

Labyrinth-Wehre

Fabian Belzner M. Eng., Bundesanstalt für Wasserbau

Bei einem Labyrinth-Wehr handelt es sich um einen in der Draufsicht gefalteten festen Wehrtyp. Im Vergleich zum linearen Wehr kann die Abflussleistung bei gleicher lichter Weite deutlich erhöht werden. Im Unterschied zum Piano-Key-Wehr sind die ober- und unterwasserseitigen Wände vertikal, was zwar eine vergrößerte Aufstandsfläche zur Folge hat, jedoch konstruktive Vorteile bietet. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die hydraulische Bemessung von Labyrinth-Wehren. Dabei werden zunächst die hydraulischen Grundlagen für freien und rückgestauten Abfluss erläutert und anschließend die wichtigsten Erkenntnisse der bisherigen Forschung zusammengefasst. Ergebnisse aus gegenständlichen Modelluntersuchungen der BAW werden diskutiert und mit der einschlägigen Literatur verglichen. Schließlich wird ein Schema für die Bemessung von Labyrinth-Wehren für freien und rückgestauten Abfluss gezeigt. Im Hinblick auf den Praxisbezug wird ein Projekt aus den USA vorgestellt.

1 Einleitung

Das Labyrinth-Wehr ist ein festes Wehr, dessen Überfallkrone in der Draufsicht gefaltet ausgeführt wird. Damit kann eine Überfalllänge realisiert werden, welche in der Regel der fünf- bis sechsfachen lichten Weite des Wehrs entspricht. Gefaltete Wehre haben dadurch eine höhere Leistungsfähigkeit als senkrecht angeströmte Wehre. Für kleine Überfallhöhen ist der Abfluss proportional zur Abwicklungslänge (Schleiss 2011). Mit zunehmender Überfallhöhe wird dieser hydraulische Vorteil immer geringer (Falvey 2003).

Generell wird zwischen drei Grundformen des Labyrinth-Wehrs unterschieden (Bild 1). Die einfachste Form ist das rechteckförmige Labyrinth-Wehr (Bild 1, a), bei dem die Front- und Rückwände im rechten Winkel zu den Seitenwänden angeordnet sind. Diese Form hat hydrau-

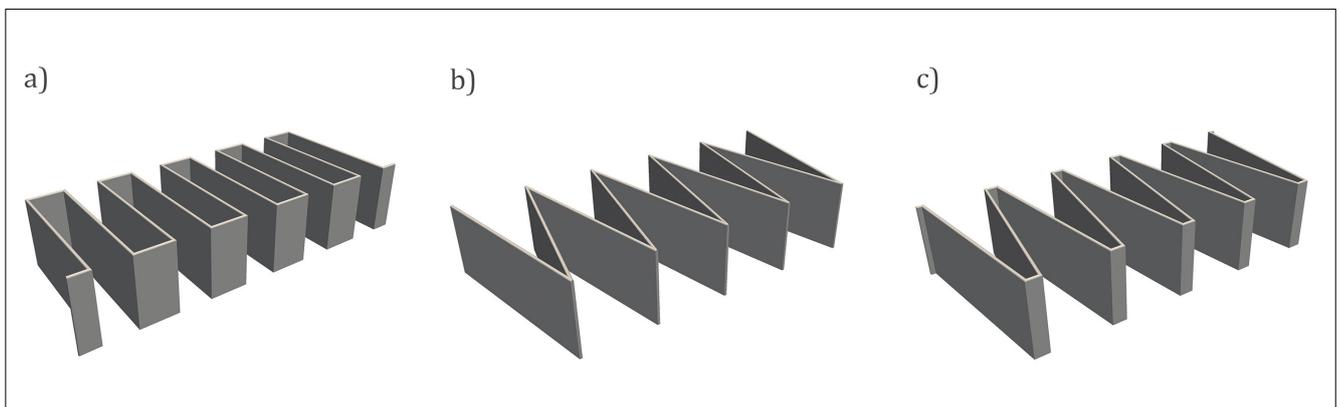


Bild 1: Grundformen des Labyrinth-Wehrs: a) Rechteckform, b) Dreieckform, c) Trapezform

liche Nachteile, da die Seitenwände parallel zueinander stehen. Beim Überströmen des Wehrs treffen die seitlichen Überfallstrahlen aufeinander und es ergeben sich lokale Rückstaueffekte, die zu einer Reduktion der Leistungsfähigkeit führen können (Crookston und Tullis 2012). Beim dreieckförmigen Labyrinth-Wehr (Bild 1, b) wird auf Front- und Rückwände verzichtet, die Seitenwände stehen im Seitenwandwinkel α [°] zur Längsachse. Das trapezförmige Labyrinth-Wehr (Bild 1, c) besteht aus angewinkelten Seitenwänden und verkürzten Front- und Rückwänden. Die Seitenwände stehen im Seitenwandwinkel α zur Längsachse. Es ist der leistungsfähigste und am meisten verbreitete Labyrinth-Wehr-Typ: Lokale Rückstaueffekte sind minimal und auch bei kleinen Überfallhöhen ist die gesamte Krone abflusswirksam.

2 Hydraulische Grundlagen und Bezeichnungen

Beim Abfluss über ein Kontrollbauwerk wird zwischen rückgestautem und freiem Abfluss unterschieden. Freier Abfluss liegt vor, wenn der Oberwasserstand h_u [m] lediglich eine Funktion vom Abfluss Q [m³/s] und der Geometrie ist. In diesem Fall kann der Abfluss Q mit der Formel

von Du Buat in Abhängigkeit von einem dimensionslosen Abflussbeiwert C_d [-], der oberwasserseitigen Energiehöhe H_u [m] und der Kronenlänge L [m] beschrieben werden. Der Abflussbeiwert C_d ist dabei eine Funktion der Geometrie und der Überfallhöhe h_u .

$$Q = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot H_u^{3/2} \tag{1}$$

Gleichung (1) ist für freien Abfluss gültig. Wird der Unterwasserstand h_d [m] angehoben, beginnt der Oberwasserstand h_u ab einem bestimmten Punkt ebenfalls zu steigen und die oberwasserseitige Energiehöhe wird eine Funktion vom Abfluss Q , dem Abflussbeiwert C_d und der unterwasserseitigen Energiehöhe H_d [m]. Der Übergang von freiem zu rückgestautem Abfluss wird als „Grenzeinstau“ oder „Modular Limit“ bezeichnet (Hager 2010).

Eine Prinzipskizze mit Angabe der in diesem Beitrag verwendeten Bezeichnungen ist in Bild 2 dargestellt. Der Index „u“ (upstream) bezeichnet dabei freien Abfluss im Oberwasser; rückgestauter Abfluss ist mit „*“ gekennzeichnet. Für das Unterwasser wird der Index „d“ (downstream) verwendet. Die Beschreibung der Geometrie erfolgt gemäß Pralong et al. (2011). Die wichtigsten geometrischen Parameter sind in Bild 3 dargestellt. Die Kronen- oder Abwicklungslänge wird in der Regel mit L bezeichnet.

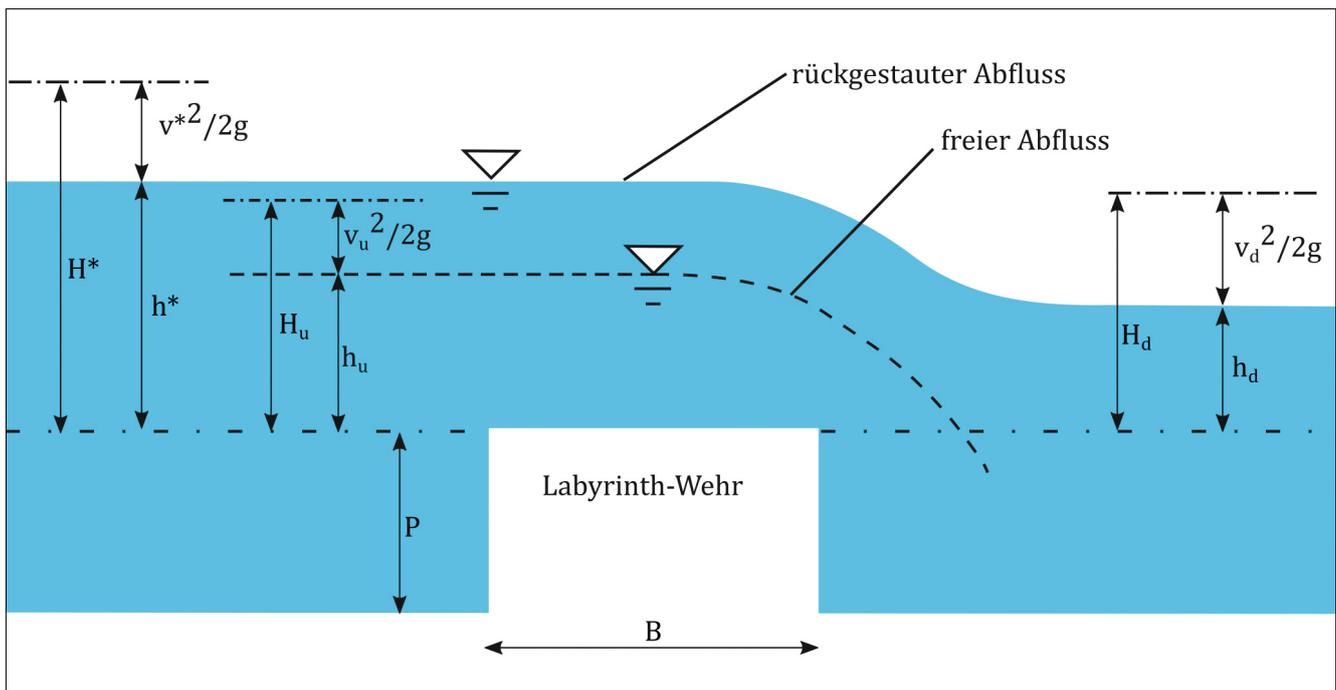


Bild 2: Prinzipskizze (Längsschnitt)

Die nach Oberwasser geöffneten Einbuchtungen werden als „Inlet-Keys“ bezeichnet, die nach Unterwasser geöffneten als „Outlet-Keys“.

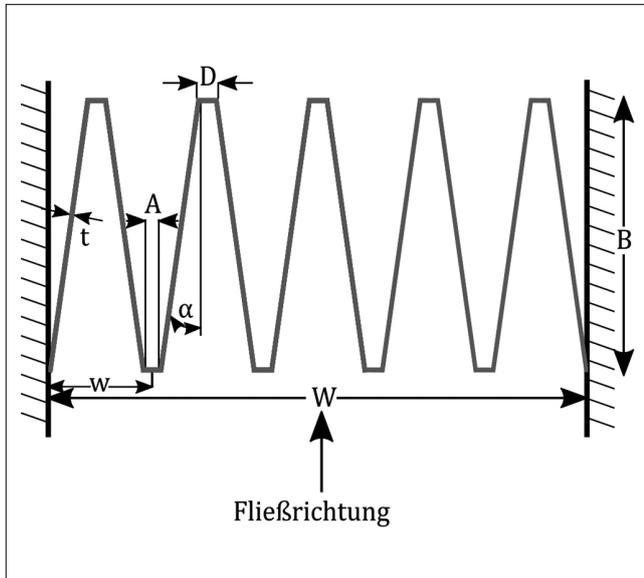


Bild 3: Schematische Darstellung der Draufsicht auf ein trapezförmiges Labyrinthwehr

3 Relevante Literatur

Im Vergleich zum Piano-Key-Wehr hat das Labyrinth-Wehr keine geneigten Überhänge, wodurch die Geometrie mit weniger Parametern beschrieben werden kann. Die ersten verfügbaren Bemessungsdiagramme, die auf Laboruntersuchungen basieren, wurden von Taylor (1968) vorgestellt. Sie beschreiben den Abfluss in Abhängigkeit von der Oberwasserenergiehöhe und von der Anzahl der Keys. In Tullis et al. (1995) werden allgemeingültige Gleichungen vorgestellt, womit der Abflussbeiwert C_d für vollkommenen Überfall in Abhängigkeit von der Oberwasserenergiehöhe bestimmt werden kann. Crookston (2010) erweiterte diese Betrachtung und entwickelte eine Gleichung, mit welcher der Abflussbeiwert für trapezförmige Labyrinth-Wehre in Abhängigkeit vom Seitenwandwinkel und von der Oberwasserenergiehöhe bestimmt werden kann. Anderson und Tullis (2012) vergleichen die Leistungsfähigkeit des Labyrinth-Wehrs mit der des Piano-Key-Wehrs und zeigen, dass das Piano-Key-Wehr eine geringfügig größere hydraulische Leistungsfähigkeit aufweist.

Untersuchungen zu rückgestautem Abfluss werden in Tullis et al. (2007) vorgestellt. Ein Überblick über die hydraulische Bemessung, die Belüftung und die Eisabfuhr ist in Falvey (2003) zu finden. Erpicum et al. (2011), Erpicum et al. (2013) und Erpicum et al. (2017) enthalten Ergebnisse einer Vielzahl von neueren Untersuchungen zu Labyrinth- und Piano-Key-Wehren.

Gebhardt et al. (2018) führten Laborversuche durch und zeigten, dass Sedimenttransport über Labyrinth-Wehre möglich ist. Die bisherige Forschung der BAW im Hinblick auf Labyrinth- und Piano-Key-Wehre ist in Belzner et al. (2017) zusammengefasst.

4 Hydraulische Untersuchung

Da Labyrinth-Wehre bisher an Bundeswasserstraßen in Deutschland noch nicht eingesetzt wurden, war es wichtig, zunächst die hydraulischen Grundlagen zu erarbeiten. Neben der Recherche und Zusammenstellung bisheriger Ergebnisse erfolgten eigene Untersuchungen an einem gegenständlichen Modell. Dabei wurden Laborversuche zur hydraulischen Leistungsfähigkeit bei freiem und rückgestautem Abfluss, zur Energieumwandlung und zur Tosbeckenbemessung (siehe Beitrag von Pfrommer et al. „Energiedissipation im Unterwasser von Labyrinth-Wehren“ in diesem Heft) durchgeführt.

4.1 Labormodell

Für die gegenständlichen Modelluntersuchungen stand im Labor der BAW eine Rinne mit einer Breite von 1,25 m, einer Länge von 15,00 m und einer Höhe von 0,60 m zur Verfügung (Bild 4). Die Wasserspiegel wurden auf der Längsachse der Rinne in Abständen zwischen 1,50 m und 2,00 m mit Ultraschall-Wasserspiegelmesssonden gemessen, die über kommunizierende Röhren mit der Rinne verbunden waren. Die Messgenauigkeit dieser Messsonden lag bei $\pm 0,1$ mm. Der maximal mögliche Abfluss der Laborrinne lag bei $0,375 \text{ m}^3/\text{s}$.

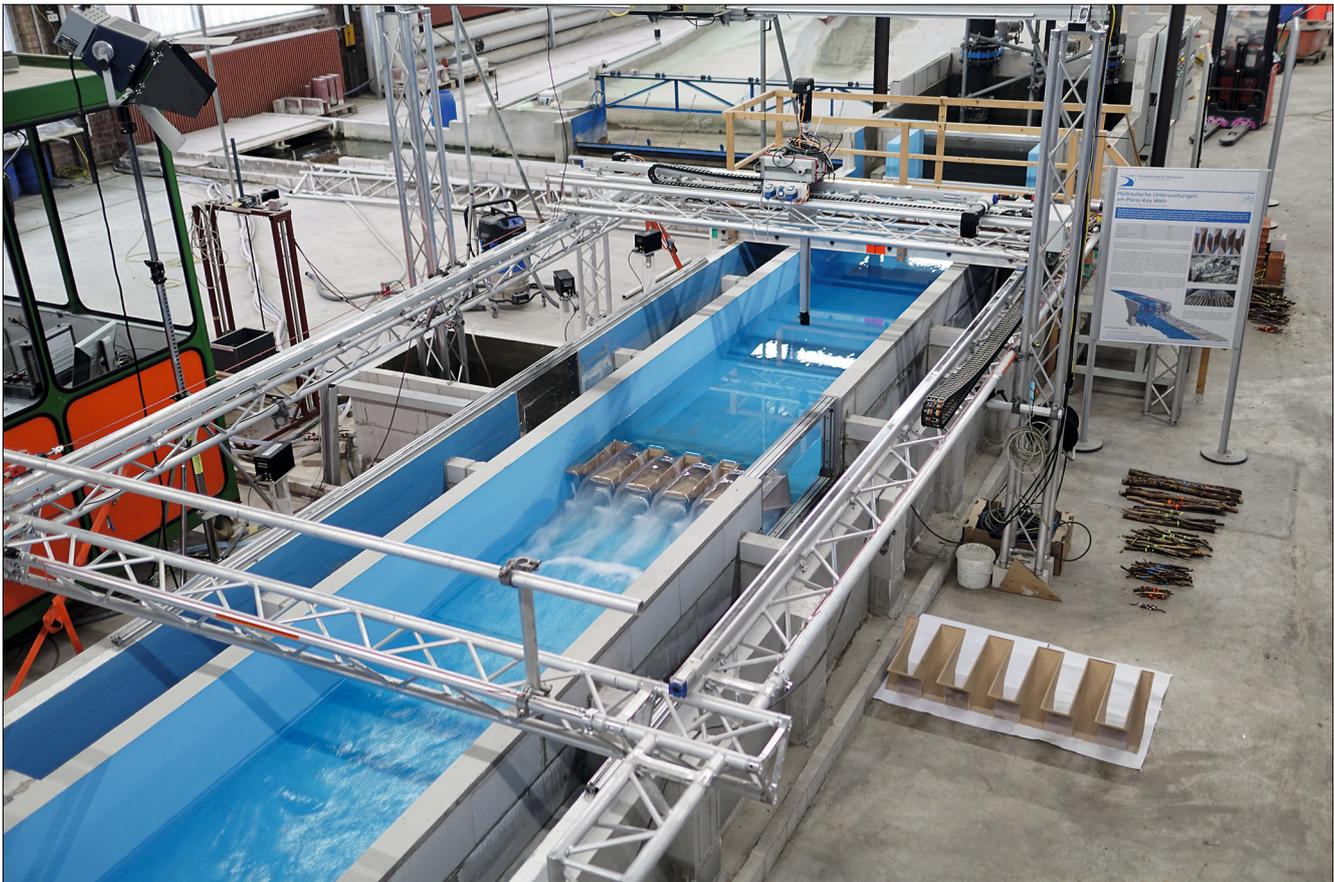


Bild 4: Labyrinth- und Piano-Key-Wehr-Versuchsstand im Labor der BAW (Belzner et al. 2016)

Für Versuche mit höheren spezifischen Abflüssen wurde eine zweite Rinne mit einer Länge von 18,00 m, einer Breite von 0,60 m und einer Höhe von 1,20 m genutzt. Hier wurde die Messung der Wasserspiegel manuell mit Spitzentastern durchgeführt.

Der Zufluss wurde in beiden Rinnen mit elektrisch verstellbaren Rohrleitungsschiebern und einer magnetisch induktiven Durchflussmessung automatisiert geregelt. Der Unterwasserstand wurde jeweils mit einer elektrisch verstellbaren Klappe am unterwasserseitigen Ende der Rinnen eingestellt. Der Oberwasserstand h_u [m] wurde 2,58 m oberstrom der Vorderkante und der Unterwasserstand h_u [m] 5,34 m unterstrom der Vorderkante des Wehrs gemessen.

4.2 Untersuchte Zustände und Geometrien

In der 1,25 m breiten Rinne wurden drei verschiedene Labyrinth-Wehre mit einem konstanten Verhältnis von Kronenlänge zur lichten Weite ($L/W = 5$) und einer kon-

stanten Wehrhöhe ($P = 0,253$ m) untersucht: Rechteckförmig, dreieckförmig ($\alpha = 11,54^\circ$) und trapezförmig ($\alpha = 8,32^\circ$). Um bei vorgegebener lichter Weite die Abwicklungslänge konstant halten zu können, betrug die Tiefe B beim dreieckförmigen Labyrinth-Wehr 0,62 m und beim trapezförmigen 0,59 m. Weiterhin wurden dieselben Breiten für die Inlet- und Outlet-Keys gewählt, um die geometrischen Einflussparameter zu reduzieren. Vorhandene Untersuchungen zum Einfluss der Kronenform auf die Leistungsfähigkeit am Piano-Key-Wehr (Cicero und Delisle 2013) haben gezeigt, dass die größte Leistungsfähigkeit erzielt werden kann, wenn die Überfallkante der vertikalen Wände viertel- oder halbkreisförmig ist. Diese Ergebnisse können auf das Labyrinth-Wehr übertragen werden, sodass eine ausgerundete Wehrkronen gewählt wurde. Die Dicke der Seitenwände betrug $T_s = 0,01$ m.

Die Abflüsse zwischen $0,025$ m³/s und $0,375$ m³/s wurden in Schritten von $0,025$ m³/s variiert. Für Versuche mit vollkommenem Überfall wurde der Unterwasserstand durch Ablegen der unterwasserseitigen Auslaufklappe

minimiert. Für Versuche mit rückgestautem Abfluss wurde der Unterwasserstand in Schritten von 0,05 m zwischen 0,20 m und 0,50 m variiert.

In der 0,60 m breiten Rinne wurden Versuche mit rechteckförmigen Labyrinth-Wehren mit Höhen von $P = 0,11$ m, $P = 0,16$ m, $P = 0,21$ m und $P = 0,26$ m durchgeführt. Für Versuche mit vollkommenem Überfall wurde der Unterwasserstand ebenfalls durch Ablegen der unterwasserseitigen Auslaufklappe minimiert und für Versuche mit rückgestautem Abfluss in Schritten von 0,05 m zwischen 0,20 m und 0,50 m variiert.

4.3 Freier Abfluss

In Bild 5 bis Bild 12 sind verschiedene Abflusszustände am trapezförmigen Labyrinth-Wehr bei freiem Abfluss dargestellt. Die Fotos wurden an der in Bild 4 dargestellten Versuchsrinne aufgenommen. Beim kleinsten

untersuchten Abfluss von 25 l/s (Bild 5) ist die gesamte Kronenlänge abflusswirksam und die Überfallstrahlen legen sich an die Struktur an. Zum Vergleich: Beim dreieckförmigen Labyrinth-Wehr fallen die unterwasserseitigen Spitzen bei kleinen Abflüssen trocken, was zu einer Reduktion der hydraulisch wirksamen Kronenlänge und damit der Leistungsfähigkeit führt. Beim Abfluss von 50 l/s herrscht bezüglich der Form des Überfallstrahls ein indifferenter Zustand. Der Strahl löst sich bereichsweise von der Struktur ab. Im Labor kann der Strahl durch kurzfristige händische Belüftung im gesamten Bereich der Krone abgelöst werden. Ein Wiederanlegen des Strahls an die Struktur erfolgt jedoch, wenn überhaupt, nur sehr langsam. Generell sind die Überfallhöhen für Abflüsse ≤ 50 l/s sehr gering, sodass die Form des Überfallstrahls hier durch Oberflächenspannungseffekte beeinflusst sein kann. Beim Abfluss von 75 l/s (Bild 7) hat sich der Überfallstrahl stabil von der Struktur abgelöst. In der Draufsicht ist zu erkennen, dass sich die Strahlen auf etwa 2/3 der Länge der Outlet-Keys berühren. Im vor-



Bild 5: $Q = 25$ l/s, $H_u/P = 0,08$



Bild 6: $Q = 50$ l/s, $H_u/P = 0,11$

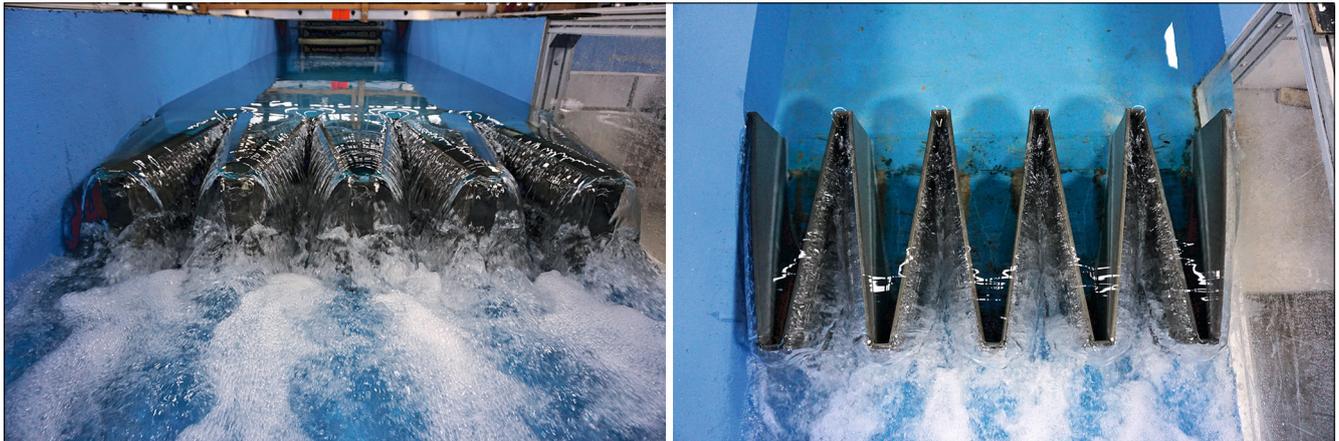


Bild 7: $Q = 75 \text{ l/s}$, $H_u/P = 0,15$

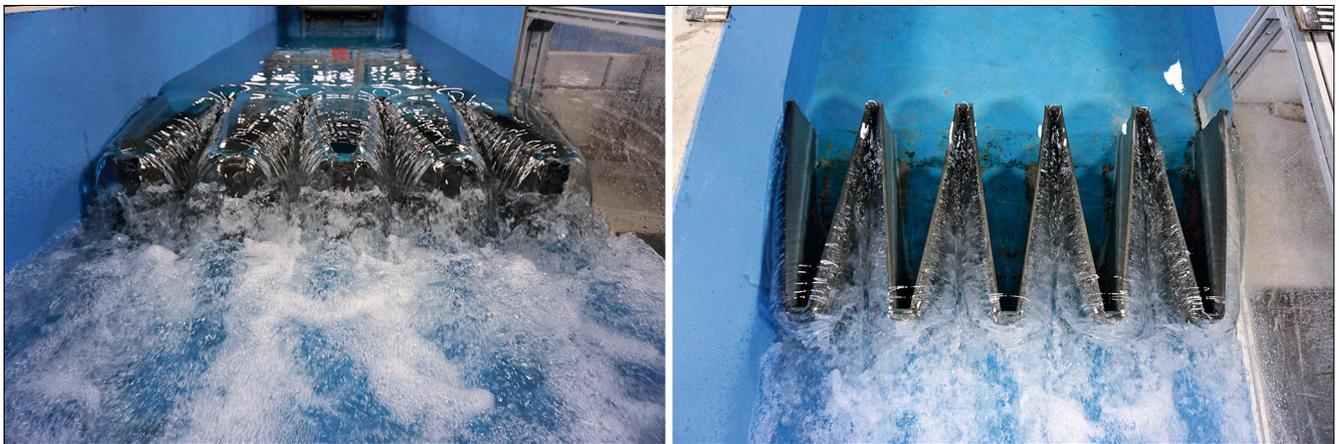


Bild 8: $Q = 100 \text{ l/s}$, $H_u/P = 0,19$



Bild 9: $Q = 125 \text{ l/s}$, $H_u/P = 0,24$

deren Bereich der Outlet-Keys sind bereits die in Crookston (2010) beschriebenen lokalen Interferenzeffekte sichtbar, die zu einer Erhöhung des Unterwasserstands in diesem Bereich führen. Mit steigendem Abfluss nimmt die gegenseitige Beeinflussung der Überfallstrahlen weiter zu. Bei 150 l/s (Bild 10) kommt es zu einer Berührung der Strahlen über die gesamte Länge.

Aus den Versuchsergebnissen wurden die Energiehöhen im Oberwasser H_u für freien Abfluss und der spezifische Abfluss q [m^2/s] pro Meter Gerinnebreite berechnet. In Bild 13 ist der spezifische Abfluss über die Energiehöhe aufgetragen. Der Vergleich der drei untersuchten Geometrien zeigt, dass das dreieckförmige und das rechteckförmige Labyrinth-Wehr bei gleicher Oberwasserenergiehöhe

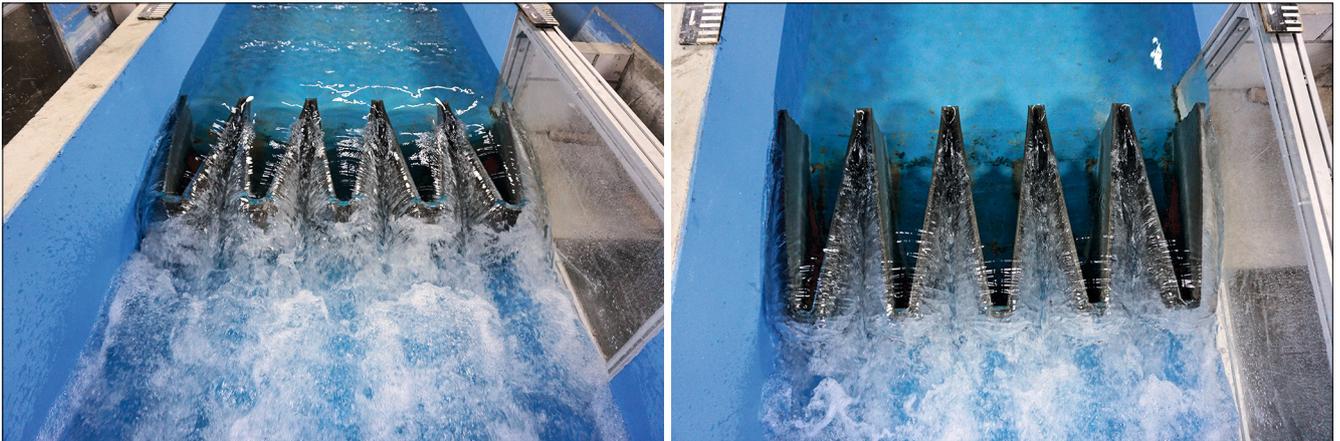


Bild 10: $Q = 150 \text{ l/s}$, $H_u/P = 0,28$

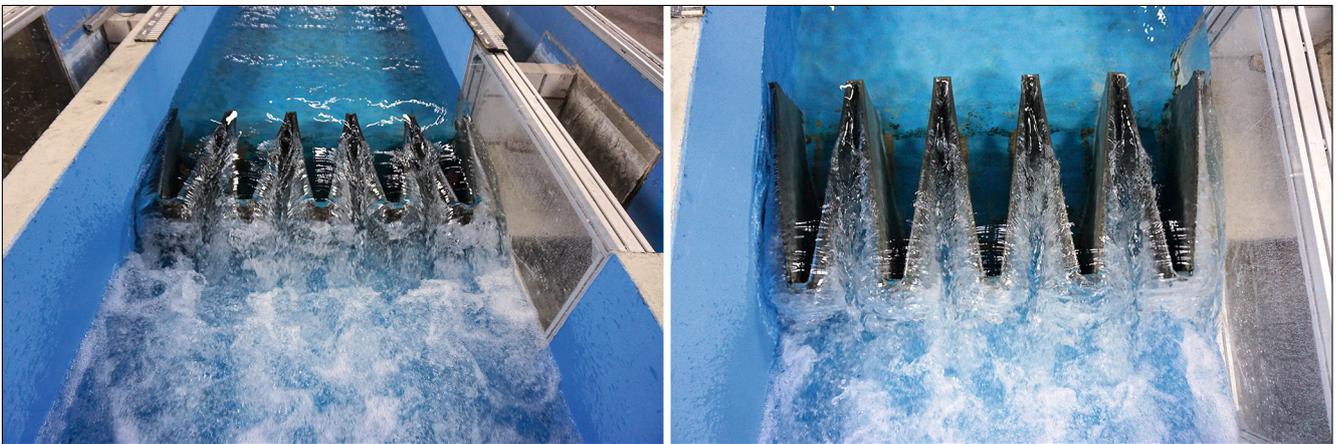


Bild 11: $Q = 175 \text{ l/s}$, $H_u/P = 0,33$



Bild 12: $Q = 200 \text{ l/s}$, $H_u/P = 0,37$

etwa die gleiche Abflussleistung aufweisen. Die Abflussleistung des trapezförmigen Labyrinth-Wehrs ist für kleine Energiehöhen vergleichbar und liegt für größere Energiehöhen über denen der beiden anderen Geometrien.

In Bild 13 sind Ergebnisse vergleichbarer Versuche für ein trapezförmiges (Crookston 2010) und für ein rechteck-

förmiges Labyrinth-Wehr (Anderson und Tullis 2012) gegenübergestellt. Im Vergleich ermittelten Anderson und Tullis (2012) einen geringfügig höheren Abfluss für Oberwasserenergiehöhen im Bereich $0,05 \text{ m} < H_u < 0,15 \text{ m}$. In der Draufsicht ist das Modell von Anderson und Tullis (2012) mit dem der BAW vergleichbar. Die Wehrhöhe ist jedoch um etwa $0,05 \text{ m}$ geringer. Neben den

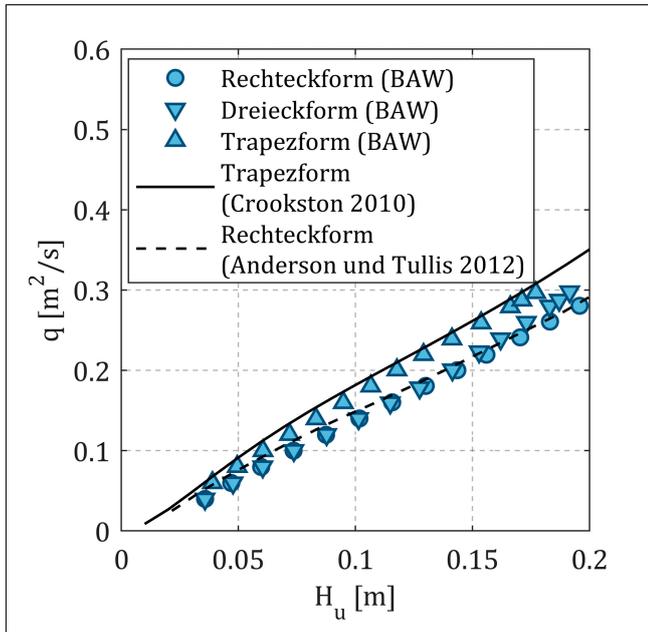


Bild 13: Versuchsergebnisse im Vergleich mit den Ergebnissen von Crookston (2010) und Anderson und Tullis (2012): Dimensionsbehaftete Darstellung

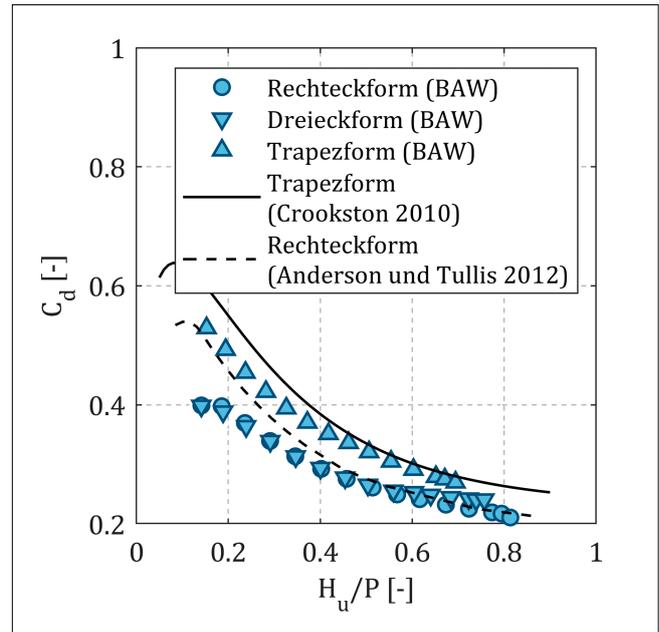


Bild 14: Versuchsergebnisse im Vergleich mit den Ergebnissen von Crookston (2010) und Anderson und Tullis (2012): Dimensionslose Darstellung

geometrischen Einflüssen kann der Grund für die Abweichung in der Messmethodik selbst liegen, z. B. in der Lage der Messstellen. Die Versuche von Crookston (2010) zeigen eine geringfügig höhere Abflussleistung als die eigenen Untersuchungen. Insgesamt zeigt sich jedoch eine gute Übereinstimmung.

Bild 14 zeigt eine dimensionslose Darstellung der Versuchsergebnisse der BAW im Vergleich mit Crookston (2010) und Anderson und Tullis (2012). Aus den Messergebnissen wurde mit Hilfe von Gleichung (1) der Abflussbeiwert C_d bestimmt und über das Verhältnis von Oberwasserenergiehöhe zu Wehrhöhe H_u/P dargestellt. Die Abweichungen zwischen den drei Untersuchungen können auch anhand von Gleichung (1) erklärt werden. Da die Energiehöhe H_u mit dem Exponenten $3/2$ überproportional berücksichtigt wird, steigt insbesondere bei kleinen Abflüssen der Einfluss kleinerer Abweichungen bei der Messung der Überfallhöhe und der daraus berechneten Energiehöhe auf den Abflussbeiwert C_d .

Die Ergebnisse der Versuche mit dem trapezförmigen Labyrinth-Wehr in der 60 cm breiten Rinne sind in Bild 15 in dimensionsloser Form dargestellt. Der Abflussbeiwert $C_{d,LW}$ [-] wurde hier bezogen auf die zur Verfügung stehende lichte Weite bestimmt. Aufgrund der höheren Abflussleistung der Rinne konnten Versuche mit

Oberwasserenergiehöhen bis $H_u/P \approx 4,5$ durchgeführt werden. Bild 15 zeigt, dass der Abflussbeiwert für die vier untersuchten Wehrhöhen $P = 0,11 \text{ m}$, $0,16 \text{ m}$, $0,21 \text{ m}$ und $0,26 \text{ m}$ bei sonst gleicher Geometrie nur von H_u/P abhängig ist. Der Abflussbeiwert ist für kleine Überfallhöhen groß und konvergiert für größere Überfallhöhen ($H_u/P > 3$) gegen den Wert, der von Hager und Schwalt (1994) für das breitkronige Wehr ermittelt wurde.

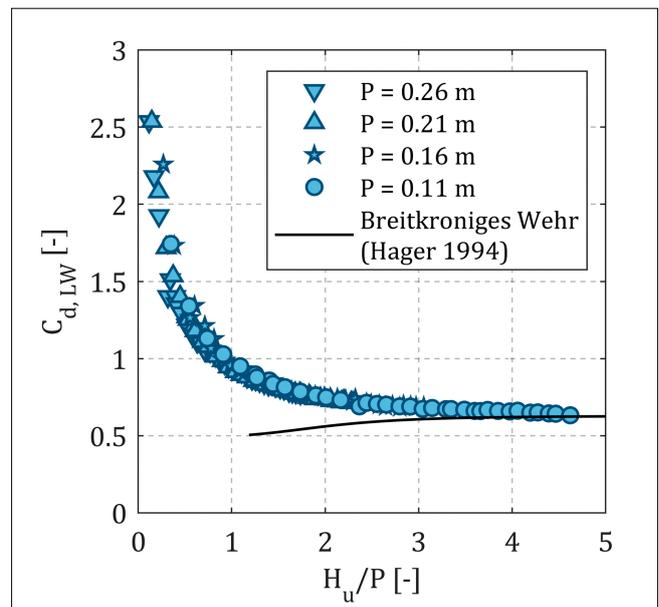


Bild 15: Dimensionslose Darstellung der Leistungsfähigkeit des rechteckförmigen Labyrinth-Wehrs

Crookston (2010) entwickelte basierend auf eigenen Laborversuchen eine empirische Gleichung, mit der der Abflussbeiwert für trapezförmige Labyrinth-Wehre in Abhängigkeit vom Seitenwandwinkel, der Wehrhöhe und der Oberwasserenergiehöhe für unbelüftete Verhältnisse bestimmt werden kann:

$$C_d = a \cdot \left(\frac{H_u}{P}\right)^b \cdot \left(\frac{H_u}{P}\right)^c + d \quad (2)$$

Gleichung (2) ist gültig im Bereich $0,05 < H_u/P < 1$, $w/P < 4$ und $L/W < 7,6$. Für eine grobe Abschätzung der Leistungsfähigkeit kann Gleichung (2) bis $H_u/P < 2,00$ genutzt werden (Crookston und Tullis 2013). Die Koeffizienten a, b, c und d ergeben sich in Abhängigkeit vom Seitenwandwinkel und sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Bild 16 zeigt eine grafische Auswertung von Gleichung (2) für verschiedene Seitenwandwinkel. Auf der horizontalen Achse ist das dimensionslose Verhältnis von Oberwasserenergiehöhe zur Wehrhöhe H_u/P und auf der vertikalen Achse der Abflussbeiwert C_d dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass der Abflussbeiwert mit größer werdendem Seitenwandwinkel steigt.

Für die Praxis bedeuten die Ergebnisse, dass ein größerer Seitenwandwinkel zwar zu einer größeren Leistungs-

α	a	b	c	d
6°	0,009447	-4,039	0,3955	0,1870
8°	0,017090	-3,497	0,4048	0,2286
10°	0,029900	-2,978	0,4107	0,2520
12°	0,030390	-3,102	0,4393	0,2912
15°	0,031600	-3,270	0,4849	0,3349
20°	0,033610	-3,500	0,5536	0,3923
35°	0,018550	-4,904	0,6697	0,5062

Tabelle 1: Koeffizienten zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Labyrinth-Wehren in Abhängigkeit vom Seitenwandwinkel nach Crookston und Tullis (2013)

fähigkeit pro laufendem Meter Wehrkrone führt, umgekehrt jedoch zur Folge hat, dass bei gegebener Gerinnebreite weniger Kronenlänge realisiert werden kann, was zu einer – absolut betrachtet – geringeren Leistungsfähigkeit der Anlage führt. Beide Effekte sind gegeneinander abzuwägen, in der Regel sind aber kleinere Seitenwandwinkel zu bevorzugen, da damit größere Kronenlängen erzielt werden können.

Bild 17 verdeutlicht diese Tendenz. Gleichung (2) wurde hier für ein bemessungspraktisches Beispiel dimensionsbehaftet ausgewertet. Zugrunde liegt ein trapezförmiges Labyrinth-Wehr mit einer lichten Weite von

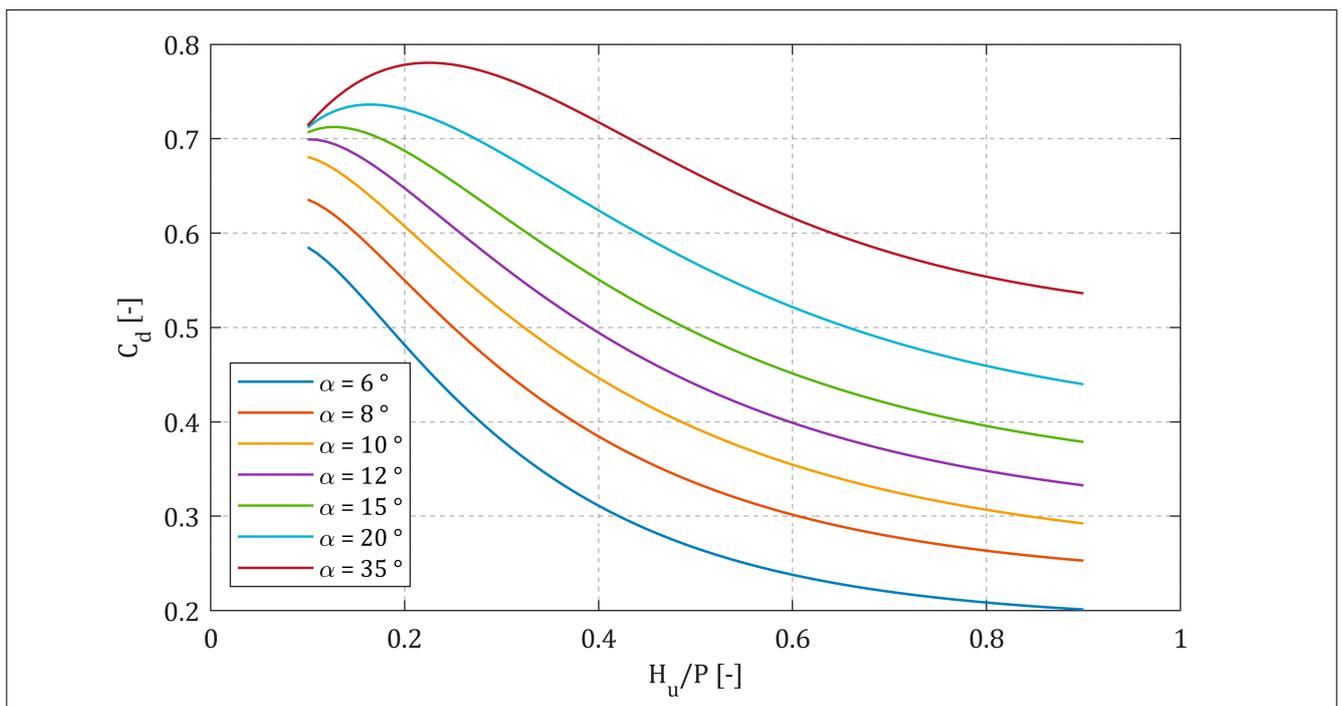


Bild 16: Abflussbeiwert für Labyrinth-Wehre verschiedener Seitenwandwinkel nach Crookston (2010)

$W = 30$ m (typische Wehrfelddbreite), einer Höhe von $P = 2$ m, einer Tiefe in Fließrichtung von $B = 4$ m und einer Breite der Front- und Rückwände von $D = 0,5$ m. Die Dicke der Seitenwände findet in Gleichung (2) keine Berücksichtigung. In Bild 17 ist der Abfluss Q in Abhängigkeit von der Überfallenergiehöhe H_u (x-Achse) und vom Seitenwandwinkel α dargestellt. Es wird deutlich, dass mit abnehmendem Seitenwandwinkel mehr Abfluss bei gleicher Oberwasserenergiehöhe abgeführt werden kann. Zum Vergleich: Bei einer Energiehöhe von $H_u = 0,45$ m kann über ein Labyrinth-Wehr mit einem Seitenwandwinkel von $\alpha = 35^\circ$ ein Abfluss von $Q = 40$ m³/s abgeführt werden, während mit einem Seitenwandwinkel von $\alpha = 8^\circ$ etwa der doppelte Abfluss ($Q = 80$ m³/s) abgeführt werden kann. Obwohl der Abflussbeiwert des „spitzeren“ Labyrinth-Wehrs ($\alpha = 8^\circ$) bei $H_u/P = 0,23$ nur etwa 60 % des Abflussbeiwerts des „stumpferen“ Labyrinth-Wehrs beträgt, kann über das „spitzere“ Labyrinth-Wehr aufgrund seiner doppelten Kronenlänge etwa der doppelte Abfluss abgeführt werden. Bemessungspraktisch muss jedoch berücksichtigt werden, dass kleine Seitenwandwinkel zu sehr schmalen Keys führen können. Typische Seitenwandwinkel liegen zwischen 8° und 12° .

4.4 Rückgestauter Abfluss

Bei einem Wehr treten in der Regel ab einem bestimmten Unterwasserstand Rückstaueffekte auf, die zu einer Verminderung der hydraulischen Leistungsfähigkeit führen. Bei konstantem Abfluss beginnt der Oberwasserstand mit steigendem Unterwasserstand zu steigen und ist damit eine Funktion vom Abflussbeiwert C_d , dem Abfluss Q und der Unterwasserenergiehöhe H_d [m] (vgl. Bild 2). Bei sehr hohen Unterwasserständen verliert das Wehr zunehmend seine Funktion als Kontrollbauwerk und der Oberwasserstand entspricht nahezu dem Unterwasserstand.

Cicero und Delisle (2013) beschreiben den Rückstau einfluss für das Piano-Key-Wehr mit einer impliziten Gleichung und bestimmen den Grenzeinstau (Modular Limit). Für das dreieckförmige Labyrinth-Wehr konnte dieser Zusammenhang durch eigene Untersuchungen bestätigt werden (Belzner et al. 2016). Beide Untersuchungen zeigen, dass sich der Rückstau einfluss ab etwa $H_d \approx 0,5 H_u$ bemerkbar macht. Eigene Untersuchungen zeigen aber auch, dass die Methodik von Cicero und Delisle (2013) nicht auf das trapezförmige und rechteckförmige

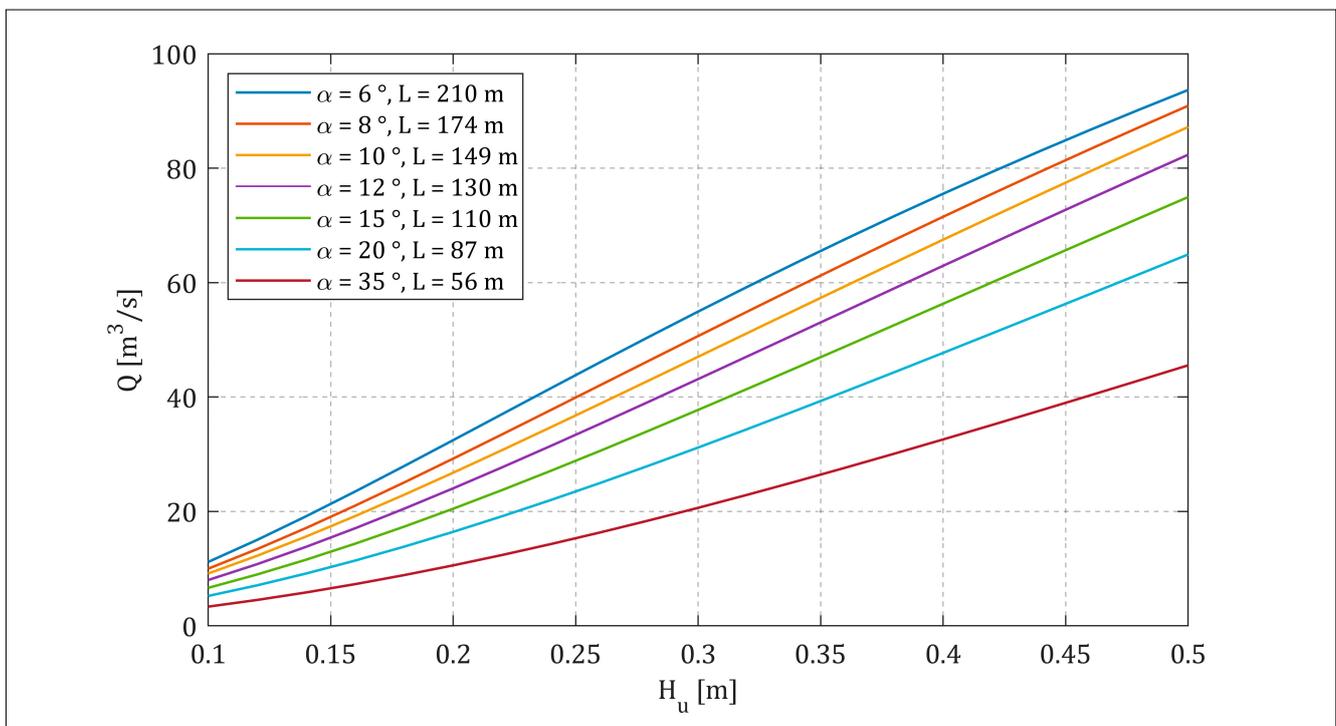


Bild 17: Abfluss in Abhängigkeit vom Seitenwandwinkel und von der Oberwasserenergiehöhe für ein trapezförmiges Labyrinth-Wehr mit einer lichten Weite von $W = 30$ m, einer Höhe von $P = 2$ m, einer Tiefe in Fließrichtung von $B = 4$ m und einer Breite der Front- und Rückwände von $D = 0,50$ m

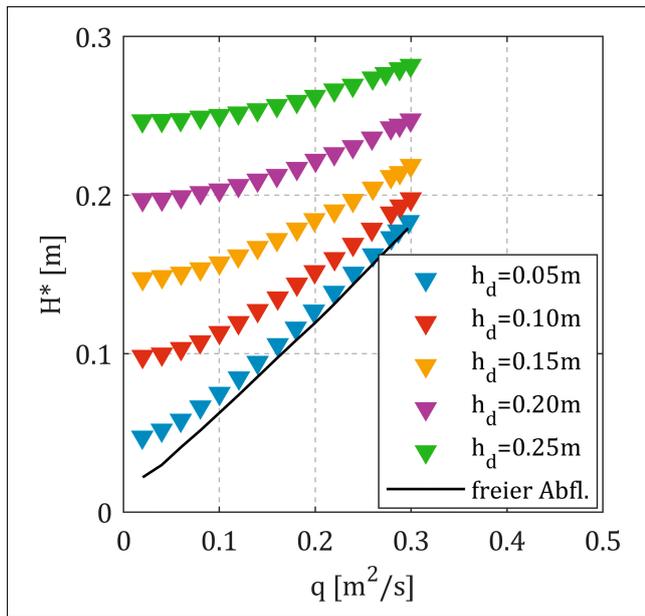


Bild 18: Untersuchungsergebnisse der BAW für rückstaubeeinflussten Abfluss am trapezförmigen Labyrinth-Wehr ($P = 0,253 \text{ m}$)

Labyrinth-Wehr übertragen werden kann, da eine Abhängigkeit vom Eintaugrad h_d/P zu beobachten ist, insbesondere für das rechteckförmige Labyrinth-Wehr (Belzner et al. 2017). Crookston und Tullis (2012) beschreiben lokale Rückstauereffekte, die sich durch die Interaktion gegenüberliegender Überfallstrahlen ergeben und dadurch die hydraulische Leistungsfähigkeit reduzieren. Dieser Effekt könnte erklären, warum der Rückstau einfluss am rechteckförmigen und trapezförmigen Labyrinth-Wehr nicht mit dem Ansatz von Cicero und Delisle (2013) beschrieben werden kann.

Bild 18 zeigt die Untersuchungsergebnisse für das trapezförmige Labyrinth-Wehr. Aufgetragen ist die Oberwasserenergiehöhe H^* in Abhängigkeit vom spezifischen Abfluss q und vom Unterwasserstand h_d , gemessen über der Wehrkrone. Die sich für $h_d = 0$ ergebende Oberwasserenergiehöhe entspricht der Energiehöhe bei freiem Abfluss H_u (schwarze Linie). Mit steigendem Unterwasserstand h_d und steigendem spezifischem Abfluss q steigt die Oberwasserenergiehöhe ebenfalls an. Für große Abflüsse nähert sich H^* asymptotisch H_u an. Für kleine Abflüsse entspricht die Oberwasserenergiehöhe H^* etwa der Summe aus Wehrhöhe P und dem Unterwasserstand über dem Wehr h_d .

Villemonte (1947) beschreibt den Rückstau einfluss bei einem scharfkantigen Wehr mit einer semiempirischen

Gleichung. Tullis et al. (2007) zeigen am Beispiel von Labyrinth-Wehren mit Seitenwandwinkeln von $\alpha = 7^\circ, 8^\circ$ und 20° , dass der Rückstau einfluss bei Labyrinth-Wehren mit dem Ansatz von Villemonte (1947) überschätzt wird. Sie entwickelten eine eigene empirische Gleichung, mit der der Rückstau einfluss für Seitenwandwinkel zwischen 7° und 20° in Abhängigkeit von H_d/H_u beschrieben werden kann:

$$\frac{H^*}{H_u} = 0,0332 \cdot \left(\frac{H_d}{H_u}\right)^4 + 0,2008 \cdot \left(\frac{H_d}{H_u}\right)^2 + 1, \text{ für } 0 \leq \frac{H_d}{H_u} \leq 1,53 \quad (3)$$

$$\frac{H^*}{H_u} = 0,9379 \cdot \left(\frac{H_d}{H_u}\right) + 0,2174, \text{ für } 1,53 < \frac{H_d}{H_u} \leq 3,5 \quad (4)$$

$$H^* = H_d, \text{ für } 3,5 < \frac{H_d}{H_u} \quad (5)$$

In Bild 19 sind die eigenen Messergebnisse im Vergleich zu Tullis et al. (2007) dargestellt. Dabei ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit einer durchschnittlichen Abweichung von 2,1 % gegenüber den Gleichungen (3), (4) und (5). Dieser Vergleich macht deutlich, dass die Gleichungen aus Tullis et al. (2007) gut für die Bemessung von Labyrinth-Wehren mit Rückstau einfluss, wie er häufig bei Wehranlagen an Bundeswasserstraßen zu finden ist, verwendet werden können.

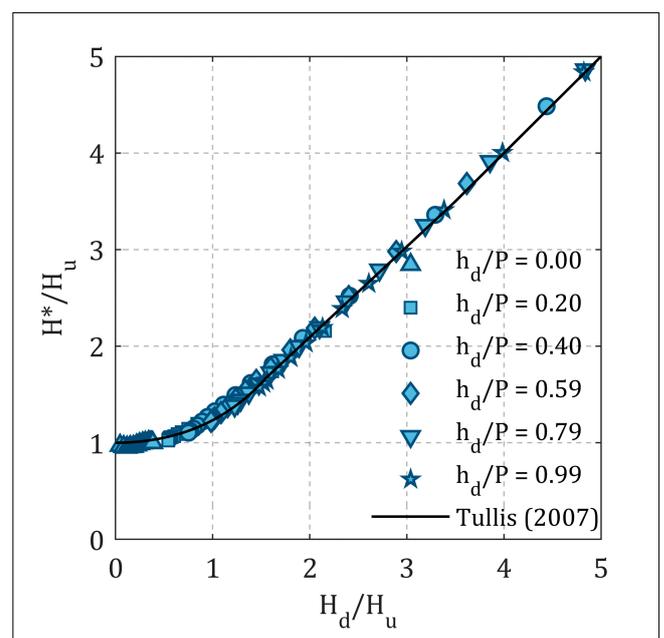


Bild 19: Rückstau einfluss beim trapezförmigen Labyrinth-Wehr

5 Hydraulische Bemessung

Wie die Ergebnisse zeigen, weist das trapezförmige Labyrinth-Wehr unter den drei untersuchten Geometrien die größte Leistungsfähigkeit auf (Bild 14). Der Vergleich mit den Ergebnissen aus Crookston und Tullis (2013) zeigt eine gute Übereinstimmung, sodass für die Bemessung Gleichung (2) genutzt werden kann. Diese ermöglicht die iterative Bestimmung des Abflussbeiwerts C_d für freien Abfluss in Abhängigkeit von der Geometrie und vom Abfluss.

Aus der Oberwasserenergiehöhe für freien Abfluss H_u und der bekannten Unterwasserenergiehöhe H_d kann mit den Gleichungen (3), (4) und (5) die Energiehöhe im Oberwasser H^* für rückgestauten Abfluss bestimmt werden.

In Bild 20 ist die Vorgehensweise zur Abschätzung des Oberwasserstands schematisch dargestellt. Bei bekannter Geometrie und bekanntem Abfluss Q wird zunächst ein Abflussbeiwert C_d geschätzt. Hieraus wird die Oberwasserenergiehöhe H_u bestimmt. C_d und H_u werden iterativ so lange verbessert, bis der Zusammenhang zwischen H_u/P und C_d nach Bild 16 bzw. Gleichung (2) gilt.

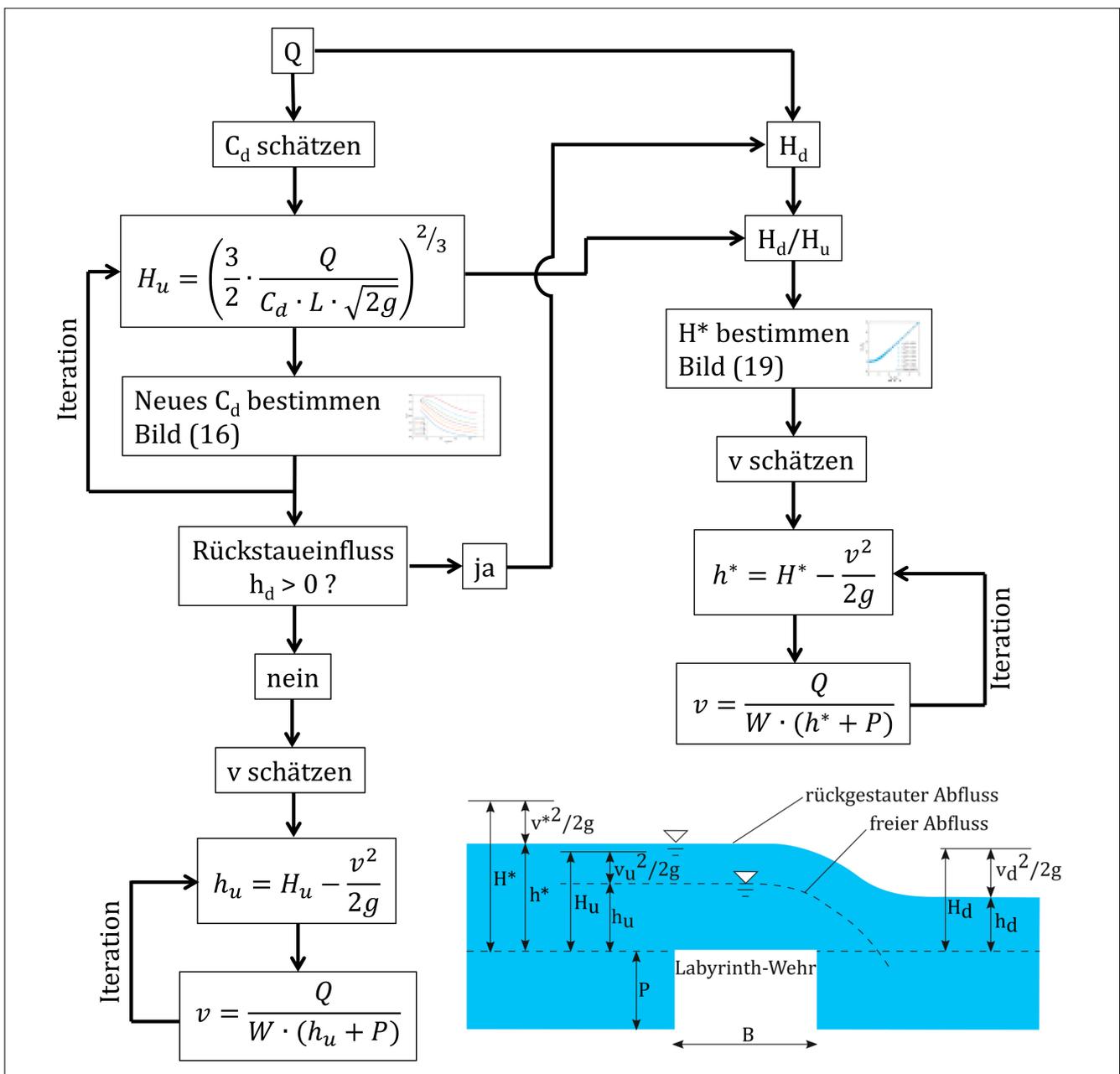


Bild 20: Schema zur Bestimmung des Oberwasserstandes für trapezförmige Labyrinth-Wehre

Rückstau einfluss kann vorliegen, wenn $h_d > 0$ ist. In diesem Fall kann die Oberwasserenergiehöhe H^* direkt aus den Gleichungen (3), (4) und (5) oder Bild 19 bestimmt werden. Der Oberwasserstand ist aus H_u bzw. H^* iterativ zu bestimmen.

6 Anwendungsbeispiel: Lake Townsend Dam (USA)

Die Wasserversorgung der Stadt Greensboro in North Carolina (USA) mit etwa 250.000 Einwohnern wird zu 70 % über den Lake Townsend sichergestellt. Der Stausee hat eine Fläche von $6,6 \text{ km}^2$ und ein Volumen von etwa $24.000.000 \text{ m}^3$. Der im Jahr 1967 in Betrieb genommene Staudamm verfügte über zehn Hubschütze, einerseits zur Regulierung des Oberwasserstands und andererseits zur Hochwasserabfuhr. Gemäß der Klassifikation des Bundesstaates North Carolina ist die Hochwasserentlastungsanlage des Stausees für drei Viertel der wahrscheinlichen maximalen Niederschlagsmenge (PMP) zu

bemessen (Cannon et al. 2010). Untersuchungen aus den 1980er-Jahren ergaben jedoch Niederschlagsmengen, welche die Leistungsfähigkeit der Hochwasserentlastungsanlage überschritten. Weiterhin traten innerhalb der letzten 25 Jahre immer wieder Schäden am Staudamm auf. Im Jahr 2005 wurden erhebliche Risse durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion festgestellt. Vertiefte Untersuchungen ergaben, dass eine langfristige Sanierung des Staudamms nicht möglich ist. Daher wurde ein Neubau empfohlen.

Die Stadt Greensboro entschied sich für ein Labyrinth-Wehr, da es im Hinblick auf den Betrieb und die Unterhaltung die kostengünstigste Variante war. Da der Abfluss aus dem Lake Townsend rückstau beeinflusst sein kann, erwies sich dieser Wehrtyp insbesondere bei höheren Abflüssen als vorteilhaft. Die Höhe des Labyrinth-Wehrs (Bild 21) beträgt etwa $P = 6 \text{ m}$, die lichte Weite etwa 90 m und die Tiefe 25 m . Das Wehr besteht aus sieben Einheiten. Der Seitenwandwinkel beträgt $\alpha = 11,4^\circ$. Neben dem Labyrinth-Wehr wurde ein schmales Tafelschütz vorgesehen, um den Wasserspiegel im See bei Bedarf absenken zu können.



Bild 21: Labyrinth-Wehr am Lake Townsend in North Carolina (USA) (Quelle: Schnabel Engineering 2019)



Bild 22: Aufnahmen aus der Bauzeit des Labyrinth-Wehrs am Lake Townsend (Quelle: Brian Crookston, Utah State University)

Da der Stausee die Hauptwasserversorgung der Stadt Greensboro darstellt, durfte der See während der Bauzeit nicht abgesenkt werden. Das Labyrinth-Wehr wurde daher im Unterwasser des Staudamms errichtet. Um während der Bauzeit den Wasserspiegel weiterhin regulieren und kleinere Hochwasserabflüsse abführen zu können, wurden die Kanäle der seitlichen Hochwasserüberläufe um die Baustelle herumgeführt. Bild 22 zeigt Aufnahmen aus der Bauzeit. Die beiden oberen Abbildungen zeigen das teilweise fertiggestellte Labyrinth-Wehr. Die Betonage wurde in horizontalen und vertikalen Betonierabschnitten durchgeführt. Links unten ist die Bewehrung einer Seitenwand zu sehen. Rechts unten ist der trockene Bereich unterhalb des alten Staudamms abgebildet.

Insgesamt wurden etwa 10.000 m^3 Beton verbaut. Um Risse durch Alkali-Kieselsäure-Reaktionen zu vermeiden, wurde eine Betonrezeptur genutzt, die zu gleichen

Anteilen Zement und Flugasche enthielt. Die Gesamtkosten für die Errichtung des Labyrinth-Wehrs lagen bei etwa 16 Mio. US-Dollar.

Für das Beispiel des Lake Townsend wurde mit dem in Bild 20 dargestellten Bemessungsschema die Überfallhöhe in Abhängigkeit vom Abfluss bestimmt. Die Eingangsdaten wurden teilweise aus Cannon et al. (2010) entnommen (lichte Weite, Höhe, Seitenwandwinkel und Anzahl der Keys) oder aus den dort zur Verfügung stehenden Daten abgeleitet (Abwicklungslänge). Die Iterationsvorschrift wurde in einem Tabellenkalkulationsprogramm umgesetzt. Durchschnittlich sind drei bis vier Iterationsschritte notwendig, um eine ausreichende Genauigkeit zu erreichen. In Bild 23 sind die berechneten Überfallhöhen für diskrete Punkte innerhalb des Abflussspektrums über den Abfluss aufgetragen. Die berechneten Energiehöhen stimmten mit Cannon et al. (2010) nahezu überein.

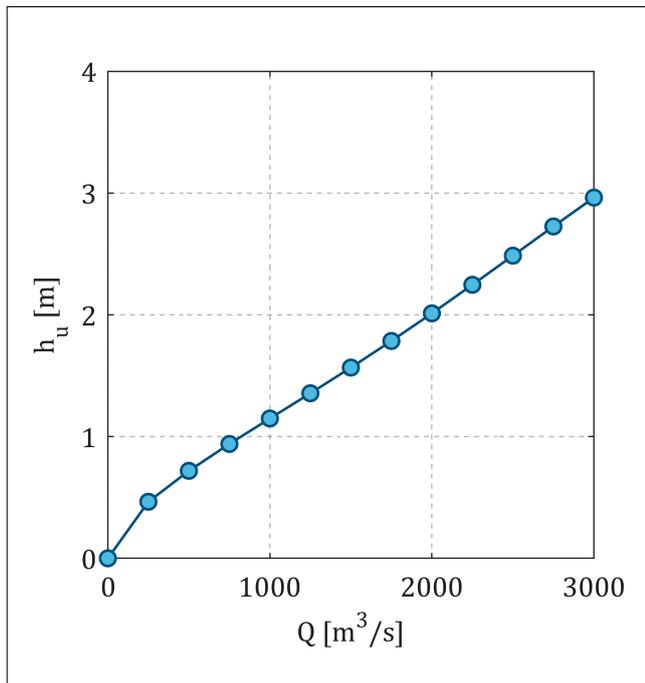


Bild 23: Überfallhöhe in Abhängigkeit vom Abfluss; ermittelt mit dem Bemessungsschema nach Bild 20 für das Beispiel des Lake Townsend Dam

7 Zusammenfassung

Das Labyrinth-Wehr ist ein gefaltetes festes Wehr, das aufgrund seiner Geometrie eine hohe Abflussleistung bei vergleichsweise geringer lichter Breite aufweist. Bei gleichem Oberwasserstand kann der Abfluss gegenüber einem linearen Wehr um das vier- bis sechsfache erhöht werden. Für steigende Überfallhöhen nimmt dieser Vorteil ab.

Im Labor der BAW wurden hydraulische Untersuchungen an einem gegenständlichen Modell mit verschiedenen Labyrinth-Wehr-Typen unter den für eine Bundeswasserstraße typischen Randbedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse konnten anhand der einschlägigen Literatur validiert werden. Es zeigte sich, dass unter den betrachteten Geometrien das trapezförmige Labyrinth-Wehr die größte Leistungsfähigkeit aufweist. Für die Praxis werden Gleichungen zur Abschätzung des zu erwartenden Oberwasserstands für freien und für rückgestauten Abfluss bereitgestellt. Mit Hilfe eines Bemessungsschemas kann der Planer eine Vorbemessung des festen Wehrtyps durchführen.

In der einschlägigen Literatur werden verschiedenen geometrische Einflussgrößen erwähnt, die die Leistungsfähigkeit des Labyrinth-Wehrs beeinflussen. Bei kleinen Überfallhöhen ist die Länge der Überfallkrone jedoch die maßgebende Einflussgröße. Bei der Bemessung ist auch zu berücksichtigen, dass die größten Überfallbeiwerte in Bezug auf die Abwicklungslänge zwar für große Seitenwandwinkel erzielt werden. Allerdings kann bei gegebener zur Verfügung stehender Fläche mit kleineren Seitenwandwinkeln eine größere Abwicklungslänge erzielt werden, was zu einer – absolut betrachtet – höheren Leistungsfähigkeit führt.

8 Literatur

Anderson, R. M.; Tullis, B. P. (2012): Comparison of Piano Key and Rectangular Labyrinth Weir Hydraulics. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 138 (4), S. 358–361. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000509.

Belzner, F.; Merkel, J.; Gebhardt, M.; Thorenz, C. (2017): Piano Key and Labyrinth Weirs at German waterways: Recent and future research of the BAW. In: Sébastien Ericpicum, Frédéric Laugier, Michel Ho Ta Khanh und Michael Pfister (Hg.): *Labyrinth and Piano Key Weirs III. PKW 2017*. Boca Raton: CRC Press, S. 167–174.

Belzner, F.; Merkel, J.; Pfrommer, U.; Gebhardt, M. (2015): Das Piano-Key-Wehr: Messungen an einem innovativen Verschluss für kleine Wasserstraßen. In: Technische Universität Dresden (Hg.): *Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer*, Bd. 53. *Dresdner Wasserbaukolloquium*. Dresden: Selbstverl. der Techn. Univ. (Wasserbauliche Mitteilungen, 53), S. 99–107.

Belzner, F.; Merkel, J.; Pfrommer, U.; Gebhardt, M.; Thorenz, C. (2016): Piano-Key-Wehre und Labyrinth-Wehre unter den Randbedingungen einer Bundeswasserstraße. In: *Wasserwirtschaft* (5), S. 37–42.

Cannon, R.; Robblee, G.; Marshall, T.; Paxon, G.; King, M.; Williams, A. (2010): Replacing Lake Townsend Dam. In: *The Journal of Dam Safety* 8 (2), S. 6–15. Online verfügbar unter <https://www.greensboro-nc.gov/home/showdocument?id=3637>, zuletzt geprüft am 11.07.2019.

- Cicero, G. M.; Delisle, J. R. (2013): Discharge characteristics of Piano Key weirs und submerged flow. In: Sébastien Erpicum, Frédéric Laugier, Michael Pfister, Michel Piroton, Guy-Michel Cicero und Anton J. Schleiss (Hg.): Labyrinth and Piano Key Weirs II: CRC Press/Balkema, S. 101–109.
- Crookston, B. M.; Tullis, B. P. (2012): Labyrinth Weirs: Nappe Interference and Local Submergence. In: Journal of Irrigation and Drainage Engineering 138 (8), S. 757–765.
- Crookston, B. M.; Tullis, B. P. (2013): Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge Relationships. In: Journal of Irrigation and Drainage Engineering 139 (5), S. 363–370.
- Crookston, B. M. (2010): Labyrinth Weirs. Dissertation. Utah State University, Logan. Civil and Environmental Engineering, <https://digitalcommons.usu.edu/etd/802/>, zuletzt geprüft am: 21.01.2020.
- Erpicum, S.; Laugier, F.; Boillat, J.-L.; Piroton, M.; Reverchon, B.; Schleiss, A. J. (Hg.) (2011): Labyrinth and Piano Key Weirs. Boca Raton: CRC Press/Balkema.
- Erpicum, S.; Laugier, F.; Ho Ta Khanh, M.; Pfister, M. (Hg.) (2017): Labyrinth and Piano Key Weirs III. PKW 2017. Boca Raton: CRC Press.
- Erpicum, S.; Laugier, F.; Pfister, M.; Piroton, M.; Cicero, G.-M.; Schleiss, A. J. (Hg.) (2013): Labyrinth and Piano Key Weirs II: CRC Press/Balkema.
- Falvey, H. T. (2003): Hydraulic Design of Labyrinth Weirs. Reston, Va: ASCE Press (American Society of Civil Engineers).
- Gebhardt, M.; Herbst, J.; Merkel, J.; Belzner, F. (2018): Sedimentation at labyrinth weirs – an experimental study of the self-cleaning process. In: Journal of Hydraulic Research 90, S. 1–12. DOI: 10.1080/00221686.2018.1494053.
- Hager, W. H. (2010): Wastewater Hydraulics. Theory and Practice. 2nd ed. Berlin, London: Springer.
- Hager, W. H.; Schwalt, M. (1994): Broad-Crested Weir. In: J. Irrig. Drain Eng. 120 (1), S. 13–26. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1994)120:1(13).
- Pfrommer, J.; Gebhardt, M.; Belzner, F. (2019): Energie-dissipation im Unterwasser von Labyrinth-Wehren. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen 105. Feste Wehre an Bundeswasserstraßen. Karlsruhe, S. 75–84.
- Pralong, J.; Vermeulen, J.; Blancher, B.; Laugier, F.; Erpicum, S.; Machiels, O. et al. (2011): A naming convention for the Piano Key Weirs geometrical parameters. In: Sébastien Erpicum, Frédéric Laugier, Jean-Louis Boillat, Michel Piroton, Bernard Reverchon und Anton Schleiss (Hg.): Labyrinth and Piano Key Weirs. Boca Raton: CRC Press/Balkema, S. 271–278.
- Schleiss, A. J. (2011): Vom Labyrinth- zum Klaviertastenwehr. In: Robert Boes (Hg.): Festkolloquium WHH – Wasserbau, Hydraulik, Hydrologie. Zürich: Eigenverlag der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH Zürich. Online verfügbar unter <https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/2010-2019/217.pdf>, zuletzt geprüft am 02.07.2019.
- Schnabel Engineering (Hg.) (2019): Lake Townsend Dam. Online verfügbar unter <https://www.schnabel-eng.com/blog/project/lake-townsend-dam/>, zuletzt geprüft am 21.01.2020.
- Taylor, G. (1968): The performance of labyrinth weirs. Doctoral dissertation. University of Nottingham. Faculty of Applied Science. Online verfügbar unter <http://eprints.nottingham.ac.uk/12857/1/553842.pdf>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.
- Tullis, B. P.; Young, J. C.; Chandler, M. A. (2007): Head-Discharge Relationships for Submerged Labyrinth Weirs. In: J. Hydraul. Eng. 133 (3), S. 248–254. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:3(248).
- Tullis, J. P.; Amanian, N.; Waldron, D. (1995): Design of Labyrinth Spillways. In: J. Hydraul. Eng. 121 (3), S. 247–255. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:3(247).
- Villemonte, J. (1947): Submerged weir discharge studies. In: Eng. News-Rec 139 (26), S. 54–56.