

# Die Ermittlung von Überfallfunktionen für Hochwasserentlastungsanlagen unter Berücksichtigung neuester Erkenntnisse und Berechnungsmöglichkeiten

Detlef Aigner

Das Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik hat in den letzten Jahren für die Hochwasserentlastungsanlagen einiger Talsperren und Rückhaltebecken der Landestalsperrenverwaltung die Wasserstands-Abflussfunktionen überprüft. Dazu wurden die Anlagen analysiert, Abflussfunktionen aufgestellt, Abflussbeiwerte ermittelt und Rückstauberechnungen durchgeführt. Teile der Hochwasserentlastungsanlagen wurden in einem 3D-Simulationsprogramm modelliert und für ausgewählte Wasserstände berechnet. Diese numerische Simulation erlaubte eine Überprüfung der räumlichen Anströmung und von Rückstauwirkungen. Für einige Überfallformen erfolgte gleichzeitig der Vergleich an einem physikalischen Modell zur Überprüfung der Überfallbeiwerte. Die Analyse aller drei Formen der Modellierung lieferte verlässliche Wasserstands-Abflussfunktionen für die weitere Planung zur Rekonstruktion der Hochwasserentlastungsanlagen. Mit Hilfe von studentischen Arbeiten wurden Untersuchungen zum Einfluss der Rauigkeit auf den Überfallbeiwert durchgeführt und im Zusammenhang mit der Überströmung eines Wehres neue Erkenntnisse zur Berechnung der Unterwasserhältnisse gewonnen.

Stichworte: Überfall, Wehre, Abflussfunktion, Abflussbeiwert, Simulation

## 1 Einleitung

Die Hochwasserereignisse der letzten Jahre, beginnend beim Extremhochwasser 2002, veranlassten die Talsperrenbetreiber das Abflussvermögen der Hochwasserentlastungen ihrer Bauwerke zu überprüfen. Neben neuen hydrologischen Daten der Einzugsgebiete von Talsperren aus Messung oder Simulationen mit Niederschlags-Abflussmodellen ist eine Retentionsberechnung zur Bestimmung der Abflusskurven und der Festlegung neuer hydraulischer Bemessungsgrößen für die Überprüfung der Hochwasserentlastungen unerlässlich. Dazu braucht man allerdings verlässliche Wasserstands-Abflussbeziehungen. Diese existieren nicht oder sind nur aus der alten Planung dieser Anlagen bekannt, wo sie mit einfachen analytischen Ansätzen ermittelt wurden. Vorzufinden sind meist recht komplizierte Überfall- und Abflussbauwerke, die aus zusammengesetzten Konstruktionen mit horizontalen und vertikalen Richtungsänderungen und Ver-

gungen oder Erweiterungen bestehen. Da die Anlagen oft im Hangbereich der Dämme oder Mauern angeordnet sind, führen komplizierte Anströmbedingungen mit schrägem und ansteigendem Untergrund zu zusätzlichen Unsicherheiten bei der Berechnung.



**Abbildung 1** Beispiel eines Einlaufes einer Hochwasserentlastung mit einem rundkronigen Überfall, Scharte und anschließender Verengung durch zwei Durchlässen

## 2 Analyse

### 2.1 Analytische Überfallfunktion

Die analytische Bestimmung der Überfallfunktion bestand in einer Analyse der bisherigen Berechnungen und Annahmen, in einer Vor-Ort-Überprüfung der Geometrien und Oberflächenbeschaffenheit, in einer Zerlegung der Einflussgrößen für die Überfallfunktion und der Definition eines neuen Überfallbeiwertes unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse. Dabei wurde bewusst in Zulaufeinfluss, Konstruktion des Überfalles und seine Beschaffenheit sowie Rückstau einfluss unterschieden. Zur Anwendung kam die Überfallgleichung nach *Poleni* (Bollrich, 2013), hier beispielhaft für den Rechtecküberfall dargestellt:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} \quad (1)$$

Der Überfallbeiwert ergibt sich dabei aus den Beiwerten der einzelnen Einflussgrößen, insbesondere Zulauf, Form und Rückstau.

$$\mu = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \dots \cdot \mu_n \quad (2)$$

Bei einigen Hochwasserentlastungen mit kombinierten Überfällen war die Superposition unterschiedlicher Überfallfunktionen erforderlich.

## 2.2 Numerische Berechnungen

Die numerische Modellierung erfolgte mit möglichst einfachen Modellen in der Regel in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurde die reine Überfallkonstruktion mit größerem Bereich der Zuströmung modelliert und im zweiten die anschließende Ableitungskonstruktionen zur Überprüfung von Rückstauwirkungen. Manchmal wurden beide Schritte in einem vereint. Für die Modellierung der Überfälle wurde das Programm ANSYS-CFX ([www.ansys.com](http://www.ansys.com), USA) verwendet und die Modellierung der anschließenden Bauwerke erfolgte mit flow3D ([www.flow3D.com](http://www.flow3D.com), USA). In einigen Fällen wurde nur mit einem Programm gerechnet.

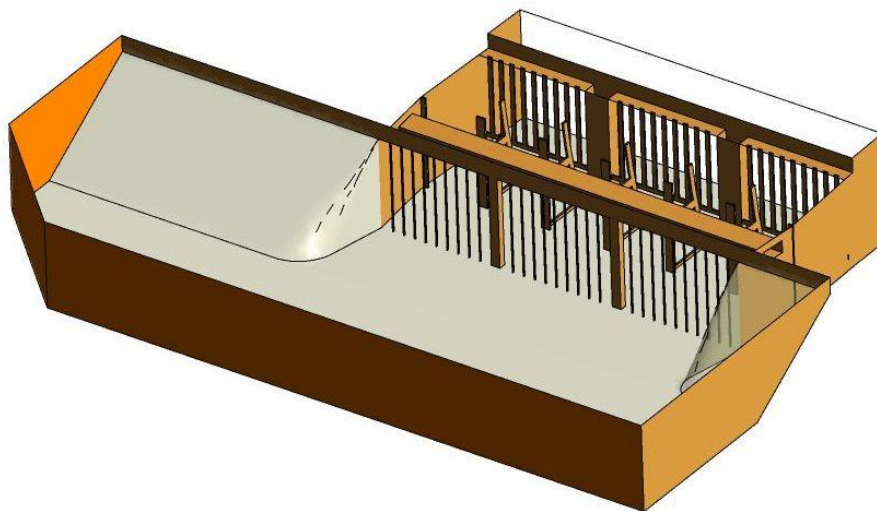


Abbildung 2 Beispiel für numerisches Modell (HWE am Hüttenteich)

## 2.3 Modellversuch

Für einige allgemeine Anwendungsfälle, z.B. den Halbkreisüberfall und den Standardüberfall, wurden Erkenntnisse aus Modellversuchen genutzt oder die im Rahmen der Studentenausbildung vorhandene Modelle zur Überprüfung bestimmter Beiwerte genutzt. Insbesondere der Rauigkeitseinfluss wurde parallel am physikalischen Modell im Rahmen einer studentischen Arbeit überprüft.

## 2.4 Bewertung des Ablesepunktes des Wasserstandes

Die vorhandenen Pegel einiger Anlagen haben die kuriosesten Standorte, so dass sofort während der Besichtigung festgestellt wurde, dass es zu falschen Ableseungen kommen muss. Oft sind die Lattenpegel im Nahbereich der Überfallkanten befestigt, befinden sich in der Nähe umströmter Ecken oder an Punkten erhöhter Geschwindigkeit der Zulaufbereiche.



**Abbildung 3** Falsche Pegelbefestigungen nach umströmten Kanten oder hinter Vorsprüngen

## 3 Einflussfaktoren

### 3.1 Anströmung

Die Anströmung der Hochwasserentlastungsanlagen hat auf den Überfallbeiwert einen erheblichen Einfluss. Die vorhandenen Anlagen haben meist keine klaren Anströmbedingungen, sondern die Beckensohle steigt zum Überfall hin an, sie verläuft schräg mit unterschiedlichen Zulaufhöhen oder es gibt keine Wehrhöhe und die Anströmhöhe entspricht der Überfallhöhe. Da der Punkt der Messung der Überfallhöhe in der Regel einem Wasserstand im Staubecken entspricht, ohne nennenswerte Bewegung des Wassers, kommt es für solche extremen Standorte zu erheblichen Abweichungen wegen des hohen Anteiles an kinetischer Energie. Wichtig ist es hier, den Bezug zum Standort der Höhenmessung zu beachten. Der Wasserstands-Messung sollte im tiefen Wasser erfolgen. Meist liegt sie allerdings in der Nähe der Überfallkante. Der Anteil des Überfallbeiwertes aus der Anströmbedingung ergibt sich zu:

$$\mu_1 = \left( \frac{h_E}{h} \right)^{1,5} = \left( \frac{h + v_0^2 / 2g}{h} \right)^{1,5} = \left( 1 + \left( \mu \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{b}{B} \cdot \frac{h}{h+w} \right)^2 \right)^{1,5} \quad (3)$$

### 3.2 Verluste und Druckeinfluss

Die Anströmung kurz vor dem Überfall, die Form des Überfalles und die mögliche Druck- oder Unterdruckbildung auf dem Überfallrücken beeinflussen stark

den eigentlichen Überfallbeiwert des Wehres. Hier kann man nur auf Beiwerte zurückgreifen, die in physikalischen Modellen mit ähnlichen Formen ermittelt wurden. Die Einflussgrößen Strömungsablösung und Unterdruck werden dabei im verkleinerten Modell falsch abgebildet und der Einfluss der Rauigkeit auf die Strömungsablösung ist nicht bekannt. Deshalb wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit Modellversuche zum Einfluss der Rauigkeit durchgeführt. Die kreisförmigen Überfälle wurden mit Sandrauigkeiten zwischen  $k = 0$  bis  $k = 5$  mm beschichtet. Von 0 bis 3 mm sank der Überfallbeiwert leicht ab und nahm für größere Rauigkeiten wieder zu. Die Änderungen lagen aber nur zwischen  $-0,4\%$  und  $+0,5\%$ . Da im Modellversuch weder die Geschwindigkeiten noch die Unterdrücke des Originals erreicht werden, wird eingeschätzt, dass dieser Einflüsse im Modellversuch nicht ausreichend nachweisbar sind.

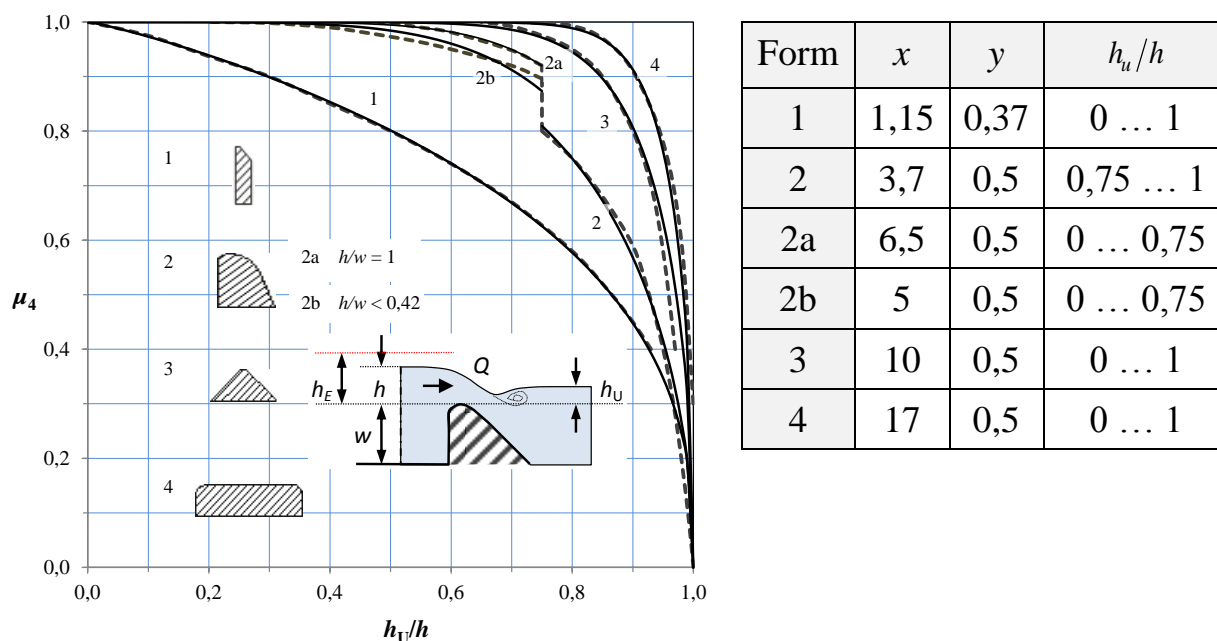


**Abbildung 4** Beschichtung eines Modellwehres Sandkorn  $k = 5$  mm

### 3.3 Rückstau

Ein beginnender Rückstau auf den Überfall kann nur ermittelt werden, wenn der Wasserstand nach dem Überfall bekannt ist. Diesen zu ermittelt ist analytisch allerdings aufwendig und schwer möglich, da man die Randbedingungen oft nicht kennt und diese angenommen werden müssen. Hier sind numerische Modelle sehr hilfreich. Eine analytische Lösung zur Ermittlung des Überfallbeiwertes bei bekanntem Unterwasserstand liefert Gleichung (4):

$$\mu_4 = \left( 1 - \left( \frac{h_u}{h} \right)^x \right)^y = f \left( Form, \frac{h_u}{h} \right) . \quad (4)$$



**Abbildung 5** Rückstauinfluence verschiedener Überfallformen

### 3.4 Abweichungen zwischen numerischen und physikalischen Modellen

Immer wieder taucht die Frage auf, wie genau die Ergebnisse aus numerischen Untersuchungen gegenüber den aus den Untersuchungen an einem physikalischen Modell sind. Grundsätzlich kann man sagen, dass die Genauigkeit des numerischen Modells vor allem von der Feinheit des Netzes bestimmt wird. Je enger die Maschen, je genauer das Ergebnis. Mit der Feinheit des Netzes verbessert sich auch die Ablesegenauigkeit für die Überfallhöhe, wenn diese nicht über den Druckwert ermittelt wird. Die Netzverfeinerung ist allerdings begrenzt und damit die Genauigkeit, da der Rechenaufwand exponentiell mit der Maschenverkleinerung ansteigt. In der Tendenz zeigte sich, dass die numerischen Modelle den Abfluss etwas überschätzen, also sich etwas größere Überfallbeiwerte ergeben. Für einige Anwendungen wurden auch die Abflüsse im numerischen Modell unterschätzt, also die Überfallbeiwerte etwas kleiner, ermittelt.

## 4 Auswertung

Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse erfolgte als Darstellung der Wasserstands-Abflussfunktionen in einem Diagramm und einer Tabelle. Die Ergebnisse der numerischen Simulationen dienten der Kontrolle dieser Funktionen, der Untersuchung der Einflussgrößen für den Überfallbeiwert und der Bestimmung der Rückstauinflüsse.

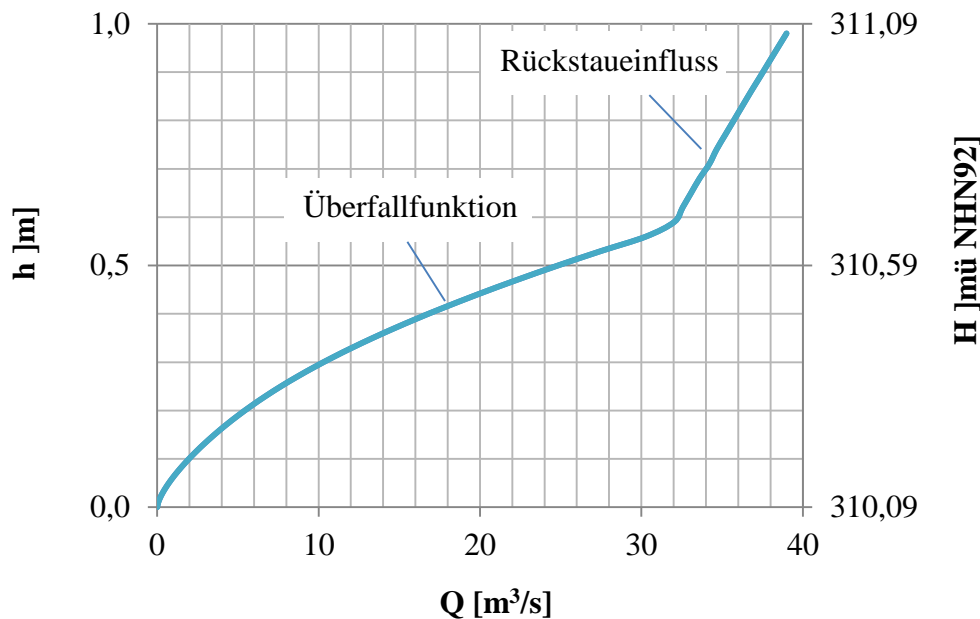


Abbildung 6 Wasserstands-Abflussfunktion einer HWE

## 5 Unterwasserbedingungen

### 5.1 Theorie

Zur Ermittlung der in Abbildung 7 dargestellten Bedingungen im Unterwasser lautet die bisher verwendete Gleichung zur Abschätzung der Geschwindigkeit nach dem Wehr:

$$v_1 \cong \sqrt{2g \cdot h_0} \quad (5)$$

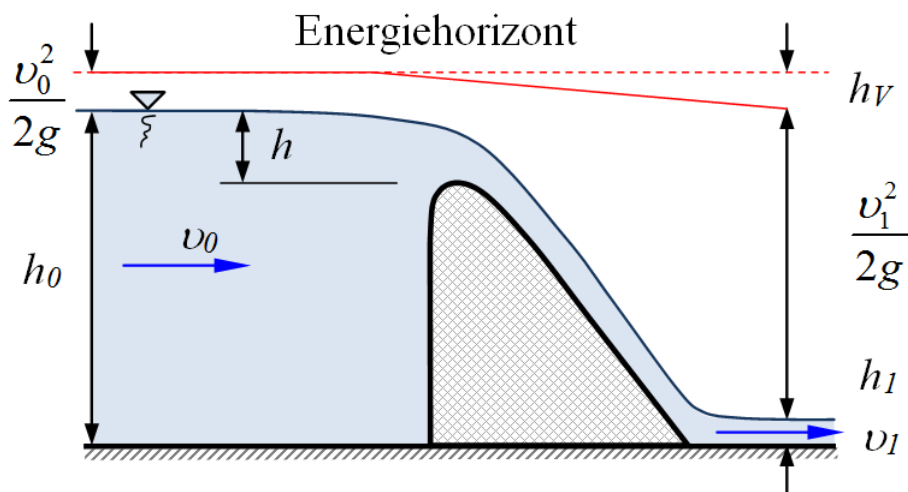
Aus dem ermittelten oder vorgegebenen spezifischen Abfluss  $q = Q/b = \text{const}$  und der Kontinuitätsbedingung ergibt sich die Wassertiefe  $h_1$  nach dem Wehr zu:

$$h_1 = \frac{q}{v_1} \quad (6)$$

Daraus kann man die Zuflussgeschwindigkeit  $v_0$  zum Wehr ermitteln und die Energiehöhe  $h_E$  bestimmen:

$$h_E = h_0 + \frac{v_0^2}{2g} = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + (h_v) \quad (7)$$

Über eine iterative Berechnung erfolgt die Korrektur von  $h_1$  und  $v_1$ , bis sich keine Änderung mehr ergibt und damit eine Lösung gefunden ist.



**Abbildung 7** Überfallströmung, links: ideale, verlustfreie Strömung, rechts: reale Strömung

## 5.2 Verlustbeiwert bei der Überströmung eines Wehres

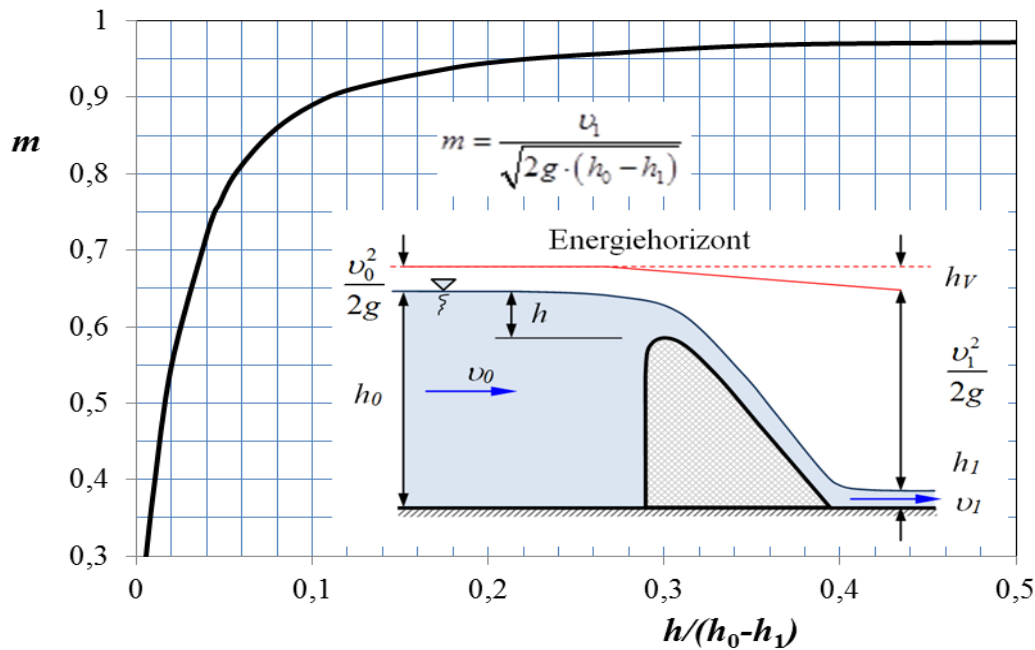
Die Verlusthöhe  $h_v$  wird dabei bisher als örtlicher Verlust mit einem Beiwert  $\zeta$  abgeschätzt (Gleichung (8)), der wie bei der Rohströmung auf die Geschwindigkeitshöhe bezogen wird, oder er wird auf die Energiehöhe bezogen und damit die zur Verfügung stehende Energiehöhe abgemindert (Gleichung (9)).

$$h_v = \zeta \cdot \frac{v_1^2}{2g} \quad (8)$$

$$h_v = c \cdot \left( h_0 + \frac{v_0^2}{2g} \right) \quad (9)$$

Die Energieverluste bei der Überströmung eines festen Wehres mit Neigungen zwischen 1:0,6 bis 1:0,8 wurden von *Peterka* (1978) untersucht und vorgestellt und sind als Diagramm mit metrischen Einheiten auch in *Bollrich* (2013) zu finden. Der von *Peterka* bestimmte Beiwert  $m$  kann als Verhältnis von realer zu theoretischer Geschwindigkeit unter Vernachlässigung der Zulaufgeschwindigkeit  $v_0$  definierte. *Aigner* (2013) zeigte, dass die Beiwerte von *Peterka* sehr gut in einer einzigen Kurve im Diagramm (Abbildung 8) zusammengefasst werden können. Die von *Peterka* untersuchten Oberflächen stellen übliche Betonoberflächen dar und seine Ergebnisse sind deshalb vor allem zur Abschätzung der Geschwindigkeit  $v_1$  nach festen Beton-Wehren geeignet.





**Abbildung 8** Abschätzung des Verlustbeiwertes (Abminderungsfaktors)  $m$  zur Ermittlung der Fließgeschwindigkeit  $v_1$  am Fuße einer Staumauer mit einer Neigung von 1:0,6 bis 1:0,8 nach (Peterka, 1978)

### 5.3 Iterationsfreie Lösung

In die Kontinuitätsbedingung wird neben dem Beiwert  $m$  ein sogenanntes Kontinuitätsverhältnis  $n$  eingeführt und man erhält bei gleicher Sohlhöhe vor und nach dem Wehr und bei konstanter Breite  $b$ :

$$n = \frac{v_1}{v_0} = \frac{h_0}{h_1} \quad . \quad (10)$$

Wird nun der Beiwert  $m$  für eine reale Strömung berücksichtigt, bedeutet das eine Reduzierung von  $v_1$  und gleichzeitig eine Erhöhung von  $h_1$ . Damit bleibt die Kontinuität erhalten und es gilt:

$$q = (v_1 \cdot m) \cdot (h_1/m) = v_1 \cdot h_1 \quad . \quad (11)$$

Es gilt nun die Energiegleichung mit idealer Überströmung (verlustfrei), realer Überströmung mit Verlusthöhe und realer Überströmung unter Verwendung des Beiwertes  $m$ :

$$h_E = h_0 + \frac{v_0^2}{2g} = h_{1i} + \frac{v_{1i}^2}{2g} = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_v = h_1 \cdot m + \frac{v_1^2}{m^2 \cdot 2g} \quad . \quad (12)$$

Aus der Kombination beider Gleichungen (10) und (12) entsteht Gleichung (13):

$$h_0 + \frac{v_0^2}{2g} = \frac{h_0}{n/m} + \frac{v_0^2}{2g} \cdot (n/m)^2 \quad . \quad (13)$$

Diese kann durch Umwandlung, z.B. mit  $\frac{1}{h_0}$  und Umstellung mit  $Fr_0^2 = \frac{v_0^2}{g \cdot h_0}$ , in folgende Form überführt werden:

$$(n/m)^2 - 1 - \frac{2}{Fr_0^2} \cdot \left(1 - \frac{1}{n/m}\right) = 0 \quad , \quad (14)$$

$$(n/m - 1) \cdot (n/m + 1) - \frac{2}{Fr_0^2} \cdot \frac{(n/m - 1)}{n/m} = 0 \quad . \quad (14a)$$

Eine Lösung dieser Gleichung ist  $n/m = 1$  und mit der Division durch  $(n/m - 1)$  wird daraus folgende quadratische Gleichung.

$$(n/m)^2 + n/m - \frac{2}{Fr_0^2} = 0 \quad (14b)$$

Für diese quadratische Gleichung gibt es folgende positive Lösung für  $n/m$ , die auch genauso mit  $Fr_1$  ermittelt werden kann:

$$n/m = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{8}{Fr_0^2}} - 1 \right) = \frac{Fr_1^2}{4} \left( \sqrt{1 + \frac{8}{Fr_1^2}} + 1 \right) \quad , \quad (15)$$

$$m/n = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{8}{Fr_1^2}} - 1 \right) = \frac{Fr_0^2}{4} \left( \sqrt{1 + \frac{8}{Fr_0^2}} + 1 \right) \quad .$$

Damit erfolgt die Berechnung des Kontinuitätsverhältnisses  $n$  unter Berücksichtigung eines Verlustbeiwertes  $m$  direkt aus dem Zufluss oder der Zuflussgeschwindigkeit, hier als dimensionslose *Froude-Zahl* dargestellt.

## 5.4 Beispiel

Gegeben:  $v_0 = 0,1 \text{ m/s}$ ,

$$h_0 = 1 \text{ m},$$

$$h = 0,13 \text{ m}$$

aus Bild 2 mit  $h/(h_0 - h_1) \cong 0,13$

ergibt sich  $m = 0,92$

$$\text{mit } Fr_0^2 = \frac{0,1^2}{9,81 \cdot 1} = 0,0010194$$

Lösung mit Gleichung (15):

$$n/m = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{8}{0,0010194}} - 1 \right) = 43,797 \quad n = 43,797 \cdot m = 40,29$$

$$\text{Ergebnisse: } h_1 = \frac{1m}{40,29} = 0,025m \quad \text{und} \quad v_1 = 40,29 \cdot 0,1m = 4,03m/s$$

## 6 Literatur

- Aigner, D. (2008): Überfälle. In: Wasserbauliche Mitteilungen - Aktuelle Forschungen im Wasserbau 1993 - 2008, Heft 36, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden, Selbstverlag der Technischen Universität Dresden, Dresden, 2008.
- Aigner, D. (2013): Iterationsfreie Lösung der Bernoulli-Gleichung – Neuer Lösungsansatz zur Ermittlung der Unterwasserbedingungen an einem überströmten Wehr. Wasserwirtschaft-Wassertechnik. HUSS-Medien-Verlag Berlin 11-12/2013.
- Bollrich, G. (2013): Technische Hydromechanik 1 – Grundlagen. Beuth Verlag GmbH, Berlin–Wien–Zürich 2013.
- Peterka A. J. (1978) Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators.- Denver (Colorado) : U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation (U.S.B.R.), 1978.

Auftraggeber und Datengrundlage:

Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen  
Referat 21 - Wassermenge  
Bahnhofstrasse 14  
01796 Pirna

Autor:

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Detlef Aigner

Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik  
Technische Universität Dresden  
Helmholtzstraße 10  
01062 Dresden

Tel.: +49 351 463 34725  
Fax: +49 351 463 36601  
E-Mail: detlef.aigner@tu-dresden.de

online- drucken + online- belichten + online- beraten und betreuen

***Blei war gestern ...***

Wir sind uns treu geblieben.  
Bei uns dürfen Sie Qualität zum günstigen  
Preis verlangen. Wir bieten Ihnen die  
vielfältigsten Möglichkeiten vom Druck bis  
zur Buchbinderei – schnell und  
unkompliziert aus einer Hand.  
Neugierig geworden?  
Besuchen Sie uns unter [www.addprint.de](http://www.addprint.de)  
oder rufen Sie einfach  
unter Telefon **03 52 06-380 11** an.

Prospekte

Plakate

**Bücher**

Großformatdrucke

**Broschüren**

**Geschäftsberichte**

Flyer

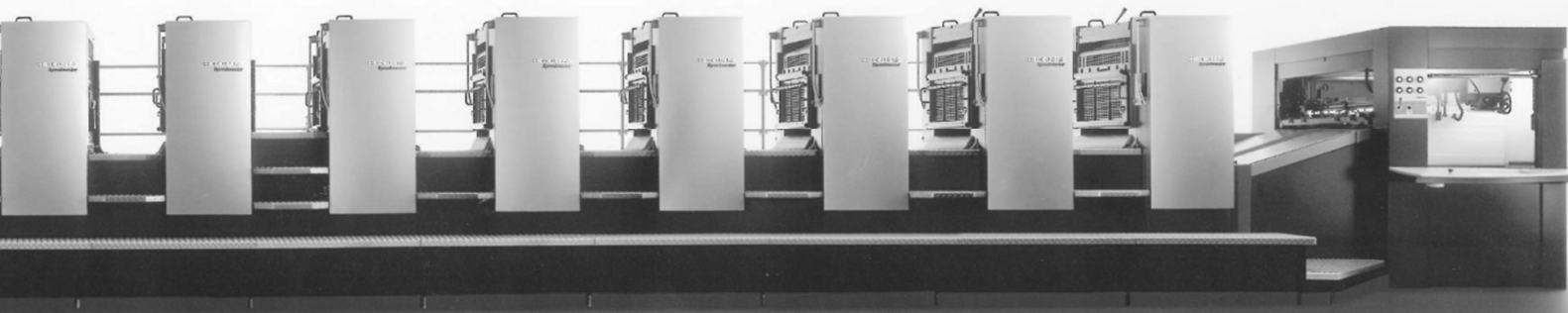
und mehr ...



**addprint® AG**

Das *online*-Druckzentrum.

Gewerbegebiet · Am Spitzberg 8a  
01728 Bannewitz/Possendorf  
E-Mail: [anfrage@addprint.de](mailto:anfrage@addprint.de)



***... high-end-Technik ist heute***