



Übung zur Kommunikation zwischen den Fachbehörden und Information der Öffentlichkeit

methoden, (Simulations-)Modelle, urbane Gefahren- und Risikokarten, Anpassungsmaßnahmen und wassersensible Siedlungsentwicklung erstellt. Durch projektbegleitende Tests der einzelnen Lehreinheiten an fünf deutschen Hochschulen wurde das Modul sukzessive weiterentwickelt, um es nun für Lehrzwecke bereitzustellen. Dabei ist sowohl die Nutzung der Inhalte als Foliensammlung zur gezielten Auswahl einzelner Modulnhalte als auch die Verwendung als zusammenhängende Blockveranstaltung möglich.

Erste Testvorlesungen zu einzelnen Teilen des Moduls fanden Anfang 2014 an Hochschulen in Münster, Stuttgart, Mülheim und Wuppertal statt. Studierende und Lehrende unterschiedlicher Fachrichtungen (Architektur, Umweltwissenschaften, Bauingenieurwesen) erhielten die Möglichkeit, den Umfang und die Inhalte des Bildungsmoduls durch Evaluation der Vorlesungen mitzugestalten. Im Anschluss an diese ersten Tests folgten im Sommersemester 2014 Blockveranstaltungen an der Bergischen Universität Wuppertal (Fachbereich Bauingenieurwesen – Insti-

Inhalt des Bildungsmoduls „KlNWäss“
Vorlesungsreihe für Studierende

Block	Einheiten + 45 min	Thema
V1	1	Der Klimawandel – Klimamodelle und Szenarien
	2	Klimawandelbedingte Herausforderungen an die Siedlungsentwicklung und urbane Siedlungsentwicklung
V2	1	Aktuelle Planungsmethoden in der Siedlungsentwicklung
	2	Aktuelle Modelle in der Siedlungsentwicklung
V3	1	Wassersensible Siedlungsentwicklung
	2	Die urbane Risikokarte als Planungsinstrument
V4	1	Die urbane Risikokarte als Kommunikationsinstrument
	2	Maßnahmenplanungen im Entsorgungssystem und in der Stadt, Teil 1
	3	Maßnahmenplanungen im Entsorgungssystem und in der Stadt, Teil 2

Tabelle zur Vorlesungs- und Übungsübersicht

tut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen) und an der Technischen Universität Kaiserslautern (Fachbereich Bauingenieurwesen – Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft) als umfassende Tests des Bildungsmoduls. Neben den Vorlesungen standen in Kaiserslautern auch die im Modul enthaltenen Übungen mit Verwendung von Simulationssoftware zur topografischen und hydraulischen Gefährdungsanalyse bzw. Maßnahmenplanung mittels eines gekoppelten Kanalnetz-Oberflächenabfluss-Modells sowie die Diskussionsübung zur interdisziplinären Herangehensweise bei der Maßnahmenumsetzung im Fokus. Die Evaluation der Blockveranstaltung fiel sehr positiv aus, die Studierenden lobten vor allem den aktuellen und praxisrelevanten Charakter des Moduls. Auch aktuelle Entwicklungen wie die Inhalte des DWA-M 119 wurden aufgenommen.

Die letzten Schritte bestanden in der finalen Einarbeitung der Erkenntnisse aus den Vorlesungstests sowie der Vertonung ausgewählter Vorlesungsinhalte, die von zukünftigen Dozenten zur Vorbereitung der Vorlesung und von Studie-

renden zur Vor- und Nachbearbeitung der Vorlesungsinhalte genutzt werden können (E-Learning).

Ergänzend wurde ein Modul erstellt, das sich an Techniker und Meister aus dem Kanalbetrieb wendet. Die Inhalte der Vorlesungen für Studierende wurden hierzu aufgegriffen und um betriebliche Aspekte ergänzt. Die DWA wird dieses Modul in die Aus- und Weiterbildung integrieren.

Das Bildungsmaterial steht ab September 2015 für öffentliche Hochschulen zu nicht kommerziellen Lehrzwecken zur freien Verfügung und ist über die DWA zu beziehen. Es umfasst Modulbeschreibungen, PowerPoint-Präsentationen, vertonte pdf-Dateien und Übungsmodelle zur topografischen Analyse von Siedlungsgebieten sowie zur gekoppelten Berechnung von Regenwasserabflüssen bei Starkregen im Kanalnetz und an der Oberfläche (Programmsystem DYNA®-GeoCPM®).

Das Vorhaben wurde von der DWA, der TU Kaiserslautern und der Dr. Pecher AG bearbeitet und mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 03DAS007 gefördert.

Weitere Informationen:

<http://de.dwa.de/thema-bildung.html>

Dipl.-Ing. Hélène Opitz
E-Mail: opitz@dwa.de

Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt
E-Mail: theo.schmitt@bauing.uni-kl.de

Dr.-Ing. Holger Hoppe
E-Mail: holger.hoppe@pecher.de



Das Klaviertastenwehr (PKW) als effizientes Einlaufbauwerk zur Erhöhung der Abflusskapazität bestehender Hochwasserentlastungsanlagen

Michael Pfister (Lausanne/Schweiz)

Zusammenfassung

Freie Überfallwehre sind hydraulisch effizient und zuverlässig im Betrieb. Die Überfallkapazität hängt dabei direkt von der hydraulisch aktiven Abwicklungslänge des Wehrs ab. Gefaltete Wehrtypen wie das Klaviertastenwehr (PKW) stellen eine überproportionale Abwicklungslänge zur Verfügung und sind daher besonders wirkungsvoll, insbesondere für relativ geringe Energiehöhen. Die kompakte Bauweise des PKW erlaubt zudem dessen wirtschaftliche und schnelle Erstellung auf Kronen von Schwergewichtstaumauern. Daher bietet sich das PKW an, wenn bei bestehenden Hochwasserentlastungsanlagen die Abflusskapazität zu erhöhen ist, oder sofern eine Hilfsentlastung unter beengten Platzverhältnissen anzuordnen ist. Die hydraulische Funktionsfähigkeit der PKW wurde mittels mehrerer Modellstudien getestet und optimiert. Weiter sind inzwischen mehrere PKW gebaut worden und haben ihre Zuverlässigkeit unter Hochwasser bestätigt.

Schlagwörter: Abflusskapazität, Hochwasserentlastungsanlage, Hydraulik, Klaviertastenwehr, Pegel-Abfluss-Beziehung

DOI: 10.3243/kwe2015.11.001

Abstract

The Piano Key Weir (PKW) as Efficient Inlet Structure for Raising the Discharge Capacity of Existing Flood Spillways

Free overfall weirs are hydraulically efficient and reliable in operation. With this, the overfall capacity depends on the hydraulically active developed length of the weir. Folded types of weir, such as the piano key weir (PKW), provide an over-proportionally developed length and are thus especially efficient, in particular for relatively small energy heads. The compact construction of the PKW in addition allows its economic and rapid creation on crests of gravity dams. Therefore, the PKW lends itself if and when the discharge capacity of existing flood spillways is to be increased or in case a subsidiary overflow is to be employed under cramped space conditions. The hydraulic functional capability of the PKW has been tested and optimised by means of several model studies. In addition, several PKW have been built and have confirmed their reliability under flood conditions.

Key words: discharge capacity, flood spillway, hydraulic, piano key weir, rating curve

1 Einleitung

Die Hochwasserentlastungsanlage (HWE) einer Talsperre ist ein zentrales Element bezüglich deren Sicherheit. Eine ungenügende Abflusskapazität ist die Ursache von rund einem Drittel aller Talsperrenbrüche [1]. Vergleichsweise sicher funktionieren HWE (1) mit unregelmäßigen Einläufen, bei denen keine mechanischen Komponenten versagen können, (2) mit einem Einlaufprofil, welches eine effiziente Pegel-Abfluss-Beziehung aufweist; damit wird ein übermäßiges Ansteigen des Stauspiegels im Überlastfall verhindert, (3) mit offenen Einläufen ohne Einbauten wie beispielsweise Brückenpfeiler, welche anfällig für Verklausungen mit Schwemmholz sind, und (4) mit Freispiegelabfluss beim Einlauf und der nachfolgenden Schussrinne.

Mehrere europäische Länder passen ihre hydrologischen Modelle zur Vorhersage einer in Stauseen einfließenden Hochwasserganglinie sporadisch an. Aufgrund von verfeinerten Methoden und Ansätzen, sowie von längeren Messreihen ergeben sich dann meist erhöhte Bemessungsabflüsse für die HWE. Bei bestehenden Anlagen muss in der Folge zwingend die Kapazität der HWE erhöht werden, um die Richtlinien bezüglich deren Sicherheit auch in Zukunft einzuhalten. Als Alternative bietet sich allenfalls die Absenkung des Betriebsspiegels an, was aber meist auf lange Sicht nicht wirtschaftlich ist.

Das Einlaufbauwerk einer HWE ist zentral für deren Einlaufkapazität, und es stellt das hydraulische Kontrollbauwerk

www.dwa.de

Alle Produkte bestellbar im DWA-Kundenzentrum:
E-Mail: info@dwa.de · Tel.: +49 2242 872-333 · Fax: +49 2242 872-100

- Fachbücher
- Betriebstagebücher
- LernApp
- Vordrucke



dar. Der Einlauf kann geregelt ausgebildet werden und ist entsprechend mit hydromechanischen Kontrollorganen wie Klappen oder Segmenten ausgerüstet, oder ungeregt, und besteht dann aus einem Überfallprofil. Geregelt Einläufe unterliegen allerdings der $(n-1)$ Regel, gemäß welcher aus Sicherheitsgründen das leistungsfähigste Kontrollorgan einer HWE als geschlossen angesehen wird. Entsprechend kann bei ungeregelten Einläufen die ganze Wehrbreite als funktionsfähig angesetzt werden, während bei geregelten Einläufen das abflussstärkste Wehrfeld wegfällt. Die abgeleiteten spezifischen Abflüsse unterscheiden sich allerdings immer weniger zwischen geregeltem und ungeregeltem Einlauf: das unregelmäßige Klaviertastenwehr (PKW) der HWE des Dartmouths Dammes in Australien vermag gegen $130 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ abzuführen. Dies wäre selbst für geregelte Einläufe ein hoher Abfluss!

Die Entlastungskapazität eines ungeregelten Überfalls ist direkt proportional zu dessen Länge, für eine gegebene oberwasserseitige Energiehöhe H . Es ist somit wirksam, die abgewinkelte Kronenlänge L relative zur Wehrbreite W zu erhöhen. Ein Wehr mit $L/W=7$ weist – zumindest für geringe H – praktisch den siebenfachen spezifischen Abfluss auf, verglichen mit einem linearen und transversalen Wehr. Labyrinthwehre sind ein Beispiel solch gefalteter Wehre und wurden bisher in großer Anzahl erstellt [2]. Das PKW stellt eine Weiterentwicklung des Labyrinthwehrs dar [1] und funktioniert hydraulisch ebenfalls als unregelmäßiger Überfall. Es kombiniert alle vier einleitend genannten Bedingungen für eine vergleichsweise sichere Funktionsfähigkeit. Die Aufstandsfläche ist deutlich geringer als bei einem Labyrinthwehr, woraus Überhänge zum Unter- und Oberwasser hin resultieren. Oder, anders formuliert, die verhältnismäßig lange und massive Grundplatte aus Beton zur Gründung eines Labyrinthwehrs fällt weg. Neben einer verbesserten hydraulischen Funktionsfähigkeit hat das PKW somit den Vorteil, dass es auf äußerst beschränkten Aufstandsflächen, wie zum Beispiel auf Gewichtsmauern, angeordnet werden kann. Trotz seiner komplexen Geometrie ist das PKW vergleichsweise günstig und schnell zu erstellen, da es aus repetitiven Zyklen besteht und nur geringe Betonvolumen benötigt [3]. Zudem haben Modellversuche gezeigt, dass PKW wenig anfällig für Verklausungen sind und sich bei Schwemmholzanfall nur eine verhältnismäßig geringe Erhöhung des Stauspiegels einstellt [4].

Das erste PKW in Europa wurde 2006 durch Électricité de France (EDF) bei der Talsperre Golours in Frankreich in Betrieb genommen [3]. Dann folgten beinahe jährlich weitere Anlagen in Frankreich: St. Marc (2008), Etroit (2009), Gloriettes (2010), Escouloubre (2011), und Malarce (2013). Sämtliche PKW wurden auf oder neben bestehenden, älteren Talsperren installiert, meist als Hilfs-HWE, um die zentrale Entlastung zu ergänzen. Weitere französische PKW sind in der Planung weit fortgeschritten oder bereits in Bau: Campauleil, Charmine, Raviege und Gage II [5].

Meist wird der PKW A-Typ gebaut, bei welchem die Einlauf- und Auslauftasten sowohl ober- als auch unterwasserseitig überhängend sind [1]. Andere PKW Typen verfügen nur ober- (B-Typ) oder nur unterwasserseitig (C-Typ) über überhängende Tasten, während die jeweils andere Seite vertikal ausgebildet ist. Der D-Typ schließlich verfügt beidseitig über vertikale Wände, und ähnelt somit dem Labyrinthwehr, allerdings mit geeigneten Tastensolehnen. Die Standard-Nomenklatur [6] für A-Typen schließt, nebst den schon definierten geometrischen Ab-

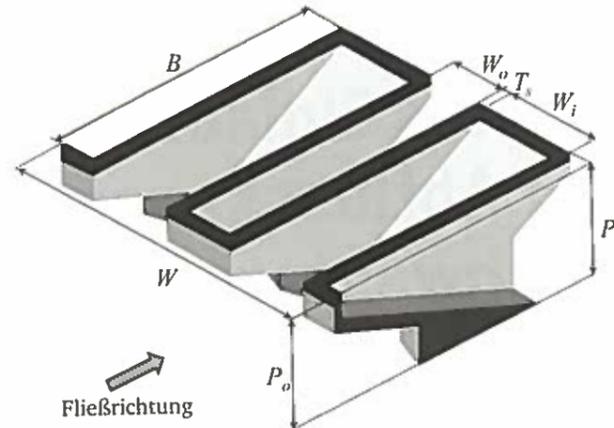


Abb. 1: Definition der Geometrie eines PKW des Typs A.

messungen, folgende Parameter ein (Abbildung 1), B =Länge in Strömungsrichtung, P =vertikale Wehrhöhe, T_s =Wandstärke, R =Höhe einer allfälligen Brüstungsmauer und W =Wehrbreite. Der Index i bezieht sich auf die Einlauftaste, d. h. in welche das Wasser oberstrom ins PKW hinein fließt, und der Index o auf die Auslauftaste, d. h. in welcher das Wasser nach der Überfallkronen das PKW verlässt.

2 Anwendungsbeispiele

Auf zwei konkrete Anwendungsbeispiele wird nachfolgend genauer eingegangen, namentlich auf jene der HWE der Staumauern Malarce und Charmine in Frankreich. Weitere Beispiele zur Kapazitätserhöhung von bestehenden HWE mittels PKW sind gut dokumentiert [7, 8], z. B. jenes des Dartmouths Dammes in Australien mit einer Abflusskapazitätserhöhung von $4400 \text{ m}^3/\text{s}$ auf über $11000 \text{ m}^3/\text{s}$ [9]. Der maximale spezifische Bemessungsabfluss übers PKW beträgt dort knapp $130 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die 17 m hohe Gewichtstaumauer Charmine wurde 1950 in einen Zufluss zum Ain (Frankreich) zu Energieerzeugung gebaut. Die HWE bestand ursprünglich aus zwei 8 m breiten Schussrinnen beschildet von zwei Segmentschützen, und zusätzlich aus zwölf nicht-regulierten Kronenüberfällen (Standard-Überfallprofile) mit einer gesamten lichten Breite von knapp 41 m. Die Abflusskapazität beim maximal zulässigen Stauspiegel betrug $440 \text{ m}^3/\text{s}$. Insbesondere die Kronenüberfälle mit ihren geringen Breiten erwiesen sich im Betrieb als anfällig für eine Verklausung mit Schwemmholz. Eine Neubeurteilung der Hydrologie aufgrund der angepassten französischen Richtlinien ergab, dass das neue Bemessungshochwasser $685 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt, was deutlich über der installierten Kapazität lag. Eine detaillierte Machbarkeitsstudie verschiedener Optionen führte zu dem Schluss, dass der Ersatz der Kronenüberfälle mit zwei PKW effizient ist [10]. Diese erfordern relativ geringe Anpassungen auf der Staumauer und die PKW können insbesondere am Ort der ineffizienten Kronenüberfälle gebaut werden (Abbildung 2). Der maximal zulässige Stauspiegel muss nur um 0,5 m abgesenkt werden, trotz der massiven Abflusssteigerung der HWE dank den beiden PKW links und rechts der Segmentschützen. Bei geschlossenen Segmentschützen und einem Stauspiegel auf Höhe der Staumauerkörne wären übrigens – gemäß Modellversuchen – alleine die beiden PKW knapp in der Lage, das Bemessungshochwasser abzuleiten. Beide PKW weisen eine Höhe von



Abb. 2: Neu erstellte Zwillings-PKW auf der Staumauer Charmine (F), Ansicht des (a) Ober- und (b) Unterwassers (Foto: Ende 2014).

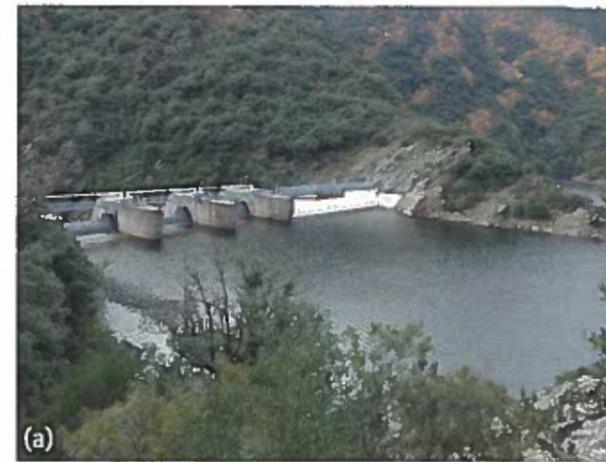


Abb. 3: Neu erstelltes PKW beim rechten Widerlager der Staumauer Malarce (F), Ansicht des (a) Ober- und (b) Unterwassers (Foto: Ende 2013).

$P=5,0 \text{ m}$ auf, und pro Seite eine abgewinkelte Länge von $L=119,5 \text{ m}$. Die lichte Breite einer Einlauftaste beträgt $W_i=2,75 \text{ m}$, und jene einer Auslauftaste ist $W_o=1,95 \text{ m}$. Die Wandstärken betragen $T_s=0,35 \text{ m}$, und die Breite $B=12,87 \text{ m}$. Die gesamten Projektkosten werden auf 6,5 Mio. Euro geschätzt, und die Baukosten der beiden PKW auf 1,8 Mio. Euro [3].

Die 30 m hohe Malarce Staumauer wurde 1968 in Südfrankreich erstellt. Die Region weist ein mediterranes Klima auf, mit langen Trockenperioden und seltenen, extrem starken Niederschlagsereignissen. Entsprechend leistungsfähig wurde die HWE ausgelegt: das Bemessungshochwasser von $4100 \text{ m}^3/\text{s}$ wurde durch drei Segmentwehre abgeleitet, jedes 14 m breit und 11,5 m hoch. Später durchgeführte Modellversuche haben jedoch gezeigt, dass die effektive Abflusskapazität ungefähr $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt [11]. Eine Neubeurteilung des Bemessungshochwassers zeigte ein Defizit der Kapazität von $600 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Die Betreiberin hat aufgrund eines Variantenstudiums entschieden, eine zusätzliche HWE auf der Mauer nahe des rechten Widerlagers zu erstellen [12, 13] (Abbildung 3). Die verfügbare Breite von 42,5 m erforderte ein PKW mit einem spezifischen Abfluss von $14,1 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einer Überfallhöhe von 1,5 m. Da der Unterschied zwischen dem maximal zulässigen Stauspiegel und dem Betriebsspiegel ursprünglich nur 1,0 m entsprach,

musste der neue Betriebsspiegel mit PKW lediglich um 0,5 m abgesenkt werden. Das PKW weist eine Höhe von $P=4,4 \text{ m}$ auf, und eine abgewinkelte Länge von ungefähr $L=340 \text{ m}$. Die lichte Breite einer Einlauftaste beträgt $W_i=1,65 \text{ m}$, und jene einer Auslauftaste ist $W_o=1,58 \text{ m}$. Die Wandstärken betragen $T_s=0,40 \text{ m}$ beim Anschluss an die Mauer, und $T_s=0,20 \text{ m}$ nahe der PKW Krone. Die Breite beträgt $B=13,46 \text{ m}$. Entlang der Talflanke wurde eine neue Schussrinne vorgesehen, und am Fuß der Talsperre war zudem ein neues Bauwerk zur Energiedissipation notwendig. Die Bauzeit betrug insgesamt 13 Monate, wovon nur 3,5 Monate auf das PKW entfielen. Die Projektkosten werden mit 4,5 Mio. Euro angegeben, davon waren nur ungefähr 0,8 Mio. Euro für die Errichtung des PKW notwendig [3].

3 Hydraulische Bemessung

3.1 Bemerkungen

In der Literatur sind bisher drei systematische Studien zur hydraulischen Bemessung von PKW publiziert worden, alle basierend auf physikalischen Modellversuchen. Diese beinhalten eine Herleitung der Abflusskapazität mittels eines modifizierten Abfluss-Koeffizienten nach Poleni [14], mittels eines kombi-

nierten Wehransatzes mit frontaler und seitlicher Überströmung [15], oder als relativer Vergleich des PKW-Abflusses mit jenem eines linearen scharfkantigen Wehrs [16]. Letzterer erscheint physikalisch sinnvoll, einfach anwendbar und robust, und wird daher weiter ausgeführt.

Der Abfluss über ein lineares und scharfkantiges Wehr Q_s berechnet sich zu

$$Q_s = C_s W \sqrt{2g} H^{1.5} \quad (1)$$

unter Annahme eines Abfluss-Koeffizienten von $C_s = 0,42$. Der PKW-Abfluss Q_p wird ins Verhältnis zu Q_s gesetzt, als

$$Q_p = r Q_s \quad (2)$$

Der Faktor r gibt somit die Effizienz des PKW verglichen mit jener des scharfkantigen und linearen Wehrs an, für gleiche W und H .

Die Pegel-Abfluss-Beziehung Q_p zu H wurde an der EPFL (ETH Lausanne) im Rahmen einer ausgedehnten Messkampagne am physikalischen Modell bestimmt [16] (Abbildung 4). Insgesamt wurden 49 geometrische PKW A-Typ Konfigurationen untersucht, welche 380 Messwerte lieferten. Die maßgebenden Parameter wurden im folgenden absoluten Bereich variiert: $1,50 \text{ m} \leq L \leq 3,50 \text{ m}$, $0,33 \text{ m} \leq B \leq 1,00 \text{ m}$, $0,10 \text{ m} \leq W_{i,0} \leq 0,20 \text{ m}$, $0,10 \text{ m} \leq P_{i,0} \leq 0,28 \text{ m}$, $0,07 \text{ m} \leq B_{i,0} \leq 0,40 \text{ m}$, $0,00 \text{ m} \leq R \leq 0,06 \text{ m}$, und $0,02 \text{ m} \leq H \leq 0,27 \text{ m}$. Die beiden Werte $T_i = 0,02 \text{ m}$ und $W = 0,50 \text{ m}$ wurden konstant gehalten, und die Wehrkrone war als Halbkreis ausgebildet. Die relative Variation der Parameter umfasste: $3,0 \leq L/W \leq 7,0$, $0,1 \leq H/P_i \leq 2,8$, $1,5 \leq B/P_i \leq 4,6$, $0,7 \leq P_i/P_o \leq 1,4$, und $0,5 \leq W_i/W_o \leq 2,0$. Um Maßstabeffekte auszuschließen, wurden Versuche mit $H < 0,05 \text{ m}$ für die Datenauswertung ausgeschlossen [17, 18].

3.2 Hydraulisch primäre Parameter

Die relative Abwicklungslänge L/W bestimmt weitestgehend die PKW-Abflusskapazität. Der Term wird als $(L - W)/W$ formuliert, und gibt daher die normierte „Überlänge“ des PKW im Vergleich zum scharfkantigen und linearen Wehr an. Weiter ist von Labyrinthwehren bekannt, dass diese besonders für geringe Energiehöhen H effizient sind. Dann ist hydraulisch die vol-



Abb. 4: Systematische Modellversuche an der EPFL (ETH Lausanne)

le Abwicklungslänge L aktiv, während für große H der Einfluss der Ecken den Abfluss reduziert. Entsprechend wird ein Parameter P_i/H eingeführt. Die Auswertung der Modelldaten legt folgenden Zusammenhang nahe [16]

$$\delta = \left(\frac{(L - W)P_i}{WH} \right)^{0,9} \quad (3)$$

Im abgedeckten Messbereich ($0 < \delta < 20$) werden die Daten mit einer linearen Annäherung beschrieben zu

$$r = 1 + 0,24 \delta \quad (4)$$

Die Korrelation zwischen den Messdaten und der Vorhersage von Q_p basierend auf den Gleichungen (3) und (4) beträgt $R^2 = 0,96$ für die Daten von Leite Ribeiro [16] und $R^2 = 0,98$ für jene von Machiels [15]. Sofern $L = W$, d. h. wenn ein scharfkantiges und lineares Wehr vorliegt, wird $\delta = 0$ und $r = 1$, woraus schließlich korrekterweise Q_s resultiert.

Eine erste, allerdings bereits sehr zuverlässige Abflussberechnung lässt sich somit vornehmen, wenn die geometrischen Größen L , W und P_i eines PKW festgelegt wurden, und eine Energiehöhe H angenommen wird. Effizient sind insbesondere PKW mit großen Werten L/W um 5 bis 7. Die detaillierte Auslegung des PKW (B_o , B_i , W_i , W_o , etc.) ist von sekundärer Bedeutung, solange L/W groß bleibt.

3.3 Hydraulisch sekundäre Parameter

Die systematische Variation der Modell-PKW hat gezeigt, dass die geometrische Auslegung der Tasten sich nur beschränkt auf die Abflusskapazität auswirkt. Der Effekt der geometrischen Auslegung entspricht einem Faktor zwischen 0,9 und 1,2, anzuwenden auf δ in Gleichung (4), und ist damit im Gegensatz zum Einfluss der primären Terme $(L - W)/W$ und P_i/H gering. Aus Modelldaten konnten nachfolgende Korrekturfaktoren abgeleitet werden [16]:

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

$$\alpha = 1 + \left(\frac{R_o}{P_o} \right)^{2,00} \quad (8)$$

Werden alle Korrekturfaktoren berücksichtigt, kann die Gleichung (4) erweitert werden zu

$$r = 1 + 0,24 \delta (wpba) \quad (9)$$

Gleichung (9) und die Messdaten von Leite Ribeiro [16] korrelieren mit $R^2 = 0,98$ (Abb. 5), und die von Machiels [15] zur Verfügung gestellten Daten mit $R^2 = 0,98$. Der Zuwachs an Kor-

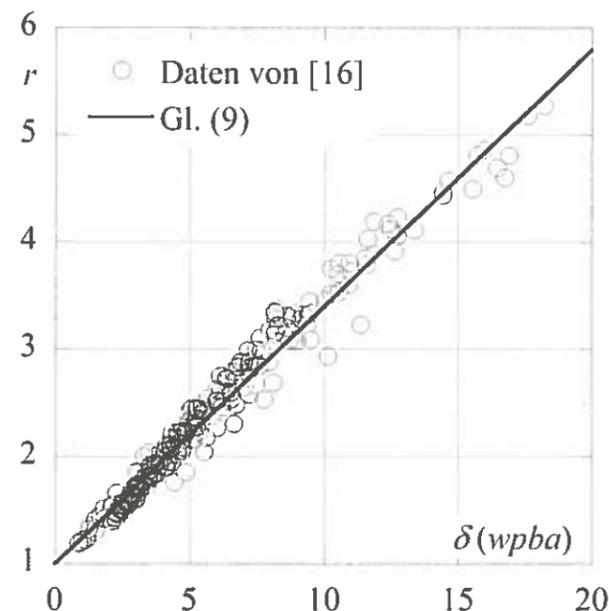


Abb. 5: Vergleich der Effizienz r mit dem Faktor δ (wpba) für die Daten von [16].

relation mag gering erscheinen, gleichzeitig reduziert sich jedoch bei Anwendung von Gleichung (9) hauptsächlich die Anzahl von Ausreißern.

Für die Auslegung eines PKW wird daher zuerst seine Geometrie festgelegt, basierend auf den wirtschaftlichen Kriterien aus nachfolgendem Unterkapitel 3.4. Danach wird, unter Berücksichtigung der Korrekturfaktoren aus den Gleichungen (5) bis (8) sowie des Terms für δ aus Gleichung (3), der Faktor r mittels Gleichung (9) ermittelt. Dieser wird in Gleichung (2) eingesetzt, unter Einbezug des Referenzabflusses Q_s aus Gleichung (1). Es folgt dann der PKW Abfluss Q_p für die gewählte PKW-Geometrie und Energiehöhe H .

3.4 Wirtschaftliche Auslegung

Nebst hydraulischen Aspekten sind für den Bau eines PKW auch technische und wirtschaftliche Kenngrößen von Bedeutung. Diese könne wie folgt zusammengefasst werden [19]:

- Wird ein PKW auf eine bestehende Schwergewichtsmauer aufgesetzt, muss ein Teil der Mauerkrone entfernt und der Stauspiegel temporär abgesenkt werden. Daraus resultiert ein Interesse, die PKW-Höhe P_i klein zu halten. Niedrige PKW mit $P_i/(W_o + W_i + 2T_i) \approx 0,5$ entsprechen am ehesten diesen Anforderungen. Allerdings sind dann die verbleibenden, hydraulisch wirksamen Parameter zu optimieren, so dass B_o/B_i bis zu 2, und $1,2 \leq W_i/W_o \leq 1,5$ wird.
- Neu zu erstellende Anlagen weisen einen größeren Spielraum bezüglich der Gestaltung auf, insbesondere was die lineare Wehrbreite W betrifft. Entsprechend ist ein hohes Wehr mit $1 \leq P_i/(W_o + W_i + 2T_i) \leq 1,3$ vorzuziehen, und infolge der Wirtschaftlichkeit $B_o/B_i = 1$ und $W_i/W_o = 1$. Daraus ergibt sich dann nur eine einzige Standard-Schalung für den geeigneten Boden des PKW, welche ober- und unterwasserseitig verwendbar ist.

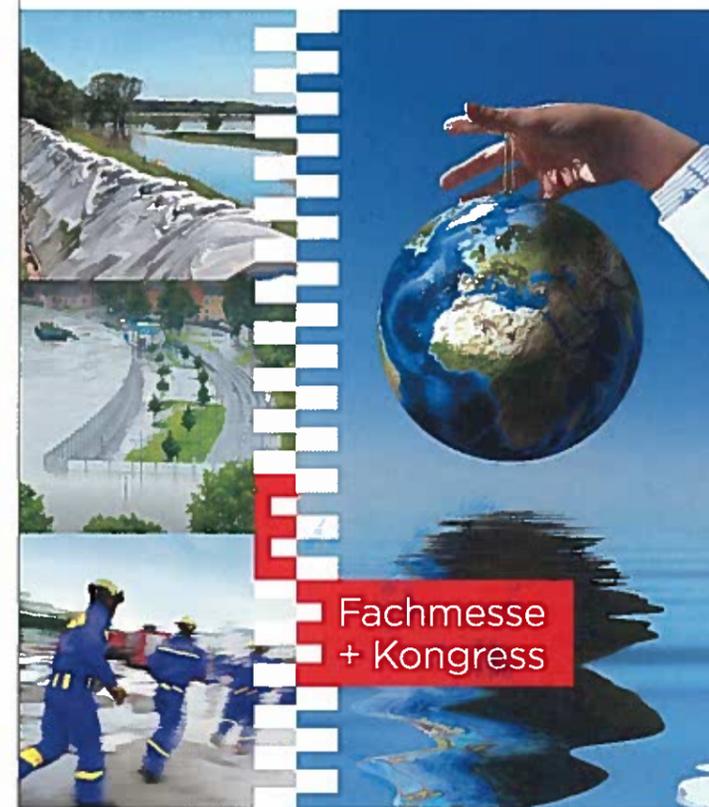


Essen
13.-15. Januar
2016

www.acqua-alta.de

Hochwasserschutz,
Klimafolgen
und Katastrophen-
management

Hochwasserschutz hoch 3: Vorsorge, Schutz, Rettung



acqua alta ist die Branchen-Plattform für Information, Austausch und interdisziplinäre Businesskontakte. Hier treffen Sie die Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik.

Erfahren Sie alles Wissenswerte über innovative und lösungsorientierte Anwendungen für den vorsorgenden, technischen und mobilen Hochwasserschutz und werden Sie Teil eines zukunftsweisenden Branchennetzwerkes.



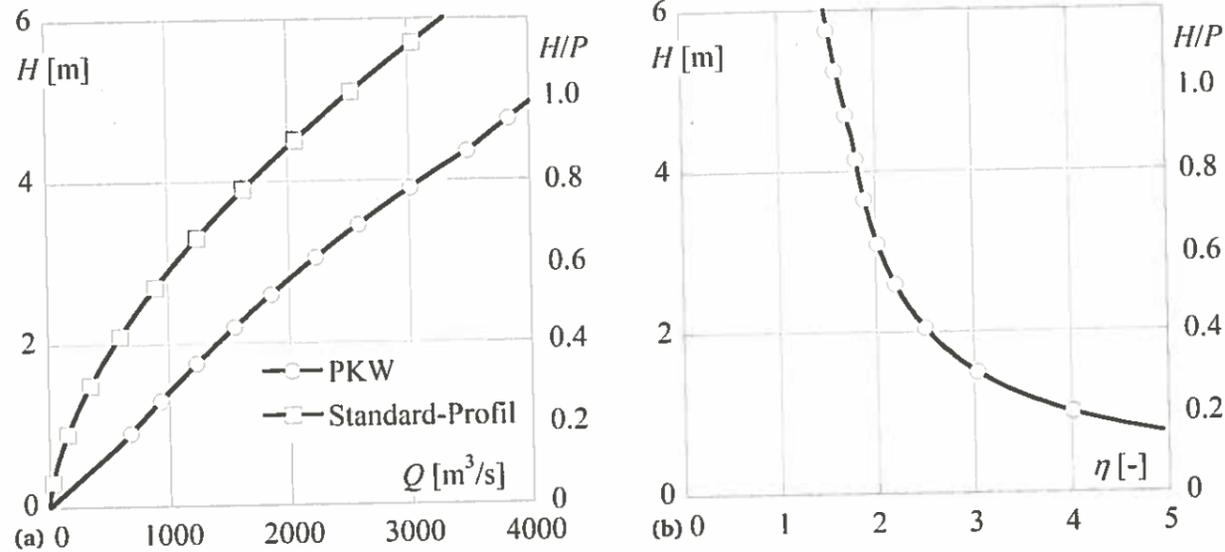


Abb. 6: Vergleich der Abflusskapazität eines PKW mit jener eines Standard-Überfallprofils, (a) absolut und (b) relativ.

- Die Kronenform sollte möglichst einem Halbkreis entsprechen. Aufgrund der meist hohen Anzahl an Zyklen wirkt sich dies kaum auf die Schalungskosten aus.

3.5 Vergleich mit einem linearen Standard-Überfallprofil

Ein Vergleich der Leistungsfähigkeit zwischen einem linearen Standard-Überfallprofil und einem PKW wurde von Pfister und Schleiss [20] vorgestellt. Die Wehrlagehöhe betrug $W=100$ m für beide Einlaufbauwerke. Das PKW wies folgende Abmessungen auf: 25 Zyklen, $L/W=5,00$, $B/P=1,60$, $W/W_0=1,20$, und $B/B_0=0,25$. Das Standard-Überfallprofil verfügte über eine Bemessungs-Energiehöhe von $H_0=5,0$ m, entsprechend einem Bemessungs-Abfluss von $Q_0=2500$ m³/s.

Die Pegel-Abfluss-Beziehungen beider Wehre sind in Abbildung 6a gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass das PKW deutlich höhere Abflüsse abzuleiten vermag, verglichen mit dem linearen Standard-Überfallprofil. Insbesondere für geringe

Energiehöhen ist der Unterschied frappant. Für $H=1,0$ m beträgt $Q_U=184$ m³/s und $Q_P=933$ m³/s (Faktor $\eta=5,07$), und für $H=5,0$ m beträgt $Q_U=2500$ m³/s und $Q_P=4040$ m³/s (Faktor $\eta=1,62$), mit Q_U als Abfluss übers Standard-Überfallprofil. Ein relativer Abflussvergleich ist in Abbildung 6b gezeigt, mit $\eta=Q_P/Q_U$. Für $H \leq 3,0$ m beträgt $Q_P > 2Q_U$, und für $H \leq 1,0$ m beträgt $Q_P > 4Q_U$. Für große $H > 6$ m folgt asymptotisch $\eta \rightarrow 1$.

4 Zusammenfassung

Klaviertastenwehre (PKW) bieten sich für die Erhöhung der Abflusskapazität bestehender Hochwasserentlastungsanlagen (HWE) an, insbesondere wenn ein linearer Standard-Überfall zu ersetzen ist. Sie leiten unter Einbezug derselben Breite einen deutlich höheren Abfluss auf die Schussrinne, ohne dabei die Energiehöhe im Stausee zu erhöhen. Diese effiziente Pegel-Abfluss-Beziehung erlaubt ferner die Bewirtschaftung von Speicherseen auf einem verhältnismäßig hohen Betriebsspiegel. Zudem sind PKW effiziente Einlaufbauwerke für neu zu erstellende Hilfs-Hochwasserentlastungsanlagen, da sie auf der Krone von Schwergewichtsmauern angeordnet werden können und nur wenig Breite in Anspruch nehmen. Schließlich sind PKW schnell und günstig erstellbar, weshalb in den letzten Jahren mehrere Anlagen erstellt wurden. Zwei Fallbeispiele aus Frankreich sind im Beitrag genannt, welche die angeführten Vorteile der PKW illustrieren und Hinweis auf effektive Bauzeiten und -kosten geben.

Die Abflusskapazität des A-Typ PKW lässt sich anhand der vorgestellten empirischen Gleichungen bestimmen. 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 PKW-Geometrie bewirken. Dabei unterscheidet sich die Auslegung des PKW entsprechend seiner Funktion: (1) Wird es auf einer bestehenden Mauer installiert, ist eine geringe Höhe kombiniert mit ansonsten hydraulisch optimierten Dimensionen wirt-

schaftlich, und (2) PKW neuer HWE sind tendenziell höher, ansonsten jedoch eher mit wirtschaftlichen, d.h. baukostenorientierten Zyklen ausgestattet.

Ein direkter Vergleich zwischen der Abflusskapazität eines linearen Standard-Überfalls und eines PKW für ansonsten gleiche Randbedingungen illustriert die ausgeprägte Abflusskapazität des PKW. Für geringe Energiehöhen ist das PKW deutlich effizienter und gleicht seine Leistungsfähigkeit für große Energiehöhen asymptotisch jener des Standard-Überfalls an.

Literatur

- Schleiss, A.J. (2011). *From labyrinth to piano key weirs: A historical review*. Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2011), CRC Press, Boca Raton, 3-15.
- Falvey, H.T. (2003). *Hydraulic design of Labyrinth weirs*. ASCE Press, Reston VA, US.
- 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 (PKW 2013), CRC Press, Boca Raton, 213-226.
- 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.
- Dugué V., Pfister, M., Hachem, F., Boillat, J.-L., Nagel, V., und Laugier, F. (2013). *Etude sur modèle physique du nouvel évacuateur de crue du barrage de Gage II*. La Houille Blanche 2, 31-38.
- Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B., Laugier, F., Erpicum, S., Machiels, O., Piroton, M., Boillat, J.L., Leite Ribeiro, M., und Schleiss, A.J. (2011). *A naming convention for the Piano Key weirs geometrical parameters*. Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2011), CRC Press, Boca Raton, 271-278.
- Erpicum, S., Laugier, F., Boillat, J.L., Piroton, M., Reverchon, B., Schleiss, A.J., Editors (2011). *Labyrinth and Piano Key Weirs* (PKW 2011), CRC Press, Boca Raton.
- Erpicum, S., Laugier, F., Pfister, M., Piroton, M., Cicéro, G.M., Schleiss, A.J., Editors (2013). *Labyrinth and Piano Key Weirs II* (PKW 2013), CRC Press, Boca Raton.
- Phillips, M.A., Lesleighter, E.J. (2013). *Piano Key Weir spillway: Upgrade option for a major dam*. Labyrinth and Piano Key Weirs II (PKW 2013), CRC Press, Boca Raton, 159-168.
- Loisel, P.E., Valley, P., Laugier, F. *Hydraulic physical model of Piano Key Weirs as additional flood spillways on the Charmine dam*. Labyrinth and Piano Key Weirs II (PKW 2013), CRC Press, Boca Raton, 195-202.
- Cicéro, G.M., Guene, C., Luck, M., Pinchard, T., Lochu, A., Brousse, P.H. (2010). *Experimental optimization of a piano key weir to increase the spillway capacity of the Malarce dam*. IAHR European Congress, Edinburgh UK.
- Pinchard, T., Boutet, J.M. (2011). *Spillway capacity upgrade at Malarce dam: Design of an additional Piano Key Weir spillway*. Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2011), CRC Press, Boca Raton, 233-240.
- Pinchard, T., Farges, J.L., Boutet, J.M., Lochu, A., Laugier, F. (2013). *Spillway capacity upgrade at Malarce dam: Construction of an additional Piano key weir spillway*. Labyrinth and Piano Key Weirs II (PKW 2013). CRC Press, Boca Raton, 243-252.
- Kabiri-Samani, A., Javaheri, A. (2012). *Discharge coefficient for free and submerged flow over Piano Key weirs*. J. Hydraulic Res. 50(1), 114-120.
- Machiels, O., Dewals, B., Archambeau, P., Piroton, M., Erpicum, S. (2013). *An analytical approach for Piano Key weir hydraulic design*. Labyrinth and Piano Key Weirs II (PKW 2013), CRC Press, Boca Raton, 131-138.
- 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.

- Erpicum, S., Silvestri, A., Dewals, B., Archambeau, P., Piroton, M., Colombié, M., Faramond, L. 2013. *Escouloubre PKW: Prototype versus scaled model*. Labyrinth and Piano Key Weirs II (PKW 2013), CRC Press, Boca Raton, 65-72.
- Pfister, M., Battisacco, E., De Cesare, G., Schleiss, A.J. (2013). *Scale effects related to the rating curve of cylindrically crested Piano Key weirs*. Labyrinth and Piano Key Weirs II (PKW 2013), CRC Press, Boca Raton, 73-82.
- Machiels, O. (2012). *Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key Weirs*. PhD Thesis, ULgetd-09252012-224610, University of Liège (B).
- Pfister, M., Schleiss, A.J. (2013). *Estimation of A-type Piano Key weir rating curve*. Labyrinth and Piano Key Weirs II (PKW 2013), CRC Press, Boca Raton, 139-147.

Autor

Dr. Michael Pfister
Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Station 18
1015 Lausanne, Schweiz

E-Mail: michael.pfister@epfl.ch

KW

www.dwa.de/eva

DWA
Deutscher Wasserbauverband

Bildungsveranstaltungen

stets aktuell im Internet

Informieren Sie sich über Kurse, Seminare und Tagungen

**PRINT
MACHT
DICH ZUM
WIEDER-
HOLUNGS-
TÄTER.**

DENN ANZEIGEN IN ZEITSCHRIFTEN WIRKEN MEHRFACH.
IM SCHNITT WERDEN SIE VON DEN LESERN RUND 2-MAL
WAHRGENOMMEN. MEHR UNTER WWW.PRINTWIRKT.DE

Print
wirkt.