

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Weichert, Roman; Henning, Martin

Hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen. FuE-Abschlussbericht B3953.01.04.70002

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107275>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2020): Hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen. FuE-Abschlussbericht B3953.01.04.70002. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

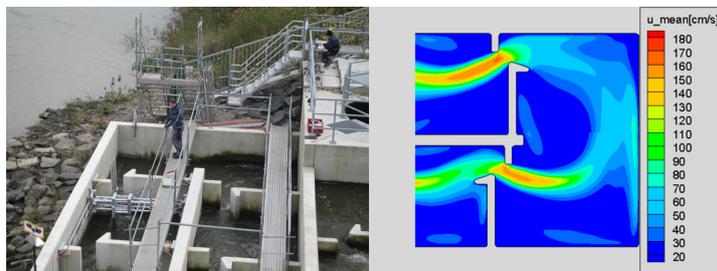
Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

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.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

FuE-Abschlussbericht
Hydraulische Dimensionierung von
Fischaufstiegsanlagen
B3953.01.04.70002



Juni 2020

FuE-Abschlussbericht
Hydraulische Dimensionierung von
Fischaufstiegsanlagen

Beginn des Vorhabens: November 2010

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3953.01.04.70002

Aufgestellt von:	Abteilung:	Wasserbau im Binnenbereich
	Referat:	W1
	Projektleiter:	Roman Weichert
	Bearbeiter:	Martin Henning

Karlsruhe, Juni 2020

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Zusammenfassung

Die gute Passierbarkeit von Fischaufstiegsanlagen (FAA) ist für deren Funktion von entscheidender Bedeutung. Die hydraulischen Vorgänge in unterschiedlichen Bautypen oder auch in verschiedenen Anlagen des gleichen Bautyps unterscheiden sich dabei mitunter deutlich. Ein allgemeines Verständnis der Strömungsprozesse in FAA bzw. deren Wirkung auf verschiedene Fischarten bestand zu Projektbeginn nicht. Zudem wurde der Erfahrungsschatz bestehender Regelwerte zu meist an relativ kleinen Gewässern oder aus internationalen Untersuchungen zusammengetragen, die für die Bedingungen an großen Bundeswasserstraßen und auf einheimische Fischarten nicht uneingeschränkt übertragen werden können. Das Forschungsprojekt „Hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen“ wurde im Jahr 2010 begonnen, um einige der vorhandenen Wissenslücken zu schließen.

Ziel der Untersuchungen war zunächst der Erkenntnisgewinn bezüglich des Einflusses geometrischer Randbedingungen auf die Hydraulik von Fischaufstiegsanlagen (FAA) in Schlitzpassbauweise und die Entwicklung von Verfahren zur Bewertung der Hydraulik nach fischökologischen Kriterien. Im Projektverlauf wurde der Umfang der Untersuchungen auf Rundbeckenfischaufstiegsanlagen (RBFAA) und Raugerinne erweitert, da diese ebenfalls in den Planungen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) relevant waren bzw. sind.

In dem Projekt bestand eine Forschungsk Kooperation mit dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD) der TU Dresden sowie dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der TU Braunschweig. Im Rahmen dieser Kooperationen kamen gegenständliche und numerische Strömungsmodelle zum Einsatz. Zudem wurden einige Feldstudien durchgeführt. Es wurden zahlreiche studentische Arbeiten angefertigt und eine Dissertation abgeschlossen.

Die Ergebnisse erlauben eine Beschreibung der Hydraulik von FAA und die Beurteilung der Strömung verschiedener Bautypen. Das Spektrum der Untersuchungen reicht von der Bestimmung zeitlicher Mittelwerte zur Abgrenzung von Strömungsmustern bis zur Beschreibung kleinskaliger, zeitlich hochaufgelöster Strömungsstrukturen, die ein Verständnis der Fischbewegung in Abhängigkeit der Hydraulik ermöglichen sollen. Die Auswirkung maßgeblicher geometrischer Randbedingungen auf Strömungsmuster von Schlitzpässen konnte nachgewiesen werden. Ergebnisse wurden auch für die Entwicklung von Modellverfahren und für Verfahren zur Parametrisierung der Strömung gewonnen. Die Projektergebnisse werden in der WSV-Beratung genutzt und fließen in die Erstellung und Fortschreibung von Bemessungsempfehlungen ein.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Projektübersicht	1
2	Kooperation mit dem IWG des KIT	2
2.1	Forschungsinhalt	2
2.2	Einfluss der geometrischen Randbedingungen auf die Strömung	3
2.3	Zeitabhängige Strömungsprozesse	11
2.4	Weiterentwicklung der HN-Modellierung	12
3	Rundbeckenfischaufstiegsanlagen	14
4	Raugerinne	17
5	Zusammenfassung	19
6	Literatur	21

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Schlitzpass-Versuchsstand mit sechs Becken am IWG (Belz et al. 2013)	3
Bild 2: Ausbildung von Strömungsmuster 1 (links) und Strömungsmuster 2; Langzeitbelichtung der Strömung mit Talkum-Gemisch aus Modellversuchen am IWG; Fließpfeile kennzeichnen den Verlauf der mittleren Hauptströmung, verändert nach Höger et al. (2014)	4
Bild 3: Hydraulische Vermessung eines Wendebeckens der FAA Koblenz (links oben) und das Ergebnis der numerischen Kalibrierung (links unten), Knapp (2013); gleichzeitiges Auftreten beider Strömungsmuster in zwei Strängen der FAA Koblenz (Quelle BfG)	5
Bild 4: Fließgeschwindigkeiten der FAA Koblenz aus HN-Simulation (IWG 2013)	6
Bild 5: Wasserspiegelmesssonden (rote Punkte) bei der Vermessung der FAA Koblenz	7
Bild 6: Schlitzelemente in modularer Bauweise (links); Schlitzvarianten (rechts): a) Standardschlitz, b) Schlitz mit Strömungsführung, c) vereinfachte Leitwand, d) vereinfachte Leitwand mit Führung (Haußmann 2018)	8
Bild 7: Ergebnis der Vermessung der Strömung im Modell von Höger (s. o.) mit zwei Schlitzvarianten: links Standardschlitz mit Strömungsmuster 1; rechts vereinfachter Schlitz mit Strömungsmuster 2 (Groß 2019)	8
Bild 8: ADV-Messung im Modell mit 5 cm Halbkugeln (links, Lorch 2014); Modell mit 10 cm Halbkugeln und Schlitz (rechts)	10
Bild 9: Gegenüberstellung der vertikalen Geschwindigkeitsprofile aus der Messung ohne Schlitz (Lorch 2014, links) und einer Messung mit Schlitz 5 cm unterhalb des Schlitzes (Sokoray-Varga 2014, rechts)	10
Bild 10: Schlitzpassrinne an der BAW (links), Ergebnis der Vermessung eines instantanen Strömungsfeldes im Schlitzpassbecken aus PIV-Vermessung (Sokoray-Varga 2016)	11
Bild 11: Ergebnis einer numerischen Simulation des Schlitzbereichs (Flow3D, links) und Ergebnis einer LDA-Vermessung der gleichen Randbedingungen in der 3-Schlitz-Rinne des IWG (recht) in Schmitz (2013)	12
Bild 12: Vorgabe der Randbedingungen am Beispiel einer 3D-Modell-Rinne mit sieben Becken (IWG 2017)	13
Bild 13: H-Typ RBFAA Rothemühle/Oker: Messaufbau mit Sondenträger (links); Ergebnis der Geschwindigkeitsvermessung (IWD 2013)	14
Bild 14: C-Typ RBFAA Höxter an der Nehte (IWD 2016)	15
Bild 15: Resultierende Fließgeschwindigkeiten in Schlitzmitte aus Flügelmessung und HN-Simulation (links), Geschwindigkeitsverteilung aus 3D-HN-Simulation im Schlitz (rechts)	15
Bild 16: H-Typ RBFAA Bahnitz/Havel: Blick auf die Anlage mit Wasserstandmessung (links); vertikales Geschwindigkeitsprofil im Schlitz aus der Vermessung (WSA Brandenburg, IWD 2014)	16
Bild 17: Modellversuch am LWI: a) bei Überströmungsbeginn der Riegel, b) bei voller Überströmung (LWI 2019)	18
Bild 18: DGM einer Sohle mit Störsteinen (links), zugehörige 2D-Strukturfunktion (LWI 2019)	18

1 Projektübersicht

Das Forschungsprojekt „Hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen“ wurde im Jahr 2010 begonnen. Ziel der Untersuchungen war der Erkenntnisgewinn bezüglich der Hydraulik von Fischaufstiegsanlagen (FAA) in Schlitzpassbauweise für die Entwicklung von Bemessungsgrundsätzen unter Berücksichtigung der für Fische relevanten hydraulischen und geometrischen Kriterien. Im Projektverlauf wurde der Umfang der Untersuchungen auf Rundbeckenfischaufstiegsanlagen (RBFAA) und Raugerinne erweitert, da diese ebenfalls in der Planung der WSV relevant waren bzw. sind.

Zur Untersuchung der Hydraulik von FAA in Schlitzpassbauweise wurde 2012 eine Forschungs-kooperation mit dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des KIT abgeschlossen (Abschnitt 2). Darin standen die Betrachtung der Strömungsmuster und die Bestimmung zeitabhängiger Strömungsprozesse im Mittelpunkt, welche beide einen großen Einfluss auf die Passierbarkeit der Becken für Fische haben. Es kamen gegenständliche und numerische Strömungsmodelle zum Einsatz. Zudem wurden einige Feldstudien durchgeführt. In der Kooperation wurden zahlreiche studentische Arbeiten am IWG und der BAW und eine Dissertation angefertigt.

RBFAA werden teilweise als Alternative zu Schlitzpässen gehandelt, obwohl über die Bemessung und die Hydraulik dieser Bauweise nur ungenügend Informationen vorliegen. Um die Strömung in RBFAA näher zu untersuchen und mit der Hydraulik konventioneller Schlitzpässe zu vergleichen, hat die BAW das Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (IWD) der TU Dresden mit einer Studie beauftragt (Abschnitt 3). Diese umfasste eine Begutachtung zum Stand der Technik und die Vermessung zweier verschiedener bestehender RRBFAA. Zusätzlich wurden durch das WSA Brandenburg hydraulische Messungen an der RBFAA Bahnitz/Havel durchgeführt.

Die Strömung in Raugerinnen ist bauartbedingt heterogener und auch aufgrund der geometrischen Randbedingungen schwierig zu bestimmen bzw. vorherzusagen. Zudem haben Raugerinne-FAA gegenüber Schlitzpässen einen erhöhten Platzbedarf und kommen deswegen nicht für alle Standorte in Frage. Da jedoch Raugerinne aus fischökologischer Sicht einige Vorteile bieten, stellen sie in der aktuellen Beratungspraxis von BfG und BAW den bevorzugten Bautyp dar, selbst wenn sie wegen ihrer baulichen Besonderheiten gemessen an der Gesamtzahl der zu errichtenden FAA, weniger relevant sind. Daher wurde im vorliegenden Projekt das Leichtweiß-Institut (LWI) der TU Braunschweig mit einer Studie zur Parametrisierung der Geometrie und Hydraulik von Raugerinnen beauftragt (Abschnitt 4).

Die Ergebnisse der Teilprojekte sind im Folgenden kurz zusammengefasst, für Details sei auf die angegebenen Berichte und Veröffentlichungen verwiesen.

2 Kooperation mit dem IWG des KIT

2.1 Forschungsinhalt

Im Jahr 2012 wurde mit dem IWG des KIT ein Kooperationsvertrag geschlossen, der bis 2019 bestand. Gegenstand der Kooperation war die gegenseitige Unterstützung bei der Analyse der Hydraulik in Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise und deren Bewertung bezüglich der Passierbarkeit durch Fische. In dem Projekt wurden Wissenschaftler und Infrastruktur beider Institute eingesetzt. Die eingesetzten Methoden bestanden beiderseits aus gegenständlichen und numerischen Modellen, sowie der Entwicklung von Verfahren zur Bewertung der Hydraulik für Fische. Zudem wurden Vermessungen bestehender Anlagen in Schlitzpassbauweise vorgenommen.

Der Forschungsinhalt der Kooperation lässt sich grundsätzlich in drei verschiedene Schwerpunkte einteilen:

- 1) Einfluss unterschiedlicher geometrischer Randbedingungen auf die Strömung in den Becken
- 2) Einfluss zeitlich aufgelöster, kohärenter Strömungsstrukturen im Hinblick auf die Vorhersagbarkeit der Strömung durch Fische
- 3) Verfahrensentwicklung in der HN-Modellierung

Die Forschung des ersten Schwerpunkts orientierte sich an unmittelbaren offenen Fragen, die sich aus der Beratung der Umsetzung der ca. 250 zu errichtenden FAA an Bundeswasserstraßen ergaben. Das für den Bau von FAA in Deutschland (neben einigen Leitfäden der Bundesländer) maßgebliche Merkblatt 509 der DWA (DWA 2014) lässt einen gewissen Spielraum bei der Auslegung der Becken von Schlitzpässen. Dessen Ausschöpfung kann eine große Auswirkung auf die Strömung in den Becken haben, indem sich bspw. unterschiedliche Strömungsmuster einstellen. Diese haben wiederum vermutlich einen Einfluss auf die Passierbarkeit der Becken für Fische, weil z. B. die Maxima der Strömungsgeschwindigkeiten andere Werte annehmen können und sich die Strömung auch qualitativ verändert. Zudem verursachen verschiedene Strömungsmuster unterschiedliche hydraulische Verluste, was einen Einfluss auf den Durchfluss der FAA hat. Auch der Einfluss der Sohlrauheit auf die Strömung des Schlitzpasses war bisher strittig und wurde in dem Projekt untersucht. Es wurden Mittelwerte der Fließgeschwindigkeiten und Wasserspiegel betrachtet, weil diese dem Stand der Technik bei der Beschreibung der Strömung bzw. der Bemessung von FAA entsprechen (z. B. DWA 2014) und weil sie modelltechnisch gut zu erfassen sind. Zudem fehlen anerkannte Verfahren zur weitergehenden Beschreibung der Strömungsprozesse bzw. zur Berücksichtigung zeitlich aufgelöster Strömungsstrukturen.

In Realität sind Strömungsfelder aus Sicht des Fisches nicht durch zeitliche Mittelwerte bestimmt, sondern durch die auftretenden starken zeitlichen Schwankungen in kohärenten Strömungsstrukturen. Daher wurden im zweiten Forschungsschwerpunkt Verfahren zur Vermessung, Parametrisierung und Vorhersage dieser Strömungsstrukturen in den für die Sensorik der Fische relevanten Skalen entwickelt (Abschnitt 2.3).

Der dritte Schwerpunkt bestand in der Weiterentwicklung hydrodynamisch-numerischer (HN) Modellverfahren. Darin wurden die Modellergebnisse beider Institute genutzt. Da am IWG mit Flow3D und an der BAW mit OpenFoam zwei unterschiedliche Softwarepakete zum Einsatz kamen, konnten einerseits die HN-Modelle mit den Daten gegenständlicher Modelle kalibriert werden, andererseits konnten durch den Vergleich der Modellverfahren und Sensitivitätsanalysen wichtige Erkenntnisse über die Anwendung von HN-Modellen für die behandelten Fragestellungen gewonnen werden.

Die Ergebnisse der Kooperation werden getrennt nach den hier beschriebenen drei Forschungsschwerpunkten im Folgenden kurz zusammengefasst. Für weitergehende Informationen sei auf die angegebenen Veröffentlichungen verwiesen. Die praxisrelevanten Ergebnisse der Kooperation mit dem IWG werden in der BAW Mitteilungsserie veröffentlicht (BAW 2020).

2.2 Einfluss der geometrischen Randbedingungen auf die Strömung

In Schlitzpässen können zwei verschiedene Strömungsmuster auftreten, die unterschiedliche Eigenschaften haben und somit einen vermuteten Einfluss auf die Passierbarkeit der Becken (DWA 2014) besitzen. Unter Biologen herrscht bis heute keine Übereinstimmung darin, welches Strömungsmuster für Fische zu bevorzugen ist bzw. spielen dabei auch die Eigenschaften des individuellen Fisches eine Rolle.

Die Gefälleverhältnisse von FAA in Schlitzpassbauweise an Bundeswasserstraßen liegen in einem Bereich, an dem sich potentiell beide Strömungsmuster einstellen können bzw. ein Übergangsbereich zwischen beiden Mustern auftreten kann. Um bestimmen zu können, unter welchen Bedingungen welches Strömungsmuster auftritt, wurden am IWG systematische Untersuchungen an Geometrievariationen auf der Grundlage von M-509 (DWA 2010, 2014) durchgeführt.

In einer kippbaren Rinne (Bild 1) mit sechs Becken wurden die Strömungsmuster anhand von Langzeitbelichtungen der Becken dokumentiert (Belz et al. 2013, Höger et al. 2014). Um die Strömung sichtbar zu machen, wurde dabei ein Talkum-Gemisch verwendet (Bild 2). Zudem wurde die Hydraulik mittels umfangreicher ADV (Acoustic Doppler Velocimetry)-Messungen ermittelt.



Bild 1: Schlitzpass-Versuchsstand mit sechs Becken am IWG (Belz et al. 2013)

Die Ergebnisse bestätigen, dass, neben den Gefälleverhältnissen, der Winkel zwischen Trennwand und Umlenkblock und das Breiten-Längen-Verhältnis der Becken ausschlaggebend für die Ausbildung des Strömungsmusters sind. Durch die Variation dieser Parameter im Versuch wurde eine umfangreiche Datenlage geschaffen, auf deren Basis Empfehlungen zur Gestaltung der Becken gemacht werden können, damit sich das gewünschte Strömungsmuster einstellt (Höger et al. 2020a).

Die Versuchsdaten wurden genutzt, um die nach Strömungsmuster unterschiedlichen maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in den Becken zu bestimmen (Höger et al. 2020b), welche für die Beurteilung der Passierbarkeit der Becken für Fische herangezogen werden können. Dabei zeigte sich, dass die Strömungsgeschwindigkeiten bei Strömungsmuster 1 grundsätzlich höher sind. Jedoch sind die maximalen Geschwindigkeiten in den Schlitzen vergleichbar, so dass vermutet werden kann, dass für die Passage des Schlitzes selbst das Strömungsmuster von untergeordneter Bedeutung ist. Die Untersuchungen zur Ausbildung und Analyse der Strömungsmuster sind in IWG (2020) zusammengefasst.

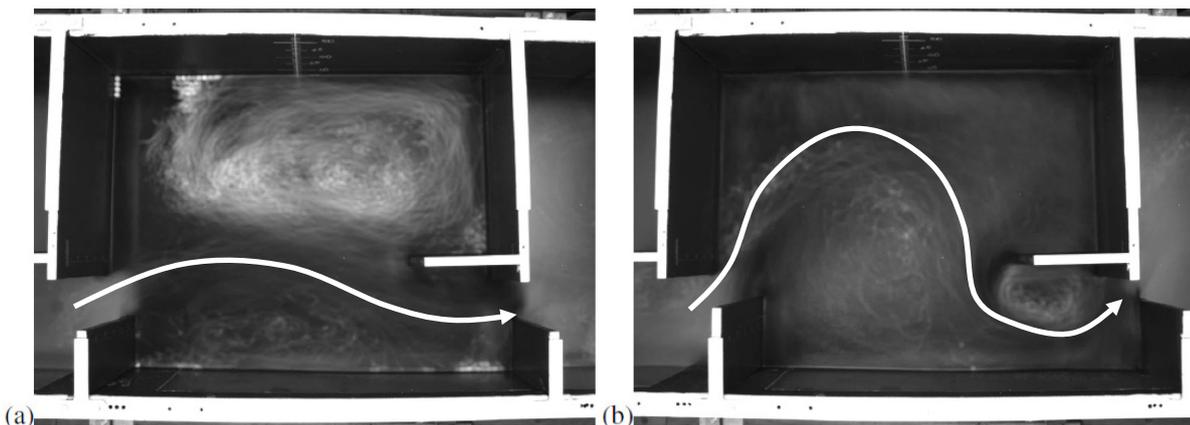


Bild 2: Ausbildung von Strömungsmuster 1 (links) und Strömungsmuster 2; Langzeitbelichtung der Strömung mit Talkum-Gemisch aus Modellversuchen am IWG; Fließpfeile kennzeichnen den Verlauf der mittleren Hauptströmung, verändert nach Höger et al. (2014)

In Modelluntersuchungen der BAW (z. B. Sokoray-Varga 2013, Abschnitt 2.3) wurde außerdem festgestellt, dass die Anströmung des obersten Schlitzes das Strömungsmuster in der folgenden Beckenkaskade bestimmen kann. Tatsächlich wurden auch im Feld, bei – im Rahmen der Bauto-leranz – identischer Ausgestaltung der Becken, beide Strömungsmuster beobachtet. In den verschiedenen Strängen der FAA Koblenz können sich bspw. zum selben Zeitpunkt beide Strömungsmuster einstellen (Bild 3). Als Ursache wurde die Anordnung der Schlitze in den Wendebecken zwischen den Strängen der Anlage vermutet, die eine andere Anströmung der Stränge verursachen. Darin ist entscheidend, ob der Schlitz am Anfang des Stranges an der Außenwand (wie in Bild 3, links) oder der Innenwand angeordnet ist.

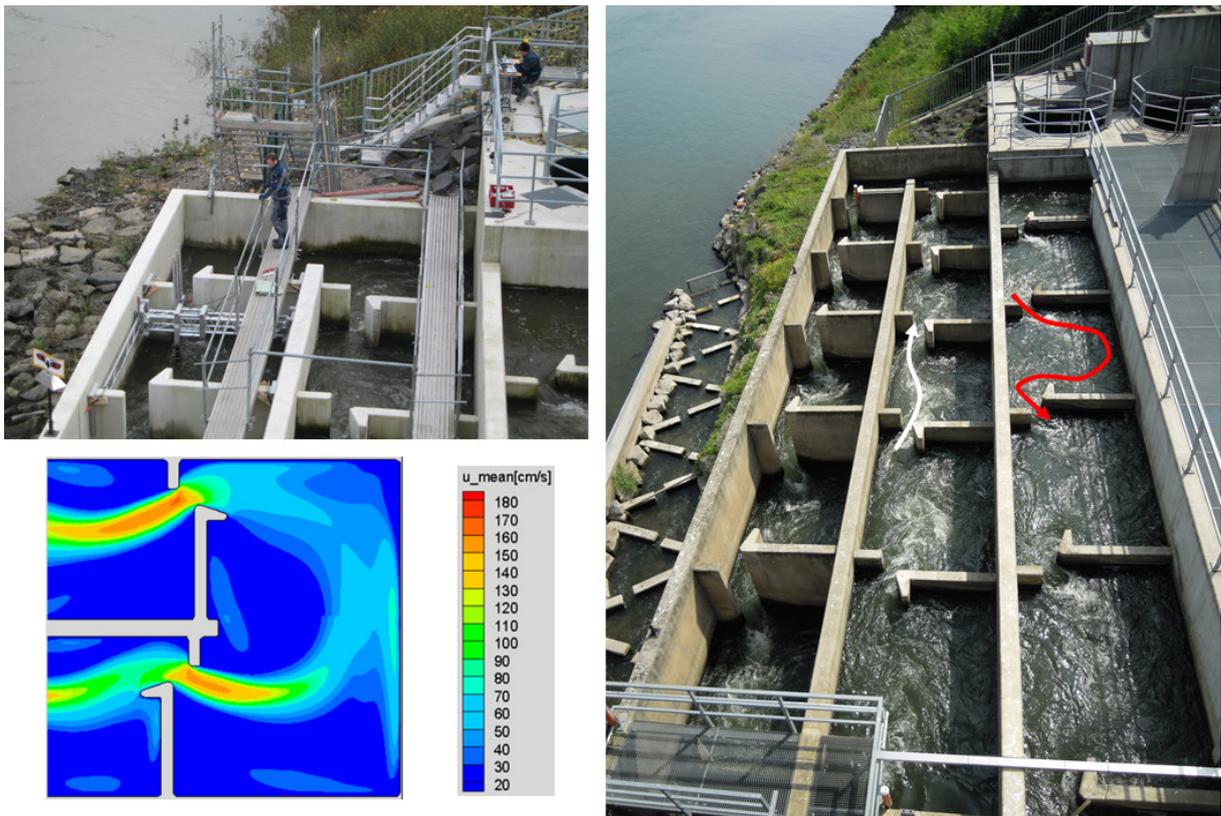


Bild 3: Hydraulische Vermessung eines Wendebeckens der FAA Koblenz (links oben) und das Ergebnis der numerischen Kalibrierung (links unten), Knapp (2013); gleichzeitiges Auftreten beider Strömungsmuster in zwei Strängen der FAA Koblenz (Quelle BfG)

Um den Einfluss der Wendebecken auf die Strömungsmuster in der FAA Koblenz festzustellen, wurden numerische Modelluntersuchungen durchgeführt. Zunächst wurde eine Diplomarbeit an der BAW angefertigt, in der ein Wendebecken der FAA Koblenz vermessen wurde (Knapp 2013, Bild 3). Die Ergebnisse dienen der Bestimmung der Strömung in dem Becken sowie der Kalibrierung und Validierung eines Teilmodells der FAA Koblenz mit OpenFOAM.

Am IWG wurde mit den Ergebnissen der Vermessung der FAA Koblenz (Knapp 2013) ein Flow3D HN-Modell eines größeren Ausschnitts der FAA Koblenz aufgebaut. Es umfasste einen Bereich von drei Strängen, die durch zwei Wendebecken verbunden sind (Bild 4).

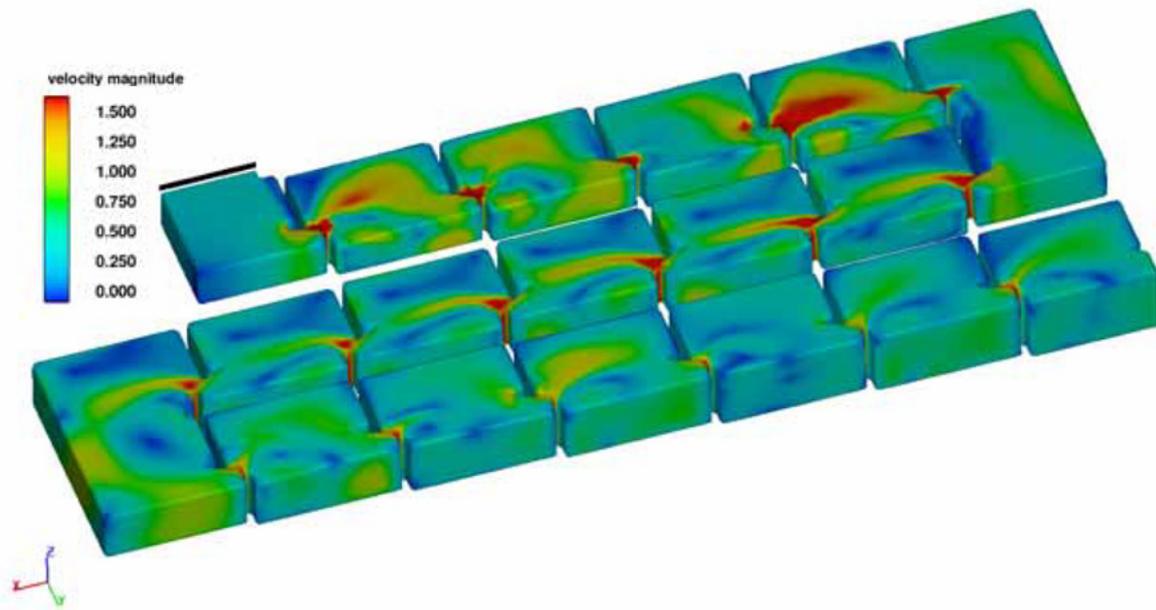


Bild 4: Fließgeschwindigkeiten der FAA Koblenz aus HN-Simulation (IWG 2013)

In dem Modell wurden umfangreiche Sensitivitätsstudien durchgeführt, wodurch wichtige Erkenntnisse bezüglich der Modelldiskretisierung und der Turbulenz- und Rauheitsmodellierung gewonnen wurden (s. Abschnitt 2.4). In Geometrievariationen wurde der Einfluss der Wendebecken auf die Strömungsmuster untersucht. Zwar treten die zwei Strömungsmuster im Ansatz in den verschiedenen Strängen auf. Durch Variation der Wendebecken ließen sich jedoch keine anderen Strömungsmuster erzwingen. Somit lässt das Ergebnis keinen eindeutigen Rückschluss auf die Wendebecken als Grund für die Entwicklung verschiedener Strömungsmuster zu. Die Untersuchung ist in IWG (2013, 2014) zusammengefasst.

Um die Auswirkung der Strömungsmuster auf die Hydraulik in den Becken der FAA Koblenz zu untersuchen, wurden im Juli 2015 und im März 2016 durch das Referat W4 der BAW die maßgeblichen Fallhöhen zwischen den Becken bestimmt. Dazu wurden die Becken von zwei parallel verlaufenden Strängen mit Messpegeln ausgestattet (Bild 5). Des Weiteren wurde die Firma Aquavision (Utrecht, NL) beauftragt, parallel zu der Vermessung der Fallhöhen an verschiedenen Orten Durchflussmessungen durchzuführen (Aquavision 2015, Aquavision 2016). Diese dienten vor allem der Bestimmung der Durchflussaufteilung auf die drei Einstiege der FAA. Zudem wurde das ADCP-Verfahren genutzt, um die Strömungsverteilung in den Einstiegen 1 und 2 zu untersuchen. Die Messungen zeigten eine recht ungleichmäßige Verteilung der Durchflüsse auf die Einstiege. Die Einstiege wurden seither angepasst.

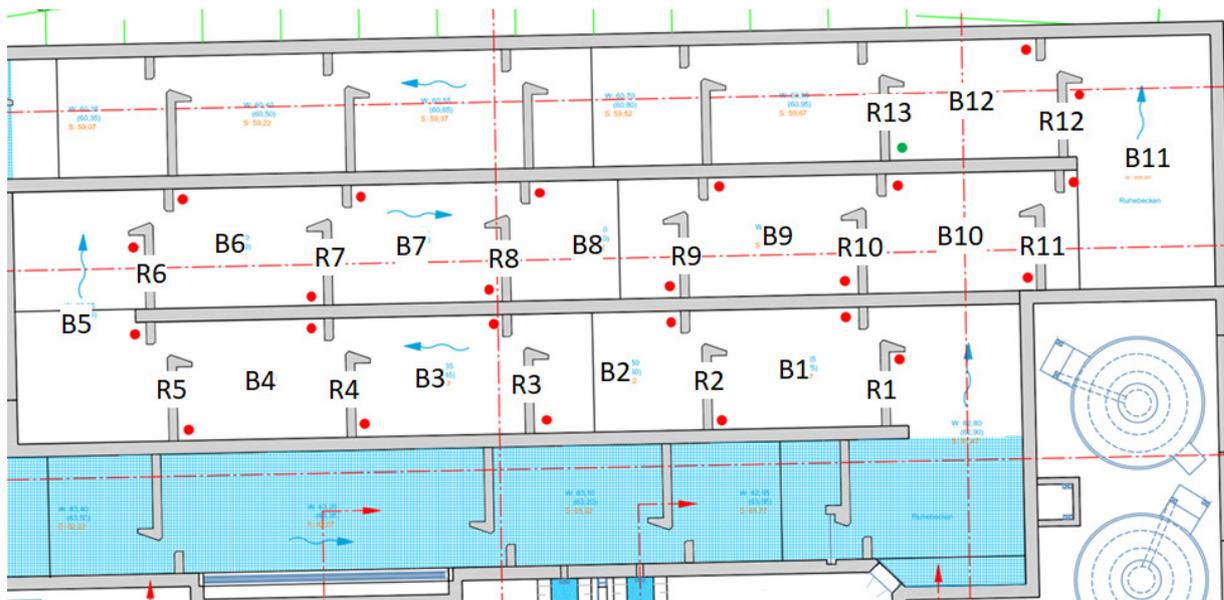


Bild 5: Wasserspiegelmesssonden (rote Punkte) bei der Vermessung der FAA Koblenz

Als Ergebnis der Vermessung der Wasserspiegel kann festgehalten werden, dass die Fallhöhen der Anlage zwischen den einzelnen Becken so heterogen verteilt sind, dass ein Einfluss der Strömungsmuster auf die Fallhöhen anhand der Vermessung der relativ kurzen Stränge nicht eindeutig festgestellt werden kann.

Die Ergebnisse liefern jedoch eine wichtige Einordnung der tatsächlich auftretenden Fallhöhen, die von den Bemessungswerten abweichen können. Sie spielen somit bei der Gesamtbeurteilung der Strömungsmuster bezüglich der Passierbarkeit der Becken kaum eine Rolle, sind aber insofern wichtig, als dass sie zeigen, dass auch bei baulich gut umgesetzten FAA die tatsächlichen Fallhöhen von den Bemessungswerten abweichen können (z. B. Henning und Weichert 2020).

Außerdem wurde festgestellt, dass die Ausgestaltung des Schlitzes, die in M-509 (DWA 2014) relativ grob gefasst ist, eine Auswirkung auf die Strömung in den Becken haben kann. Daher wurde im Rahmen einer Masterarbeit am IWG untersucht, wie Variationen des Schlitzdetails die Strömung in den Becken beeinflussen (Haußmann 2018, Bild 6). Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Einfluss der Schlitzausgestaltung auf die Ausbildung der Strömungsmuster und die hydraulischen Verluste in den Becken. Um letztere in Abhängigkeit der Schlitzdetails näher zu betrachten, war die Länge der Rinne, die zugunsten eines großen Maßstabs von 1:1,16 nur drei Schlitz hatte, nicht ausreichend. Daher wurden im Anschluss Untersuchungen in dem Modell von Höger (Bild 1) durchgeführt (Groß 2019).

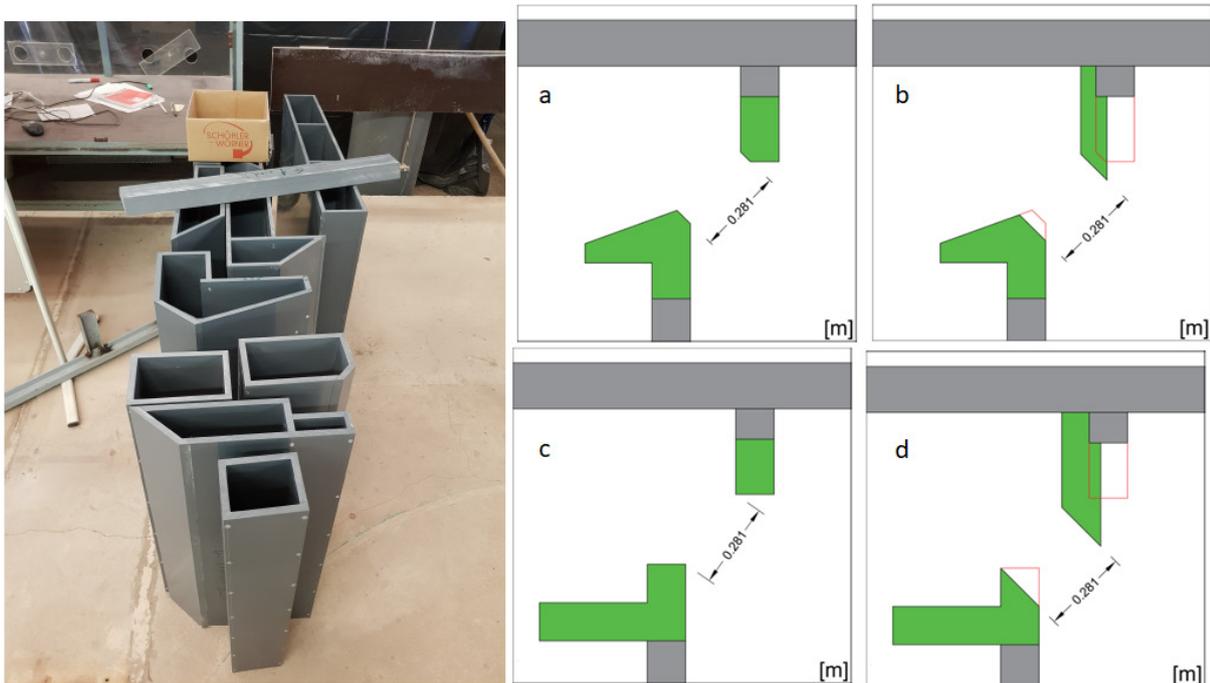


Bild 6: Schlitzelemente in modularer Bauweise (links); Schlitzvarianten (rechts): a) Standard-schlitz, b) Schlitz mit Strömungsführung, c) vereinfachte Leitwand, d) vereinfachte Leitwand mit Führung (Haußmann 2018)

Die Ergebnisse der Vermessung des Modells mittels ADV-Sonden zeigten, dass die Variante mit Standard-Schlitz einen geringeren Fließwiderstand hat und somit die Geschwindigkeiten und Durchflüsse größer sind als bei den vereinfachten Varianten. Zudem verursacht eine vereinfachte Schlitzgestaltung wegen der veränderten Anströmung infolge des anderen Umlenkblocks, im Gegensatz zu anderen untersuchten Varianten, Strömungsmuster 2 (Bild 7).

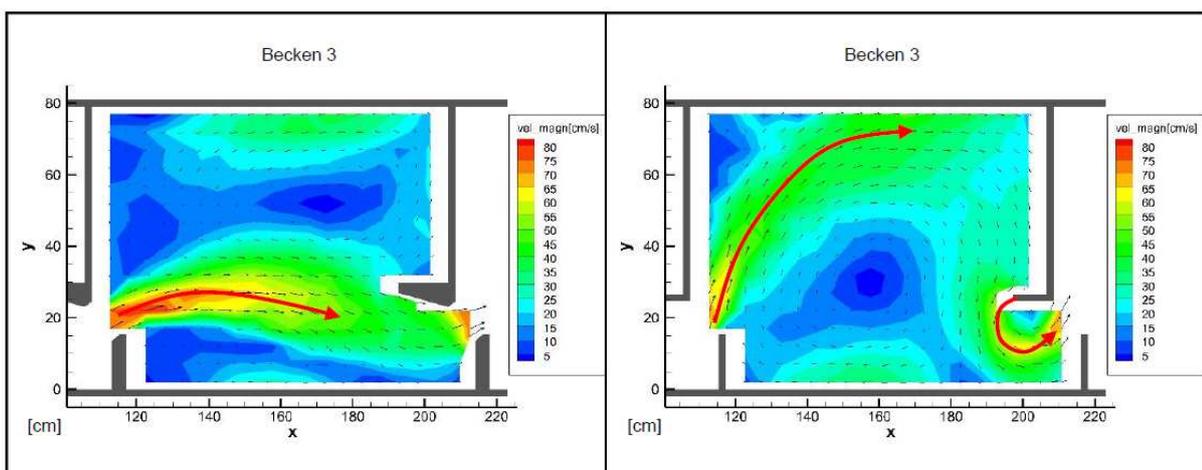


Bild 7: Ergebnis der Vermessung der Strömung im Modell von Höger (s. o.) mit zwei Schlitzvarianten: links Standardschlitz mit Strömungsmuster 1; rechts vereinfachter Schlitz mit Strömungsmuster 2 (Groß 2019)

Der in den vorliegenden Untersuchungen festgestellte Einfluss der Strömungsmuster auf die Fließgeschwindigkeiten und auf die hydraulischen Verluste der Becken wirkt sich auch auf den Durchfluss von FAA in Schlitzpassbauweise aus; jedoch weniger stark als bisher angenommen. Die umfangreiche Datenbasis der gegenständlichen Modelluntersuchungen wurde genutzt, um eine, gegenüber der gängigen Bemessungspraxis vereinfachte, allgemeingültige Beziehung zur Berechnung des Durchflusses für beide Strömungsmuster aufzustellen (Sokoray-Varga 2015, Sokoray-Varga et al. 2020). Die Vereinheitlichung ist besonders wichtig, weil für die Verhältnisse an Bundeswasserstraßen in der bisherigen Bemessung (DWA 2014) nicht definitiv gesagt werden kann, welches der Strömungsmuster sich einstellen wird.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Ausgestaltung der Schlitzpassbecken ist die Gestaltung der Sohle. Es ist allgemein anerkannt, dass FAA eine gewisse Sohlrauheit aufweisen müssen, unter anderem, um Makrozoobenthos die Möglichkeit zu bieten, zwischen den Sohlstrukturen aufzuwandern. Vielfach wird auch damit argumentiert, dass die Fließgeschwindigkeiten im Schlitz oberhalb der rauen Sohle reduziert seien, wodurch sich gerade schwachen Fischen zusätzliche Möglichkeiten des Aufstiegs böten. Tatsächlich gilt in der Gerinnehydraulik bei Normalabfluss, dass sich sohnah, gemäß eines logarithmischen Geschwindigkeitsprofil und einer rauheitsinduzierten Unterschicht, geringere Fließgeschwindigkeiten einstellen. Dieser Zusammenhang ist jedoch nicht auf die druckdominierten Abflussverhältnisse in den Schlitzten, welche die pessimale Stelle für die Passage der Becken durch Fische darstellen, übertragbar (z. B. Rajaratnam et al. 1986, Henning und Weichert 2020).

Um den Einfluss der Sohlrauheit auf die Strömung in Schlitzpässen festzustellen, wurden an der BAW Modellversuche mit idealisierten Halbkugeln durchgeführt (Lörsch 2014, Sokoray-Varga 2014, Bild 8). Zur Einordnung des Schlitzeinflusses, wurden die Versuche zunächst ohne Schlitz durchgeführt. Die Ergebnisse der ADV-Vermessung (Bild 9) zeigen den erwarteten Verlauf der vertikalen Geschwindigkeitsprofile mit einer Abnahme der Geschwindigkeiten zur Sohle. In den Messungen mit Schlitz hingegen sind die Geschwindigkeiten 5 cm unterhalb des Schlitzes über die Tiefe annähernd gleich (Bild 9). Die Gleichverteilung der Geschwindigkeiten unterhalb des Schlitzes über die Tiefe wird durch Ergebnisse aus anderen BAW-Forschungsprojekten bestätigt (B3953.01.04.70006).

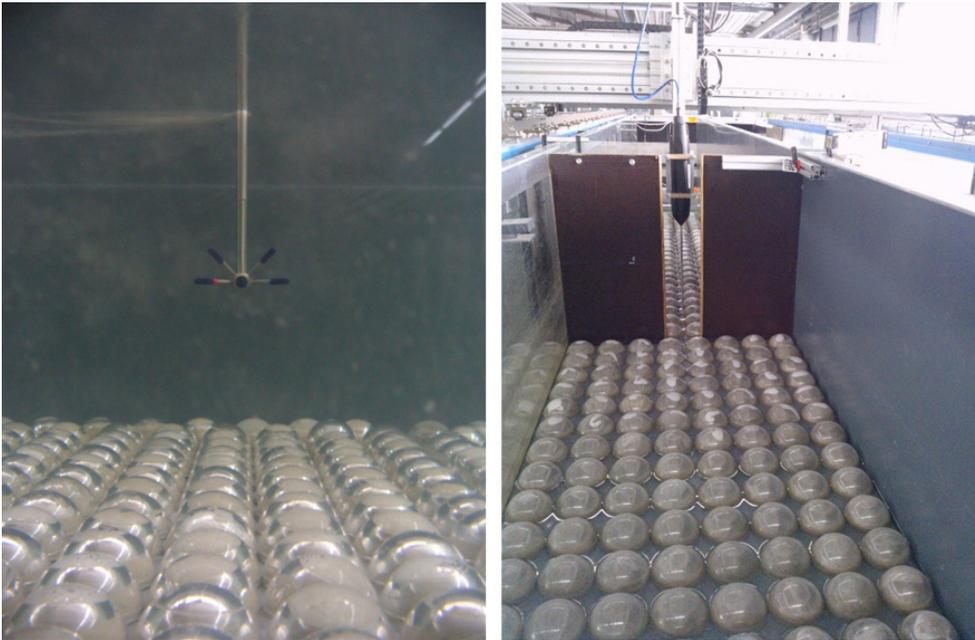


Bild 8: ADV-Messung im Modell mit 5 cm Halbkugeln (links, Lorch 2014); Modell mit 10 cm Halbkugeln und Schlitz (rechts)

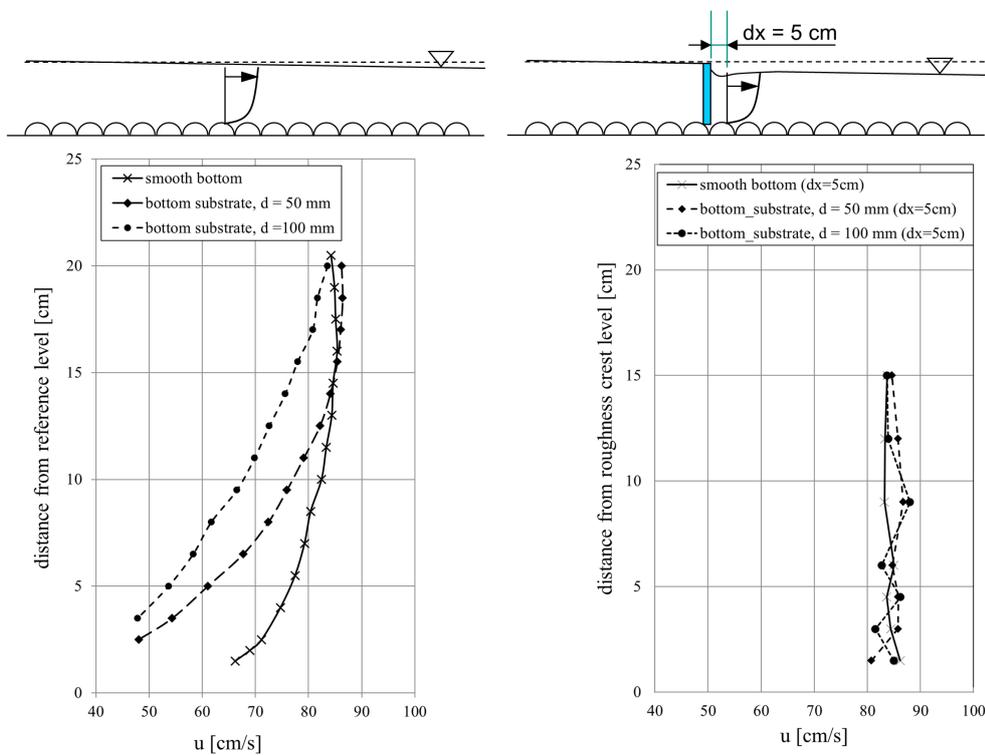


Bild 9: Gegenüberstellung der vertikalen Geschwindigkeitsprofile aus der Messung ohne Schlitz (Lorch 2014, links) und einer Messung mit Schlitz 5 cm unterhalb des Schlitzes (Sokoray-Varga 2014, rechts)

2.3 Zeitabhängige Strömungsprozesse

Für die Bemessung von FAA werden hydraulische Grenzwerte definiert, denen das Konzept zeitgemittelter Strömungsfelder zugrunde liegt. Die Beurteilung der Hydraulik anhand zeitlich gemittelter Strömungsparameter fand z. B. in den in Abschnitt 2.2 vorgestellten Untersuchungen statt. In Wirklichkeit erleben Fische jedoch Strömungsfelder, die starken zeitlichen Schwankungen unterliegen. Grenzwerte der Dimensionierung auf der Grundlage zeitlicher Mittelwerte werden somit bei der Betrachtung zusammenhängender, instantaner Geschwindigkeitsfelder lokal über- bzw. unterschritten. Es bestehen Anhaltspunkte, dass Fische sich zeitabhängige Strömungsprozesse bei der Passage von Bauwerken zunutze machen können (z. B. Odeh et al. 2002, Liao 2007, Tritico und Cotel 2010).

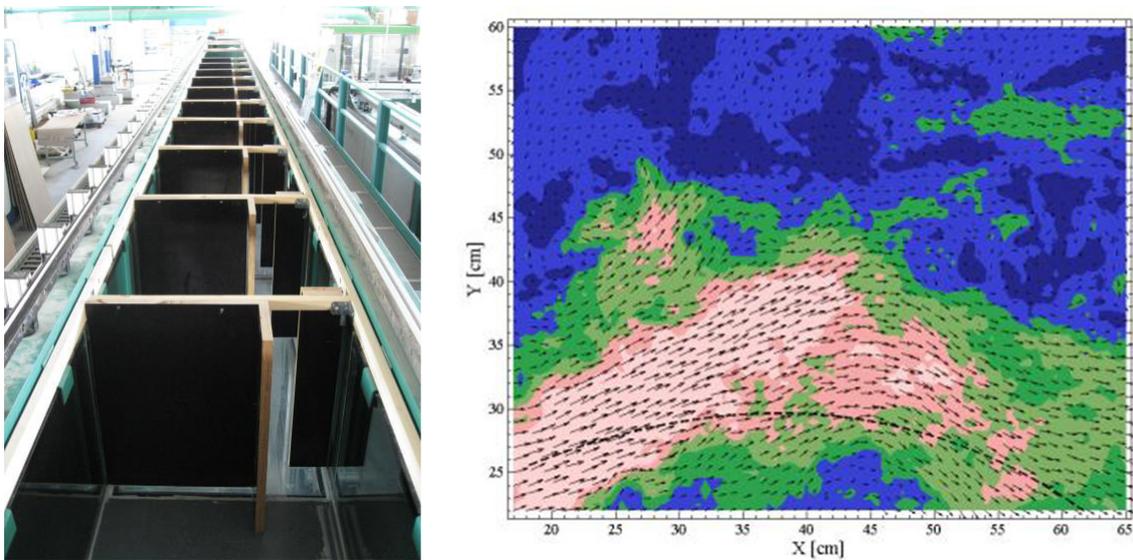


Bild 10: Schlitzpassrinne an der BAW (links), Ergebnis der Vermessung eines instantanen Strömungsfeldes im Schlitzpassbecken aus PIV-Vermessung (Sokoray-Varga 2016)

Bei der Passage von Schlitzpässen ist besonders der Schlitz von Bedeutung, da hier die größten Geschwindigkeiten überwunden werden müssen. Um die Hydraulik im Schlitzbereich vermessen und beschreiben zu können, wurde an der BAW das 1:4 Maßstabsmodell eines Schlitzpasses mit einem Particle-Image-Velocimetry-Messsystem (PIV) ausgestattet (Sokoray-Varga et al. 2013, 2014, Bild 10). Der Versuchsaufbau ermöglichte die Aufnahme der Beckenströmung unterhalb des Schlitzes in einem Lichtschnitt durch eine Hochfrequenzkamera.

Da es keinen anerkannten Stand des Wissens zur Beschreibung zeitabhängiger Strömungsfelder gibt, bestand in dem Projekt die Herausforderung, neben der Vermessung der Strömung und der Auswertung der Daten, in der Entwicklung entsprechender Verfahren zur quantitativen Beschreibung turbulenter Strömungsprozesse. Neben anderen Verfahren wurde auf Basis von Proper-Orthogonal-Decomposition (POD) eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, aus einer hoch aufgelösten Zeitreihe instantaner Strömungsfelder die Vorhersehbarkeit von Strömungsschwankung zu quantifizieren, die u. U. für Fische relevant sein können. Zudem wurde festgestellt, dass die POD auch auf Strömungsdaten mit wesentlich geringerer Auflösung, wie sie bspw. durch ein Feld von

ADV-Sonden erhoben werden könnten, anwendbar ist, solange die Methode an den hochaufgelösten Daten einer PIV kalibriert wird. Das Projekt wurde 2016 mit einer Dissertation am IWG abgeschlossen (Sokoray-Varga 2016). Die Ergebnisse werden bereits in einem Folgeprojekt (B3953.01.04.70008) genutzt, in dem ethohydraulische Versuche mit Fischen durchgeführt werden sollen. Es ist geplant, die Strömungsfelder zeitgleich mit der Fischbewegung aufzuzeichnen, um den direkten Einfluss der kohärenten Strömungsstrukturen auf die Bewegung der Fische und die Schlitzpassage festzustellen.

Die Daten der Modelluntersuchungen wurden auch für die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Untersuchungen und die Entwicklung von HN-Modellverfahren genutzt (s. Abschnitt 2.4, auch Rustico et al. 2014).

2.4 Weiterentwicklung der HN-Modellierung

Aus den zahlreichen numerischen Untersuchungen, die seitens des IWG mit dem Modellverfahren Flow3D und von der BAW mit dem Modellverfahren OpenFOAM durchgeführt wurden, konnten wichtige Erkenntnisse für die Anwendung numerischer Methoden für die vorliegenden Fragestellungen gewonnen werden. Im Projekt wurde die Erhebung von Daten für die Modellkalibrierung bzw. -validierung in Modell- und Naturuntersuchungen (Knapp 2013, Schmitz 2013, Abschnitt 2.2) betrachtet. Dabei wurde neben akustischen ADV-Verfahren auch LDA (Laser Doppler Anemometry) eingesetzt (Bild 11). Weiterhin wurde die Eignung unterschiedlicher Berechnungsverfahren (LES (Large Eddy Simulation), 2D/3D-RANS (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes)) in Abhängigkeit der Fragestellung untersucht und Sensitivitätsanalysen verschiedener Parameter (Boldt 2014, Carbonell 2015) durchgeführt. Außerdem wurde auch die Möglichkeiten der Ergebnisdarstellung für verschiedene Fragestellungen in unterschiedlichen Skalen betrachtet (IWG 2014b).

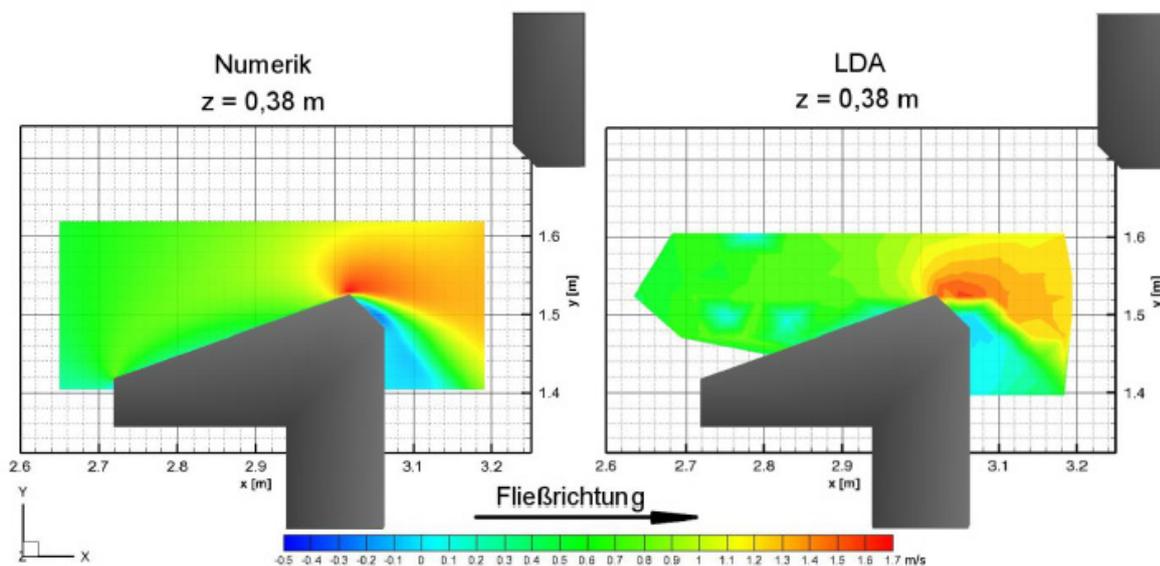


Bild 11: Ergebnis einer numerischen Simulation des Schlitzbereichs (Flow3D, links) und Ergebnis einer LDA-Vermessung der gleichen Randbedingungen in der 3-Schlitz-Rinne des IWG (rechts) in Schmitz (2013)

Konkrete Ergebnisse bestehen bspw. darin, dass LES und RANS Verfahren für die Beurteilung der zeitlich gemittelten Strömung qualitativ und quantitativ vergleichbare Ergebnisse liefern und somit für die meisten Fragestellungen auf deutlich aufwändigere LES verzichtet werden kann. Obwohl die Strömung in den Becken von FAA in Schlitzpassbauweise durch den druckdominierten Abfluss der Schlitze als annähernd zweidimensional angesehen werden kann, sind 3D-RANS-Verfahren besser in der Lage die tatsächliche Strömung abzubilden als tiefengemittelte 2D-Verfahren, wenngleich der Einsatz von 2D- oder auch 1D-Verfahren für Betrachtungen von integralen Parametern wegen der Einfachheit der Anwendung von Vorteil sein kann. In Einklang mit den Ergebnissen aus gegenständlichen Modellen (Abschnitt 2.2) spielt die Parametrisierung der Rauheit für das Ergebnis der Berechnung eine untergeordnete Rolle. Die Untersuchungen haben weiterhin gezeigt, dass die HN-Modelle, und hier besonders Flow3D, die Rauheit unterschätzen und somit den Durchfluss und die Fließgeschwindigkeiten überschätzen. Im Bereich der gegenständlichen Modellierung wurden Messdauern und Messrasterdichten ermittelt die notwendig sind, um die Strömung in den Becken ausreichend genau zu erfassen.

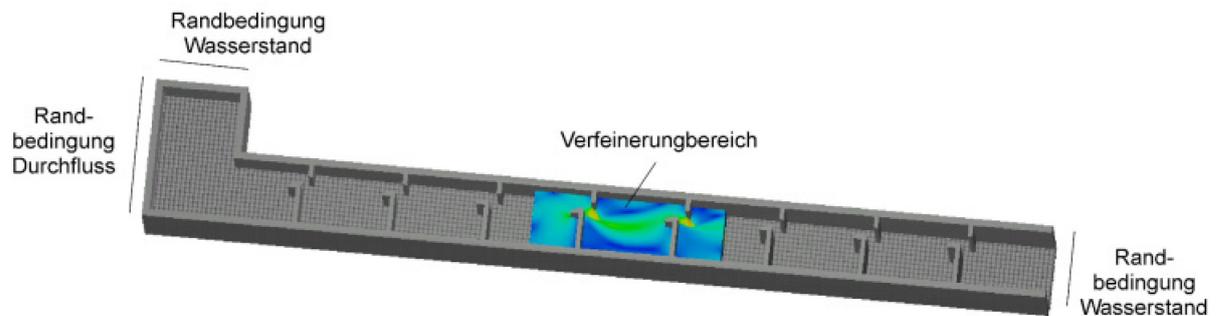


Bild 12: Vorgabe der Randbedingungen am Beispiel einer 3D-Modell-Rinne mit sieben Becken (IWG 2017)

Die Ergebnisse der Untersuchungen des IWG wurden in einem Leitfaden zur Modellierung von Schlitzpässen zusammengeführt (IWG 2017). Die wichtigsten Zielgrößen für die Bewertung von Schlitzpässen sind darin das Strömungsmuster in den Becken, die Wasserspiegeldifferenzen zwischen den Becken, die Fließgeschwindigkeiten im Schlitz und in den Becken und der Anlagen-durchfluss. Es werden Empfehlungen zur Durchführung von Modellierungen von Schlitzpässen mit der Software Flow3D gegeben, bspw. bezüglich der Setzung der Randbedingungen (siehe Bild 12) und der Gitterauflösung in Abhängigkeit verschiedener Fragestellungen. Die Empfehlungen sollen helfen, die Modellerstellung effizient zu gestalten. Sensitivitätsprüfungen und eine gewissenhafte Auseinandersetzung mit dem Modell sind jedoch nach wie vor eine Grundvoraussetzung für die Ableitung belastbarer Aussagen. Ferner ist eine gute und geeignete Darstellung der Mess-ergebnisse ein wichtiger Aspekt, um eine zutreffende Interpretation der Ergebnisse zu ermöglichen. Dies ist auch wichtig, um einen Vergleich von Datensätzen aus Simulation mit Labor- und Feldmessungen anzustellen und zu beurteilen. Diese Aspekte werden ebenfalls in IWG (2017) betrachtet. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Musall und Mahl (2020) gegeben.

3 Rundbeckenfischaufstiegsanlagen

Fischaufstiegsanlagen in Rundbeckenbauweise (RBFAA, auch Mäanderfischpass©) wurden im deutschsprachigen Raum teilweise als Alternative zu den weit geläufigeren Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise angesehen. Entsprechend war diese Bauweise mitunter auch in Vorhaben der WSV relevant.

Vorteilen der Bauweise (geringer Platzbedarf, Fertigteiltbauweise, flexible Trasse, geringer Wasserverbrauch) stehen vermeintliche Nachteile (zu hohe Fließgeschwindigkeiten, zu kleine Becken und Schlitz) gegenüber. Zwar werden RBFAA auch im Standardwerk DWA M-509 (DWA 2014) behandelt, allerdings werden dort für RBFAA lediglich die Bemessungsansätze für Schlitzpässe angewendet, obwohl einiges dafür spricht, dass die Hydraulik von RBFAA eine grundlegend andere ist. Zudem existieren verschiedene Bauformen von RBFAA, die sich bezüglich ihrer Hydraulik unterscheiden.

Um RBFAA näher zu untersuchen und mit der Hydraulik konventioneller Schlitzpässe zu vergleichen, hat die BAW das Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (IWD) der TU Dresden mit einer Studie beauftragt. Diese umfasste eine Begutachtung zum Stand der Technik (IWD 2013) und die Vermessung der bestehenden H-Typ RRBFAA Rothemühle/Oker (IWD 2013, Bild 13) und des C-Typs Höxter/Nethe (IWD 2016, Bild 14). Zusätzlich wurden durch das WSA Brandenburg hydraulische Messungen an der RBFAA (H-Typ) Bahnitz/Havel durchgeführt (Bild 16) und durch das IWD wissenschaftlich begleitet (IWD 2014). Die Projektergebnisse sind in BAW (2020) zusammengefasst.

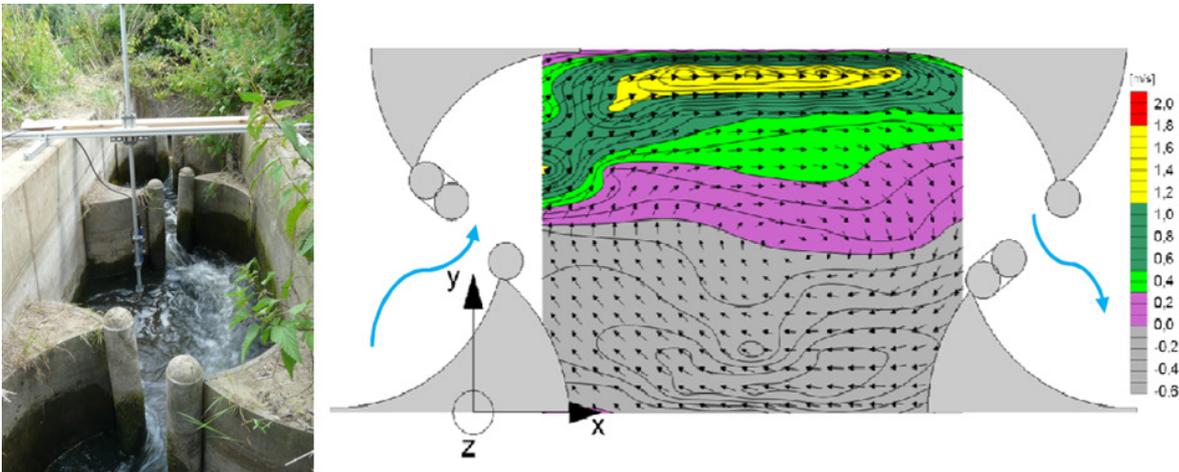


Bild 13: H-Typ RBFAA Rothemühle/Oker: Messaufbau mit Sondenträger (links); Ergebnis der Geschwindigkeitsvermessung (IWD 2013)



Bild 14: C-Typ RBFAA Höxter an der Nehte (IWD 2016)

Bei der Vermessung der FAA Höxter wurde eine erhebliche Zunahme der Fließgeschwindigkeiten im Schlitz zur Sohle hin festgestellt (Bild 9), was eine deutliche Abweichung von der Fließgeschwindigkeitsverteilung in Schlitzpässen darstellt. Um die Hydraulik weiter zu analysieren, wurden weitere Untersuchungen anhand eines 3D-HN-Modells (Star-CCM+®, RANS) durchgeführt, welches an den gewonnenen Projektdaten kalibriert wurde. Die Modellergebnisse bestätigen die Geschwindigkeitszunahme zur Sohle (Bild 15).

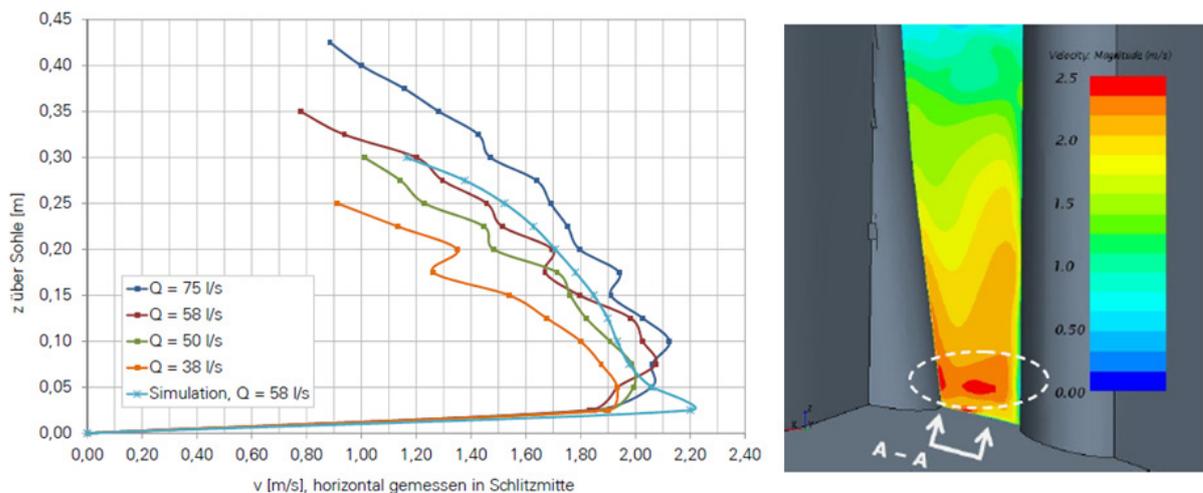


Bild 15: Resultierende Fließgeschwindigkeiten in Schlitzmitte aus Flügelmessung und HN-Simulation (links), Geschwindigkeitsverteilung aus 3D-HN-Simulation im Schlitz (rechts)

Die Abweichungen sind teilweise durch die im Vergleich zum Schlitzpass andere Anström-situation zu erklären. Wahrscheinlich ist allerdings, dass die Abweichung der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung im Schlitz zu einem großen Teil auf eine im Vergleich zur Fallhöhe zwischen den Becken zu geringe Wassertiefe zurückzuführen ist (Rajaratnam et al. 1986, BAW 2020).

Die Vermessung der H-Typ RBFAA Bahnitz/Havel, welche durch das WSA Brandenburg durchgeführt wurde, zeigte, dass die geometrischen und hydraulischen Grenzwerte eingehalten werden. Allerdings hat diese FAA mit einer Beckenlänge von 3,75 m und einer Beckenbreite von 2,5 m die Dimensionen eines Schlitzpasses und ist die mit Abstand größte bekannte RBFAA. Auch die Wassertiefen und die Geschwindigkeitsverteilung im Schlitz entsprechen denen eines Schlitzpasses (Bild 16).

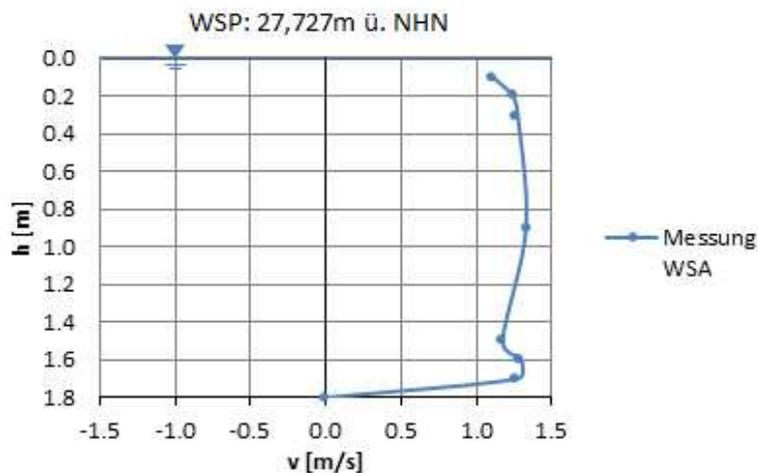


Bild 16: H-Typ RBFAA Bahnitz/Havel: Blick auf die Anlage mit Wasserstandmessung (links); vertikales Geschwindigkeitsprofil im Schlitz aus der Vermessung (WSA Brandenburg, IWD 2014)

Als Zusammenfassung der Untersuchungen in Zusammenarbeit mit dem IWD der TU Dresden lässt sich feststellen, dass sich verschiedene Typen von RBFAA deutlich bezüglich ihrer Geometrie und Hydraulik unterscheiden. Es lassen sich für RBFAA gegenüber FAA in Schlitzpassbauweise, bei Einhaltung der an Bundeswasserstraßen geforderten geometrischen und hydraulischen Grenzwerte, kaum Vorteile ausmachen, da sich die Bautypen bezüglich ihrer Größe und des Durchflusses dann sehr ähnlich sind. Da FAA in Schlitzpassbauweise wesentlich besser untersucht sind und eine allgemein anerkannte Bauweise darstellen, wurde empfohlen, FAA in Schlitzpassbauweise zu realisieren, sofern der Bau eines Beckenpasses angezeigt ist. Für eine ausführliche Zusammenfassung der Ergebnisse wird auf BAW (2020b) verwiesen.

4 Raugerinne

Raugerinne bieten auf Grund ihrer an natürliche Verhältnisse angepassten Bauweise eine größere geometrische und hydraulische Heterogenität als bspw. FAA in Schlitzpassbauweise, welche für die Passierbarkeit eines breiten Artenspektrums von Vorteil ist. Sie stellen in der aktuellen Beratungspraxis von BfG und BAW den bevorzugten Bautyp dar, auch wenn sie wegen ihrer baulichen Besonderheiten, gemessen an der Gesamtzahl der zu errichtenden FAA, weniger relevant sind.

Offene Fragen bestehen vor allem in der Beschreibung der Hydraulik von Raugerinnen. Deren Geometrie ist aufgrund der Bauweise mit natürlichen Materialien schwer zu erfassen und folglich ist auch die Hydraulik in Raugerinnen schwer vorherzubestimmen. Der Nachweis der Einhaltung von Bemessungswerten ist gerade für unstrukturierte Raugerinne aufgrund der räumlich heterogenen Rauheits- und Strömungsverhältnisse mit Unsicherheiten behaftet, da die hydraulische Dimensionierung über rein empirische Berechnungsansätze erfolgt. Diese besitzen nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich und liefern lediglich breiten- und tiefengemittelte Werte für die Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit, so dass lokale Verhältnisse nicht ausreichend genau beurteilt werden können.

Das LWI der TU Braunschweig wurde daher beauftragt, die Anwendbarkeit bestehender Ansätze für die Parametrisierung der Strömung auf die Verhältnisse in Raugerinnen in Störsteinbauweise bzw. Raugerinne-Beckenpässen zu ermitteln (LWI 2019). Ein adäquates Mittel zur Untersuchung räumlich heterogener Strömungsfelder ist die Methode der doppelten Mittelung (Double Averaging Methodology) der Navier-Stokes Gleichungen. Hinsichtlich der Auswertung der Strömung in Raugerinnen kann damit berücksichtigt werden, dass ein Wanderkorridor im dreidimensionalen Raum liegen kann und nicht nur auf die Betrachtung in der horizontalen Ebene beschränkt ist.

Auf der Basis von Daten, die im Rahmen von studentischen Arbeiten am LWI aufgenommen wurden (Bild 17), wurden geometrische und hydraulische Parameter für den Fischaufstieg mit den Kriterien eines Wanderkorridors (Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit) in Beziehung gesetzt. Dabei wurde sowohl auf die klassische Beschreibung der Sohle und des Strömungsfeldes anhand von Steingrößen und Widerstandsbeiwerten als auch auf neuere, auf statistischen Verfahren basierende Ansätze zurückgegriffen (z. B. 2D-Strukturfunktionen, Bild 18). Die angewandten Methoden wurden in einem weiteren Schritt auf einen zur Verfügung gestellten Datensatz einer 3D-hydrodynamisch numerischen Berechnung eines Raugerinne-Beckenpasses (Czerny 2014) angewandt.

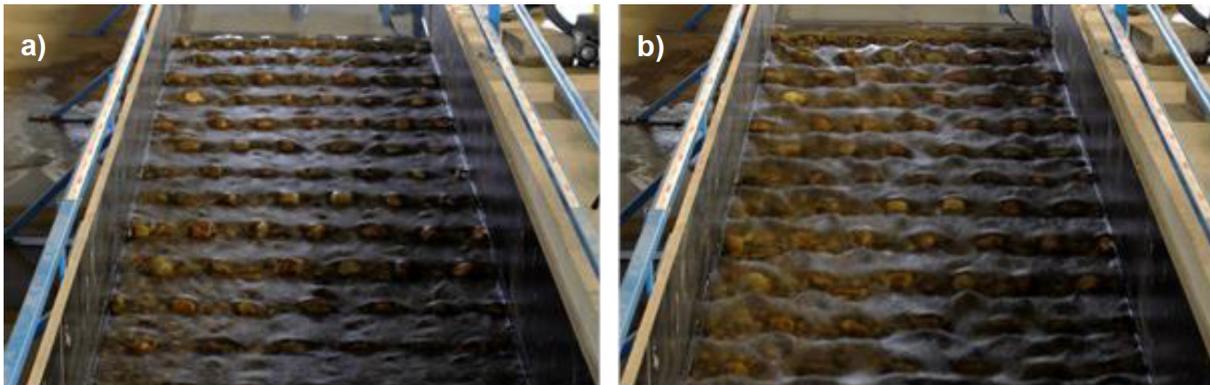


Bild 17: Modellversuch am LWI: a) bei Überströmungsbeginn der Riegel, b) bei voller Überströmung (LWI 2019)

Die Analyse der Verteilungsfunktion der Sohlhöhen zeigte, dass insbesondere die Standardabweichung der Sohlhöhen ein gutes Maß für die Rauheit darstellt. So konnte mittels der Standardabweichung die Belegungsichte der Sohle erfasst werden, da diese mit steigender Belegungsichte zunahm. Die geläufigen Ansätze zum Fließwiderstand zeigten hingegen keine zufriedenstellende Beschreibung der Daten.

Sehr gute Ergebnisse im Hinblick auf die Rauheitsstruktur der Sohle wurden mittels 2D-Strukturfunktionen zweiter Ordnung erhalten. Für die Grundrauheit zeigte die Anwendung der Strukturfunktionen nur einen vernachlässigbar geringen Korrelationsbereich, der in der Größenordnung des Korndurchmessers liegt. Die Belegung der Grundsohle mit Störsteinen in einer regelmäßigen Anordnung, konnte durch die Strukturfunktionen eindeutig identifiziert werden. Bei unregelmäßiger Anordnung von Störsteinen konnten anhand der Strukturfunktion verschiedene und zum Teil überlagerte Korrelationsmuster erkannt werden, wie z. B. Querriegel und Fließrinnen.

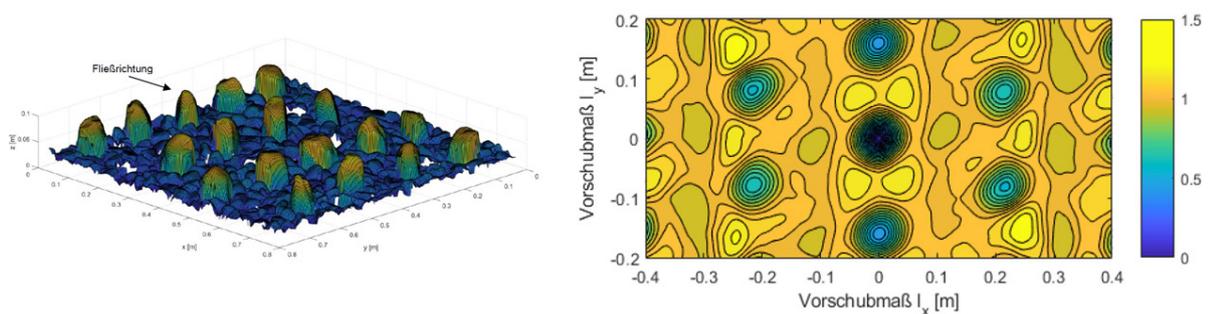


Bild 18: DGM einer Sohle mit Störsteinen (links), zugehörige 2D-Strukturfunktion (LWI 2019)

Die Auswertung der LWI-Versuche zeigte, dass bei Störsteinbauweisen die Grundrauheit hinsichtlich der Fließwiderstände eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielt. Diese sollte immer zusammen mit der Störsteinanordnung bzw. der Störsteindichte berücksichtigt werden. Die räumliche Verteilung der Fließgeschwindigkeiten wurde anhand von Ebenen parallel zum mittleren Sohlgefälle erfasst. So ließen sich vorhandene Wanderkorridore gut abschätzen. Die Dreidimensionalität

der Wanderkorridore wurde in dieser Betrachtung bestätigt. Zudem wurde die Variabilität der Strömung durch die flächenhafte Betrachtung der Schwankungsgeschwindigkeiten verdeutlicht. Die Analyse der 3D-hydrnumerischen Daten des Raugerinne-Beckenpasses zeigte, dass dieser Bautyp aufgrund seiner Rauheitsstruktur und die sich dadurch einstellende Beckenströmung eine grundlegend andere Hydraulik aufweist als der Bautypen Schlitzpass. Die räumliche Variation des Strömungsfeldes in den Becken konnte mit den 2D-Strukturfunktionen zweiter Ordnung direkt mit der Struktur der Sohle in Verbindung gebracht werden.

Für eine praktische Anwendung müssen die aktuellen Ergebnisse auf eine breitere Datenbasis angewendet werden und entsprechend verallgemeinert bzw. verfeinert werden.

5 Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt „Hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen“ wurden FAA in Schlitzpassbauweise in einer Kooperation mit dem IWG des KIT untersucht. Dabei konnten wichtige Erkenntnisse über die Abhängigkeit der Hydraulik von den geometrischen Randbedingungen gewonnen werden. Dies ist besonders für die Vorhersage des Auftretens von Strömungsmustern wichtig, da diese einen vermuteten Einfluss auf die Passierbarkeit haben. Zudem hängen weitere Parameter, wie Durchfluss und Fließgeschwindigkeiten, direkt mit der Ausbildung der Strömungsmuster zusammen. In Bezug auf den Einfluss einer rauen Sohle konnte bestätigt werden, dass diese keinen messbaren Effekt auf die Strömung in den Schlitzten hat. Weiterhin konnten in der Zusammenarbeit mit dem IWG wertvolle Erkenntnisse bezüglich der Modellierung der relevanten Strömungsprozesse gewonnen werden. Die praxisrelevanten Projektergebnisse werden momentan für eine Veröffentlichung als **BAW**Mitteilung vorbereitet und stehen dann der Allgemeinheit zur Verfügung. Zudem fließen Erkenntnisse aus dem Projekt in die Beratung der WSV ein und werden in der Fortschreibung des DWA M-509 genutzt.

Das Teilprojekt „zeitabhängige Strömungsprozesse“ wurde mit einer Dissertation abgeschlossen (Sokoray-Varga 2016). Darin wurden aus zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Modelldaten Verfahren entwickelt, anhand derer die Abfolge kohärenter Strömungsstrukturen prognostiziert werden kann, welche wiederum durch Fische genutzt werden könnten. Die Verfahren werden bereits in einem Folgeprojekt vertieft untersucht (B3953.01.04.70008) und sollen am Ende in einem Fischversuch im ethohydraulischen Versuchsstand der BAW durch die BfG geprüft werden.

Die Untersuchungen zu Rundbecken-FAA mit dem IWD der TU Dresden zeigten, dass bei einer ausreichenden Dimensionierung die meisten Vorteile der Bauform, wie geringer Wasserverbrauch und kleine Baugröße, nicht mehr gegeben sind. Der WSV wurde aus hydraulischer Sicht bis auf weiteres der Bau von FAA in Schlitzpassbauweise empfohlen, sofern der Bau eines Beckenpasses angezeigt ist, da diese Bauform allgemein anerkannt ist. Das heißt nicht, dass RBF AA bei Einhaltung der geometrischen und hydraulischen Grenzwerte nicht ebenfalls funktionsfähig sind.

Die Untersuchungen des LWI der TU Braunschweig haben gezeigt, dass es statistische Verfahren gibt, mit denen heterogene Geometrie und Strömung von Raugerinne-Beckenpässen und

Raugerinnen in Störsteinbauweise beschrieben werden können. Bevor dieser Weg weiterverfolgt wird, muss die Relevanz einer solchen Parametrisierung in Bezug auf die Standorte der WSV unter Einbeziehung der praktischen Fragen der Planer erneut überprüft werden.

Die dargestellten FuE-Untersuchungen wurden mit Fokus auf die Hydraulik durchgeführt. Zur Beantwortung weiterer offener Fragen zur Auswirkung der Geometrie verschiedener Bauweisen von FAA auf die Passierbarkeit durch Fische müssen zunächst auch entsprechende fischökologische Thesen aufgestellt bzw. verfeinert werden. Mit der Doppelstranganlage, die am Pilotstandort Eddersheim geplant ist (BfG/BAW 2017), steht in Zukunft die Infrastruktur zum Test verschiedener Bauweisen mit Fischen zur Verfügung.

6 Literatur

BAW/BfG 2015: Arbeitshilfe Fischaufstiegsanlagen an Bundeswasserstraßen (AH FAA). Version 2.0, 26.06.2015.

BAW/BfG 2017: Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit für Fische an den Staustufen der Bundeswasserstraßen - Rahmenkonzept für Forschung und Entwicklung.

BAW 2020a: BAW Mitteilungen 106, BAW Eigenverlag.

BAW 2020b: Beurteilung von Rundbecken-Fischaufstiegsanlagen, BAW Bericht, unveröffentlicht.

Belz (2013): Untersuchung der Strömungscharakteristik von Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise, JuWi Treffen 2013, unveröffentlicht.

Boldt, Sophia (2014): Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse einer 3D-numerischen Modellierung einer idealisierten Fischaufstiegsanlage in Schlitzpassbauweise. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. Institut für Wasser und Gewässerentwicklung.

Carbonell Baeza, R. (2015): Detaillierte Untersuchung der Strömungscharakteristik in Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise, Masterarbeit, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, unveröffentlicht.

Czerny, R. C. (2014): Hoch aufgelöste Strömungssimulation naturnaher Fließgewässerstrukturen - Detaillierte Modellierung auf Basis des terrestrischen Laserscannings zur Untersuchung ökohydraulischer Fragestellungen, Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG).

DWA (2010): Merkblatt DWA-M 509 (Gelbdruck), Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.

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

Gisen, D. C.; Heneka, P.; Schütz, C. (2016): Fish-size-based criteria for assessing attraction flow. Proc. Fish Passage Conference 2016, Amherst, USA.

Groß, M. (2019): Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Geometrie- und Hydraulikparameter auf das Strömungsverhalten in einem Vertical Slot Fischpass, Masterarbeit, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, unveröffentlicht.

Haußmann, M. P. (2018): Einfluss der Detailgeometrie im Schlitz auf die hydraulischen Kenngrößen bei einem Vertical-Slot-Fischpass, Masterarbeit, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, unveröffentlicht.

Henning, M.; Weichert, R. (2020): Hydraulische Parameter von Schlitzpassbauweise in Bemessung und Bestand, BAW Mitteilungen 106, BAW Eigenverlag.

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.; Musall, M.; Sokoray-Varga, B. (2015b): Hydraulik von Fischaufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise – physikalische und numerische Untersuchungen zur Optimierung der Passierbarkeit, In: Veranstaltungen 1/2015 „Kolloquiumsreihe Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen, 4. Kolloquium Forschung und Entwicklung zur Qualitätssicherung von Maßnahmen an Bundeswasserstraßen“, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde. S. 95-104.

Höger, V.; Seidel, F.; Nestmann, F. (2020a): Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen, BAW Mitteilungen 106, BAW Eigenverlag.

Höger, V.; Prinz, F.; von Meltzer, J.; Weichert, R. (2020b): Die Variabilität der Fließgeschwindigkeit in Schlitzpässen, BAW Mitteilungen 106, BAW Eigenverlag.

IWG (2013): Analysen zur Strömungscharakteristik in Schlitzpässen auf Basis 3D-numerischer Strömungssimulationen am Beispiel der FAA Koblenz, Bericht, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, unveröffentlicht.

IWG (2014a): Weiterführung der Analysen zur Strömungscharakteristik in Schlitzpässen auf Basis 3D-numerischer Strömungssimulationen, Bericht, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, unveröffentlicht.

IWG (2014b): Analysen zur Strömungscharakteristik in technischen Fischaufstiegsanlagen mittels numerischer und physikalischer Modellierung, Bericht, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, unveröffentlicht.

IWG (2017): BAW/IWG Leitfaden zur HN-Berechnung von Schlitzpässen, Bericht, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, unveröffentlicht.

IWG (2020): Untersuchung der Strömungscharakteristik in Vertical-Slot-Fischpässen, unter Berücksichtigung fischökologischer Anforderungen, Abschlussbericht.

IWD (2013): Mäanderfischpasse – Wissenschaftliche Begutachtung zum Stand der Technik, TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik.

IWD (2014): Fachwissenschaftliche Begleitung der Insitu-Messwerterfassung der Fischaufstiegsanlage Bahnitz, TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik.

IWD (2016): Hydraulische Untersuchung der Rundbeckenpassanlage Höxter/Godelheim, TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik.

Knapp, F. (2013): 3D-numerische Modellierung von Strömungsmustern im Einflussbereich von Wendebecken einer Fischaufstiegsanlage auf der Grundlage eines Naturversuchs, Diplomarbeit angefertigt an der BAW, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, unveröffentlicht.

Lorch, M. (2014): Experimentelle Untersuchungen zur Auswirkung des Sohlsubstrates auf das vertikale Geschwindigkeitsprofil in beckenartigen Fischaufstiegsanlagen, Diplomarbeit angefertigt an der BAW, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, unveröffentlicht.

LWI (2019): Machbarkeitsstudie zur Beschreibung des flächigen Strömungsfelds für die Ableitung verbesserter Bemessungskriterien von Raugerinnen, LWI Bericht 1094, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig, unveröffentlicht.

Rajaratnam, N.; Van der Vinne, G.; Katopodis, C. (1986): Hydraulics of Vertical Slot Fishways, Journal of Hydraulic Engineering, 112, 909-927.

Rustico, E.; Sokoray-Varga, B.; Bilotta, G.; Hérault, A. and Brudy-Zippelius, T. (2014): Full 3D numerical simulation and validation of a fish pass with GPUSPH, DOI 10.1007/978-3-319-23413-7_122. In G. Russo (Hrsg.), Progress in Industrial Mathematics at ECMI 2014, ISBN: 9783319234120, Mathematics in Industry 22, 2014, Springer International Publishing, S. 871-877.

Schmitz C. (2013): Analysen zur Strömungscharakteristik in technischen Fischaufstiegsanlagen mittels numerischer und physikalischer Modellierung, Diplomarbeit, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, unveröffentlicht.

Sokoray-Varga, B.; Weichert, R.; Lehmann, B.; Nestmann, F., (2013): Hydraulische Untersuchungen zur Passierbarkeit von Fischaufstiegsanlagen an Bundeswasserstraßen, Symposium der Wasserbau-Institute TU München, TU Graz und ETH Zürich, Wallgau.

Sokoray-Varga, B.; Weichert, R.; Nestmann, F. (2014): Erfassung turbulenter Wirbel in Vertical-slot Fischpässen mittels zeitaufgelöstem PIV, Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 9. – 11. September 2014, Karlsruhe.

Sokoray-Varga, B.; Weichert, R.; Nestmann, F. (2015): Untersuchungen zu hydraulischen Berechnungsansätzen von Schlitzpässen, WasserWirtschaft 08/08 2015, S.61-66.

Sokoray-Varga, Béla (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).

Weichert, Roman et al. (2013): Zur Frage der Dotationswassermenge von Fischaufstiegsanlagen an großen Fließgewässern. In: WasserWirtschaft, 1/2, S. 33–38.



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. +49 (0) 721 97 26-0 · Fax +49 (0) 721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. +49 (0) 40 81 908-0 · Fax +49 (0) 40 81 908-373

www.baw.de