

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

**Musall, Mark; Oberle, Peter; Henning, Martin; Weichert, Roman;
Nestmann, Franz**

Analysen zu Strömungsmustern in technischen Fischaufstiegsanlagen

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische
Hydromechanik**

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103456>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Musall, Mark; Oberle, Peter; Henning, Martin; Weichert, Roman; Nestmann, Franz (2014):
Analysen zu Strömungsmustern in technischen Fischaufstiegsanlagen. In: Technische
Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.):
Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Dresdner
Wasserbauliche Mitteilungen 50. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für
Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 353-362.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

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

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



Analysen zu Strömungsmustern in technischen Fischaufstiegsanlagen

Mark Musall
Peter Oberle
Martin Henning
Roman Weichert
Franz Nestmann

Im vorliegenden Beitrag wird der Einsatz dreidimensionaler numerischer Modelle zur Analyse der Strömungscharakteristik in technischen Fischaufstiegsanlagen vorgestellt. Diese Strömungsmodelle wurden zunächst mittels umfangreicher Natur- und Labormessungen hinsichtlich ihrer Naturähnlichkeit validiert. Anschließend erfolgten Variantenuntersuchungen zur Prognose der zu erwartenden Strömungsmuster bei unterschiedlichen, bislang noch nicht ausreichend untersuchten Randbedingungen bzw. Anlagenkonfigurationen. Die Ergebnisse der Untersuchungen liefern einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Belastbarkeit zukünftiger Planungen bzw. fischökologischer Begutachtungen im Planungsprozess.

Stichworte: Technische Fischaufstiegsanlage, Schlitzpass, Strömungsmuster, Fischwanderung, 3D-HN-Simulation

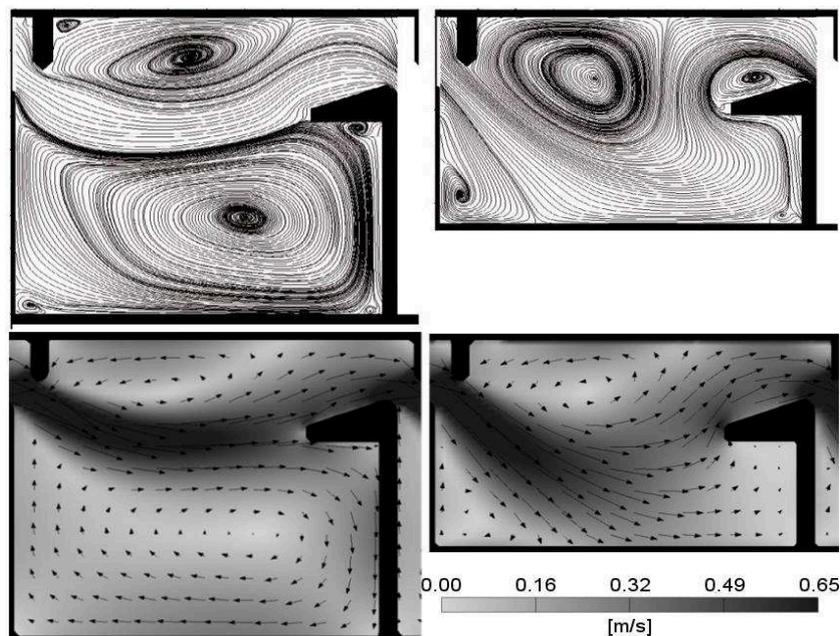
1 Veranlassung und Zielsetzung / Motivation

Zur Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit anthropogen veränderter Fließgewässerabschnitte kommen vielfach technische Fischaufstiegsanlagen (FAA), wie z.B. Schlitzpässe, zum Einsatz. Deren Funktionsfähigkeit hängt im Wesentlichen von den Faktoren Auffindbarkeit und Passierbarkeit ab. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Strömungscharakteristik innerhalb des Bauwerks von entscheidender Bedeutung, da ungeeignete Strömungsverteilungen oder das Überschreiten artspezifischer Grenzwerte zu einer Selektion und damit einer eingeschränkten Passierbarkeit führen können.

Bisherige Planungen basieren in der Praxis meist auf stark vereinfachten Überlegungen zur Abschätzung einiger maßgeblicher hydraulischer Kenngrößen, wie der maximalen Schlitzgeschwindigkeit oder der theoretischen Energiedissipation bzw. Leistungsdichte. Unterschiedliche oder auch innerhalb einer Anlage wechselnde Strömungsmuster, wie sie in der Literatur beschrieben (z.B. *Wu et al.*, 1999; *Wang et al.*, 2010) aber auch an bestehenden Anlagen beobachtet werden

(IWG, 2013), sind bislang für die praktische Anwendung nicht ausreichend untersucht. Eine eingehende Betrachtung der Strömungscharakteristik und ihrer Einflussgrößen ist jedoch sinnvoll, um hydraulisch basierte Unsicherheiten bereits in der Planungsphase ausschließen zu können.

Um zu analysieren, welchen Beitrag numerische Strömungsmodelle hierbei leisten können, werden am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in Kooperation mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) umfangreiche Studien durchgeführt. Insbesondere zur Untersuchung möglicher Ursachen unterschiedlicher Strömungsmuster in Schlitzpässen erfolgte bislang ein ausgedehntes Variantenstudium, u.a. am Beispiel der Geometrie der vom Ingenieurbüro Dr. Gebler (Walzbachtal) im Auftrag der Regionalstelle Wasserwirtschaft Koblenz (SGD Nord, Rh.-Pf.) entsprechend dem aktuellen Stand der Technik dimensionierten FAA Koblenz (Mosel). Innerhalb dieser Anlage lassen sich teilweise in baugleichen Becken die beiden unterschiedlichen in Abbildung 1 exemplarisch dargestellten Strömungsmuster SM1 und SM2 erkennen. SM1 zeichnet sich dabei durch eine nur leicht gebogene Hauptströmung von Schlitz zu Schlitz und das Ausbilden zweier ausgeprägter Rezirkulationswirbel aus. SM2 zeigt demgegenüber einen stark gebogenen Strömungspfad und ein Aufprallen der Hauptströmung auf die gegenüberliegende Außenwand. Zwischen diesen beiden Zuständen liegt ein Übergangsbereich mit tlw. instabiler bzw. schwankender Strömungscharakteristik.



Strömungsmuster 1 (SM1) Strömungsmuster 2 (SM2)

Abbildung 1: Unterschiedliche Strömungsmuster in Abhängigkeit der Beckengeometrien; oben: Modellversuch Wang *et al.* (2010), unten: 3D-Simulation

Im Rahmen der Untersuchungen wurde eine Vielzahl geometrischer Parameter variiert und damit die lokale Strömungscharakteristik nachhaltig beeinflusst. Auch der Einfluss von Umlenkbecken auf das Ausbilden der Strömungsmuster wurde in diesem Zusammenhang detailliert analysiert. Weiterführende Studien beschäftigten sich zudem mit lokalen Strömungsdetails.

2 Modellerte Bauwerksgeometrien

Im bisherigen Untersuchungsverlauf wurde zunächst ein Ausschnitt der FAA Koblenz, bestehend aus 15 regulären Becken sowie 2 Umlenkbecken, modelliert. Zusätzlich erfolgte ein Variantenstudium auf Basis einer geometrisch ähnlichen, geraden Beckenrinne mit 7 bzw. 10 aufeinander folgenden Becken. Des Weiteren wurde der in *Tarrade et al.* (2008) bzw. *Wang et al.* (2010) beschriebene Versuchsaufbau mit insgesamt 5 Becken simuliert. Zur Analyse von Strömungsdetails im Nahbereich der Schlitzeinbauten wurde zudem die Strömung durch einen großmaßstäblich im Labor aufgebauten Schlitz modelliert. Alle Berechnungen wurden unter Einsatz des Verfahrens Flow3D[®] durchgeführt.

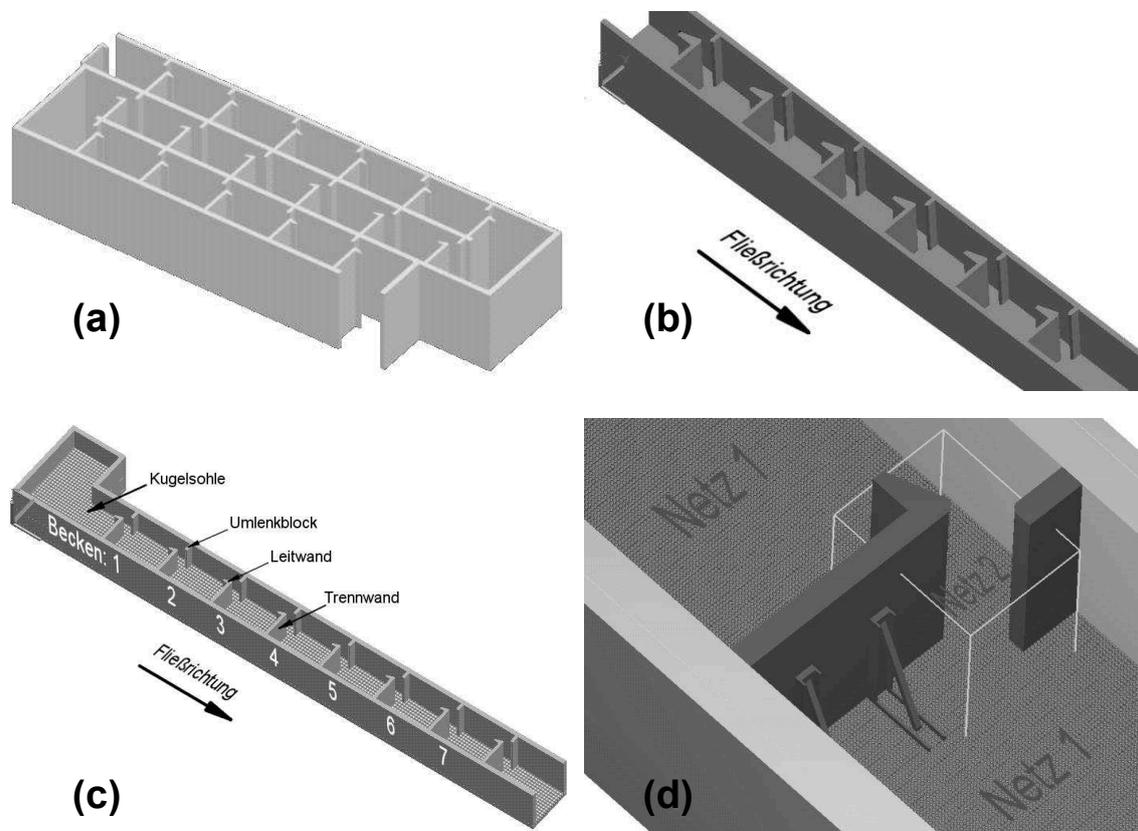


Abbildung 2: Eingesetzte Modellgeometrien: Ausschnitt FAA Koblenz (a), Modellaufbau *Wang et al.* (2010) (b), gerade Beckenrinne (c), Detailmodell Schlitz (d)

3 Bewertung der Naturähnlichkeit

3.1 Naturmessung / Beobachtung FAA Koblenz

Die Kalibrierung bzw. Validierung des Ausschnittsmodells der FAA Koblenz erfolgte zum einen über den qualitativen Vergleich mit Naturbeobachtungen, anhand derer die unterschiedlichen Strömungsmuster identifiziert wurden. Zum anderen standen detaillierte Strömungsinformationen aus einer von der BAW im November 2012 durchgeführten Messkampagne (*Knapp, 2012*) zur Verfügung. Sowohl die beobachteten Strömungsphänomene als auch die gemessenen Fließgeschwindigkeiten (vgl. exemplarische Abbildung 3) konnten dabei zufriedenstellend nachgebildet werden.

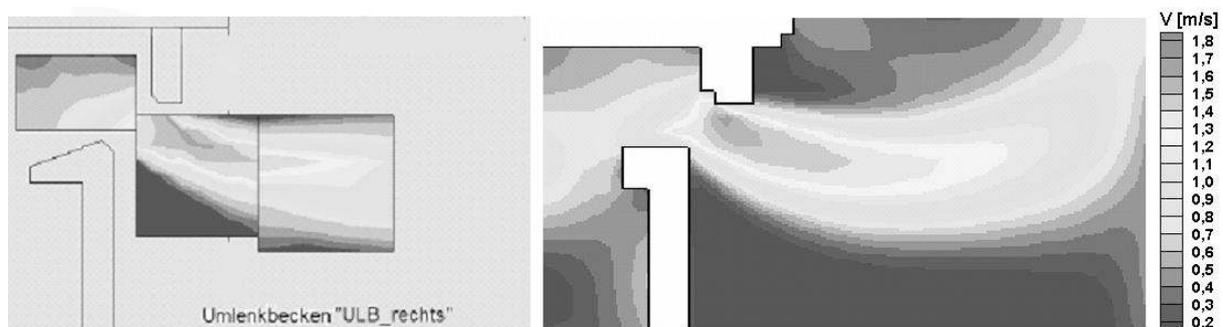


Abbildung 3: Vergleich bei der Naturmessung erfasster Fließgeschwindigkeiten im Schlitzbereich (links) mit den Berechnungsergebnissen (rechts) in einer Ebene ca. 50 cm unter der Wasseroberfläche

3.2 Vergleich mit Literaturwerten

Die in der Publikation von *Wang et al. (2010)* ausführlich dokumentierten Strömungsmuster konnten ebenfalls qualitativ sehr gut nachgebildet werden. Lediglich im Übergangsbereich der beiden Strömungsmuster traten tlw. Unterschiede auf, die jedoch auch auf unterschiedliche Interpretationen bei der Klassifizierung des Übergangsbereichs zurückzuführen sein können. Entsprechende Vergleiche können den Darstellungen in den Abbildungen 1 sowie 6 entnommen werden.

3.3 Geschwindigkeitsmessung im Wasserbaulaboratorium

Zur detaillierten Analyse wandnaher Strömungseffekte im Schlitzbereich wurde ein großmaßstäbliches Labormodell mit entsprechenden numerischen Berechnungen verglichen. Auch hier wurde die Strömung zunächst qualitativ validiert. Abbildung 4 zeigt exemplarisch einen Vergleich der stark verformten Wasserspiegeloberfläche bei der Anströmung des Schlitzes, welche wiederum sehr gut nachgebildet werden konnte.



Abbildung 4: Der Absink an der Leitwand wird naturgetreu simuliert; links: Simulationsergebnis, rechts: Labormodell

Im weiteren Verlauf durchgeführte, quantitative Detailvergleiche bezogen sich u.a. auf lokale Geschwindigkeitsspitzen, welche direkt an den Leiteinrichtungen auftreten. Hier konnte durch umfangreiche Messungen nachgewiesen werden, dass die zunächst nur im numerischen Modell beobachteten Effekte auch in der Natur in vergleichbarer Größenordnung zu erwarten sind. Abbildung 5 zeigt einen Vergleich von Berechnungsergebnissen bei unterschiedlicher Modelldiskretisierung mit LDA-Geschwindigkeitsmessungen. Die Abweichungen zwischen den im physikalischen Modell gemessenen maximalen Geschwindigkeiten und denen des fein diskretisierten numerischen Modells liegen bei max. ca. 10 %. Besonders erwähnenswert ist auch die Tatsache, dass die lokalen Effekte schon bei einer relativ groben Diskretisierung vom Modell erfasst werden. Ihre Wirkung auf das Umfeld wird somit, wenngleich abstrahiert, auch bereits bei eher grober Geometrieabbildung berücksichtigt, so dass in Abhängigkeit der jeweiligen Fragestellung die Prognosegüte derartiger Modelle u.U. durchaus ausreichend sein kann.

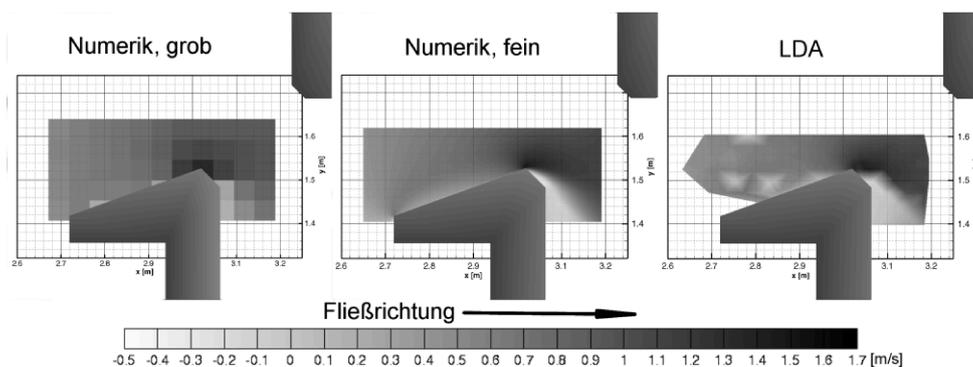


Abbildung 5: Vergleich von Simulationsergebnissen mit grober (links) und feiner (Mitte) Diskretisierung sowie LDA-Geschwindigkeitsmessung (rechts) in einer mittleren Wassertiefe

4 Variantenstudium

4.1 Einfluss geometrischer Unregelmäßigkeiten

Wesentliches Ziel der Untersuchung des Ausschnitts der FAA Koblenz war es, die zwei unterschiedlichen innerhalb der FAA auftretenden Strömungsmuster nachzubilden sowie den Einfluss geometrischer Unregelmäßigkeiten innerhalb der FAA (z.B. Umlenkungen, lokale Einbauten) zu analysieren. Vor dem Hintergrund der teilweise unsicheren Randbedingungen (Anlagendurchfluss, Unterwasserstand, Sohlgeometrie) erfolgte in Anlehnung an die Naturmessung (vgl. 3.1) zunächst eine umfassende Sensitivitätsstudie in Bezug auf die maßgebenden physikalischen und numerischen (Modell-)Parameter. Anschließend wurden diverse geometrische Einbauten (Störkörper) integriert, wobei die Strömung jeweils innerhalb einzelner Becken deutlich umgelenkt wurde. Über dieses Variantenstudium konnte jedoch kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Gestaltung der Umlenkbecken bzw. der lokalen Störkörper und den sich in der Gesamtanlage einstellenden Strömungsmustern identifiziert werden. Es wurde vielmehr festgestellt, dass die spezifischen geometrischen Abmessungen der Beckenkaskade unterschiedliche Strömungsmuster zulassen, die theoretisch in jedem der Becken auftreten können.

4.2 Variation von Gefälle, Beckenbreite und -länge

Die Betrachtung der aktuell durchgeführten Untersuchungen sowie der einschlägigen Literatur (z.B. *Wu et al.*, 1999; *Tarrade et al.*, 2008; *Wang et al.*, 2010) zeigt einen maßgeblichen Einfluss des Gefälles sowie der Beckenbreiten und -längen (B bzw. L) auf das Ausbilden des einen oder anderen Strömungsmusters. Die weiterführende Modellstudie konzentrierte sich daher auf die Variation der geometrischen Abmessungen der Beckenkaskade. Dabei wurden zunächst Berechnungen auf Basis der Geometrie nach *Wang et al.* (2010) durchgeführt und das dortige Untersuchungsspektrum insbesondere auf Bereiche mit niedrigerem Gefälle ausgeweitet. Abbildung 6 zeigt eine an die Darstellung von *Wang et al.* (2012) angelehnte Auswertung dieser Simulationen. Dabei ist das Auftreten der einzelnen Strömungsmuster in Abhängigkeit der Beckenbreite B und der Schlitzbreite S sowie des Gefälles aufgetragen. Daraus erkennt man - neben der guten Prognosefähigkeit des numerischen Modells - ein verstärktes Auftreten des SM1 mit eher geradliniger Beckendurchströmung bei zunehmender Beckenbreite und bei abnehmendem Gefälle.

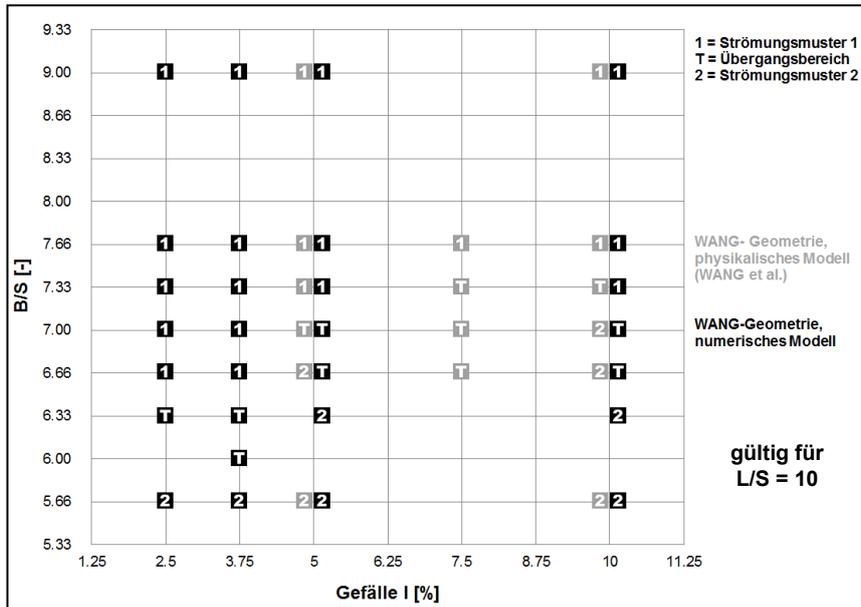


Abbildung 6: Ausbildung unterschiedlicher Strömungsmuster im Abhängigkeit von Beckenbreite und Gefälle; Darstellung in Anlehnung an Wang et al. (2010)

Um eine Vergleichbarkeit mit den Berechnungen auf Basis der Geometrie der FAA Koblenz zu ermöglichen, ist eine Anpassung dieser bisher gängigen Darstellungsform in Abhängigkeit von B/S und dem Gefälle erforderlich, da diese jeweils nur für ein festes L/S-Verhältnis gültig ist. In Abbildung 7 sind deshalb die beobachteten Strömungsmuster in Abhängigkeit des Verhältnisses L/B sowie des Gefälles aufgetragen. Dabei wurden alle Ergebnisse maßstäblich auf eine einheitliche Schlitzbreite S skaliert.

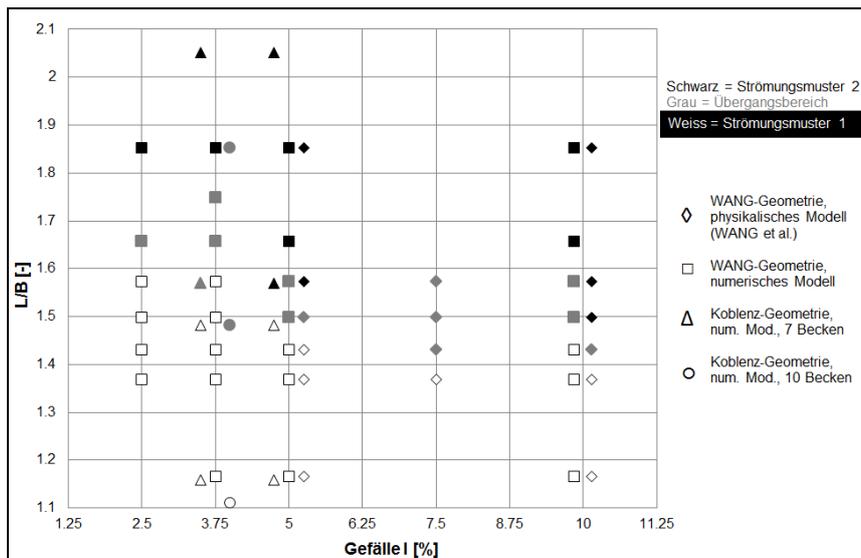


Abbildung 7: Ausbildung unterschiedlicher Strömungsmuster im Abhängigkeit von Beckenlänge- und -breite sowie Gefälle

Man erkennt, dass sich in kurzen Becken SM1 und in langgezogenen Becken SM2 einstellen wird. Zudem erkennt man auch auf Basis dieser Darstellung einen Trend zu SM 1 mit abnehmendem Gefälle. Im Rahmen weiterführender Untersuchungen soll nun analysiert werden, ob dieser Trend bei weiter sinkendem Gefälle anhält oder ob sich die instabilen Strömungseffekte verstärken.

4.3 Auswirkungen eines Einstaus

FAA werden bei erhöhten Unterwasserständen i.d.R. zumindest teilweise eingestaut. Auf Basis der Beckengeometrie der FAA Koblenz wurde untersucht, ob Rückstaueffekte zu einer signifikanten Veränderung der generellen Strömungssituation führen können. Dazu wurden Simulationen der Rinne aus 10 Becken (vgl. Abbildung 2) mit Einstautiefen von 2, 3 und 4m anstatt der Normalabflusstiefe von ca. 1,20m als unterer Randbedingung durchgeführt. Der Maximalinstau entspricht dabei näherungsweise dem höchsten bei der Bemessung zu berücksichtigenden Unterwasserstand.

Ein rückstaubedingtes Umschlagen vom einen zum anderen Strömungsmuster konnte dabei in keiner Simulation beobachtet werden. Wie in den zuvor vorgestellten Berechnungen kam hier zunächst eine statistische Turbulenzmodellierung zum Einsatz. In Ergänzung dazu wurden jedoch auch Berechnungen mittels Grobstruktursimulation (LES) zur Analyse eventueller instationärer Effekte durchgeführt. Dabei konnten tendenziell instabilere bzw. etwas schwankende Strömungspfade quantifiziert werden, was die Naturähnlichkeit der Modellierung zusätzlich erhöhte (vgl. exemplarische Darstellung in Abbildung 8). Die prinzipielle Aussage bzgl. der Persistenz der Strömungsmuster im Rückstaufall wurde jedoch auch durch diese Simulationen bestätigt. Der dabei beobachtete Mehrwert der LES hinsichtlich der Prognosefähigkeit der zu erwartenden Strömungscharakteristik deckt sich mit Erfahrungen ähnlicher Analysen zur FAA Geesthacht (*Oberle et al., 2012*).

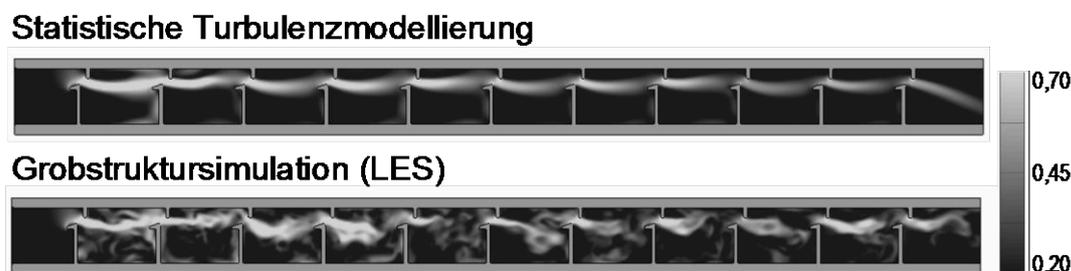


Abbildung 8: Vergleich von nahezuh stationärem Berechnungsergebnis bei statistischer Turbulenzmodellierung (oben) und exemplarischem Zeitpunkt der instationären LES (unten) anhand eines Geschwindigkeitsschnitts ca. 1 m unter der Wasseroberfläche bei einem unterstromigen Einstau von 4 m Höhe

5 Fazit und Ausblick

Zur Analyse der Strömungscharakteristik in Schlitzpässen wurden umfangreiche numerische Untersuchungen durchgeführt. Die dazu eingesetzten dreidimensionalen numerischen Modelle wurden anhand von Natur- und Labormessungen validiert. Dabei konnten alle wesentlichen Beobachtungen mit ausreichender Genauigkeit nachgebildet werden. Insbesondere konnte auch das Auftreten der beiden charakteristischen Strömungsmuster naturgetreu simuliert werden. Einzelne Strömungsdetails wurden zusätzlich mittels hoch aufgelöster Geschwindigkeitsmessungen in einem großmaßstäblichen physikalischen Labormodell verifiziert. Dabei wurde ebenfalls eine sehr hohe Prognosesicherheit beobachtet, welche letztlich die notwendige Basis für die nachfolgenden Variantenuntersuchungen darstellte.

Diese bestätigten den maßgeblichen Einfluss der Dimensionierungsgrößen Beckenbreite und -länge sowie des Gefälles auf das Ausbilden der unterschiedlichen Strömungsmuster. Zudem lieferten sie wesentliche neue Erkenntnisse bzgl. des Strömungsverhaltens bei geringem Gefälle sowie im Rückstaufall.

Im Rahmen der Fortführung der Forschungsarbeiten sind nun verstärkt Untersuchungen zur Betrachtung dreidimensionaler und instationärer Strömungseffekte sowie des sensiblen Übergangsbereichs von SM1 zu SM2 geplant. Darüber hinaus sollen die Auswirkungen der einzelnen Strömungsmuster auf die Leistungsfähigkeit einer Anlage bzw. die im Nachlauf der Schlitzte auftretenden Maximalgeschwindigkeiten im Wanderkorridor der Fische detailliert mittels numerischer Modellierung und vergleichender Laboruntersuchungen analysiert werden.

Unabhängig von der hydraulisch-technischen Seite ist allerdings auch die abschließende Bewertung der unterschiedlichen Strömungsmuster unter fischökologischen Aspekten notwendig, um entsprechende Planungssicherheit zu schaffen. In diesem Zusammenhang ist in Kooperation mit Partnern aus dem Bereich der Fischökologie die Durchführung geeigneter ethohydraulischer Verhaltens-tests mit lebenden Fischen am Karlsruher Institut für Technologie geplant.

6 Literatur

- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2010): Entwurf Merkblatt DWA-M 509, Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung, DWA Hennef
- Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (2013): Analysen zur Strömungscharakteristik in Schlitzpässen auf Basis 3D-numerischer Strömungssimulation am Beispiel der FAA Koblenz, Bericht des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruhe (unveröff.)
- Knapp, F. (2012): 3D-numerische Modellierung von Strömungsmustern im Einflussbereich von Wendebetten einer Fischaufstiegsanlage auf der Grundlage eines Naturversuchs, Diplomarbeit am Karlsruher Institut für Technologie
- Oberle, P., Musall, M., Riesterer, J., Nestmann, F. (2012): Numerische Modelluntersuchungen im Rahmen der Planung der Fischaufstiegsanlage Geesthacht, WasserWirtschaft 4/2012, S. 28-33
- Schmitz, C. (2013): Analysen zur Strömungscharakteristik in technischen Fischaufstiegsanlagen mittels numerischer und physikalischer Modellierung, Diplomarbeit am Karlsruher Institut für Technologie
- Tarrade, L., Texier, A., David, L., Larinier, M. (2008): Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways, Hydrobiologia, Jul2008, Vol. 609 Issue 1, p177-188
- Wang, R.W., 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
- Wu, S., Rajaratnam, N., and Katopodis, C. (1999): Structure of Flow in Vertical Slot Fishway, J. Hydraul. Eng., 125(4), p351–360.

Autoren:

Dr.-Ing. Mark Musall
 Dr.-Ing. Peter Oberle
 Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann

Dr.-Ing. Martin Henning
 Dr. sc. techn. Roman Weichert

Institut für Wasser und
 Gewässerentwicklung
 Karlsruher Institut für Technologie
 Kaiserstraße 12
 76131 Karlsruhe

Bundesanstalt für Wasserbau
 Abteilung Wasserbau im Binnenbereich
 Flusssysteme I (W1) Kußmaulstraße 17
 76187 Karlsruhe

Tel.: +49 721 608 4 3163
 Fax: +49 721 66 16 34
 E-Mail: musall@kit.edu

Tel.: +49 721 9726 3330
 Fax: +49 721 9726 4540
 E-Mail: martin.henning@baw.de