

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Sokoray-Varga, Béla; Kerlin, Tim; Prinz, Frederik; von Meltzer, Jonas; Musall, Mark; Weichert, Roman

Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen

BAWMitteilungen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107295>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Sokoray-Varga, Béla; Kerlin, Tim; Prinz, Frederik; von Meltzer, Jonas; Musall, Mark; Weichert, Roman (2020): Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen. In: BAWMitteilungen 106. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 43-48.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen

Dr.-Ing. Béla Sokoray-Varga, Bundesanstalt für Wasserbau

Tim Kerlin M. Sc., Karlsruher Institut für Technologie

Dipl.-Ing. Frederik Prinz, Bundesanstalt für Wasserbau

Jonas von Meltzer M. Sc., Fichtner Water & Transportation GmbH

Dr.-Ing. Mark Musall, Dr.-Ing. Peter Oberle, Karlsruher Institut für Technologie

Dr. sc. techn. Roman Weichert, Bundesanstalt für Wasserbau

Im Rahmen von Modelluntersuchungen an der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) sowie am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wurde der Einfluss von Sohl- und Wandrauheiten auf die Hydraulik von Schlitzpässen untersucht. Hierbei zeigte sich, dass kein wesentlicher Unterschied hinsichtlich der Durchfluss-Fließtiefen-Beziehung zwischen den im Modell getesteten Varianten eines glatten Rinnenbodens, einer mit Halbkugeln belegten Sohle oder einer aus Granitschotter bestehenden Sohle existiert. Auch der Einfluss auf die Fließgeschwindigkeitsverteilung im Schlitzpass kann für die getesteten Bedingungen eines glatten Rinnenbodens und einer mit Halbkugeln belegten Sohle als vernachlässigbar bezeichnet werden. Die Ergebnisse belegen, dass die wesentlichen hydraulischen Verluste in einem Schlitzpass durch die Geometrie der Becken und die Schlitz- bzw. Trennwandgestaltung bestimmt werden.

In hybriden Modelluntersuchungen wurde zudem der Einfluss einer offenen Spundwand als seitliche Berandung bei Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass das sich in den Becken einstellende Strömungsmuster und damit zu einem gewissen Grad auch der Anlagendurchfluss unter bestimmten Randbedingungen durch die Wandgestaltung beeinflusst werden können.

1 Einleitung

Der Schlitzpass, ein sehr häufig eingesetzter Bautyp für Fischaufstiegsanlagen, wird in aller Regel aus Beton hergestellt, wobei die den Schlitzpass kennzeichnenden Einbauten wie Trennwände oder Umlenkblöcke auch aus anderen Materialien, wie z. B. Holz, hergestellt sein können. Auf die Betonsohle wird gemäß einschlägigen Empfehlungen eine mindestens 0,3 m dicke Substratschicht aufgebracht (z. B. DWA 2014), welche insbesondere für Makrozoobenthos und bodennah wandernde Fische Vorteile hinsichtlich der ökologischen Durchgängigkeit aufweist (Bild 1). Eine kostengünstige Möglichkeit für die Ausführung der Schlitzpasswand stellt die dauerhafte Nutzung des Baugrubenverbaus z. B. in Form einer Spundwand (Bild 1) dar.

Die Strömung entlang oder über rauen Oberflächen ist grundsätzlich ein intensiv untersuchtes Themenfeld. Als grundlegende Eigenschaft dieser Strömungen kann festgehalten werden, dass in Sohl- bzw. Wandnähe eine Zone existiert, in der sich die Geschwindigkeiten und die Turbulenzeigenschaften von denen in der freien Wassersäule unterscheiden. In Abhängigkeit der Rauheitsstruktur an Wand bzw. Sohle sowie weiterer Parameter, wie beispielsweise Gefälle oder Abfluss, wirken sich Wand- bzw. Sohlrauheiten daher mehr oder weniger stark auf



Bild 1: Trockengelegter Schlitzpass mit rauher Sohle und Betonwand an der Stauanlage Koblenz/Mosel (links); Spundwand als Wandelement eines Schlitzpasses (rechts; Quelle: D. Schmidt, team ferox GmbH, Dresden)

Fließwiderstand und Strömungsgeschwindigkeiten aus. Der Schwerpunkt in der internationalen Literatur liegt auf Untersuchungen von Gerinneströmungen unter Normalabflussbedingungen (siehe z. B. Bezzola 2002). Die Fließvorgänge in einem Schlitzpass weichen von Normalabflussbedingungen jedoch deutlich ab, sodass die dafür vorhandenen Erkenntnisse über die Ausbildung und Charakteristik der wand- und sohlnahen Strömungsfelder nicht ohne Weiteres auf Schlitzpässe übertragen werden können.

Im vorliegenden Artikel werden Untersuchungen vorgestellt, die an der BAW sowie am KIT durchgeführt wurden. Während an der BAW die Wirkung einer rauhen Sohle auf hydraulische Verluste und Fließgeschwindigkeiten im Vordergrund stand, wurde am KIT die Strömung in Schlitzpässen mit Spundwänden und ohne Spundwände als seitliche Berandung untersucht.

2 Untersuchungen zur Sohllrauheit in Schlitzpässen

2.1 Fließtiefen-Durchfluss-Relation

Im Beitrag von Sokoray-Varga et al. „Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen“ (in diesem Heft) werden die an KIT und BAW durchgeführten Versuche zur Fließtiefen-Durchfluss-Relation beschrieben. Diese Untersuchungen bestätigen grundsätzlich die Ergebnisse vorheriger Studien, dass in einem Schlitzpass zwischen der Fließtiefe und dem Durchfluss im gesamten für die Verhältnisse an Bundeswasserstraßen praxisrelevanten Betriebsspektrum ein linearer Zusammenhang besteht. Nachfolgend soll daher der Fokus auf einem Vergleich zwischen Versuchen mit glatter und rauher Sohle liegen. Die Versuche wurden in einem gegenständlichen Modell mit einem Maßstab $M = 1 : 4,1$, bestehend aus neun Becken und mit einer Sohlneigung von 2,8 %, durchgeführt. Die Abmessungen der Becken orientieren sich an den Angaben des DWA (2014). Die Sohle und die Seitenwände des Modells sind aus Plexiglas, die sonstigen Beckeneinbauten aus Holz. Neben Versuchen ohne Rauheit (nachfolgend als glatt bezeichnet) wurden Untersuchungen mit Halbkugeln (Durchmesser 50 mm) und mit Granitschotter der Größenklasse 32/56 mm durchgeführt (Bild 2).

Die Ergebnisse der Versuche sind in Bild 3 zusammengefasst. Dargestellt sind die im Modell gemessenen Durchflüsse und Fließtiefen. Für die Versuche ohne Rauheit ist der Bezugshorizont der Sohle als untere Begrenzung der Fließtiefe der Rinnenboden. Für die Versuche mit

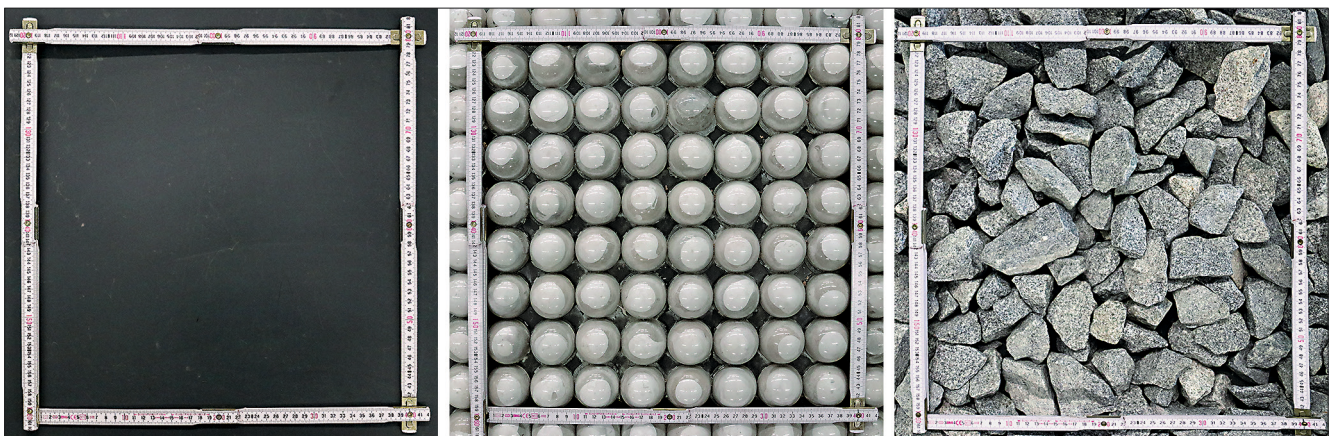


Bild 2: Untersuchte Sohllrauheiten glatt (links), Halbkugeln $D = 50$ mm (Mitte) und Granitschotter 32/56 mm (rechts)

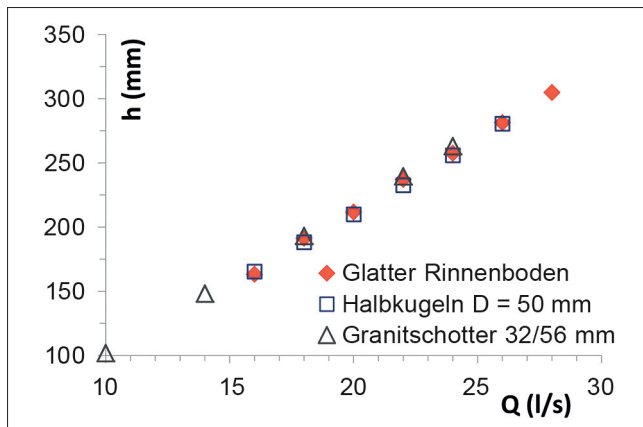


Bild 3: In gegenständlichen Modellversuchen gemessene Durchflüsse und Fließtiefen für drei verschiedene Rauheiten

Rauheit wurde dieser Bezugswert auf 25 % (des Kugeldurchmessers bzw. des Durchmessers der größten Steine) unterhalb der Rauheitsspitzen gesetzt. Dies entspricht einer Größenordnung, wie sie auch für Gerinneströmungen üblich ist (z. B. Dittrich 1998). Aufgrund der Notwendigkeit, bei rauen, unregelmäßigen Sohlen Annahmen zum Bezugshorizont der Sohle zu treffen, ist letztendlich der Anteil der Rauheit am Fließwiderstand nicht exakt ableitbar. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass die Rauheit keinen signifikanten Einfluss auf die Fließtiefe besitzt. Dieses wiederum bedeutet, dass die Verluste in den vorliegenden Untersuchungen im Wesentlichen durch die Fließvorgänge im Bereich der Trennwände und des Schlitzes hervorgerufen werden. Ein anhand von Versuchen mit glatter Rinnenboden abgeleiteter linearer Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe ist demgemäß auch für reale Verhältnisse mit rauer Sohle gültig.

2.2 Fließgeschwindigkeiten

Der im vorigen Abschnitt festgestellte lineare Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe gibt einen Hinweis auf die Zweidimensionalität des Strömungsfeldes in einem Schlitzpass. Dieser Aspekt kann durch die direkte Messung der Fließgeschwindigkeit in einem Schlitzpass vertiefter betrachtet werden. Für die zwei bereits beschriebenen Rauheitszustände „glatter Rinnenboden“ und „Halbkugeln“ wurden in der BAW Messungen der Fließgeschwindigkeit durchgeführt. Zur Messung der Fließgeschwindigkeiten stand ein Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) zur Verfügung, der über eine Traversierung

im Modell positionierbar war und eine Messfrequenz von 200 Hz hatte. Es wurde an insgesamt 536 Punkten im Becken in vier Tiefen gemessen (134 Punkte pro Ebene). Um statistisch stationäre Mittelwerte zu erhalten, war pro Messpunkt jeweils eine Messdauer von drei Minuten notwendig. Die Fließgeschwindigkeitsmessungen fanden im sechsten Becken des im Labor eingebauten Schlitzpasses ausschließlich bei einem Durchfluss von 20 l/s bei gleichförmigem Abflusszustand statt.

Die zeitlichen Mittelwerte der durchgeführten Fließgeschwindigkeitsmessungen sind in Bild 4 dargestellt. In den Bereichen zwischen den Gitterpunkten wurde linear interpoliert. Die Messergebnisse in unterschiedlichen Höhen über der Sohle zeigen keine signifikanten Unter-

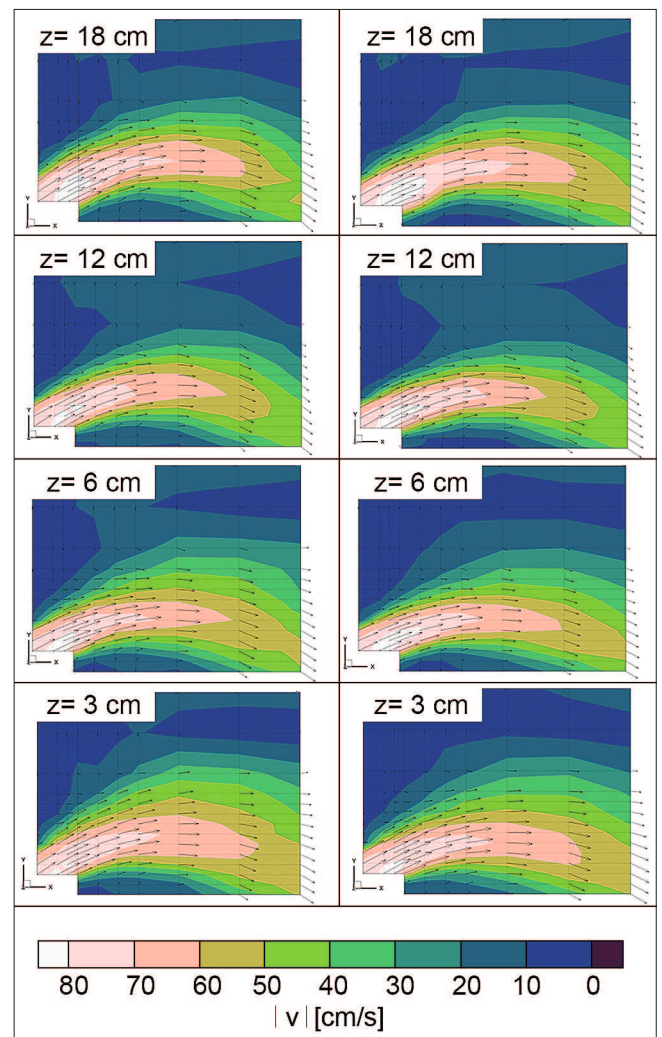


Bild 4: Gemessene, zeitlich gemittelte Fließgeschwindigkeiten bei einem Durchfluss von 20 l/s in unterschiedlichen Höhen z über glatter (links) bzw. rauer Sohle mit Halbkugeln (rechts); die Farbskala zeigt den Betrag der Geschwindigkeit

schiede, was die Erfahrungen aus der Literatur bestätigt. Zwischen den Ergebnissen über glatter und rauher Sohle mit Halbkugeln können ebenfalls nur sehr geringe Unterschiede festgestellt werden.

3 Untersuchung zur Wirkung von Spundwänden in Schlitzpässen

3.1 Datengrundlage

Im Wasserbaulaboratorium des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung des KIT wurde die Planung einer Fischauftstiegsanlage an einem Nebengewässer im Oberrheingebiet im Maßstab 1 : 3 nachgebildet (vgl. auch Musall et al. 2017 bzw. Oberle et al. 2018). Die Schlitzeinbauten wurden als einzelne, variabel verschiebbare Module gefertigt und die Versuchsreihe jeweils mit unterschiedlichen Beckenlängen durchgeführt. Hierdurch konnte der Einfluss der Spundwandberandung auf die drei wesentlichen Strömungsmuster eines Schlitzpässes untersucht werden („Strömungsmuster 1 bzw. strömungsstabil“, „Strömungsmuster 2 bzw. strömungsdissipierend“ und Übergangsbereich; vgl. auch DWA 2014 bzw. Beitrag von Höger et al. „Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen“ in diesem Heft). Die Sohlneigung betrug 4 % und die Beckenanzahl lag je nach untersuchter Variante bei sieben bis zehn Becken. Die genutzte Spundwandberandung wurde einem für derartige wasserbauliche Anlagen typischen Larssen-Profil 24 nachempfunden (ThyssenKrupp 2010). Einzelne Spund-

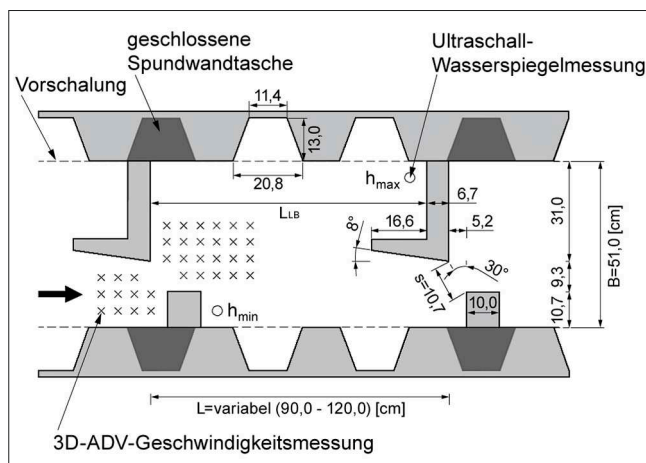


Bild 5: Planskizze des Modellaufbaus im Modellmaßstab 1 : 3

wandtaschen wie auch die gesamte Spundwand konnten geschlossen werden, um die Versuche auch mit glatter Beckenwand (Vorschalung) durchführen zu können. Ergänzend wurde zudem eine 3D-numerische Simulationsstudie durchgeführt. Bild 5 zeigt den Versuchsaufbau sowie die Lage der Messpunkte der Fließgeschwindigkeit sowie des Wasserstands.

3.2 Ergebnisse

Zunächst wurde der Ausschnitt des Schlitzpässes gemäß der ursprünglichen Planung mit einem Breiten-zu-Längen-Verhältnis $B/L_{LB} = 0,61$ untersucht. Der Einsatz von Spundwänden im Gegensatz zu einer Vorschalung führte zu keiner erkennbaren Beeinflussung der Strömungscharakteristik (vgl. Bild 6). In beiden Fällen wurde ein „strömungsstabiler“ Zustand mit nur leichten Schwankungen beobachtet. Die Rezirkulationszone im Strömungsschatten des Umlenkblocks reichte nun allerdings bis in die offene Spundwandtasche hinein, während sich in den anderen Spundwandtaschen beruhigte Bereiche oder nur kleinere Wirbel ohne Auswirkung auf die Hauptströmung ausbildeten. Auch eine offene Spundwandtasche direkt vor dem Umlenckblock ergab keinen erkennbaren Einfluss auf den Durchströmungswinkel des Schlitzes. Die Fließtiefen mit offener Spundwandberandung lagen nur unwesentlich unter denen mit Vorschalung, wobei die Differenzen durchaus auf Mo-

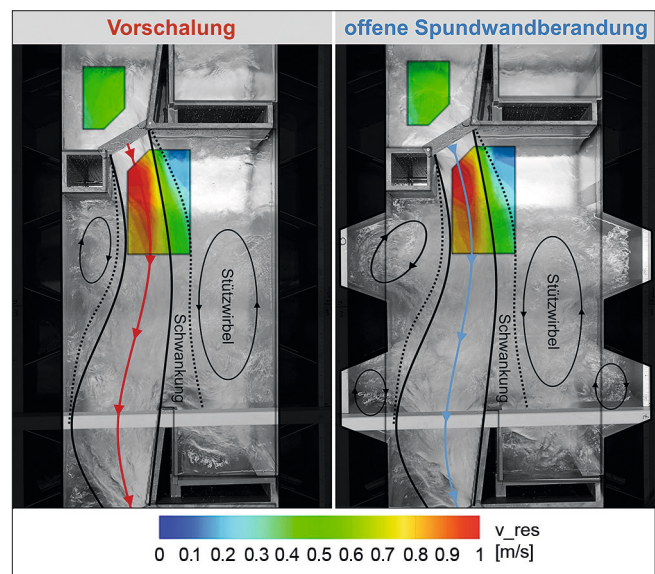


Bild 6: Strömungssituation bei $B/L_{LB} = 0,61$ mit Vorschalung (links) und mit offener Spundwandberandung (rechts)

dell- bzw. Messungenauigkeiten zurückgeführt werden könnten. Auch die gemessenen Fließgeschwindigkeiten waren in den untersuchten Becken nahezu identisch.

Nach Verlängerung der Becken, was zu einem $B/L_{LB} = 0,45$ führte, konnte sowohl mit offener Spundwandberandung als auch mit Vorschalung ein „strömungsdissipierendes“ Verhalten beobachtet werden. Mit Vorschalung bildete sich ein stark gebogener Strömungspfad aus, welcher zunächst auf die linke Außenwand prallte, an der querstehenden Leitwand umgelenkt wurde und schließlich noch auf die rechte Außenwand traf. Unterstrom des Umlenkblocs entwickelte sich hierbei eine große Rezirkulationszone (vgl. Bild 7). Die offene Spundwandprofilierung führte demgegenüber, bedingt durch kleine Wirbelstrukturen in den Spundwandtaschen, welche den Strahl zur Mitte hin drücken, zu einer vergleichsweise geradlinigeren Strömungssignatur. Ein zusätzlicher starker Aufprall auf die rechte Außenwand blieb im Allgemeinen aus bzw. erfolgte nur noch gelegentlich im Rahmen unregelmäßiger Schwankungen. Die Durchflusskapazität der Variante mit offener Spundwandberandung liegt jedoch ca. 5 % über der mit Vorschalung. Ursächlich dafür erscheinen im Wesentlichen die geringeren Umlenkungsverluste bedingt durch den tendenziell geradlinigeren Strömungsverlauf. Dies führte im vorliegenden Fall allerdings nicht zu der erwarteten Zunahme der maxi-

malen Fließgeschwindigkeiten. Die Abweichung vom optimalen Anströmwinkel des Schlitzes orthogonal zur Schlitzachse reduziert sich durch die offene Spundwandberandung von 12° auf 4° , wodurch sich der wirksame Strömungsanteil erhöht und der Querschnitt besser genutzt wird.

Bei einer weiteren Änderung der Beckenlänge, aus welcher ein $B/L_{LB} = 0,56$ resultierte, konnte mit Vorschalung in den obersten drei Becken ein „strömungsstabiler“ und in den untersten drei Becken ein „strömungsdissipierender“ Zustand beobachtet werden. Die mittleren Becken 4 bis 6 wiesen hingegen kein eindeutiges Strömungsmuster auf und ließen sich folglich dem Übergangsbereich zuordnen. Hier lag ein unregelmäßiger Wechsel zwischen leicht geschwungener Hauptströmung von Schlitz zu Schlitz bis hin zu einem stark gekrümmten Strahl, welcher auf beide Außenwände traf (vgl. Bild 8), vor. Zeitweise kam es auch zu Strömungsverhältnissen, die keinem der beiden Muster zuzuordnen waren, wobei diese Übergangsphasen im Modell ca. 4 s bis 35 s (Naturmaßstab: 7 s bis 60 s) andauerten und die jeweiligen charakteristischen Strömungsmuster für ca. 7 s bis 20 s (Naturmaßstab: 12 s bis 35 s) erkennbar waren. Die Mittelwerte der Fließgeschwindigkeiten im Nachlaufbereich des Schlitzes in Becken 5 lagen mit Vorschalung ca. 15 % unter denen mit offener Spundwandberandung. Kurzzeitige Maxima liegen jedoch in einer vergleichbaren Größenordnung wie bei „strömungsstabilen“ Verhältnissen.

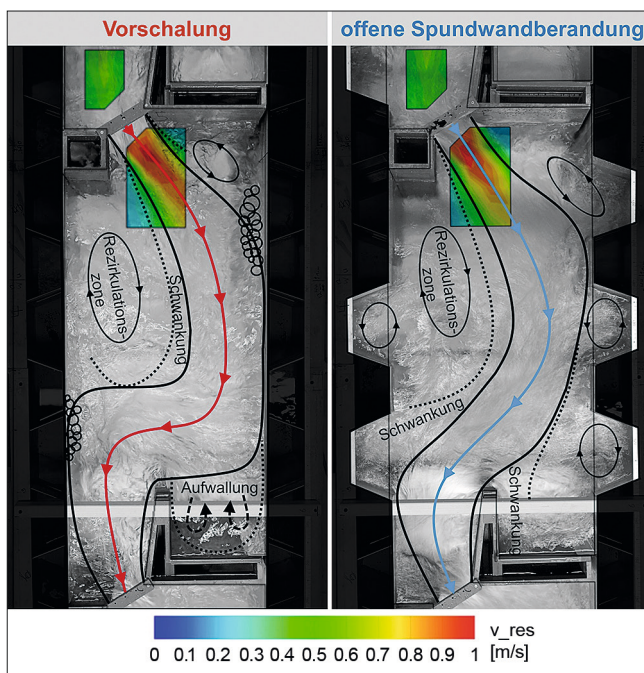


Bild 7: Strömungssituation bei $B/L_{LB} = 0,45$ mit Vorschalung (links) und mit offener Spundwandberandung (rechts)

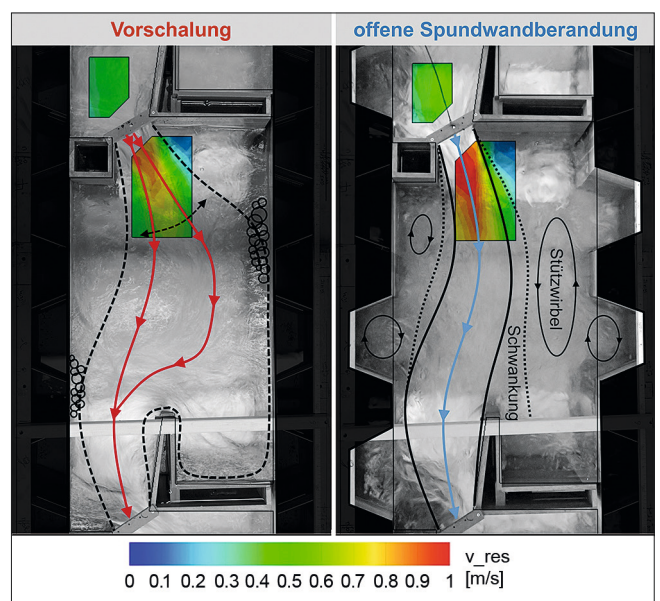


Bild 8: Strömungssituation bei $B/L_{LB} = 0,56$ mit Vorschalung (links) und mit offener Spundwandberandung (rechts)

4 Schlussfolgerungen

Die Versuche an der BAW belegen die vergleichsweise geringe Wirkung einer rauen Sohle auf den Durchfluss wie auch auf die Fließgeschwindigkeiten in einem Schlitzpass; d. h., die hydraulischen Verluste werden im Wesentlichen durch die Beckengeometrie bestimmt. Dieses Erkenntnis ist in Bezug auf die Fließgeschwindigkeiten insofern von Bedeutung, als dass bislang davon ausgegangen wurde, dass insbesondere schwimmschwache Fische eine Zone oberhalb der Rauheitsspitzen nutzen können, in denen die Fließgeschwindigkeiten reduziert sind. Es sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig, um zu erkunden, wie sich für nach DWA (2014) bemessene Fischaufstiegsanlagen die Zone oberhalb der Rauheitsspitzen in einem Schlitz detailliert charakterisieren lässt.

Weiterhin wurde mithilfe hybrider Modelluntersuchungen der Einfluss einer offenen Spundwand als seitliche Berandung bei Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise analysiert. Es konnte nachgewiesen werden, dass bei Anlagentypen, in welchen „strömungsstabile“ Verhältnisse (Strömungsmuster 1) vorherrschen, eine Spundwandprofilierung zu keiner signifikanten Veränderung der hydraulischen Charakteristik innerhalb der Becken führt. Bei Anlagen, die aufgrund ihrer geometrischen Abmessungen (B/L_{LB} , Neigung) eine „strömungsdissipierende“ Charakteristik (Strömungsmuster 2) aufweisen, kann eine offene Spundwandberandung tendenziell zu einem weniger gekrümmten Verlauf der Hauptströmung und zu einer geringfügigen Erhöhung des Anlagendurchflusses führen. Im hydraulisch sensiblen Übergangsbereich zwischen den beiden Strömungsmustern konnte eine deutliche Veränderung des zuvor stark instationären Strömungsverhaltens hin zu einem „strömungsstabilen“ Zustand (Strömungsmuster 1) beobachtet werden.

In allen untersuchten Varianten führte der Einsatz von Spundwänden als seitliche Berandung aufgrund der Vergrößerung des Beckenvolumens zu einer (deutlich) geringeren Leistungsdichte in den einzelnen Becken. Der Einsatz von unverbauten Spundwänden kann somit nicht nur ökonomische und bauliche Vorteile mit sich bringen, sondern sich möglicherweise auch vorteilhaft auf die Gesamtgröße der Fischaufstiegsanlage auswirken.

5 Literatur

Bezzola, G. R. (2002): Fließwiderstand und Sohlenstabilität natürlicher Gerinne. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich. Mitteilungen Nr. 173.

Dittrich, A. (1998): Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH). Heft 198.

DWA (2014): Merkblatt 509, Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hg.), Hennef.

Höger, V.; Seidel, F.; Nestmann, F. (2020): Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 15-22.

Musall, M.; Kerlin, T.; Seidel, F.; Oberle, P.; Schmidt, D. (2017): Untersuchungen zum Einfluss seitlicher Spundwände auf die Strömungscharakteristik in technischen Fischaufstiegsanlagen. In: Tagungsband 40. Dresdner Wasserbaukolloquium, Technische Universität Dresden, D. Aigner (Hg.), Selbstverlag der Technischen Universität Dresden, S. 301–310.

Oberle, P.; Kerlin, T.; Musall, M.; Nestmann, F. (2018): Auswirkung seitlicher Spundwände auf die Hydraulik von Schlitzpässen. In: WasserWirtschaft, 108 (2–3), S. 54–59.

Sokoray-Varga, B.; Höger, V.; von Meltzer, J.; Prinz, F.; Weichert, R. (2020): Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 33-42.

ThyssenKrupp (2010): Spundwandhandbuch. 4. Auflage. <https://www.yumpu.com/de/document/view/8472688/spundwandhandbuch-thyssenkrupp-bau-technik/2> (zuletzt geprüft am 08.01.2020).