

Blocksteinrampen in Riegelbauweise Neue Bemessungsansätze

Mario Oertel
Daniel Bung
Andreas Schlenkhoff

Blocksteinrampen in Riegelbauweise ermöglichen den Abbau einer größeren Sohlenstufe mittels einer zuvor bestimmten Anzahl an Becken. Die Riegel, welche quer zur Strömungsrichtung eingebracht werden, verursachen dabei den notwendigen Aufstau, um die Fließgeschwindigkeiten auf ein akzeptables Maß zu reduzieren und ggf. eine ökologische Durchgängigkeit zu gewährleisten. Der hier präsentierte Beitrag befasst sich diesbezüglich mit neuen Bemessungsansätzen in Bezug auf den Strömungswiderstand sowie die resultierende Energiedissipation, welche auch größere Abflusszustände implementieren und somit eine Bemessung für den Hochwasserfall ermöglichen. Zudem werden Stabilitätszustände betrachtet, um eine ausreichende Dimensionierung der Störsteine zu ermöglichen.

Stichworte: Blocksteinrampe, Strömungswiderstand, Energiedissipation, Stabilität

1 Einleitung

In der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (*EU-WRR 2000*) wird die Umgestaltung der vom Menschen veränderten Wasserkörper gefordert. Dabei ist das maßgebliche Ziel das Erreichen eines ökologisch „guten“ Zustandes. Über die (a) biologischen, (b) hydromorphologischen sowie (c) chemischen und chemisch-physikalischen Komponenten erfolgt dabei die Klassifizierung der vorliegenden oder erreichten Gewässerzustände. Wenn es die Randbedingungen zulassen, sind die im Zuge der Industrialisierung aufgestauten Gewässer in den naturnahen Zustand zurückzuführen, wobei auch ein „Schleifen“ der Wehre in Erwägung zu ziehen ist. Die verbleibenden Sprünge in der Sohle können dabei mit Hilfe von Längsbauwerken, wie Sohlgleiten oder Sohlenrampen (*DIN 4047 1989*), über einen längeren Fließweg moderat abgebaut werden. Dabei liegt das Ziel in der Reduzierung der Fließgeschwindigkeiten sowie dem Erreichen von Mindestwasserständen, welche eine Fischpassierbarkeit ermöglichen. Eine besondere Form der Sohlenrampen sind sogenannte Blocksteinrampen in

Riegelbauweise. Diese reduzieren die Sohlhöhe über quer zur Strömungsrichtung angeordnete Riegel mit sinkendem Höhenniveau. Die Querriegel werden dabei aus großen Wasserbausteinen (Durchmesser teils $> 1,0$ m) errichtet, welche im Sohlmaterial bis zu mehreren Dezimetern eingebunden werden. In manchen Fällen erfolgt gar eine Einbetonierung der großen Störsteine, um die Stabilität auch für extreme Abflussereignisse zu gewährleisten. In den Becken zwischen den Riegeln wird ein grobkörniges Sohlmaterial eingebracht ($D > 0,1$ m, je nach Bauwerk deutlich größer), welches die Sohle vor Erosion schützen und die großen Störsteine schützen soll. Abbildung 1 zeigt ein Foto einer Blocksteinrampe in Riegelbauweise in einem urbanen Gebiet. Es ist erkennbar, dass die Riegel an einigen Stellen durch kleinere Störsteine in der Höhe reduziert werden. Dies ermöglicht die Abführung der maßgeblichen mittleren Durchflüsse. Im Falle von überdurchschnittlichen Abflussereignissen erfolgt in zunehmendem Maße die Überströmung der kompletten Riegel über die gesamte Bauwerksbreite. Für die hydraulische Bemessung sind somit Strömungswiderstände sowie die hervorgerufene Energiedissipation relevant. Da Blocksteinrampen zumeist recht kostenintensiv sind, ist zudem die Betrachtung der Stabilitätskriterien ebenfalls ein maßgebliches Element der hydraulischen Bemessung. Hierbei sind zwei Stabilitätsbetrachtungen notwendig: (a) Stabilität der einzelnen Störsteine in den Riegeln (versagt ein Riegel, kann die Stabilität des Gesamtbauwerks gefährdet sein) und (b) Stabilität des Sohlsubstrats in den Becken (erodiert die Sohle, sinkt die Stabilität der Störsteine).



Abbildung 1: Foto einer zweigeteilten Blocksteinrampe in Riegelbauweise in Wuppertal Barmen, links: Bauzustand (Quelle: Wupperverband), rechts: Betriebszustand

2 Hydraulische und numerische Modellversuche

2.1 Hydraulisches Modell

Um die maßgeblichen Strömungscharakteristika auf Blocksteinrampen in Riegelbauweise zu identifizieren und daraus geeignete Bemessungsformeln abzuleiten, erfolgt die Errichtung eines hydraulischen Versuchsmodells im Wasserbaulabor der Bergischen Universität Wuppertal. Das Modell wird dabei im Maßstab 1:15 errichtet (Abb. 2). Für das hydraulische Modell wird eine fixe Bauwerksgeometrie mit folgenden Eigenschaften gewählt:

Abstand der Riegel (Beckenlänge): $L_b = 33$ cm

Höhe der Riegel: $h_B = 6$ cm

Rampenbreite: $W = 80$ cm

Rampenneigung: $S = 1:30$

Rampenlänge: $L_R = 200$ cm

Durchflüsse: $Q = 5$ bis 50 l/s

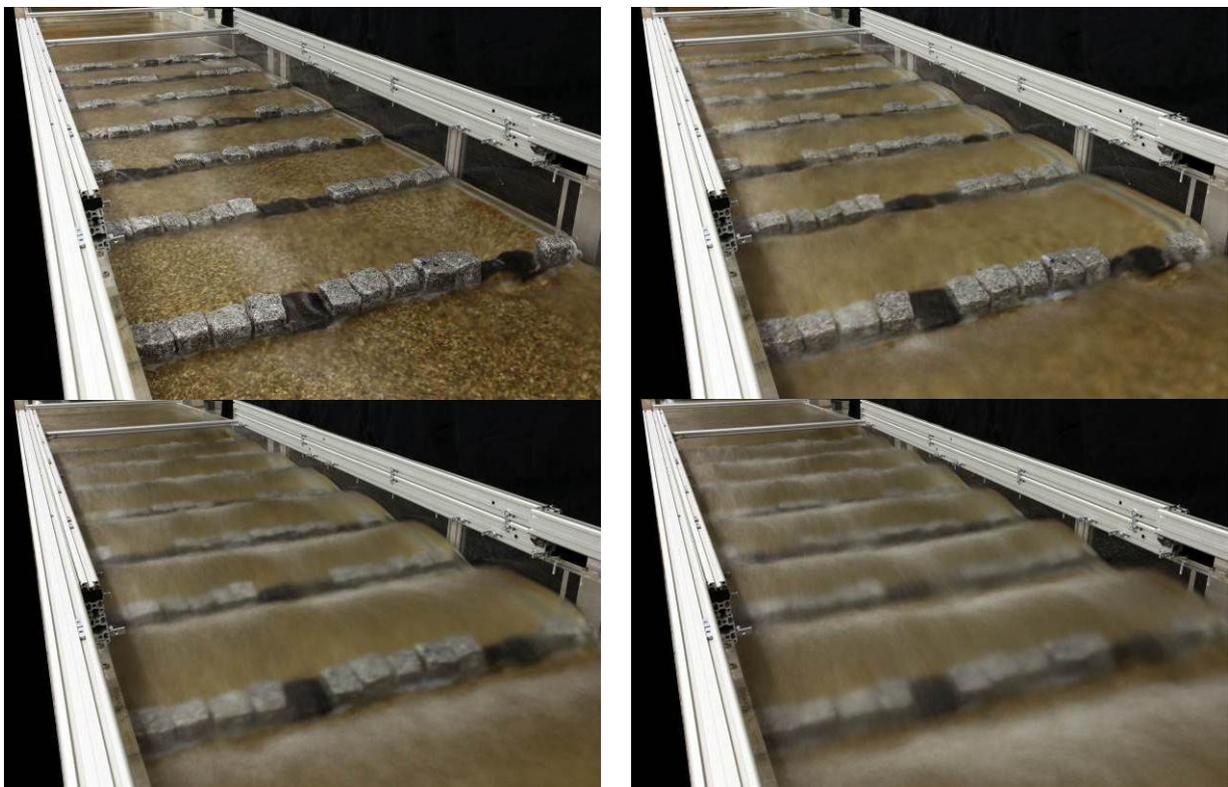


Abbildung 2: Foto ausgewählter Modellläufe ($Q = 5, 15, 30, 50$ l/s, links oben, rechts oben, links unten, rechts unten)

2.2 Numerisches Modell

Die Modellläufe des hydraulischen Modells werden herangezogen, um ein numerisches 3D-Modell zu kalibrieren. Das hierfür gewählte numerische Modell ist FLOW-3D[®] der Firma Flow Science. Das Modell wird mit etwa 2 Mio. Zellen und einem Gitter-Block erstellt. Als Einlauf- und Auslaufrandbedingung wird ein Wasserstand in Verbindung mit einer Geschwindigkeit vergeben. Das Renormalize-Group (RNG) Turbulenzmodell wird gewählt. Die Ermittlung der freien Wasserspiegellage erfolgt in FLOW-3D mit Hilfe der Volume-of-Fluid (VOF) Methode (Hirt und Nichols 1981). Nach der erfolgreichen Reproduzierung der hydraulischen Modellläufe (Abb. 3, Abb. 4) erfolgt die Ausweitung des Versuchsprogramms. Dabei werden die folgenden geometrischen Randbedingungen gewählt:

Abstand der Riegel (Beckenlänge): $L_b = 33$ cm und 39 cm

Höhe der Riegel: $h_B = 6$ cm und 9 cm

Rampenneigung: $S = 1:50, 1:30, 1:20, 1:10$

Durchflüsse: $Q = 5$ bis 200 l/s

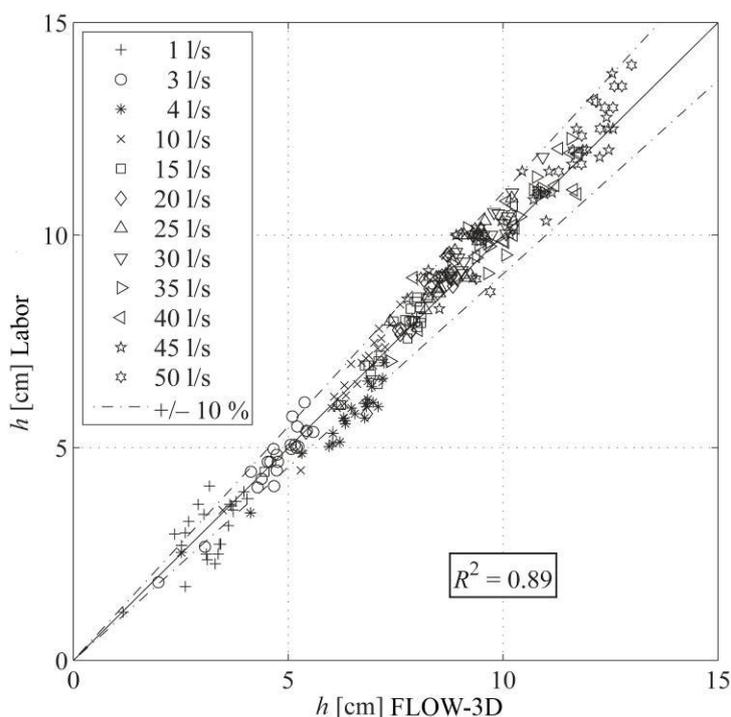


Abbildung 3: Qualität der numerischen Modellergebnisse im Vergleich zum hydraulischen Modell

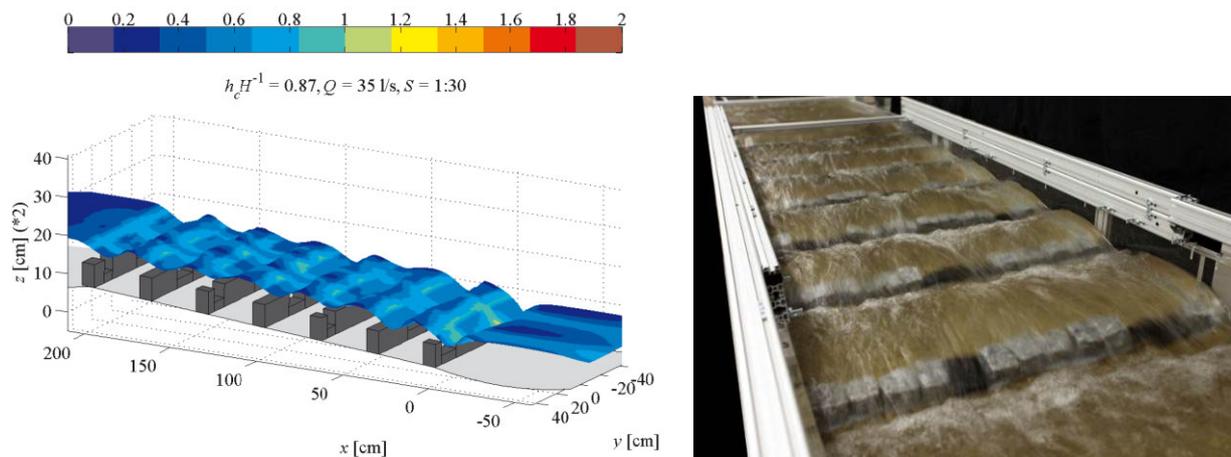


Abbildung 4: Beispielhaftes, vergleichendes Ergebnis eines hydraulischen und numerischen Versuchslaufs, $Q = 35 \text{ l/s}$, $S = 1:30$, $L_b = 33 \text{ cm}$, $h_B = 6 \text{ cm}$

3 Ergebnisse

3.1 Abflussregime

Wie bereits in *Oertel (2011)* beschrieben, erfolgt der Abfluss auf Blocksteinrampen in Riegelbauweise in drei maßgeblichen Strömungsregimen: (a) Beckenabfluss, (b) gewellter Abfluss und (c) Gerinneabfluss. Dabei kann als dominantes Kriterium der Abfluss mit den sich einstellenden Wasserständen angenommen werden. Zudem beeinflussen die Neigung sowie Riegelabstand und Riegelhöhe den Zeitpunkt des Eintretens des jeweils nächsten Abflussregimes. Die Beckenströmung ist gekennzeichnet durch eine nahezu waagerechte Wasserspiegellage. Dabei erfolgt der Abfluss fast ausschließlich über die tiefer liegenden Störsteine in den Riegeln ($h \leq h_B$). Für steigende Abflüsse werden zunehmend auch die großen Störsteine überströmt und der Abfluss gerät in einen gewellten, quasi-stationären Zustand ($h_B \leq h \leq 1.5h_B$). Für sehr große Abflüsse ($h > 1.5h_B$) glättet sich die Wasserspiegellage allmählich und ein gleichförmiger, parallel zur Sohle verlaufender Gerinneabfluss stellt sich ein. Abbildung 5 zeigt eine beispielhafte Entwicklung der Abflussregime für steigende Durchflüsse.

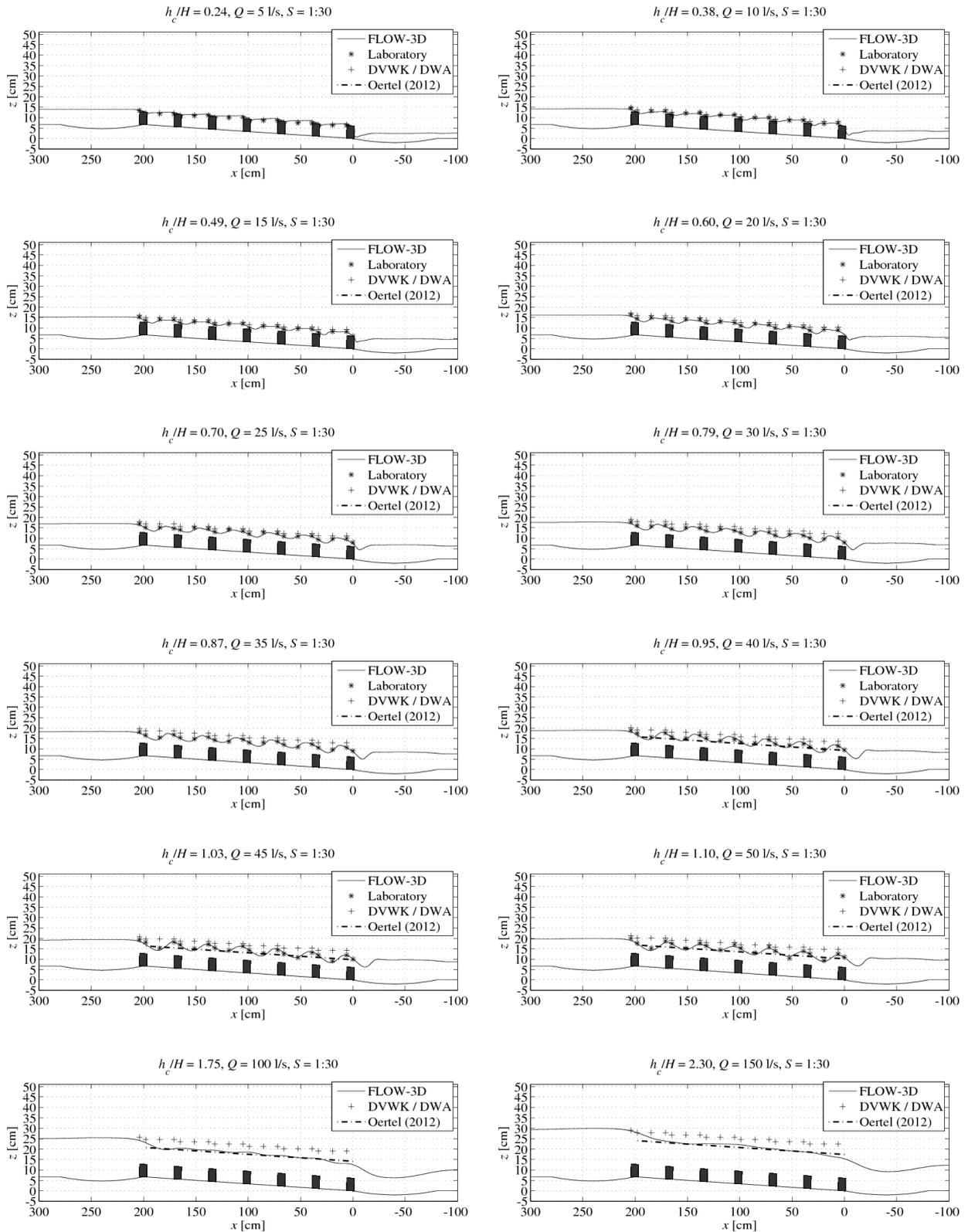


Abbildung 5: Bsp. Entwicklung der Abflussregime, $S = 1:30, L_b = 33 \text{ cm}, h_B = 6 \text{ cm}$

3.2 Berechnung von Wasserständen, Strömungswiderstand und Energiedissipation

Die hydraulischen und numerischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Berechnung der Wasserstände für den Beckenabfluss hinreichend genau mit einem iterativen Ansatz nach Poleni erfolgen kann:

$$Q = \frac{2}{3} C_w W \sqrt{2g} h_w^{3/2} \quad (1)$$

mit: Q = Durchfluss, C_w = Abflussbeiwert, W = Bauwerksbreite, g = Erdbeschleunigung, h_w = Überfallhöhe (tiefe und große Störsteine separat).

Im gewellten Abflussregime kann ein Forschungsdefizit identifiziert werden, da die Wellenberge und Täler nicht hinreichend genau abgebildet werden können (siehe Abb. 5). Für den Gerinneabfluss, also für eine sich einstellende gleichförmige Strömung auf dem Bauwerk, hat sich ein Ansatz unter Einbeziehung von Reibungsbeiwerten als anwendbar erwiesen:

$$U = \sqrt{\frac{8}{f}} \sqrt{grS} \quad (2)$$

mit: U = mittlere Fließgeschwindigkeit, f = Reibungsbeiwert, r = hydraulischer Radius, S = Rampenneigung. Der Reibungsbeiwert lässt sich dabei über einen logarithmischen Ansatz ermitteln (*Oertel und Schlenkhoff 2012*):

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \left(4,4 + \frac{0,09}{S}\right) \log\left(\frac{h}{h_B}\right) + \left(2,2 - \frac{0,0023}{S}\right) \quad (3)$$

Die somit berechneten gleichförmigen Wasserspiegellagen sind gestrichelt in Abb. 5 dargestellt.

Neben den Wasserständen ist die Energiedissipation auf dem Bauwerk von Relevanz. Hier kann auf einen Ansatz nach *Pagliara und Chiavaccini (2006)* zurückgegriffen werden:

$$\Delta E_r = a_1 + (1 - a_1) \exp\left((a_2 + a_3 S) \frac{h_c}{H}\right) \quad (4)$$

mit: $\Delta E_r = (E_0 - E_1)/E_0 =$ relative Energiedissipation, $E_0 =$ Energiehöhe Oberwasser, $E_1 =$ Energiehöhe Unterwasser, $a_{1..3} =$ Parameter, $h_c = (Q^2 g^{-1} W^{-2})^{1/3} =$ Grenzwassertiefe, $H =$ Rampenhöhe.

Nach *Oertel und Schlenkhoff (2012)* erfolgt dabei eine Anpassung der Beiwerte $a_{1..3}$ wie folgt:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,17 + \frac{0,0017}{S} \\ a_2 &= -0,7 + \frac{0,0073}{S} \\ a_3 &= -4,9 - \frac{0,26}{S} \end{aligned} \quad (5)$$

Aus Gleichung 4 zeigt sich, dass die relative Energiedissipation in Abhängigkeit der kritischen Wassertiefe (Durchfluss), der Rampenhöhe sowie der Neigung erfolgen kann. Mit steileren Rampen nimmt dabei die Energiedissipation ab. Ebenso mit steigenden Durchflüssen.

3.3 Stabilität

Die Stabilität einer Blocksteinrampe in Riegelbauweise hängt maßgeblich von der Stabilität der großen Störsteine ab. Damit diese ausreichend groß dimensioniert werden können, ist das Wissen über die angreifenden Strömungskräfte unabdingbar. In diesem Bezug erfolgt die direkte Messung von Kräften in Strömungsrichtung mit Hilfe von vertikal installierten Wägezellen im hydraulischen Modell. Vergleichend werden aus dem numerischen Modell Druckspannungen ober- und unterwasserseitig der Störsteine zu resultierenden Kräften integriert. Oertel (2012) entwickelt in diesem Zusammenhang die folgende Funktion:

$$\frac{F_D}{F_s} = (17S + 0.7) \left(\frac{h_c}{h_B} \right)^{(2,2S+0,5)} \quad (6)$$

mit: $F_D =$ Strömungskraft, $F_s = 0,5\rho gh_B A_B =$ statische Vergleichskraft, $\rho =$ Dichte, $h_B =$ Störsteinhöhe, $A_B =$ Störsteinfläche in Strömung.

Mit Hilfe von Gleichung 6 lassen sich Kräfte auf einzelne Störsteine näherungsweise bestimmen. Dabei sei angemerkt, dass die vorliegende dreidimensionale Strömung aber zu abweichenden Kräften führen kann. Insbesondere der Ort der Störsteine, z. B. unmittelbar unterhalb einer Öffnung in den Riegeln, kann zu variierenden Ergebnissen führen.

4 Zusammenfassung und Fazit

Blocksteinrampen in Riegelbauweise sind moderne Bauwerke, welche als naturnahe Lösung zur Überwindung größerer Höhenunterschiede herangezogen werden können. Für eine hydraulische Bemessung sind Wasserstände auf dem Bauwerk sowie die Energiedissipation zu bestimmen. Die in diesem Beitrag aufgeführten Gleichungen können für derartige Bauwerke herangezogen werden, wobei insbesondere für den Gerinneabfluss mit gleichförmiger Wasserspiegellage einen gesonderten Ansatz mit Reibungsbeiwerten empfohlen wird. Hier führt ein standardisierter Ansatz nach Poleni zu überschätzen Wasserständen. Für den gewellten Abfluss kann ein Forschungsdefizit identifiziert werden. Die Energiedissipation auf dem Bauwerk lässt sich mit einem Exponentialansatz bestimmen. In Bezug auf die Stabilität des Bauwerks wird eine Formel präsentiert, mit deren Hilfe sich die Kräfte auf einzelne Störsteine in den Riegeln bestimmen lassen. Hier ist darauf zu achten, dass örtliche Gegebenheiten zu abweichenden Kräften führen können.

5 Literatur

- DIN 4047 (1989): Landwirtschaftlicher Wasserbau. Teil 5: Begriffe, Ausbau und Unterhaltung von Gewässern. DIN-Norm, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- EU-WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik
- DWA (2010): Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. *DWA-Merkblatt M509*, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef
- DVWK (1996): Fischaufstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. DVWK-Merkblatt 232, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., Bonn
- Hirt, Nichols (1981): Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Computat. Phys.*, 39(1), 201-225
- Oertel, M. (2011): Strömungsvisualisierung auf Blocksteinrampen in Riegelbauweise, *WasserWirtschaft*, 9/2011, Organ der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef
- Oertel, M. (2012): Cross-bar Block Ramps. Habilitationsschrift, Bergische Universität Wuppertal, in print
- Oertel, M., Schlenkhoff, A. (2012): Cross-Bar Block Ramps – Flow Regimes, Energy Dissipation, Friction Factors, Drag Forces. *J. Hydr. Engng.*, ASCE, in print
- Pagliara, S., Chiacaccini, P. (2006): Energy Dissipation on Block Ramps. *J. Hydr. Engng.*, ASCE, 132(1), pp. 41-48

Autoren:

Dr.-Ing. Mario Oertel
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Schlenkhoff

LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau
Bergische Universität Wuppertal
Pauluskirchstr. 7
42285 Wuppertal

Tel.: +49 202 439 4133
Fax: +49 202 439 4196
E-Mail: m.oertel@uni-wuppertal.de

Prof. Dr.-Ing. Daniel Bung

Lehrgebiet Wasserbau
FH Aachen University of Applied Sciences
Bayernallee 9
52066 Aachen