

BAWMitteilungen

Nr. 106

Hydraulik von Fischaufstiegsanlagen
in Schlitzpassbauweise



BAWMitteilungen

Nr. 106

Hydraulik von Fischaufstiegsanlagen
in Schlitzpassbauweise

Impressum

Herausgeber (im Eigenverlag):
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
Postfach 21 02 53, 76152 Karlsruhe
Telefon: +49 (0) 721 9726-0
Telefax: +49 (0) 721 9726-4540
E-Mail: info@baw.de, www.baw.de



Creative Commons BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Soweit nicht anders angegeben, liegen alle Bildrechte bei der BAW.

ISSN 2190-9199

Karlsruhe · September 2020

BAWMitteilungen Nr. 106

Inhalt

Henning, M.; Weichert, R. Hydraulische Parameter von Schlitzpässen in Bemessung und Bestand	7
Höger, V.; Seidel, F.; Nestmann, F. Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen	15
Höger, V.; Prinz, F.; von Meltzer, J.; Weichert, R. Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen	23
Sokoray-Varga, B.; Höger, V.; von Meltzer, J.; Prinz, F.; Weichert, R. Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen	33
Sokoray-Varga, B.; Kerlin, T.; Prinz, F.; von Meltzer, J.; Musall, M.; Oberle, P.; Weichert, R. Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen	43
Musall, M.; Mahl, L. Numerische Modellierung von Schlitzpässen	49
Sokoray-Varga, B.; Weichert, R. Analyse turbulenter Strömungsprozesse in Schlitzpässen aus Sicht der Fischpassage	59

Editorial

Liebe Leserin, lieber Leser,

seit dem Inkrafttreten des novellierten Wasserhaushaltsgesetzes am 1. März 2010 obliegt dem Bund die Erhaltung und Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit an den von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) errichteten und betriebenen Stauanlagen. Schon früh zeigte sich, dass die überwiegende Zahl der WSV-Staustufen nicht über ausreichend funktionsfähige Anlagen verfügt. Allein bezüglich des Fischeaufstiegs existieren an circa 250 Staustufen Defizite.

Der in Deutschland am häufigsten eingesetzte Bautyp einer Fischeaufstiegsanlage ist der Schlitzpass. Die Vorteile dieses Bautyps sind seine vergleichsweise platzsparende Bauweise und die erwiesene Praxistauglichkeit, sowohl in Bezug auf die bauliche Umsetzbarkeit als auch hinsichtlich seiner Funktion. Mit dem Merkblatt M-509 der DWA existiert ein Standardwerk für die Bemessung von Fischeaufstiegsanlagen. Auch wenn sich das Merkblatt in der Praxis in weiten Teilen bewährt hat, gibt es nach wie vor zahlreiche offene Fragestellungen, die weitere Forschungsaktivitäten auf nationaler und internationaler Ebene erforderlich machen.

Im Zentrum dieser Forschungsaktivitäten stehen häufig Fragestellungen zu den Auswirkungen der Strömungsvorgänge auf das Fischverhalten. Fischökologische Untersuchungen setzen daher ein vertieftes Verständnis der komplexen hydraulischen Vorgänge in der Fischeaufstiegsanlage voraus. Aus diesem Grund haben das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) im Rahmen einer mehrjährigen Forschungskooperation aufwändige Untersuchungen zur Hydraulik von Fischeaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise durchgeführt. Der Abschluss der gemeinsamen Untersuchungen ist nun Anlass, die Forschungsergebnisse in der wissenschaftlichen Publikationsreihe **BAWMitteilungen** zu dokumentieren und die für den planenden Ingenieur relevanten Erkenntnisse zusammenzufassen.

Der erste Beitrag in den **BAWMitteilungen** Nr. 106 leitet in das Thema ein, benennt die für die Bemessung eines

Schlitzpasses relevanten hydraulischen Parameter und erläutert grundlegende Zusammenhänge und Herausforderungen. In den folgenden Beiträgen werden die Ergebnisse der gegenständlichen Modellversuche, die in den Laboren des KIT und der BAW durchgeführt wurden, präsentiert. Beobachtungen im Labor und an bereits realisierten Anlagen zeigen beispielsweise, dass selbst in baugleichen Becken eines Schlitzpasses verschiedene, sich stark unterscheidende Strömungsmuster auftreten können. Das Auftreten dieser Strömungsmuster und deren Wirkung auf zentrale hydraulische Parameter wie Fließgeschwindigkeit, Wassertiefe oder Durchfluss wurden untersucht und liefern wichtige praxisrelevante Erkenntnisse.

Gegenständliche Modelluntersuchungen zur Hydraulik von Schlitzpassen werden vornehmlich zu Forschungszwecken durchgeführt. Für Planungszwecke kommen dagegen eher numerische Verfahren zum Einsatz, um spezielle standortspezifische Fragestellungen zu untersuchen. Ein Beitrag in diesem Heft widmet sich den Möglichkeiten und Grenzen der numerischen Modellierung von Schlitzpassen. Der abschließende Beitrag basiert auf einer Dissertation, die im Rahmen der Forschungskooperation entstanden ist und die Entwicklung einer neuen Methode zur Untersuchung turbulenter Strömungen am Beispiel eines Schlitzpasses beschreibt.

Die in der Wissenschaft bekannte Erfahrung, wonach die Beantwortung einer Forschungsfrage weitere Fragen aufwirft, gilt auch für die Untersuchung von Schlitzpassen. Weitere Forschungsaktivitäten sind erforderlich, um die bisherigen Ergebnisse zu vervollständigen. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die fischökologische Bewertung von Schlitzpassen, beispielsweise im Hinblick auf die Passierbarkeit für Jungfische oder kleine Fischarten.

Ihr

Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann
Leiter der Bundesanstalt für Wasserbau

Karlsruhe, im September 2020

Hydraulische Parameter von Schlitzpässen in Bemessung und Bestand

Dr.-Ing. Martin Henning, Dr. sc. techn. Roman Weichert,
Bundesanstalt für Wasserbau

Der vorliegende Artikel gibt einen Überblick über die Grundlagen der Hydraulik von Schlitzpässen. Er dient damit als Einführung der weiteren Beiträge der **BAW**-Mitteilungen 106 zu diesem Thema. Hydraulische Bemessungswerte von Schlitzpässen gehen von einem Gleichgewichtszustand aus, der sich an realisierten Anlagen nicht einstellen wird. Die Annahme, dass in jedem Becken identische Werte auftreten, entspricht nicht den tatsächlichen Verhältnissen, da die hydrologischen und geometrischen Randbedingungen sowie zeitliche und räumliche Inkonsistenzen eine Rolle spielen. Somit weichen Bemessungs- und Messwerte voneinander ab. Der vorliegende Artikel stellt auf qualitativer Basis die Unterschiede zwischen Bemessungswerten und tatsächlich auftretenden Werten dar und gibt knappe Empfehlungen zur Beurteilung der Turbulenz in Fischaufstiegsanlagen und zur Vermessung von Bestandsanlagen.

1 Einleitung

Fischaufstiegsanlagen sind gängige Bauwerke, um das Ziel der Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Querbauwerken zu erreichen. Die Anlagen werden unter der Vorgabe bemessen, dass sie für alle am jeweiligen Standort zu berücksichtigenden Fischarten passierbar sein sollen. Neben den geometrischen Abmessungen spielen für die Bemessung die in der Anlage auftretenden hydraulischen Verhältnisse eine wesentliche Rolle. Die Wahl des Bautyps einer Fischaufstiegsanlage hängt von einer Reihe verschiedener, meist stand-

ortspezifischer Kriterien ab. Insbesondere bei beengten Platzverhältnissen ist der Schlitzpass ein häufig zur Anwendung kommender Bautyp. Das Grundprinzip seiner Konstruktion ist, dass der gesamte Höhenunterschied der Stauanlage zwischen Ober- und Unterwasser in viele kleine Wasserspiegeldifferenzen aufgeteilt wird. Dies geschieht durch eine Aneinanderreihung von Becken, deren Trennwände durch einen Schlitz für Fische passierbar sind.

Die hydraulischen Prozesse in Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise unterliegen zeitlichen und räumlichen Schwankungen. Diese treten auf, selbst wenn die Randbedingungen, wie z. B. der Ober- und der Unterwasserstand der Stauanlage, und die zeitlichen Mittelwerte konstant sind (dynamisches Gleichgewicht). Das liegt einerseits an der Natur der auftretenden hydraulischen Prozesse, z. B. infolge nicht-periodischer Turbulenz. Andererseits können selbst kleine Unterschiede in der geometrischen Ausbildung der Becken, z. B. infolge von Baulöcherungen im Schlitzbereich, messbare Auswirkungen auf die Beckenhydraulik haben.

Die Bemessung eines Schlitzpasses erfolgt nach hydraulischen und geometrischen Grenzwerten, die sich aus den Anforderungen der Fischfauna ergeben. Zeitliche und räumliche Schwankungen in den Becken werden dabei nicht direkt, sondern durch Sicherheitsbeiwerte berücksichtigt. Es wird daher davon ausgegangen, dass für die größte zu berücksichtigende Gesamtfallhöhe an der Stauanlage (gewöhnlich bei UW_{30}) in allen Becken identische hydraulische Verhältnisse herrschen. Es wird somit vorausgesetzt, dass in der Fischaufstiegsanlage näherungs-

weise Normalabfluss herrscht, welcher in Abgrenzung zur Gerinnehydraulik so definiert ist, dass die zeitlichen Mittelwerte der hydraulischen Parameter an vergleichbaren Punkten in aufeinanderfolgenden Becken gleich sind (siehe auch Rajaratnam et al. 1986). Somit sind Bemessungswerte als stationäre Mittelwerte zu verstehen.

Im Gegensatz zu den Annahmen für die Bemessung sind in der Realität konstante Randbedingungen nicht vorhanden, d. h. Ober- und Unterwasserstände sind ständigen Schwankungen, z. B. infolge veränderter Abflüsse, Kraftwerks- und Wehrsteuerung oder Schleusungen, unterworfen. Ein sich dynamisch verändernder Ober- bzw. Unterwasserstand wirkt in die Anlage hinein. Demzufolge weichen die Wasserspiegeldifferenzen zwischen den Becken innerhalb der Anlage voneinander ab. In der Folge sind auch alle anderen hydraulischen Parameter in der Anlage, wie beispielsweise die Fließgeschwindigkeiten, beeinflusst.

Folgende hydraulische Parameter sind für die Bemessung von zentraler Bedeutung:

- Nominelle Wasserspiegeldifferenz zwischen benachbarten Becken Δh_N , die sich aus der bemessungsrelevanten Gesamtfallhöhe der Stauanlage und der Anzahl der Becken bzw. Schlitzen ergibt (im Folgenden auch als Beckenfallhöhe bezeichnet),
- maximale zeitlich gemittelte Fließgeschwindigkeit v_{\max} ,
- Wassertiefe in den Becken h ,
- Durchfluss der Fischaufstiegsanlage Q .

Dabei sind die Parameter h , Q , v_{\max} keine unabhängigen Variablen, sondern stehen, gemeinsam mit der Schlitzweite s , über die Kontinuitätsgleichung sowie die Parameter Δh_N und v_{\max} durch (z. B. DWA 2014)

$$v_{\max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_N + v_a^2}; \quad v_a = 0 \quad (1)$$

miteinander in Beziehung, wobei die Anströmgeschwindigkeit v_a in Einklang mit der Bemessungsempfehlung für beckenartige Fischaufstiegsanlagen (DWA 2014) im Weiteren vernachlässigt wird. Die zulässige Beckenfallhöhe Δh_N wird nach Gleichung 1 bestimmt, wobei sich die Bemessungsgeschwindigkeit v_{\max} in einem Schlitzpass an der Fischregion des Gewässers orientiert (DWA 2014). Aus dem Quotienten der bemessungsrelevanten Gesamtfallhöhe und Δh_N ergibt sich die Mindestanzahl der Rie-

gel. Da dieser auf die nächste natürliche Zahl aufgerundet werden muss, sind die nominellen Fallhöhen in der Regel am Ende etwas geringer als nach Gleichung 1.

Um den Bemessungsparametern die tatsächlich in der Fischaufstiegsanlage auftretenden Fließtiefen, Beckenfallhöhen und Fließgeschwindigkeiten gegenüberstellen zu können, werden diese Parameter im folgenden Kapitel 2 charakterisiert. Kapitel 3 gibt Hinweise zur Berücksichtigung von Turbulenz. Hinweise zur hydraulischen Vermessung von Schlitzpässen werden in Kapitel 4 gegeben.

2 Bemessungsrelevante Parameter

2.1 Fließtiefe und Beckenfallhöhe

Für die Bestimmung der Fließtiefe h und der nominellen Beckenfallhöhe Δh_N ist das Wasserspiegelniveau in den Becken relevant. Aus Gründen der Anwendbarkeit bei der Bemessung wird der Wasserspiegel in den Becken als horizontal und eben definiert. Da die Sohle in der Regel ein Gefälle hat, wird von den bemessungsrelevanten Wassertiefen h_{\min} (geringste Fließtiefe) und h_{\max} (größte Wassertiefe) ausgegangen, die sich ebenfalls jeweils auf einen ideal horizontalen Wasserspiegel beziehen. Ein horizontaler Wasserspiegel tritt in Realität nicht auf. Vielmehr zeigen verschiedene Studien, dass die Wasserspiegellagen in einem Becken von einem Minimum unterhalb der oberen Trennwand auf ein Maximum direkt oberhalb der unteren Trennwand ansteigen (z. B. Rajaratnam et al. 1986, Wu et al. 1999, Sokoray-Varga et al. 2015, Bild 1). Somit kommt es, neben den auftretenden temporären Schwankungen, zu räumlichen Unterschieden der tatsächlichen Fließtiefe im Vergleich zum Bemessungswert.

Die Feststellung, dass der für die Bemessung als Vereinfachung angenommene horizontale Wasserspiegel nicht dem realen entspricht, ist besonders für die Bestimmung der Beckenfallhöhen relevant. Wie oben bereits beschrieben, ergibt sich die nominelle Beckenfallhöhe Δh_N mit Gleichung 1 unter Berücksichtigung der fischbiologisch begründeten maximalen Geschwindigkeit, bzw. es wird mit Δh_N und der Differenz der Bemessungswasserstände

des Ober- und Unterwassers die Anzahl erforderlicher Riegel bestimmt. Lokal gesehen ergibt sich die tatsächliche Beckenfallhöhe Δh_R in einem Schlitzpass jedoch aus der Differenz der Wasserspiegel oberhalb und unterhalb einer Trennwand zweier aufeinanderfolgender Becken (Bild 1), wobei wegen der Dreidimensionalität des Wasserspiegels und der Schlitzströmung eine exakte Definition von Δh_R nicht möglich ist.

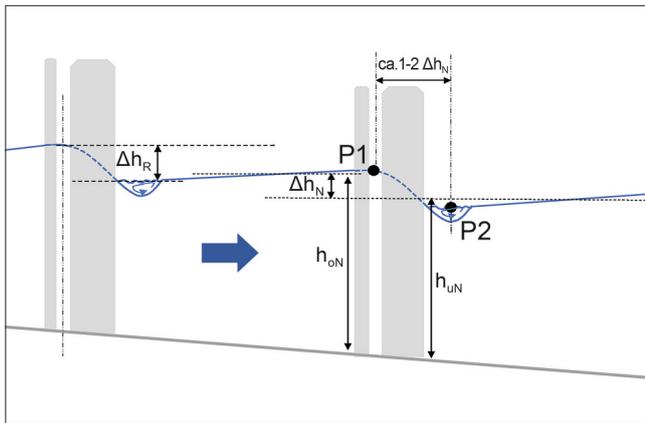


Bild 1: Skizze des Wasserspiegellängsschnitts durch die Becken eines Schlitzpasses

An realisierten Anlagen stellt sich häufig die Aufgabe, anhand von Messungen die Einhaltung der Bemessungswerte zu prüfen. In diesem Kontext ist beispielsweise die Frage der Einhaltung der Beckenfallhöhen aufgrund des Zusammenhangs nach Gleichung 1 von Relevanz. Hierauf wird in Kapitel 4 näher eingegangen.

2.2 Fließgeschwindigkeit und Durchfluss

Die nominelle Beckenfallhöhe Δh_N wird in der Bemessung so gewählt, dass die maximal zulässige Fließgeschwindigkeit v_{max} nicht überschritten wird (Gleichung 1). Werden die tatsächlich in einem Schlitzpass auftretenden Fließgeschwindigkeiten mit der nach Gleichung 1 ermittelten Geschwindigkeit verglichen, so ergibt sich eine relativ gute Übereinstimmung für den Schlitzquerschnitt (Punkt 1 in Bild 1). Je nach Strömungsmuster können jedoch die Fließgeschwindigkeiten circa ein bis zwei Δh_N unterhalb des Schlitzes noch größere Werte annehmen (Punkt 2 in Bild 1) und dort im zeitlichen Mittel bis zu 20 % höher sein (siehe Beitrag von Höger et al. „Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen“ in diesem Heft).

Abweichungen der Ergebnisse von Gleichung 1 können aus der Vernachlässigung der Anströmgeschwindigkeit v_a resultieren. Zudem müsste für eine Betrachtung der tatsächlichen Zusammenhänge auch das am Schlitz auftretende Δh_R herangezogen werden, welches wegen der Auslenkung des Wasserspiegels größer ist als das für die Bemessung zugrunde gelegte Δh_N (Bild 1). Beide Parameter, v_a und Δh_R , interagieren, variieren auch mit dem Strömungsmuster im Schlitzpass (siehe Beitrag von Höger et al. „Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen“ in diesem Heft) und lassen sich wegen der komplexen hydraulischen Randbedingungen nicht eindeutig bestimmen.

Im Beitrag von Höger et al. „Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen“ (in diesem Heft) werden weitere Betrachtungen zu den Fließgeschwindigkeiten in den Becken von Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise angestellt. Grundsätzlich muss beachtet werden, dass es sich bei der vorgestellten Vorgehensweise der Bemessung um ein 1D-Konzept handelt und die Größe und Richtung der maximalen Fließgeschwindigkeiten sowie der Ort ihres Auftretens variieren können.

Bei der Einordnung der Fließgeschwindigkeiten in einen fischökologischen Zusammenhang muss beachtet werden, dass die räumlich über den Schlitzquerschnitt gemittelte Fließgeschwindigkeit definitionsgemäß geringer ist als die lokal auftretende maximale Geschwindigkeit. Die mittleren Fließgeschwindigkeiten im Schlitzquerschnitt bewegen sich meistens in einer Größenordnung von 75 % bis 95 % der maximalen Fließgeschwindigkeit (siehe Beitrag von Höger et al. „Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen“ in diesem Heft). Wenn zur Abschätzung der mittleren Fließgeschwindigkeiten im Schlitzquerschnitt (über mehrere Trennwände gemittelt, nicht an jeder einzelnen Trennwand) die Kontinuitätsgleichung verwendet wird, werden gute Ergebnisse erreicht, wenn die Bemessungswassertiefe oberhalb des Schlitzes h_{oN} verwendet wird. Die profilgemittelte Geschwindigkeit wird in Teilen des Schlitzprofils über- bzw. unterschritten, da die Fließgeschwindigkeiten nicht homogen über die Schlitzweite verteilt sind. Dies liegt an den an Schlitzkanten vorhandenen Ablösungen, die im unmittelbaren Nahbereich der Berandung einen Abfall der Fließgeschwindigkeiten zur Folge haben (Bild 2). Strömungsbilösungen an den Schlitzkanten sind wiederum eng verknüpft mit den in den Becken auftretenden

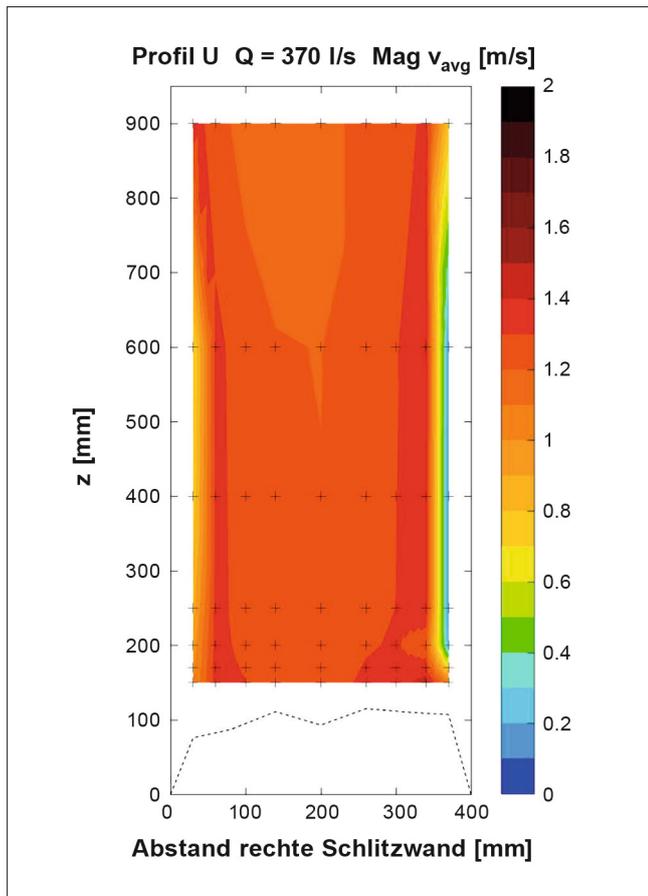


Bild 2: Farbkodierter flächiger Verlauf der zeitlich gemittelten Fließgeschwindigkeiten im Schlitz aus einer ADV-Messung, die Kreuze zeigen den Ort der Messung mittels ADV-Sonde; Messdauer 180 s; die gestrichelte Linie zeigt den Bereich der Sohlrauheit

Strömungsmustern (siehe Beitrag von Höger et al. „Auf-treten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitz-pässen“ in diesem Heft).

Zu beachten ist, dass sich in den Geschwindigkeitslotrechten im Schlitz durch den druckdominierten Abfluss über die Wassertiefe relativ konstante zeitliche Mittelwerte einstellen (Bild 2). Dies gilt für die gesamte Wassersäule und weitestgehend unabhängig von der im Schlitzbereich vorhandenen Sohlrauheit. Genau genommen zählt auch die Dimensionierung der rauen Sohle (Substrat) in der Fischaufstiegsanlage zu den Bemessungsparametern. Diese hat jedoch insgesamt einen untergeordneten Einfluss auf die Beckenhydraulik (siehe Beitrag Sokoray-Varga et al. „Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen“ in diesem Heft). Die Gestaltung der Sohle muss jedoch zumindest bei der Bestimmung der Wassertiefen berücksichtigt werden.

Die Fließgeschwindigkeiten in den Schlitzfen der Fischaufstiegsanlage bestimmen auch den Durchfluss der Anlage. Dieser Umstand wird für die Abschätzung des Betriebsdurchflusses in der Dimensionierung durch geeignete Annahmen bezüglich des Durchflussbeiwertes der Schlitzfen indirekt berücksichtigt. Hierzu sei auf den Beitrag von Sokoray-Varga et al. „Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen“ (in diesem Heft) verwiesen.

3 Berücksichtigung von Turbulenz

Wie oben ausgeführt, sind Bemessungswerte als Mittelwerte über die Zeit bzw. einen räumlichen Ausschnitt zu verstehen. Geschwindigkeitsschwankungen, die naturgemäß auftreten, werden in der Bemessung nicht berücksichtigt.

Geschwindigkeitsdaten an bestehenden Anlagen werden in der Regel punktuell, beispielsweise mittels Messflügel oder Ultraschallsonden, erfasst, da andere Messverfahren nicht bzw. nur mit großem Aufwand einsetzbar sind. Als Ergebnis einer solchen Messung liegt eine punktuelle Zeitreihe von Geschwindigkeitsdaten vor, von der zu-meist der Mittelwert für die Beschreibung der Strömung herangezogen wird (Bild 3). Es ist wichtig, die Messdauer so zu wählen, dass sich der Mittelwert (und genau genommen die Varianz) der Zeitreihe bzw. deren Verteilungsfunktion mit zunehmender Messdauer nicht mehr nennenswert verändert.

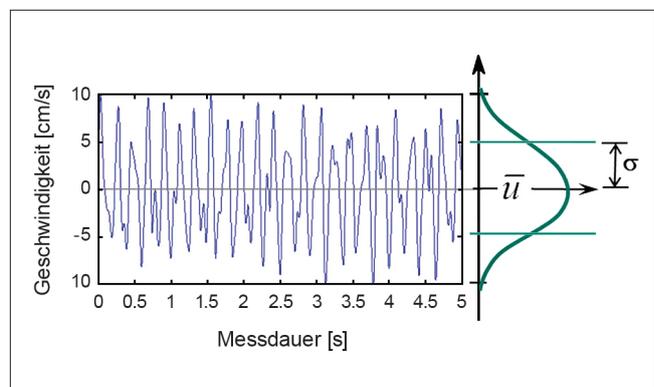


Bild 3: Ausschnitt aus einer Geschwindigkeitszeitreihe in einem gegenständlichen Modell eines Schlitzpasses, Gaußverteilung mit Mittelwert \bar{u} und Standardabweichung σ (nach Sokoray-Varga 2016)

Neben dem Mittelwert der Zeitreihe kann aus den Einzelwerten der Messung die Schwankung der Geschwindigkeit im Messpunkt bestimmt werden. Hierfür können z. B. die Varianz bzw. die Standardabweichung der Zeitreihe oder die turbulente kinetische Energie (TKE) und relative Turbulenz genutzt werden (z. B. Nezu und Nakagawa 1993).

Turbulente Strömungen sind durch interagierende Wirbelstrukturen gekennzeichnet. Demzufolge kann Turbulenz durch nichtsynchrone Punktmessungen nicht hinreichend beschrieben werden (siehe Beitrag von Sokoray-Varga und Weichert „Analyse turbulenter Strömungsprozesse in Schlitzpässen aus Sicht der Fischpassage“ in diesem Heft). Es wird daher zumeist eine statistische Charakterisierung der Intensitätseigenschaften der Turbulenz, wie z. B. in Form der TKE vorgenommen (z. B. Nikora et al. 2003). Der Nutzen dieser statistischen Turbulenzwerte bei der Interpretation bzw. Vorhersage des Fischverhaltens ist weitestgehend unklar. Es liegt die Vermutung nahe, dass das Schwimmverhalten hauptsächlich von der Beschaffenheit des kohärenten, augenblicklich auftretenden Strömungsfeldes abhängt, welches tatsächlich auf den Fisch wirkt (z. B. Odeh et al. 2002, Liao 2007, Tritico und Cotel 2010). Zur vollständigen Beschreibung eines solchen Strömungsfeldes ist zusätzlich die Bestimmung der Eigenschaften Periodizität, Orientierung und Größe der Wirbel erforderlich (z. B. Lacey et al. 2012). Allerdings ist diese Beschreibung nicht trivial, und die notwendige Vermessung kann für gewöhnlich nur unter Laborbedingungen durchgeführt werden.

Somit können in der Praxis momentan nur Intensitätseigenschaften der Turbulenz, wie die TKE, berücksichtigt werden. Deren praktischer Nutzen besteht darin, die Über- bzw. Unterschreitung der mittleren Geschwindigkeit im Verlauf der Zeit abzuschätzen und im Hinblick auf das Leistungsvermögen der Fische bei der Schlitzpassage zu berücksichtigen. Jedoch fehlt hier bisher eine praktisch anwendbare fischökologische Bewertung, selbst wenn allgemein anerkannt ist, dass Fische die Strömungsschwankungen unter bestimmten Umständen zu ihrem Vorteil nutzen können (z. B. Liao 2007). Zudem können Betrachtungen der statistischen Turbulenz aus Zeitreihen von Punktmessungen genutzt werden, um z. B. Bereiche unterschiedlicher Strömungscharakteristik gegeneinander abzugrenzen. Für eine Beurteilung

der tatsächlich auf die Fische wirkenden Turbulenz ist weitere Forschung notwendig.

Weiterhin wird in Merkblatt 509 (DWA 2014) die „Leistungsdichte bei der Energiedissipation“ mit der Gleichung

$$p_D = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h}{L_{LB} \cdot h_m \cdot b} \quad (2)$$

berechnet. Da die Dissipation der Strömungsenergie in Wasser überwiegend durch Turbulenz erfolgt, wird dieser Parameter in der Praxis als das „durchschnittliche Turbulenzniveau“ im Becken betrachtet. Dazu ist anzumerken, dass diese 1D-Betrachtung, in der lediglich integrale Größen betrachtet werden, durchaus geeignet ist, um Durchfluss und Beckengröße ins Verhältnis zu setzen und so eine hydraulische Belastung zu bestimmen. Rückschlüsse auf die Turbulenz, die der Fisch beim Durchschwimmen der Becken tatsächlich erfährt, sind jedoch nicht möglich.

4 Hydraulische Vermessung des Bestands

Die hydraulische Vermessung von Fischaufstiegsanlagen kann sehr aufwändig sein, weshalb vor ihrer Durchführung, beispielsweise zur Überprüfung der Grenzwerte, in jedem Fall eine Kontrolle der Geometrie des Schlitzpasses, wie z. B. der Schlitzweite, erfolgen sollte – am besten bereits im Rahmen der Bauabnahme.

Wie bisher vorgestellt, kann es zu natürlichen zeitlichen und räumlichen Abweichungen der hydraulischen Parameter in den Schlitzpassbecken kommen. Zeitliche Abweichungen können normalerweise durch ausreichend lange Messungen ausgeglichen werden. Aber auch bei hinreichend langer Messdauer können in einer Fischaufstiegsanlage unterschiedliche Mittelwerte auftreten. Das gilt sowohl an identischen Orten zu verschiedenen Zeiten als auch zu identischen Zeitpunkten in gleichen Punkten verschiedener Becken. Die zeitlichen und räumlichen Abweichungen der hydraulischen Parameter sind für die hydraulische Vermessung eines Schlitzpasses von Relevanz, da die gemessenen Werte in der Regel von den

Bemessungswerten abweichen werden. Wichtig bei der Beurteilung des gemessenen Wertes ist der Vergleich mit dem entsprechenden Grenzwert, da die Schwankung der hydraulischen Parameter über Sicherheitsbeiwerte bei der Bemessung, zumindest zum Teil, berücksichtigt wird.

Eine genaue Anleitung zur Vermessung abiotischer Parameter in Schlitzpässen kann wegen der Vielzahl standortspezifischer und an die Fragestellung gebundener Faktoren an dieser Stelle nicht erfolgen. Um verwertbare Ergebnisse zu erhalten, ist jedoch zu empfehlen, bei der Planung und Durchführung von Messungen in Schlitzpässen folgende Punkte zu beachten:

- Der Zeitpunkt der Messung muss im Hinblick auf die hydrologischen Randbedingungen so gewählt werden, dass für die Fragestellung repräsentative Werte gemessen werden. Es ist darauf zu achten, dass die Unter- und Oberwasserstände in den für die Bemessung der Fischaufstiegsanlage relevanten Zeiträumen (in der Regel W_{30} – W_{330}) liegen.
- Für die hydraulische Vermessung einer Fischaufstiegsanlage sind der Ort und die Dauer der Messung entscheidend, die wiederum von der Fragestellung abhängen. Die Messungen müssen ausreichend lang sein und an repräsentativen Punkten durchgeführt werden.
- Die notwendige Messdauer hängt von dem Ort der Messung und den Randbedingungen ab und kann pauschal nicht angegeben werden. Als eine Größenordnung kann eine Messdauer von mehreren Minuten betrachtet werden.
- Um eine an einem Schlitz auftretende Beckenfallhöhe zu prüfen, die der nominellen Beckenfallhöhe aus der Bemessung entspricht, müssen die Wasserspiegel an möglichst vielen gleichen Punkten in aufeinanderfolgenden Becken gemessen und zu einem Mittelwert zusammengefasst werden, oder die Messung sollte näherungsweise in Beckenmitte erfolgen. Bei der Bestimmung der Beckenfallhöhen im Bestand muss bedacht werden, dass Abweichungen der Wasserspiegel zwischen einzelnen Becken auch auftreten können, wenn es sich um Sonderbecken, wie z. B. Wendebcken oder lang gezogene kanalartige Strecken, handelt.
- Soll die minimale Fließtiefe in einem Schlitzpass ermittelt werden, so ist in den Becken unterhalb der Trennwände zu messen.

- Beim Vergleich einzelner Becken untereinander müssen die Messungen an gleichen Punkten durchgeführt werden. Dabei ist zu beachten, dass Abweichungen der Messwerte zwischen den einzelnen Becken auch im zeitlichen Mittel in der Größenordnung von 10 % auftreten können, selbst wenn die Anlage korrekt dimensioniert ist.
- Durchflussmessungen sollten in möglichst einfachen Querschnitten, wie z. B. langen Kanalabschnitten oder Zählbecken (ohne Einbau der Fischzähleinrichtung), durchgeführt werden. Wenn im Schlitzpassbecken gemessen werden muss, sollte die Messung der Geschwindigkeiten im Schlitz selbst durch mehrere vertikale Profile zwischen den Schlitzwänden erfolgen. Eine Durchflussmessung in den Becken ist aufgrund der dort auftretenden Rückstrombereiche nicht zu empfehlen.
- Soll statistische Turbulenz ausgewertet werden, muss ein geeignetes Messsystem gewählt werden, welches die Zeitreihe in entsprechender Auflösung aufzeichnet.

Geschwindigkeitsmessungen erfolgen in der Regel mittels Ultraschallpunktsonden (ADV), magnetisch induktiven Verfahren oder Messflügeln. Dabei ist zu beachten, dass systembedingt induktive Verfahren die Strömung nur zweidimensional und Messflügel nur die resultierende Geschwindigkeit erfassen, was für die meisten Anwendungen jedoch ausreichen dürfte. Wasserspiegel können über Schwimmer und Ultraschall- oder Drucksonden erfasst werden. Je nach Anwendungsfall können die Wasserstände in den Becken aber auch mittels Pegellatten hinreichend genau erfasst werden.

Darüber hinaus sind weitere Messmethoden denkbar, für die jedoch nur wenige Erfahrungswerte vorliegen (z. B. ADCP für Geschwindigkeitsmessungen und Durchflussbestimmung, PIV oder PTV zur Bestimmung der Strömungsmuster).

5 Schlussfolgerungen

In Schlitzpässen sind Abweichungen zwischen Bemessungswerten und tatsächlich auftretenden Werten unvermeidbar. Sie können aus verschiedenen Gründen auftreten:

- Bemessung anhand vereinfachter hydraulischer Zusammenhänge: In der Bemessung sind vereinfachende Annahmen bezüglich der Hydraulik notwendig, die in Realität nicht vollständig zutreffen.
- Natürliche Abweichungen von den Bemessungswerten: Der für die Bemessung der Beckenfallhöhen zugrunde gelegte Unterwasserstand UW_{30} tritt als stationäre Randbedingung im Grunde nicht bzw. äußerst selten auf. Das heißt, dass in der Realität in dem maßgeblichen Unterschreitungszeitraum zwischen 30 und 330 Tagen so gut wie immer eingestaute Verhältnisse in der Fischaufstiegsanlage herrschen. Die Beckenfallhöhen sind aus diesem Grund auch bei stationären Randbedingungen nicht homogen über die Anlage verteilt. In der Folge sind auch alle anderen hydraulischen Parameter beeinflusst.
- Abweichungen durch schwankende Randbedingungen: Der angenommene Gleichgewichtszustand der Becken, bei dem in jedem Becken identische Werte auftreten, wird sich in der Anlage nicht einstellen, weil die Ober- und Unterwasserstände ständigen Schwankungen unterliegen, z. B. durch veränderte Abflüsse oder Veränderungen in der Kraftwerks- und Wehrsteuerung oder Schleusungen.
- Abweichungen in Sonderbecken: Die Hydraulik kann bspw. in Ein- und Ausstiegsbecken, Wendebecken, kanalartigen Strecken und Zählbecken und auch in den anschließenden Becken von der eines Standardbeckens abweichen.
- Abweichungen durch Bautoleranzen: Erfahrungen zeigen, dass selbst kleine Abweichungen in der Bauausführung der Becken, vor allem im Schlitzbereich, messbare Veränderungen in hydraulischen Kenngrößen hervorrufen können.

Diese Aspekte sind auch für die Planung und Durchführung hydraulischer Messungen in Bestandsanlagen bzw. bei der Interpretation von Messdaten zu berücksichtigen. Ein besonderes Augenmerk ist dabei auf die Dauer und den Ort der Messung zu legen, um in der turbulenten Strömung den Bemessungswerten entsprechende Mittelwerte zu erhalten. Durch die Wahl geeigneter Messverfahren lassen sich auch Rückschlüsse auf die Turbulenz in den Becken ziehen. Deren Aussagekraft ist jedoch, bedingt durch die Schwierigkeit der Erfassung aller notwendiger Turbulenzparameter und fehlender fischökologischer Hypothesen, derzeit eingeschränkt.

Es ist festzuhalten, dass Abweichungen von den Bemessungswerten an sich keinen Nachteil für die Fische darstellen, solange fischökologisch begründete Grenzwerte nicht überschritten werden. Im Gegenteil: Ein gewisses Maß an Heterogenität und Dynamik der hydraulischen Prozesse in einem Schlitzpass kann sich positiv auf die Fischpassage auswirken.

6 Literatur

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

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.

Höger, V.; Prinz, F.; von Meltzer, J.; Weichert, R. (2020): Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 23-32.

Lacey, J. R. W.; Neary, V. S.; Liao, J. C.; Enders, E. C.; Tritico, H. M. (2012): The IPOS framework: linking fish swimming performance in altered flows from laboratory experiments to rivers. Special Issue Paper. In: River Res. Applic. 28 (4), S. 429–443. DOI: 10.1002/rra.1584.

Liao, J. C. (2007): A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows, Philosophical Transactions of the Royal Society B, Vol. 362, pp. 1973–1993.

Nezu, I.; Nakagawa, H. (1993): Turbulence in Open-Channel Flows. In: IAHR Monograph, Balkema Rotterdam, The Netherlands 1993.

Nikora, V. I.; Aberle, J.; Biggs, B. J. F.; Jowett, I. G.; Sykes, J. R. E. (2003): Effects of fish size, time-to-fatigue and turbulence on swimming performance: a case study of *Galaxias maculatus*, J. Fish Biol.; HY63, pp. 1365–1382.

Odeh, M.; Noreika, J. F.; Haro, A.; Maynard, A.; Castro-Santos, T.; Cada, G. F. (2002): Evaluation of the Effects of Turbulence on the Behavior of Migratory Fish, U. S. Department of Energy Bonneville Power Administration Division of Fish and Wildlife, Project Number 2000-057-00.

Rajaratnam, N.; Van der Vinne, G.; Katopodis, C. (1986): Hydraulics of vertical slot fishways, *Journal of Hydraulic Engineering* 112, Nr. 10, S. 909–927.

Sokoray-Varga, B.; Weichert, R.; Nestmann, F. (2015): Untersuchungen zu hydraulischen Berechnungsansätzen von Schlitzpässen, *WasserWirtschaft* 08/08 2015, S. 1–66.

Sokoray-Varga, B. (2016): Detecting flow events in turbulent flow of vertical-slot fish passes. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG).

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.

Sokoray-Varga, B.; Kerlin, T.; Prinz, F.; von Meltzer, J.; Musall, M.; Oberle, P.; Weichert, R. (2020): Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): *BAWMitteilungen* Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 43-48.

Sokoray-Varga, B.; Weichert, R. (2020): Analyse turbulenter Strömungsprozesse in Schlitzpässen aus Sicht der Fischpassage. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): *BAWMitteilungen* Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 59-66.

Tritico, H. M.; Cotel, A. . (2010): The effects of turbulent eddies on the stability and critical swimming speed of creek chub (*Semotilus atromaculatus*), *Journal of Experimental Biology*, Vol. 213(13), pp. 2284–2293.

Wu, S.; Rajaratnam, N.; Katopodis, C. (1999): Structure of flow in a vertical slot fishway, *Journal of Hydraulic Engineering* 125, Nr. 4, S. 351–359.

Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen

Dipl.-Ing. Verena Höger, Dr.-Ing. Frank Seidel,
Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. mult. Franz Nestmann, Karlsruher Institut für Technologie

Der Schlitzpass ist vermutlich der am häufigsten gebaute Typ von Fischaufstiegsanlagen (FAA) weltweit. Erfahrungen zeigen dabei, dass in Abhängigkeit der geometrischen Randbedingungen in Schlitzpässen auch bei gleichbleibender Beckengeometrie zwei verschiedene Strömungsmuster auftreten können. Das Strömungsmuster ist ein wichtiger Bestandteil der Hydraulik des Schlitzpasses und beeinflusst z. B. die Position der maximalen Fließgeschwindigkeit im Becken. In der Planung findet das Strömungsmuster jedoch derzeit keine ausreichende Berücksichtigung, da bislang keine Bewertung hinsichtlich der fischbiologischen Präferenz vorliegt. Unklar ist darüber hinaus aus hydraulischer Sicht, bei welchen geometrischen Randbedingungen sich welches Strömungsmuster einstellt. Um die Unsicherheiten im Zusammenhang mit den Strömungsmustern in Schlitzpässen zu verringern, wurden im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) gegenständliche Modellversuche am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt. Dabei wurden 90 Geometrie- und Neigungsvariationen innerhalb der Vorgaben des DWA-Merkblatts 509 (DWA 2014) untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Ausbildung des Strömungsmusters in erster Linie vom Schlitzwinkel α , dann vom Breiten/Längen-Verhältnis B/L und der Neigung S_0 abhängig ist.

1 Einleitung

Schon seit dem 19. Jahrhundert ist der Schlitzpass als Bauweise zur Herstellung der ökologischen Durchgän-

gigkeit für Fische an Stauanlagen in verschiedenen Ausprägungen bekannt (Keller 1885). In der heute in der Regel umgesetzten Bauweise wurde der Schlitzpass in den 1940er-Jahren das erste Mal in den USA gebaut. Mit der weiteren Entwicklung hin zum heutigen Schlitzpass wurde im späten 20. Jahrhundert auch das Phänomen der unterschiedlichen Strömungsmuster in den Fokus genommen (Wu et al. 1999).

Das Strömungsverhalten in einem Schlitzpass ist sehr eng an die geometrische Ausbildung des Schlitzes und die Beckengeometrie geknüpft. Je nach Wahl der geometrischen Parameter können sich dabei nach heutigem Erkenntnisstand drei verschiedene Strömungsmuster einstellen. Aus hydraulischer Sicht besteht die Frage, inwieweit sich das Strömungsmuster z. B. auf die maximale Fließgeschwindigkeit oder deren Position auswirkt. Dieser Aspekt wird im Beitrag von Höger et al. „Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen“ (in diesen Heft) vertieft betrachtet.

Bei ausgeführten Anlagen konnte beobachtet werden, dass die Ausbildung des Strömungsmusters von sehr geringen geometrischen Unterschieden innerhalb der Becken oder der verschiedenen Anströmungssituationen beeinflusst werden kann. So gibt es Beispiele, bei denen sich selbst bei gleicher Geometrie der Becken innerhalb eines Schlitzpasses zwei Strömungsmuster dauerhaft einstellen können (Bild 1) oder das Aufkommen von leichtem Bewuchs in den Becken zu einem Umschlagen des Strömungsmusters führt. Weitere Erkenntnisse zur Instabilität des Strömungsmusters haben unveröffentlichte Beobachtungen in einem Neun-Becken-Modell an

der BAW gezeigt. Dabei konnte das Strömungsmuster in allen Becken durch eine Veränderung der Abströmung des ersten Schlitzes verändert werden.

Inwieweit die unterschiedlichen Strömungsverhältnisse der Strömungsmuster auch fischbiologisch relevant sind, ist derzeit weitestgehend ungeklärt. Nichtsdestotrotz können unterschiedliche hydraulische Parameter bei den beiden Strömungsmustern (z. B. Fließgeschwindigkeit, Turbulenzgrad, Größe der Wirbelfelder) einen Einfluss auf die Wahrnehmung der Fische und damit auf die Funktionalität eines Schlitzpasses haben.

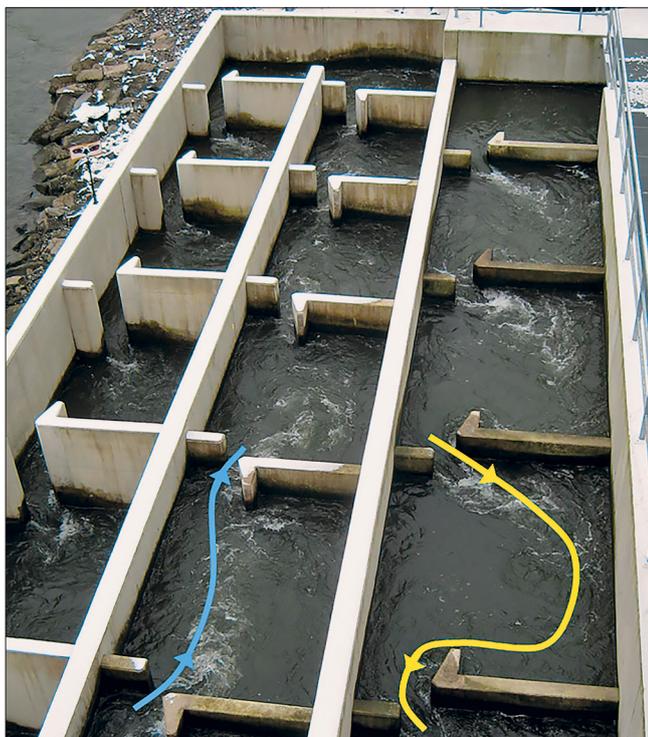


Bild 1: Strömungsmuster 1 (SM 1, blau) und Strömungsmuster 2 (SM 2, gelb) an der FAA Koblenz (Höger et al. 2015a)

Mit der vorliegenden Untersuchung wird das Ziel verfolgt, das Auftreten der Strömungsmuster in einem Schlitzpass für die Verhältnisse, wie sie an Bundeswasserstraßen auftreten, zu untersuchen. Als Grundlage für die Gestaltung und Bemessung von Fischaufstiegsanlagen dient in Deutschland häufig das Regelwerk DWA M509 (DWA 2014). Darin sind die geometrischen Abmessungen von Schlitzpässen in Abhängigkeit der Schlitzweite angegeben. Die Schlitzweite wiederum ergibt sich aus den Anforderungen der zu berücksichtigenden Fischregion. Welche Auswirkungen eine Variation der Beckengeometrie im Schlitzbereich innerhalb der vorgegebenen

Grenzen des DWA-Merkblatts 509 (DWA 2014) sowie der relevanten Neigungsbereiche für Bundeswasserstraßen auf die sich einstellenden Strömungsmuster hat, wurde bisher nur unzureichend untersucht.

Für ausgewählte Geometrievarianten wurden im Rahmen der Untersuchung in einem gegenständlichen Modell am KIT ADV-Punktmessungen im Schlitzbereich und im Becken in verschiedenen Tiefenebenen durchgeführt. Die Messungen zeigen, dass die Ausprägung des Strömungsmusters einen starken Einfluss auf die maximale Geschwindigkeit im Becken und im Schlitzbereich hat. Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen sind im Beitrag von Höger et al. „Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen“ (in diesen Heft) dargestellt. Der Fokus des vorliegenden Artikels liegt auf der Bewertung und Klassifizierung von Strömungsmustern.

2 Stand des Wissens

In den 1980er-Jahren wurden erstmals umfangreiche gegenständliche Modellversuche zur Untersuchung der Hydraulik von Schlitzpässen durchgeführt (Rajaratnam et al. 1986). Aber erst 1999 beschrieben Wu et al., dass sich in den Becken von Schlitzpässen zwei verschiedene Strömungsmuster einstellen können. Wu et al. (1999) variierten bei gleicher Beckengeometrie die Neigung (S_0) und den Durchfluss. Sie stellten fest, dass sich unabhängig vom Durchfluss bei größeren Neigungen Strömungsmuster 2 (SM 2) (vgl. Bild 7) und bei kleineren Neigungen Strömungsmuster 1 (SM 1) (vgl. Bild 6) einstellt. Etwa zehn Jahre später wurden diese Schlussfolgerung durch Tarrade et al. (2008) ergänzt. In diesen Untersuchungen varriierten die Autoren neben Neigung und Durchfluss auch das Verhältnis von Beckenbreite zu Beckenlänge (B/L). Dabei stellte sich heraus, dass die Strömungsmuster stark vom Breiten-zu-Längen-Verhältnis der Becken beeinflusst werden. Bei einem der vier untersuchten B/L-Verhältnisse (B/L = 0,77) stellten sich je nach Neigung beide Strömungsmuster ein. Bei B/L-Verhältnissen kleiner 0,77 bildete sich SM 2 und bei größeren B/L-Verhältnissen SM 1 aus.

Im Jahr 2010 wurden durch Wang et al. die Untersuchungen von Tarrade et al. (2008) weitergeführt und dabei

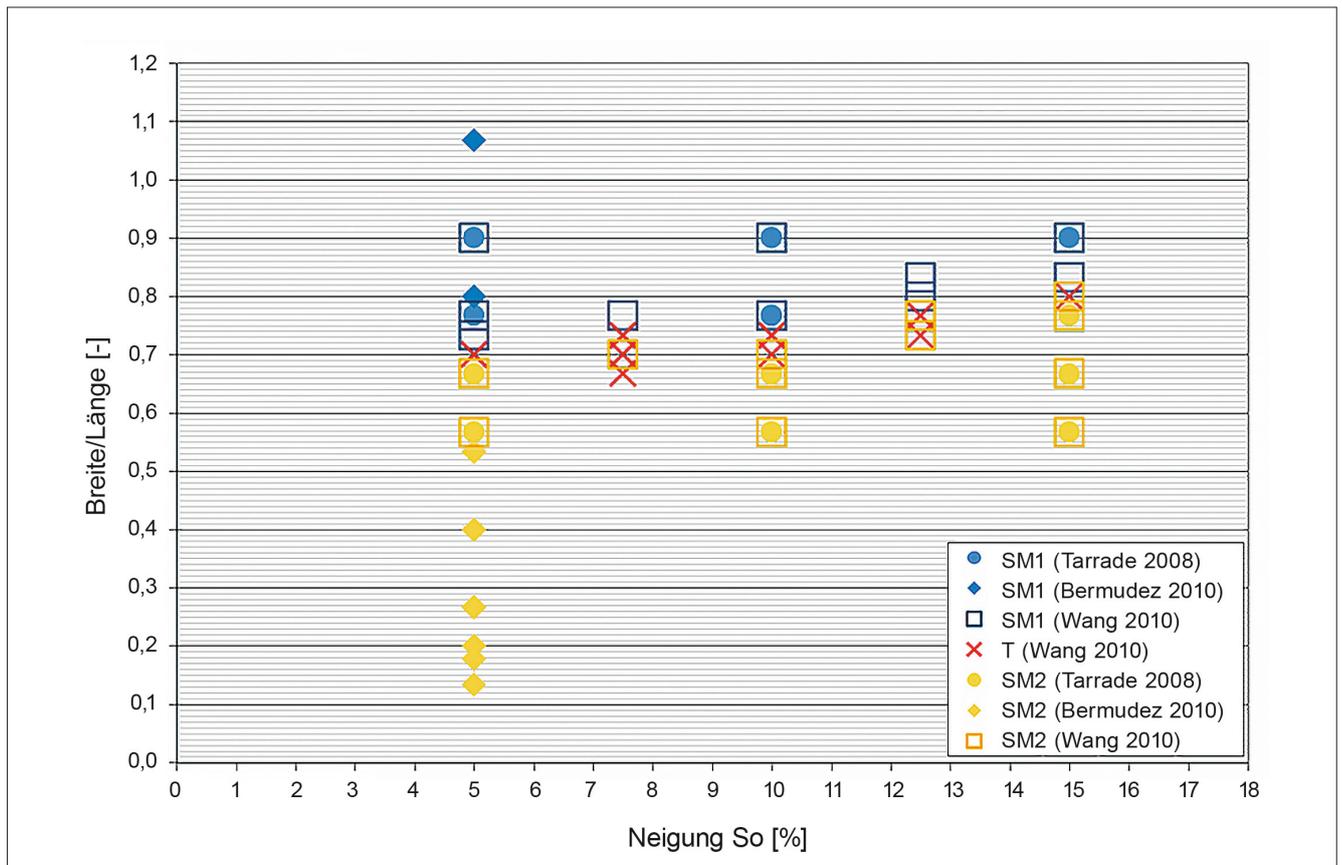


Bild 2: Untersuchungsergebnisse von Tarrade et al. (2008), Wang et al. (2010) und Bermudez et al. (2010), Vorkommen der Strömungsmuster SM 1, SM 2 und T bei gleichförmigen Bedingungen nach B/L-Verhältnis und Neigung (S_0) aufgetragen

mehrere Neigungen und B/L-Verhältnisse untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen ebenfalls, dass das Auftreten der Strömungsmuster vom B/L-Verhältnis und von der Neigung abhängig ist. Auch Bermudez et al. (2010) bestätigen mit ihren Untersuchungen die Abhängigkeit des Strömungsmusters vom B/L-Verhältnis.

In Wang et al. (2010) wird zum ersten Mal in der Literatur ein sogenannter Übergangsbereich erwähnt. Aus dieser Arbeit geht jedoch nicht hervor, wie dieser Übergangsbereich definiert ist. Es ist unklar, ob in diesem Fall bei der Untersuchung in zeitlicher Abfolge beide Strömungsmuster abwechselnd auftraten oder das beobachtete Phänomen nicht eindeutig einem Strömungsmuster zugeordnet werden konnte.

Bild 2 zeigt die Übereinstimmung der Ergebnisse aus den drei Untersuchungen von Tarrade et al. (2008), Wang et al. (2010) und Bermudez et al. (2010). Der von Wang et al. (2010) beschriebene Übergangsbereich (Transition, T) zwischen den beiden Strömungsmustern ver-

schiebt sich mit zunehmender Neigung zu höheren B/L-Verhältnissen.

Am KIT wurden numerische Untersuchungen in der Programmumgebung FLOW 3D zu zwei verschiedenen Geometrien durchgeführt (Musall et al. 2014), zum einen zu der Geometrie der FAA Koblenz und zum anderen zu der Geometrie aus Wang et al. (2010). In beiden Simulationen wurden die Beckenbreite und die Neigung variiert. Bei der numerischen Modellierung wurden die Empfehlungen zur Qualitätssicherung, die im Beitrag von Musall und Mahl „Numerische Modellierung von Schlitzpässen“ (in diesem Heft) beschrieben sind, angewandt.

Bild 3 zeigt die Ergebnisse der 35 simulierten Varianten nach Wang et al. (2010) und der 20 simulierten Varianten mit der Geometrie der FAA Koblenz im Vergleich zu den Ergebnissen von Wang (2010). Der in Bild 2 dargestellte Zusammenhang zwischen dem B/L-Verhältnis und der Neigung konnte auch für Neigungen < 5 % bestätigt werden. Mit abnehmender Neigung findet der

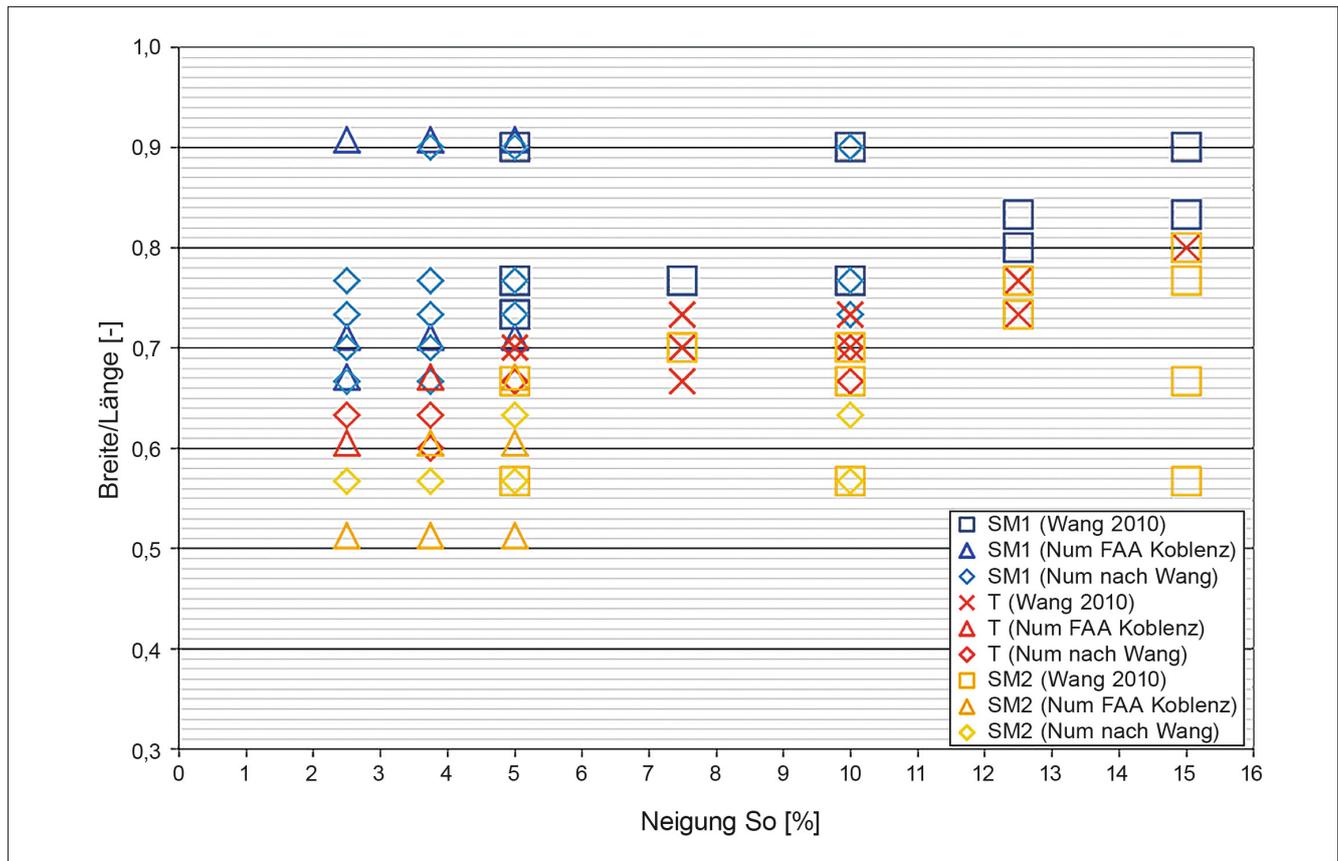


Bild 3: Untersuchungsergebnisse von Musall et al. (2014) im Vergleich zu Wang et al. (2010), Vorkommen der Strömungsmuster SM 1, SM 2 und T bei gleichförmigen Abflussbedingungen nach B/L-Verhältnis und Neigung (S_0) aufgetragen

Übergang von SM 1 zu SM 2 grundsätzlich bei kleineren B/L-Werten statt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Strömungsmuster in einem Schlitzpass nach aktuellem Stand der Forschung von der Neigung der Fischaufstiegsanlage und dem B/L-Verhältnis der Becken abhängt.

3 Untersuchungen im gegenständlichen Modell

Ziel der Modelluntersuchungen war, die Ursachen für das Auftreten unterschiedlicher Strömungsmuster in Abhängigkeit der geometrischen Randbedingungen und der für die Bundeswasserstraßen relevanten Neigungsbereiche von $< 5\%$ detailliert zu überprüfen. Das sich jeweils einstellende Strömungsmuster wurde dabei visuell klassifiziert und einer der Kategorien SM 1, SM 2 oder T zugeordnet.

Die gegenständlichen Untersuchungen wurden an einer 9,5 m langen und 0,79 m breiten Metallrinne (Bild 4), in die ein Schlitzpass mit sechs aufeinanderfolgenden Becken eingebaut wurde, im Theodor-Rehbock-Wasserbaulaboratorium des Institutes für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) am KIT durchgeführt. Die Einbauten wurden als modulare Elemente installiert, um eine große Variabilität der geometrischen Abmessungen der



Bild 4: Gegenständliches Modell des Schlitzpasses im Theodor-Rehbock-Wasserbaulaboratorium des IWG (Höger et al. 2015a)

Becken und Schlitz zu ermöglichen. Die Sohlneigung des Modells ist variabel einstellbar (Höger et al. 2015a). Die Strömungsmuster wurden mittels Langzeitbelichtungen von auf der Wasseroberfläche schwimmenden Tracerpartikeln aufgenommen (Höger et al. 2014) und optisch den verschiedenen Strömungsmustern zugeordnet. Um mögliche Einflüsse der Ein- und Auslaufbedingungen auf die Strömung im Untersuchungsbereich zu minimieren, fanden die Aufnahmen im dritten Becken in Fließrichtung statt (Höger et al. 2014).

In DWA (2014) sind Designvorgaben zu Schlitzpässen enthalten, die neben dem B/L-Verhältnis und der Neigung auch weitere konstruktive Parameter, wie z. B. die Geometrie des Umlenkblocks und der Leitwand, enthalten. Bild 5 zeigt die Parameter, die bei den Untersuchungen am gegenständlichen Modell variiert wurden: Die Breite der Becken B, das Versatzmaß der Leitwand zum Schlitz a_{LW} und der Schlitzwinkel α . Die Beckenlänge L und die Schlitzbreite blieben gleich. Insgesamt wurden 90 Varianten untersucht, jeweils 30 Geometrievarianten für drei verschiedene Rinnenneigungen.

Die untersuchten Werte der Geometrieparameter nach DWA (2014) sind:

- Neigung: 2,8 %, 3,9 % und 5,0 %
- B/L-Verhältnis: 0,8, 0,75, 0,7, 0,65 und 0,6
- Versatzmaß der Leitwand zum Schlitz a_{LW} : 0,038 m und 0,071 m
- Schlitzwinkel α : 24°, 39° und 56°

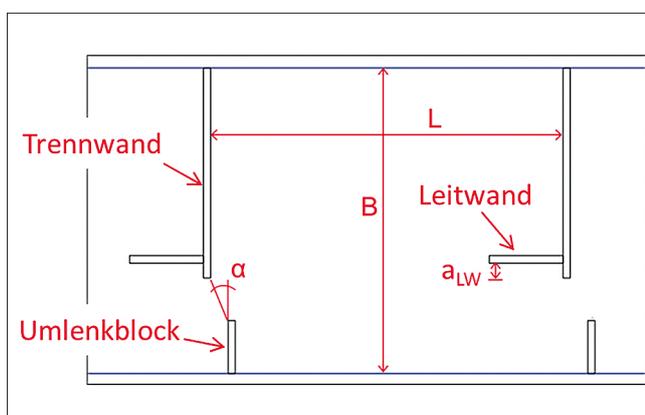


Bild 5: Geometrieparameter und Benennung der Einbauten, verändert nach Höger et al. (2015a)

4 Unterscheidung der Strömungsmuster

Basierend auf der Auswertung der Bilder der Langzeitbelichtungen und Beobachtungen während der Messung werden die Strömungsmuster im Folgenden bestmöglich beschrieben und als Prinzipskizze dargestellt. Wesentliches Merkmal von SM 1 ist, dass sich der Hauptströmungspfad (in einer leichten Kurve) direkt zwischen den Schlitz befindet (Bild 6). Ober- und unterhalb der Hauptströmung bilden sich Rückströmzonen mit geringer Fließgeschwindigkeit aus (R1.1 und R1.2 in Bild 6). Diese verändern sich über die Wassertiefe in ihrer Form und Ausprägung nicht. Die Hauptströmung schwankt dabei lateral um ca. 0,7 mal der Schlitzbreite, wie durch die gestrichelten Linien in Bild 6 dargestellt.

Im Gegensatz dazu bildet sich der Hauptströmungspfad bei SM 2 vom Schlitz in die gegenüberliegende Beckenecke und von dort entlang der Berandungen des Beckens aus, bevor er durch den unterhalb folgenden Schlitz in das nächste Becken weiterfließt (Bild 7). Dabei entsteht eine große Rückströmzone zwischen den Schlitz (R2.1 in Bild 7) und eine kleine zwischen der Leitwand und dem unterstromigen Schlitz (R2.2 in Bild 7). Der Anströmwinkel auf den unterstromigen Schlitz ist dadurch signifikant anders als bei SM 1. Die beiden fett gestrichelten Linien der Hauptströmung in Bild 7 kennzeichnen verschiedene Varianten der Linienführung der Hauptströmung, die bei SM 2 beobachtet werden konnten. Die Strömung trifft dabei in allen Fällen auf die Seitenwand und wird dort, je nach Stärke des auftreffenden Strömungsimpulses, auch

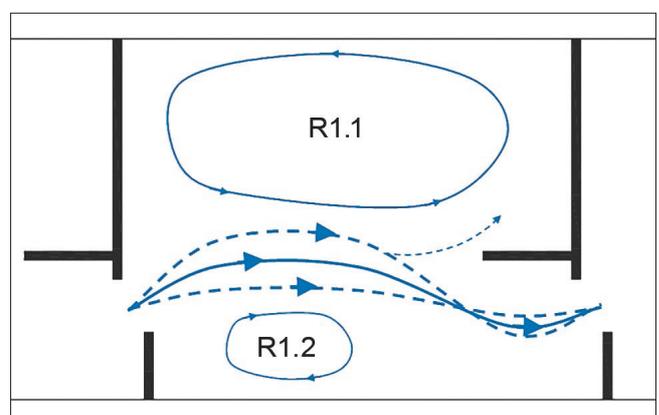


Bild 6: Prinzipskizze Strömungsmuster 1 (SM 1)

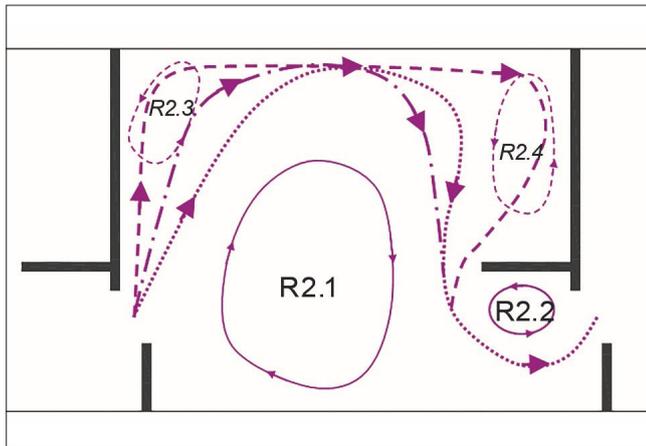


Bild 7: Prinzipskizze Strömungsmuster 2 (SM 2)

in Richtung der Wasseroberfläche umgelenkt. Die Trennwände werden hingegen nicht bei allen Varianten vom Hauptströmungspfad berührt. Je nach Linienführung können noch weitere Rückströmzonen im Becken auftreten (R2.3 und R2.4 in Bild 7).

Der Übergangsbereich (Transition T) zwischen den beiden Strömungsmustern ist schwer zu definieren und tritt in unterschiedlichen Ausprägungen auf. Eine beobachtete Variante des Übergangsbereichs ist, dass in einer zeitlichen Abfolge SM 1 und SM 2 in den Becken auftritt. Eine andere Beobachtung in den Versuchen ist in Bild 8 dargestellt. Hier schwankt die Hauptströmung kontinuierlich fast über die gesamte Beckenbreite (fett gestrichelte Linien in Bild 8). Zwischen den Umlenkblöcken bildet sich dauerhaft eine Rückströmzone (RT in Bild 8), die in ihrer Ausdehnung entsprechend ebenfalls schwankt. Oberstrom der unteren und unterstrom der oberen Trennwand entstehen je nach aktueller Position der Hauptströmung temporäre Rückströmzonen (RT.2 und RT.3 in Bild 8). Die Rückströmzone RT.3 ist durch einen starken dreidimensionalen Charakter gekennzeichnet. Teile der Hauptströmung prallen hier gegen die Trennwand und es bilden sich vertikale Wirbel aus (Bild 8).

5 Ergebnisse

Für die 90 untersuchten Geometrievarianten des gegenständlichen Modells wurde das Strömungsgeschehen anhand der in Kapitel 4 vorgestellten Methodik erfasst

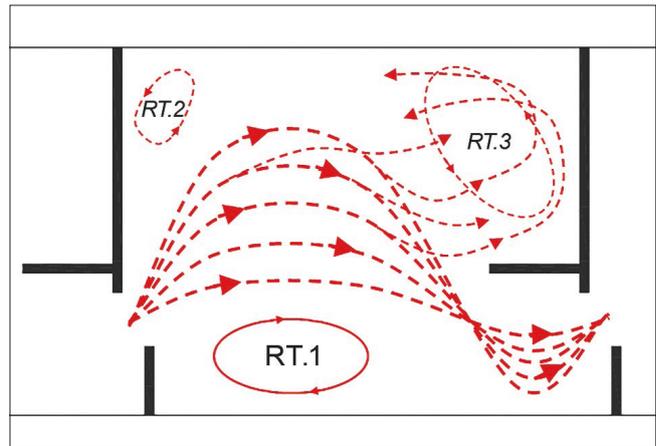


Bild 8: Prinzipskizze Übergangsbereich (T)

und den drei Strömungsmustern (SM 1, SM 2 und T) zugeordnet.

Die Ergebnisse des gegenständlichen Modells sind für die drei untersuchten Neigungen, differenziert nach den unterschiedlichen Geometrieparametern, in Tabelle 1, Tabelle 2 und Tabelle 3 aufgetragen.

Die Ergebnisse bestätigen grundsätzlich die Aussagen aus den Versuchen von Wang et al. (2010), wonach die Ausprägung der Strömungsmuster von der Neigung abhängt. Bei einer Erhöhung der Neigung von 2,8 % auf 5,0 % zeigt sich eine geringfügige Verschiebung der Auftretenswahrscheinlichkeit der Strömungsmuster hin zu SM 2. Dies ist bei einem Versatz der Leitwand von $a_{LW} = 0,038$ m deutlicher ausgeprägt als bei dem größten untersuchten Versatzmaß. Bei gleichem B/L-Verhältnis und gleicher Neigung S_0 hingegen zeigt sich durch die zusätzlich variierten Parameter der Einfluss der Schlitzgeometrie auf die Ausbildung des Strömungsmusters.

Aus Tabelle 1 geht deutlich hervor, dass das Strömungsmuster nicht nur vom B/L-Verhältnis abhängt, sondern dass vielmehr auch der Schlitzwinkel α und das Versatzmaß Leitwand zum Schlitz a_{LW} einen signifikanten Einfluss auf die Ausbildung des Strömungsmusters haben. Mit zunehmendem Schlitzwinkel wird das Strömungsgeschehen stärker von diesem dominiert und bei einem Winkel von $\alpha = 56^\circ$ stellt sich unabhängig von den anderen untersuchten Geometrieparametern SM 2 ein. Dieser Effekt zeigt sich auch bei einer Neigung von 3,9 % und 5,0 % (vgl. Tabelle 2 und Tabelle 3). Bei dem größten untersuchten Schlitzwinkel ($\alpha = 56^\circ$) haben auch hier die

anderen untersuchten Geometrieparameter keinen Einfluss auf das Strömungsmuster, hier tritt immer SM 2 auf.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass mit einer Veränderung eines Parameters innerhalb des Untersuchungsspektrums ein Übergang von einem Strömungsmuster über den Übergangsbereich hin zum zweiten Strömungsmuster möglich ist. Vereinzelt scheint ein direkter Umschlag von SM 1 zu SM 2 oder andersherum statt zu finden. Beispielhaft sei hier der Fall mit 3,9 %

Neigung und einem B/L von 0,8 genannt, bei dem unabhängig von a_{LW} das Strömungsmuster von SM 1 bei $\alpha = 39^\circ$ direkt in SM 2 bei $\alpha = 56^\circ$ übergeht. Die Abstufung der untersuchten Parameter ist vermutlich hier nicht eng genug, um den Übergangsbereich direkt zu erfassen. Auf Grund der sonstigen Ergebnisse ist aber davon auszugehen, dass auch hier ein Übergangsbereich existiert.

Die Ergebnisse zeigen darüber hinaus deutlich auf, dass eine Prognose des Strömungsmusters rein auf Basis des

$S_0 = 2,8 \%$	$a_{LW} = 0,038 \text{ m}$					$a_{LW} = 0,071 \text{ m}$				
	B/L = 0,80	B/L = 0,75	B/L = 0,70	B/L = 0,65	B/L = 0,60	B/L = 0,80	B/L = 0,75	B/L = 0,70	B/L = 0,65	B/L = 0,60
$\alpha = 24^\circ$	SM 1	SM 1	SM 1	T	T	SM 1	SM 1	T	T	T
$\alpha = 39^\circ$	SM 1	T	T	SM 2	SM 2	SM 1	SM 1	T	T	SM 2
$\alpha = 56^\circ$	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2

Tabelle 1: Ergebnis für $S_0 = 2,8 \%$ (blau = SM 1, rot = T, gelb = SM 2)

$S_0 = 3,9 \%$	$a_{LW} = 0,038 \text{ m}$					$a_{LW} = 0,071 \text{ m}$				
	B/L = 0,8	B/L = 0,75	B/L = 0,7	B/L = 0,65	B/L = 0,6	B/L = 0,8	B/L = 0,75	B/L = 0,7	B/L = 0,65	B/L = 0,6
$\alpha = 24^\circ$	SM 1	SM 1	SM 1	SM 1	T	SM 1	SM 1	SM 1	T	T
$\alpha = 39^\circ$	SM 1	T	T	SM 2	SM 2	SM 1	T	T	SM 2	SM 2
$\alpha = 56^\circ$	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2

Tabelle 2: Ergebnis für $S_0 = 3,9 \%$ (blau = SM 1, rot = T, gelb = SM 2)

$S_0 = 5,0 \%$	$a_{LW} = 0,038 \text{ m}$					$a_{LW} = 0,071 \text{ m}$				
	B/L = 0,8	B/L = 0,75	B/L = 0,7	B/L = 0,65	B/L = 0,6	B/L = 0,8	B/L = 0,75	B/L = 0,7	B/L = 0,65	B/L = 0,6
$\alpha = 24^\circ$	SM 1	SM 1	SM 1	T	SM 2	SM 1	SM 1	SM 1	T	T
$\alpha = 39^\circ$	T	T	SM 2	SM 2	SM 2	SM 1	T	T	SM 2	SM 2
$\alpha = 56^\circ$	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2	SM 2

Tabelle 3: Ergebnis für $S_0 = 5,0 \%$ (blau = SM 1, rot = T, gelb = SM 2)

B/L-Verhältnisses und der Neigung, wie es z. B. bei Wang et al. (2010) postuliert wird, nicht möglich ist. Als dominierender Faktor für die Ausbildung des Strömungsmusters konnte der Schlitzwinkel α ausgemacht werden, gefolgt vom B/L-Verhältnis, der Neigung S_0 und dem Versatzmaß a_{LW} .

In Bezug auf die Praxis lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass auch innerhalb der Gerinnegeometrie einer FAA in Schlitzbauweise (z. B. B/L-Verhältnis), die nur mit einem sehr großen Aufwand verändert werden kann, durch geringfügige Modifikationen, z. B. am Umlenkblock (zur Änderung des Schlitzwinkels α), das gewünschte Strömungsmuster realisiert werden kann. Dies ermöglicht es künftig, bestehende Schlitzpässe entsprechend potenzieller Vorgaben aus fischbiologischen Anforderungen im Hinblick auf das gewünschte Strömungsmuster umzubauen. Die Grundlage für diese Modifikationen und den Neubau von Anlagen mit einer genauen Vorkenntnis über das sich einstellende Strömungsmuster wurde mit den hier vorgestellten Untersuchungen und der Strömungsmustermatrix aus den Tabellen 1, 2 und 3 gelegt.

Mit Blick auf die innere Hydraulik von Schlitzpässen konnte mit den Untersuchungen und den gemessenen Punktgeschwindigkeiten weiter aufgezeigt werden, dass sich mit dem Strömungsmuster auch die hydraulischen Parameter, wie z. B. die lokale Fließgeschwindigkeit, die Wassertiefe, das Widerstandsverhalten und die Energiedissipation, verändern. Weitergehende Auswertungen hinsichtlich dieser Aspekte finden sich im Beitrag von Höger et al. „Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen“ (in diesen Heft).

6 Literatur

Bermudez, M.; Puertas, J.; Cea, L.; Pena, L.; Balairon, L. (2010): Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways. In: Ecological Engineering 36, S. 1355-1364.

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

Höger, V.; Henning, M.; Nestmann, F. (2014): Experimental Study on the Influence of Pool Geometry on Flow Patterns in Vertical-Slot Fishways. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Ecohydraulics, Trondheim.

Höger, V.; Henning, M.; Nestmann, F. (2015a): Experimental study on flow patterns in vertical slot fishways. In: Proceedings of Fish Passage, Groningen.

Höger, V.; Prinz, F.; von Meltzer, J.; Weichert, R. (2020): Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 23-32.

Keller, H. (1885): Die Anlage der Fischwege. In: Centralblatt der Bauverwaltung. S. 259- 278.

Musall, M.; Schmitz, C.; Oberle, P.; Nestmann, F. (2014): Analysis of Flow Patterns in Vertical Slot Fishways. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Ecohydraulics, Trondheim.

Musall, M.; Mahl, L. (2020): Numerische Modellierung von Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 49-58.

Rajaratnam, N.; Van der Vinne, G.; Katopodis, C. (1986): Hydraulics of vertical slot fishways. In: Journal of Hydraulic Engineering 112, Nr. 10, S. 909-927.

Tarrade L.; Texier A.; David L.; Larinier M. (2008): Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways. In: Hydrobiologia 609, S. 177–188.

Wang, R.; David, L.; Larinier, M. (2010): Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes. In: Knowl. Managt. Aquatic Ecosyst. 396, Nr. 2, S. 1-21.

Wu, S.; Rajaratnam, N.; Katopodis, C. (1999): Structure of flow in a vertical slot fishway. In: Journal of Hydraulic Engineering 125, Nr. 4, S. 351-359.

Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen

Dipl.-Ing. Verena Höger, Karlsruher Institut für Technologie

Dipl.-Ing. Frederik Prinz, Bundesanstalt für Wasserbau

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

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

Im vorliegenden Artikel werden gegenständliche Modelluntersuchungen zur Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen vorgestellt, die am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt wurden. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen die räumliche und zeitliche Variabilität der Fließgeschwindigkeit in einem Schlitzpass. Dies ist von Relevanz, da die Fließgeschwindigkeit ein wesentliches Bemessungskriterium für einen Schlitzpass darstellt. Die räumliche Variabilität betrifft dabei nicht nur unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten in einem Messquerschnitt (z. B. Schlitz), sondern auch unterschiedliche Kennwerte (Minimum, Mittel, Maximum) innerhalb eines Schlitzpasses zwischen baugleichen Becken. Ein Vergleich der gemessenen Fließgeschwindigkeiten mit dem im DWA-Merkblatt 509 (2014) empfohlenen Bemessungsansatz zeigt bereichs- bzw. zeitweise eine signifikante Überschreitung der Bemessungsgeschwindigkeit.

dass die Fallhöhe je Trennwand (und damit die Fließgeschwindigkeit) so groß, wie unter Einhaltung der biologischen Grenzwerte möglich, geplant werden soll. Eine verlässliche und fundierte Abschätzung der auftretenden Fließgeschwindigkeiten ist deshalb unabdingbar, um die Funktionsfähigkeit und die Wirtschaftlichkeit eines Schlitzpasses sicherzustellen.

Der vorliegende Artikel beschreibt anhand von Ergebnissen aus gegenständlichen Modellversuchen die Fließgeschwindigkeiten in einem Schlitzpass. Es werden Modellergebnisse mit dem in DWA (2014) beschriebenen und in der Planungspraxis häufig angewandten Bemessungsansatz zur Berechnung der maximalen Fließgeschwindigkeit verglichen. Ziel ist es, anhand der Ergebnisse und ausgehend von diesem rechnerischen Bemessungsansatz eine Einschätzung für die räumliche und zeitliche Variabilität der Fließgeschwindigkeiten in einem Schlitzpass zu gewinnen.

1 Einleitung

Die Passierbarkeit eines Schlitzpasses für Fische ist u. a. wesentlich von den dort auftretenden Fließgeschwindigkeiten abhängig. Die maximalen Fließgeschwindigkeiten in einem Schlitzpass, gegen die die aufsteigenden Fische anschwimmen müssen, treten dabei im Bereich der Schlitzpässe an den Trennwänden auf. Gleichzeitig werden Schlitzpässe wegen der Wirtschaftlichkeit bzw. aufgrund von häufig beengten Platzverhältnissen meist mit möglichst wenigen Becken ausgelegt. Das bedeutet,

2 Bestehende Berechnungsansätze

Anhand von Messungen in einem gegenständlichen Modell eines Schlitzpasses beschreibt Rajaratnam (1986), dass die maximale Fließgeschwindigkeit in den Schlitzpässen v_{\max} annähernd mit folgendem Zusammenhang beschrieben werden kann:

$$v_{\max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad (1)$$

Dabei ist g die Erdbeschleunigung und Δh die Wasserspiegeldifferenz. Dieser Ansatz wird in weiteren Studien durch Messungen bestätigt (u. a. Wu et al. 1999, Puertas et al. 2004, Wang et al. 2010, Krüger et al. 2010).

In DWA (2014) wird nicht die Geschwindigkeit im Schlitz als maßgebend für den Fischaufstieg betrachtet, sondern die maximale Geschwindigkeit im Einschnürungsbereich, die sich im Abstand von circa ein bis zwei Δh unterhalb des Schlitzes befindet. Für die Berechnung dieser Geschwindigkeit wird die folgende Gleichung empfohlen:

$$v_{\max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h + v_a^2} \quad (2)$$

in der v_a die Anströmgeschwindigkeit zum Schlitz ist. Da bei der Planung von Schlitzpässen v_a nicht bekannt und kaum zu ermitteln ist, wird sie meist vernachlässigt und in der Folge Gleichung 1 angewandt. Derzeit fehlen konkrete Anhaltswerte, wie groß die Abweichungen zwischen den so ermittelten Bemessungswerten zu den tatsächlich im Schlitzpass auftretenden Fließgeschwindigkeiten sind. Auch aus diesem Grund wird gemäß der Bemessungsphilosophie nach DWA (2014) die Verwendung von Sicherheitsbeiwerten erforderlich. Zur Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der hydraulischen Bemessung von Schlitzpässen wird daher empfohlen, den Grenzwert für die Fließgeschwindigkeit in den Engstellen bei Anlagen in Standardbauweise mit dem Sicherheitsbeiwert 0,95 zu reduzieren.

Der maßgebende Parameter für die Berechnung der maximalen Fließgeschwindigkeiten in Gleichung 1 ist die Wasserspiegeldifferenz zweier aufeinanderfolgender Becken. Verschiedene Studien (Rajaratnam et al. 1986, Wu et al. 1999, Puertas et al. 2004, Sokoray-Varga et al. 2015) zeigen, dass die Wasserspiegellagen innerhalb eines Beckens von einem Minimum an der oberstromigen Trennwand auf ein Maximum an der unterstromigen Trennwand ansteigen. Die tatsächlich in einem Schlitzpass an einer Trennwand auftretende Wasserspiegeldifferenz Δh_R ist demnach von einer theoretischen, für die Bemessung relevanten nominellen Wasserspiegeldifferenz Δh_N zu unterscheiden, die von einem horizontalen Wasserspiegel innerhalb der Becken ausgeht (Bild 1). Δh_N ist bei der Planung eine sinnvolle Größe, da der reale Wasserspiegelverlauf nicht bekannt ist. Für Δh_N wird die mittlere nominelle Wasserspiegeldifferenz herangezogen, die sich anhand des Gesamthöhenunterschieds des

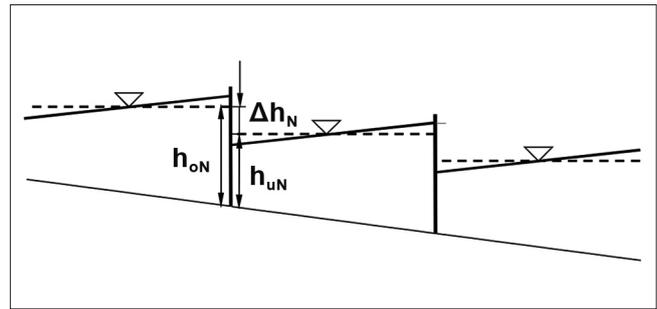


Bild 1: Schematischer Längsschnitt durch einen Schlitzpass mit der Definition des theoretischen horizontalen Wasserspiegels (gestrichelte Linie) und des in Realität tatsächlich geneigten Wasserspiegels (durchgezogene Linie)

betrachteten Schlitzpässes im Bemessungsfall und der Anzahl der Trennwände unter der Annahme von Normalabflussbedingungen ergibt.

3 Datengrundlage

3.1 Modellversuch

Grundlage für die Analysen sind Untersuchungen, die in einer Versuchsrinne am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit sieben Riegeln (sechs Becken) durchgeführt wurden (Bild 2). Die Becken im Modell haben eine Länge von 1,0 m. Weitere Informationen zu Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung finden sich in Höger et al. (2014).

Um einen Bezug zu Schlitzpässen mit einer an Bundeswasserstraßen häufig auftretenden Beckenlänge herzu-



Bild 2: Schlitzpassmodell am KIT, Blick entgegen der Fließrichtung

stellen, wurden die Ergebnisse mit dem Maßstab 1:3,75 skaliert. Zur Untersuchung unterschiedlicher Geometrievarianten wurden das Verhältnis zwischen Breite und Länge (B/L-Verhältnis), Schlitzwinkel α und Sohlneigung S_0 bzw. der Wasserspiegelunterschied Δh zwischen den Becken variiert (siehe Beitrag von Höger et al. „Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen“ in diesem Heft):

- B/L-Verhältnis: 0,6 bis 0,8
- α : 24°, 39°, 56°
- S_0 : 2,8 % bis 5 %
- Δh_N (bei Modellmaßstab 1:3,75): 0,11 m bis 0,20 m

Wie im o. g. Beitrag von Höger et al. beschrieben, stellen sich in Abhängigkeit der Geometrie und Neigung unterschiedliche Strömungsmuster ein, die mit Strömungsmuster 1 (SM 1 – „strömungsstabil“) und Strömungsmuster 2 (SM 2 – „strömungsdissipierend“) bezeichnet werden. Es lagen für SM 1 fünf und für SM 2 dreizehn unterschiedliche Kombinationen aus Geometrie und Neigung vor. Da jeweils an den Trennwänden 2 bis 6 gemessen wurde, stehen für jede Kombination aus Geometrie und Neigung fünf Datensätze an den einzelnen Trennwänden zur Verfügung. Aufgrund messtechnischer Probleme konnten zwei Datensätze für SM 1 nicht ausgewertet werden. Insgesamt ergab sich somit eine Stichprobe von $n = 23$ bei SM 1 und $n = 65$ bei SM 2.

Die Fließgeschwindigkeiten wurden mit einem Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) gemessen. Um stationäre zeitliche Mittelwerte bilden zu können, betrug die Messdauer pro Messpunkt mindestens fünf Minuten. Bei einer Aufnahmefrequenz von 200 Hz ergaben sich je Zeitreihe

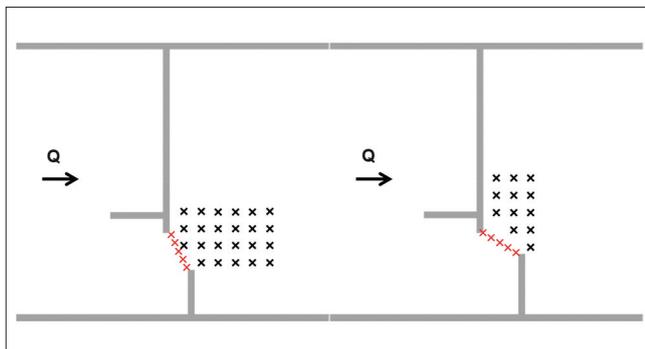


Bild 3: Darstellung der Messpunkte im Schlitzquerschnitt (rot) und im Becken (schwarz) unterstrom des Schlitzes für SM 1 (rechts) und SM 2 (links)

circa 60.000 Messwerte. Ein Messraster der kompletten Beckenbereiche in einer horizontalen Ebene in mittlerer Fließtiefe verschaffte zunächst einen Überblick über die Verteilung der Fließgeschwindigkeiten. Darauf aufbauend wurde im Nahbereich an den in Bild 3 dargestellten Messpunkten in fünf unterschiedlichen Tiefen gemessen. Im Folgenden wurde der Schlitzquerschnitt und der Bereich unterstrom des Schlitzes unterschieden. Der Messbereich unterstrom des Schlitzes war so eingegrenzt, dass dieser die maximalen Fließgeschwindigkeiten im Becken erfasste und unterschied sich je nach Strömungsmuster.

3.2 Auswertung der Daten

Für die Auswertung wurden alle Ergebnisse mit dem Modellmaßstab skaliert. Anschließend wurden die zeitlichen Mittelwerte der Fließgeschwindigkeit \bar{v} an jedem Messpunkt gebildet, wobei \bar{v} die Resultierende der zeitlichen Mittelwerte der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten (v_x , v_y und v_z) ist. Für jeden Schlitzquerschnitt wurde aus \bar{v} der Maximal-, der Minimal- und der arithmetische Mittelwert der Fließgeschwindigkeiten ermittelt ($\bar{v}_{\max,S}$; $\bar{v}_{\min,S}$; $\bar{v}_{\text{mittel},S}$). Im Becken unterstrom des Schlitzes wurde zudem jeweils der Maximalwert $\bar{v}_{\max,B}$ des betrachteten Bereichs berechnet. Eine Betrachtung des Minimal- oder Mittelwerts ist hier nicht sinnvoll, da das Messraster auch Punkte außerhalb des Strömungspfad erfasst und die so ermittelten Werte für die Passierbarkeit des Bereichs unterhalb der Schlitzes nicht relevant sind.

Die in den Modellversuchen untersuchten unterschiedlichen Geometrien wurden in der nachfolgenden Auswertung nicht einzeln betrachtet, sondern nur nach Strömungsmuster kategorisiert. Begründet wird dieses Vorgehen damit, dass sich die geometrischen Änderungen vor allem über das Strömungsmuster bemerkbar machen, d. h. sobald die Änderungen stark genug sind, um ein Umschlagen in ein anderes Strömungsmuster zu bewirken, hat dies einen Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung in den Becken (siehe Beitrag Höger et al. „Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen“ in diesem Heft).

4 Ergebnisse

4.1 Räumliche Verteilung der Fließgeschwindigkeit

In einem ersten Schritt erfolgt nachfolgend eine qualitative Beschreibung der Strömung in den Becken anhand eines Beispiels für jedes Strömungsmuster. Bild 4 zeigt die in mittlerer Fließtiefe in zwei aufeinander folgenden Becken gemessenen und zeitlich gemittelten Fließgeschwindigkeiten. Da die Strömung im Becken außerhalb des Schlitzbereichs hauptsächlich zweidimensional ist (Puertas et al. 2004), sind die Ergebnisse der mittleren Ebene im Becken repräsentativ für die gesamte Fließtiefe.

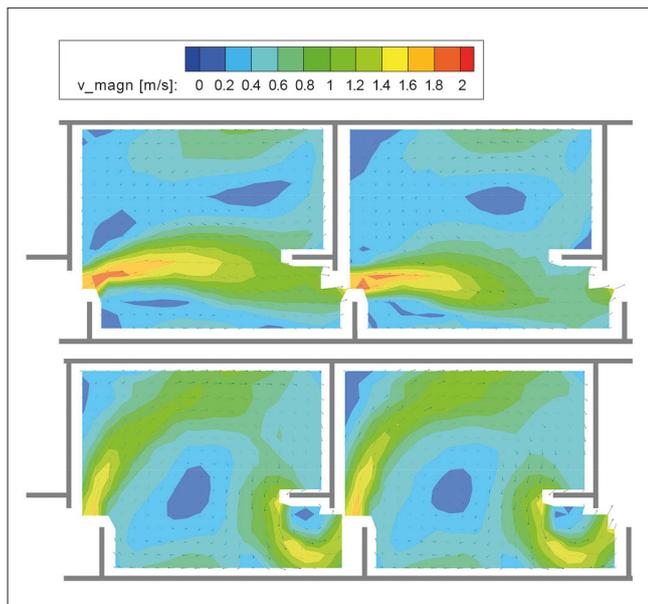


Bild 4: Vergleich der Fließgeschwindigkeiten in mittlerer Fließtiefe in zwei aufeinanderfolgenden Becken bei SM 1 (oben) mit $\alpha = 24^\circ$, B/L-Verhältnis = 0,8, $S_0 = 3,9 \%$ und SM 2 (unten) mit $\alpha = 56^\circ$, B/L-Verhältnis = 0,8, $S_0 = 3,9 \%$

Wie in Bild 4 zu erkennen ist, treten erhöhte Fließgeschwindigkeiten bei SM 1 im und unmittelbar unterstrom des Schlitzquerschnitts auf. Oberstrom des Schlitzquerschnitts sind die gemessenen Fließgeschwindigkeiten deutlich niedriger. Der Maximalwert der gemessenen Fließgeschwindigkeiten ist bei SM 1 im Vergleich zu SM 2 höher und wird nicht innerhalb des Schlitzquerschnittes, sondern unterstrom des Schlitzes erreicht. Die von den Schlitzten abgewandte Seite des Beckens zeigt eine aus-

geprägte Rückstromzone mit geringen Fließgeschwindigkeiten.

Im Gegensatz zu SM 1 werden bei SM 2 erhöhte Fließgeschwindigkeiten nicht nur im Schlitzquerschnitt und unterstrom, sondern auch oberstrom beobachtet. Diese größere Ausdehnung hoher Fließgeschwindigkeiten ist bedingt durch eine Ablösung der Strömung am oberstromigen Ende der Leitwand. Die höchste Fließgeschwindigkeit wird bei SM 2 im Schlitzquerschnitt bzw. in dessen Nahbereich direkt unterstrom erreicht. Bei SM 2 zeigt sich in Beckenmitte ein Bereich mit sehr geringer Strömungsgeschwindigkeit.

Die Vor- und Nachteile der beiden Strömungsmuster für den Fischaufstieg werden seit längerer Zeit in der Fachgemeinschaft diskutiert. So wird als Vorteil für das SM 1 gesehen, dass ein klarer von Schlitz zu Schlitz führender Strömungspfad existiert, der den Fischen eine gute Orientierung beim Aufstieg liefert. Der Vorteil von SM 2 liegt in einer im Vergleich zu SM 1 potenziell erhöhten Geschwindigkeitsabnahme im Becken verknüpft mit einer geringeren maximalen Fließgeschwindigkeit im unterstrom gelegenen Schlitz. Grundsätzlich bestätigen die Ergebnisse der Modelluntersuchungen diese Hypothesen. SM 2 zeichnet sich durch die Strömungsablösung an der Leitwand oberhalb eines Schlitzes aus. Dies ist verbunden mit einer erhöhten Geschwindigkeitsabnahme im Becken und damit geringeren Fließgeschwindigkeiten unterhalb des Schlitzes. Zu beachten ist jedoch die mit der Ablösung verbundene Einengung des Strömungspfades sowie eine längere Strecke erhöhter Fließgeschwindigkeit. Insbesondere für SM 2 lässt sich die Aussage treffen, dass es sich beim Schlitz weniger um einen einzelnen für den Fisch zu passierenden Querschnitt, sondern vielmehr um einen Schlitzbereich mit einer gewissen Ausdehnung bzw. Länge handelt.

4.2 Maximale Fließgeschwindigkeiten im Schlitz und im Becken

Bild 5 zeigt die Maximalwerte der Fließgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Δh_N sowie dem beobachteten Strömungsmuster. Jeder im Bild gezeigte Datenpunkt entspricht dabei dem Maximalwert der zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten im Schlitzquerschnitt $\bar{v}_{\max,S}$ (Bild 5, links) bzw. im Becken unterstrom des Schlitz-

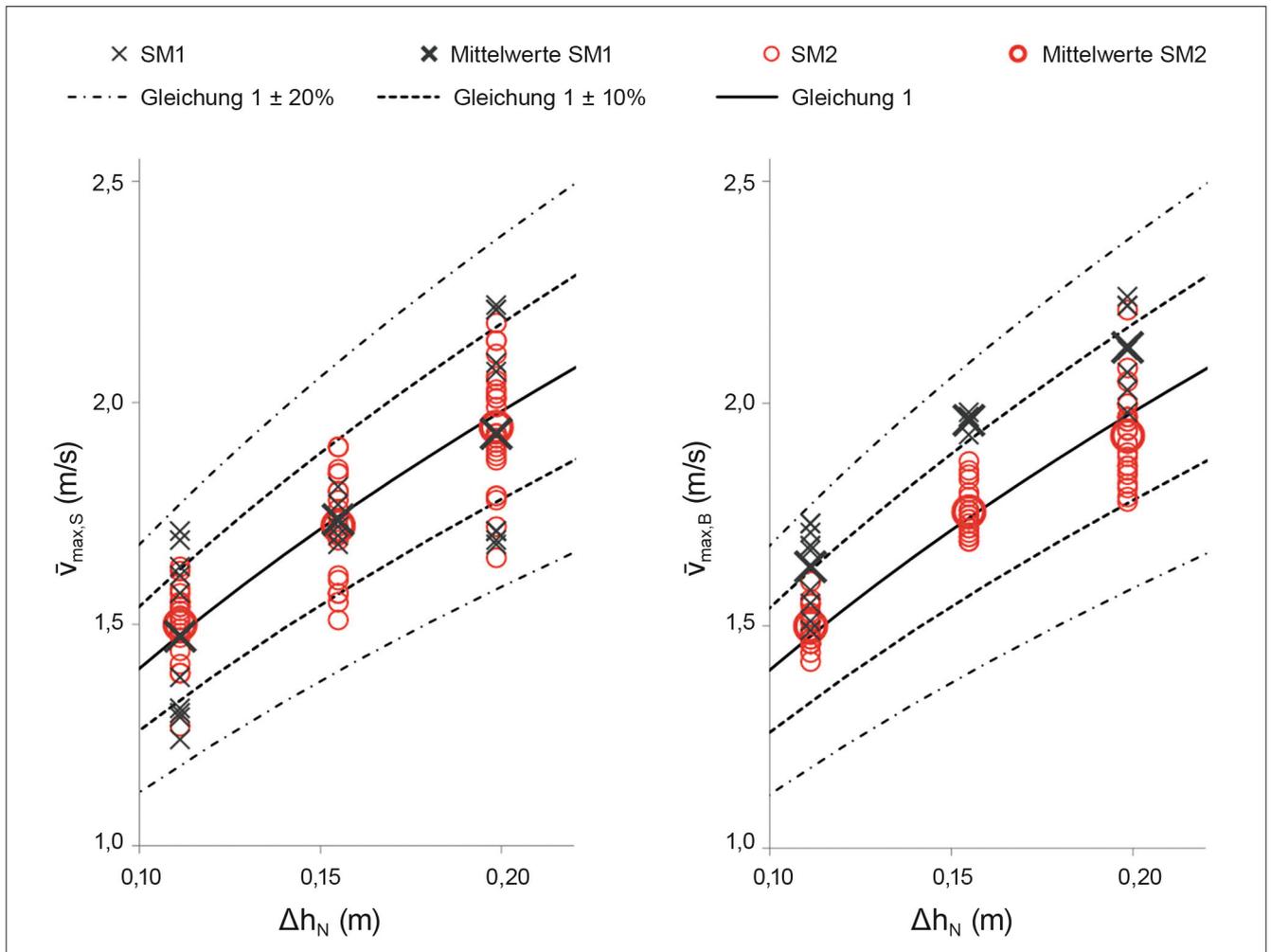


Bild 5: Maximale Fließgeschwindigkeit im Schlitzquerschnitt (links) und im Becken unterstrom des Schlitzes (rechts), jeder Datenpunkt entspricht dem Maximalwert im Schlitz bzw. im Becken unterhalb des Schlitzes

querschnittes $\bar{v}_{\max,B}$ (Bild 5, rechts). Neben den Maximalwerten sind die arithmetischen Mittelwerte der Maximalwerte aller gemessenen Punkte (d. h. in verschiedenen Schlitzes bzw. Becken für verschiedene Geometrievarianten) hervorgehoben. Zum Vergleich ist außerdem der funktionale Zusammenhang nach Gleichung 1 dargestellt.

Betrachtet man in Bild 5 (links) die Mittelwerte der maximalen Fließgeschwindigkeit im Schlitzquerschnitt, so lässt sich für beide Strömungsmuster und unabhängig von Δh_N eine gute Übereinstimmung zwischen $\bar{v}_{\max,S}$ und Gleichung 1 erkennen. Die im Mittel gemessenen Abweichungen von $-0,5\%$ (SM 1) und $-1,1\%$ (SM 2) sind vor dem Hintergrund anderer Unsicherheiten vernachlässigbar. Im Gegensatz hierzu ist bei $\bar{v}_{\max,B}$ ein deutlicher Einfluss des Strömungsmusters auf die Mittelwerte der Maximalgeschwindigkeiten erkennbar (Bild 5, rechts). Die

im Mittel über alle Becken und Geometrien gemessenen Werte liegen bei SM 1 um $+11\%$ höher als nach Gleichung 1 berechnet, während bei SM 2 mit einer Abweichung von $-0,2\%$ auch unterhalb des Schlitzes eine gute Übereinstimmung mit Gleichung 1 zu erkennen ist. Die einzelnen Messwerte zeigen jedoch auch, dass an einzelnen Schlitzes durchaus kleinere und größere Maximalgeschwindigkeiten gemessen werden. Auf diese Streuung wird weiter unten näher eingegangen.

Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse, dass für den Schlitzquerschnitt unabhängig vom Strömungsmuster eine Prognose des mittleren in einem Schlitzpass auftretenden Maximalwerts mit Gleichung 1 möglich ist. Für den Bereich unterhalb des Beckens liefert Gleichung 1 hingegen lediglich für SM 2 plausible Resultate, während für SM 1 mit Gleichung 1 der mittlere Maximalwert um etwa 10% unterschätzt wird.

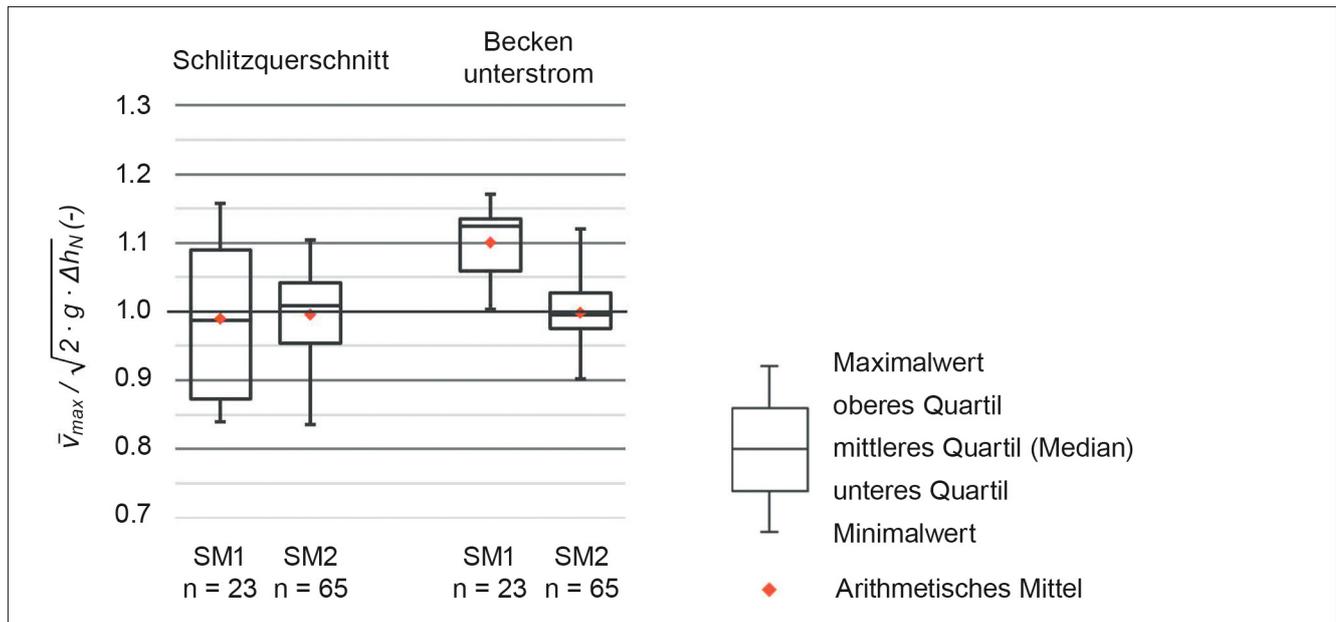


Bild 6: Darstellung der mit Gleichung 1 normierten maximalen Fließgeschwindigkeit (zeitlicher Mittelwert), differenziert nach Schlitz und Beckenbereich unterhalb des Schlitzes sowie in Abhängigkeit des Strömungsmusters

Eine qualitative Betrachtung der Ergebnisse in Bild 5 zeigt, dass die Variabilität der Ergebnisse weitestgehend unabhängig von Δh_N ist und die Datenpunkte deshalb für alle Δh_N (d. h. Gefälle) zusammengefasst betrachtet werden können. In Bild 6 werden die mit Gleichung 1 normierten Ergebnisse der gemessenen Geschwindigkeiten als Boxplot dargestellt. Der Boxplot zeigt neben den Minimal- und Maximalwerten die Quartile mit einer Unterschreitungswahrscheinlichkeit von 25 % (unteres Quartil), 50 % (mittleres Quartil bzw. Median) und 75 % (oberes Quartil).

Im Schlitzquerschnitt (Bild 6, links) zeigen die Werte der Quartile und die größten bzw. kleinsten gemessenen Werte, dass die räumliche Variabilität bei SM 1 größer als bei SM 2 ist. Die Betrachtung der oberen und unteren Quartilswerte zeigt, dass bei SM 1 die Abweichungen der gemessenen maximalen Fließgeschwindigkeit von Gleichung 1 im Schlitzquerschnitt an 50 % der Trennwände innerhalb einer Bandbreite von $\pm 10\%$ liegen, während die Abweichungen der Minimal- bzw. Maximalwerte bei etwa $\pm 15\%$ liegen. Demgegenüber ist bei SM 2 die Bandbreite des oberen und unteren Quartil-Werts mit etwa $\pm 5\%$ deutlich kleiner. Die Minimal- bzw. Maximalwerte liegen etwa bei -15% bis $+10\%$.

Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen im Schlitzquerschnitt und im Becken unterhalb des Schlitzes ergibt,

dass die räumliche Variabilität im Becken bei SM 1 und SM 2 kleiner ist als im Schlitzquerschnitt. Ausgehend von einem höheren Mittelwert liegt der größte gemessene Wert bei SM 1 mehr als 15 % über dem mit Gleichung 1 ermittelten Wert, während selbst der Minimalwert über der Prognose nach Gleichung 1 liegt. Der untere und obere Quartil-Wert liegt für SM 1 etwa bei $+5\%$ bis $+15\%$. Demgegenüber betragen bei SM 2 der untere und obere Quartil-Wert unter $\pm 5\%$. Die Minimal- bzw. Maximalwerte liegen etwa bei $\pm 10\%$. Die Unterschiede der Geschwindigkeiten im Becken in Abhängigkeit der Strömungsmuster (Bild 6, rechts) lassen sich mit einer höheren Anströmgeschwindigkeit und eines stärker dominierenden und punktuell konzentrierten Verlustes bei SM 1 erklären. Im Gegensatz hierzu trägt bei SM 2 bereits die oberhalb des Schlitzes angeordnete Leitwand zum hydraulischen Verlust des Schlitzes bei, mit der Folge insgesamt reduzierter Maximalgeschwindigkeiten im unterhalb gelegenen Becken, jedoch eines im Vergleich zu SM 1 verlängerten Bereichs erhöhter Geschwindigkeiten (siehe auch Bild 4).

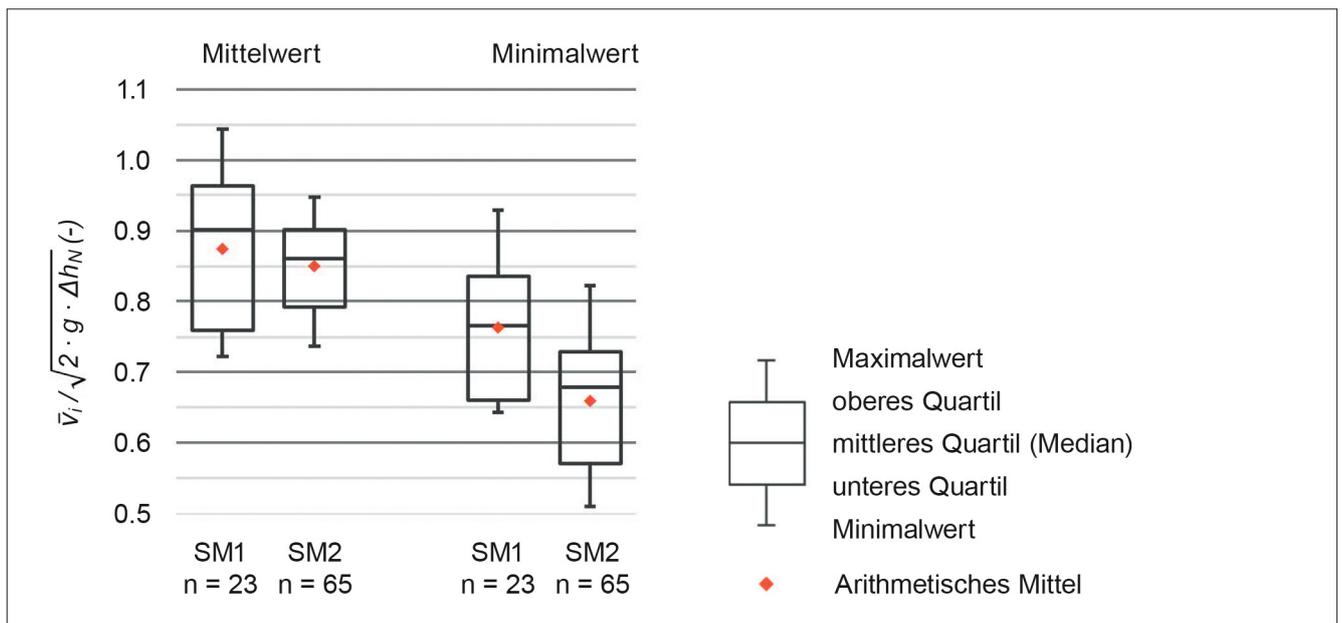


Bild 7: Darstellung der mit Gleichung 1 normierten mittleren und minimalen Fließgeschwindigkeit (zeitlicher Mittelwert) im Schlitz in Abhängigkeit des Strömungsmusters

4.3 Mittlere und minimale Fließgeschwindigkeit innerhalb der Schlitzquerschnitte

Analog zu der vorgängig vorgestellten Analyse der Maximalwerte erfolgt in diesem Kapitel die Betrachtung der Mittelwerte und der Minimalwerte der in den Schlitzquerschnitten gemessenen (zeitlich gemittelten) Fließgeschwindigkeiten (Bild 7). Es soll somit ein Eindruck der Streuung der Fließgeschwindigkeiten innerhalb des Schlitzquerschnittes vermittelt werden.

Bild 7 zeigt, dass der Mittelwert der im Schlitzquerschnitt gemessenen Fließgeschwindigkeiten Werte annehmen kann, die zwischen 75 % und 105 % des mit Gleichung 1 prognostizierten Wertes für v_{max} liegen. Das arithmetische Mittel ist bei SM 1 nahezu identisch zu SM 2. Betrachtet man die Streuung der Mittelwerte (Quartile, Minimum, Maximum), so zeigt sich, dass bei SM 2 tendenziell ein geringerer Schwankungsbereich vorliegt. Hinsichtlich des Minimalwertes lässt sich diese Tendenz nicht wiederfinden. Hier zeigt sich für beide Strömungsmuster eine ähnliche Streuung der Quartil-Werte bzw. des Minimums und des Maximums. Im Gegensatz dazu lässt sich ein Unterschied beim arithmetisches Mittel erkennen. Im Vergleich zu Gleichung 1 liegt für SM 1 das arithmetische Mittel des Minimums bei gut 75 %, wäh-

rend für SM 2 ein geringerer Wert von etwa 65 % festzustellen ist. Diese im Vergleich zu SM 1 beobachteten geringeren Minimalwerte bei SM 2 können ein Hinweis auf eine etwas ungleichmäßigere Anströmung des Schlitzes, hervorgerufen durch die Ablösung der Strömung an der oberstromigen Leitwand, sein.

4.4 Zeitliche Variation der Fließgeschwindigkeiten im Schlitzquerschnitt

Die bisherigen Auswertungen bezogen sich ausschließlich auf zeitliche Mittelwerte. Um zusätzlich einen Eindruck von der zeitlichen Variation (turbulente Schwankungen) der Fließgeschwindigkeiten in einem Schlitzpass zu gewinnen, werden exemplarisch die Zeitreihen je eines Messpunktes eines Versuchs für SM 1 und SM 2 betrachtet. Der ausgewählte Messpunkt ist jeweils der Maximalwert des zeitlichen Mittels (siehe Kapitel 4.2) an der vierten Trennwand des ausgewählten Versuchs. Der obere Teil von Bild 8 zeigt für die ausgewählten Messpunkte einen Ausschnitt der Zeitreihe über eine Dauer von 150 Sekunden. Dargestellt ist dabei jeweils nur die größte der Geschwindigkeitskomponenten v_x und v_y . Neben den einzelnen Messwerten ist der über eine Sekunde und der über zehn Sekunden ermittelte gleitende Mittelwert dargestellt.

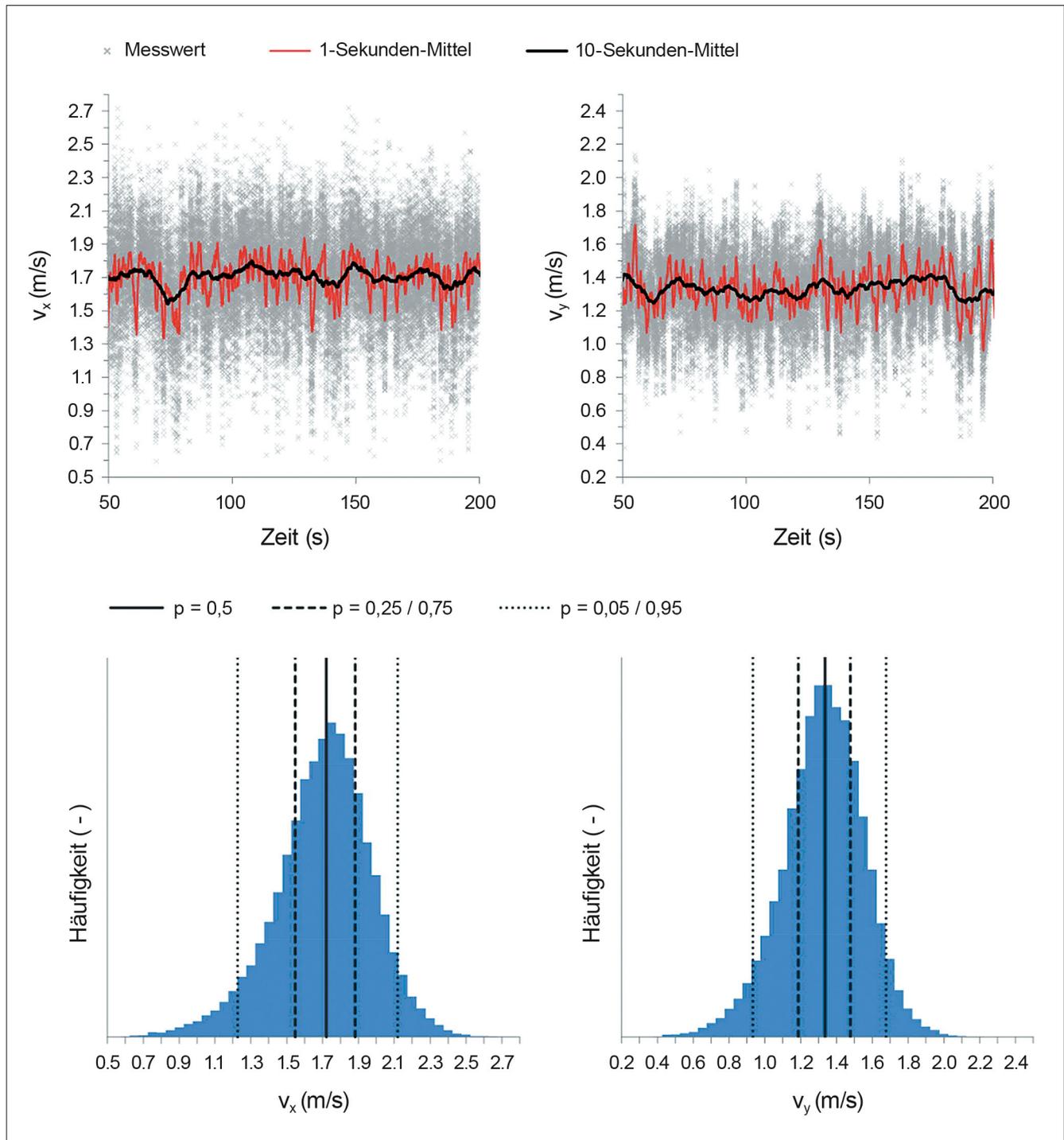


Bild 8: Ausschnitt aus der Zeitreihe (oben) und Häufigkeitsverteilung der gemessenen Fließgeschwindigkeit (unten) eines ausgewählten Messpunktes für SM 1 (links) mit $\alpha = 24^\circ$, B/L-Verhältnis = 0,8, $S_0 = 2,8 \%$ und SM 2 (rechts) mit $\alpha = 56^\circ$, B/L-Verhältnis = 0,6, $S_0 = 2,8 \%$

Der untere Teil von Bild 8 zeigt die Verteilung der Messwerte als Histogramm mit ausgewählten Quartilen der Wahrscheinlichkeit p . Für den beispielhaft ausgewählten Messpunkt bei SM 1 (links) liegt der Median der Messwerte für v_x bei circa 1,7 m/s. Für den ausgewählten Mes-

spunkt bei SM 2 (rechts) ergibt einen Median für v_y von ca. 1,3 m/s. 50 % der Messwerte liegen in beiden Fällen in einer Spanne von circa $\pm 10 \%$. Die einzelnen Messwerte zeigen somit eine große Bandbreite der Fließgeschwindigkeiten infolge turbulenter Schwankungen, die

mindestens in einer ähnlichen Größenordnung wie die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene räumliche Variabilität liegen. Für detailliertere Aussagen zur zeitlichen Schwankung der Fließgeschwindigkeit an einzelnen Orten in einem Schlitzpass müsste eine umfassendere Analyse erfolgen.

5 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen verdeutlichen, dass die Fließgeschwindigkeiten in einem Schlitzpass nicht konstant sind, sondern zeitlich und räumlich stark schwanken. Die räumliche Variabilität betrifft dabei nicht nur den naheliegenden Fall unterschiedlicher Fließgeschwindigkeiten an unterschiedlichen Orten eines Schlitzpasses (z. B. Schlitz versus Becken), sondern insbesondere auch variierende Fließgeschwindigkeiten an identischen Messpunkten in baugleichen Becken.

Im Schlitzquerschnitt zeigen die gemessenen maximalen Fließgeschwindigkeiten, dass Gleichung 1 als gute Annäherung für den zeitlichen Mittelwert der Maximalgeschwindigkeit dienen kann. Für den Einschnürungsbereich direkt unterhalb des Schlitzes gilt die Aussage zur Validität von Gleichung 1 hingegen nur für SM 2, da der Maximalwert für SM 1 im Mittel unterschätzt wird.

Durch die ermittelten Schwankungen kommt es zumindest bereichs- bzw. zeitweise zu signifikanten Überschreitungen der mit Gleichung 1 berechneten maximalen Fließgeschwindigkeit. Der in DWA (2014) bei der Ermittlung der Fließgeschwindigkeit empfohlene Sicherheitsbeiwert für Schlitzpässe von 0,95 kann diese Variationen nur teilweise abdecken. Die Schlussfolgerung, dass demzufolge der Sicherheitsbeiwert bei Schlitzpässen anzupassen ist, greift jedoch zu kurz. Vielmehr ist eine Diskussion zu führen, welche hydraulischen Unsicherheiten der Sicherheitsbeiwert abdecken soll und vor allem welche charakteristische Geschwindigkeit tatsächlich fischökologisch maßgebend und damit bemessungsrelevant ist. So wird beispielsweise das zeitliche Maximum an einem Messpunkt voraussichtlich zu keiner wesentlichen Beeinträchtigung des Fischeaufstiegs führen, da an gleicher Stelle wenige Momente später wesentlich geringere Geschwindigkeiten anzutreffen sind.

Eine ähnliche Einschätzung betrifft die Bewertung der gemessenen Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der beiden identifizierten Strömungsmuster. Zwar konnte gezeigt werden, dass die maximale Geschwindigkeit im Becken unterhalb des Schlitzes bei SM 1 höher ist als bei SM 2, es besteht jedoch grundsätzlich die Möglichkeit, dass Fische dem Bereich der maximalen Geschwindigkeiten seitlich ausweichen. Die vorliegenden Ergebnisse sollten demzufolge nicht direkt für die Bemessung eines Schlitzpasses angewendet werden, ohne die Reaktion der Fische auf zeitlich und örtlich erhöhte Geschwindigkeiten einzuschätzen oder zu untersuchen.

Mit dem vorliegenden Artikel wird ein Beitrag zur Beschreibung der vorhandenen Variabilität der Fließgeschwindigkeiten in einem Schlitzpass geleistet. Es ist jedoch zu beachten, dass die für den Fisch tatsächlich relevanten hydraulischen Prozesse wesentlich komplexer sind, als es das hier zugrunde liegende Untersuchungskonzept mit Punktmessungen und den zugehörigen Auswertungen charakteristischer Kenngrößen der Geschwindigkeit erwarten lässt (Lacey et al. 2012, Sokoray-Varga 2016).

6 Literatur

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

Höger, V.; Henning, M.; Nestmann, F. (2014): Experimental study on the influence of pool geometry on flow patterns in vertical-slot fishways. In: 10th International Symposium on Ecohydraulics. 10th International Symposium on Ecohydraulics. Trondheim, Juni 2014.

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.

Krüger, F.; Heimerl, S.; Seidel, F.; Lehmann, B. (2010): Ein Diskussionsbeitrag zur hydraulischen Berechnung von

Schlitzpässen. In: *WasserWirtschaft* (03), S. 30–36.

Lacey, J. R. W.; Neary, V. S.; Liao, J. C.; Enders, E. C.; Tritico, H. M. (2012): The IPOS framework: linking fish swimming performance in altered flows from laboratory experiments to rivers. Special Issue Paper. In: *River Res. Applic.* 28 (4), S. 429–443. DOI: 10.1002/rra.1584.

Puertas, J.; Pena, L.; Teijeiro, T. (2004): Experimental Approach to the Hydraulics of Vertical Slot Fishways. In: *J. Hydraul. Eng.* 130 (1), S. 10–23. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:1(10).

Rajaratnam, N.; Van der Vinne, G.; Katopodis, C. (1986): Hydraulics of Vertical Slot Fishways. In: *J. Hydraul. Eng.* 112 (10), S. 909–927. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:10(909).

Sokoray-Varga, B. (2016): Detecting flow events in turbulent flow of vertical-slot fish passes. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG).

Sokoray-Varga, B.; Weichert, R.; Nestmann, F. (2015): Untersuchungen zu hydraulischen Berechnungsansätzen von Schlitzpässen. In: *WasserWirtschaft*, Bd. 105. Wiesbaden: Springer Vieweg (105), S. 61–66.

Wang, R. W.; David, L.; Larinier, M. (2010): Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes. In: *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* (396), S. 2. DOI: 10.1051/kmae/2010002.

Wu, S.; Rajaratnam, N.; Katopodis, C. (1999): Structure of Flow in Vertical Slot Fishway. In: *J. Hydraul. Eng.* 125 (4), S. 351–360. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:4(351).

Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen

Dr.-Ing. Béla Sokoray-Varga, Bundesanstalt für Wasserbau
Dipl.-Ing. Verena Höger, Karlsruher Institut für Technologie
Jonas von Meltzer M. Sc., Fichtner Water & Transportation GmbH
Dipl.-Ing. Frederik Prinz, Dr. sc. techn. Roman Weichert,
Bundesanstalt für Wasserbau

Im vorliegenden Artikel werden Untersuchungen vorgestellt, die an Versuchsrinnen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zum Thema der Durchflusskapazität von Schlitzpässen durchgeführt wurden. Die Untersuchungen hatten zum Ziel, die im DWA Merkblatt 509 (2014) empfohlenen Schlitzpassgeometrien für die an Bundeswasserstraßen auftretenden Verhältnisse hinsichtlich des Zusammenhangs von Durchfluss und Fließtiefe zu prüfen. Die Daten der KIT/BAW-Untersuchungen wurden mit dem in DWA (2014) beschriebenen Ansatz verglichen und ein neuer, einfacher Ansatz entwickelt. Die Ergebnisse bestätigen den in der Literatur beschriebenen linearen Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe für die an Bundeswasserstraßen praxisrelevanten Betriebsfälle. Der Ansatz nach DWA (2014) konnte nur teilweise durch die erhobenen Daten bestätigt werden. Auch wenn unabhängige Daten der TH Lübeck die Validität des neu entwickelten Ansatzes zeigen, sind weitere Messungen insbesondere an realisierten Anlagen erforderlich, um die Genauigkeit des Ansatzes auch unter Feldbedingungen zu prüfen.

1 Einleitung

Der Betriebsdurchfluss Q und die Fließtiefe h sind fundamentale Größen für die Bemessung einer Fischaufstiegsanlage. Der Zusammenhang zwischen dem Durchfluss Q und der Fließtiefe h bringt letztendlich das Zusammen-

spiel aus zur Verfügung stehender Energiehöhendifferenz zwischen Ober- und Unterwasser und den hydraulischen Verlusten in der Fischaufstiegsanlage zum Ausdruck (Bild 1). Die verlässliche Bestimmung des Betriebsdurchflusses ist dabei für verschiedene Aspekte relevant. So ist es beispielsweise für die Frage der Auffindbarkeit einer Fischaufstiegsanlage wichtig zu wissen, wie groß der Betriebsdurchfluss ist, da nur so berechnet werden kann, ob und wenn ja, wieviel Wasser zur Erzeugung einer hinreichenden Leitströmung im Unterwasser der Fischaufstiegsanlage hinzugegeben werden muss.



Bild 1: Strömungsablösungen an den Einbauten im Bereich der Trennwand eines Schlitzpasses

Der nachfolgende Beitrag fasst Resultate verschiedener Untersuchungen an KIT und BAW zusammen und setzt diese in Relation zu bestehenden Ansätzen zur Berechnung der Durchfluss-Fließtiefen-Beziehung in Fischauf-

stiegsanlagen. Untersuchungsergebnisse der Technischen Hochschule Lübeck (Klein und Oertel 2017, 2018) dienen dem Vergleich mit unabhängigen Daten.

2 Bestehende Berechnungsansätze

In der Literatur existieren verschiedene Ansätze zur Berechnung der Durchfluss-Fließtiefen-Beziehung eines Schlitzpasses. Eine Übersicht findet sich beispielsweise in Sokoray-Varga et al. (2015) oder in Klein und Oertel (2017). Nachfolgend wird auf relevante Ansätze eingegangen, wobei der Schwerpunkt auf dem in DWA (2014) publizierten Ansatz (siehe auch Krüger et al. 2010) liegt, da dieser in der Planungspraxis in Deutschland häufig Anwendung findet.

Die grundlegende Erkenntnis der bisherigen Untersuchungen zur Durchflusskapazität von Schlitzpässen ist, dass der Durchfluss Q und eine definierte, in einem praxisrelevanten Bereich liegende Fließtiefe in den Becken h für den gleichförmigen Abflusszustand in einem linearen Verhältnis zueinander stehen (u. a. Rajaratnam et al. 1986, 1992 Puertas et al. 2004, Sokoray-Varga et al. 2015). Exemplarisch sei der Ansatz von Wang et al. (2010) aufgeführt:

$$Q = C_{md} \cdot h_m \cdot s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_N} \quad (1)$$

Hierin ist C_{md} ein Durchflussbeiwert, welcher sich für die untersuchte Beckengeometrie in Wang et al. (2010) für unterschiedliche Durchflüsse als konstant erwies, s ist die Schlitzweite, g die Erdbeschleunigung und h_m die mittlere Fließtiefe in den Becken. Ein wichtiger Parameter für die Bemessung von Schlitzpässen ist die Wasserspiegeldifferenz zweier aufeinanderfolgender Becken. Verschiedene Studien (Rajaratnam et al. 1986, Wu et al. 1999, Puertas et al. 2004, Sokoray-Varga et al. 2015) zeigen, dass die Wasserspiegellagen von einem Minimum hinter der Trennwand auf ein Maximum direkt vor der Trennwand ansteigen. Die tatsächlich in einer Fischaufstiegsanlage an einer Trennwand auftretende Wasserspiegeldifferenz Δh_R ist demnach von einer theoretischen, für die Bemessung relevanten, nominellen Wasserspiegelspiegeldifferenz Δh_N zu unterscheiden, da diese von einem horizontalen Wasserspiegel innerhalb der Becken ausgeht (Bild 2). Die no-

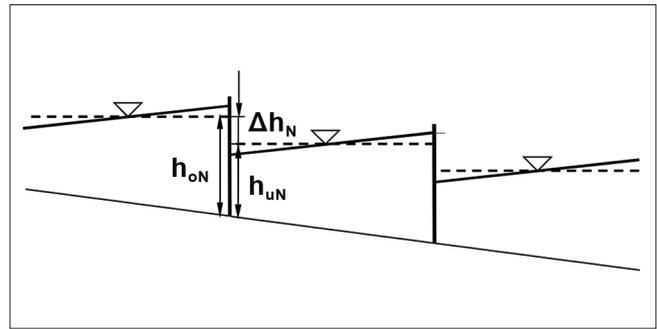


Bild 2: Schematischer Längsschnitt durch einen Schlitzpass mit der Definition des theoretischen horizontalen Wasserspiegels (gestrichelte Linie) und des in Realität tatsächlich geneigten Wasserspiegels (durchgezogene Linie)

minellen Fließtiefen h_{oN} und h_{uN} bezeichnen die auf den horizontalen Wasserspiegel bezogenen Fließtiefen direkt oberhalb und unterhalb der Trennwand.

In Deutschland ist das Standardwerk zur Bemessung von Fischaufstiegsanlagen das DWA-Merkblatt 509 (2014). Der dort empfohlene Berechnungsansatz lautet:

$$Q = \mu_v \cdot s \cdot \sqrt{g} \cdot h_{oN}^{3/2} = \mu_v \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot h_{oN} \cdot s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{oN}} \quad (2)$$

Zur Bestimmung des Durchflusskoeffizienten μ_v wird in DWA (2014) ein funktionaler Zusammenhang zu den Fließtiefen h_{oN} und h_{uN} ober- bzw. unterhalb der Trennwand zweier aufeinanderfolgender Becken gegeben, wobei strömungsstabile und strömungsdissipierende Verhältnisse unterschieden werden. Für eine Definition dieser beiden Strömungsmuster wird auf den Beitrag von Höger et al. „Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen“ (in diesem Heft) verwiesen. Für strömungsstabile Verhältnisse (Strömungsmuster 1, SM 1) gilt:

$$\mu_v = 0,48 \cdot \left(1 - \left[\frac{h_{uN}}{h_{oN}} \right]^{4,5} \right)^{0,60} \quad (3a)$$

Für strömungsdissipierende Verhältnisse (Strömungsmuster 2, SM 2) wird angegeben:

$$\mu_v = 0,59 \cdot \left(1 - \left[\frac{h_{uN}}{h_{oN}} \right]^{4,5} \right)^{0,48} \quad (3b)$$

Auch wenn die Gleichungen 2 sowie Gleichungen 3a und 3b nicht linear sind, gibt deren Kombination ebenfalls den linearen Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe wieder. Wichtig für die Anwendung des Ansatzes nach DWA (2014) ist, dass sich h_{oN} und h_{uN} auf die theoretischen, horizontalen Wasserspiegellagen beziehen. Als Gültigkeitsbereich wird für die Gleichungen

$$\frac{h_{uN}}{h_{oN}} = 0,5 \text{ bis } 0,99$$

und

$$h_u > 2 \cdot s$$

genannt.

3 Datengrundlage

Wesentliche Grundlage für die hier vorgestellten Analysen sind Untersuchungen, die an Versuchsrinnen am KIT und an der BAW durchgeführt wurden. Nähere Informationen zu Versuchsaufbau und -durchführung finden sich in Höger et al. (2014) und Sokoray-Varga et al. (2015). Grundsätzlich wurde darauf geachtet, dass die Untersuchungen den in DWA (2014) beschriebenen Parameterbereich für das Rinnengefälle und die Beckengeometrie abdecken. Eine wesentliche Unterscheidung der beiden Versuchsreihen liegt in der unterschiedlichen Gestaltung der Schlitzte. Während in den Untersuchungen an der KIT-Rinne ein scharfkantiger Schlitz zum Einsatz kam, sind die Schlitzte in der BAW-Rinne abgerundet. Des Weiteren wurden die Versuche in der KIT-Rinne ohne Sohlrauheit durchgeführt, wohingegen an der BAW drei unterschiedliche Bedingungen vorlagen: ohne Sohlrauheit (glatt), mit einer idealisierten Sohlrauheit in Form von Halbkugeln und mit Granitschotter.

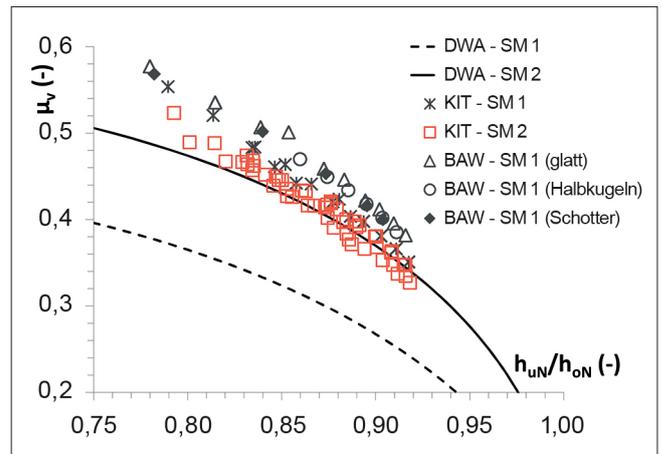


Bild 3: Vergleich des Ansatzes aus DWA (2014) mit den KIT/BAW-Daten unterschieden nach Strömungsmuster (SM 1 = strömungsstabil, SM 2 = strömungsdissipierend)

4 Vergleich der BAW/KIT-Daten mit dem Ansatz nach DWA (2014)

In einem ersten Schritt werden die vorhandenen Datensätze mit dem in DWA (2014) beschriebenen Berechnungsansatz (Gleichungen 2 und 3a/b) verglichen. In Bild 3 wird dabei die in DWA (2014) gewählte Darstellung übernommen, die den Durchflussbeiwert μ_v in Funktion des Verhältnisses der nominellen Fließtiefen h_{uN}/h_{oN} zeigt.

Bild 3 zeigt, dass eine Differenzierung der Daten nach Strömungsmustern, wie es DWA (2014) vorschlägt, möglich ist, auch wenn die Daten nur teilweise zu dem dort vorgestellten Ansatz (Gleichungen 2 und 3) passen. Während eine relativ gute Übereinstimmung zwischen Gleichung 3b und den Daten mit Strömungsmuster 2 (SM 2) vorliegt, ergibt sich für die Daten mit Strömungsmuster 1 (SM 1) keine Übereinstimmung zur Gleichung 3a. Bild 3 zeigt für SM 1 der KIT-Daten sogar einen höheren Durchflussbeiwert als für SM 2, eine Tendenz, die der Prognose des Ansatzes aus DWA (2014) entgegensteht, da der Graph für strömungsdissipierende Verhältnisse nach Bild 3 über dem Graphen für strömungsstabile Verhältnisse liegt. Grundsätzlich gilt, dass ein höherer Durchflussbeiwert geringeren Verlusten in den Becken entspricht. Die in den KIT/BAW-Daten sichtbaren geringeren Verluste des SM 1 entsprechen daher eher den Erwartungen, da es das Ziel des SM 2 ist, möglichst

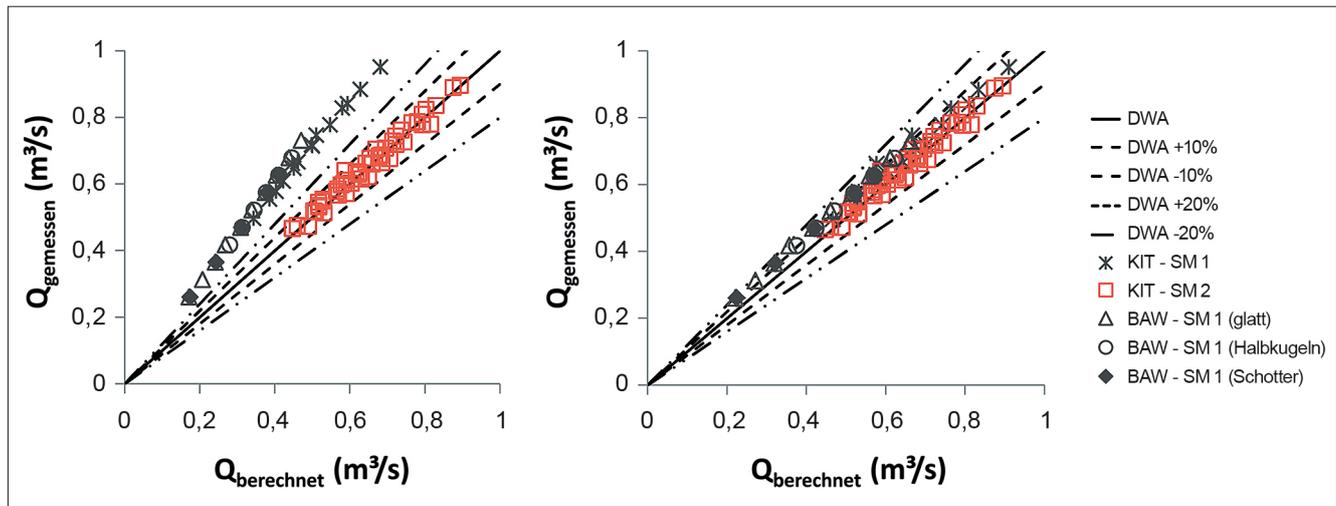


Bild 4: Vergleich der im Modell gemessenen Durchflüsse mit den nach DWA (2014) berechneten Durchflüssen; links: Differenziert nach Strömungsmuster; rechts: Auswertung nach Gleichung 3b (SM 2), unabhängig davon, welches Strömungsmuster tatsächlich beobachtet wurde

hohe hydraulische Verluste in den Becken zu erzeugen, um die Geschwindigkeiten im Schlitz gering zu halten.

Weiterhin lassen sich in Bild 3 für SM 1 Unterschiede zwischen den KIT und den BAW-Daten erkennen. Dieses lässt sich überwiegend mit der unterschiedlichen Ausrundung der eingebauten Geometrien im Schlitzbereich erklären. Formverluste im Schlitzbereich entstehen im Wesentlichen durch Strömungsablösungen, wobei dies durch scharfkantige Geometrien unterstützt wird. Infolgedessen bewirken scharfkantige Geometrien höhere Verluste und geringere Durchflussbeiwerte.

In Bild 4 (links) ist der Vergleich zwischen dem in den Versuchen gemessenen Betriebsdurchfluss Q_M und dem nach DWA (Gleichungen 2 und 3a/b) für eine jeweils gemessene Fließtiefe berechneten Durchfluss Q_B dargestellt, wobei auf Naturgrößen umgerechnet wurde. Das Bild zeigt, dass der Ansatz aus DWA (2014) für die KIT/BAW-Daten mit SM 1 keine sinnvollen Ergebnisse liefert. Für die Daten mit SM 2 liegt die Genauigkeit des Ansatzes nach DWA (2014) hingegen in einem guten Bereich von $\pm 10\%$.

Bild 4 (rechts) zeigt eine analoge Auswertung, mit dem Unterschied, dass der Ansatz nach DWA (2014) ausschließlich für das strömungsdissipierende Muster (Gleichung 3b) angewandt wird, unabhängig vom tatsächlich beobachteten Strömungsmuster. Es zeigt sich, dass die Genauigkeit des DWA-Ansatzes nun bei etwa $\pm 20\%$ liegt.

Im Gegensatz zu den deutlich wahrnehmbaren Unterschieden für verschiedene Strömungsmuster (und damit Geometrien) ist der Effekt der Rauheit der Sohle nach Bild 3 und Bild 4 vergleichsweise gering, wobei anzumerken ist, dass für die Versuche mit Halbkugeln und Granitschotter der Nullhorizont der Sohle 25 % unterhalb der Höhe der Rauheitsspitzen angesetzt wurde. Hydraulische Verluste werden häufig in Reibungs- und Formverluste unterschieden. In Schlitzpässen dominieren die Formverluste aus den turbulenten Wirbelstrukturen im Becken sowie der Um- und Durchströmung im Bereich der Trennwände (siehe auch Bild 1) deutlich über dem Reibungswiderstand der Berandungen. Weitere Ausführungen zu diesem Thema finden sich im Beitrag von Sokoray-Varga et al. „Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen“ (in diesem Heft).

5 Analyse der KIT/BAW-Daten

Im Folgenden werden die KIT/BAW-Daten analysiert. Als charakteristische Fließtiefe in den Becken wird die theoretische Fließtiefe unterhalb der Trennwand h_{uN} verwendet. Diese Fließtiefe geht von der Modellvorstellung eines horizontalen Wasserspiegels in den Becken aus (siehe auch Bild 2). Da der Wasserspiegel in Realität geneigt ist (in Fließrichtung in einem Becken zunehmend, z. B.

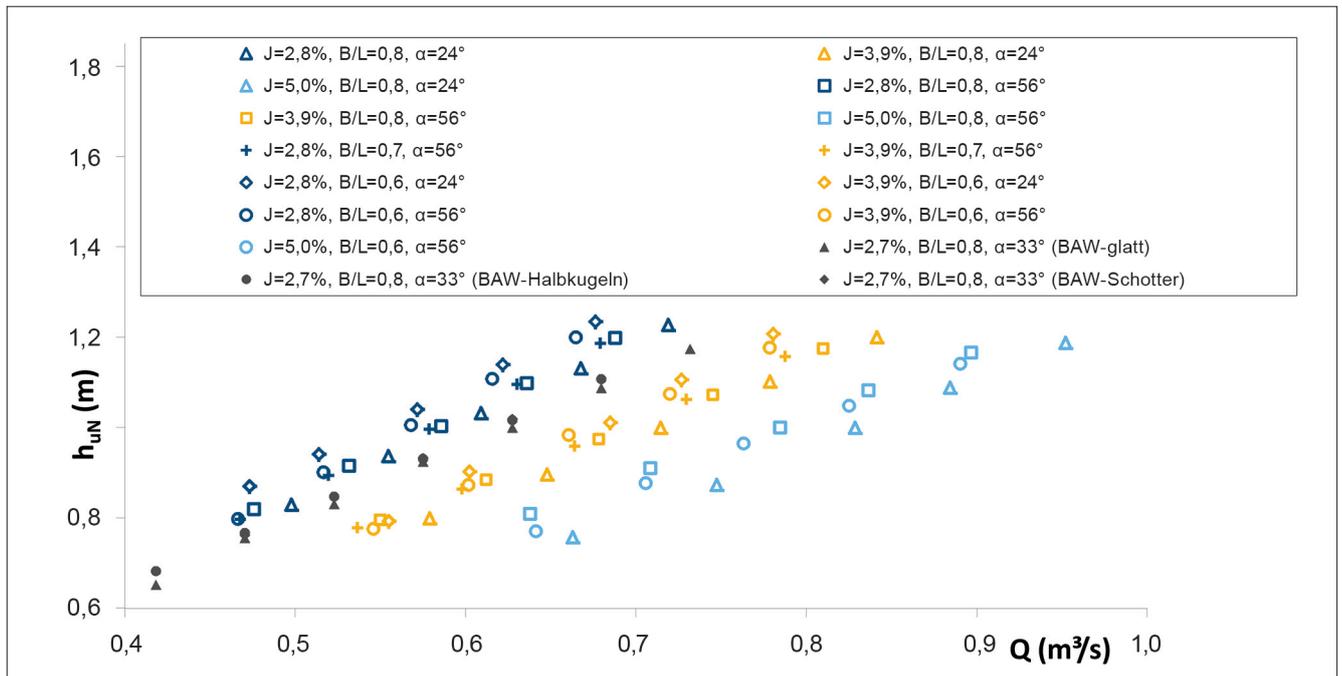


Bild 5: Linearer Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe der KIT/BAW-Versuche

Puertas et al. 2004) und von der jeweiligen Geometrie und der Wasserspiegeldifferenz an der oberhalb gelegenen Trennwand abhängt, entspricht die Fließtiefe h_{uN} keiner in einer Fischaufstiegsanlage vorhandenen, klar definierten oder messbaren Größe. Nichtsdestotrotz stellt h_{uN} eine sinnvolle Größe bei der Planung einer Fischaufstiegsanlage dar, da der reale Wasserspiegelverlauf im Vorhinein nicht bekannt ist. Außerdem wird in der Regel über die biologisch erforderliche Mindestfließtiefe und dem horizontalen Unterwasserspiegel bei einem W_{30} die Sohlenlage des Einstiegs der Fischaufstiegsanlage dimensioniert, was letztendlich dem Parameter h_{uN} des untersten Beckens entspricht. In den Untersuchungen an KIT und BAW wurde die theoretische, horizontale Wasserspiegellage anhand einer aus Messwerten abgeleiteten mittleren Fließtiefe berechnet.

Bild 5 zeigt, dass für die Daten der KIT/BAW-Versuche der in der Literatur beschriebene lineare Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe gilt. Weiterhin ist deutlich eine Gefälleabhängigkeit zu erkennen (unterschiedliche Farben in Bild 5), d. h., je steiler die Fischaufstiegsanlage, desto mehr Durchfluss ist zu erwarten. Der Effekt des Gefälles überwiegt dabei deutlich über den getesteten geometrischen Änderungen, welche im Wesentlichen eine Variation des Verhältnisses Beckenbreite zu Beckenlänge (B/L) wie auch der Ausrichtung

des Umlenkblocks (Schlitzwinkel α) waren. Die geometrischen Änderungen machen sich zudem über das Strömungsmuster bemerkbar, d. h., sobald die Änderungen stark genug sind, um ein Umschlagen in ein anderes Strömungsmuster zu bewirken (siehe Beitrag von Höger et al. „Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen“ in diesem Heft), ist auch ein Effekt auf die hydraulischen Verluste (und damit auf den Durchfluss) messbar. Die Versuche in der BAW-Rinne mit glatter und rauher Sohle zeigen in Bild 5 sehr ähnliche Durchflüsse. Ein Effekt, der verdeutlicht, dass die wesentlichen hydraulischen Verluste aus der Turbulenz im Becken sowie Strömungsablösungen im Bereich der Trennwände resultieren.

In Bild 6 wird der dargestellten Gefälleabhängigkeit (über den Parameter Δh_N) Rechnung getragen und der Durchfluss Q durch den Term

$$\sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_N} \cdot s^2 \text{ dividiert, d. h. } Q^* = Q / \left(\sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_N} \cdot s^2 \right)$$

und entsprechend der beobachteten Strömungsmuster gegen $h^* = h_{uN}/s$ aufgetragen. Die KIT-Daten werden hierbei nicht wie in Bild 5 nach den verschiedenen untersuchten Geometrien differenziert, sondern nur noch gemäß des beobachteten Strömungsmusters unterschieden. Für den Zusammenhang zwischen Schlitzpassgeo-

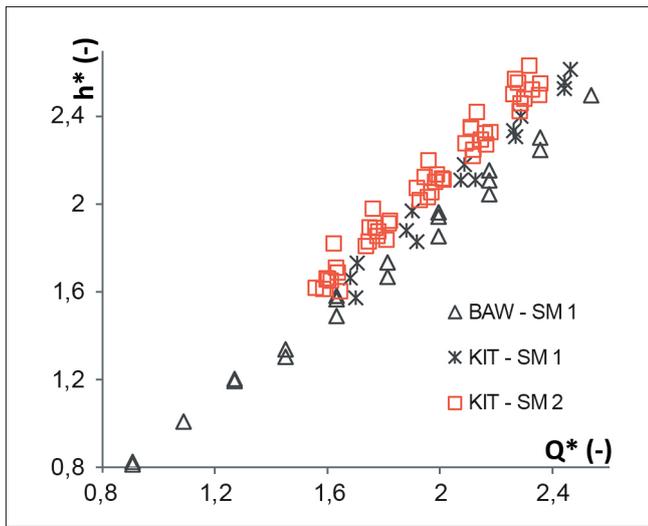


Bild 6: Linearer Zusammenhang zwischen normiertem Durchfluss Q^* und normierter Fließtiefe h^* der Versuche an KIT und BAW

metrie und Strömungsmuster wird auf den Beitrag von Höger et al. „Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen“ (in diesem Heft) verwiesen. Die BAW-Daten mit rauher bzw. glatter Sohle sind aufgrund der geringen festgestellten Unterschiede in Bild 6 ebenfalls zusammen dargestellt.

Die KIT-Daten in Bild 6 zeigen, dass ein geringer Einfluss des Strömungsmusters (d. h. der Beckengeometrie) auf den Q-h-Zusammenhang ebenso existiert wie ein Einfluss der Schlitzgestaltung (BAW-Daten für SM 1 mit rundem Schlitz und KIT-Daten SM 1 mit scharfkantigem Schlitz).

Im Folgenden wird ein linearer Ansatz aus den KIT/BAW-Daten entwickelt, indem mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate der empirische Zusammenhang zwischen Q^* und h^* ermittelt wird. Im Rahmen der vorliegenden Auswertung wird hierbei auf eine Differenzierung nach Strömungsmuster und Schlitzgestaltung verzichtet. Dieses erhöht den Anwendungsbereich des Ansatzes auf Kosten seiner Genauigkeit. Demnach ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen dem Durchfluss Q und der Fließtiefe h_{uN} :

$$Q = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_N} \cdot s \cdot (0,9 \cdot h_{uN} + 0,2 \cdot s) \quad (4)$$

Der Gültigkeitsbereich der Gleichung orientiert sich an den im DWA empfohlenen Geometrien eines Schlitzpasses, welche in den Modellversuchen an KIT und BAW umgesetzt wurden. Wie in Bild 6 zu erkennen, liegt die Anwen-

dungsgrenze der Gleichung in Bezug auf den Parameter $h^* = h_{uN}/s$ bei $h_{uN}/s > 0,8$, während diese beim Ansatz nach DWA (2014) mit $h_{uN}/s > 2$ angegeben wird. Die Untersuchungen an KIT/BAW wurden dabei für Verhältnisse ausgerichtet, wie sie an Bundeswasserstraßen vorkommen, d. h., die geometrischen (Schlitzweite) und hydraulischen (Fließtiefe, Wasserspiegeldifferenz zwischen den Becken) Parameter orientieren sich an den DWA-Vorgaben zur Kaulbarsch-Flunder-, Brachsen- und Barbenregion.

6 Diskussion der Untersuchungsergebnisse

Interessant ist ein qualitativer Vergleich der Ansätze nach DWA (Gleichung 2/3) und KIT/BAW (Gleichung 4). Zum einen wird deutlich, dass der KIT/BAW-Ansatz den linearen Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe direkt wiedergibt, was zu einer einfachen Anwendung des Ansatzes führt. So erfordern Gleichung 2 und 3 nach DWA (2014) eine doppelte Iteration für den rückgestauten Fall einer Fischaufstiegsanlage. Bei dem hier vorgestellten KIT/BAW-Ansatz kann hingegen der Q-h-Zusammenhang im rückgestauten Fall mit einfacher Iteration durchgeführt werden.

Weiterhin lässt sich erkennen, dass Gleichung 4 (im Gegensatz zu den Gleichungen 2 und 3) nicht durch den Nullpunkt verläuft (für $h_{uN} = 0$ m ist $Q \neq 0$ m³/s), was ohne Beachtung des Gültigkeitsbereichs für sehr kleine Fließtiefen zu fehlerhaften Ergebnissen führt. Diese vermeintliche Unzulänglichkeit ist bei näherer Betrachtung jedoch sinnvoll. Für sehr kleine Fließtiefen ist nicht davon auszugehen, dass die in vielen Untersuchungen bestätigte Erkenntnis eines linearen Zusammenhangs zwischen Fließtiefe und Durchfluss in einem Schlitzpass Gültigkeit besitzt. Vielmehr werden bei großen Verhältnissen von $\Delta h_N/h_{uN}$ andere, dreidimensionale Strömungsprozesse wie auch der Einfluss der Sohle an Bedeutung gewinnen. Ein linearer Ansatz, welcher durch den Nullpunkt gezwungen wird, wird dann jedoch für den relevanten Bereich von Fließtiefe und Durchfluss zwangsläufig Abweichungen vom tatsächlichen Wert erzeugen. Es wird daher ein linearer Ansatz im praxisrelevanten Bereich mit klarer Beschränkung der Gültigkeit als zielführend angesehen.

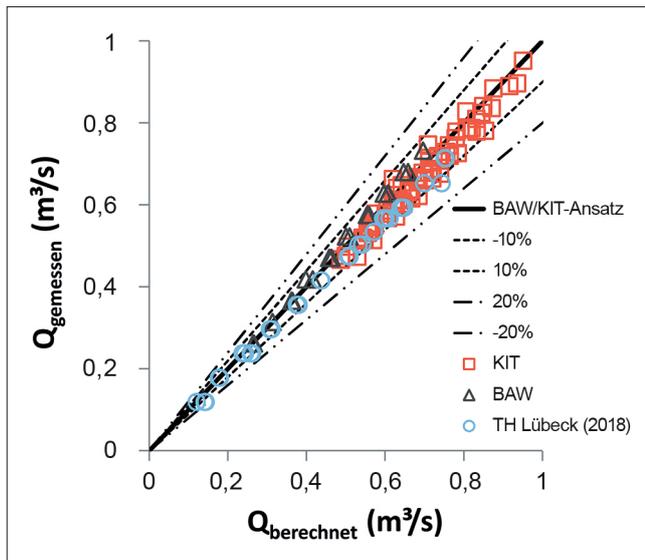


Bild 7: Vergleich der im Modell gemessenen Durchflüsse mit den nach Gleichung 4 berechneten Durchflüssen, zusätzlich Vergleich mit den Daten nach Klein und Oertel (2017, 2018)

Bild 7 zeigt den Vergleich zwischen dem in den Versuchen gemessenen Betriebsdurchfluss Q_M und dem mit Gleichung 4 berechneten Durchfluss Q_B . Gleichung 4 gibt demnach die Daten in einer Genauigkeit von circa $\pm 10\%$ für alle Geometrievarianten wieder. Die vorhandene Streuung der Daten spiegelt letztendlich die Unterschiede der untersuchten Modellvarianten wider (im Wesentlichen Strömungsmuster und Schlitzgestaltung), welche nicht als Parameter in den hier vorgestellten Ansatz (Gleichung 4) eingeflossen sind. Weiterhin wurden die Versuche von Klein und Oertel (2017, 2018) hinzugezogen, die in einer Rinne an der TH Lübeck ebenfalls auf Basis der im DWA vorgeschlagenen Geometrien den Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe untersuchten. Diese unabhängigen Rinnendaten bestätigen in der Grundtendenz die Ergebnisse nach Gleichung 4, wenn auch die gemessenen Durchflusswerte tendenziell unter den prognostizierten Werten liegen. Dieses kann mit Unterschieden in der Ausgestaltung der Geometrien der Becken in den Untersuchungen in Lübeck erklärt werden. Der Vergleich mit anderen zur Verfügung stehenden Datensätzen aus Laborversuchen (z. B. Wang et al. 2010, Rajaratnam et al. 1986, 1992) wurde hier nicht als zielführend angesehen, da diese Daten nicht den in DWA (2014) empfohlenen Geometrien entsprachen oder am Einzelschlitz entstanden sind.

Aufschlussreich ist ein Vergleich des aus den KIT/BAW-Daten abgeleiteten linearen Ansatz mit dem ebenfalls

gut passenden Ansatz aus DWA (2014) für das strömungsdissipierende Muster (Gleichungen 2 und 3b). So wird für das Berechnungsbeispiel aus dem Merkblatt 509 (DWA 2014) (mit $s = 0,30$ m, $\Delta h_N = 0,16$ m, $h_{uN} = 0,70$ m) ein Durchfluss für den gleichförmigen Abflusszustand von $Q = 0,35$ m³/s angegeben. Die Berechnung mit dem vorgeschlagenen Ansatz ergibt einen ähnlichen Wert von $Q = 0,37$ m³/s. Für größere Fließtiefen und Schlitzweiten werden die Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen größer, die Ergebnisse befinden sich jedoch immer noch in einem ähnlichen Bereich. Ein Berechnungsbeispiel für typische Verhältnisse an Bundeswasserstraßen (mit $s = 0,45$ m, $\Delta h_N = 0,14$ m, $h_{uN} = 1,20$ m) zeigt, dass mit dem KIT/BAW-Ansatz ein Durchfluss von $Q = 0,87$ m³/s zu erwarten wäre, während der Ansatz nach DWA (2014) einen Wert von $Q = 0,82$ m³/s liefert.

Diese Angaben beziehen sich auf den gleichförmigen Abflusszustand, eine Situation, die für die Bemessung der Fischaufstiegsanlage wichtig ist, jedoch nicht häufig auftritt. Stattdessen dominiert im Bemessungszeitraum zwischen Q_{30} und Q_{330} der ungleichförmige Abflusszustand, d. h., die Fischaufstiegsanlage wird vom Unterwasser her eingestaut, die Wasserspiegeldifferenzen zwischen den Becken nehmen von unten nach oben zu, die Fließtiefe von unten nach oben hin ab. Betrachtet man das Beispiel in DWA (2014) für den rückgestauten Fall, ergibt sich für einen um 90 cm erhöhten Unterwasserstand und einen um 20 cm erhöhten Oberwasserstand des obigen Berechnungsbeispiels ein Durchfluss von $Q = 0,44$ m³/s. Die Anwendung von Gleichung 4 ergibt einen Wert von $Q = 0,46$ m³/s.

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die Praxis

Die Untersuchungen an KIT und BAW wie auch die Versuche an der TH Lübeck bestätigen den linearen Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe in einem Schlitzpass, d. h., im Rahmen des praxisrelevanten Anwendungsbereichs führt beispielsweise eine doppelt so große Fließtiefe in den Becken nahezu zu einem doppelt so großen Durchfluss in der Anlage. Dieser lineare Zusammenhang wie auch die Ergebnisse der Untersuchungen mit glatter und rauher Sohle zeigen, dass der Einfluss

der Rauheit der Sohle in einem Schlitzpass vergleichsweise gering ist.

Neben der Sohlrauheit wurden in den Versuchen im Wesentlichen das Gefälle, die Geometrie der Becken (und damit das Strömungsmuster) sowie die Ausgestaltung der Schlitze variiert. Es zeigt sich, dass die genannten Parameter eine Rolle für den Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe spielen, wobei insbesondere das Gefälle (bzw. der Wasserspiegelunterschied zwischen den Becken Δh_N) wesentlich auf die Resultate einwirkt und demnach in der Ableitung eines Berechnungsansatzes zwingend zu berücksichtigen ist.

Der Vergleich der KIT/BAW-Daten mit dem in DWA (2014) empfohlenen Ansatz zeigt ein differenziertes Bild. Die DWA-Gleichung für das strömungsstabile Strömungsmuster (SM 1) führt nicht zu brauchbaren Ergebnissen, wohingegen die Gleichung für das strömungsdissipierende Strömungsmuster (SM 2) grundsätzlich solide Resultate liefert. Einfacher in der Anwendung ist die aus den hier vorgestellten Daten abgeleitete Gleichung

$$Q = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_N} \cdot s \cdot (0,9 \cdot h_{uN} + 0,2 \cdot s)$$

zur Berechnung des Durchflusses. Neben der Fließtiefe h_{uN} unterhalb der Trennwand, welche sich für den Bemessungsfall eines W_{30} aus der biologisch erforderlichen Mindesttiefe ermitteln lässt, gehen in diesen Ansatz die Schlitzweite s , die Erdbeschleunigung g und die Wasserspiegeldifferenz Δh_N zwischen den Becken ein. Der Gültigkeitsbereich der Gleichung bezieht sich dabei auf den Anwendungsbereich des Merkblatts 509 (DWA 2014) hinsichtlich der dort empfohlenen Geometrien, Mindestfließtiefen und Gefällebereiche für die Kaulbarsch-Flunder-, Brachsen- und Barbenregion. Eine darüber hinausgehende Anwendung der Gleichung (Äschenregion und obere und untere Forellenregion) kann brauchbare Ergebnisse liefern, ist jedoch nicht durch Versuche an KIT/BAW nachgewiesen. Ein direkter Vergleich beider Ansätze zeigt, dass Abweichungen existieren, grundsätzlich jedoch ähnliche Ergebnisse produziert werden. Der Vorteil des hier vorgestellten Ansatzes ist dessen Einfachheit. Während die Gleichungen nach DWA (2014) eine doppelte Iteration im rückgestauten Fall erfordern, ist der KIT/BAW-Ansatz für den rückgestauten Fall mit einfacher Iteration anwendbar. Eine Differenzierung nach Strömungsmustern ist nicht erforderlich, auch wenn eine

Prognose des Strömungsmusters möglich wäre (siehe im Beitrag von Höger et al. „Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen“ in diesem Heft).

Der hier vorgestellte Ansatz wie auch die große Mehrheit vorhandener Datensätze in der Literatur basieren auf Versuchen in geraden Versuchsrinnen mit Abfolgen gleicher Becken. In realisierten Schlitzpässen kommen häufig auch Becken zum Einsatz, die von den Standardmaßen abweichen, wie etwa Wendebecken, kanalartige Abschnitte oder geknickte Becken. Weiterhin lässt sich in Modellversuchen beobachten, dass sich die Wasserspiegeldifferenzen an der ersten und der letzten Trennwand von den Verhältnissen in der Anlage unterscheiden. Dieser Tatsache wird in Modelluntersuchungen begegnet, indem die mittleren Becken, in denen ein gleichförmiger Abflusszustand herrscht, betrachtet werden. Je nach Anzahl der Becken und Gestaltung der Fischaufstiegsanlage weichen demnach die realen Verhältnisse mehr oder weniger stark von den idealisierten Modellbetrachtungen ab. Für eine Weiterentwicklung der Ansätze ist die Validierung mit Naturdaten ein wichtiger nächster Schritt.

Die Genauigkeit des hier vorgestellten Ansatzes, wie auch anderer bekannter Berechnungsansätze, sollte in der Praxis nicht überbewertet werden. Die detaillierte Ausgestaltung des Schlitzes, die Sensitivität der Strömungsmuster und das Abweichen der Situation an realen Anlagen von idealen Laborbedingungen führen dazu, dass die Genauigkeit der Ansätze von uns in einem Bereich von etwa $\pm 15\%$ geschätzt wird.

8 Literatur

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

Höger, V.; Henning, M.; Nestmann, F. (2014): Experimental Study on the Influence of Pool Geometry on Flow Patterns in Vertical-Slot Fishways. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Ecohydraulics, Trondheim.

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.

Klein, J.; Oertel, M. (2017): Untersuchung von Einflussparametern auf die Abflussbemessung von Fischaufstiegsanlagen in Schlitzbauweise. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Bemessung im Wasserbau – Klimaanpassung, Untersuchungen, Regeln, Planung, Ausführung. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 58. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 291–300.

Klein, J.; Oertel, M. (2018): Influence of Inflow and Outflow Boundary Conditions on Flow Situation in Vertical Slot Fishways. In: 7th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Aachen, Germany, 15–18 May. Doi: 10.15142/T3SW73 (978-0-692-13277-7).

Krüger, F.; Heimerl, S.; Seidel, F.; Lehmann, B. (2010): Ein Diskussionsbeitrag zur hydraulischen Berechnung von Schlitzpässen. In: WasserWirtschaft, 100/3, S. 30–36.

Puertas, J.; Pena, L.; Teijeiro, T. (2004): Experimental Approach to the Hydraulics of Vertical Slot Fishways. In: Journal of Hydraulic Engineering 130, pp. 10–23.

Rajaratnam, N.; Van der Vinne, G.; Katopodis, C. (1986): Hydraulics of vertical slot fishways. In: Journal of Hydraulic Engineering 112, Nr. 10, pp. 909–927.

Rajaratnam, N.; Katopodis, C.; Solanki, S. (1992): New designs for vertical slot fishways. In: Canadian Journal of Civil Engineering 19, pp. 402–414.

Sokoray-Varga, B.; Weichert, R.; Nestmann, F. (2015): Untersuchungen zu hydraulischen Berechnungsansätzen von Schlitzpässen. In: WasserWirtschaft 105 (7–8), S. 61–66.

Sokoray-Varga B.; Kerlin, T.; Prinz, F.; von Meltzer, J.; Musall, M.; Oberle, P.; Weichert, R. (2020): Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 43-48.

Wang, R.; David, L.; Larinier, M. (2010): Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes. In: Knowl. Managt. Aquatic Ecosyst. 396, Nr. 2, pp. 1–21.

Wu, S.; Rajaratnam, N.; Katopodis, C. (1999): Structure of flow in a vertical slot fishway. In: Journal of Hydraulic Engineering 125, Nr. 4, pp. 351–359.

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 sohl-nahen 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 Sohlnrauheit 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

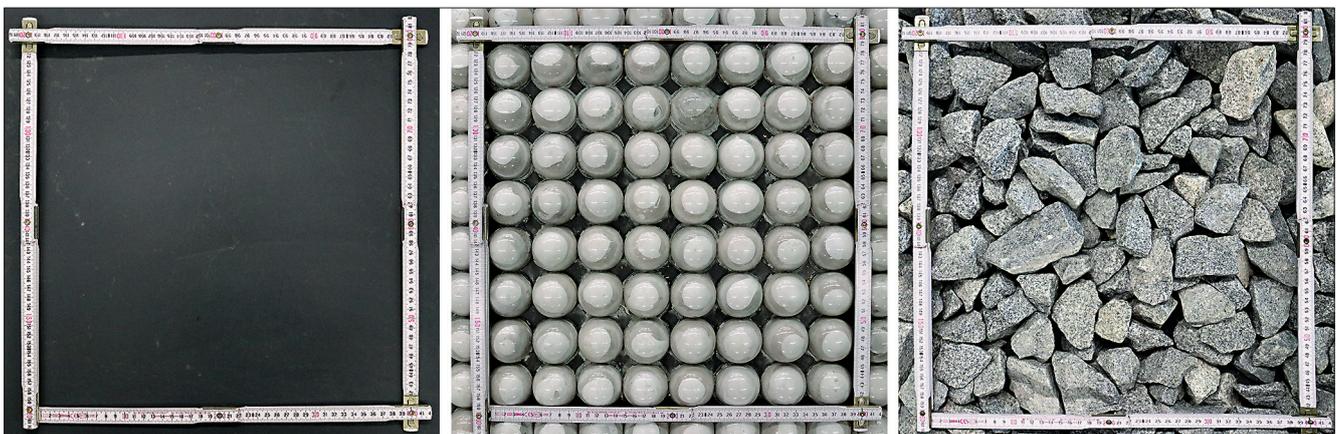


Bild 2: Untersuchte Sohlnrauheiten glatt (links), Halbkugeln $D = 50$ mm (Mitte) und Granitschotter 32/56 mm (rechts)

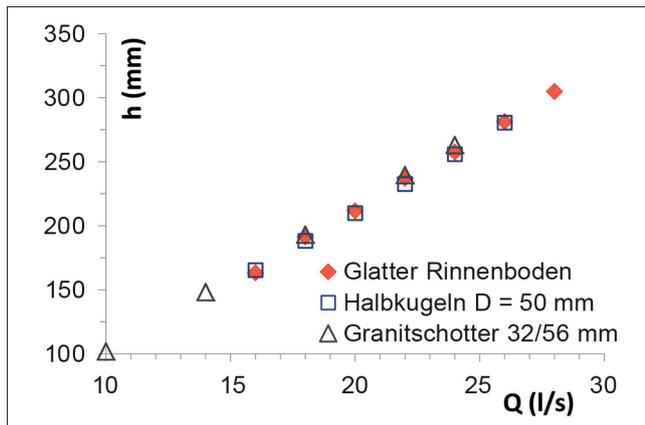


Bild 3: In gegenständlichen Modellversuchen gemessene Durchflüsse und Fließtiefen für drei verschiedene Rauheiten

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-

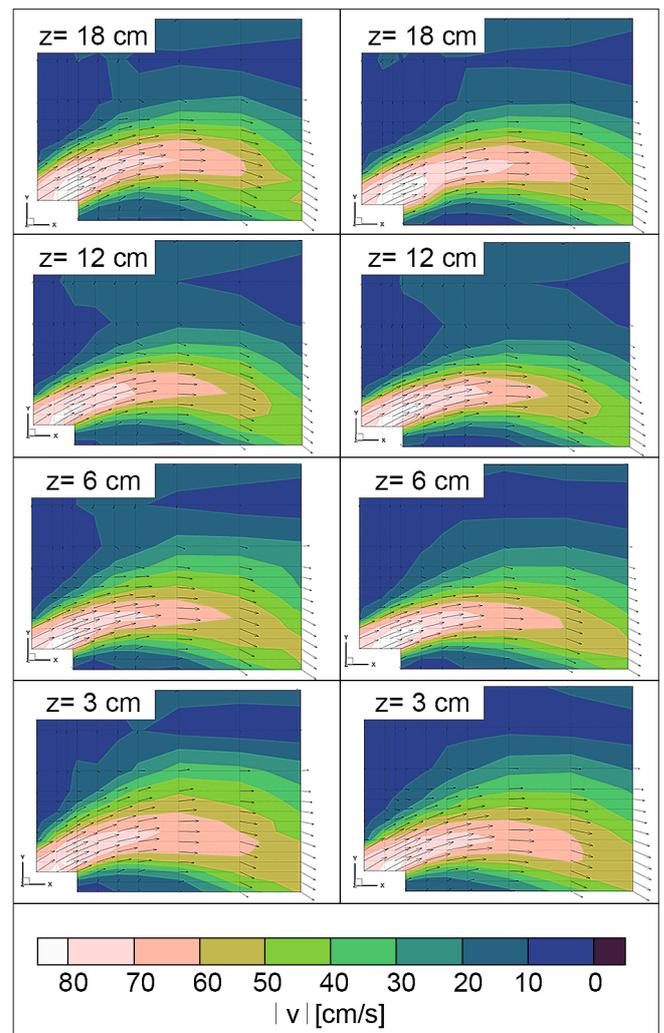


Bild 4: Gemessene, zeitlich gemittelte Fließgeschwindigkeiten bei einem Durchfluss von 20 l/s in unterschiedlichen Höhen z über glatter (links) bzw. rauer Sohle mit Halbkugeln (rechts); die Farbskala zeigt den Betrag der Geschwindigkeit

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-

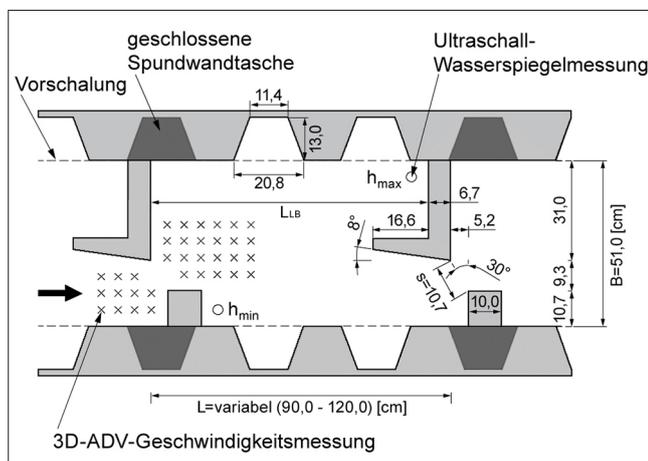


Bild 5: Planskizze des Modellaufbaus im Modellmaßstab 1 : 3

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 Umlenkblock 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-

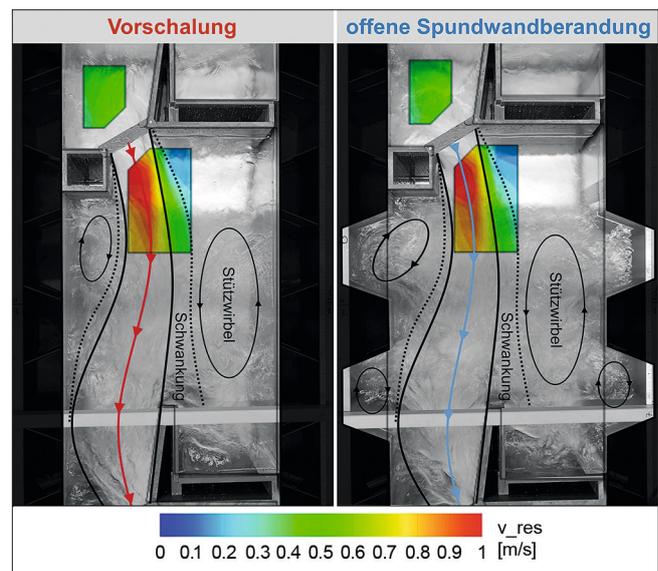


Bild 6: Strömungssituation bei $B/L_{LB} = 0,61$ mit Vorschalung (links) und mit offener Spundwandberandung (rechts)

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.

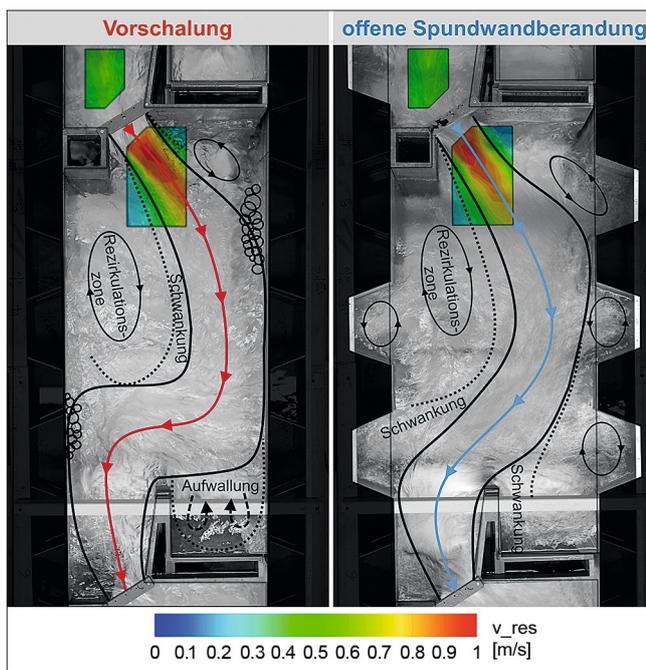


Bild 7: Strömungssituation bei $B/L_{LB} = 0,45$ mit Vorschalung (links) und mit offener Spundwandberandung (rechts)

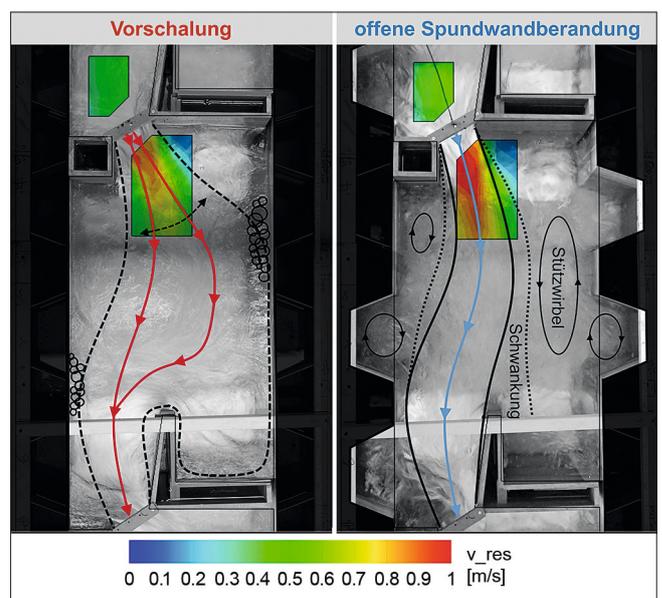


Bild 8: Strömungssituation bei $B/L_{LB} = 0,56$ mit Vorschalung (links) und mit offener Spundwandberandung (rechts)

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).

Numerische Modellierung von Schlitzpässen

Dr.-Ing. Mark Musall, Karlsruher Institut für Technologie
Dr.-Ing. Lena Mahl, Bundesanstalt für Wasserbau

Im vorliegenden Artikel wird die Verwendung von mehrdimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellen zur Untersuchung von Schlitzpässen diskutiert. Es wird erläutert, unter welchen Bedingungen eine numerische Modellierung von Schlitzpässen oder Teilen davon sinnvoll ist und wann auf schon vorhandene Kenntnisse zurückgegriffen werden kann. Wichtige Aspekte sind die Modellwahl (2D oder 3D) und die benötigte Datengrundlage. Basierend auf Literaturquellen und eigenen Erfahrungen aus Modellierungen mit FLOW-3D® und OpenFOAM® werden Hinweise gegeben, worauf bei einer Modellierung geachtet werden sollte, damit aussagekräftige Ergebnisse erzeugt werden. Dazu gehören u. a. die Wahl der Randbedingungen, der Diskretisierung und des Turbulenzmodells.

1 Einleitung

Zur Analyse hydraulisch komplexer Fragestellungen werden in der Wasserbaupraxis häufig hydrodynamisch-numerische (HN-) Modelle eingesetzt. Generell gilt es hierbei zu beachten, dass eine numerische Modellierung – vor allem in 3D – meist mit einem hohen Aufwand verbunden ist, weshalb kritisch abzuwägen ist, ob deren Notwendigkeit im konkreten Fall gegeben ist. So ist beispielsweise bei der Planung einer Fischaufstiegsanlage in Schlitzpassbauweise, welche ausschließlich aus Standard-Schlitzpassbecken gemäß gängigen Bemessungsempfehlungen besteht, keine numerische Modellierung notwendig, da hier schon weitreichende Erkenntnisse

bezüglich des Strömungsverhaltens vorhanden sind (siehe die anderen Beiträge in diesem Heft). Ein Modelleinsatz kann hingegen sinnvoll sein, wenn Becken beispielsweise deutlich von der Norm abweichen (wie etwa bei stark geknickten oder sehr langgezogenen Becken sowie Sonderbecken in Einstiegsbereichen o. ä.) oder wenn auf Basis der vorliegenden Informationen eine wesentliche Funktionsbeeinträchtigung der Anlage, z. B. im Einstau-fall, nicht ausgeschlossen werden kann.

Numerische Modelle eines Schlitzpasses können Aufschluss über unterschiedliche Zielgrößen, wie Strömungsmuster, Wasserspiegellagen, Fließgeschwindigkeiten, Anlagendurchflüsse, oder auch grundlegende Informationen zu Turbulenzgrößen geben. Somit liefern numerische Modelle oftmals eine gute Basis für die anschließende fischökologische Anlagenbewertung. Zur belastbaren Ermittlung dieser Zielgrößen sind jedoch unterschiedliche Anforderungen an das Modell zu stellen, auf welche in diesem Beitrag eingegangen wird.

Zunächst erfolgt in Abschnitt 2 eine Beschreibung der möglichen Modelltypen. Hier werden auch Hinweise zur Modellwahl in Abhängigkeit unterschiedlicher Einsatzbereiche gegeben. Anschließend wird in Abschnitt 3 aufgezeigt, welche Datengrundlagen für eine Modellierung prinzipiell geeignet sind. In den Abschnitten 4 und 5 werden weiterführende Hinweise zu 2D- und 3D-HN-Modellen gegeben. In Abschnitt 6 wird schließlich auf die Genauigkeiten eingegangen, welche von einem fachgerecht erstellten Modell erwartet werden können.

2 Grundlagen und Modellwahl

Zur detaillierten Betrachtung der Strömung in einem Schlitzpass mittels eines hydrodynamisch-numerischen Modells kommen i. A. sogenannte 2D- und 3D-Modelle in Frage. Derzeit gängige Programme zur dreidimensionalen Simulation von Strömungsvorgängen basieren meist auf der diskreten Lösung der reynoldsgemittelten Navier-Stokes-Gleichungen unter Einsatz eines numerischen Verfahrens (z. B. Finite Differenzen oder Finite Volumen) auf einem Berechnungsgitter. Die lokale Modelldiskretisierung („Auflösung“) wird dabei im Zuge der Modellerstellung insbesondere in Abhängigkeit der Fragestellung, der benötigten Zielgrößen und der Abmessungen des Untersuchungsbereichs gewählt. Die Wasseroberfläche kann i. A. durch Lösung einer zusätzlichen Volume-of-Fluid-Gleichung hinreichend genau abgebildet werden, was in den meisten gängigen Programmen standardmäßig erfolgt.

Oftmals bieten die Programme neben gängigen Methoden der statistischen Turbulenzmodellierung (RANS, z. B. $k-\epsilon$, $k-\omega$, SST) außerdem die Möglichkeit der Anwendung eines Large-Eddy-Simulationsansatzes (LES). Hier werden Wirbel ab einer bestimmten Skalengröße mitsamt ihren zeitlichen Schwankungen naturähnlich abgebildet, was insbesondere vor dem Hintergrund räumlicher und zeitlicher Schwankungen der Schlitzpasströmung von großer Bedeutung sein kann.

Zweidimensionale Modelle verwenden demgegenüber die tiefengemittelten Flachwassergleichungen, wodurch vertikale Strömungsanteile sowie ungleichförmige Verteilungen über die Gewässertiefe nicht abgebildet werden können.

Aus derzeitiger Sicht erscheint eine mehrdimensionale numerische **Modellierung** eines Schlitzpasses für folgende Fälle **nicht sinnvoll**:

- Standardfischpass gemäß gängiger Bemessungsempfehlungen,
- Vorhandensein von zufriedenstellenden Betriebserfahrungen an vergleichbaren Bestandsanlagen.

Der Einsatz von **2D-Modellen** stellt i. A. eine eher vereinfachte Betrachtung von Schlitzpässen dar. Eine 2D-Simulation kann dennoch für z. B. folgende Fälle sinnvoll sein:

- Fragestellungen, welche die Modellierung der gesamten Fischaufstiegsanlage erfordern, insbesondere falls dies im 3D-Modell nicht praktikabel ist oder die aus der 2D-Modellierung resultierenden Einschränkungen tolerabel sind,
- Fischaufstiegsanlage als Teil einer großräumigeren Modellierung (z. B. inklusive An- oder Abströmung der Fischaufstiegsanlage),
- Bewertung von Dotationen oder Einstau hinsichtlich der Wirkung auf die Hydraulik der Gesamtanlage.

3D-Modelle eignen sich hauptsächlich für Detailbetrachtungen einzelner Anlagendetails eines Schlitzpasses. Für den praktischen Einsatz erscheinen sie insbesondere sinnvoll für folgende Fragestellungen:

- Analyse von Strömungsdetails (z. B. Schlitzströmung oder Strömungsverhalten bei starkem Einstau),
- Sonder-/Wende-/Mündungsbecken mit deutlichen Abweichungen von Standardformen,
- Bewertung von Dotationen (Wirkung auf Einzelbecken),
- Evaluierung von Bestandsanlagen mit unzureichenden Monitoringergebnissen,
- Detailuntersuchungen von Ausschnitten der Fischaufstiegsanlage.

Bild 1 stellt die wesentlichen Aspekte der Modellwahl nochmals gegenüber.

Wird eine Modellierung für sinnvoll erachtet, sollte bei der Auswertung auf folgende Punkte besonders geachtet werden, damit die Aussagekraft des Modells zur Geltung kommen kann:

- Darstellung in für die Fragestellung relevanten (Detail-) Ausschnitten sowie in anschaulichen Gesamtübersichten,
- Wahl einer für die Fragestellung geeigneten Farbskala, die einen Vergleich verschiedener Varianten zulässt,
- Vollständige Beschreibung der relevanten Metadaten.

Modellierung nicht sinnvoll	2D-Modell	3D-Modell
<p>Standardfischpass</p> <p>Ausreichende Betriebserfahrungen an vergleichbaren Anlagen</p>	<p>Gesamte FAA</p> <p>Großräumiges Modell inkl. FAA</p> <p>Auswirkungen von Dotationen oder Einstau auf die gesamte FAA</p>	<p>Detailbetrachtungen von Anlagenteilen</p> <p>Analyse von Strömungsdetails, z.B. bei starkem Einstau</p> <p>Sonderbecken</p> <p>Evaluierung bei Funktionsdefiziten</p>

Bild 1: Einsatzbereiche numerischer Modelle bei Schlitzpässen

3 Datengrundlagen

Als Basis einer Modellierung werden unterschiedliche Daten zu Geometrie und hydraulischen Randbedingungen benötigt, die im Folgenden beschrieben werden.

Bei der **Modellgeometrie** eines Schlitzpasses ist zu beachten, dass auch schon kleinere geometrische Änderungen zu veränderten Strömungsbedingungen führen können. Somit ist es erforderlich, detaillierte Informationen zur Form der Einbauten sowie zur Gestaltung der Sohle und der Berandungen zu berücksichtigen. Auch Baumaterialien sowie Details der baulichen Ausgestaltung (z. B. scharfkantig oder abgerundet) können u. U. von wesentlicher Bedeutung für lokale Strömungsdetails sein. Bei der Modellierung von Bestandsanlagen sollte nach Möglichkeit zudem eine Prüfung bezüglich etwaiger Abweichungen der realen Anlage von der Planung (z. B. Ungenauigkeiten bei der Bauausführung, nachträgliche Änderungen) erfolgen.

Die Abbildung der Schlitzpassgeometrie für eine Berechnung sollte auf Basis detaillierter **CAD-Zeichnungen** erfolgen (siehe Bild 2). Eine besondere Herausforderung stellt dabei die i. A. aus Natursteinen bestehende Bau-

werkssohle eines Schlitzpasses dar. Hier können vorhandene geometrische Unregelmäßigkeiten der rauen Sohle ggf. über Zufallsverteilungen (vgl. Beispiel in Bild 2) angenähert werden. Alternativ kann die Geometrie der rauen Sohle auch vernachlässigt werden, wenn stattdessen die hydraulischen Widerstände über eine verfahrensabhängige Parametrisierung der Sohlrauheit berücksichtigt werden. Diese Möglichkeit bringt natürlich Ungenauigkeiten in der Abbildung der Hydraulik im Bereich der Sohle mit sich, jedoch zeigen Erfahrungen, dass die Strömung i. A. im Bereich der mittleren Fließtiefe ausreichend gut wiedergegeben wird (siehe auch Abschnitt 5 bzw. Beitrag von Sokoray-Varga et al. „Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen“ in diesem Heft). Die für die Widerstandsparametrisierung erforderlichen Wand- und Sohlrauheiten können auf Basis der Bau-/Sohlmaterialien über gängige Tabellenwerke abgeschätzt werden.

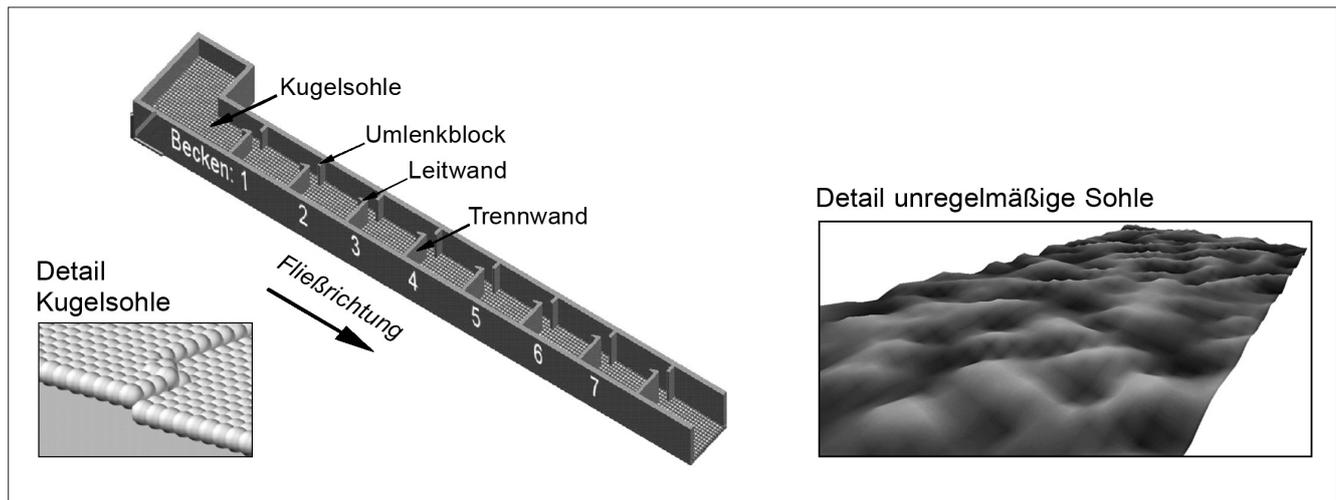


Bild 2: 3D-CAD-Modell eines Schlitzpasses mit sieben Becken und Repräsentation der Sohlrauheit mittels Kugeln (links) sowie unregelmäßige Sohle, die über eine Zufallsverteilung von Rauheitshöhen angenähert wurde (rechts)

Neben den geometrischen Anlageninformationen werden für numerische Modelle als Randbedingungen zudem **hydrologische Daten**, wie Durchfluss und Wasserstände des angrenzenden Gewässers bei unterschiedlichen Betriebszuständen (z. B. $W_{30'}$, W_{330}), benötigt. Hierbei ist es wichtig, darauf zu achten, möglichst lange Zeitreihen der Daten zu verwenden und die Daten gewissenhaft zu plausibilisieren.

Soll eine **Bestandsanlage** modelliert werden oder sind die Aussagen einer Modellierung im Nachhinein zu überprüfen, sollten Messdaten für die Kalibrierung bzw. Validierung erfasst werden. Hierfür eignen sich z. B. folgende Datensätze:

- Messung der Wasserspiegellage an mindestens einem (besser zwei) Punkt(en) pro Becken,
- Visualisierung der Oberflächenströmung, z. B. über Filme oder Langzeitbelichtungen, evtl. mit Zugabe von Tracer-/Schwimmpartikeln (ggf. genehmigungspflichtig),
- Möglichst exakte Bestimmung des Anlagendurchflusses; wenn möglich inklusive Angabe eines Unsicherheitsbereichs oder einer möglichen Abflussspanne,
- Messungen der Fließgeschwindigkeit an einzelnen, fischökologisch relevanten Punkten (z. B. im Schlitz oder im Becken im Bereich des Geschwindigkeitsminimums der Hauptströmung zwischen den Schlitzzen),
- Plausibilisierung der geometrischen Eingangsdaten der Modellierung (Beckenabmessungen, Schlitzweiten, Sohlhöhen, Oberflächenrauheiten).

Besteht darüber hinaus die Möglichkeit der Durchführung einer aufwändigeren Messkampagne, wird insbesondere die Erfassung des detaillierten Strömungsbildes in (ausgewählten) Einzelbecken in Form von Vielpunktmessungen, z. B. in einer Tiefenebene, empfohlen. Über 20 bis 25 flächig verteilte Messpunkte (Messpunktabstand entspricht ungefähr der Schlitzweite) kann z. B. die Strömungscharakteristik eines Beckens bereits derart detailliert abgebildet werden, dass darauf aufbauend weitergehende Aussagen zur Prognosegüte des numerischen Modells ermöglicht werden. Insbesondere hier ist jedoch die Wirtschaftlichkeit zu beachten.

4 Hinweise zu 2D-Modellen

Unterschiedliche Untersuchungen zeigen, dass die vertikale Komponente der Geschwindigkeit in vielen Bereichen des Schlitzpasses im Vergleich zu den horizontalen Komponenten sehr gering ist, weshalb die dortige Strömung als quasi-2D-Strömung betrachtet werden kann (Rajaratman et al. 1992, Puertas et al. 2004, Pena et al. 2004, Sokoray-Varga et al. „Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen“ in diesem Heft). Signifikante Vertikalströmungen treten i. A. nur im unmittelbaren Nahbereich des Schlitzes auf. Die naheliegende Möglichkeit, einen Schlitzpass mit Hilfe eines 2D-tiefengemittelten Modells zu modellieren, wurde deshalb von unterschiedlichen Autoren (z. B. Cea et al. 2007,

Chorda et al. 2010, Bombac et al. 2014, Bombac et al. 2015) untersucht. Die Untersuchungen bestätigen die prinzipielle Verwendbarkeit eines 2D-tiefengemittelten Modells zur Modellierung eines Standardschlitzpasses, wobei keine Aussagen zu Sonderbecken o. ä. gemacht werden. Cea et al. (2007) empfehlen bei sehr steilem Gefälle ($> 10\%$) des Schlitzpasses jedoch eine Überprüfung dieser Annahme. Im Folgenden werden im Wesentlichen die Erkenntnisse der genannten Untersuchungen zusammengefasst.

Praxisrelevante Ergebnisdaten zweidimensionaler Modelle von Schlitzpässen stellen die tiefengemittelten Geschwindigkeiten sowie Wasserstände dar, welche von 2D-Modellen i. A. ausreichend genau abgebildet werden. Turbulenzparameter hingegen werden, wenn überhaupt, weniger genau abgebildet. Hinsichtlich der Schwankungen der Hauptströmungspfade sowie lokaler Details im Schlitzbereich (z. B. Ablösungen, Maximalgeschwindigkeiten) sind beim Einsatz von 2D-Modellen eher keine bzw. nur eingeschränkt zufriedenstellende Ergebnisse zu erwarten.

Wesentlich für realistische Modellergebnisse ist das Setzen plausibler **Randbedingungen**. Als Randbedingungen werden in den meisten Fällen am oberen Modellrand erwartete Anlagendurchflüsse (vgl. Beitrag von Sokoray-Varga et al. „Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen“ in diesem Heft) und am unteren Modellrand relevante Wasserstände angesetzt.

Um möglichst gute Ergebnisse zu erreichen, sollten einige nachfolgend genannte Aspekte bei der 2D-Modellierung beachtet werden:

- Nach Möglichkeit sollte ein **numerisches Schema** zweiter Ordnung verwendet werden, da bei Schemata erster Ordnung u. U. eine sehr hohe numerische Diffusion auftreten kann und z. B. die mittleren Geschwindigkeiten nicht ausreichend detailliert abgebildet werden (Cea et al. 2007).
- Gute Ergebnisse sind nur bei ausreichend feinen **Gitterauflösungen**, z. B. zwischen 1 cm und 5 cm bezogen auf Anlagen mit Beckenlängen von ca. 3 m, zu erwarten (Chorda et al. 2010, Bombac et al. 2014). Sollte ein numerisches Schema erster Ordnung verwendet werden, ist hierauf besonders zu achten. Es wird dringend empfohlen, die für die jeweilige Fragestellung benötigte Gitterauflösung mittels Sensitivi-

tätsstudien zu prüfen und deren Ergebnisse nachvollziehbar zu dokumentieren.

- Verlässliche Ergebnisse sind i. A. nur bei Verwendung eines geeigneten **Turbulenzmodells** zu erwarten. In den betrachteten Studien ergaben sich mit dem k - ϵ -Modell gute Ergebnisse. Modelle mit konstanter Wirbelviskosität und Nullgleichungsmodelle scheinen hingegen nicht ausreichend genaue Ergebnisse zu liefern (Cea et al. 2007, Bombac et al. 2014), es sei denn, die dabei benötigten Parameter konnten über ein komplexeres Modell kalibriert werden.
- Die hier zitierten Studien (Cea et al. 2007, Bombac et al. 2014) wie auch eigene Erfahrungen zeigen, dass der **Rauheitsbeiwert** (z. B. Manning-Strickler) nur einen geringfügigen Einfluss hat.

5 Hinweise zu 3D-Modellen

Nachfolgend werden Hinweise zu einzelnen Aspekten der 3D-HN Modellierung gegeben und wesentliche Modellsensitivitäten diskutiert. Die Erkenntnisse basieren auf unterschiedlichen Untersuchungen unter Einsatz der Softwaresysteme FLOW-3D® und OpenFOAM® zu realisierten Schlitzpässen sowie Schlitzpässen im Modellmaßstab und Sonderbeckenanalysen, deren Hintergründe hier jedoch nicht im Detail erläutert werden können. Im Folgenden werden die wesentlichen bei diesen Untersuchungen gemachten Erfahrungen zusammengefasst.

Randbedingungen

Auch bei 3D-Modellen ist das Setzen plausibler Randbedingungen ein wichtiger Schritt. I. A. wird bei der Simulation von Schlitzpässen am oberstromigen Modellrand der Durchfluss und am unteren Modellrand ein Wasserstand vorgegeben. Der oberstromige Wasserstand stellt sich dann entsprechend im Modell ein. Alternativ kann am oberen Modellrand statt des Durchflusses ein zweiter Wasserstand definiert werden; in diesem Fall stellt sich der Durchfluss ein. Bei dieser Variante besteht auch die Möglichkeit, den Wasserstand an einem zusätzlichen Rand (z. B. seitlich) zu definieren und in Verbindung mit einer etwas überhöhten Durchflusszugabe eine Abflussaufteilung oberhalb des Schlitzpasses und damit das selbstständige Einstellen der Durchflussmenge im Schlitzpass

zu ermöglichen. Eine solche Situation entspricht vom Prinzip her dem Naturzustand an einer Gesamtanlage, wo in der Regel auch der Oberwasserstand, z. B. über eine Stauregulierung, fixiert ist.

Die explizite Vorgabe realistischer Verteilungen weiterer Strömungsgrößen (z. B. turbulente kinetische Energie) an den Modellrändern hat sich bei reinen Schlitzpassberechnungen als nicht notwendig herausgestellt, da keine Beeinflussung der Strömung im Schlitzpass beobachtet werden konnte, sobald der für die Auswertung relevante Modellbereich durch mindestens einen Schlitz vom Einlassrand getrennt ist. Die Hydraulik im Schlitzbereich bestimmt hierbei die Turbulenzentwicklung nahezu vollständig. Liegt bei einer Modellierung kein Schlitz zwischen dem oberen Rand und dem für die Auswertung relevanten Gebiet, sollten jedoch ein ausreichend großer Abstand zum Rand eingehalten und plausible Werte für die turbulente kinetische Energie abgeschätzt werden (siehe z. B. CFD-Online 2019), da anderenfalls eine Beeinflussung nicht völlig ausgeschlossen werden kann.

Kann es bei einer Anlage zu Rückstau bei erhöhter Wasserführung im Unterwasser kommen, sind Sensitivitätsanalysen bezüglich aller im Untersuchungsspektrum vorkommenden unterstromigen Wasserstände wichtig, um Auswirkungen auf die Strömungsgrößen in der Anlage zu ermitteln (siehe Bild 3).

Diskretisierung

Bei der Auswahl der geeigneten Modelldiskretisierung sind die Zielgrößen der Untersuchung von wesentlicher Bedeutung. Ist lediglich die generelle Strömungscharakteristik (Strömungsmuster, Hauptfließkorridor, Rückströmzonen) von Interesse, kann eine relativ grobe Diskretisierung (ca. 5 bis 10 Zellen über die Schlitzbreite) ausreichen. Hiermit konnte bei vorliegenden Untersuchungen mit FLOW-3D® die Bildung unterschiedlicher Strömungsmuster an der Oberfläche zufriedenstellend nachgebildet werden. Die Wahl einer solchen gröberen Diskretisierung setzt jedoch eine Sensitivitätsprüfung mittels feinerer Diskretisierung voraus. Sind dagegen Strömungsdetails – wie lokale Ablösungen oder maximale Fließgeschwindigkeiten – gesucht, ist eine deutlich feinere Modellauflösung erforderlich. Mehrere Untersuchungen zeigten hier erst bei einer Zellauflösung von ca. 20 Zellen über die Schlitzbreite zufriedenstellende Ergebnisse (Beispiel siehe Bild 4). Besteht verfahrensintern die Möglichkeit variabler Gitterabstände, kann im Becken selbst eine gröbere Diskretisierung ausreichend sein und nur der Schlitzbereich feiner aufgelöst werden. Insbesondere hier sind jedoch Sensitivitätsanalysen zu den Auswirkungen durchzuführen. Insgesamt können die genannten Werte der Modelldiskretisierung jedoch nur erste Anhaltswerte darstellen. Eine eingehende Sensitivitätsprüfung bzgl. der Auswirkungen unterschiedlicher Diskretisierungen sollte essentieller Bestandteil jeder Simulation von Fischaufstiegsanlagen sein. In jedem Fall sind die Berechnungszellen so zu wählen, dass die Abbildung der Geometrie in ausreichender Genauigkeit möglich ist. Hierfür kann es auch sinnvoll sein, die wandnahen Zellen zu verfeinern.

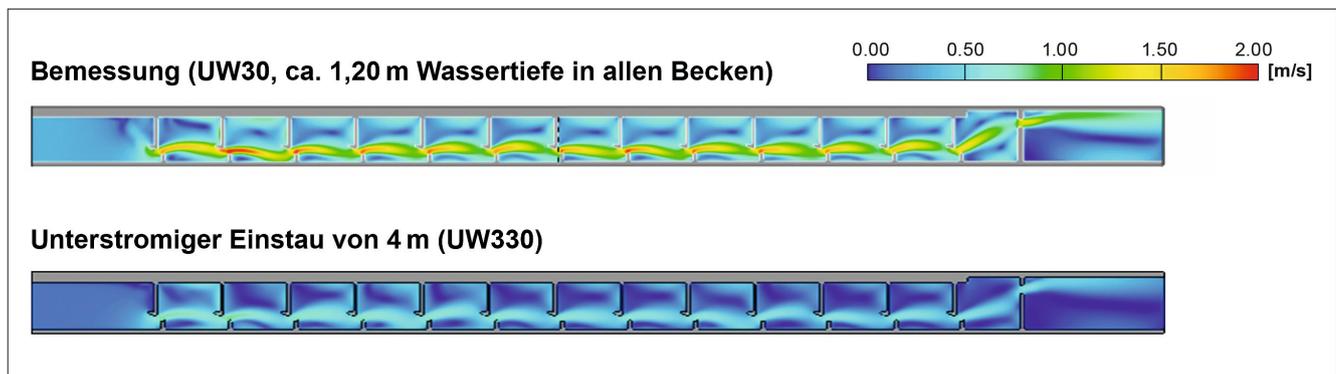


Bild 3: Modellierung einer Fischaufstiegsanlage ohne (oben) und mit (unten) Rückstau; die veränderten Fließgeschwindigkeiten sind deutlich zu erkennen

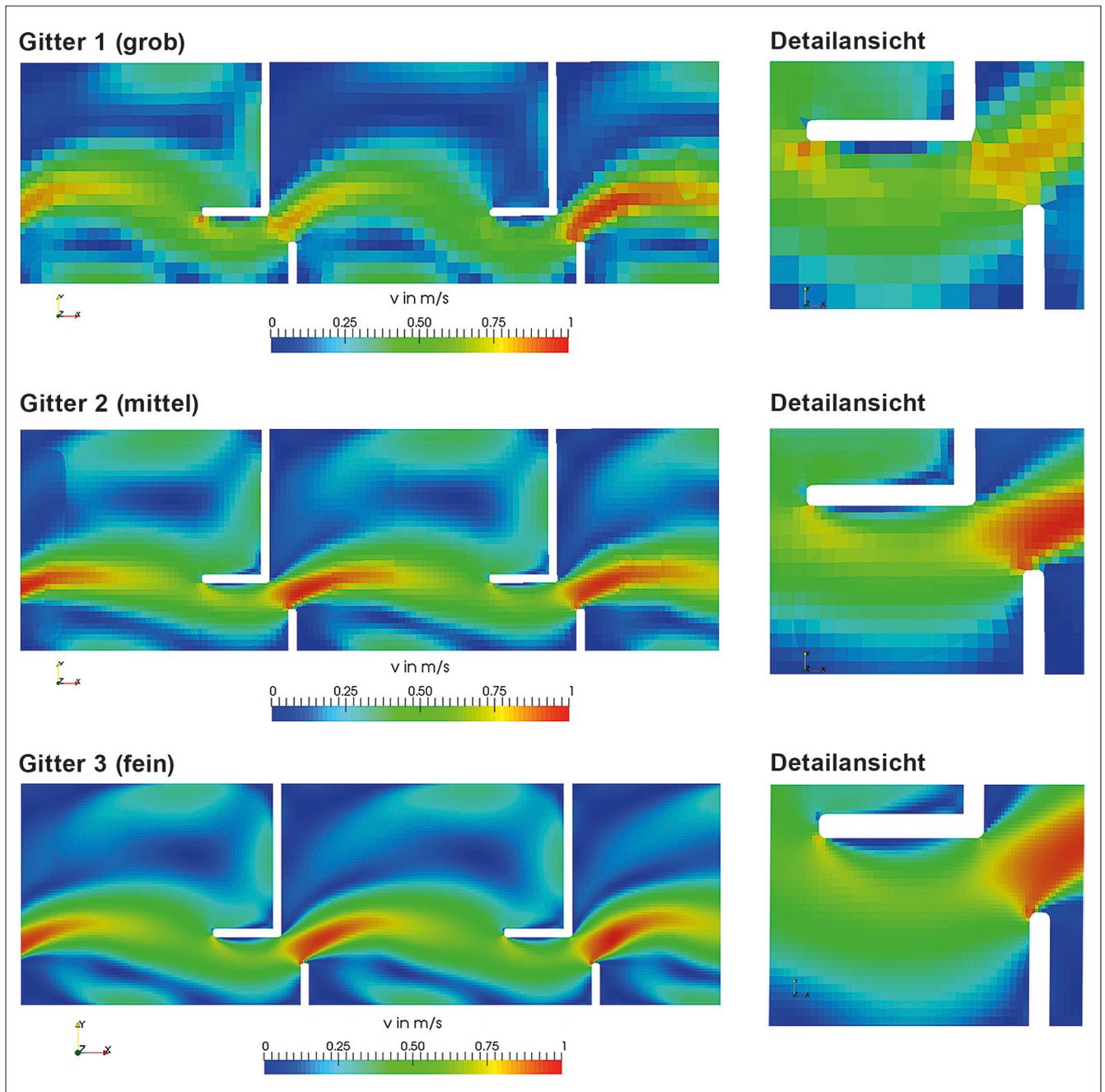


Bild 4: Beispiel für Effekte verschiedener Gitterauflösungen im Schlitz einer Fischaufstiegsanlage: Gitter 1: ca. 6 Zellen im Schlitz, Gitter 2: ca. 12 Zellen im Schlitz, Gitter 3: ca. 24 Zellen im Schlitz (Boldt 2014)

Turbulenzmodellierung

Sehr wichtig für eine plausible Modellierung ist die Wahl eines geeigneten Turbulenzmodells. Wie in Abschnitt 2 beschrieben, werden für 3D-Modelle meist statistische RANS-Modelle verwendet. Es hat sich diesbezüglich gezeigt, dass nur die komplexeren Zweigleichungsmodelle eine ausreichende Genauigkeit für die realistische Abbildung der Strömungseffekte in Schlitzpässen besitzen.

Statistische Modelle können durch die ihnen zugrunde liegenden Vereinfachungen prinzipiell keine hochfrequenten turbulenten Schwankungen, sondern nur vergleichsweise langsam ablaufende Veränderungen des gesamten Strömungsbilds abbilden. Bei ausreichend hoher Modelldiskretisierung zeigen sie jedoch auch bei Schlitzpässen oftmals zufriedenstellende Ergebnisse bezüglich der Prognose der mittleren bzw. einer nur gering schwankenden Strömung.

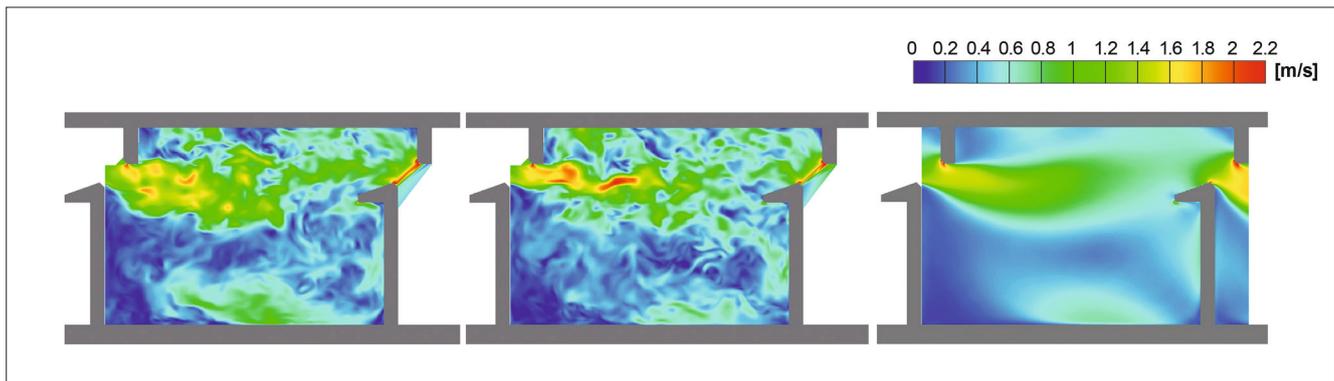


Bild 5: Geschwindigkeitsverteilung zu unterschiedlichen Zeitpunkten einer LES-Simulation (links und Mitte) und gemitteltes Ergebnis einer 300s-Simulation (rechts)

Da es sich bei Schlitzpaßströmungen in der Regel jedoch um hochturbulente Strömungen handelt, kann die oftmals vorhandene Option der LES-Berechnung in vielen Fällen weitergehende Einblicke in das in der Natur zu erwartende Strömungsbild bieten (Fuentes-Pérez et al. 2018, Oberle et al. 2012; siehe auch Bild 5). Dies gilt insbesondere im Fall von unterstromigem Einstau oder bei Beckengeometrien, welche zu Strömungsmustern im Übergangsbereich (Transition) führen. Jedoch gelten für LES strengere Anforderungen an die Modellqualität, insbesondere an die Gitterauflösung, welche in jedem Fall getestet werden müssen. Generell kann die Option der LES-Berechnung bei ausreichend feiner Gitterauflösung auch als eine Art „Hydraulik-Test“ zur Überprüfung der Ergebnisse der statistischen Turbulenzmodellierung zum Einsatz kommen. Dabei sollten die statistischen Modellierungsergebnisse weitgehend den zeitlichen Mittelwerten der LES entsprechen.

Wand-/Sohlerfassung

Für viele Fragestellungen ist es ausreichend, Sohle und Wände als eine ebene Berandung mit einer Wandfunktion mit einer geeigneten Abschätzung der Rauigkeit (z. B. k_s -Wert) anzunehmen, da so die Geschwindigkeiten im Becken ausreichend genau abgebildet werden können. Belastbare Aussagen zu den Strömungsgrößen in direkter Wand- oder Sohlennähe sind mit einem solchen Modell jedoch nicht möglich.

Berechnungsdauer/Datenausgabe

Bei Einsatz statistischer Turbulenzmodellierung sollte die Simulationszeit so gewählt werden, dass einerseits eine Unabhängigkeit von den Initialbedingungen ge-

währleistet ist und andererseits weitgehende Stationarität in relevanten Strömungsgrößen erreicht wird. Pauschale Aussagen zu Simulationszeiten sind hier nicht möglich, da diese stark von der betrachteten Situation und Fragestellung abhängen. Diesbezüglich sollten bei jeder Simulation an unterschiedlichen Stellen über die Auswertung berechneter Zeitreihen Analysen durchgeführt werden. Werden verbleibende (kleinere) Schwankungen in den Strömungsgrößen beobachtet, können diese ggf. über einen ausreichend großen Zeitraum gemittelt werden.

6 Modellgenauigkeiten

Ein Modell ist immer ein abstrahiertes Abbild der Realität und wird diese nie exakt wiedergeben können. Nachfolgende Auflistung soll Anhaltswerte dafür liefern, welche Prognosegenauigkeiten für einige wesentliche Zielgrößen einer Schlitzpaßsimulation unter Einsatz eines 3D-Verfahrens in der Praxis erzielt werden können. Da derartige pauschale Angaben auch bei Vorliegen entsprechend umfangreicher Erfahrungswerte mit sehr großen Unsicherheiten behaftet sind, sollten sie mit entsprechender Vorsicht betrachtet werden. Wichtig ist hier auch zu beachten, dass die Unsicherheiten meist stark von der gewählten Gitterauflösung abhängen.

Bei **Fließgeschwindigkeiten** im Bereich der Hauptfließpfade sind numerisch begründete Prognoseunsicherheiten in einer Größenordnung von bis zu ca. $\pm 5\%$ bis 15% zu erwarten. Die Prognose von Fließgeschwindigkeiten im Scherbereich bzw. in den Rückströmzonen oder Be-

reichen mit sehr geringen Geschwindigkeiten ist mit größeren Unsicherheiten behaftet, da hier schon eine geringe Verschiebung des Hauptströmungspfades zu großen Abweichungen führen kann. Der Wertebereich der natürlichen Schwankungen hingegen kann z. B. mittels einer LES i. A. in weitgehend realistischer Größenordnung abgebildet werden.

Der **Anlagendurchfluss** wird abhängig vom Verfahren mit Unsicherheiten von bis zu ca. $\pm 15\%$ abgebildet. Mittels Modelloptimierungen basierend auf Sensitivitätsprüfungen (z. B. Diskretisierung, Geometrieabbildung) kann dieser Wert oftmals deutlich reduziert werden.

Wasserstände innerhalb der Anlage können bei Unsicherheiten hinsichtlich der exakten Durchflussabbildung u. U. nur bei zusätzlicher oberstromiger Fixierung des Wasserspiegels anhand der Planungswerte belastbar abgebildet werden. Dann sind jedoch Genauigkeiten von wenigen Zentimetern (± 1 cm bis 2 cm), auch bezüglich der Schwankungswerte, zu erwarten. Die Gitterauflösung im Bereich der Wasseroberfläche kann hier zusätzlich ein entscheidender Aspekt sein.

Die **Strömungscharakteristik** bzw. die **Strömungsmuster** werden bei geeigneter Modelldiskretisierung i. A. naturgetreu abgebildet. Auch eventuelle Schwankungsbereiche können ausreichend genau erfasst werden.

7 Schlussfolgerungen

Der Vergleich vorhandener Ergebnisse aus numerischen Modellen mit Naturmessungen an bestehenden Anlagen wie auch mit Ergebnissen aus gegenständlichen Modelluntersuchungen zeigt die grundsätzliche Eignung der numerischen Modelle zur Berechnung und Analyse von Strömungsvorgängen in Schlitzpässen.

Numerische Modelle können bei der Planung wie auch bei der hydraulischen Funktionskontrolle von Fischwanderhilfen in Schlitzpassbauweise ein wertvolles Werkzeug darstellen. Mittels hydrodynamisch-numerischer Modellierung können alle gängigen hydraulischen Bemessungsgrößen ermittelt und wesentliche Sensitivitäten überprüft werden.

Generell gilt es jedoch, die prinzipielle Notwendigkeit des Modelleinsatzes kritisch zu hinterfragen sowie den erwarteten Erkenntnisgewinn im Vorfeld klar zu definieren. Fällt die Entscheidung dann zugunsten einer numerischen Modellierung, kann die Beachtung der in den vorangegangenen Abschnitten gegebenen Hinweise von entscheidender Bedeutung für die Ergebnisqualität sein. Darüber hinaus sollte bei allen Beteiligten eine realistische Einschätzung der zu erwartenden Prognosegüte bzw. eventueller Modellunsicherheiten gewährleistet sein.

8 Literatur

Boldt, S. (2014): Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse einer 3D-numerischen Modellierung einer idealisierten Fischeufstiegsanlage in Schlitzpassbauweise. Bachelorarbeit am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), unveröffentlicht.

Bombac, M.; Novak, G.; Rodic, P.; Cetina, M. (2014): Numerical and physical model study of a vertical slot fishway. In: Journal of Hydrol. Hydromech. 62 (2), pp. 1-10.

Bombac, M.; Novak, G.; Mlacnik, J.; Cetina, M. (2015): Extensive field measurements of flow in vertical slot fishway as data for validation of numerical simulations. In: Journal of Ecological Engineering 84, pp. 476-484.

Cea, L.; Pena, L.; Puertas, J.; Vazquez-Cendon, M. E.; Pena, E. (2007): Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. In: J. Hydraulic Eng., 133, 2, pp. 160-172.

CFD-Online (2019): Turbulence free-stream boundary conditions. Online verfügbar unter https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_free-stream_boundary_conditions (zuletzt geprüft am 06.03.2020).

Chorda, J.; Maubourguet, M. M.; Roux, H.; George, J.; Larnier, M.; Tarrade, L.; David, L. (2010): Two-dimensional free surface flow numerical model for vertical slot fishways. In: Journal of Hydraulic Research 48 (2), pp. 141-151.

Fuentes-Pérez, J. F.; Silva, A. T.; Tuhtan, J. A.; García-Vega, A.; Carbonell-Baeza, R.; Musall, M.; Kruusmaa, M. (2018). 3D modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways. *Environmental Modelling & Software*, 99, pp. 156–169. [10.1016/j.envsoft.2017.09.011](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.09.011).

Musall, M.; Oberle, P.; Carbonell Baeza, R.; Nestmann, F.; Fuentes-Pérez, J. F.; Tuhtan, J. (2015): Beitrag zu detaillierten Analysen der Hydraulik von Schlitzpässen, *Wasserwirtschaft* 08/2015, S. 67-72. DOI:10.1007/s35147-015-0551-x.

Oberle, P.; Musall, M.; Riesterer, J.; Nestmann, F. (2012): Numerische Modelluntersuchungen im Rahmen der Planung der Fischaufstiegsanlage Geesthacht, *Wasserwirtschaft* 04/2012; 102(4), S. 28-33.

Pena, L.; Cea, L.; Puertas, J. (2004): Turbulent flow: An experimental analysis in vertical slot fishways. In: 5th Int. Symp. on Ecohydraulics, Madrid, Spanien, IAHR, Madrid, Spanien, pp. 881-888.

Puertas, J.; Pena, L.; Teijeiro, T. (2004): Experimental Approach to the Hydraulics of Vertical Slot Fishways. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 130, pp. 10-23.

Rajaratnam, N.; Katopodis, C.; Solanki, S. (1992): New designs for vertical slot fishways, *Canadian Journal of Civil Engineering* 19, pp. 402-414.

Sokoray-Varga B.; Kerlin, T.; Prinz, F.; von Meltzer, J.; Musall, M.; Oberle, P.; Weichert, R. (2020): Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): *BAWMitteilungen* Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 43-48.

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.

Analyse turbulenter Strömungsprozesse in Schlitzpässen aus Sicht der Fischpassage

Dr.-Ing. Béla Sokoray-Varga, Dr. sc. techn. Roman Weichert,
Bundesanstalt für Wasserbau

Im vorliegenden Artikel werden die Ergebnisse einer Forschungsarbeit vorgestellt, die im Rahmen einer Kooperation zwischen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zur quantitativen Beschreibung turbulenter Strömungen in Schlitzpässen durchgeführt wurde. Ziel der Arbeit war die Entwicklung einer Methodik, mit der eine Detektion bestimmter nicht-periodischer, jedoch wiederkehrender und zum Teil vorhersehbarer Strömungsänderungen möglich ist. Die Vorhersehbarkeit dieser turbulenten Strömungsänderungen kann von besonderer Bedeutung sein, da Fische diese für eine effiziente Passage von Schlitzpässen nutzen könnten.

1 Einleitung

Die Bemessung von Schlitzpässen nach den Vorgaben des DWA-Merkblatts 509 (2014) basiert auf der Verknüpfung fischökologischer und hydraulischer Parameter. Die zulässigen Fließgeschwindigkeiten in einem Schlitzpass orientieren sich beispielweise an der Fischregion des Gewässers und bestimmen in Verbindung mit der Fallhöhe der Stauanlage die Anzahl der Becken und damit die Länge des Schlitzpasses. Hierbei werden sowohl auf fischbiologischer wie auch auf hydraulischer Seite Vereinfachungen vorgenommen, um ein praktikables Vorgehen bei der Auslegung eines Schlitzpasses sicherzustellen.

Auch wenn grundsätzlich positive Erfahrungen zur Passierbarkeit von Schlitzpässen vorliegen, bestehen weiter-

hin offene Fragen. Ein wesentlicher, derzeit diskutierter Aspekt betrifft die Selektivität von Schlitzpässen für die verschiedenen zu berücksichtigenden Fischarten. Besonders im Fokus stehen dabei Fragen zur Passierbarkeit durch Jungfische bzw. kleinere, eher schwimmschwächere Fischarten. Die in DWA (2014) angegebenen Bemessungswerte der maximalen Fließgeschwindigkeit übersteigen in vielen Fällen deren Schwimmleistungsfähigkeit (nach derzeitigem Wissen). Hinzu kommt, dass die häufig angenommene Reduktion der Fließgeschwindigkeiten in Sohlhöhe in Schlitzpässen nur in geringer räumlicher Ausprägung existiert, sodass Zweifel bestehen, dass sie von schwimmschwachen Fischarten genutzt werden können (siehe Beitrag von Henning und Weichert in diesem Heft).

Diesen Erkenntnissen stehen fischbiologische Beobachtungen gegenüber, die anzeigen, dass auch eher schwimmschwächere Fische in der Lage sind, Schlitzpässe zu überwinden. So wurden beispielsweise an der Fischaufstiegsanlage Koblenz im Jahr 2015 von der Bundesanstalt für Gewässerkunde circa 230.000 kleinere Fische (Größe circa 5 cm bis 15 cm) bei der erfolgreichen Passage der Anlage registriert (BfG 2017). Eine Erklärung für diese Beobachtung könnte sein, dass Fische in der Lage sind, die zeitliche Variabilität der Strömung (Instationarität durch turbulente Strömungsprozesse) zu ihrem Vorteil zu nutzen. In der Literatur beschriebene Beobachtungen lassen vermuten, dass diese Fähigkeit bei Fischen vorhanden ist (Wang et al. 2010), wenngleich ein Nachweis mit Hilfe systematischer Untersuchungen noch aussteht. Eine Voraussetzung für zielgerichtete fischökologische Untersuchungen zu dieser Frage ist die

Entwicklung von Methoden zur Erfassung und quantitativen Beschreibung von turbulenten instationären Strömungsprozessen.

Dieser Beitrag fasst die wesentlichen Resultate einer Forschungsarbeit zusammen, die sich im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) der Methodenentwicklung zur Analyse turbulenter Strömungsprozesse in Schlitzpässen widmete.

2 Turbulente Strömung in Schlitzpässen

Die turbulente Strömung in Schlitzpässen ist ein weltweit untersuchtes Themenfeld, wenngleich sich die Ergebnisse in der Regel auf statistische Kenngrößen wie beispielsweise die turbulente kinetische Energie (TKE) beschränken (z. B. Puertas et al. 2004, Liu et al. 2006, Wang et al. 2010, Fuentes-Pérez et al. 2018). Auch wenn diese statistischen Kenngrößen Einblicke in die Strömungscharakteristik eines Schlitzpasses liefern, so geben sie nicht die von den Fischen „erlebte“ turbulente Strömung wieder. Um zu verstehen, wie sich Fische in einer turbulenten Strömung verhalten, müssen sich die betrachteten Skalen der Strömungsstrukturen (z. B. Wirbel) an den relevanten zeitlichen Skalen des Fischaufstiegsprozesses wie auch an der Physiologie der Fische orientieren. Eine wichtige Arbeit in der Schnittstelle Hydraulik – Fischverhalten liefern Lacey et al. (2012). Sie schlagen vor, bei Untersuchungen zum Einfluss von Turbulenz auf Fische neben den Intensitätseigenschaften von Turbulenz (z. B. TKE, Turbulenzintensität, Wirbelstärke, ...) auch die Merkmale Orientierung und Größe der auftretenden Strömungsstrukturen sowie Vorhersehbarkeit der turbulenten Änderungen (welche laut der Autoren durch Periodizität von Wirbelablösungen gegeben ist) zu betrachten. Mit Ausnahme der Intensitätseigenschaften sind diese Eigenschaften nicht mit den üblicherweise zum Einsatz kommenden Punktmesssonden zur Messung der Fließgeschwindigkeit (z. B. ADV-Sonden) erfassbar (siehe Beitrag von Henning und Weichert in diesem Heft). Vielmehr ist dafür der Einsatz von Messverfahren erforderlich, welche zeitgleiche Messungen der Fließgeschwindigkeiten in einem sehr engen Messraster ermöglichen.

Die instationären Strömungsprozesse in den Becken eines Schlitzpasses sind im Wesentlichen durch Strömungsvorgänge im Bereich des Schlitzes geprägt und werden zudem durch die Beckengeometrie beeinflusst. An der Umrandung des Schlitzes löst sich der in das darunterliegende Becken eintauchende Strahl ab und generiert in der Folge im Becken Wirbel, deren größte Skalen durch die geometrischen Abmessungen des Schlitzes bestimmt werden. Diese Ablösevorgänge im Bereich des Schlitzes, und damit die instationären Strömungsprozesse im Becken selbst, sind zeitlich wiederkehrend, jedoch nicht periodisch. Um die zu diesen Strömungsprozessen gehörenden Teilprozesse zu beschreiben, wird in dieser Arbeit die folgende Terminologie verwendet: Ein instationärer Strömungsprozess wird als zeitliche Abfolge von einzelnen Strömungsereignissen definiert. Der Begriff „Strömungsereignis“ bezieht sich auf Änderungen im Strömungsfeld, die mit dem Auftreten, dem Verschwinden oder der Ortsveränderung einer turbulenten Strömungsstruktur an einer bestimmten Stelle in der Strömung verbunden sind.

Strömungsprozesse lassen sich demzufolge in zeitliche Abfolgen einzelner Strömungsereignisse untergliedern. Wenn sich diese Strömungsereignisse in einer bestimmten Reihenfolge wiederholen, werden diese Änderungen (kurzfristig) vorhersehbar, auch dann, wenn der Gesamtprozess nicht periodisch ist. Diese Eigenschaften sind wichtig, da eine wiederkehrende Abfolge ähnlicher Strömungsereignisse zu einer Vorhersehbarkeit aus der Perspektive des Fisches führen kann. Demzufolge steht die Erfassung und Beschreibung aperiodisch wiederkehrender Prozesse im Zentrum der nachfolgend vorgestellten Methodik.

3 Untersuchungen im gegenständlichen Modell

An der BAW wurde ein Laborversuch konzipiert, bei dem in einem skalierten gegenständlichen Modell eines Schlitzpasses das Strömungsfeld in einem Becken mittels des Messverfahrens „Particle Image Velocimetry“ (PIV) vermessen wurde. PIV ist ein optisches Ganzfeldmessverfahren, bei dem mit einem Laser beleuchtete kleine Partikel, die dem Wasser zugegeben werden, in kurzen

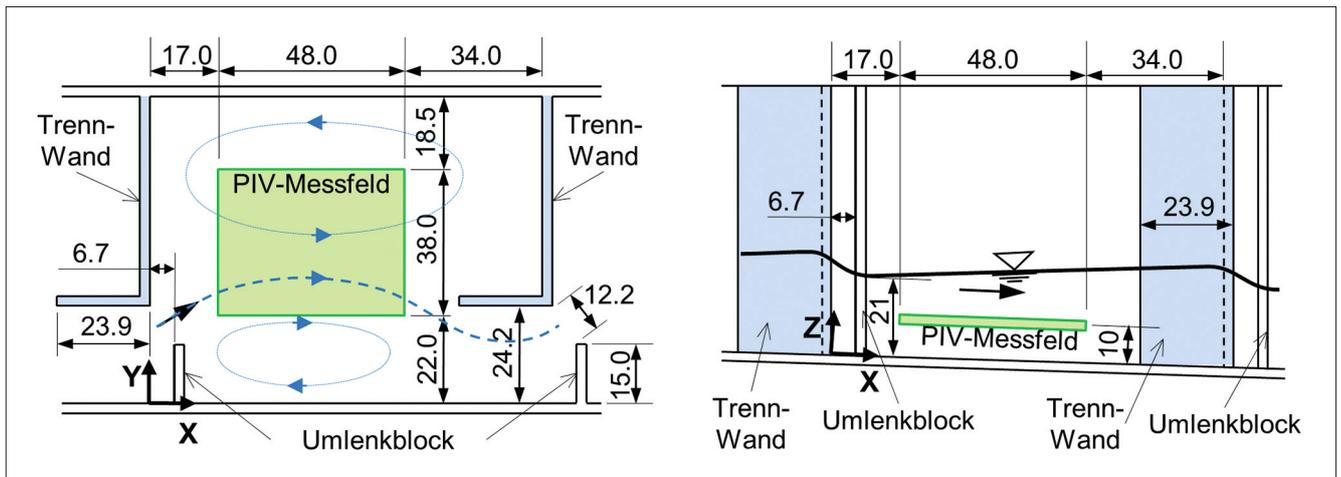


Bild 1: PIV-Messfeld in einem mittleren Schlitzpassbecken in der Draufsicht (links) und Seitenansicht (rechts, Abmessungen in cm)

zeitlichen Abständen fotografiert werden. Eine computergestützte Auswertung ermöglicht die Identifikation der Partikel nach jedem Zeitschritt und liefert damit die Basis für die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit im gesamten Messfeld.

Die PIV-Messung im Modell an der BAW (Maßstab 1 : 4,1) wurde in einem mittleren Becken über fünf Minuten mit einer Messfrequenz von 200 Hz durchgeführt (Bild 1). Die erhaltenen Fließgeschwindigkeitsvektoren wurden in dem Messfeld von 48 x 38 cm Größe für ein 5,0 x 5,0 mm-Raster in jedem Zeitschritt ermittelt (Bild 2), was in einem Geschwindigkeitsdatensatz mit 7.469 Rasterpunkten und 60.000 Zeitschritten resultierte. Die Beträge der Geschwindigkeiten in Bild 2 sind Modellgrößen, die realen Geschwindigkeiten sind etwa doppelt so groß.

4 Auswertung der PIV-Messungen

Zur Auswertung der gemessenen Zeitreihen der Geschwindigkeitsfelder wird in einem ersten Schritt die Methode POD (Proper Orthogonal Decomposition, z. B. Sirovich 1987, Cordier und Bergmann 2003) genutzt. In den folgenden Schritten werden die POD-Resultate im Sinne des Zieles dieser Arbeit weiter analysiert. POD ist ein mathematisches Verfahren, welches die Zeitreihen von Geschwindigkeitsfeldern in zeitunabhängige Eigenvektoren, sogenannte Moden, und zugehörige zeitabhängige Koeffizienten zerlegt. Die lineare Kombination der Moden und der zugehörigen Koeffizienten ermöglichen eine exakte Rekonstruktion der ursprünglichen Geschwindigkeitsfelder in jedem Zeitschritt. Mode 0 entspricht dabei dem zeitlich gemittelten Geschwindigkeitsfeld, während

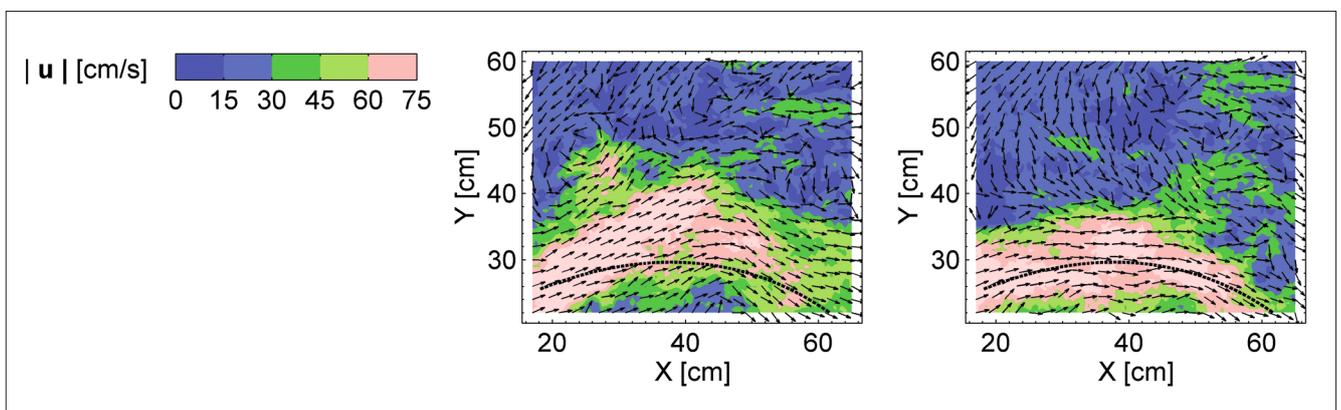


Bild 2: Mit dem PIV-Verfahren gemessene Fließgeschwindigkeiten im Messfeld eines Schlitzpassbeckens (siehe Bild 1) für zwei Zeitpunkte (Fließgeschwindigkeiten in Modellgrößen)

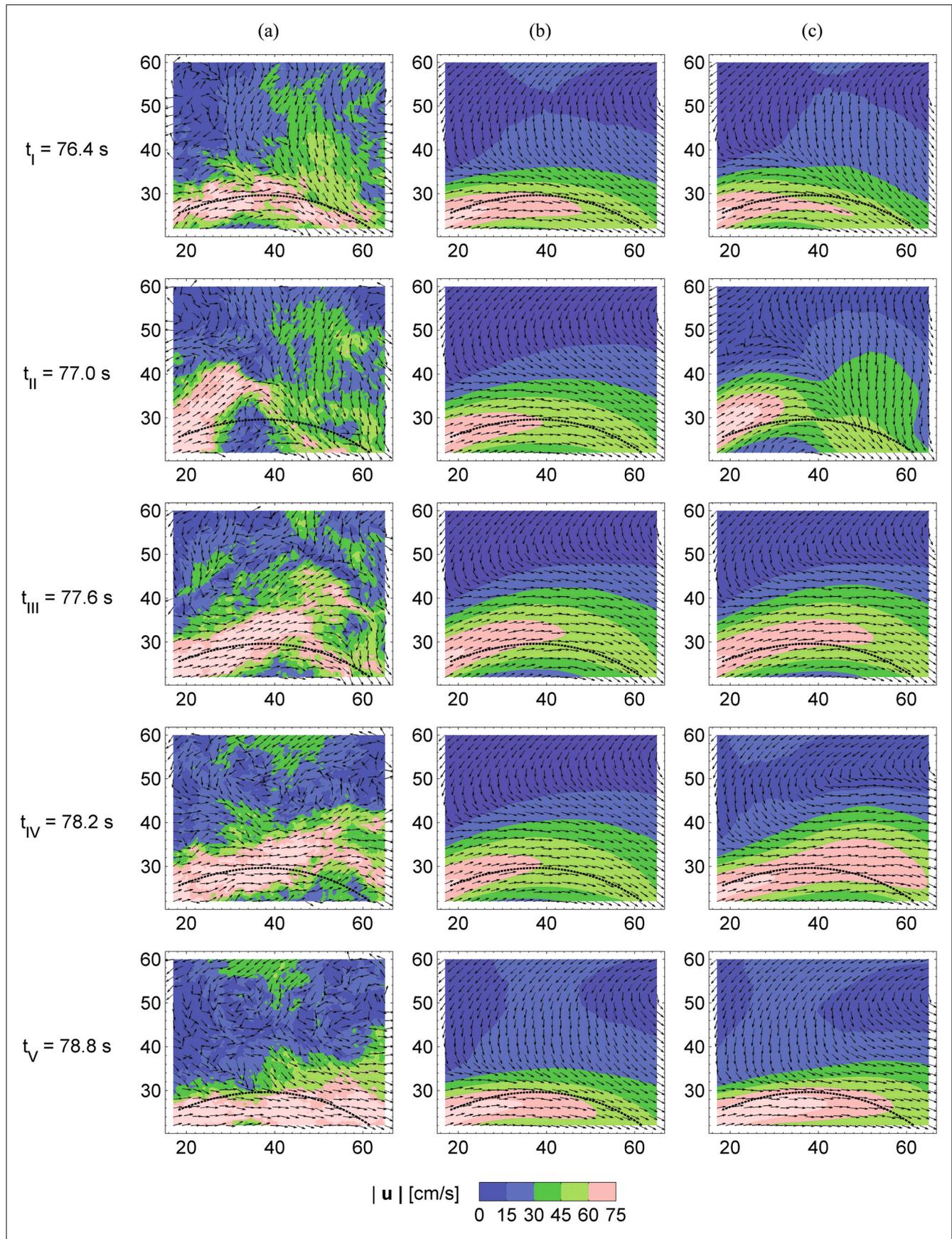


Bild 3: Geschwindigkeitsfelder aus den Rohdaten (Spalte a) und aus der Rekonstruktion der Strömung aus den POD-Moden 0 und 1 (Spalte b) bzw. 0, 1 und 2 (Spalte c) für fünf aufeinanderfolgende Zeitschritte (X- und Y-Skalen in cm)

die weiteren Moden keine Komponenten im Sinne von existierenden Strömungsstrukturen darstellen, sondern vielmehr Oszillationen des Geschwindigkeitsfeldes repräsentieren.

Da die Moden anhand ihres Beitrages zur turbulenten kinetischen Energie geordnet werden, spielen Moden niedriger Ordnung die größte Rolle bei der Rekonstruktion von großskaligen Strömungsprozessen. Eine klassische Verwendung von POD ist demnach die Rekonstruktion der Geschwindigkeitsfelder mit nur wenigen POD-Moden niedriger Ordnung, mit dem Ziel, großskalige instationäre Prozesse der Strömung zu detektieren. So wendeten beispielsweise Tarrade et al. (2011) POD auf einen PIV-Geschwindigkeitsdatensatz aus einem Schlitzpassbecken an und konnten feststellen, dass POD-Mode 1 der oszillierenden Hauptströmung in dem betrachteten Becken entspricht. Die POD-Moden 2, 3 und 4 konnten hingegen mit der Hauptströmungsschwankung verknüpften kleinskaligeren Strömungsprozessen zugeordnet werden. Die Beschreibung dieser Zusammenhänge erfolgte ausschließlich auf Basis einer visuellen Analyse der rekonstruierten Geschwindigkeitsfelder, was lediglich eine qualitative Beschreibung ermöglichte.

Aufbauend auf den Erkenntnissen von Tarrade et al. (2011) erfolgte in der vorliegenden Forschungsarbeit die Analyse der POD-Moden niedriger Ordnung mit dem Ziel, klar definierte Strömungsereignisse zu extrahieren, die für Fische bei der Passage eines Schlitzes eine Rolle spielen könnten. Bild 3 zeigt fünf aufeinanderfolgende Zeitschritte mit einem zeitlichen Abstand von jeweils 0,6 s. Als Orientierung ist eine gestrichelte Linie eingezeichnet, die der Mittellinie der Hauptströmung im zeitlich gemittelten Geschwindigkeitsfeld entspricht. Die Beträge der Geschwindigkeiten und die dargestellten Zeitabstände in Bild 3 sind Modellgrößen, die Werte einer Anlage im Realmaßstab sind etwa doppelt so groß. Die gemessenen Geschwindigkeiten des betrachteten Schlitzpassbeckens finden sich in der linken Spalte, während die mittlere und die rechte Spalte die aus den POD-Moden 0 und 1 bzw. den Moden 0, 1 und 2 rekonstruierten Geschwindigkeitsfelder zeigen. Die Abfolge dieser Geschwindigkeitsfelder zeigt den instationären Charakter der Strömung im Becken. Wie oben bereits beschrieben, wird das in Bild 3 wiedergegebene instationäre Verhalten der Beckenströmung im Wesentlichen durch die Vorgänge am Schlitz hervorgerufen. Dieser Zusammenhang konnte im

Rahmen der hier vorgestellten Messungen wegen eines zu kleinen Messfelds zwar nicht quantifiziert werden, es ist jedoch naheliegend, dass zeitliche Schwankungen am Beginn des Messfeldes mit zeitlichen Schwankungen im Schlitzquerschnitt korrelieren.

Die Ergebnisse bestätigen, dass die mit den POD-Moden 0 und 1 rekonstruierten Geschwindigkeitsfelder im Wesentlichen die räumliche Oszillation der Hauptströmung wiedergeben. Wird POD-Mode 2 hinzugenommen, kommen die mit dieser Schwankung verknüpften Strömungsereignisse, wie beispielsweise die in Zeitschritt II zu erkennende Querströmung, hinzu (Bild 3, rechte Spalte), die die Hauptströmung in Strömungsrichtung nach rechts (im Bild nach unten) ablenkt.

Die Analyse der Koeffizientenzeitreihen zeigt, dass es damit möglich ist, die Zeitpunkte der in Bild 3 exemplarisch dargestellten Abfolge an Strömungsereignissen im gesamten Datensatz zu identifizieren. Bild 4 gibt die POD-Koeffizienten der Abfolge der Strömungsereignisse aus Bild 3 wieder, d. h. das Zusammenspiel der POD-Koeffizienten von Mode 1 und Mode 2, welche die Basis für die Identifikation in dem vorhandenen Datensatz darstellen.

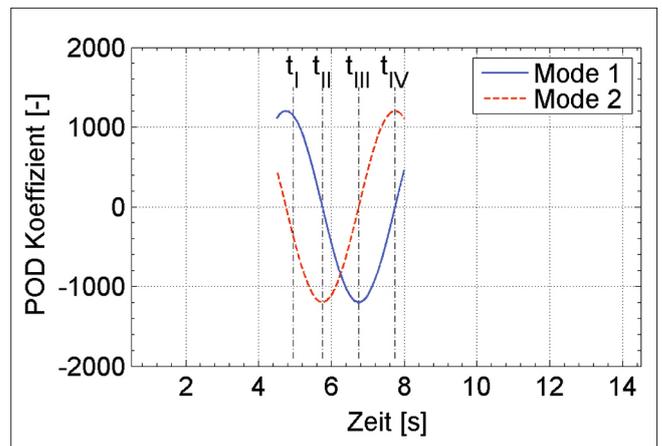


Bild 4: Schematische zeitliche Entwicklung der POD-Koeffizienten der POD-Moden 1 und 2

Bild 5 gibt einen einminütigen Ausschnitt der Zeitreihen-koeffizienten (POD-Koeffizienten Mode 1 und Mode 2) wieder. Grau hinterlegt sind die Zeitabschnitte, in denen der in Bild 3 dargestellte Strömungsprozess identifiziert werden konnte. Es zeigt sich, dass diese Abfolge an Strömungsereignissen in der hier dargestellten Minute neun Mal auftrat, jedoch ohne klar definierten zeitlichen Ab-

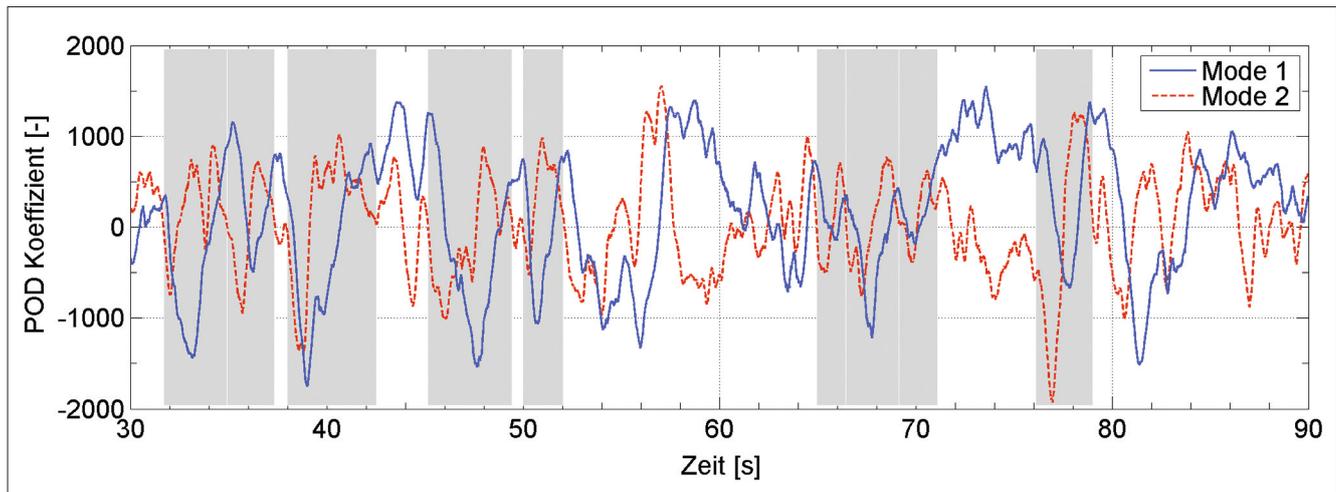


Bild 5: POD-Koeffizienten der POD-Moden 1 und 2 aus dem Geschwindigkeitsdatensatz; grau hinterlegt ist das Auftreten des in Bild 3 dargestellten Strömungsprozesses

stand. Die in den grau hinterlegten Bereichen identifizierten Muster nach Bild 4 sind sich dabei ähnlich, wenn auch nicht identisch, was auf die chaotische Überlagerung von Prozessen verschiedener Skalen des in Bild 3 definierten Strömungsprozesses zurückzuführen ist.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Fische sind in Flüssen, aber auch in Fischaufstiegsanlagen, einem turbulent-instationären Strömungsfeld ausgesetzt. Eine Hypothese zur Erklärung, dass auch schwimmschwache Fische einen Schlitzpass erfolgreich passieren, ist, dass Fische die mit der instationären Strömungscharakteristik verbundenen hydraulischen Bedingungen „intelligent“ nutzen.

Die vorgestellten Untersuchungen im Rahmen einer BAW/KIT-Kooperation (Sokoray-Varga 2016) zeigen, dass die Identifizierung von typischen Abfolgen instationärer Strömungsereignisse möglich ist. Diese typischen Abfolgen sind vermutlich mit einer zeitlichen Variabilität der hydraulischen Bedingungen im Schlitzbereich verknüpft. Sie erwiesen sich dabei als nicht-periodisch, jedoch wiederkehrend und damit potenziell für den Fisch „erlernbar“ und „vorhersehbar“. In zukünftigen Forschungsprojekten gilt es, diese Hypothese zu überprüfen. Zu diesem Zweck sind Fischverhaltensuntersuchungen bei gleichzeitiger Messung der turbulent-instationären Strömung

erforderlich. Eine in diesem Zusammenhang wichtige Erkenntnis der Untersuchung ist, dass die detektierte Abfolge von Strömungsereignissen auch anhand von Messungen mit deutlich geringerer räumlicher Auflösung erhalten werden kann. Für die erforderlichen Fischverhaltensuntersuchungen bedeutet dies, dass der Einsatz von Punktmesssonden, wie z. B. ADV-Sonden in einem bestimmten Raster, zur Erfassung der vorab beschriebenen Strömungsabfolgen grundsätzlich möglich ist, sofern vorab eine Analyse anhand von PIV-Messungen durchgeführt wurde.

6 Literatur

BfG (2017): BfG registriert an Fischaufstiegsanlage Koblenz über 230000 Fische. Pressemitteilung vom 7. April 2017. Quelle: https://www.bafg.de/DE/Service/presse/2017_04_07.html?nn=168662 (zuletzt geprüft am 06.05.2020).

Cordier, L.; Bergmann, M. (2008): Proper Orthogonal Decomposition: an overview. 'Lecture series 2002-04, 2003-03 and 2008-01 on post-processing of experimental and numerical data, Von Kármán Institute for Fluid Dynamics, 2008', VKI, pp. 46.

DWA (2014): Merkblatt 509, Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung,

Qualitätssicherung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hg.), Hennef.

Fuentes-Pérez, J. F.; Tuhtan, J. A.; Eckert, M.; Romão, F.; Ferreira, M. T.; Kruusmaa, M.; Branco, P. (2018): In: *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 145 (2), 2019.

Henning, M.; Weichert, R. (2020): Hydraulische Parameter von Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise in Bemessung und Bestand. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): *BAWMitteilungen* Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 7-14.

Lacey, J. R. W.; Neary, V. S.; Liao, J. C.; Enders, E. C.; Tritico, H. M. (2012): The IPOS framework: linking fish swimming performance in altered flows from laboratory experiments to rivers. Special Issue Paper. In: *River Res. Applic.* 28 (4), pp. 429–443. DOI: 10.1002/rra.1584.

Liu, M.; Rajaratnam, N.; Zhu, D. Z. (2006): Mean Flow and Turbulence Structure in Vertical Slot Fishways. In: *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 132, No. 8, August 1, 2006, pp. 765–777.

Puertas, J.; Pena, L.; Teijeiro, T. (2004): Experimental Approach to the Hydraulics of Vertical Slot Fishways. In: *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 130, No. 1, pp. 10–23.

Sirovich, L. (1987): Turbulence and the dynamics of coherent structures part I: coherent structures. *Quarterly of Applied Mathematics* 45 (3), pp. 561–571.

Sokoray-Varga, B. (2016): Detecting flow events in turbulent flow of vertical slot fish passes. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), DOI: 10.5445/IR/1000072000.

Tarrade, L.; Pineau, G.; Callaud, D.; Texier, A.; David, L.; Larinier, M. (2011): Detailed experimental study of hydrodynamic turbulent flows generated in vertical slot fishways. In: *Environmental Fluid Mechanics* 11 (1), pp. 1–21.

Wang, R.; David, L.; Larinier, M. (2010): Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes, *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* 396 (02), pp. 21.



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe

Tel. +49 (0) 721 9726-0

Fax +49 (0) 721 9726-4540

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg

Tel. +49 (0) 40 81908-0

Fax +49 (0) 40 81908-373

www.baw.de