

Der Schlitzpass – Ausfluss- und/oder Überfallströmung

Detlef Aigner

Einleitung

Der Schlitzpass wird oft in Fischaufstiegsanlagen eingesetzt. Seine hydraulische Berechnung basiert auf der Auswertung von Modell- und Naturmesswerten. Hydraulisch ist der Schlitzpass eine extreme Querschnittseinengung mit Rückstau vom Unterwasser. So beziehen sich die Durchflussformeln für den Schlitzpass, z.B. im Merkblatt DWA-M 509, auf den Beckenwasserstand im Oberwasser und sämtliche weiteren Einflussgrößen, wie Anströmung, Einschnürung (Form der Öffnung) und Rückstau aus dem Unterwasserstand sind im Durchflussbeiwert integriert. Das erschwert eine Differenzierung und Übertragung auf andere Bauarten und Formen. So werden im DWA-Merkblatt für eine ausgerundete Form des Schlitzpasses gegenüber einer eckigen pauschale Zuschläge von 10% empfohlen. Andererseits vermitteln unterschiedliche Formeln für den Durchflussbeiwert zwischen strömungsstabilen und dissipierenden Bedingungen im Oberwasser eine hohe Genauigkeit der Durchflussermittlung. Für eine exakte Planung ist eine möglichst genaue Definition der Abhängigkeiten zwischen Schlitzbreiten, Schlitzformen, Beckengeometrien, Wasserständen und Durchfluss erforderlich. Dieser Beitrag geht insbesondere auf die hydraulischen Grundlagen zur Berechnung eines Schlitzpasses und die diese Berechnung beeinflussenden Größen ein. Es wird eine Trennung zwischen den einzelnen Einflussgrößen im Durchflussbeiwert vorgeschlagen.

Rückgestauter Ausfluss aus Seitenöffnungen

In den Grundlagenbüchern der Hydromechanik gibt es keinen direkten Berechnungsansatz für den Schlitzpass. Eine gewisse Ähnlichkeit besteht zwischen der Strömung in einem Schlitzpass und der Strömung aus einem teilweise rückgestauten Seitenauslass. Nach Bollrich (2013) kann man den Ausfluss aus einer teilweise rückgestauten, rechteckigen Öffnung mit der Breite b aus zwei Teilen zusammengesetzt berechnen (Abbildung 1). Den oberen Teilausfluss Q_o mit der Differenz $a - h_u$ und den unteren Teilabfluss Q_u mit der Unterwasserhöhe h_u .

Wird die Anströmgeschwindigkeit berücksichtigt, kann anstelle von h mit der Energiehöhe $h_E = h + v^2/2g$ gerechnet werden.

Der obere Teilabfluss ergibt sich zu:

$$Q_o = \frac{2}{3} \cdot \mu_o \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot \left[(h - h_u)^{3/2} - (h - a)^{3/2} \right] \quad (1)$$

Mit der Querschnittsfläche der oberen Ausströmöffnung $A_o = b \cdot (a - h_u)$ und der zur Verfügung stehenden Energiehöhe $\Delta h = h - h_u$ kann man schreiben.

$$Q_o = \frac{2}{3} \cdot \left[\frac{\Delta h^{3/2} - (h-a)^{3/2}}{(a-h_u) \cdot \Delta h^{1/2}} \right] \cdot \mu_o \cdot A_o \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad (1a)$$

Umgestellt ergibt sich:

$$Q_o = \frac{2}{3} \cdot \mu_o \cdot \left[1 - \left(\frac{h-a}{\Delta h} \right)^{3/2} \right] \cdot \frac{\Delta h}{a-h_u} \cdot A_o \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad (1b)$$

Für den unteren Teil mit der Öffnungsfläche $A_u = b \cdot h_u$ wird der Ausfluss:

$$Q_u = \mu_u \cdot b \cdot h_u \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} = \mu_u \cdot A_u \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad (2)$$

Damit wird der Gesamtabfluss für den teilweise rückgestauten Ausfluss aus Seitenöffnungen:

$$Q = Q_o + Q_u = \left[\frac{2}{3} \cdot \mu_o \cdot \left(1 - \left(\frac{h-a}{\Delta h} \right)^{3/2} \right) \cdot \frac{\Delta h}{a-h_u} \cdot A_o + \mu_u \cdot A_u \right] \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad (3)$$

$$Q = Q_o + Q_u = \left[\frac{2}{3} \cdot \mu_o \cdot \left(1 - \left(\frac{h-a}{\Delta h} \right)^{3/2} \right) \cdot \frac{\Delta h}{a} + \mu_u \cdot \frac{h_u}{a} \right] \cdot b \cdot a \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad (3a)$$

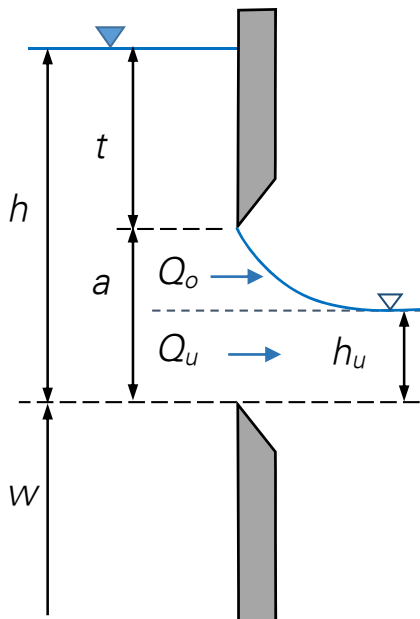


Abbildung 1: Seitenansicht – Ausfluss aus Seitenöffnung

Unter der Annahme, dass für die Teilausflüsse etwa gleiche Strömungseinschnürungen vorliegen, kann man die Ausflussbeiwerte gleich setzen, so dass sich $\mu = \mu_o = \mu_u$ ergibt.

$$Q = Q_o + Q_u = \left[\frac{2}{3} \cdot \left(1 - \left(\frac{h-a}{\Delta h} \right)^{3/2} \right) \cdot \frac{\Delta h}{a} + \frac{h_u}{a} \right] \cdot \mu \cdot b \cdot a \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad (3b)$$

$$Q = \mu_G \cdot \mu \cdot b \cdot a \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad (3c)$$

$$\text{Geometriefaktor: } \mu_G = \frac{2}{3} \cdot \left(1 - \left(\frac{h-a}{\Delta h} \right)^{3/2} \right) \cdot \frac{\Delta h}{a} + \frac{h_u}{a} \quad (4)$$

Für eine Seitenöffnung mit sehr großem Überstau $h \gg a$ wird der Geometriefaktor $\mu_G = 1$ (Abbildung 2).

Für $h = a$ ergibt sich $\mu_G = \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot \frac{h_u}{h}$.

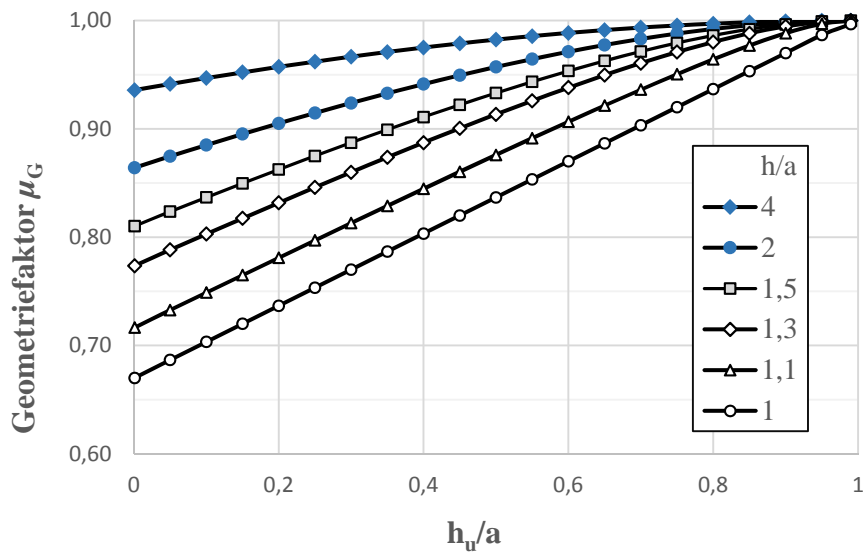


Abbildung 2: Geometrieinfluss für den Ausfluss aus einer Seitenöffnung

Damit könnte dieser Berechnungsansatz mit $w = 0$ zur Berechnung eines Schlitzpasses verwendet werden.

Ausfluss aus Schlitzpass ohne Rückstau

Beim freien Ausfluss aus einem Schlitzpass ohne Rückstau kommt es zu keiner Beeinflussung aus dem Unterwasser. Der Ausfluss wird hauptsächlich durch die Geometrie der Öffnung und den Oberwasserstand bestimmt. Mit $h_u = 0$ also $h = \Delta h$ lässt sich der Ausfluss Q in Anlehnung an eine Überfallfunktion für die Schlitzbreite $b = s$ mit folgender Gleichung ermitteln.

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

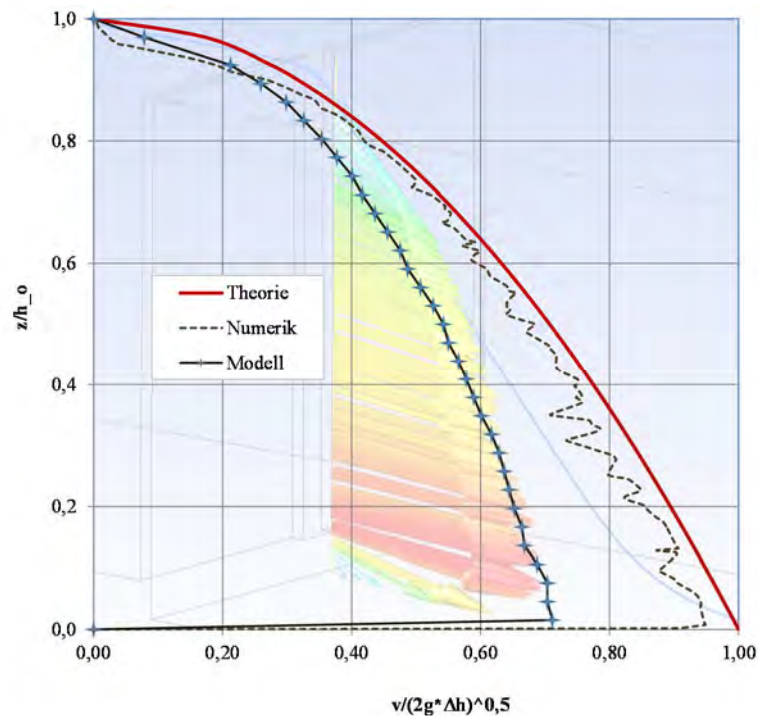


Abbildung 3: Vergleich der normierten horizontalen Geschwindigkeitsverteilung im Schlitzpass zwischen theoretischer Betrachtung, numerischer und physikalischer Simulation

Durch den Vergleich von Messungen, Simulationen und theoretischen Betrachtungen konnte gezeigt werden, dass die Geschwindigkeitsverteilung beim Ausfluss aus einem nicht rückgestauten Schlitz prinzipiell der theoretischen Betrachtung nahe kommt (Abbildung 3). Die Ergebnisse der numerischen Simulation ergeben etwas geringere Werte als die Theorie wogegen die Messergebnisse aus dem physikalischen Modell bedeutend geringer sind als Theorie und Numerik. Die Geschwindigkeitsverteilung ist relativ unabhängig von der Theorie, so dass man annehmen kann, dass der Abflussbeiwert hauptsächlich durch die seitliche Strahleinschnürung und durch die Abweichungen der Geschwindigkeitswerte zustande kommt.

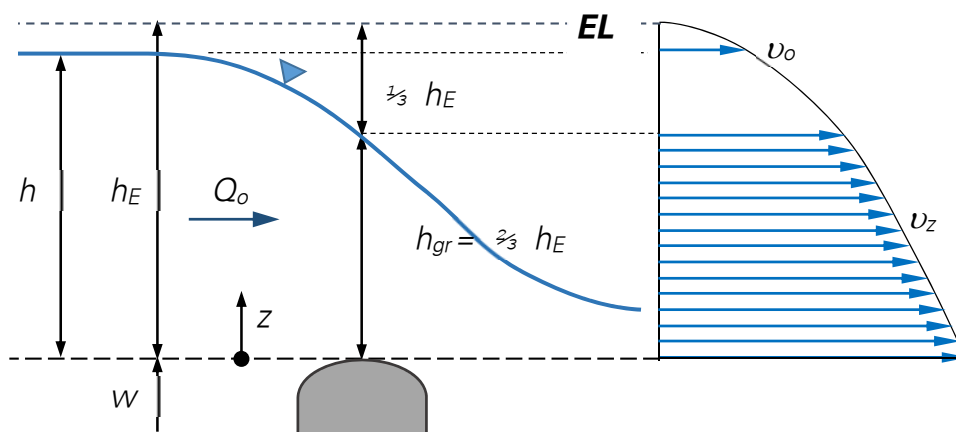


Abbildung 4: Zur Ableitung der Abflussformel ohne Rückstau für einen Überfall

Die Ableitung der Abflussformel entspricht dem Vorgehen von Weisbach (Bollrich, 2013), wobei die Integrationsgrenzen hier zwischen $z = 0$ und der Grenztiefe $z = h_{gr} = \frac{2}{3} h_E$ definiert werden.

Damit ergibt sich theoretisch der Abfluss als Überfallfunktion ohne Rückstau aus folgenden Gleichungen.

Aus dem Bernoulli-Ansatz kann die Geschwindigkeit in Spaltmitte als Funktion der Variablen z geschrieben werden:

$$v(z) = \sqrt{2g(h_E - z)}$$

Die Integration über z und der konstanten Spaltbreite s liefert:

$$Q_o = s \cdot \sqrt{2g} \cdot \int_{z=0}^{z=\frac{2}{3}h_E} \sqrt{h_E - z} \cdot dz$$

$$Q_o = s \cdot \sqrt{2g} \cdot \left(-\frac{2}{3}\right) \cdot \left[\left(h_E - \frac{2}{3} \cdot h_E\right)^{3/2} - (h_E)^{3/2} \right]$$

Damit wird $Q_o = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot s \cdot \sqrt{2g} \cdot h_E^{3/2}$ (5)

mit dem theoretischen Abflussbeiwert $\mu = \left(1 - \frac{1}{3^{3/2}}\right) = 0,80755$ und $h_E = h + \frac{v_o^2}{2g}$.

Die Berücksichtigung des Geschwindigkeitsanteiles in h_E spielt hier eine wichtige Rolle, da die Anströmgeschwindigkeit einen entscheidenden Einfluss auf den Abfluss im Schlitzpass von Fischpässen haben kann.

Die Untersuchungen am physikalischen Modell u.a. im Rahmen der Diplomarbeit von Sanni (2015) lieferten diesen Abflussbeiwert am scharfkantigen rechteckigen Schlitzpass mit der Schlitzbreite von 51 mm in einem Versuchskanal von 30 cm Breite.



Abbildung 5: Schlitzpass, frei austretenden Strahl am physikalischen Modell (rechts) mit sichtbarer Strahleinschnürung in der Draufsicht (links)

Ausfluss aus Schlitzpass mit Rückstau

Analog zum rückgestauten Ausfluss aus Seitenöffnungen kann der Teilausfluss für den Anteil des rückgestauten Schlitzpasses nach Gleichung (2) berechnet werden. Dabei wird die Öffnungsbreite b zur Schlitzbreite s . Setzt man den Gesamtabfluss Q nun aus diesen zwei Anteilen Q_o und Q_u zusammen, mit $h_E = \Delta h$ für den oberen freien Teil und h_u für den unteren rückgestauten Anteil, so erhalten wir folgende Gleichung:

$$Q = Q_o + Q_u = \frac{2}{3} \cdot \mu_o \cdot s \cdot \Delta h \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} + \mu_u \cdot s \cdot h_u \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad (6)$$

Es ist sofort erkennbar, dass diese Gleichung mit der Ausflussgleichung der Seitenöffnung (Gleichung (3b)) für $h = a$ und $b = s$ übereinstimmt.

Die Gleichung kann durch Umformung unter Verwendung von dimensionslosen Größen folgendermaßen geschrieben werden:

$$Q = \left(\frac{2}{3} \cdot \mu_o \cdot \frac{\Delta h}{h_o} + \mu_u \cdot \frac{h_u}{h_o} \right) \cdot s \cdot h_o \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad (6a)$$

Dabei stellt h_o den Wasserstand vor dem Schlitz (Oberwasser) und h_u den Wasserstand nach dem Schlitz (Unterwasser), s die Schlitzbreite und Δh die Wasserspiegeldifferenz zwischen Oberwasser und Unterwasser dar.

Im Rahmen von studentischen Arbeiten wurden Messungen an einem Schlitzpass mit unterschiedlichen Geometrien durchgeführt. Dabei wurden die Ausflussbeiwerte ohne Rückstau und mit Rückstau, für scharfkantige Formen und ausgerundete Schlitzte, für rechteckige Öffnungen und trapezförmige Öffnungen ermittelt.

Im Gegensatz zu den im DWA-Merkblatt 509 vorgeschlagenen Formeln zur Berechnung des Durchflusses von einfachen Schlitzpassen ergaben sich mit o.g. Gleichung annähernd konstante, nur von der Form des Schlitzpasses abhängige Beiwerte.

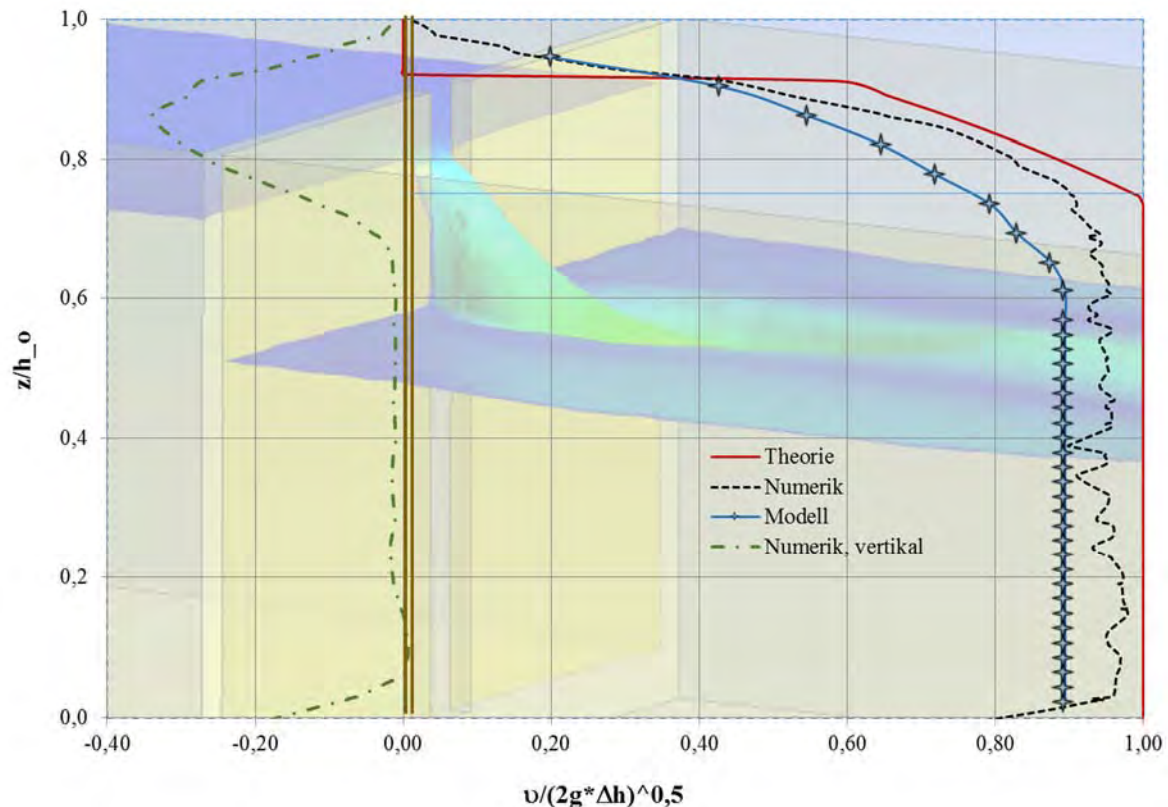


Abbildung 6: Geschwindigkeitsverteilung beim rückgestauten Schlitzdurchlass, theoretisch, numerisch und am Modell

Messwerte

Die an einem Modellgerinne mit der Breite $B = 30$ cm durchgeführten Untersuchungen wurden mit den oben aufgestellten Formeln ausgewertet. Die Untersuchungen wurden für einen geraden, scharfkantigen Schlitz der Breite $s = 51$ mm, für einen geraden, ausgerundeten Schlitz der Breite $s = 44$ mm sowie für einen scharfkantigen und einen ausgerundeten trapezförmigen Schlitz der Sohlbreite $s = 51$ mm bzw. $s = 44$ mm und den Neigungen m durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten erst für einen nicht rückgestauten Ausfluss. Um einen Rückstau vollständig zu vermeiden und das Wasser im Unterwasser sofort abzuleiten, wurde nach dem Schlitz ein Sohlabsatz im Gerinne eingebaut (Abbildung 5). Die Auswertung der Messungen mit Gleichung (1c) bzw. (6a) für $h_u = 0$ lieferte den Wert $\bar{\mu}_o$, welcher in Abbildung 7 eingetragen ist. Die Auswertung der Messungen zeigte einen fast konstanten Verlauf mit einem Mittelwert von $\bar{\mu}_o = 0,65$ und einem leichten Anstieg des Wertes mit steigendem h_o .

Mit diesem $\bar{\mu}_o$ erfolgte dann die Auswertung der Gleichung (6a) für die Messungen mit $h_u > 0$ zur Ermittlung des zweiten Beiwertes μ_u . Wie erwartet bzw. angenommen wurde, waren beide Werte fast gleich groß. Beide Werte sind vor allem Einschnürungsbeiwerte, die auf die scharfkantige Form der schlitzförmigen Öffnung zurückzuführen sind. Der Einfluss anderer Größen, wie z.B. der Wasserstände h_u und h_o ist hier vernachlässigbar. Der Einfluss des Breitenverhältnisses der Gerinnebreite zu Spaltbreite und der Einfluss der Anströmung wurden nicht untersucht. Die Auswertung des Beiwertes μ_u (siehe Abbildung 7) zeigte eine

leichte Streuungen. Die Werte ordneten sich zwischen 0,605 und 0,679 ein und wurden im Mittel mit $\mu_u = 0,643$ bestimmt.

Damit wurde die Annahme bestätigt, dass die Ausflussbeiwerte für beide Teilabflüsse gleichgesetzt werden können, so dass gilt: $\mu = \mu_o = \mu_u$ und

$$Q = \mu \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{\Delta h}{h_o} + \frac{h_u}{h_o} \right) \cdot s \cdot h_o \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} = \mu \cdot \left(h_o - \frac{1}{3} \cdot \Delta h \right) \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad (6b)$$

Werden die Messungen mit dieser Gleichung (6b) ausgewertet, ergibt sich der Ausflussbeiwert für scharfkantige Schlitzöffnungen im Mittel zu $\mu = 0,645$ bei einem Breitenverhältnis von $b/B=0,17$.

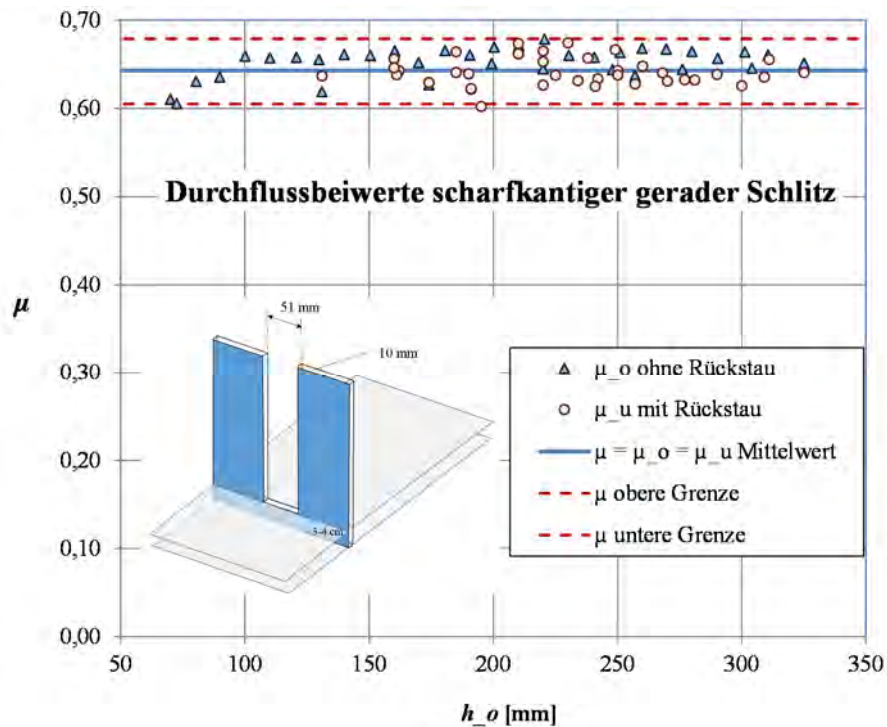


Abbildung 7: Ausflussbeiwerte scharfkantiger gerader Schlitz ohne und mit Rückstau sowie als Mittelwert

Der gerade, rechteckige Schlitz wurde für eine weitere Untersuchung mit kreisförmig abgerundeten Kanten mit einem Durchmesser von 15 mm ausgeführt. Die Schlitzweite verringerte sich gegenüber der scharfkantigen Form von 51 mm auf $s = 44$ mm. Der Überfallbeiwert erhöhte sich durch die Abrundung um über 23% auf im Mittel $\bar{\mu}_o = 0,8$.

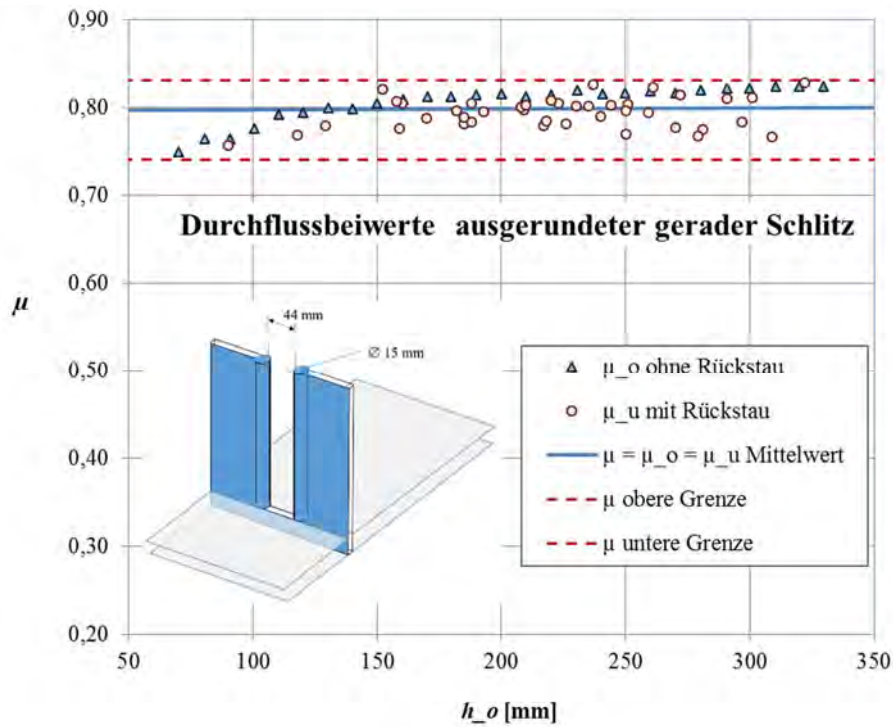


Abbildung 8: Ausflussbeiwerte ausgerundeter gerader Schlitz ohne und mit Rückstau

Trapezprofil

Für das Trapezprofil kann eine ähnliche Betrachtung durchgeführt werden. Hier besteht die Unsicherheit in den Integrationsgrenzen für Q_o , da die Grenztiefe für das Trapezprofil keine direkte Lösung zulässt. Wird näherungsweise die Grenztiefe für das Rechteckprofil verwendet, wird die Lösung allerdings etwas überschätzt. Das Integral für das Trapezprofil des freien Abflusses mit $h_E \cong \Delta h$ lautet:

$$\begin{aligned}
 Q_o &= \int_{z=0}^{z=\frac{2}{3}\Delta h} v(z) \cdot s(z) \cdot dz = \int \left(\sqrt{2g \cdot (\Delta h - z)} \cdot (s + 2 \cdot m \cdot z) \right) \cdot dz & (7) \\
 &= 2 \cdot m \cdot \sqrt{2g} \cdot \left[\frac{2}{5} \cdot (\Delta h - z)^{5/2} - \frac{2}{3} \cdot (\Delta h - z)^{3/2} \cdot \left(\Delta h + \frac{s}{2 \cdot m} \right) \right]_{z=0}^{z=2/3 \cdot h_E} \\
 &= 2 \cdot m \cdot \sqrt{2g} \cdot \left[\frac{2}{5} \cdot \left(\Delta h - \frac{2}{3} \cdot \Delta h \right)^{5/2} - \frac{2}{3} \cdot \left(\Delta h - \frac{2}{3} \cdot \Delta h \right)^{3/2} \cdot \left(\Delta h + \frac{s}{2 \cdot m} \right) \right. \\
 &\quad \left. - \left(\frac{2}{5} \cdot \Delta h^{5/2} + \frac{2}{3} \cdot \Delta h^{3/2} \cdot \left(\Delta h + \frac{s}{2 \cdot m} \right) \right) \right] \\
 &= \frac{2}{3} \cdot \Delta h^{5/2} \cdot \sqrt{2g} \cdot 2 \cdot m \cdot \left[\left(1 + \frac{s}{2 \cdot m \cdot \Delta h} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{3} \right)^{3/2} \right) - \frac{3}{5} \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{3} \right)^{5/2} \right) \right] \\
 &= \frac{2}{3} \cdot \Delta h^{5/2} \cdot \sqrt{2g} \cdot 0,80755 \cdot \left[\frac{s}{\Delta h} + 0,61 \cdot m \right]
 \end{aligned}$$

Die Lösung dieses Integrals lautet:

$$Q_o = \frac{2}{3} \cdot \mu_o \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \cdot \Delta h \cdot \left(1 + 0,61 \cdot \frac{m \cdot \Delta h}{s} \right) \quad (8)$$

Mit dem rückgestauten Abfluss Q_u ergibt sich der Gesamtabfluss Q .

$$Q_u = \mu_u \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \cdot h_u \cdot \left(1 + \frac{m \cdot h_u}{s} \right) \quad (9)$$

$$Q = Q_o + Q_u = \mu \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \cdot \left[\Delta h \cdot \left(\frac{2}{3} + 0,406 \cdot \frac{m \cdot \Delta h}{s} \right) + h_u \cdot \left(1 + \frac{m \cdot h_u}{s} \right) \right] \quad (10)$$

Die am gleichen Modellgerinne der Breite $B = 30$ cm durchgeführten Versuche mit den gleichen Schlitzbreiten an der Sohle und den Neigungen von $m = 0,061$ scharfkantig und $0,064$ ausgerundet ergaben ähnliche über h_o konstante Ausflussbeiwerte wie die für den rechteckigen Querschnitt.

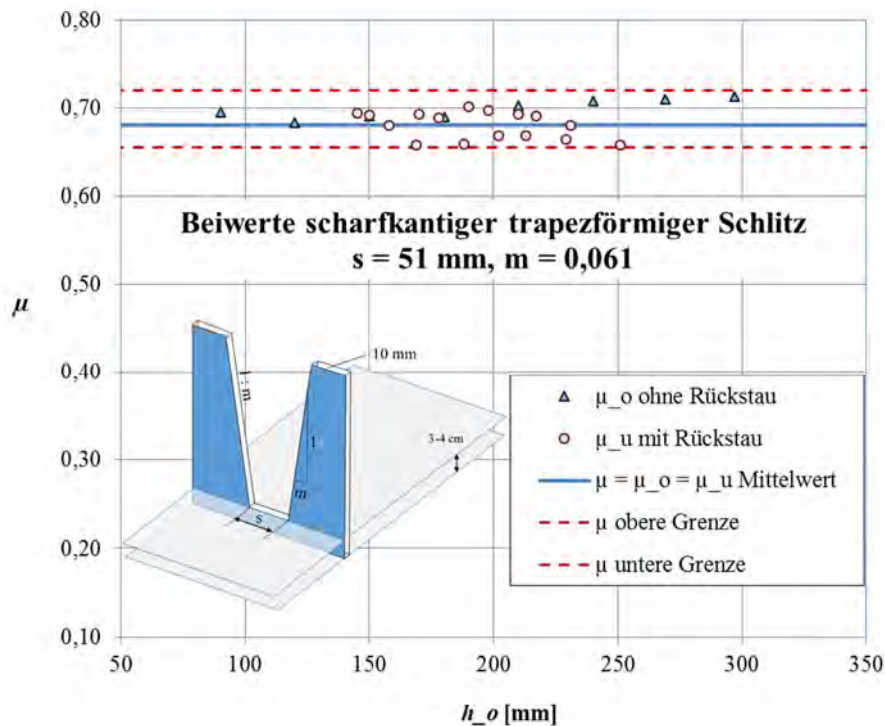


Abbildung 9: Durchflussbeiwerte des trapezförmigen Schlitzes, scharfkantig

Für das scharfkantige Trapezprofil ergab sich ein Mittelwert von $\bar{\mu}_o = 0,68$ und für das ausgerundete Trapezprofil ein Mittelwert von $\bar{\mu}_o = 0,84$.

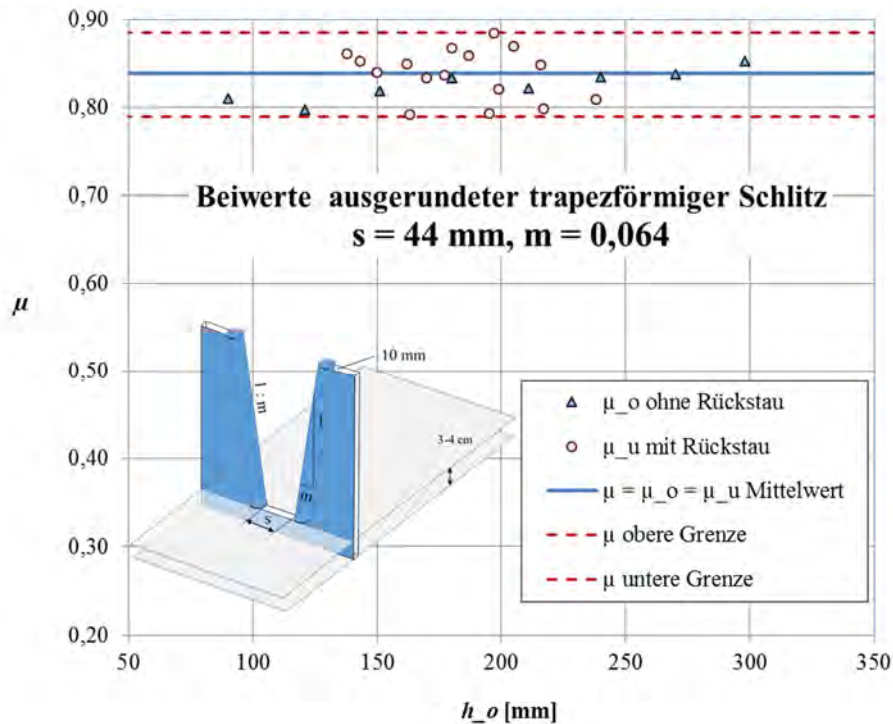


Abbildung 10: Durchflussbeiwerte des trapezförmigen Schlitzes, ausgerundet

Zusammenfassung

Die Berechnungsformel des Durchflusses durch einen Schlitzpass kann aus zwei Teilen, der Ausflussformel und der Überfallformel zusammengesetzt werden. Für den rechteckigen Schlitzpass gilt Gleichung (6b) und für den trapezförmigen Gleichung (10). Die sich daraus ergebenden Durchflussbeiwerte sind formabhängig aber nicht abhängig vom Wasserstand oder Differenzwasserstand. Sie werden vor allem durch die Einschnürung des Durchflussquerschnittes, der effektiven Durchflussfläche, bestimmt. Diese Einschnürung wird bei scharfen Kanten größer als bei ausgerundeten, wodurch der effektive Durchflussquerschnitt kleiner wird und damit auch der Abflussbeiwert. Da diese Einschnürung vor allem formabhängig ist, ist es möglich, Beiwerte anderer Untersuchungen, z.B. für scharfkantige oder ausgerundete Öffnungen, auf den Schlitzpass zu übertragen. Die im DWA-Merkblatt 509 angegebenen Beiwerte zur Berechnung eines Schlitzpasses sind nicht frei von den Einflüssen des Wasserstandes bzw. des Differenzwasserstandes und können deshalb schwer eingeschätzt werden. Die Trennung zwischen Wasserstands abhängigen und geometrischen Einflüssen und damit eine Reduzierung des Durchflussbeiwertes hauptsächlich auf die Formeinflüsse, wie es auch bei anderen hydraulischen Überfall- oder Durchflussbeiwerten üblich sind, wird für die Anwendung auf den Schlitzpass empfohlen.

Der Schlitzpass – Ausfluss- oder Überfallströmung

Detlef Aigner

39. Dresdner Wasserbaukolloquium 2016
Dresden, 3. und 4. März 2016

Einleitung

Schlitzpass in Spremberg (Brandenburg)
mit versetzt angeordneten Becken,
DWA-M 509, Krüger, LUGV Brandenburg



Draukraftwerk in Villach (Österreich),
Hassinger, Uni Kassel

Einleitung

Ausfluss

Überfall

Schlitzpass

Anwendung

Schlitzpass in Spremberg
(Brandenburg) mit versetzt
angeordneten Becken, DWA-M 509,
Krüger, LUGV Brandenburg



Einleitung

Ausfluss

Überfall

Schlitzpass

Anwendung

Mäander-Fischpass in Wismar, Mühlenteich,
www.youtube.com/watch?v=G2CoeohFzs



DWA-M 509 (2014)

Bisherige Berechnungsgrundlage ist das DWA-Merkblatt mit der von Krüger (2010) angegebenen Grundgleichung:

$$Q = \mu_V \cdot s \cdot \sqrt{g} \cdot h_o^{3/2}$$

Mit dem Beiwert μ_V für

strömungsdissipierende und strömungsstabile Verhältnisse

$$\mu_V = 0,59 \cdot \left[1 - \left(\frac{h_u}{h_o} \right)^{4,5} \right]^{0,48}$$

$$\mu_V = 0,48 \cdot \left[1 - \left(\frac{h_u}{h_o} \right)^{4,5} \right]^{0,60}$$

Einleitung

Ausfluss

Überfall

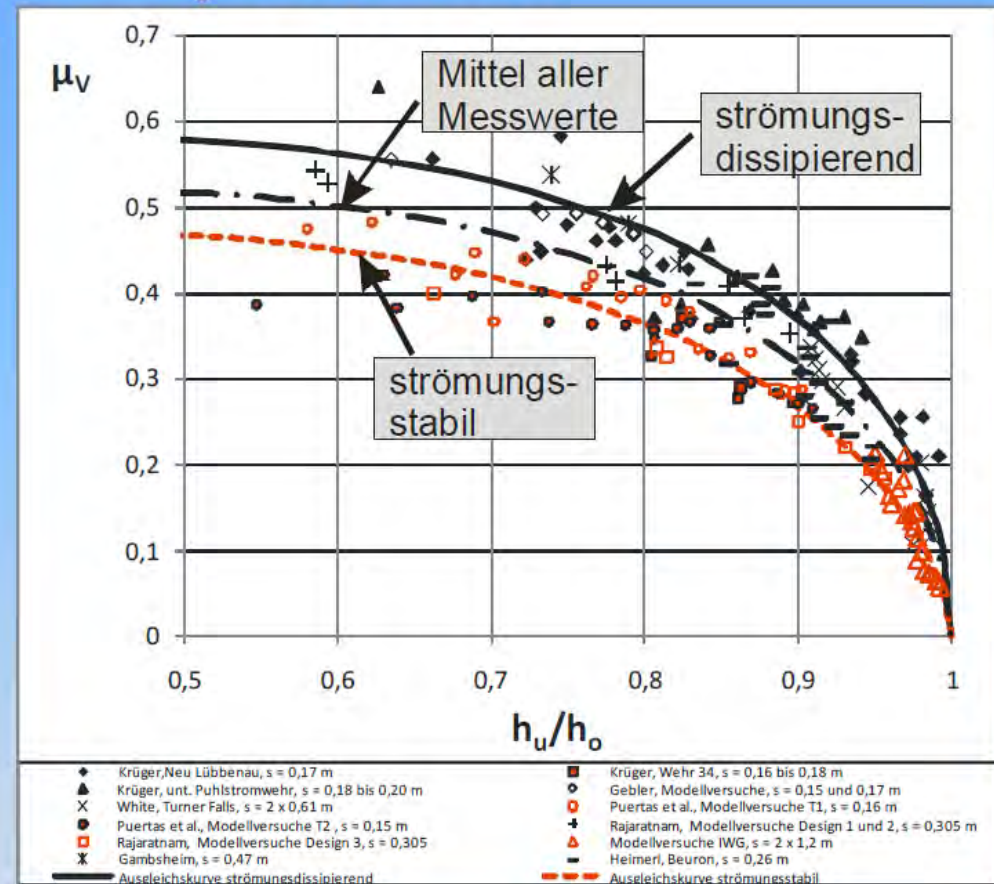
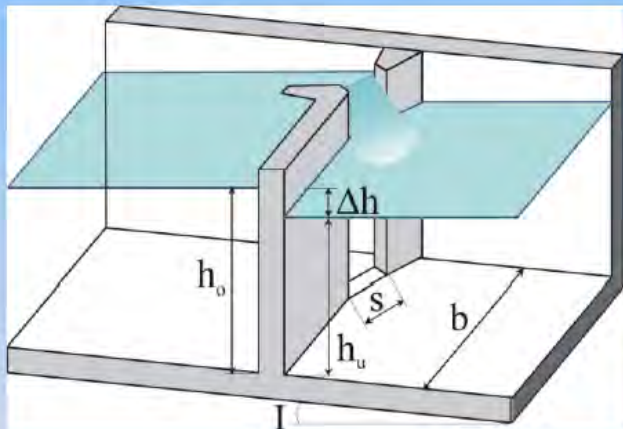
Schlitzpass

Anwendung

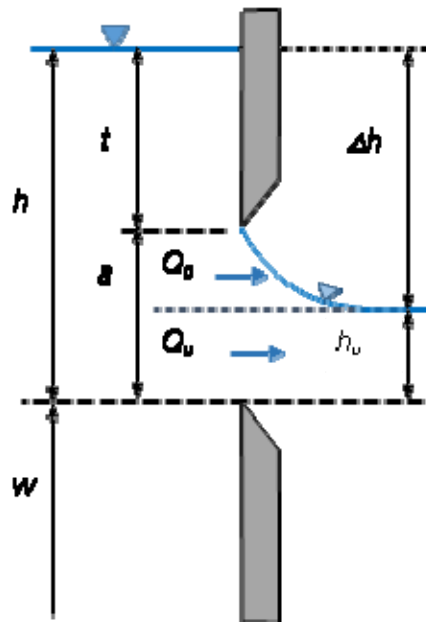
Hydraulische Berechnung von Schlitzpässen

Berechnungsansatz
analog Einengung:

$$Q = \mu_V \cdot s \cdot \sqrt{g} \cdot h_o^{3/2}$$



Der hydraulische Ansatz für den Ausfluss nach Bollrich (THM1, 2013)



Aufteilung in $Q = Q_o + Q_u$:

$$Q = \left[\frac{2}{3} \cdot \mu_o \cdot \left(1 - \left(\frac{h-a}{\Delta h} \right)^{3/2} \right) \cdot \frac{\Delta h}{a-h_u} \cdot A_o + \mu_u \cdot A_u \right] \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h}$$

mit $A_o = b \cdot (a - h_u)$ und $A_u = b \cdot h_u$

Für $t=0$ wird $a=h$ und somit:

$$Q = Q_o + Q_u = \left(\frac{2}{3} \cdot \mu_o \cdot A_o + \mu_u \cdot A_u \right) \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h}$$

Einleitung

Ausfluss

Überfall

Schlitzpass

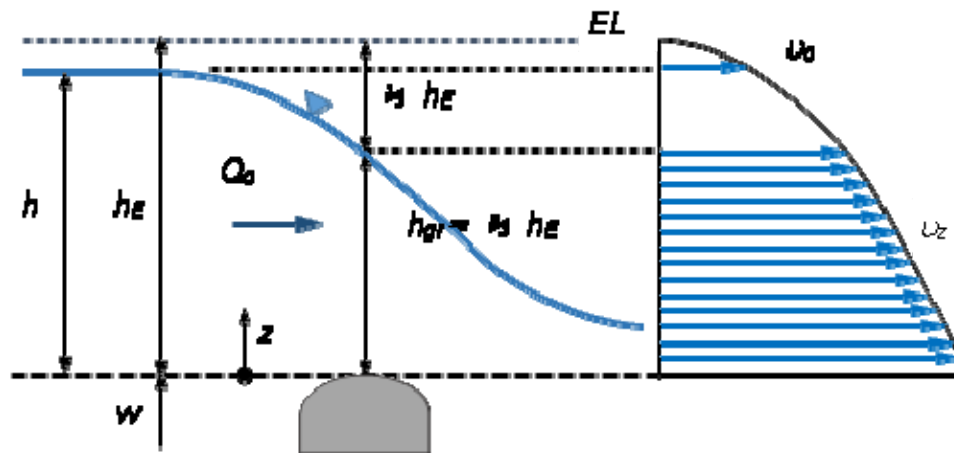
Anwendung

Der Integrationsansatz für den Überfall

$$v(z) = \sqrt{2g(h_E - z)} \quad Q_o = s \cdot \sqrt{2g} \cdot \int_{z=0}^{z=\frac{2}{3} \cdot h_E} \sqrt{h_E - z} \cdot dz$$

$$h_E = h + \frac{v_o^2}{2g} \quad Q_o = s \cdot \sqrt{2g} \cdot \left(-\frac{2}{3}\right) \cdot \left[\left(h_E - \frac{2}{3} \cdot h_E\right)^{3/2} - (h_E)^{3/2} \right]$$

$$\mu = \left(1 - \frac{1}{3^{3/2}}\right) = 0,80755 \quad Q_o = \frac{2}{3} \cdot \mu_o \cdot s \cdot \sqrt{2g} \cdot h_E^{3/2} \quad \text{Poleni-Formel}$$



Einleitung

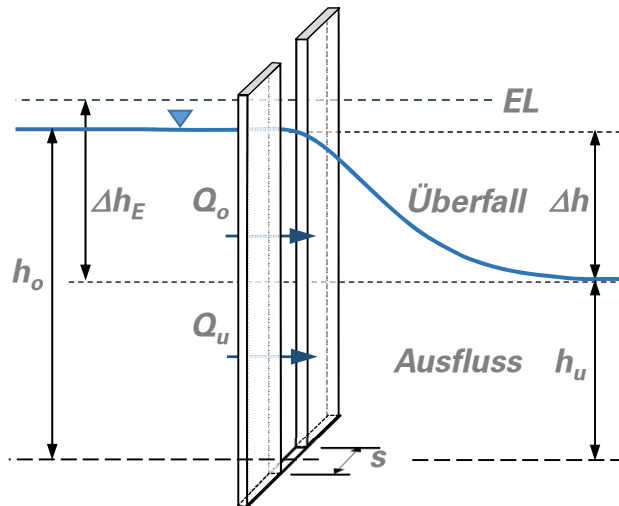
Ausfluss

Überfall

Schlitzpass

Anwendung

Der Ausfluss aus dem Schlitzpass



Überfall:

$$Q_o = \frac{2}{3} \cdot \mu_o \cdot s \cdot \Delta h \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h}$$


Ausfluss:

$$Q_u = \mu_u \cdot s \cdot h_u \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h}$$

Schlitzpass:

$$Q = Q_o + Q_u = \left(\frac{2}{3} \cdot \mu_o \cdot \Delta h + \mu_u \cdot h_u \right) \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h}$$

Annahme: Der Ausflussbeiwert ist vor allem ein Beiwert der Strahleinschnürung und deshalb nur formabhängig!

Ergebnis:  $\mu \cong \mu_o \cong \mu_u$ $Q = \mu \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \Delta h + h_u \right) \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h}$

Einleitung

Ausfluss

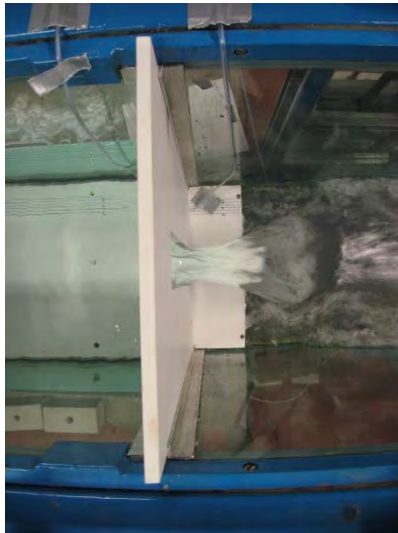
Überfall

Schlitzpass

Anwendung

Das Modell

1. Annahme $h_u = 0$ und Ermittlung von μ_o aus dem physikalischen Modell
2. Modellversuch mit Rückstau $h_u > 0$!
Mit bekanntem μ_o Ermittlung von μ_u und Überprüfung der Annahme!



Einleitung

Ausfluss

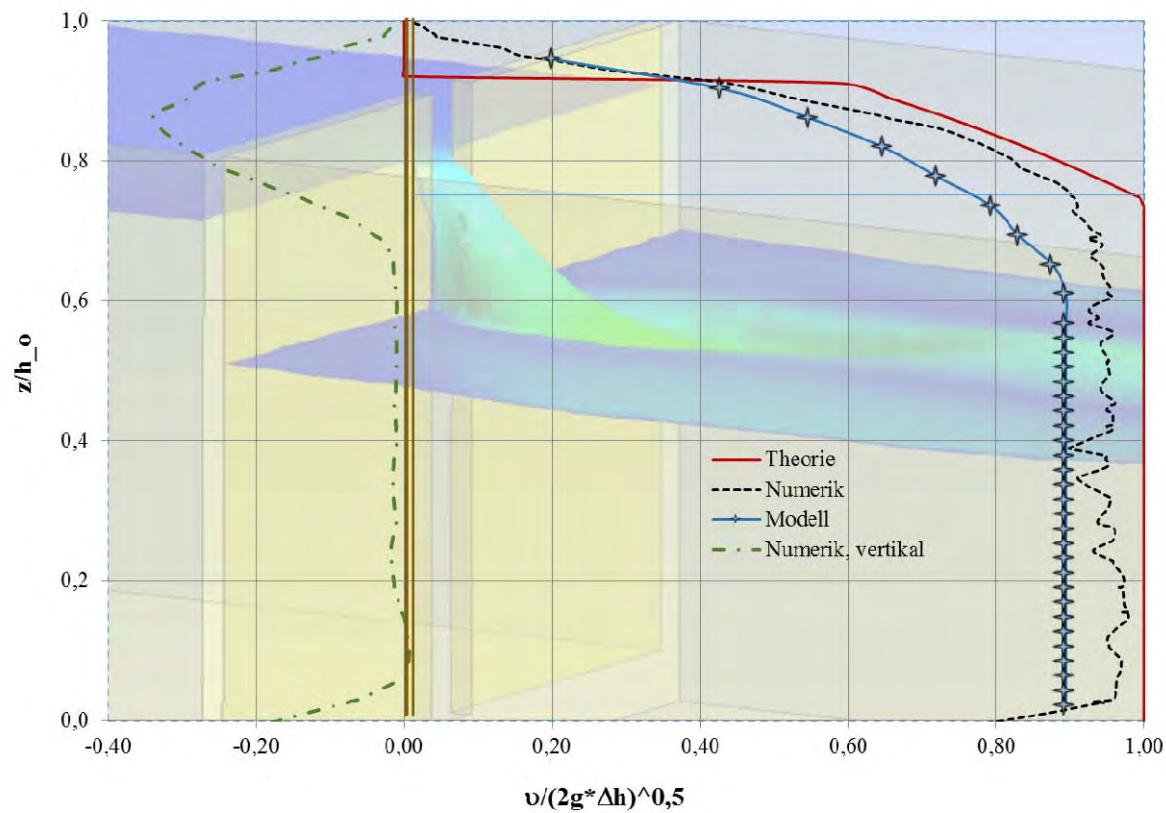
Überfall

Schlitzpass

Anwendung

Vergleich: Theorie, Modell und Numerik

Geschwindigkeitsermittlung im verengten Strahl (vena contracta)



Einleitung

Ausfluss

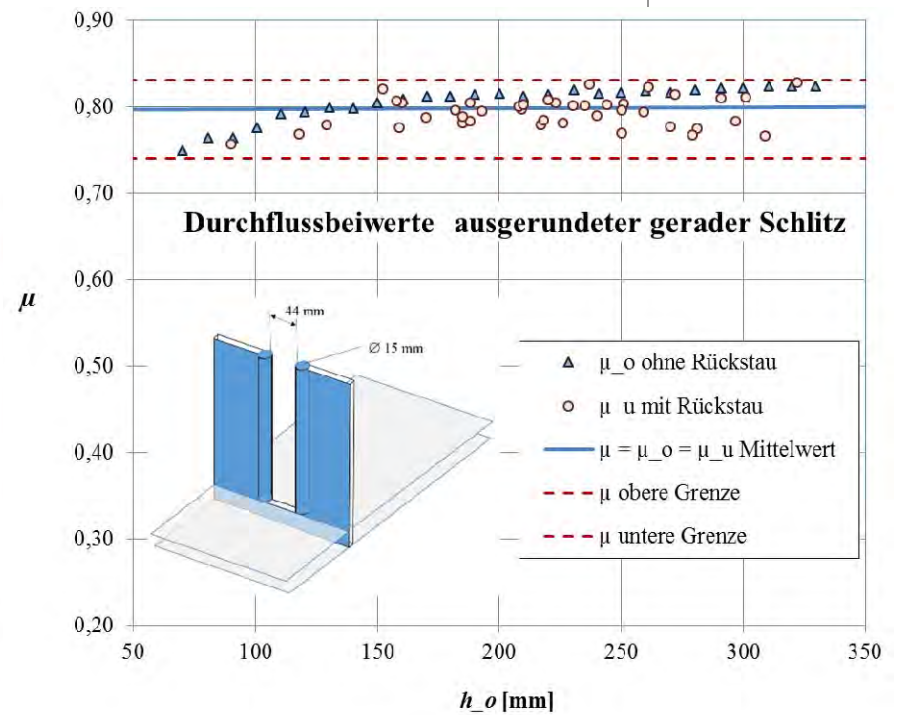
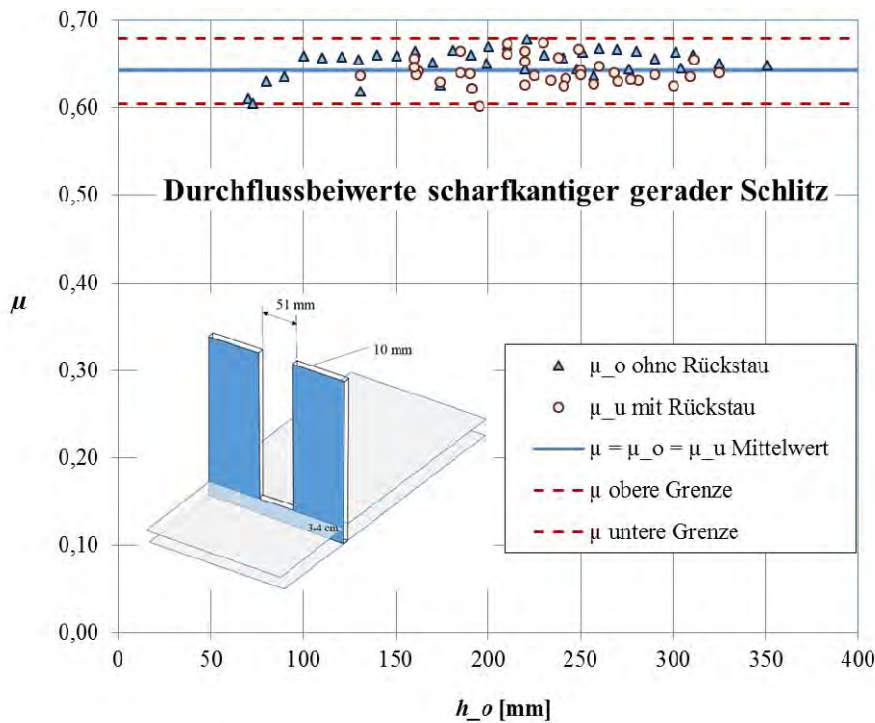
Überfall

Schlitzpass

Anwendung

Der Ausflussbeiwert gerader Schlitzpass

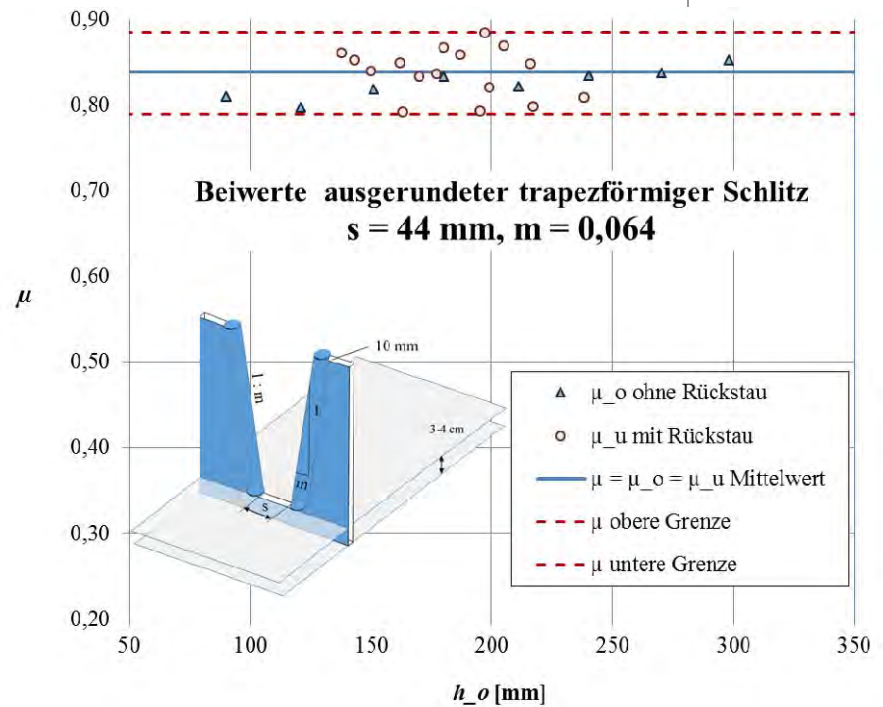
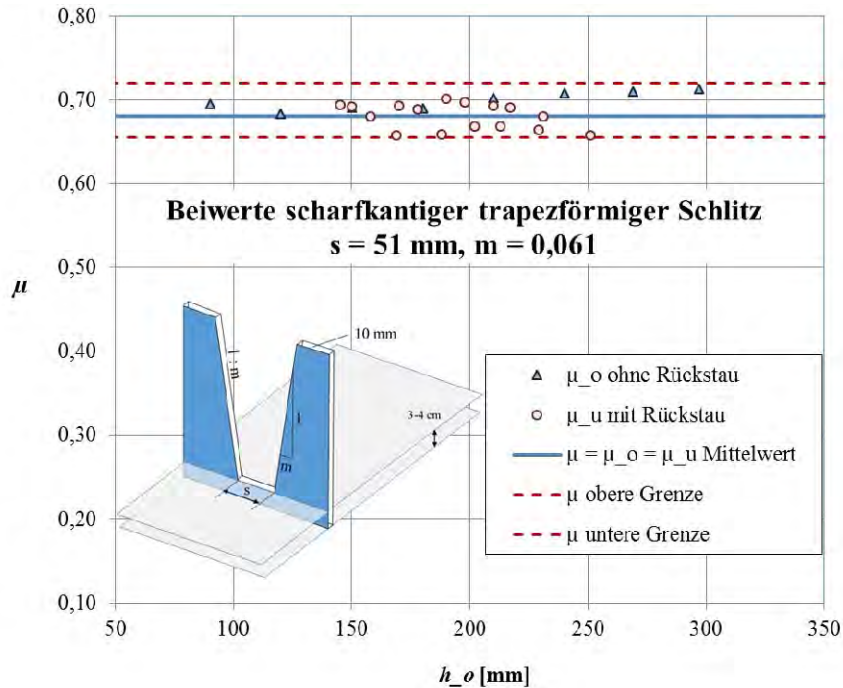
Messergebnisse aus dem physikalischen Modell.



Beiwert etwa 25% größer bei einem ausgerundeten Schlitz!

Der Ausflussbeiwert trapezförmiger Schlitzpass

Messergebnisse aus dem physikalischen Modell.



Beiwert etwa 25% größer bei einem ausgerundeten Schlitz!

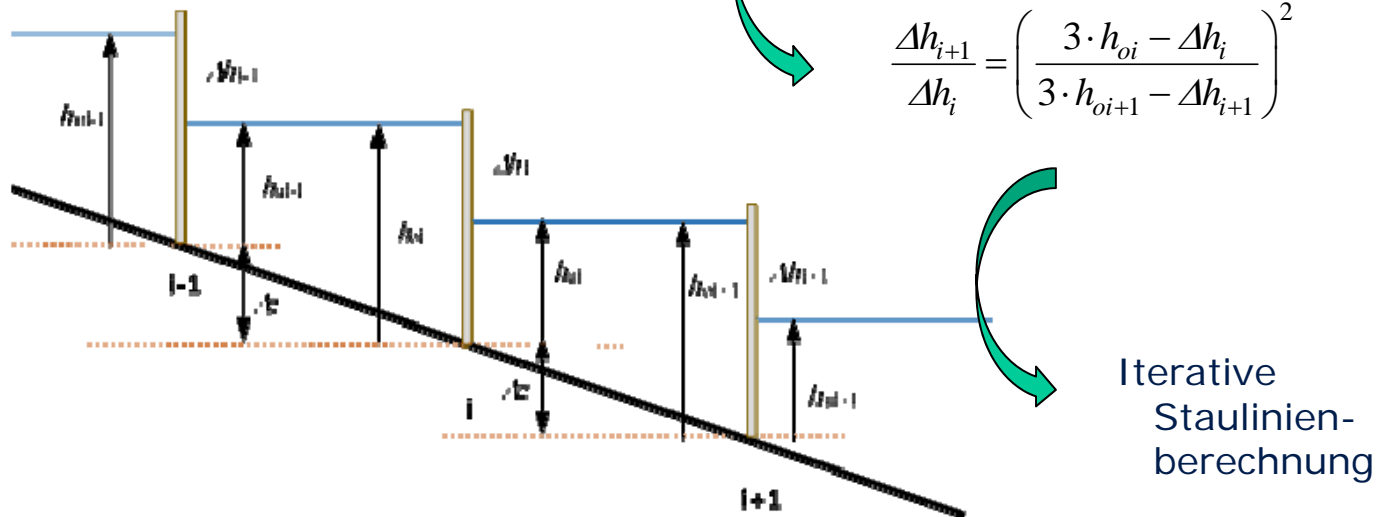
Berechnung von Stau- und Senkungslinien möglich!

$$Q_i = \mu \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \Delta h_i + h_{ui} \right) \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h_i} = \mu \cdot \left(h_{oi} - \frac{1}{3} \cdot \Delta h_i \right) \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h_i}$$

$$Q_{i+1} = \mu \cdot \left(h_{oi+1} - \frac{1}{3} \cdot \Delta h_{i+1} \right) \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h_{i+1}}$$

Kontinuität: $Q_i = Q_{i+1}$

$$\frac{\Delta h_{i+1}}{\Delta h_i} = \left(\frac{3 \cdot h_{oi} - \Delta h_i}{3 \cdot h_{oi+1} - \Delta h_{i+1}} \right)^2$$



Einleitung

Ausfluss

Überfall

Schlitzpass

Anwendung

Rückstau oder Absenkung des Unterwassers!

Eine iterative Berechnung der Wasserspiegellagen im Auslaufbereich einer Fischtreppe ist mit einem konstanten Auslaufbeiwert möglich!

Bei einem Rückstau (linkes Bild) kommt es zu einem höheren Wasserstand und zu einer Verringerung der WS-Differenz zwischen den Becken.

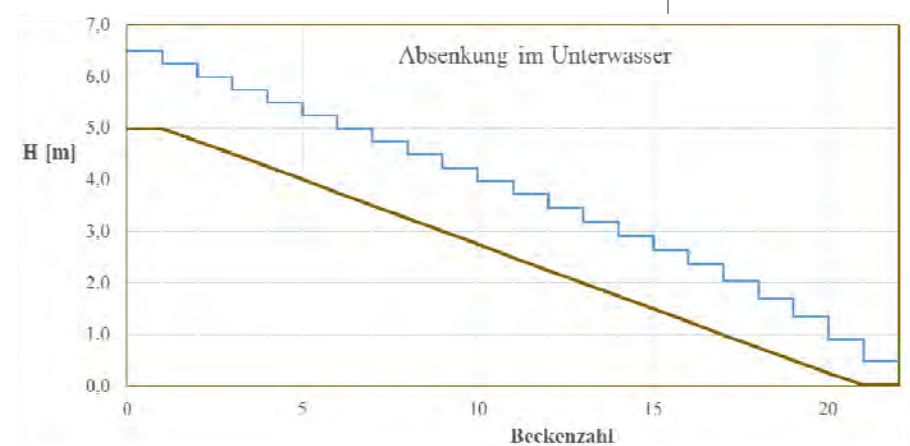
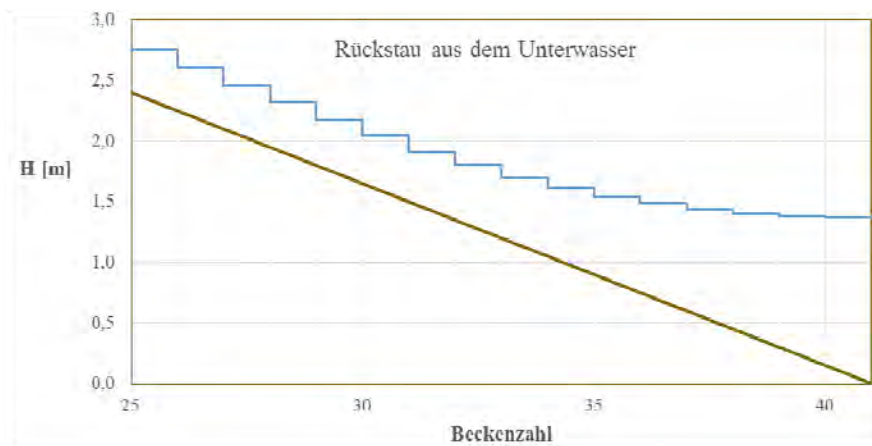
Eine Absenkung (rechtes Bild) verringert den Beckenwasserstand wodurch die Wasserspiegeldifferenz automatisch ansteigen muss.

Einleitung

Ausfluss

Überfall

Schlitzpass



Zusammenfassung

Der Schlitzpass ist ein rückgestauter Auslass. Der Durchfluss durch einen Schlitzpass kann aus einer Kombination aus Überfall- und Ausflussformel ermittelt werden kann.

Die Ausflussbeiwerte können als konstant angenommen werden. Sie werden vor allem durch die Einschnürung des austretenden Wasserstrahles, also durch die Form beeinflusst.

Eine iterative Berechnung der Wasserspiegellagen im Auslaufbereich einer Fischtreppe ist mit einem konstanten Auslaufbeiwert möglich!

Wegen eines konstanten Durchflusses ($Q = \text{constant}$) muss sich die Differenz der Wasserspiegellagen verkleinern, wenn der Beckenwasserstand größer wird und umgekehrt!

Bei einem Rückstau aus dem Unterwasser kommt es zur Ausbildung einer Staulinie, die sich auf mehrere Becken auswirkt. Die Lockströmung verringert sich.

Eine Absenkung des Unterwasserstandes führt zur Ausbildung einer Senkungslinie über mehrere Becken. Die Wasserspiegeldifferenz und damit die Geschwindigkeit im Schlitz in den unteren Becken wird bedeutend größer als geplant.

