnet. Die hydraulische Leistungsfähigkeit von Labyrinth- und Piano-Key-Wehren wird im Wesentlichen von ihrer Abwicklungslänge beeinflusst, welche bei geringen Überfallhöhen der Überfalllänge entspricht. Mit steigender Überfallhöhe verlieren sie allmählich ihren Vorteil und die effektive Überfalllänge wird kleiner. Weiterhin wird die Leistungsfähigkeit von einer Vielzahl von weiteren Parametern, wie beispielsweise der Kronenform, der Länge

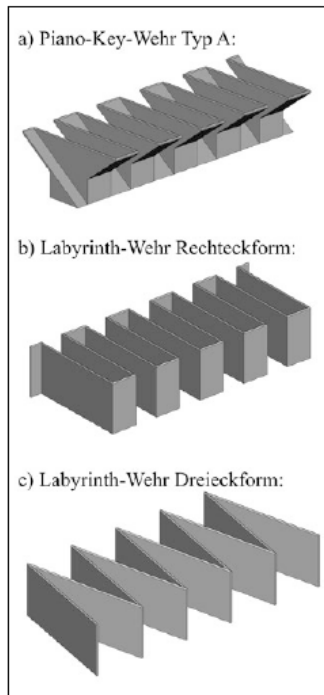


Bild 2: Untersuchte Modellgeometrien (Quelle: BAW)



Bild 3: Staumauer Barrage de Charmines (Quelle: BAW)

## Autorenfassung

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz: Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße, 2016

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz:  
Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen  
einer Bundeswasserstraße.  
WasserWirtschaft 5 (2016), S. 37-42.

S. 39

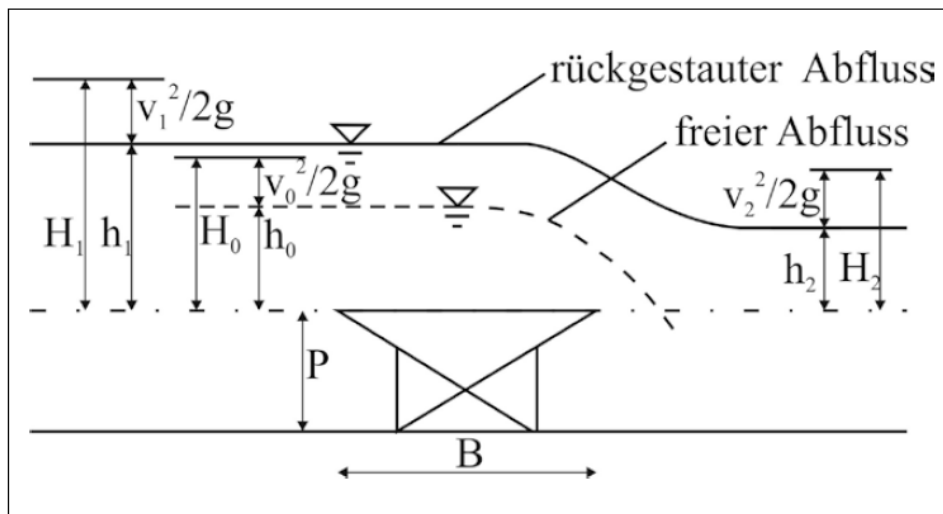


Bild 4: Prinzipskizze (Quelle: BAW)

der Keys, dem Breitenverhältnis von Inlet- und Outlet-Keys und der Neigung der ober- und unterwasserseitigen Wände beeinflusst. In Pralong et al. [2] wird eine Namenskonvention für die geometrischen Parameter für Piano-Key-Wehre eingeführt, die auf Labyrinth-Wehre übertragen werden kann und die in der Literatur im Zusammenhang mit diesen Wehrtypen weitgehend einheitlich verwendet wird. Zusätzlich zu den in Bild 4 dargestellten Größen wird die lichte Weite mit  $W$  [m] und die Abwicklungslänge mit  $L$  [m] bezeichnet.

Trotz intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gibt es bisher vergleichsweise wenig Untersuchungen zum Einsatz von Labyrinth- und Piano-Key-Wehren an Staustufen. Typischerweise steigt an staugeregelten Flüssen mit zunehmendem Abfluss der Unterwasserstand an und größere Abflüsse werden rückstaubeinflusst über die Wehranlage abgeführt. Im Fokus der Untersuchungen stand daher die Frage, ob der hydraulische Vorteil gefalteter Wehre auch bei rückstaubeinflussten Verhältnissen gegeben ist.

## 2.3 Konzeption und Methodik

Ein Kontrollbauwerk ist dadurch gekennzeichnet, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Abfluss und der Wassertiefe im Oberwasser besteht, der von der Geometrie, den Fluideigenschaften und der Art der Anströmung bestimmt wird. Um diesen zu ermitteln, wurde ein gegenständlicher Versuchsstand auf Basis der Froude-Ähnlichkeit konzipiert. Der Einfluss von Zähigkeit (Reynolds-Zahl) und Oberflächenspannung (Weber-Zahl) ist in der Natur vernachlässigbar, kann jedoch im Labormodell von Bedeutung sein. Oberflächenspannungseffekte können vernachlässigt werden, wenn die Überfallhöhe mehr als 3 bis 5 cm beträgt [3]. Dies war im Modell weitgehend der

## Autorenfassung

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz: Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße, 2016

---

Fall. Die im Modell auftretenden Reynolds-Zahlen lagen bei allen durchgeführten Versuchen über 20 000 bis 120 000 in der Zuströmung und damit im vollturbulenten Bereich, so dass die Einflüsse von Schwerkraft und Trägheitskraft dominieren und die Ergebnisse weitgehend unabhängig von der Reynolds-Zahl sind [3].

Der Rückstau einfluss wird mit folgenden relevanten Einflussgrößen (Bild 4) beschrieben [4]:

$$\frac{H_1}{H_0} = f\left(\frac{H_2}{P}, \frac{H_2}{H_1}\right) \quad (2)$$

$H_0$  Energiehöhe im Oberwasser bei freiem Abfluss [m]

$H_1$  Energiehöhe im Oberwasser bei rückgestautem Abfluss [m]

$H_2$  Energiehöhe im Unterwasser [m]

$P$  Höhe des Wehrs [m]

## 2.4 Versuchsaufbau und Messtechnik

Für die Modellversuche wurde eine wasserbauliche Versuchsrinne mit einer Länge von etwa 15,00 m, einer Breite von 1,25 m und einer Höhe von 0,60 m genutzt (Bild 5). Die Variation der relevanten Einflussgrößen erfolgte durch Veränderung von Zufluss und Unterwasserstand. Der



Bild 5: Versuchsstand im Labor der BAW (Quelle: BAW)

## Autorenfassung

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz: Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße, 2016

---

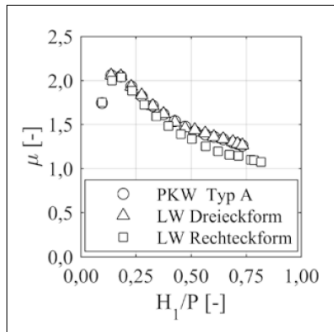


Bild 6: Vergleich der Überfallbeiwerte der drei untersuchten Geometrien (Quelle: BAW)

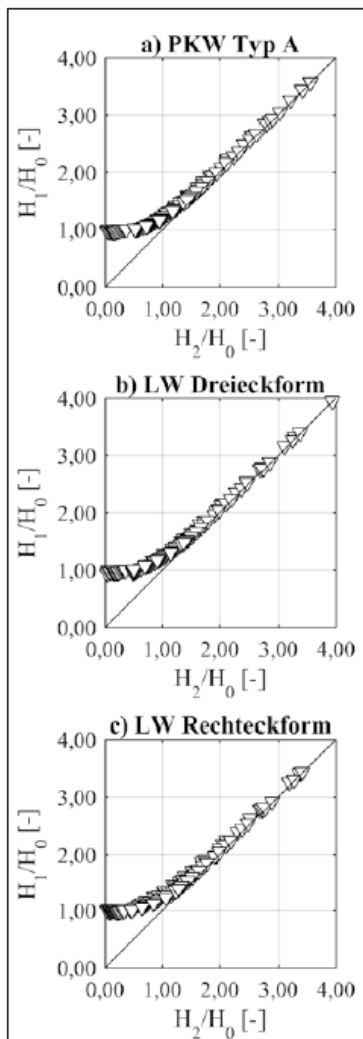


Bild 7: Dimensionsloses Verhältnis der Energiehöhen im Ober- und Unterwasser (Quelle: BAW)



## **Autorenfassung**

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz: Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße, 2016

---

Zufluss konnte mit magnetisch-induktiven Durchflussmessern (MID) und elektrisch verstellbaren Schiebern von einem Mess- und Steuercomputer aus vorgegeben werden. Der Unterwasserstand wurde mit einer verstellbaren Auslaufklappe eingestellt. Die Messung der Wasserspiegel erfolgte mittels Ultraschallsonden in Wasserspiegelmessstöpfen, die über das Prinzip der kommunizierenden Röhren mit der Versuchsrinne im Abstand von 1,25 m bis 2,00 m verbunden waren.

## **2.5 Versuchsreihen und untersuchte Einflussgrößen**

Untersucht wurden ein PKW Typ A (Bild 2a), ein rechteckförmiges (Bild 2b) und ein dreieckförmiges Labyrinth-Wehr (Bild 2c). Für die Vorbemessung wurden empirische Formeln aus der Literatur herangezogen [5], [6]. Für die Untersuchung der beiden Labyrinth-Wehre wurden dieselbe Höhe ( $P = 0,253$  m), lichte Weite ( $W = 1,25$  m) und Abwicklungslänge ( $L/W = 5$ ) gewählt, um eine Vergleichbarkeit mit dem untersuchten Piano-Key-Wehr zu erzielen. In Cicero und Delisle [7] werden halbgerundete Überfallkronen empfohlen, da für kleine Überfallhöhen von  $H_1/P < 0,3$  damit eine höhere Leistungsfähigkeit erzielt werden kann. Diese Empfehlung wurde für die Versuche übernommen.

Die drei Geometrien wurden mit Abflüssen zwischen  $0,025$  m<sup>3</sup>/s und  $0,375$  m<sup>3</sup>/s in Kombination mit Unterwasserständen von  $0,05$  m bis  $0,50$  m untersucht, so dass sich insgesamt 176 Zustände ergaben, die der weiteren Auswertung zugrunde lagen.

## **3 Ergebnisse der Modelluntersuchungen**

### **3.1 Freier Abfluss**

Der Überfallbeiwert  $\mu$  wurde für die drei untersuchten Geometrien mit Gl. (1) ermittelt, wobei darauf hinzuweisen ist, dass die lichte Weite und nicht die Abwicklungslänge als Überfalllänge verwendet wird. Im Zusammenhang mit Piano-Key- und Labyrinth-Wehren ist diese Annahme üblich und auch aus ingenieurpraktischer Sicht sinnvoll, da die lichte Weite für die Planung maßgeblicher ist als die Abwicklungslänge.

In Bild 6 ist der Überfallbeiwert  $\mu$  in Abhängigkeit vom Verhältnis von Oberwasserenergiehöhe  $H_1$  zur Wehrhöhe  $P$  dargestellt. Der Verlauf des Überfallbeiwerts folgt für alle untersuchten Geometrien demselben Trend. Im Vergleich zeigt sich, dass die Leistungsfähigkeiten des PKW Typ A und des dreieckförmigen Labyrinth-Wehrs in etwa gleich sind. Hingegen weist das rechteckförmige Labyrinth-Wehr bei größeren Abflüssen eine geringere Leistungsfähigkeit auf. Grund für diese Reduzierung ist eine gegenseitige Beeinflussung der Überfallstrahlen in den Outlet-Keys und der sich daraus ergebende lokale Rückstau einfluss [8]. Weiterhin fällt in Bild 6 auf, dass der Überfallbeiwert bei  $H_1/P = 0,10$  für alle untersuchten Geometrien mit  $\mu = 1,75$  deutlich unterhalb des Trends liegt. Die Oberwasserenergiehöhe liegt hier bei  $H_1 < 0,03$  m, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Ergebnisse durch Oberflächenspannungseffekte beeinflusst sind [3]. In ähnlichen Untersuchungen wurden aus diesem Grund nur Versuche mit  $H_1 \geq 0,05$  m berücksichtigt [9].

## Autorenfassung

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz: Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße, 2016

---

### 3.2 Rückgestauter Abfluss

Bei niedrigen Unterwasserständen  $h_2$  ist die Energiehöhe im Oberwasser  $H_1$  unabhängig vom Unterwasserstand. Mit steigendem Unterwasserstand kommt es sukzessive zu einer Beeinflussung der Energiehöhe im Oberwasser bis sich diese schließlich der Energiehöhe im Unterwasser  $H_2$  annähert. Der Unterwassereinfluss beginnt dann, wenn  $H_1$  erstmalig nicht mehr von  $H_2$  unabhängig ist. In der englischsprachigen Literatur wird dieser Zustand als „Modular Limit“ bezeichnet, was mit „Grenzeinstau  $S_m$ “ übersetzt werden kann [10]. Zum Vergleich: Der Grenzeinstau für ein breitkroniges Wehr liegt bei  $h_2/h_1 = 0,80$  bis  $0,85$ , der für einen überströmten Damm bei  $h_2/h_1 = 0,75$  [11] und der für ein scharfkantiges Wehr bei  $h_2/h_1 = 0,65$  [10]. Scharfkantige Wehre sind hier anfälliger für Rückstau einflüsse, weil infolge der gekrümmten Stromlinien im Kontrollquerschnitt der horizontale Impulsanteil kleiner ist als bei breitkronigen Wehren.

Bild 7 zeigt den Zusammenhang zwischen den dimensionslosen Energiehöhen im Ober- und Unterwasser für die drei Modellgeometrien. Mit  $H_0$  wird die Energiehöhe bezeichnet, welche sich für den Fall des freien Überfalls ergibt (Bild 4).  $H_1/H_0$  bezeichnet das dimensionslose Verhältnis der Energiehöhen von freiem zu rückgestautem Abfluss. Für  $H_1/H_0 = 1$  gilt  $H_1 = H_0$ . Die Oberwasserenergiehöhe  $H_1$  entspricht dabei der Energiehöhe bei frei-

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz:  
Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen  
einer Bundeswasserstraße.  
WasserWirtschaft 5 (2016), S. 37-42.

S. 41

em Abfluss  $H_0$  und ist von  $H_2$  unabhängig (horizontaler Verlauf). Bei steigender Unterwasserenergiehöhe  $H_2$  ist beim Piano-Key-Wehr und dem dreieckförmigen Labyrinth-Wehr ab  $H_2/H_0 \approx 0,5$  erstmalig eine Beeinflussung der Oberwasserenergiehöhe durch den steigenden Unterwasserstand zu erkennen (Grenzeinstau  $S_m$  erreicht). Mit weiter steigendem Unterwasserstand nähern sich die Messwerte der Winkelhalbierenden an. Ab  $H_2/H_0 \approx 2$  gilt  $H_2 = H_1$  und das Wehr verliert seine Abflusskontrolle. Beim rechteckförmigen Labyrinth-Wehr ist der Grenzeinstaubereits bei  $H_2/H_0 \approx 0,3$  zu erkennen. Im Vergleich ist es anfälliger für Rückstau einflüsse.

## Autorenfassung

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz: Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße, 2016

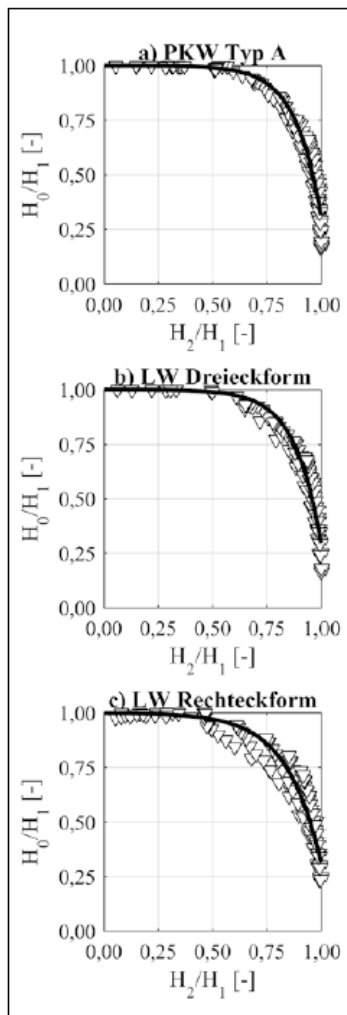


Bild 8: Einfluss des Rückstaus auf die Leistungsfähigkeit (Quelle: BAW)

In Cicero und Delisle [4] wurde der Grenzeinstau  $S_m$  für verschiedene PKW-Typen bestimmt. Der Rückstau einfluss wird dort als Funktion des Einstaugrads  $H_2/H_1$  dargestellt:

$$\frac{H_0}{H_1} = 1 - 0,01 \cdot e^{\alpha \left( \frac{H_2}{H_1} - S_m \right)} \quad (3)$$

In Bild 7 ist für die drei Modellgeometrien die Zunahme der Oberwasserenergiehöhe als Funktion von  $H_2/H_1$  entsprechend Gl. (3) dargestellt. Für  $H_0/H_1 = 1$  liegt freier Abfluss vor, mit beginnendem Rückstau einfluss steigt die Oberwasserenergiehöhe an und  $H_0/H_1$  nimmt ab.

Die schwarze Linie ist eine nach Gl. (3) bestimmte zweiparametrische Regressionsfunktion. In Belzner et al. [12] wurde die Regressionsfunktion für das Piano-Key-Wehr bereits Cicero und Delisle [4] gegenübergestellt, wobei sich eine gute Übereinstimmung zeigte. Für das dreieckförmige und rechteckförmige Labyrinth-Wehr wurde die Regressionsfunktion ebenfalls bestimmt und zum Vergleich mit den Messwerten in Bild 7 als schwarze Linie dargestellt. In Tabelle 1 sind die beiden Re-

## **Autorenfassung**

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz: Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße, 2016

---

gressionsparameter und der Regressionskoeffizient als Wurzel der normierten Summe der Fehlerquadrate angegeben:  $\alpha$  ist dabei ein Koeffizient zur Kurvenanpassung. Mit Regressionskoeffizienten von  $R > 0,97$  ergibt sich eine gute Anpassung der Regressionsfunktion an die Messwerte.

### **3.3 Diskussion der Ergebnisse**

Die Leistungsfähigkeit wird primär von der Abwicklungslänge beeinflusst, die ein Vielfaches eines senkrecht angeströmten, linearen Wehrs beträgt. Vergleicht man das im Wesentlichen für Talsperren entwickelte Piano-Key-Wehr vom Typ A mit einem rechteckigen Labyrinth-Wehr, dann fällt auf, dass die Überfallbeiwerte für kleine Überfallhöhen ( $H_1/P < 0,25$ ) nahezu identisch sind, für größere Überfallhöhen bis  $H_1/P = 0,75$  die Leistungsfähigkeit des Labyrinth-Wehrs jedoch um bis zu 8 % unter der des Piano-Key-Wehrs liegt. Nach Crookston und Tullis [8] wird als Ursache die gegenseitige Beeinflussung der Überfallstrahlen in den Outlet-Keys angeführt, was einen lokalen Rückstau verursacht. Bei den Modellversuchen wurde dieses Phänomen beobachtet. Der Effekt wird durch steigende Unterwasserstände verstärkt, was zu einem früheren Grenzeinstau führt. Hierbei zeigt das Labyrinth-Wehr einen deutlichen Nachteil: Während die fallenden Strahlen beim PKW auf eine Schräge fallen und so der Impuls teilweise in Fließrichtung umgelenkt wird, fallen die Strahlen beim Labyrinth-Wehr auf eine horizontale Fläche und verlieren so einen Großteil ihres Impulses. Dadurch steigt der Wasserspiegel in den Outlet-Keys. Dieser Einfluss kann durch eine Aufweitung der Keys in Fließrichtung, wie sie z. B. beim dreieckförmigen Labyrinth-Wehr vorhanden ist, verringert werden. Dies ist für die Abströmung aus den Keys günstig, da sich dadurch die Auslassgeschwindigkeit verringert und damit die Energieverluste beim Ausströmen verringert werden. Beobachtungen am Labormodell zeigten jedoch, dass die Spitzen beim dreieckförmigen Labyrinth-Wehr bei kleinen Energiehöhen nicht abflusswirksam sind, weswegen hier weiteres Optimierungspotential besteht. Bei trapezförmigen Labyrinth-Wehren ist zu erwarten, dass die volle Abwicklungslänge abflusswirksam ist. Vergleicht man nämlich das dreieckförmige Labyrinth-Wehr mit dem PKW Typ A, dann weisen beide Wehrtypen eine ähnliche hydraulische Leistungsfähigkeit bei freiem Abfluss auf und der Rückstaeinfluss macht sich bei beiden erst bei  $S_m \approx 0,5$  ( $h_2/h_1 = 0,33$ ) bemerkbar, während beim rechteckförmigen Labyrinth-Wehr schon bei  $S_m \approx 0,30$  ( $h_2/h_1 = 0,12$ ) der Beginn des Rückstaeinflusses zu erkennen ist.

## **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Mit Hilfe systematischer Untersuchungen wurden drei unterschiedlich gefaltete Wehrtypen im Labormodell unter Rand-

## Autorenfassung

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz: Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße, 2016

---

	A [-]	$S_m$ [-]	R[-]
PKW Typ A	8,5044	0,50262	0,98070
LW, Dreieck	8,3979	0,49355	0,98277
LW, Rechteck	6,3077	0,32989	0,97145

Tab. 1: Anpassungskoeffizient, Grenzeinstau und Regressionskoeffizient der angepassten Kurven zur Beschreibung des Rückstauinflusses bei den untersuchten Geometrien (Quelle: BAW)

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz:  
Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen  
einer Bundeswasserstraße.  
WasserWirtschaft 5 (2016), S. 37-42.

S. 42

bedingungen, wie sie typischerweise an staugeregelten Flüssen vorliegen, untersucht: Bei größerem Abfluss steigt hier der Unterwasserstand an, so dass häufig Rückstauinfluss vorliegt. Es zeigt sich, dass die hydraulische Leistungsfähigkeit eines rechteckförmigen Labyrinth-Wehrs bei freiem und rückstaubeeinflussten Abfluss etwas geringer ist. Für die Praxis bleibt abzuwägen, ob dieser geringe hydraulische Nachteil gegenüber dem Vorteil der einfacheren Herstellung in Kauf genommen werden kann.

Labyrinth- oder Piano-Key-Wehre können eine wirtschaftliche Alternative zu Streichwehren sein, insbesondere dort, wo ein geringes Platzdargebot vorhanden ist oder die baulichen Randbedingungen die Lage des festen Wehres bestimmen. Für den Ersatzneubau bietet sich die Chance im Wesentlichen in der bisherigen Wehrachse zu bleiben. Auch wenn mit einer langen Überfallkrone die Variabilität der Wasserstände im Oberwasser verringert werden kann, ist ein festes Wehr insbesondere dort eine Alternative zu beweglichen Wehren, wo die Anforderungen an Mindestwasserstände gesenkt und eine gewisse Variabilität der Wasserstände in Kauf genommen werden kann oder sogar unter ökologischen Gesichtspunkten erwünscht ist. Zurzeit werden in der BAW verschiedene Standorte betrachtet und geprüft, ob bewegliche Wehre durch feste, gefaltete Wehre ersetzt werden können und welche hydraulischen, morphologischen und ökologischen Auswirkungen sich daraus ergeben.

## **Autorenfassung**

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz: Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße, 2016

---

Fabian Belzner, Jennifer Merkel, Udo Pfrommer, Michael Gebhardt and Carsten Thorenz

### **Piano Key Weirs and Labyrinth Weirs under the Constraints of a Federal Waterway**

Movable gates cause high running costs. In order to reduce maintenance costs, it is desirable to replace movable weirs by fixed weirs. Labyrinth weirs and piano key weirs are fixed weirs whose crown length is a multiple of their installation width. Thus, these weir types are more powerful than conventional linear weirs. Although research on labyrinth and piano key weirs has increased in the recent years, there is little experience with labyrinth or piano key weirs in submerged conditions like it often occurs at the federal waterways in Germany. This investigation focuses on the question, if the hydraulic advantage of these weirs also exists under submerged flow conditions.

## **Autoren**

**Fabian Belzner, M. Eng.**

**Jennifer Merkel, M. Sc.**

**Dipl.-Ing. (FH) Udo Pfrommer**

**Dr.-Ing. Michael Gebhardt**

**Dr.-Ing. Carsten Thorenz**

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Kußmaulstr. 17

76187 Karlsruhe

fabian.belzner@baw.de

jennifer.merkel@baw.de

udo.pfrommer@baw.de

michael.gebhardt@baw.de

carsten.thorenz@baw.de

## **Literatur**

[1] Aigner, D.; Bollrich, G.: Handbuch der Hydraulik. Berlin: Beuth, 2012.

[2] Pralong, J.; Vermeulen, J. et al.: A naming convention for the Piano Key Weirs geometrical parameters. In: Erpicum, S.; Laugier, F. et al. (Hrsg.): Labyrinth and piano key weirs: PKW 2011. Leiden: CRC Press/Balkema, 2011, S. 271-278.

[3] Kobus, H. (Hrsg.): Wasserbauliches Versuchswesen. In: Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (1978) Nr. 39.

## **Autorenfassung**

Belzner, Merkel, Pfrommer, Gebhardt, Thorenz: Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße, 2016

---

- [4] Cicero, G. M.; Delisle, J. R.: Discharge characteristics of Piano Key weirs und submerged flow. In: Erpicum, S. (Hrsg.): Labyrinth and Piano Key Weirs II: PKW. Leiden: CRC Press/Balkema, 2014, S. 101-109.
- [5] Machiels, O.: An analytical approach for Piano Key weir hydraulic design. In: Erpicum, S. (Hrsg.): Labyrinth and Piano Key Weirs II: PKW 2013. Leiden: CRC Press/Balkema, 2014, S. 131-138.
- [6] Pfister, M.; Schleiss, A.: Estimation of A-type Piano Key weir rating curve. In: Erpicum, S. (Hrsg.): Labyrinth and Piano Key Weirs II: PKW 2013. Leiden: CRC Press/Balkema, 2014, S. 139-147.
- [7] Cicero, G.; Delisle, J.: Effects of the crest shape on the discharge efficiency of a type A Piano Key weir. In: Erpicum, S. (Hrsg.): Labyrinth and Piano Key Weirs II: PKW. Leiden: CRC Press/Balkema, 2014, S. 41-48.
- [8] Crookston, B. M.; Tullis, B. P.: Labyrinth Weirs: Nappe Interference and Local Submergence. In: Journal of Irrigation and Drainage Engineering 138 (2012), Nr. 8, S. 757-765.
- [9] Ribeiro, M. L.; Pfister, M.; Schleiss, A. J.; Boillat, J.-L.: Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs. In: Journal of Hydraulic Research 50 (2012), Nr. 4, S. 400-408.
- [10] Hager, W. H.: Wastewater Hydraulics: Theory and Practice. 2. A. Berlin: Springer Verlag, 2014.
- [11] Fritz, H. M.; Hager, W. H.: Hydraulics of Embankment Weirs. In: Journal of Hydraulic Engineering 124 (1998), Nr. 9, S. 963-971.
- [12] Belzner, F.; Merkel, J.; Pfrommer, U.; Gebhardt, M.: Das Piano-Key-Wehr: Messungen an einem innovativen Verschluss für kleine Wasserstraßen. In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen (2015), Nr. 53, S. 99-107.