



Dipl.-Ing. Tom Rößger (TUD)
Dr.-Ing. Janina Kopecki (SJE)
Dr. rer. nat. Falko Wagner (IGF)

ABSCHLUSSBERICHT 2025/10

„OptiPass – Konsolidierung der ethohydraulischen Grundlagen sowie
Entwicklung eines Planungs- und Optimierungswerkzeuges für den
Fischabstieg“ – AZ 39461/01-33/2

Dresden, Oktober 2025

„OPTIPASS – KONSOLIDIERUNG DER ETHOHYDRAULISCHEN GRUNDLAGEN SOWIE ENTWICKLUNG EINES PLANUNGS- UND OPTIMIERUNGSWERKZEUGES FÜR DEN FISCHABSTIEG“

Fördermittelgeber:	Deutsche Bundesstiftung Umwelt An der Bornau 2 49090 Osnabrück
Förderkennzeichen:	39461/01-33/2
Projektpartner:	Technische Universität Dresden Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD) Professur Wasserbau sje Ecohydraulic Engineering GmbH Institut für Gewässerökologie und Fischereibiologie (IGF) Jena
Projektleiter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Stamm
Bearbeitende:	Dipl.-Ing. Tom Rößger (Koordination, TUD) Dr.-Ing. Ianina Kopecki (sje) Dr. rer. nat. Falko Wagner (IGF)
Ort, Datum:	Dresden, 30.10.2025



Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	IV
Kurzfassung	1
1 Einleitung und Motivation	2
1.1 Veranlassung	2
1.2 Ziele	3
2 Vorgehensweise und Methodik	4
2.1 Projektablauf	4
2.2 Methodik ethohydraulische Laborversuche	5
2.2.1 Laborrinne und Setups	5
2.2.2 2D-HN-Modellierung	7
2.2.3 Fischversuche	12
2.3 Methodik Feldstudie	19
2.3.1 Untersuchungsstandort	19
2.3.2 Hydraulik	20
2.3.3 Fischversuche	22
3 Ergebnisse	26
3.1 Ergebnisse Laborversuche	26
3.2 Ergebnisse Feldstudie	29
3.3 Empfehlungen für Bypasskonfiguration	32
4 Öffentlichkeitsarbeit	33
4.1 Konferenzbeitrag	33
4.2 Gremienarbeit	33
5 Fazit und Ausblick	33
Literaturhinweise	35
Anhang	37
Validierung des 2D-HN-Modells (Laboruntersuchungen)	37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geplanter Projektablauf	5
Abbildung 2: Grundstruktur der verwendeten Strömungsrinne, schematisch in gelb und grün sind die modularen Einbauteile dargestellt	6
Abbildung 3: Ausbildung der drei Versuch-Setups, gelb dargestellt der Bereich vor dem Bypasseinstieg der videoteknisch erfasst wird, im Nahbereich wird das „Einsteigen“ in den Bypass beobachtet, vorgelagert dient eine Strecke als Kontrollbereich (Skizzen nicht maßstäblich).....	7
Abbildung 4: Draufsichten der v_x -Verteilungen in den Setups S1, S2a, S2b und S3	9
Abbildung 5: Draufsichten der SVG_x -Verteilungen in den Setups S1, S2a, S2b und S3.....	10
Abbildung 6: Eingesetzter Fließgeschwindigkeits-Keilsensor (ADV) und Messbereich (aus NIVUS 2015).....	12
Abbildung 7: Draufsicht der Positionen der ADV-Messungen in den Setups S1 und S2a,b	12
Abbildung 8: Barbe, Freilandaufnahme (Wagner).....	13
Abbildung 9: Draufsichten der räumlichen Anordnung der Kontroll- und Nahbereich sowie der Prüfgrößen und die drei den ethohydraulischen Versuchen zugrunde liegenden Hypothesen	16
Abbildung 10: Aufbau des Kamerasystems und Darstellung der Aufzeichnung des Beobachtungsbereichs bestehend aus Kontroll- und Nahbereich vorm Bypasseinstieg	18
Abbildung 11: Schema des Kraftwerks Shakhimardan und der zugehörigen Fischschutzeinrichtungen.....	20
Abbildung 12: 3D-Ansicht des Bypasses mit 2D-Netzelementen (a), berechnete Verteilungen der Strömungsgeschwindigkeit (b) und des räumlichen Geschwindigkeitsgradienten SVG (c) im Bypass des Kraftwerks Shakhimardan.....	22
Abbildung 13: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten und SVG -Werte im Bypass des Kraftwerks Shakhimardan bei 77 l/s und 145 l/s	22
Abbildung 14: Snow Trout (<i>Schizothorax eurycephalus</i>), Freilandaufnahme (Wagner).....	23
Abbildung 15: links: Blick in die Einhausung des Bypasseinstiegs zur Vermeidung schneller Beleuchtungswechsel und dem Schutz des Kamerasystems während der Feldversuche an der WKA Shakhimardan; rechts: schematische Darstellung des Kamera-Infrarotstrahler-Systems	25
Abbildung 16: Seitenansicht des Bypasseinstiegs mit den Maßen und der räumlichen Anordnung des Kamerasystems, der IR-Beleuchtung, dem Messpunkteraster an den Bypasswänden zur räumlichen Kalibrierung und der Einsatzpunkt der Versuchsfische (Piktogramm)	25
Abbildung 17: Anzahl von Meidungsreaktionen, normiert auf 1 m Fließstrecke entlang der x-Achse der Versuchsrinne im Kontroll- und Nahbereich im Setup 1 mit einem hohem SVG bis 1 m/s/m im Nahbereich.....	27

Abbildung 18: Schwimmpfad einer Barbe im Experiment 7 des Setups 1 mit positiv rheotaktischer Ausrichtung und aktiver Drift bis kurz vor dem Bypasseinstieg, wo sie stationär wechselte und nicht in den Bypass einschwamm	27
Abbildung 19: Ergebnis des Conditional Inference Trees zum Einfluss des SVG und der Strömungsgeschwindigkeit auf die Anzahl vom Meidungsreaktionen im Setup 2a bezogen auf eine Standardfließstrecke von 1 m Richtung x-Achse als abhängige Variable	28
Abbildung 20: Anzahl von Meidungsreaktionen normiert auf 1 m Fließstrecke entlang der x-Achse der Versuchsrinne im Kontroll- und Nahbereich im Setup 3 mit einem SVG < 0,1 m/s/m (Schwellenwert aus 2a für Meidungsreaktion)	29
Abbildung 21: Anteile der erfolgreich abgestiegener und im Bypass verbliebener Fische während der Abstiegsexperimenten im Bypass der Wasserkraftanlage in Shakhimardan	30
Abbildung 22: In der Draufsicht dargestellte räumliche Verteilung der Reaktionspunkte der Fische mit einem Wechsel vom Bewegungsmodus „aktive Drift stromab“ zu „aktiv stromauf“ was dazu führt, dass die Fische wieder stromauf schwimmen und nicht absteigen, das Raster markiert 7,5 cm lange Sektoren entlang der x-Achse des Bypasskanals.....	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Hauptmerkmale der 2D-HN-Simulationen	8
Tabelle 2: Gesamtanzahl der Fische und für die Analyse nutzbaren pro Versuchssetup, ihre Totallänge (TL) mit Standardabweichung (SD), die Wassertemperatur während der Versuche und die theoretische Sprintgeschwindigkeit (<i>usprint</i>) der Versuchsfische (Modellgrundlagen: maximale Schwimmdauer von 10 s eines rheophilen Fisches; Modelle von Ebel 2013)	14
Tabelle 3: Anzahl der Fische der beiden Teilstichproben mit übereinstimmender Totallänge der Probanden im Versuchssetup 1 und 3, ihre Totallänge (TL) mit Standardabweichung (SD), die Wassertemperatur während der Versuche und die theoretische Sprintgeschwindigkeit der Versuchsfische (Modellgrundlagen: maximale Schwimmdauer von 10 s eines rheophilen Fisches; Modelle von Ebel 2013)	14
Tabelle 4: Grundbewegungsmodi in ethohydraulischen Experimenten, charakterisiert durch die Kombination von einem äußeren Betrachter wahrnehmbaren Absolutgeschwindigkeit des Fisches <i>uabs</i> mit der Strömungsgeschwindigkeit <i>vx</i> . Daraus resultiert die Relativgeschwindigkeit des Fisches <i>urel</i> sowie die rheotaktische Ausrichtung (RN = rheotaktisch negativ, RP = rheotaktisch positiv)	17
Tabelle 5: Gesamtanzahl der Fische pro Experiment am Bypass der WKA Shakhimardan, ihre Totallänge (TL) mit Standardabweichung (SD), die Wassertemperatur während der Versuche und die theoretische minimale Sprintgeschwindigkeit (<i>usprint</i>) der Versuchsfische (Modellgrundlagen: maximale Schwimmdauer von 10 s eines rheophilen Fisches; Modelle von Ebel 2013) in der Versuchsgruppe	24

KURZFASSUNG

Für Fischschutzsysteme an Wasserkraftanlagen müssen die drei Grundfunktionen Blockieren, Leiten und Ableiten, erfüllt sein. Besonders für das Ableiten fehlen aktuell evidenzbasierte Grundlagen zur Auslegung von Bypasseinstiegen. Im Rahmen von *OptiPass* wurden für die hydraulische Variable räumlicher Geschwindigkeitsgradient (SVG) für engl. spatial velocity gradient), welcher in Vorgängerprojekten des Konsortiums als für das Fischverhalten maßgebend identifiziert wurde, erstmalig Bemessungsgrenzwerte ermittelt. Dazu erfolgten ethohydraulische Laborversuche sowie eine Feldstudie. In einem Strömungskanal im Labor wurde mit Barben (*Barbus barbus*) als Vertreter der Cyprinodei zunächst das Meidungsverhalten bei Ausführung des Bypasseinstiegs nach Stand der Technik (Setup 1) quantifiziert. Anschließend gelang in einem zweiten Setup mit einem starken SVG-Gradienten der artspezifische Nachweis eines Schwellenwertes von 0,3 m/s/m bei dessen Überschreitung Meidungsreaktionen der Barbe sehr wahrscheinlich werden. Auf Grundlage dieses Ergebnisses wurde ein optimierter Bypasseinstieg geplant und umgesetzt. Es gelang dadurch die Anzahl von Meidungsreaktionen signifikant zu reduzieren. Die Analyse des Fischverhaltens erfolgte anhand quantitativer Verhaltensparameter auf Basis des Video-Trackings der Fische. Somit sind die Ergebnisse uneingeschränkt mit Daten aus weiteren Versuchen mit anderen Arten oder abweichenden hydraulischen Situationen vergleichbar und unterliegen keiner subjektiven Interpretation. Die Pfade und lokalisierten Reaktionspunkte der Fische wurden anschließend mit der Hydraulik aus einer 2D-hydroneumerischen-Simulation (2D-HN) verschnitten. In der Feldstudie wurden am Bypass einer Wasserkraftanlage in Shakhirmadan (Usbekistan) Versuche mit Snow Trout (*Schizothorax eurycephalus*) ebenfalls zum Meidungsverhalten in einem Versuchsaufbau vergleichbar mit dem Labor-Setup 1 durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass im Freiland aufgrund einer Einengung des Durchflussquerschnitts und des damit verbundenen hohen SVG wie im Labor ein deutliches Meidungsverhalten zu beobachten war. In der Anschlussphase *OptiPass II* soll der Schwellenwert für eine weitere Fischart, die Bachforelle (*Salmo trutta*) als Vertreter der Salmonidae bestimmt werden. Am Feldstandort wird die Geometrie des Einstiegs gemäß unseren Empfehlungen angepasst, sodass wir zuversichtlich sind, die Wirksamkeit des Schwellenwertes auch im Freiland in einer Feldstudie bestätigen zu können. Die Ergebnisse aus beiden Projektphasen fließen in die Entwicklung eines Planungs- und Optimierungstools ein, welches zukünftig für die Dimensionierung von Bypasseinstiegen genutzt werden kann.

1 EINLEITUNG UND MOTIVATION

Der vorliegende Bericht dokumentiert die wesentlichen Arbeiten und Ergebnisse, die im Rahmen des Forschungsprojekts *OptiPass* (gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt – DBU) erzielt wurden. Die Umsetzung des Projektes erfolgte im Zeitraum vom 01.08.2024 bis 31.07.2025 durch ein Konsortium bestehend aus der Technischen Universität Dresden (**TU Dresden**), dem Institut für Gewässerökologie Jena (**IGF**) sowie der SJE – Ecohydraulic Engineering GmbH (**SJE**). Neben den zentralen Inhalten des Projekts *OptiPass*, die überwiegend auf Laboruntersuchungen an der TU Dresden basierten, umfasst der Bericht zudem die Darstellung der Ergebnisse einer Feldstudie, die im Rahmen einer Kooperation mit dem EU-Horizon-Projekt *Hydro4U* (<https://hydro4u.eu>) durchgeführt wurde. Das Projekt wird in einem zweiten Projektabschnitt – *OptiPass II* – im Zeitraum vom 01.09.2025 bis 31.08.2026 fortgeführt.

1.1 VERANLASSUNG

Die fehlende Vernetzung von Fischlebensräumen durch die Fragmentierung der Flüsse, aufgrund von Querbauwerken und Wasserkraftanlagen, ist eines der Haupthindernisse auf dem Weg zum guten ökologischen Zustand der deutschen und europäischen Fließgewässer. Eine große Anzahl von Wasserkraftanlagen verfügt noch immer nicht über funktionsfähige Fischwanderhilfen, um die ökologische Passierbarkeit stromauf und vor allem stromab zu gewährleisten. Für die Planung von Fischaufstiegsanlagen gibt es in Deutschland wissenschaftlich fundierte Empfehlungen mit normativem Charakter (Dumont et al. 2005; LUBW 2006; DWA 2014; VDI 2014). Für Fischschutz- und Fischabstiegssysteme dagegen sind zwar Planungsempfehlungen verfügbar (Ebel 2013; Schwevers und Adam 2020; Wagner 2022; Ebel 2024), diese sind aber aufgrund einer unzureichenden wissenschaftlichen Datengrundlage nicht uneingeschränkt übertragbar oder empirisch nicht ausreichend gestützt. Besonders für die verzögerungsarme Ableitung der Fische über den Bypass ins Unterwasser und dafür optimierte hydraulische Bedingungen fehlen noch immer fachliche Grundlagen.

Mit der Berücksichtigung des Fischverhaltens sowie aufeinander abgestimmter Einlaufrechen und Bypasssysteme können Fischschutzsysteme durchaus auch dann hohe Wirkung erzielen, wenn der Rechen keine komplett unüberwindbare Barriere darstellt (Maddahi et al. 2022; Meister et al. 2022; Wagner 2022). Voraussetzung hierfür ist, dass die drei Grundfunktionen eines Fischschutzsystems (Wagner 2022) – Blockieren, Leiten und Ableiten – für alle Zielarten gewährleistet sind. Während praxiserprobte Vorgaben für das Blockieren und Leiten verfügbar sind, fehlen allgemeingültige und auf alle Bypässe übertragbare ethohydraulische Grundlagen für das Ableiten. Vorhandene Laborstudien (Lehmann et al. 2016) geben erste Hinweise zu Form und Größe von Bypasseinstiegen, die ein Einschwimmen begünstigen. Die Erkenntnisse sind jedoch nur sehr eingeschränkt auf andere räumliche Konfigurationen übertragbar. Der Grund hierfür ist, dass die verhaltensbeeinflussenden hydraulischen Faktoren und Mechanismen nicht geklärt sind. Bei Freilanduntersuchungen wurden diese bisher häufig nicht exakt erfasst und berücksichtigt (Blasel 2009; Schmalz 2012; Wagner 2013).

Es ist notwendig, die hydraulischen Parameter zu identifizieren, die hinsichtlich der Ableitung von Fischen durch einen Bypass erwünschte oder unerwünschte Reaktionen hervorrufen. Bekannt ist, dass Fische häufig Meidungsverhalten zeigen, wenn der räumliche Strömungsgradient (Spatial Velocity Gradient – SVG) artspezifische Schwellenwerte überschreitet (Enders et al. 2009; Enders et al.

2012; Vowles und Kemp 2012; Wagner 2016; Wagner et al. eingereicht). Zonen starker Beschleunigungen des Wassers auf kurzer Strecke, wie sie im Einstieg von Bypässen typischerweise vorhanden sind, werden in der Regel nicht verzögerungsfrei passiert (Nestler et al. 2008; Blasel 2009; Wagner 2013). Auch wenn darauf hingewiesen wird, dass starke Geschwindigkeitsgradienten zu vermeiden sind (Ebel 2024), sind bisher keine gilden- oder artspezifischen Schwellenwerte für maximale SVG verfügbar. Die Strömungsgeschwindigkeit im Einlaufprofil kann nach Ebel (2024) das Doppelte der Anströmgeschwindigkeit betragen. Häufig wird daher so geplant, dass zwar im Bypasseinstieg eine für die Fische wahrnehmbare Strömung gegeben ist, die aber ohne Berücksichtigung des maximalen SVG häufig das genannte Meidungsverhalten auslöst. Allgemeingültige, artspezifische SVG Schwellenwerte sind als Planungsgrundlage für Bypässe dringend erforderlich, um einen verzögerungsarmen Abstieg zu gewährleisten und so die Effizienz von Fischschutzsystemen deutlich zu erhöhen.

1.2 ZIELE

Das Projekt *OptiPass* soll es ermöglichen, nachvollziehbare und wissenschaftlich fundierte Empfehlungen für die Gestaltung von Fischabstiegen zu formulieren. Das Projekt leistet einen wichtigen Beitrag zum Schutz der Umwelt, indem es die Lebensraumvernetzung in Fließgewässern verbessert. Damit wird der negative Einfluss von Querbauwerken und Wasserkraftinstallationen vermindert und die regenerative Wasserkraft entscheidend umweltfreundlicher. Außerdem könnte im Einzelfall die Möglichkeit bestehen, Verluste wie einen Ertragsausfall durch unnötig hohe Abgaben in den Bypass, zu reduzieren. Durch die entwickelte Methodik können konkrete Hinweise für die Auslegung von Nachrüstlösungen und für den Bau von Neuanlagen gegeben werden.

Das Projekt verfolgt das Hauptziel, Schwellenwerte entscheidender hydraulischer Parameter für eine verzögerungsfreie Bypass-Passage abzuleiten. Im ersten Schritt erfolgt dies für Vertreter der Karpfenähnlichen (*Cyprinoidei*), als artenreichste Gruppe in mitteleuropäischen Fließgewässern. Weiterhin werden Vorschläge für die Einhaltung dieses Schwellenwertes in der Praxis erarbeitet. Um diese Ziele zu erreichen, werden folgende Untersuchungsschritte durchgeführt:

- Ethohydraulische Untersuchung zum Schwimmverhalten und potenziellen Reaktionen der Fische in Bypasseinläufen bei unterschiedlichen Strömungsbedingungen;
- Messung und detaillierte Charakterisierung der hydraulischen Bedingungen in 3 verschiedenen Modellsituationen;
- Beschreibung des Fischverhaltens vor Bypässen auf Basis objektiver und übertragbarer quantitativer Kriterien;
- Ableitung von artspezifischen SVG-Schwellenwerten für die verzögerungsfreie Passage unter zusätzlicher Berücksichtigung der absoluten Strömungsgeschwindigkeit;
- Empfehlungen für die Bypassgeometrie und angepasste Abflussabgabe unter Berücksichtigung von Fischschutz und Wirtschaftlichkeit.

Ein häufiger Kritikpunkt an ethohydraulischen Laborversuchen mit Fischen ist, dass sich diese in künstlicher Umgebung potenziell anders verhalten als in der Natur. Daher sollen die in den Labor-

versuchen gewonnenen Erkenntnisse im Freiland validiert werden. Hierzu wurde, das Fischverhalten an einer realen Wasserkraftanlage in einer Fallstudie untersucht. Die im EU-Projekt *Hydro4U* (<https://hydro4u.eu/>) geplante und 2024 in Betrieb genommene Wasserkraftanlage Shakhimardan in Zentralasien bot dem Konsortium dazu eine sehr gute Gelegenheit. Aufgrund der Projektbeteiligung von SJE im Projekt *Hydro4U* bot sich dem *OptiPass*-Verbund die Gelegenheit, eine Fallstudie am genannten Standort durchzuführen. Der dort vorgesehene Bypass für den Fischabstieg wurde sowohl über In-Situ-Messungen als auch durch numerische Modellierungen hydraulisch untersucht. Auf dieser Grundlage sollten die vorhandenen Strömungsbedingungen mit den in Laboruntersuchungen ermittelten Schwellenwerten verglichen und die Reaktionen von Karpfenähnlichen in-situ erfasst werden. Anhand der gewonnenen Informationen sind empirisch abgesicherte Aussagen zu Schwellenwerten zu treffen, welche die Optimierung von Anlagen ermöglichen, an denen die Fischableitung nicht oder mangelhaft funktioniert.

2 VORGEHENSWEISE UND METHODIK

2.1 PROJEKTABLAUF

Die in der Projektkonzeption geplante Ablauf (Abbildung 1) wurde weitgehend eingehalten. Zunächst erfolgte eine Literaturrecherche, um das Labormodell-Setup 1 entsprechend dem aktuellen Stand der Technik hydraulisch zu definieren. In diesem tritt ein lokaler, hoher SVG auf, welcher in vorangegangenen Forschungsarbeiten (*RETERO*-Projekt, Roth et al. 2024 & *MeMo*-Projekt, Bensing et al. 2022) als verhaltensbeeinflussender Strömungsparameter identifiziert werden konnte. Mit Hilfe von vorläufigen 2D-HN-Simulationen wurde das Modell-Setup 2 so entworfen, dass sich der SVG in Hauptfließrichtung der Versuchsrinne kontinuierlich erhöht. Zeitgleich erfolgte die Vorbereitung der Versuchsrinne an der TU Dresden, indem die erforderliche Videotechnik eingerichtet sowie Einbaumodule auf Basis der verfeinerte 2D HN-Modelle für die Umsetzung der Setups 1 und 2 gefertigt wurden. Für die Validierung der hydraulischen Situation in der Rinne fanden zunächst Strömungsmessungen statt bevor die Versuchsreihen in den Setups 1 und 2 durchgeführt wurden. Nach Auswertung der Versuche war es möglich bereits einen SVG -Schwellenwert für Cyprinoidei zu definieren, welcher die Grundlage für die Entwicklung der optimierten Einlauf-Geometrie mithilfe numerischer Verfahren für Setup 3 ermöglichte. In diesem Setup wird der SVG-Schwellenwert im gesamten Verlauf des Bypass-Modells nicht überschritten, um SVG bedingte Meidungsreaktionen weitgehend auszuschließen. Nach intensiver Vorbereitung wurde die Feldstudie in Usbekistan durchgeführt und abschließend die zweite Versuchsreihe (Setup 3) im Labor absolviert. Die nachfolgende Auswertung der Laborversuche (Setup 3) und Feldversuche diente der Validierung des SVG-Schwellenwertes, zum einem im Labor zum anderen in der Praxis.

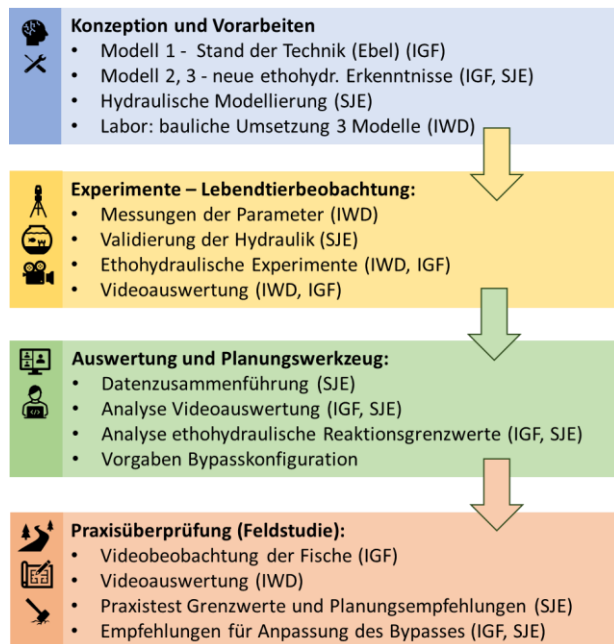


Abbildung 1: Geplanter Projektablauf

2.2 METHODIK ETHOHYDRAULISCHE LABORVERSUCHE

2.2.1 Laborrinne und Setups

Für die *OptiPass*-Laborversuche konnte auf eine ethohydraulische Versuchsrinne im Wasserbaulabor der TU Dresden zurückgegriffen werden, welche im Rahmen eines vorangegangenen Projekts (*RETERO*-Projekt) errichtet worden war. Durch Einbauten wurde die Rinnengeometrie so verändert, dass sie die erforderlichen hydraulischen Bedingungen für die ethohydraulischen Versuche aufwies.

Die Grundstruktur ist eine 30 m lange Rinne mit einem gemauerten, offenen ersten Teil, bestehend aus Quelltopf, Strömungsgleichrichter und Einlaufbereich (Abbildung 2). Der Einlaufbereich geht in das Kernstück der Rinne, einen aus Acrylglas und Holzträgern gefertigten Drucktunnel, über. Dieser ist auf einer Länge von 10 m aus zwei Raumrichtungen einsehbar, was eine Videobeobachtung in diesem Abschnitt erlaubt. Am Ende dieses Rinnenteils geht der Drucktunnel in ein offenes, gemauertes Gerinne über, welches als Beruhigungs- und Auslaufbereich dient. Der geschlossene Rinnenteil hat eine konstante Höhe von 0,4 m und weist ein Gefälle von 1,67 % ($\approx 1^\circ$) auf. Die ersten 7,5 m des Tunnels verjüngen sich konisch, von 2 m auf 0,45 m Breite, die weiteren 5 m Lauflänge sind mit einer konstanten Breite von 0,45 m konstruiert. Der konstant breite Bereich entspricht damit mit einem Querschnitt von 0,4 m x 0,45 m praxisüblichen Bypassabmessungen.

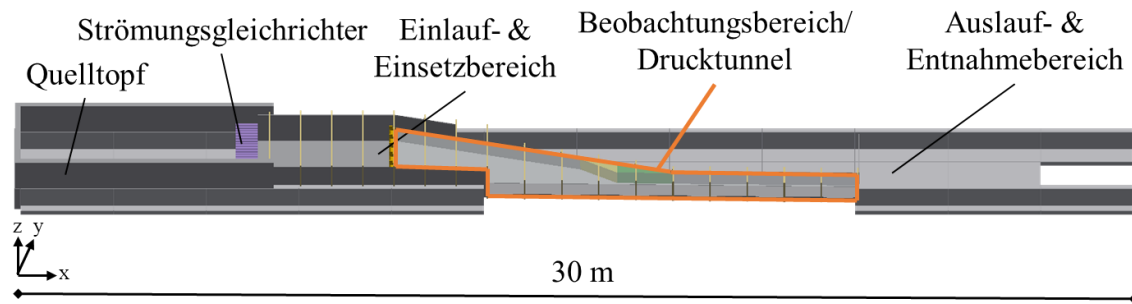


Abbildung 2: Grundstruktur der verwendeten Strömungsrinne, schematisch in gelb und grün sind die modularen Einbauteile dargestellt

Modulare Einbauteile ermöglichen es, verschiedene Situationen an Bypasseinstiegen zu simulieren. Für die Bearbeitung der Hauptfragestellung mittels ethohydraulischer Laborexperimente wurden in der Versuchsrinne drei Setups umgesetzt.

- Setup 1: Modell des Stands der Technik zur Überprüfung der Wirkung eines lokal großen Geschwindigkeitsgradient am Eingang des Bypasses auf die Passage der Fische flussabwärts.
- Setup 2: Lineare Verjüngung des Querschnitts vorm Bypasseinstieg mit damit einhergehender Erhöhung des räumlichen Geschwindigkeitsgradienten (SVG) zur Ermittlung des SVG -Schwellenwertes für Meidungsreaktionen
- Setup 3: Allmähliche Verjüngung des Querschnitts hin zum Bypasseinstieg durch eine gewölbte Wand zur Verringerung des SVG und Prüfung der Reduktion von Meidungsreaktionen (bei Berücksichtigung SVG -Schwellenwert aus Setup 2).

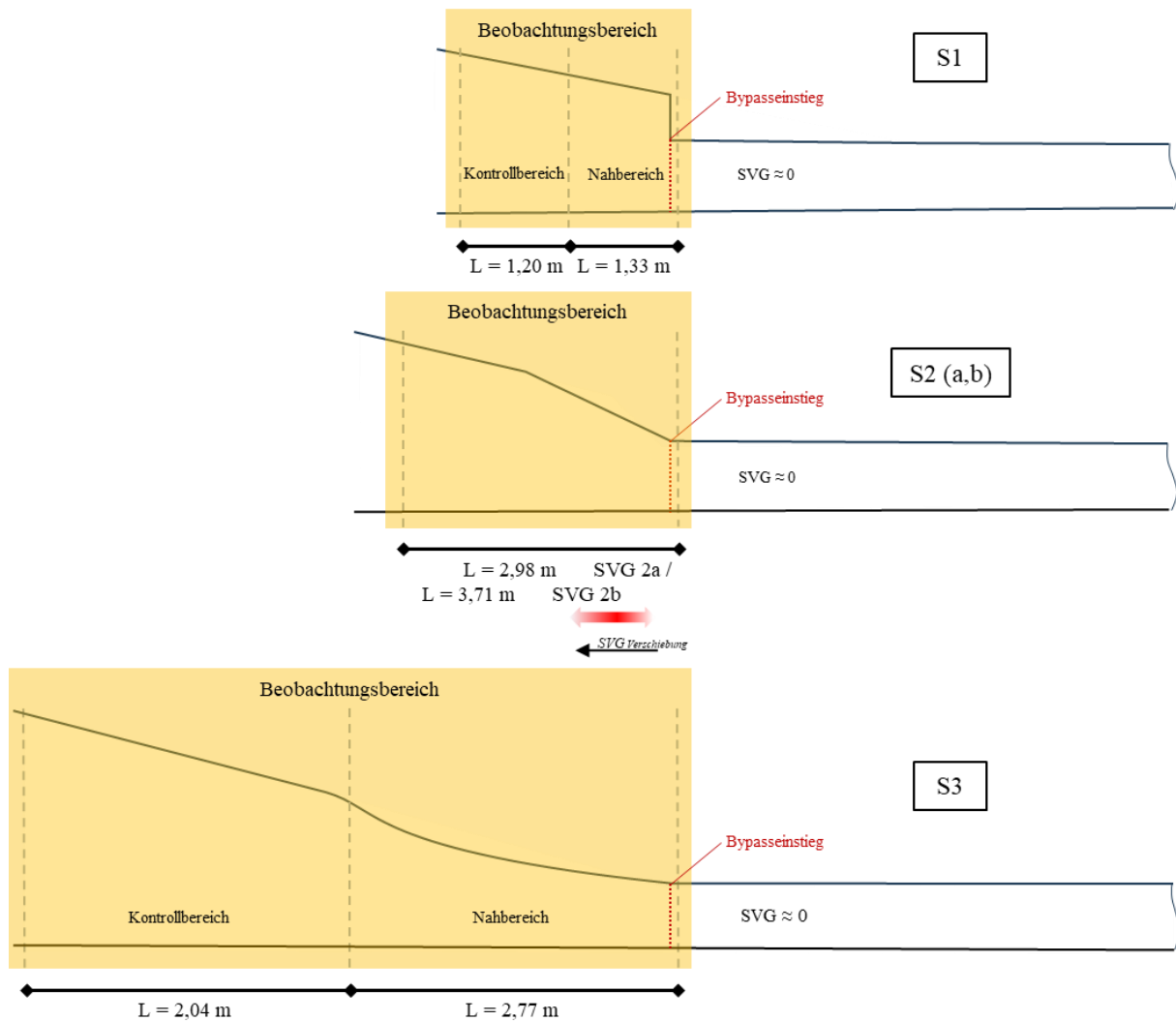


Abbildung 3: Ausbildung der drei Versuch-Setups, gelb dargestellt der Bereich vor dem Bypasseinstieg der videotekhnisch erfasst wird, im Nahbereich wird das „Einsteigen“ in den Bypass beobachtet, vorgelagert dient eine Strecke als Kontrollbereich (Skizzen nicht maßstäblich)

Jede Geometrie wurde mit Hilfe von 2D-HN-Simulationen (siehe Abschnitt 3.3) vorausberechnet. Diese dienen der Überprüfung, dass die Umgebungsvariablen innerhalb des gewünschten Bereichs liegen und dass die Bypass-Hydraulik, die an realen Standorten zu finden ist, entspricht. Der Modellierungsansatz erlaubt es außerdem, die kontinuierlichen Felder der Strömungsgeschwindigkeit und ihrer räumlichen Veränderungen (SVG) für die Korrelation des Fischpfades mit der Hydraulik zu nutzen, die sonst nur durch umfangreiche, engmaschige physikalische Messungen erfasst werden könnten.

2.2.2 2D-HN-Modellierung

Die Experimente von *OptiPass* wurden im Strömungskanal der TU Dresden durchgeführt, der ursprünglich für das *RETERO*-Projekt konzipiert war. Im *RETERO*-Projekt konnte nachgewiesen werden, dass die Strömungsgeschwindigkeit im Beobachtungsbereich mit ausreichender Genauigkeit durch ein zweidimensionales hydrodynamisch numerisches (2D-HN) Modell auf der Grundlage von

Flachwassergleichungen approximiert werden kann (Roth et al. 2024). Darüber hinaus hat sich das 2D-Modell als schneller und einfacher zu kalibrieren erwiesen als 3D-Modelle. Dies begründet die Verwendung desselben Ansatzes für die *OptiPass*-Simulationen.

Die 2D-HN-Simulationen wurden mit dem SRH-2D-Modell, Version 3.3.1, durchgeführt, welches auch die Modellierung von Druckströmungen ermöglicht (Lai 2008). Für die Erstellung des erforderlichen unstrukturierten Netzes sowie für die Visualisierung und Analyse der hydraulischen Ergebnisse wurde die Software SMS, Version 13.2 (AQUAVEO 2016), verwendet. Die Hauptmerkmale der Simulationen, einschließlich Randbedingungen, Netzparameter und wichtiger hydraulischer Eigenschaften, sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Netze der drei Modellvarianten decken den gesamten in Abbildung 2 dargestellten Versuchsbereich ab.

Die Elementgrößen betragen in allen Modellen 0,5 bis 2,5 cm. Die Simulationen wurden instationär durchgeführt, beginnend mit einem trockenen Sohlzustand und fortgesetzt, bis sich ein stationärer Zustand (Zufluss = Abfluss) einstellte. Der Rauheitsbeiwert nach Manning wurde in allen Modellen konstant auf $0,014 \text{ s/m}^{1/3}$ gesetzt. Die besten Kalibrierungsergebnisse wurden mit einem Wert von 0,05 für die Konstante A_{TURB} des parabolischen Turbulenzmodells von SRH-2D erzielt.

Tabelle 1: Hauptmerkmale der 2D-HN-Simulationen

Parameter	Setup			
	S1	S2a	S2b	S3
Zuflussrand: Q [m^3/s]	0,15	0,15	0,25	0,15
Abflussrand: H [m]	0,76	0,76	0,66	0,66
Mittlere Geschwindigkeit v_x nach Bypasseinstieg [m/s]	0,85	0,85	1,4	0,85
Maximaler SVG_x im Nahbereich [m/s/m]	4,0	3,0	5,2	0,25
Minimaler SVG_x im Nahbereich [m/s/m]	-1,15 (0,1)	0,12	0,2	0,1
Anzahl Elemente/Knoten	84 332 / 80 397	84 100 / 80 987		83 637 / 80 222

Zwei Strömungshauptkennwerte – die Geschwindigkeit v_x und der räumliche Geschwindigkeitsgradient SVG_x – beide entlang der x-Achse des Versuchserinnes – sind die Variablen, die zur Erklärung des Fischverhaltens in den Experimenten herangezogen werden.

Zur Verknüpfung mit den Fischreaktionen wurden die hydrodynamischen Variablen an den Knotenpunkten des unstrukturierten Netzes auf ein Raster mit einer Zellgröße von 1 cm interpoliert. Die Werte von SVG_x werden aus den v_x -Werten der benachbarten Gitterzellen berechnet.

Strömungsgeschwindigkeit und räumlicher Geschwindigkeitsgradient

In Abbildung 4 und Abbildung 5 sind die Verteilungen von v_x und SVG_x im Gerinne für den unmittelbaren Versuchsbereich (Kontrollbereich, Nahbereich, Einstieg in den Bypass) der insgesamt vier genutzten Setups dargestellt. Zur Vereinfachung und für eine bessere Vergleichbarkeit der hydraulischen Setup-Bedingungen sind in der Legende für den SVG_x keine negativen Werte abgebildet, die üblicherweise in Bereichen mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit auftreten. Eine Strömungsverzögerung kann ebenfalls Ablehnungsreaktionen hervorrufen und dadurch den Abstieg der Fische verzögern. Dieses Phänomen tritt in Fischbeobachtungsbereichen ausschließlich im Setup 1 (Stagnationszone an der linken Wand) auf.

Die im Auswertungsbereich des Kanals modellierten Strömungsgeschwindigkeiten v_x betragen im Setup 1 zwischen 0,4 m/s und 0,9 m/s. Die maximalen Geschwindigkeitswerte treten unmittelbar hinter der scharfen Ecke auf. In diesem Bereich tritt eine Strömungsablösung auf, die im weiteren Verlauf des Bypasses zu einer Verengung des Strömungsquerschnitts führt. Die SVG_x -Werte im Setup 1 erreichen im Querschnitt nahe der scharfen Ecke bis zu 4 m/s/m; die minimalen SVG_x -Werte in diesem Bereich (1,03 m/s/m – nahe der rechten Wand) sind immer noch sehr hoch. In der Stagnationszone treten lokal negative SVG_x -Werte bis $-1,15$ m/s/m auf, die auf eine Strömungsverzögerung hinweisen (siehe auch Tabelle 1).

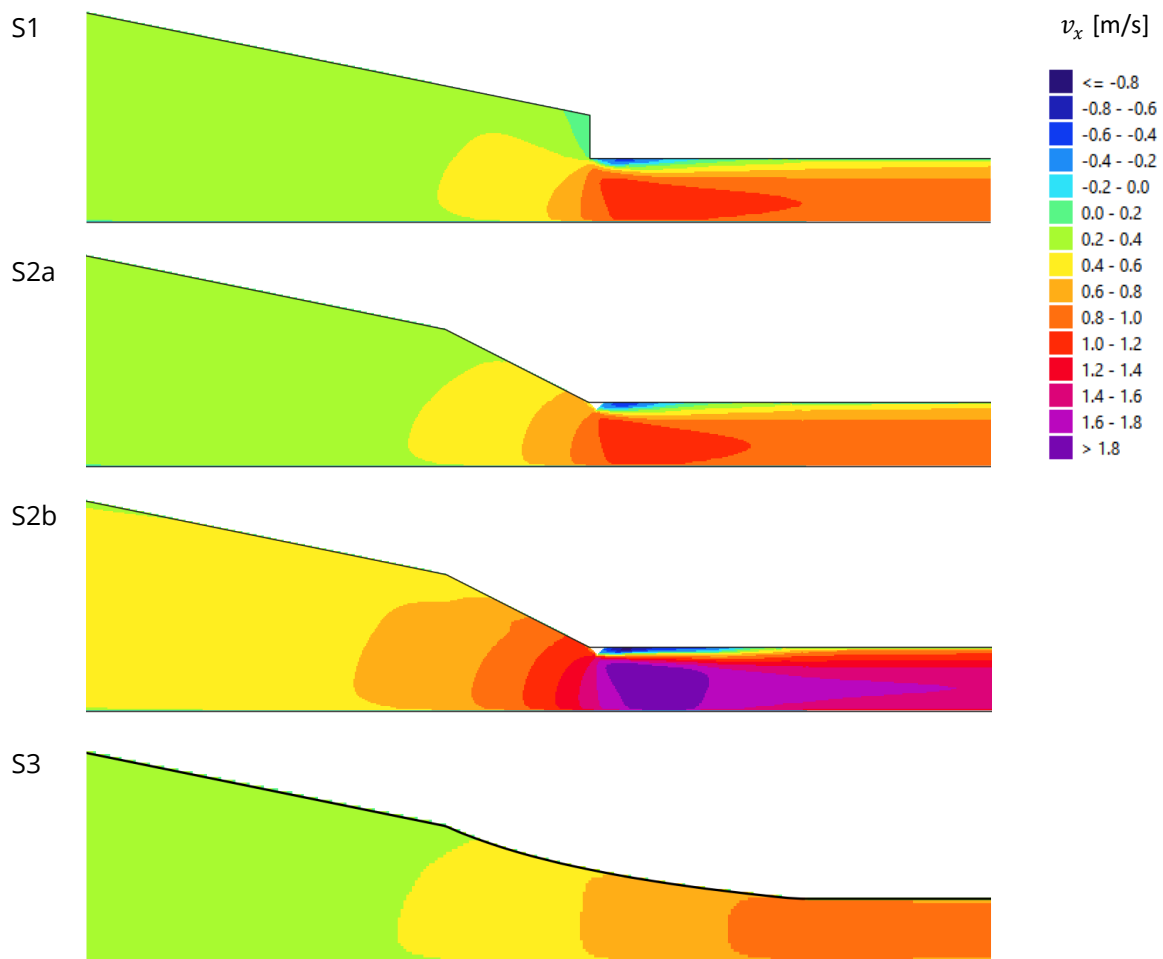


Abbildung 4: Draufsichten der v_x -Verteilungen in den Setups S1, S2a, S2b und S3

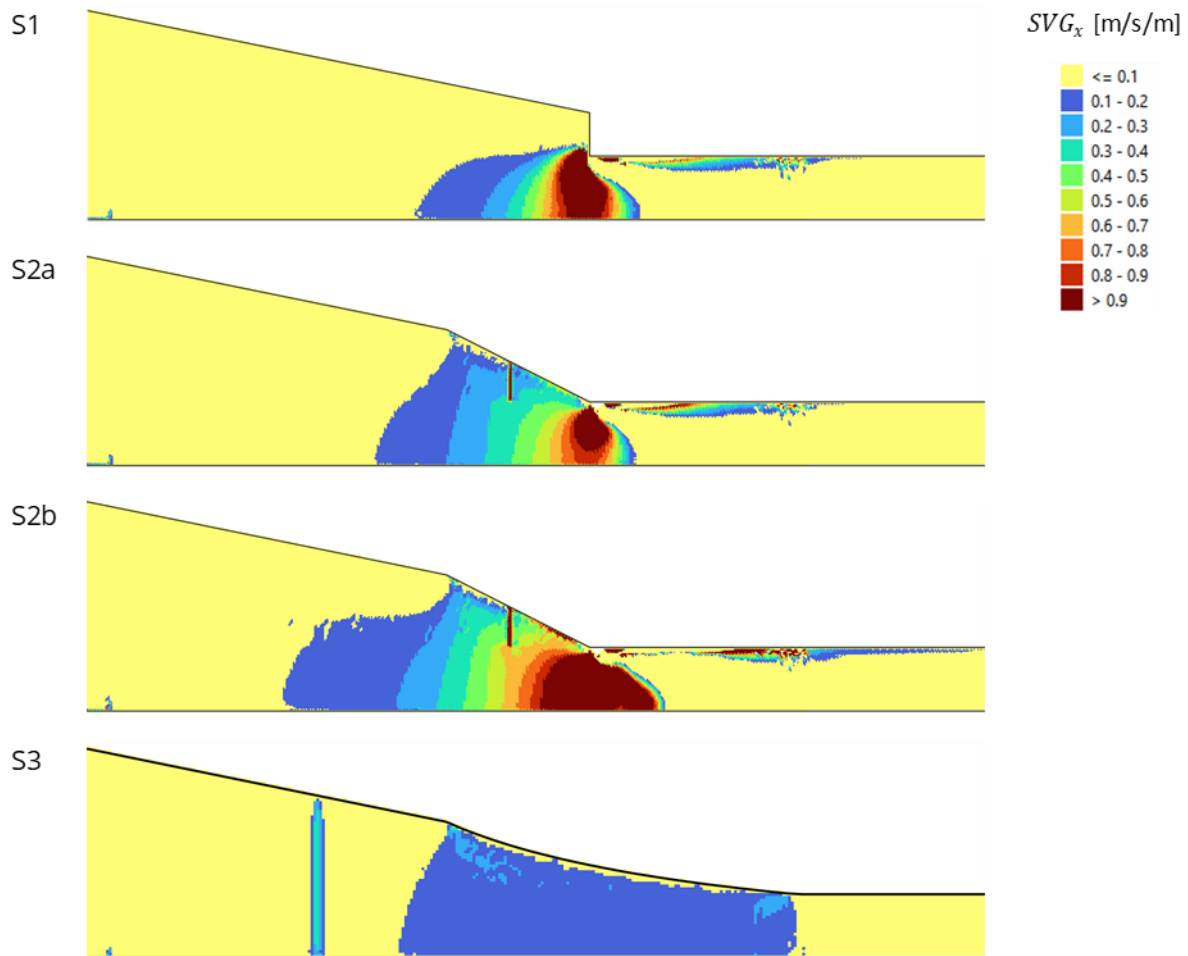


Abbildung 5: Draufsichten der SVG_x -Verteilungen in den Setups S1, S2a, S2b und S3

Da während der ersten Experimente in den Setups 2a und 2b beobachtet wurde, dass die Lichtkanäle des Versuchsgerinnes (deren Höhe etwa 1,5 bis 2 cm beträgt) für die Barben als bodenlebende Fische eine gewisse Attraktivität als Sohlstruktur aufwiesen, wurde für Setup 3 eine zusätzliche Plexiglasplatte zur Nivellierung des Bodens installiert und das Modellnetz dieser Experimente entsprechend angepasst. Obwohl die Wirkung der Plexiglasplatte in den Darstellungen der Strömungsgeschwindigkeit nicht sichtbar ist, zeigt sich ihr Einfluss auf die SVG-Werte. Dies lässt sich teilweise dadurch erklären, dass das 2D-Modell den lokalen Bodeneinfluss auf die gesamte Wassersäule projiziert. In der Realität ist die hydraulische Wirkung der Bodenplatte als eher gering einzustufen. Sie nimmt mit zunehmendem Abstand vom Boden zudem schnell ab. Ein besonderes Merkmal des Setups 2 ist ein vertikales dreieckiges Element mit einer Höhe von 5 cm, dass in den Hauptströmungsquerschnitt hineinragt in der Nähe des Bypass-Eingangs. Es wurde installiert, um die SVG-Werte so stark wie möglich zu erhöhen. Dieses Element verursacht eine Strömungsablösung und eine lokale Erhöhung der Geschwindigkeit und damit des Geschwindigkeitsgradienten.

Im Beobachtungsbereich des Versuchsgerinnes liegen die modellierten Strömungsgeschwindigkeiten v_x im Setup 2a zwischen 0,3 m/s und etwa 1 m/s. Im Setup 2b liegen sie in denselben Bereichen zwischen 0,5 m/s und 1,7 m/s. Die maximalen Geschwindigkeitswerte von 1,13 m/s in S2a und 2,12 m/s in S2b werden im Bereich der größten Strömungskontraktion, außerhalb des Beobachtungsbereiches erreicht. Der Punkt mit den Maxima liegt jeweils etwa 0,3 m (S2a) bzw. 0,4 m (S2b)

stromab der Kante des dreieckigen Hindernisses. Die Bandbreite der SVG_x -Werte beträgt im Durchschnitt 0,05 bis 0,86 m/s/m in S2a und 0,1 bis 1,43 m/s/m in S2b. Die höchsten Werte treten in der Nähe des dreieckigen Hindernisses an der linken Wand auf und betragen 3 m/s/m in S2a bzw. 5,2 m/s/m in S2b. Negative Werte von SVG_x wurden in den in den Experimenten S2a und S2b nicht vorhergesagt.

Gemäß den Zielen der Untersuchung wurde die Geometrie des Setups S3 so gestaltet, dass die SVG_x -Werte unter dem in den Setups S2a und S2b ermittelten Schwellenwert von 0,3 m/s/m bleiben. Obwohl die Werte von v_x in Kontroll- und Nahbereichen des Setups S3 ähnliche Werte wie im Experiment S2a aufweisen (0,25 bis 0,9 m/s), ermöglichte die spezielle Gerinneform, den SVG_x über die gesamte Länge des Nahbereichs bei einem Abfluss von 150 l/s unter 0,25 m/s/m zu halten. Die maximalen Werte des SVG_x treten an der linken Seite des Gerinnes nahe dem Übergang zum geraden Bypass-Abschnitt auf. Für diesen Setup wurden weder Strömungsablösungen noch Rezirkulationsbereiche berechnet.

Etwa 3,4 m stromauf des Bypasses mit konstanter Rinnenbreite war lokal ein Anstieg des SVG_x -Werts auf 0,37 m/s/m gegeben. Dieser Effekt wird auf die Installation der Plexiglasplatte mit einer Höhe von 1,5 cm zurückgeführt, die die Unebenheiten durch die Beleuchtungskanäle am Boden ausgleichen soll. Die hydraulische Wirkung der Platte wird im Modell mit hoher Wahrscheinlichkeit überschätzt. Eine Wahrnehmung der räumlich sehr begrenzten SVG -Änderung durch die bodenorientierte Barbe ist allerdings nicht ausgeschlossen.

Validierung 2D-HN-Simulationen

Eine genaue Abbildung der Strömungsfelder in den Experimenten ist in *OptiPass* von entscheidender Bedeutung, da die vorhergesagten SVG_x mit den Verhaltensbeobachtungen verknüpft werden. Diskrepanzen zwischen der modellierten und tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeit können zu Fehlinterpretationen führen. Daher spielt die erfolgreiche Validierung der Simulationsergebnisse vor der Videoauswertung eine wichtige Rolle.

Wie in Abbildung 6 dargestellt, misst der verwendete Fließgeschwindigkeits-Keilsensor der Firma *NIVUS* (Typ POA-V200/V2D0, Messtechnik Acoustic-Doppler-Velocimeter, ADV) die Geschwindigkeit im Messvolumen unter einem Winkel von 67,5°, ausgehend von der Messsonde des Geräts. Das *NIVUS*-Gerät ist für gleichförmige Strömungen konzipiert. Im vorliegenden Fall einer Validierung von numerischen Modellierungen wurden die Messungen aber als ausreichend genau angesehen.

Die in Abbildung 7 gezeigten Linien entsprechen der horizontalen Projektion des Messvolumens des *NIVUS*-Geräts. Um die modellierten Geschwindigkeitswerte mit den gemessenen vergleichen zu können, wurde die 2D-tiefengemittelte Modellgeschwindigkeit über diese projizierten Positionen gemittelt. Zusätzlich wurden die gemessenen vertikalen Geschwindigkeitsprofile zeitlich über $t_{mean} = 5$ min gemittelt.

Wie die Vergleichsdiagramme im Anhang zeigen, liegen die Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Geschwindigkeitswerten in den Kontroll- und Nahbereichen an den meisten Positionen unter 5 cm/s. Höhere Differenzen treten im geraden Abschnitt des Gerinnes auf (Positionen 04 und 06 in S1 sowie Positionen 04, 05, 06 in anderen Experimenten). Besonders im Experi-

ment S2b mit einem Gesamtabfluss von $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ und entsprechend höheren Strömungsgeschwindigkeiten im Gerinne scheint das Modell die Position der Strömungsablösung aufgrund des dreieckigen Hindernisses falsch vorherzusagen. Die Validierung der modellierten Strömungsgeschwindigkeit wurde nur für die Setups S1, S2a und S2b durchgeführt, da diese eine komplexere Hydraulik als Setup 3 aufweisen. Die Validierung des Setups S3 wird in der OptiPass Phase II erfolgen. Insgesamt aber sind die Ergebnisse der Validierung sehr gut und lassen darauf schließen, dass auch die berechneten SVG_x -Werte die hydraulische Situation in den Experimenten ausreichend genau widerspiegeln.

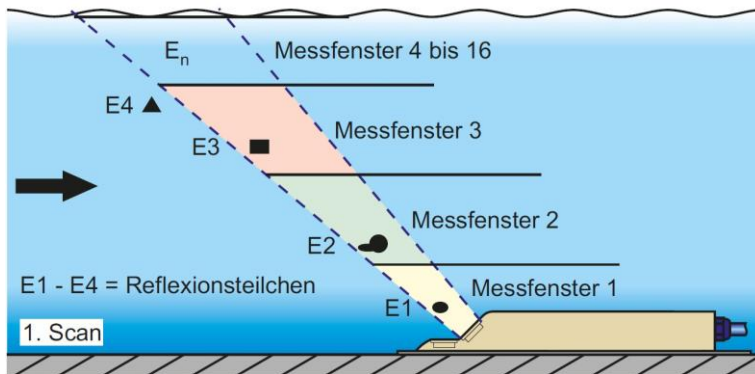
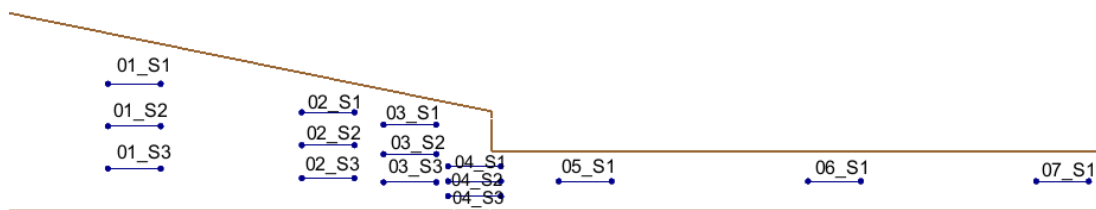


Abbildung 6: Eingesetzter Fließgeschwindigkeits-Keilsensor (ADV) und Messbereich (aus NIVUS 2015)

S1



S2a,b

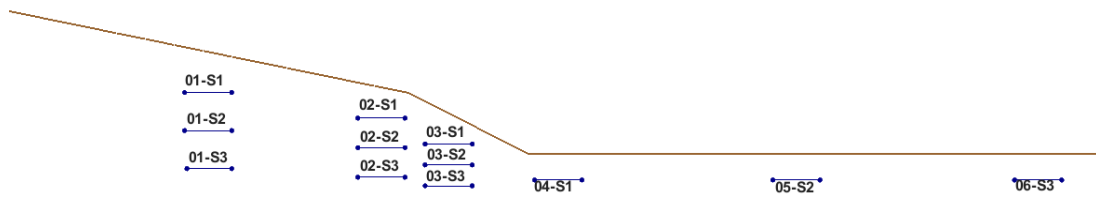


Abbildung 7: Draufsicht der Positionen der ADV-Messungen in den Setups S1 und S2a,b

2.2.3 Fischversuche

Probanden / Halterung

Die Versuche in allen 3 Rinnen-Setups erfolgten mit der Fischart Barbe (*Barbus barbus*) als Vertreter der *Cyprinoidei* (Abbildung 8). Die Totallänge der Fische betrug 15 bis 24 cm. Alle Versuche fanden im Dunkeln im Zeitraum zwischen 17:12 Uhr und 00:13 Uhr, ab Beginn der Dämmerung, statt. Die

Jungfische und Adulttiere vieler einheimischer Fischarten, so auch die Barbe, zeigen in der abendlichen Dämmerungsphase und den ersten Nachtstunden in der Regel eine gesteigerte Abstiegsaktivität (Ebel 2024; Schmalz 2002). Es ist daher in diesem Zeitraum bei Beibehaltung der natürlichen diurnalen Beleuchtungsdynamik auch bei Laborversuchen von einer erhöhten Abstiegs motivation auszugehen. Zur Gewährleistung einer stabilen Beleuchtungssituation während der Versuche war die gesamte Versuchsrinne sowie die Hälterbecken komplett eingehaust und durch schwarze Stoffbahnen vor Lichteinfall von außen geschützt.



Abbildung 8: Barbe, Freilandaufnahme (Wagner)

Die Beleuchtungsstärke innerhalb der Einhausung erreichte 4,2 bis 6 Lux (Mittelwert 4,6). Die Wassertemperatur während der Versuche betrug 13,4 bis 16,7°C (Mittelwert 16,5 °C). Im Setup 1, welcher den aktuellen Stand der Technik von Bypässen repräsentiert, sowie im Setup 3, dem hydraulisch optimierten Bypasseinstieg (siehe Abschnitt 2.2.1) kamen jeweils 40 Probanden zum Einsatz. In den Setups 2a und 2b zur Bestimmung des SVG-Schwellenwertes für ein ausgeprägtes Meidungsverhalten der Fische wurden jeweils 24, also insgesamt 48 Fische verwendet. Damit wurde die ursprünglich aus der biometrischen Planung hervorgegangene Anzahl von Versuchen umgesetzt.

Für den Vergleich des Fischverhaltens zwischen Setup 1 und 3 mit statistischen Verfahren wurde die Teilstichprobe mit insgesamt 56 Fischen herausgefiltert, welche sich hinsichtlich der Totallänge der Fische nicht signifikant unterschied. Die Prüfung des Unterschieds der Totallänge zwischen den beiden Gruppen erfolgte mittels Willcoxon-Tests, da die Daten nicht normalverteilt waren. Das Ergebnis ($W = 284,5$, $p\text{-value} = 0,072$) zeigt, dass sich die Teilstichproben hinsichtlich der Totallänge der Probanden nicht mehr unterschieden. Aufgrund der einheitlichen Totallänge ist ausgeschlossen, dass Effekte hydraulischer Parameter durch die Körperlänge und damit der korrelierten Schwimmleistung, überlagert werden.

Tabelle 2: Gesamtanzahl der Fische und für die Analyse nutzbaren pro Versuchssetup, ihre Totallänge (TL) mit Standardabweichung (SD), die Wassertemperatur während der Versuche und die theoretische Sprintgeschwindigkeit (u_{sprint}) der Versuchsfische (Modellgrundlagen: maximale Schwimmdauer von 10 s eines rheophilen Fisches; Modelle von Ebel 2013)

Setup	N _{Fisch,gesamt}	N _{Fisch,Analyse}	Mittlere TL [m]	SD TL [m]	Masse [g]	SD Masse [g]	u_{sprint}
1	40	38	18,7	2,0	66,9	23,5	1,67
2a	24	22	17,1	2,1	50,5	17,7	1,57
2b	24	23	16,8	1,7	49,5	17,3	1,56
3	40	40	20,0	1,5	50,0	12,2	1,71

Tabelle 3: Anzahl der Fische der beiden Teilstichproben mit übereinstimmender Totallänge der Probanden im Versuchssetup 1 und 3, ihre Totallänge (TL) mit Standardabweichung (SD), die Wassertemperatur während der Versuche und die theoretische Sprintgeschwindigkeit der Versuchsfische (Modellgrundlagen: maximale Schwimmdauer von 10 s eines rheophilen Fisches; Modelle von Ebel 2013)

Setup	N _{Fisch,Analyse}	Mittlere TL [m]	SD TL [m]	Masse [g]	SD Masse [g]	u_{sprint}
1	27	19,4	1,7	73,8	22,8	1,72
3	29	19,5	1,2	59,2	10,0	1,68

Bei den Versuchen kam jeweils ein einzelner Fisch pro Versuch zum Einsatz, um Effekte der Interaktionen zwischen den Fischen auszuschließen. Die Tiere wurde in einem geschlossenen 15-Liter-Eimer vom Hälterbecken zum Einsetzungspunkt in der Versuchsrinne transportiert und mit einem durchströmten Transportshuttle an den Start des Beobachtungsbereich des geschlossenen Rinnebereiches verbracht. Nach Öffnen des Behälters konnten die Fische frei motiviert ausschwimmen. Durch den Transport der Fische in den Beobachtungsbereich war sichergestellt, dass die Fische sofort einen deutlichen Strömungsreiz wahrnehmen konnten, der stromauf in der Versuchsrinne aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten von $v_x < 0,27$ m/s gering ausgeprägt war. Die Versuche dauerten maximal 45 Minuten wurden aber eher beendet, sobald der Fisch den Strömungskanal vollständig durchquert hatte. Nach erfolgtem Abstieg wurden die Fische mittels Kescher aus dem unteren Ruhebecken gefangen und in die Hälterungsbecken rückgeführt. Jeder Fisch wurde während der Studie nur einmalig verwendet, um den Einfluss von Lerneffekten auf die Ergebnisse auszuschließen. Die Versuche wurden unter Berücksichtigung des Tierschutzes geplant und von der zuständigen Behörde des Landes Sachsen, der Landesdirektion Sachsen (Genehmigungsnummer TV 58/2024), gemäß den europäischen Tierschutzgesetzen genehmigt.

Ethohydraulische Hypothesen

Den in OptiPass durchgeführten ethohydraulischen Experimenten lagen drei Grundhypothesen zu Grunde:


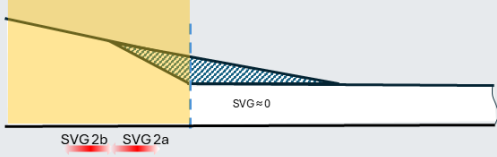
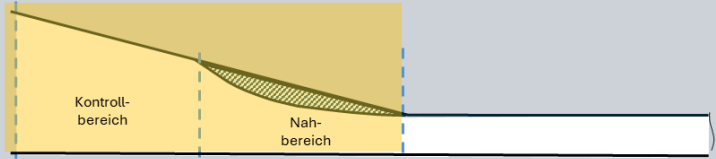
Hypothese 1 - Setup 1: Ein starker Geschwindigkeitsgradient, wie er gegenwärtig an den meisten Bypasseinstiegen vorkommt, löst bei vielen stromabwärts schwimmenden Fischen Meidungsreaktionen aus.

Hypothese 2 - Setup 2: Die Wahrscheinlichkeit einer Meidungsreaktion der Fische steigt bei Überschreitung eines Schwellenwertes des Geschwindigkeitsgradienten (SVG – spatial velocity gradient) signifikant an.

Hypothese 3 – Setup 3: Sofern die Geschwindigkeitsgradienten im Bypasseinstieg nur gering sind und den Schwellenwert unterschreiten, treten signifikant weniger Meidungsreaktionen auf als im Setup 1.

Als Prüfgröße für die Hypothesen 1 und 3 dienten die Anzahl von Meidungsreaktionen, normiert auf eine Fließstrecke von 1 m in Richtung der x-Achse. Es erfolgte ein Vergleich der Anzahl von Reaktionen im Kontrollbereich mit einer Strömungsgeschwindigkeit $v_x \leq 0,4$ m/s und einem $SVG_x < 0,1$ m/s/m zur Anzahl im Nahbereich vor dem Bypass wo ein SVG_x von 0,1 m/s/m deutlich überschritten wurde. Der Prüfung von Hypothese 1 wurde die Annahme zugrunde gelegt, dass aufgrund der starken Beschleunigung des Wassers im Nahbereich vor dem Bypasseinstieg mehr Meidungsreaktionen zu verzeichnen sind als im Kontrollbereich stromauf (Abbildung 9). Für Hypothese 3 war zu prüfen, ob nach Optimierung der Einlaufgeometrie und damit der Reduktion des SVG unter den mit Setup 2 ermittelten Schwellenwert sich die Anzahl der Meidungsreaktionen im Nahbereich des Bypasseinstiegs nicht mehr signifikant von denen im Kontrollbereich unterscheidet (Abbildung 9).

Der Vergleich der Reaktionsanzahl zwischen den Zonen erfolgte nach Testung auf Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test) und dem Nachweis, dass die Daten nicht normalverteilt waren, mit einem Willcoxon-Test. Zur Bestimmung des SVG -Schwellenwertes, bei dessen Überschreitung ein Anstieg der Anzahl von Meidungsreaktionen zu beobachten war, wurden die Daten aus Setup 2a und 2b mit Hilfe Conditional Inference Trees analysiert (Abbildung 9). Conditional Inference Trees gehören zur statistischen Methode der Entscheidungsbäume. Sie arbeiten mit statistischen Tests, um herauszufinden, welche Variablen für eine möglichst gute Gruppentrennung bezogen auf eine abhängige Variable, in unserem Fall der Reaktionsanzahl, wichtig sind. Sie prüfen bei jedem Schritt, ob ein Zusammenhang zwischen einer Variablen und dem Ergebnis besteht, und teilen die Daten nur dann auf, wenn dieser Zusammenhang signifikant ist. Dadurch entstehen oft objektivere und weniger verzerrte Bäume als bei herkömmlichen Entscheidungsbaum-Methoden. Als unabhängige Variablen flossen der Median des SVG sowie der Strömungsgeschwindigkeit innerhalb 8,5 cm breiter Rinnen-Segmenten (1/2 des TL medians) entlang der x-Achse ein.

Set-up	Skizze Rinnensetup	Untersuchungsvariablen und Hypothesen
1		<p>Variable: streckennormierte Anzahl Meidungsreaktionen in Kontroll- & Nahbereich ($N_{\text{Meid.,K}}$ $N_{\text{Meid.,N}}$)</p> <p>Test Hypothesis: $N_{\text{Meid.,K}} < N_{\text{Meid.,N}}$</p> <p>Method: Willcoxon-Test</p>
2 (a, b)		<p>Variable : Anzahl Meidungsreaktionen in 8,5 cm-Sektoren entlang x-Achse)</p> <p>Test Hypothesis : $N_{\text{Meid.}}$ steigt ab SVG-Grenzwert signifikant an</p> <p>Methode: Conditional Inference Trees</p>
3		<p>Variable: streckennormierte Anzahl Meidungsreaktionen in Kontroll- & Nahbereich ($N_{\text{Meid.,K}}$ $N_{\text{Meid.,N}}$)</p> <p>Test Hypothesis: $N_{\text{Meid.,K}} = N_{\text{Meid.,N}}$</p> <p>Method: Willcoxon-Test</p>

Beobachtungsbereich

Abbildung 9: Draufsichten der räumlichen Anordnung der Kontroll- und Nahbereich sowie der Prüfgrößen und die drei den ethohydraulischen Versuchen zugrunde liegenden Hypothesen

Die Erfassung des Fischverhaltens erfolgte anhand quantitativer Parameter. Hierfür wird das Verhalten in drei Komponenten unterteilt: Aktivität, Bewegung und Reaktion. Jede dieser Komponenten kann anhand der Daten der Schwimmpfade der Fische mithilfe mathematischer Algorithmen quantifiziert werden (Kopecki *et al.* 2025; Roth *et al.* 2024). Dieser Ansatz gewährleistet eine hohe Reproduzierbarkeit der Daten und ermöglicht Vergleiche zwischen verschiedenen Versuchsanordnungen und Fischarten, selbst wenn Verhaltensänderungen visuell nicht wahrnehmbar sind.

Anhand der relativen Schwimmgeschwindigkeit u_{rel} und deren Verhältnis zur Strömungsgeschwindigkeit v_x , sind fünf grundlegende Bewegungsmodi unterscheidbar, welche die Bewegungsrichtung, die Positionsänderung und die rheotaktische Ausrichtung des Fisches während eines bestimmten Zeitschritts eindeutig beschreiben (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Grundbewegungsmodi in ethohydraulischen Experimenten, charakterisiert durch die Kombination von einem äußeren Betrachter wahrnehmbaren Absolutgeschwindigkeit des Fisches u_{abs} mit der Strömungsgeschwindigkeit v_x . Daraus resultiert die Relativgeschwindigkeit des Fisches u_{rel} sowie die rheotaktische Ausrichtung (RN = rheotaktisch negativ, RP = rheotaktisch positiv).

Bewegungsmodus	Bewegung des Fisches	Rheotaxis	Geschwindigkeiten		
			v_x	u_{rel}	u_{abs}
1	Aktiv stromab	RN	→	→	→
2	Passive Drift	RN oder RP	→	0	→
3	Aktive Drift	RP	→	←	→
4	Stationär	RP	→	←	0
5	Aktiv stromaufwärts	RP	→	←	←

Die Quantifizierung der absoluten Schwimmgeschwindigkeit erfolgte anhand der Trackingdaten der Fische, die korrespondierenden Strömungsgeschwindigkeiten stammen aus der hydraulischen Modellierung. Die Schwimmpfade der Fische wurde mittels Infrarot-Videotracking im Dunkeln und störungsfrei aufgezeichnet. Als Grundlage der weiteren Auswertung wurde bestimmt, wo die Fische von einem Bewegungsmodus in einen anderen wechselten. So ein Wechsel wird als Reaktion der Fische auf intrinsische oder extrinsische Reize gewertet. Sofern dabei in einen Bewegungsmodus gewechselt wurde, der eine stärkere Verzögerung des Fischabstiegs zur Folge hatte, wurde dies als Meidungsreaktion eingestuft.

Videotracking

Die in Abschnitt 2.2.1 beschriebene Versuchsrinne wird von insgesamt 10 Kameras überwacht. Dabei sind 6 Kameras über dem Druckbereich der Rinne positioniert. Davon zeichnen drei die Fischbewegungen im Kontroll- und im Nahbereich des Bypasseinstiegs mit einer Auflösung von 1280 px x 1024 px und einer Bildrate von 40 Hz auf. Die restlichen drei Kameras in der Draufsicht dienen ebenso wie 4 seitlich in die Rinne blickende Kameras der Live-Bild-Überwachung vor und nach dem relevanten Bereich während der Versuchsdurchführung. Die Tiere erscheinen im Videomaterial als schwarze Silhouetten vor hellem Hintergrund (Abbildung 18). Dieser wird durch aktive Hintergrundbeleuchtung mit Infrarotlicht in einer Wellenlänge von 850 nm erreicht. Nach Adam and Lehmann (2011) ist dies für Fische nicht sichtbar und Infrarotlicht mit Wellenlängen über 750 nm können in Fischexperimenten verwendet werden, um „dunkle“ Bedingungen zu simulieren, ohne das Verhalten zu beeinträchtigen (Beach 1978).

Die digitalen 2D-Fischpfade werden mit der kommerziellen Software *Ethovision XT* (Version 17, Noldus, Niederlande) erstellt. Für jeden Frame sind Kopf-, Mittel- und Schwanzpunkt exakt positioniert und können durch eine vordefinierte Kalibrierung in die Koordinaten in der Versuchsrinne umgerechnet werden. Somit lassen sich Parameter wie Schwimmgeschwindigkeit oder Strömungsgradient des Fisches exakt berechnen.

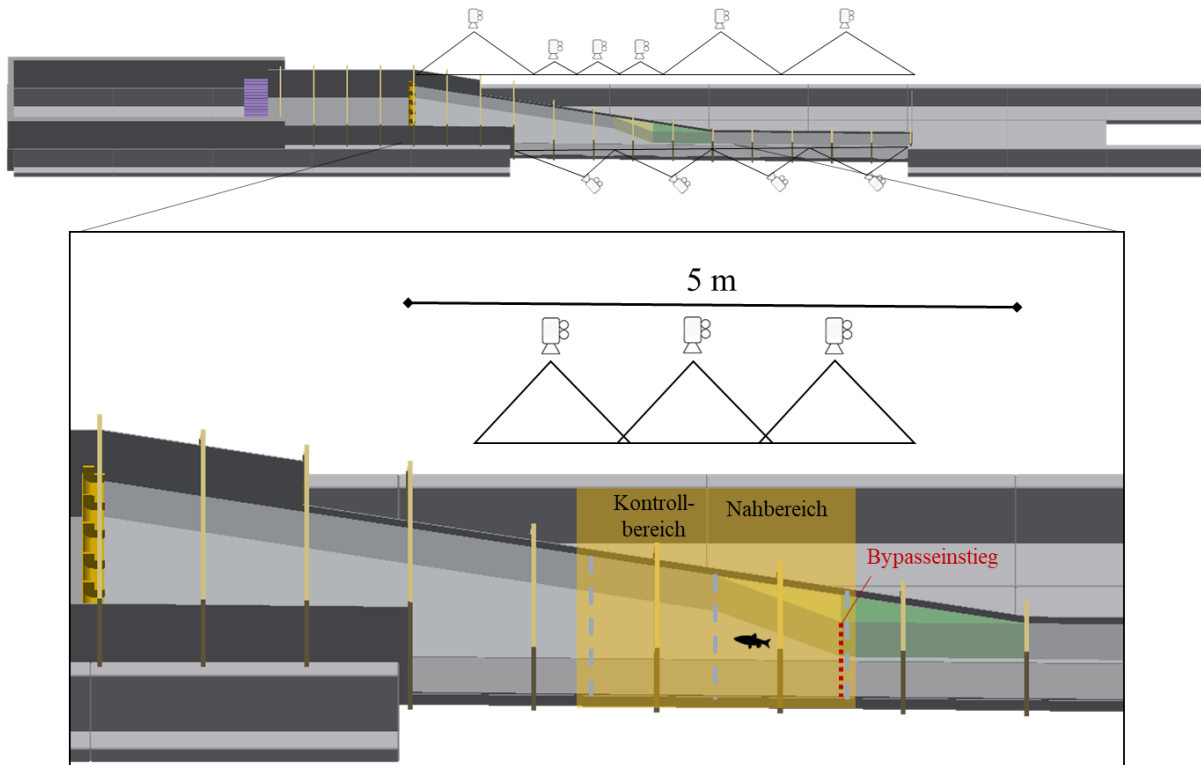


Abbildung 10: Aufbau des Kamerasystems und Darstellung der Aufzeichnung des Beobachtungsbereichs bestehend aus Kontroll- und Nahbereich vorm Bypasseinstieg

Auswertung der Fischpfade

Die Auswertung der Rohdaten aus dem Videotracking wurde mit einer im Rahmen des Projekts *RETERO* entwickelten in-house Datenverknüpfungssoftware durchgeführt. Da sich der Großteil der Fische während der Versuche nahe dem Boden des Gerinnes bewegte, wurden ausschließlich die Aufnahmen der Kameras von oben ausgewertet, was zu zweidimensionalen Echtzeit-Trajektorien führte.

Die entwickelte Software ermöglicht:

- die Transformation der Bildkoordinaten in Modellkoordinaten unter Verwendung der Kamerakalibrierungsdaten,
- die Zusammenführung synchronisierter Kameraaufnahmen zu kombinierten Trajektorien für jedes einzelne Fischindividuum,
- die Glättung der Tracking-Daten, um Fehler aus der manuellen Nachverfolgung zu minimieren,
- die Verknüpfung der Tracking-Daten mit den Ergebnissen der hydrodynamischen Modellierung sowie
- die Berechnung beobachteter und tatsächlicher Schwimmgeschwindigkeiten.

Die Methodik zur Quantifizierung der Fischreaktionen ist in Kopecki et al. (2025) beschrieben.

Während ihres Abstiegs im Gerinne orientieren sich die Fische in den *OptiPass*-Experimenten die meiste Zeit entlang der Hauptfließrichtung. Dabei zeigen sie sowohl positiv als auch negativ rheotaktisches Verhalten.

Da die Hauptströmungsrichtung im Beobachtungsbereich nahezu vollständig mit der x-Achse übereinstimmt, besteht zwischen der relativen Schwimmgeschwindigkeit u_{rel} , der absoluten Geschwindigkeit u_{abs} (aus Videotracking abgeleitet, sogenannte Bodengeschwindigkeit) und der Längskomponente der Strömungsgeschwindigkeit v_x folgender Zusammenhang:

$$u_{rel} = u_{abs} - v_x \quad (1)$$

Die Strömungsgeschwindigkeit v_x zur Berechnung der relativen Geschwindigkeit wurde aus dem 2D-HN-Modell (siehe 2.2.2) entnommen, während die absolute Geschwindigkeit u_{abs} aus den nachverarbeiteten Positionen des Fischkörperzentrums aus der Videoanalyse mit einem Zeitintervall von 0,025 s (entspricht 40 Hz) berechnet wurde.

Durch den Vergleich der Beträge und Richtungen dieser Geschwindigkeitskomponenten lassen sich fünf Bewegungsmodi der Fische unterscheiden, wie in Tabelle 4 dargestellt:

- aktive Bewegung abwärts (rheotaktisch negativ),
- passives Driften (rheotaktisch negativ oder positiv),
- aktives Driften,
- stationäres Verhalten,
- aktive Bewegung stromaufwärts (rheotaktisch positiv).

Um kleinere Ungenauigkeiten der hydrodynamischen Modellierung zu berücksichtigen, wurde ein Schwellwert von 0,1 m/s festgelegt, um die Bewegungsmodi voneinander abzugrenzen.

So wurde beispielsweise der Modus „passives Driften“ jenen Beobachtungspunkten zugeordnet, an denen die Bodengeschwindigkeit u_{abs} nicht exakt der Strömungsgeschwindigkeit v_x entsprach, sondern innerhalb des Bereichs $v_x \pm 0.1$ m/s lag. Diesen Schwellwert wurde für das gesamte Gerinne und alle Setups konstant beibehalten.

2.3 METHODIK FELDSTUDIE

2.3.1 Untersuchungsstandort

Die Wasserkraftanlage Shakhimardan (HPP) liegt am Fluss Koxu im usbekischen Exklave Shakhimardan, umgeben von kirgischem Gebiet, und wurde im Rahmen des *HYDRO4U*-Projekts (<https://hydro4u.eu/>) gebaut. *HYDRO4U* hat zum Ziel, europäische Kleinwasserkraft-Technologien in Zentralasien zu testen und deren Vorteile in Pilotanlagen zu demonstrieren. Das Projekt wird im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogramms „Horizont 2020“ der Europäischen Union finanziert. In Shakhimardan handelt es sich um ein Ausleitungskraftwerk mit einer Fallhöhe von etwa 80 Metern und einer Nennleistung von 2,4 MW. Das Kraftwerk besitzt zwei identische Francis-

Turbineneinheiten, die jeweils in einer Doppelcontaineranlage untergebracht sind, mit einem zusätzlichen Container für das Steuerungssystem. Eine bestehende, in den 1980er Jahren erbaute aber nie betriebene Druckleitung mit Einlauf wurde neugestaltet und modernisiert, um aktuellen Sicherheits- und Nachhaltigkeitsanforderungen zu entsprechen. Es handelt sich um ein Laufwasserkraftwerk ohne nennenswertes Speichervolumen am Einlaufbauwerk der Druckleitung.

Um die Fischwanderung in beide Richtungen zu erleichtern, wurde die Einlaufkonstruktion mit einem vertikalen Schlitzpass für die Wanderung stromaufwärts und einem Bypass für die Wanderung stromabwärts ausgestattet. Um zu verhindern, dass stromabwärts wandernde Fische in die Druckleitung gelangen, wurde vor dem Einlauf ein abgewinkelter vertikaler Fischleitrechen installiert. Der Stababstand beträgt 20 mm, was den Eintrag von Geschwemmsel und Fischen etwa ab 20 cm Tottallänge verhindert, jedoch nicht ausreicht, um Jungfische der Zeigerart Snow Trout (*Schizothorax eurycephalus*) mechanisch am Einschwimmen zu hindern. Der gesamte Rechen weist einen flachen Winkel zur Hauptströmungsrichtung auf, um abstiegswillige Fische in den direkt am unteren Ende anschließenden Bypasseinlauf zu leiten. Der Bypass ist ein ca. 40 cm breiter Betonkanal, dessen Einlauf bis zum Gewässergrund reicht. Innerhalb des Kanals nimmt die Strömungsgeschwindigkeit, aufgrund der nach oben geführten Sohle, allmählich zu und geht schließlich in ein Stahlrohr über, das die Fische stromabwärts transportiert. Die Kraftwerkanordnung ist in Abbildung 11 dargestellt.

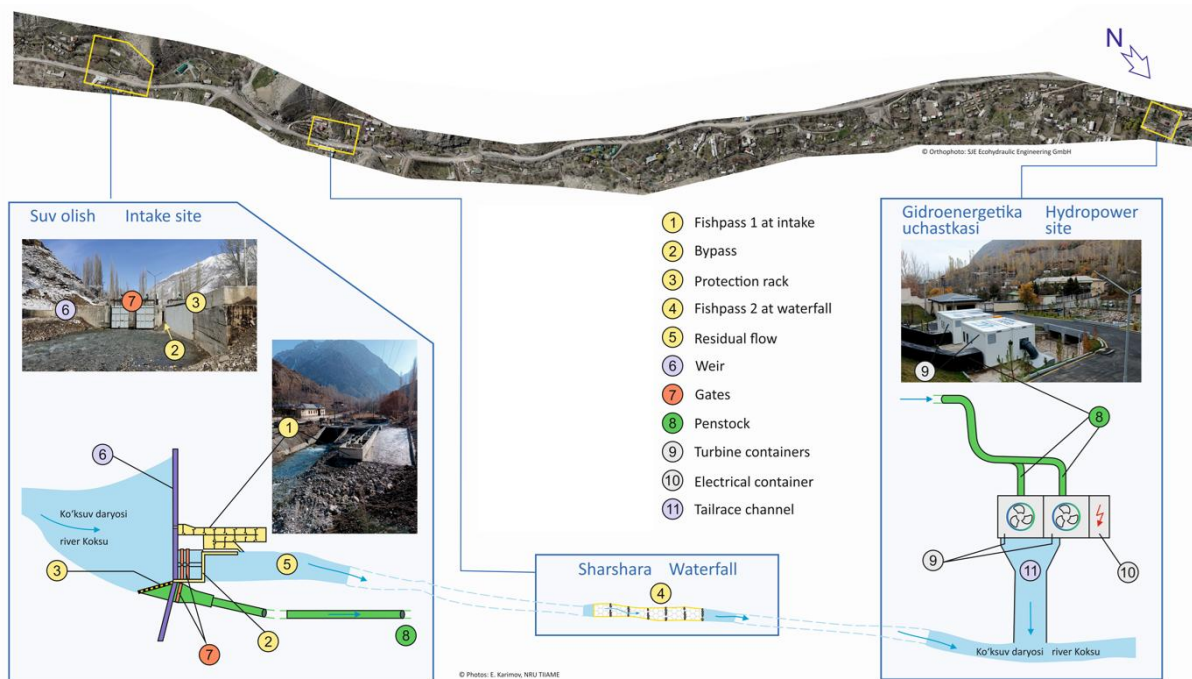


Abbildung 11: Schema des Kraftwerks Shakhimardan und der zugehörigen Fischschutzeinrichtungen

2.3.2 Hydraulik

Während der Fischversuche war das Kraftwerk aufgrund eines Problems mit der Druckleitung außer Betrieb. Daher strömte kein Wasser durch das Rechenbauwerk zu den Turbinen. Der Wasser-

spiegel des Stauraums lag über dem Bemessungswert, was zu einem Notüberlauf und infolgedessen zu erhöhten Abflüssen über den Fischpass und den Bypass führte. Basierend auf den Geschwindigkeitsmessungen lag der Bypass-Abfluss während der Fischversuche bei etwa 145 l/s.

Wie bei den Laborversuchen wurde das Strömungsfeld im Bypass des Wasserkraftwerks Shakhimardan mit einem 2D-HN-Modell simuliert, um die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit und des räumlichen Geschwindigkeitsgradienten (SVG) in der realisierten Geometrie zu berechnen. Die Simulationen wurden, wie auch bei den Laborversuchen, mit dem Modell SRH2D durchgeführt (siehe 2.2.2).

Die mittlere Größe der Modellelemente betrug etwa 1,5 cm, das Rechenetz bestand aus 5763 viereckigen Elementen mit insgesamt 6053 Knoten. Die Simulationen wurden instationär durchgeführt. Die Modell-Rauheit nach Manning wurde konstant auf $0,01 \text{ s/m}^{1/3}$ gesetzt. Der Parameter A_{TURB} im parabolischen Turbulenzmodell von SRH2D wurde auf den Standardwert 0,7 eingestellt. Die Draufsicht des Netzes mit Sohlhöhen sowie die berechneten Verteilungen der Strömungsgeschwindigkeit v und des SVG bei einem Durchfluss von 145 l/s sind in Abbildung 13 dargestellt. Die hydrodynamischen Variablen wurden von den Modellknoten des unstrukturierten Netzes auf ein Raster mit 1 cm Auflösung interpoliert, um sie mit den Fischreaktionen zu verknüpfen.

Strömungsgeschwindigkeit und räumlicher Geschwindigkeitsgradient

Der Bypass wurde zwar planmäßig mit einem sich allmählich verengenden Querschnitt ausgeführt, er weist jedoch am Übergang in das bestehende Bauwerk ein abrupte Querschnittsverengung auf. Diese Diskontinuität führt zu einer starken lokalen Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit, anschließender Strömungsablösung und hohen Geschwindigkeitsgradienten.

Die Strömungsgeschwindigkeit nimmt am Beginn des Bypasses über die ersten zwei Meter von etwa 0,25 m/s auf 0,5 m/s stetig zu (siehe Abbildung 13). Auf den folgenden 30 cm steigt sie weiter an und erreicht 0,74 m/s direkt vor der beschriebenen Diskontinuität. Dieser deutliche Anstieg ist in der starken Querschnittsverengung durch die steil ansteigende Kanalsole begründet und aus Sicht der gewünschten allmählichen Strömungsbeschleunigung nicht optimal.

Die abrupte Querschnittsverengung am Übergang zum alten Bauwerksteil führt zu einer plötzlichen starken Geschwindigkeitszunahme, wobei maximale Werte von etwa 1,0 m/s erreicht werden. Dies verursacht eine entsprechende Zunahme des SVG, der laut Simulation mittlere Werte von 1,44 m/s/m in einer Entfernung von ca. 2,3 m zum Bypass-Einlauf erreicht.

Eine zusätzliche Simulation mit einem Bypass-Abfluss von 77 l/s (entsprechend der Situation im Herbst 2024), der dem Bemessungsabfluss näherkommt, zeigt ebenfalls erhöhte SVG-Werte im Bereich der abrupten Querschnittsänderung (siehe Abbildung 13). Unabhängig vom tatsächlichen Abfluss liegen die Werte somit deutlich über dem zuvor ermittelten SVG-Schwellenwert.

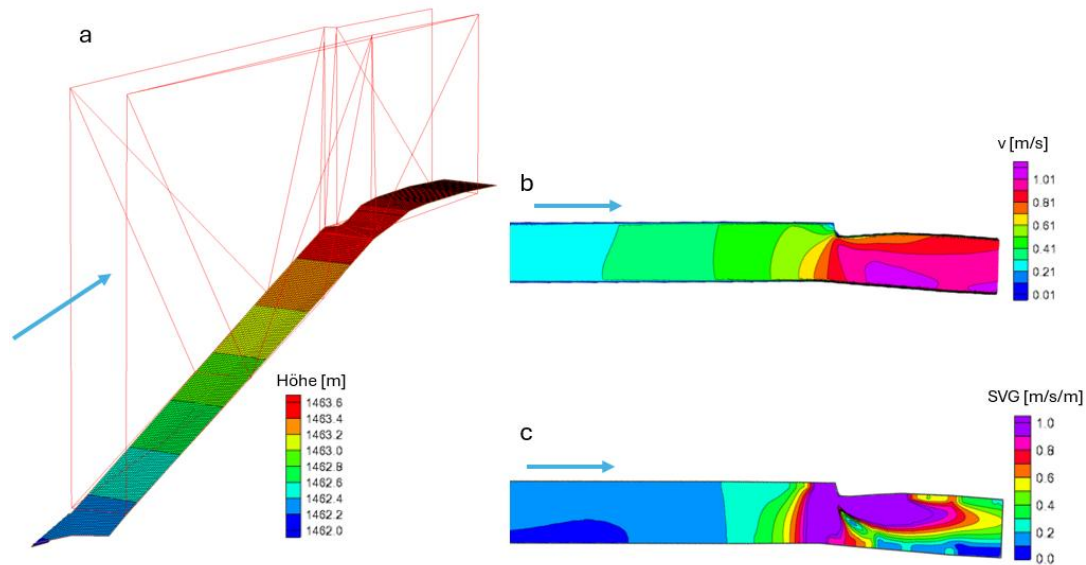


Abbildung 12: 3D-Ansicht des Bypasses mit 2D-Netzelementen (a), berechnete Verteilungen der Strömungsgeschwindigkeit (b) und des räumlichen Geschwindigkeitsgradienten SVG (c) im Bypass des Kraftwerks Shakhimardan

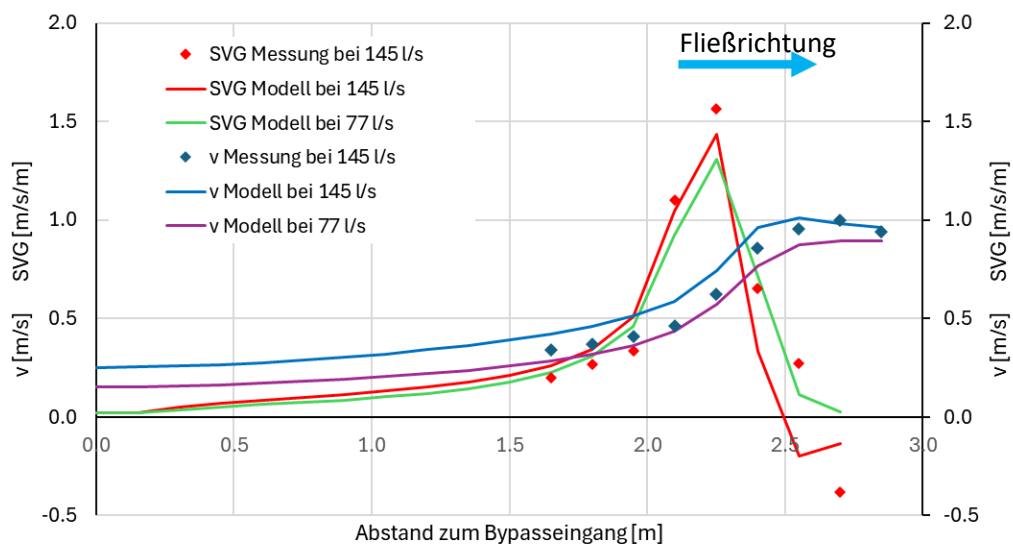


Abbildung 13: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten und SVG-Werte im Bypass des Kraftwerks Shakhimardan bei 77 l/s und 145 l/s

Der Vergleich der gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeiten v und der SVG - Werte bei einem Durchfluss von 145 l/s zeigt eine gute Übereinstimmung (s. Abbildung 13).

2.3.3 Fischversuche

Fischversuche (Probanden/ Halterung)

Bei den Freilandversuchen in Usbekistan wurde das Abstiegsverhalten der genannten Fisch-Zei-gerart Snow Trout (*Schizothorax eurycephalus*) (Abbildung 14) im Einstiegsbereich des Bypasses der

neu gebauten Wasserkraftanlage untersucht. Im Fokus der Studie stand der Einfluss der in den Laborversuchen gefundenen maßgebenden hydraulischen Parameter absolute Strömungsgeschwindigkeit und räumlicher Strömungsgradient (SVG) auf das Abstiegsverhalten der Tiere.



Abbildung 14: Snow Trout (*Schizothorax eurycephalus*), Freilandaufnahme (Wagner)

Die Versuchstiere wurden mittels Elektrofischung im Gewässersystem des Shakhimardan (Koksu und Aksu Fluss) gefangen und in einem Netzkäfig im Oberwasser des Wehres zwischengehalten. Bei Versuchsbeginn wurde die benötigte Anzahl von Versuchsfischen mit einem Kescher herausgefangen, in einen Eimer überführt und zum unmittelbar benachbarten Bypasseinstieg transportiert. Das Einbringen der Versuchstiere in den Bypasseinstieg im Oberwasser erfolgte, indem der Eimer im Wasser langsam und vorsichtig mit der Öffnung gegen die Strömung gerichtet angekippt wurde (Abbildung 16). Die Strömungsgeschwindigkeit betrug in diesem Bereich $< 0,1$ m/s, so dass die Fische mit geringem Energieaufwand lokal verbleiben und frei motiviert weiter stromab in den Bypass einschwimmen konnten. Ein Netz direkt an der Bypassöffnung verhinderte eine Flucht der Fische ins Oberwasser. Insgesamt wurden 72 Fische eingesetzt, drei davon schwammen sofort, ohne Orientierungsphase stromab und waren für die weitere Analyse nicht nutzbar. Die restlichen Tiere verblieben stromauf des Beobachtungsbereiches und sondierten anschließend den Abstiegsweg. In den Experimenten 1, 2 und 3 wurde zunächst jeweils nur ein einzelner Fisch eingesetzt, um den experimentellen Ablauf und das Videosystem zu testen. In den Folgeexperimenten wurden Gruppen mit 5 bzw. 10 Tieren verwendet (Tabelle 5). Die Wassertemperatur während der Versuche betrug 8,9 bis 9,7 °C (Tabelle 5). Es wurden 7 Versuche bei Dunkelheit und 4 unter Tageslichtbedingungen durchgeführt. Der Untersuchungsschwerpunkt lag auf der Dämmerungs- und der Nachtphase, da Untersuchungen der verwandten Art *Schizothorax pelzham*

zeigten, dass die Tiere ähnlich wie die Mehrzahl der mitteleuropäischen Fischarten (Zusammenfassung in Ebel 2024) in dieser Zeit eine verstärkte Schwimmaktivität zeigen (Ebrahimi et al. 2017).

Das Spektrum der Totallänge der Fische lag zwischen 11,5 und 42,2 cm (Tabelle 5). Nach einer Phase von maximal 11:29 h wurde der Versuch beendet und noch im Bypasseinstieg befindliche Probanden mit einem Kescher herausgefangen und anschließend unverzüglich im Unterwasser des Wehres freigelassen.

Tabelle 5: Gesamtanzahl der Fische pro Experiment am Bypass der WKA Shakhimardan, ihre Totallänge (TL) mit Standardabweichung (SD), die Wassertemperatur während der Versuche und die theoretische minimale Sprintgeschwindigkeit (u_{sprint}) der Versuchsfische (Modellgrundlagen: maximale Schwimmdauer von 10 s eines rheophilen Fisches; Modelle von Ebel 2013) in der Versuchsgruppe

Experiment	N _{Fisch}	Beleuchtung	Temp [°C]	Mittlere TL [m]	Min TL [m]	Max TL [m]	u_{sprint} [m/s]
1	1	dunkel	9,2	16,1	16,1	16,1	1,7
2	1	hell	9,2	11,5	11,5	11,5	0,9
3	1	hell	9,2	12,7	12,7	12,7	0,9
4	5	dunkel	9,2	26,8	24,2	28,9	1,6
5	5	hell	8,9	23,4	21,5	25,0	1,5
6	4	dunkel	8,9	26,4	25,6	27,7	1,7
7	9	hell	9,4	25,2	21,4	27,0	1,5
8	10	dunkel	9,1	27,1	20,7	32	1,4
9	10	dunkel	9,2	18,1	13,7	25,3	1,0
10	10	dunkel	9,2	29,2	23,7	42,2	1,6
11	9	dunkel	9,7	23,7	22,1	25,3	1,5

Videotracking

Zwei IP-Kameras zeichneten im kontinuierlichen Betrieb die Fische und ihr Verhalten innerhalb des 82,5 cm langen Beobachtungsbereiches auf. Zwei Unterwasser-Infrarotscheinwerfer mit einer Wellenlänge von 850 nm ermöglichten die Aufnahme während der Dunkelheit, ohne eine Beeinflussung der Fische durch sichtbares Licht. Die Kameras passten ihren Arbeitsmodus je nach natürlicher Beleuchtungsintensität an, indem sie zwischen dem Betriebsmodus Infrarot und sichtbarem Licht wechselten. Zur Vermeidung schneller, starker Schwankungen der Beleuchtungssituation und störender Lichtreflexe sowie zum Schutz des Kamerasystems, war der Bypasseinstieg mit einer teiltransparenten Plane eingehaust (Abbildung 15). Die beiden Kameras zeichneten synchron die Bewegung der Fische im Beobachtungsbereich aus zwei unterschiedlichen Winkeln auf. Die

räumlich überlappenden Aufnahmen der beiden Kameras ermöglichen eine Positionsbestimmung von Objekten in 3D.

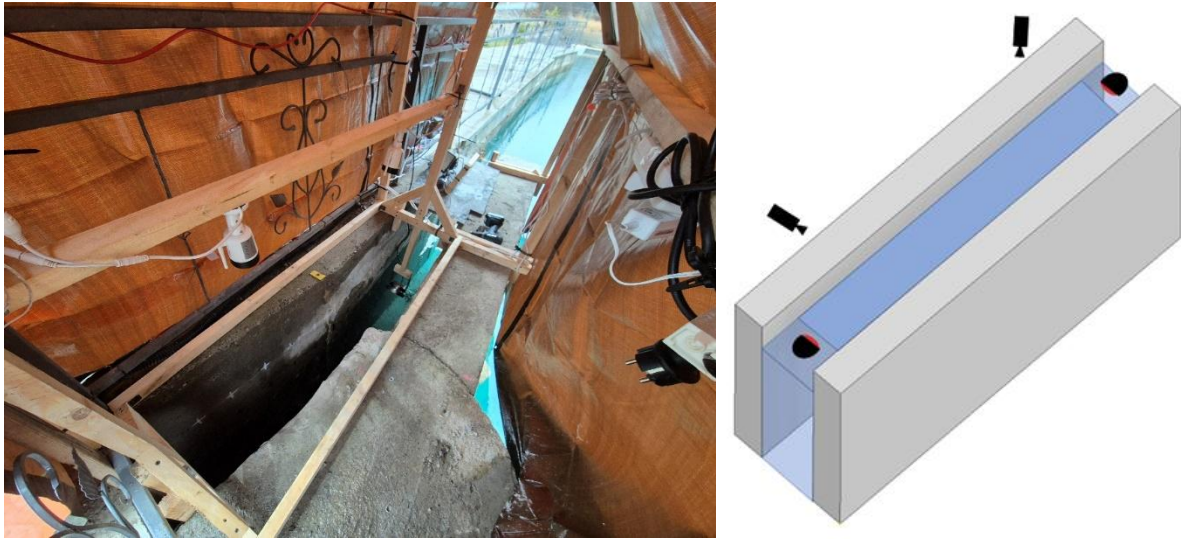


Abbildung 15: links: Blick in die Einhausung des Bypasseinstiegs zur Vermeidung schneller Beleuchtungswechsel und dem Schutz des Kamerasystems während der Feldversuche an der WKA Shakhimardan; rechts: schematische Darstellung des Kamera-Infrarotstrahler-Systems

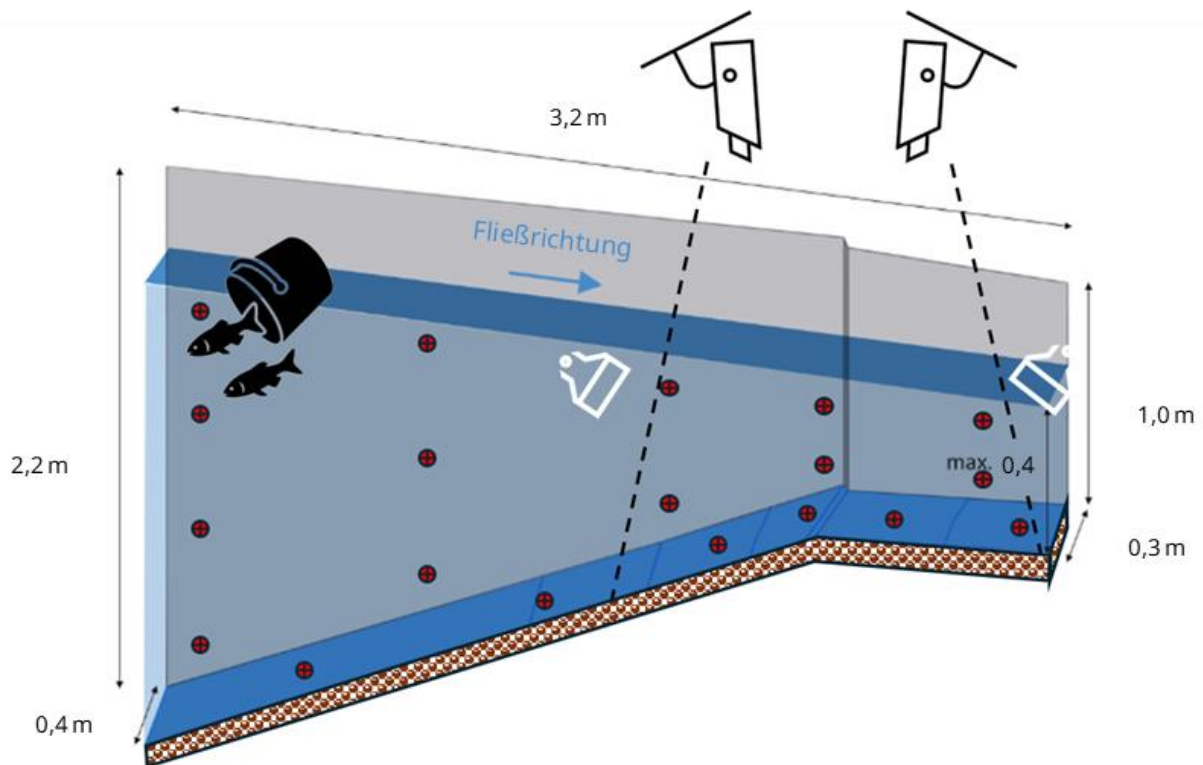


Abbildung 16: Seitenansicht des Bypasseinstiegs mit den Maßen und der räumlichen Anordnung des Kamerasystems, der IR-Beleuchtung, dem Messpunkteraster an den Bypasswänden zur räumlichen Kalibrierung und der Einsatzpunkt der Versuchsfische (Piktogramm)

Auswertung Tracking-Daten

Die stereoskopische Anordnung der beiden Kameras ermöglicht durch die Kombination korrespondierender Bildsequenzen eine dreidimensionale Positionsbestimmung der Fische. Grundlage hierfür bildet ein im Bypass installiertes Messpunkteraster, das zur Kalibrierung der Raumkoordinaten dient und mit der Software *EthoVision XT* (Version 17, Noldus, Niederlande) ausgewertet wird.

Zur Identifikation relevanter Ereignisse wurden zunächst die Pixelkoordinaten jener Punkte in den Videoframes bestimmt, an denen Meidungsreaktionen auftraten. Als Meidungsreaktion wird der Übergang von stromabwärts gerichteter Bewegung (kontrollierte Drift oder aktive Abwärtsbewegung) zu stationärem Verbleib oder aktiver Aufwärtsbewegung definiert. Die Fusion der Bilddaten beider Kameras in Verbindung mit der Kalibrierung anhand des Messpunkterasters ermöglicht die Bereitstellung absoluter Positionsdaten für die weiterführende Analyse, einschließlich der Integration hydraulischer Messdaten.

3 ERGEBNISSE

3.1 ERGEBNISSE LABORVERSUCHE

Von den insgesamt 128 in den drei Modell-Setups verwendeten Fischen waren die Daten von 123 Tieren für die Analyse des Schwimmverhaltens nutzbar. Diese Tiere waren alle abstiegsmotiviert und schwammen während der 45-minütigen Versuchszeit im Beobachtungsbereich stromabwärts. Das gewählte Versuchsdesign zeigte sich somit als gut geeignet, um den frei motivierten Abstieg der Barben in unterschiedlichen hydraulischen Verhältnissen zu untersuchen. Es stand daher eine ausreichend große Stichprobengröße für die geplanten Analyse des Fischverhaltens zur Verfügung. Die Fische zeigten im Setup 1 im Nahbereich vor der Bypassöffnung mit einem maximalen Geschwindigkeitsgradienten von $> 1 \text{ m/s/m}$ eine reichlich zehnmal größere Anzahl von Meidungsreaktionen als im Kontrollbereich mit geringem Geschwindigkeitsgradienten $SVG_{max} < 0,1 \text{ m/s/m}$ (Abbildung 17). Häufig wechselten die Fische direkt stromauf der Querschnittsverengung von zuvor kontrollierter Drift stromab zur Flucht stromaufwärts oder die Fische stoppten zumindest ihre Bewegung stromab und blieben für einige Zeit stationär (Abbildung 18).

Auf Grundlage dieses Ergebnisses wird die **Hypothese 1** bestätigt.

Ein starker Geschwindigkeitsgradient, wie er gegenwärtig an den meisten Bypasseinstiegen vorkommt, löst bei vielen stromabwärts schwimmenden Fischen Meidungsreaktionen aus.

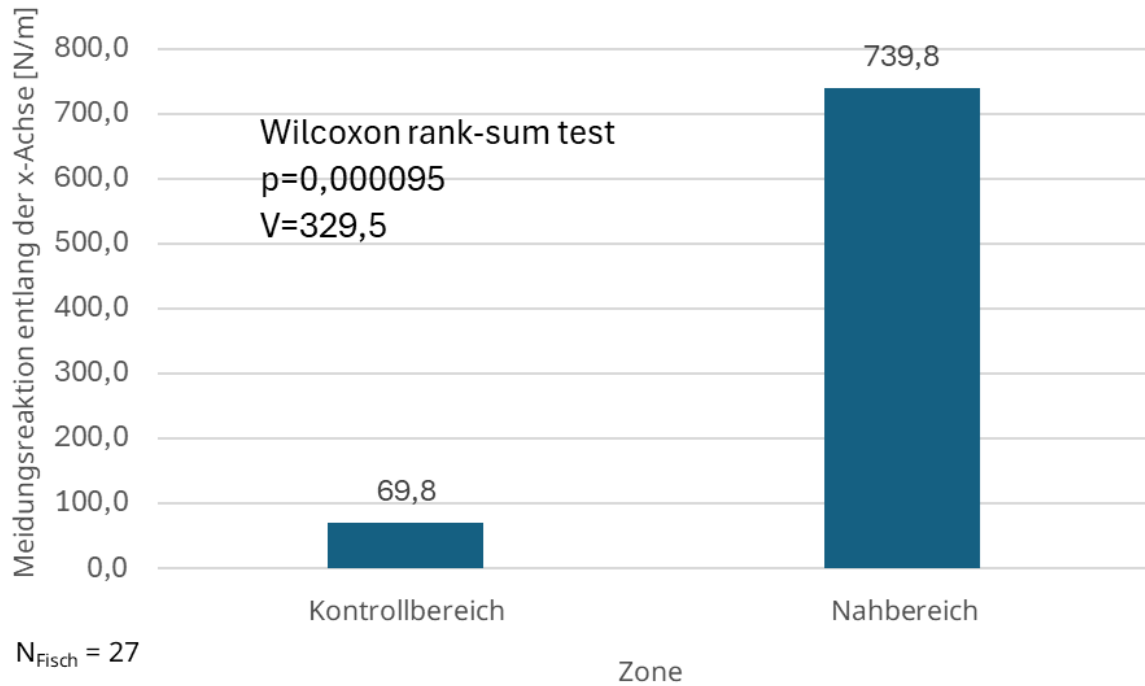


Abbildung 17: Anzahl von Meidungsreaktionen, normiert auf 1 m Fließstrecke entlang der x-Achse der Versuchsrinne im Kontroll- und Nahbereich im Setup 1 mit einem hohem SVG bis 1 m/s/m im Nahbereich

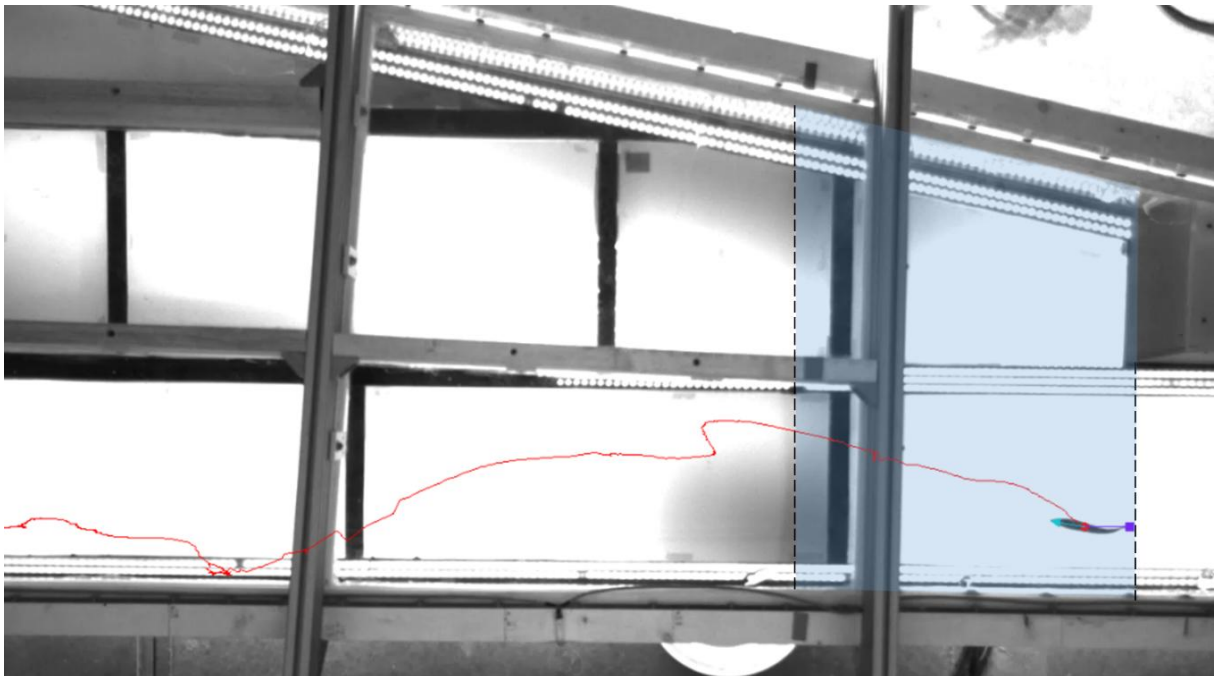


Abbildung 18: Schwimmpfad einer Barbe im Experiment 7 des Setups 1 mit positiv rheotaktischer Ausrichtung und aktiver Drift bis kurz vor dem Bypasseinstieg, wo sie stationär wechselte und nicht in den Bypass einschwamm

Mithilfe des räumlich über die x-Achse der Versuchsrinne gestreckten *SVG* - Spektrums im Setup 2a gelang zudem der Nachweis, des signifikanten Einflusses des *SVG* auf die Anzahl von Meidungsreaktionen. Die Strömungsgeschwindigkeit selbst zeigte einen untergeordneten Effekt. Auf Basis der Ergebnisse des Conditional Inference Tree (Abbildung 19) leitet sich ein *SVG* - Schwellenwert von rund 0,3 m/s/m ab, bei dessen Überschreitung ein deutlicher Anstieg der Anzahl an Meidungsreaktionen zu verzeichnen war.

Dieses Ergebnis bestätigte die **Hypothese 2**.

Die Wahrscheinlichkeit einer Meidungsreaktion der Fische steigt bei Überschreitung eines Schwellenwertes des Geschwindigkeitsgradienten (*SVG* – spatial velocity gradient) signifikant an.

Auf Basis der Daten aus Setup 2b war mit Hilfe des Conditional Inference Tree kein Schwellenwert ableitbar. Der Methode gelang weder anhand der Variablen *SVG* noch der Sprintgeschwindigkeit eine Trennung zwischen Gruppen mit hoher und geringer Anzahl von Meidungsreaktionen. Ein möglicher Grund hierfür ist, dass sich der *SVG* in 2b weniger gleichmäßig entlang der x-Achse ausprägte als in Setup 2a. Die vereinfachte Analyse des Zusammenhangs zwischen Reaktionshäufigkeit und mittlerem *SVG* sowie mittlerer Strömungsgeschwindigkeit bezogen auf orthogonal zur x-Achse angeordneten 8,5 cm langen Rinnen-Segmenten verursacht im Setup 2b daher größere Ungenauigkeiten hinsichtlich der Ausprägung der hydraulischen Variablen am Reaktionsort als in 2a.

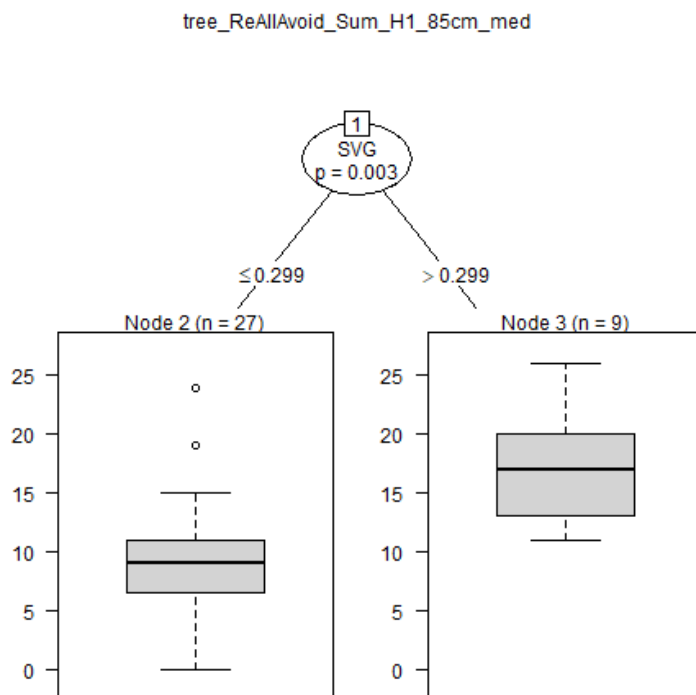


Abbildung 19: Ergebnis des Conditional Inference Trees zum Einfluss des *SVG* und der Strömungsgeschwindigkeit auf die Anzahl vom Meidungsreaktionen im Setup 2a bezogen auf eine Standardfließstrecke von 1 m Richtung x-Achse als abhängige Variable

Nach der Optimierung des Bypasseinstiegs durch die Anpassung der Einlaufgeometrie und die resultierende Unterschreitung des abgeleiteten *SVG* - Schwellenwertes von 0,3 m/s/m war kein signifikanter Unterschied bezüglich der Anzahl von Meidungsreaktionen zwischen Kontroll- und Nahbereich mehr gegeben (Abbildung 20). Allerdings ist nicht auszuschließen, dass die auf den Bereich nahe der Gewässersohle beschränkte, Erhöhung des *SVG* im Kontrollbereich im Setup 3 Meidungsreaktionen ausgelöst, die bei Abwesenheit, der kleinskaligen Geschwindigkeitsänderung nicht stattgefunden hätten und damit das Ergebnis positiv beeinflusste. Allerdings unterstreicht die drastische Reduktion von rund 740 Reaktionen pro Meter im Setup 1 auf nur noch rund 94 im Setup 3 den Effekt der Bypassoptimierung deutlich.

Die Ergebnisse werden daher als Bestätigung der **Hypothese 3** gewertet.

Sofern die Geschwindigkeitsgradienten im Bypasseinstieg nur gering sind und den Schwellenwert unterschreiten, treten signifikant weniger Meidungsreaktionen auf als im Setup 1.

In weiterführenden Experimenten wird darauf geachtet werden, dass die Gewässersohle durchgängig keine Unebenheiten aufweist, um auch kleinräumige Störungen der hydraulischen Verhältnisse zu vermeiden.

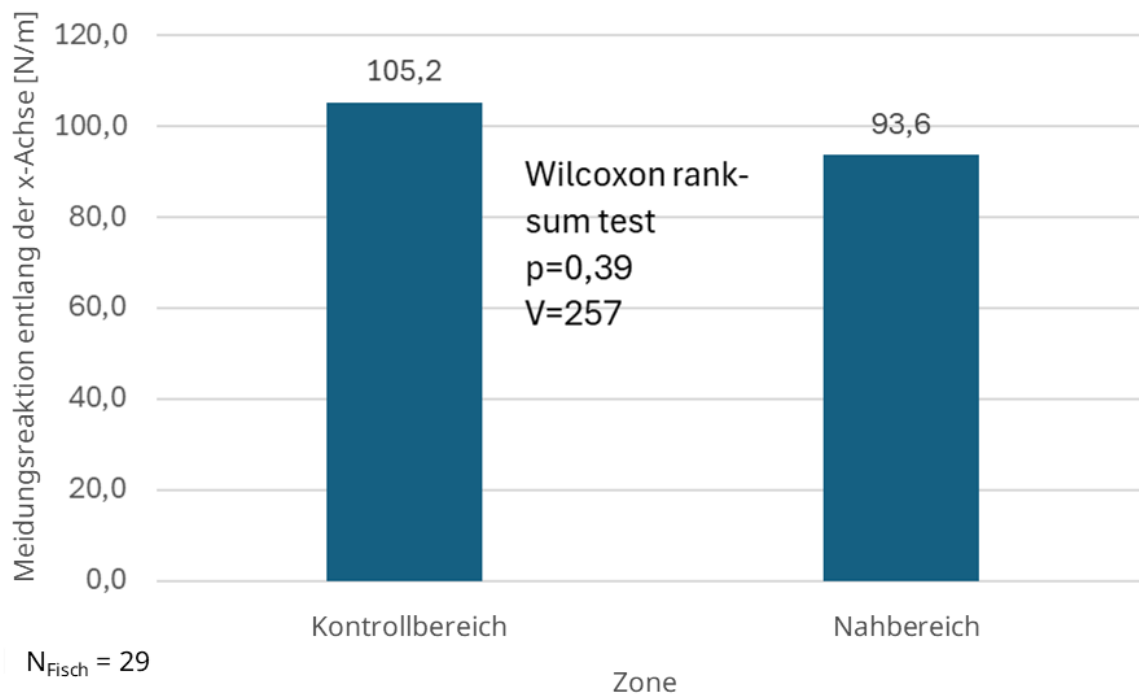


Abbildung 20: Anzahl von Meidungsreaktionen normiert auf 1 m Fließstrecke entlang der x-Achse der Versuchsrinne im Kontroll- und Nahbereich im Setup 3 mit einem *SVG* < 0,1 m/s/m (Schwellenwert aus 2a für Meidungsreaktion)

3.2 ERGEBNISSE FELDSTUDIE

Von den 73 in den Einstieg des Bypasses an der Wasserkraftanlage Shakhimardan eingesetzten Fischen waren die Daten von 65 für die weitere Analyse Abstiegsverhalten nutzbar. Von diesen, stiegen während der Beobachtungszeit 49 erfolgreich ab und 16 verblieben im Oberwasserbereich

(Abbildung 21). Hieraus ergibt sich ein Anteil von 75 % erfolgreicher Passagen. Die Turbinen konnten während der Versuche aufgrund technischer Probleme nicht betrieben werden und die Fische waren unmittelbar in den Bypasseinstieg eingesetzt worden. Aus diesem Grund war eine sichere Auffindbarkeit des Bypasses gegeben. Bei optimaler Funktion sollten unter diesen Bedingungen alle abstiegsmotivierten Fische weiter über den Bypass in das Unterwasser absteigen. Da die Fische von ihrem Einsetzungspunkt am Bypasseinstieg stromab in den Beobachtungsbereich einschwammen und in der Regel auch bis zu einer im Rinnenverlauf vorhandenen Querschnittseinengung abstiegen, ist von einer Motivation der Tiere zum Abstieg auszugehen.

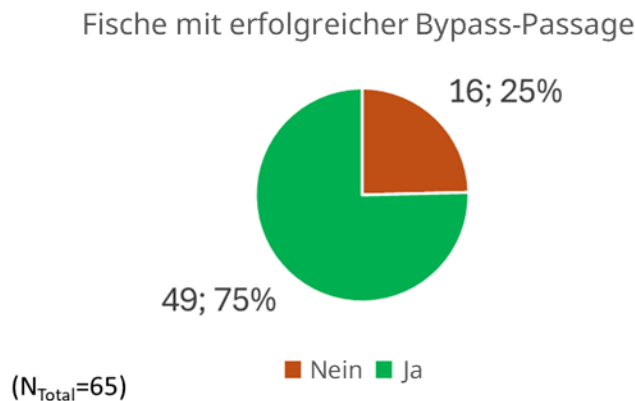


Abbildung 21: Anteile der erfolgreich abgestiegener und im Bypass verbliebener Fische während der Abstiegsexperimenten im Bypass der Wasserkraftanlage in Shakhimardan

Alle Fische zeigten im Beobachtungsbereich eine positiv rheotaktische Ausrichtung. Sie bewegten sich stromabwärts, indem sie die Drift durch aktives Schwimmen leicht oder auch deutlich verzögerten (siehe Abschnitt 2.2.3). Unterbrachen Fische innerhalb des Beobachtungsbereiches ihren Abstieg, indem sie in den Bewegungsmodus „stationär“ oder „aktiv stromauf“ (siehe Abschnitt 2.2.3) wechselten, wurde dies als Meidungsverhalten interpretiert. Im Mittel waren pro Fisch rund 25 Meidungsreaktionen zu verzeichnen (Grundlage Daten aus den Experimenten 1 bis 6 bei denen die Daten für komplette Aufenthaltsdauer der Fische vorliegen).

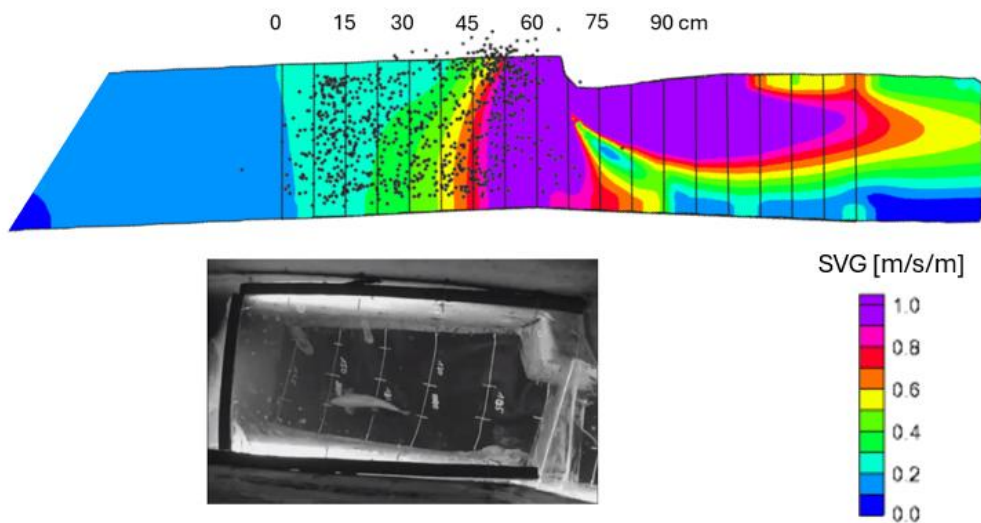


Abbildung 22: In der Draufsicht dargestellte räumliche Verteilung der Reaktionspunkte der Fische mit einem Wechsel vom Bewegungsmodus „aktive Drift stromab“ zu „aktiv stromauf“ was dazu führt, dass die Fische wieder stromaufschwimmen und nicht absteigen, das Raster markiert 7,5 cm lange Sektoren entlang der x-Achse des Bypasskanals

Meidungsreaktionen traten im gesamten Beobachtungsbereich auf (Abbildung 22). Die Sektoren 2 und 7 heben sich von den anderen jedoch durch eine besonders hohe Anzahl von Reaktionen ab. Im Sektor 7 beginnt der SVG aufgrund der folgenden Verengung des Durchflussquerschnittes 1 m/s/m zu überschreiten. Die Strömungsgeschwindigkeit erreicht hier allerdings erst 0,56 m/s und damit, lediglich 0,1 m/s mehr als am Beginn des Beobachtungsbereiches. Die untersuchten Fische sollten zu einer minimalen Sprintgeschwindigkeit von 0,9 m/s (Übertragung des Modells Ebel 2013 auf die rheophile Zielart *Schizothorax eurycephalus*) in der Lage sein. Die Fische waren somit im Sektor 7 problemlos fähig, das Abdriften im Bypass zu kontrollieren und hatten keine Veranlassung stromauf zu flüchten. Mit hoher Wahrscheinlichkeit war daher der hohe SVG ausschlaggebend für die gesteigerte Anzahl von Meidungsreaktionen in diesem Bereich. Die Annahme wird durch die Ergebnisse der Laborversuche gestützt, wo ebenfalls der hohe SVG - Wert als relevanter Faktor für eine Steigerung der Anzahl von Meidungsreaktionen bei der Barbe identifiziert wurde (Abschnitt 3.1).

Unwahrscheinlich ist hingegen, dass der lokale Anstieg der Anzahl von Reaktionen im Sektor 2 bei einer Strömungsgeschwindigkeit von lediglich 0,43 m/s und einem SVG von nur 0,23 m/s/m ebenfalls auf hydraulischer Einflussvariablen zurückzuführen ist. Ein Effekt des Wechsels der Farbe der Gewässersohle (hellgrau zu schwarz) infolge der erforderlichen Markierung des Beobachtungsbereiches auf das Verhalten ist hier nicht auszuschließen.

Die Ergebnisse der Freilanduntersuchung deuten darauf hin, dass der hohe SVG infolge der plötzlichen Querschnittseinengung auch bei der zentralasiatischen Fischart *Schizothorax eurycephalus* zu Meidungsreaktionen und einer Verzögerung des Fischabstiegs führt. In dieser Hinsicht sind die Ergebnisse der ethohydraulischen Versuche im Labor auf den baulich umgesetzten Bypass an der WKA Shakhimardan in Usbekistan übertragbar.

Der Bypass soll daher baulich umgestaltet werden, um Zonen hoher Geschwindigkeitsgradienten zu beseitigen. Es wird angestrebt, die Bypassgeometrie so anzupassen, dass der für die Barbe ermittelte Schwellenwert von 0,3 m/s/m nicht mehr überschritten wird.

3.3 EMPFEHLUNGEN FÜR BYPASSKONFIGURATION

Die Laborversuche im Rahmen des *OptiPass*-Projekts haben gezeigt, dass ein optimiertes Design des Bypass-Einlaufs, bei dem ein räumlicher Geschwindigkeitsgradienten (*SVG*) von 0,3 m/s/m nicht überschritten wird, Meidungsreaktionen im Bypass deutlich reduzieren kann. Das Hauptkriterium für die Gestaltung für eine gute Bypassfunktion ist daher mit großer Wahrscheinlichkeit nicht die absolute Strömungsgeschwindigkeit oder der Durchfluss, sondern der *SVG*.

Für bestehende Bypass-Systeme kann die *SVG* - Verteilung entweder durch Strömungsmessungen oder mittels hydrodynamischer Simulationen ermittelt werden. Beim Entwurf neuer Bypässe stellen hydrodynamische Simulationen die effizienteste Methode dar, um die Geschwindigkeitsfelder und die entsprechenden *SVG* - Werte abzuschätzen. Feldmessungen am Wasserkraftwerk Shakhimardan bestätigten, dass 2D-hydrnumerische Modelle (2D-HN) für diesen Zweck eine ausreichende Genauigkeit liefern, 3D-Simulationen sind in der Regel nicht erforderlich. Die Anpassung der Einlaufgeometrie kann dabei sowohl wie im Fall unserer Laborstudie durch eine horizontale Querschnittsreduktion als auch durch eine vertikale erfolgen.

Zu beachten ist, dass die Ausgestaltung mit reduziertem *SVG*-Werten unterhalb des Schwellenwertes zu längeren Einlaufgeometrien führt, als Sie bisher in der Praxis umgesetzt werden. In unseren Laborversuchen ergab sich in Setup 3 mit der gewölbten Querschnittsreduktion die 2,5-fache Länge des Einlaufs aus Setup 2. Der sich daraus ergebende höhere Platzbedarf sowie gegebenenfalls höhere Kosten müssen bereits in der Planung berücksichtigt werden.

Neben der Planungsoptimierung hinsichtlich einer Einhaltung der *SVG*-Schwellenwerte, ist eine ausreichende Sorgfalt bei der Bauausführung von großer Bedeutung. Bereits geringe Unebenheiten der Oberflächen können Strömungsablösungen und Verengungen des Strömungsquerschnitts verursachen, wodurch lokal die *SVG* - Schwellenwerte überschritten werden. Solche Bedingungen können bei Fischen Meidungsverhalten auslösen, was zu einer Verzögerung der Abwanderung oder zu einer Leitung der Fische in Gefährdungszonen führen kann – beispielsweise über den Fischschutzrechen in die Turbinen.

Wenn zur Untersuchung der Bypass-Funktion ein Erfassungssystem für Fische (z. B. PIT-Antennen oder Unterwasserkameras) installiert wird, muss sichergestellt sein, dass dieses die Bypasshydraulik nicht negativ beeinflusst und beispielsweise einen hohen *SVG* erzeugt. Die Installation sollte vorzugsweise in Bereichen mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten erfolgen. Falls notwendig, sollte der Einbau solcher Geräte mithilfe hydrodynamischer Modellierungen überprüft werden, um negative Auswirkungen auf die Strömungsverhältnisse zu minimieren.

Die in dieser Studie entwickelten Strömungs- und daraus abgeleitete Gestaltungskriterien für Bypass-Einläufe gelten ebenso für den weiteren Verlauf des Bypass-Kanals stromab des Einlaufs. Beobachtungen am Standort Shakhimardan zeigten, dass kleinere Fische nach erfolgreichem Eintritt in den Bypass problemlos abwanderten, während größere Individuen teilweise wieder zum Einlauf zurückkehrten. Dies trat vermutlich auf, wenn ungünstige hydraulische Bedingungen im Bypass-

kanal selbst Meidungsreaktionen auslösten. Aufgrund ihrer im Vergleich zu kleineren Fischen höheren Schwimmleistung konnten die größeren Fische problemlos gegen die Strömung schwimmend bis zum Einlauf zurückkehren. Es empfiehlt sich daher ein allmählicher Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit deutlich über die Sprintgeschwindigkeit der Zielarten ohne Überschreitung der *SVG*-Schwellenwerte.

4 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

4.1 KONFERENZBEITRAG

In nachfolgend aufgelisteten Konferenzbeiträgen wurde das Projekt sowie erste Ergebnisse vorgestellt.

Wagner, F. et al., 2025. Hydraulic Optimization of the Bypass Entrance Design for Downstream Fish Migration: Insights from Laboratory and Field Studies, 3rd International Conference on Sustainability in Hydropower, 2. -5. September 2025, Vienna (Austria)

Kopecki, I. et al., 2025. Fish downstream passage at hydropower plants: Studies on the optimization of bypass entrances in laboratory and practice, 9. Symposium zum technischen Monitoring von Fischen, 09. & 10. September 2025 Grimselhospiz, Grimselpass, Schweiz

Kopecki, I. et al., 2025. „Fischabstieg an Wasserkraftanlagen: Untersuchungen zur Optimierung von Bypasseingängen in Labor und Praxis“, 9. Kolloquium der BAW/BfG aus der Reihe „Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Bundeswasserstraßen“. Hydraulik und Fische. 12. und 13. November 2025, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

4.2 GREMIENARBEIT

Die ersten Ergebnisse werden bereits durch das Institut für Gewässerökologie und Fischereibiologie (IGF) Jena in die Arbeit der DWA-Arbeitsgruppe 7.1: „Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen“ sowie als beratender Experte für den „Grundlagenbericht Fischschutz & Fischabstieg in Österreich“ für die BOKU Wien und das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft Österreich als Auftraggeber eingebracht.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Der gesamte Untersuchungsplan wurde vollständig und planmäßig umgesetzt. Das experimentelle Gerinne mit den angepassten Kanalgeometrien ermöglichte die vorgesehenen hydraulischen Bedingungen, um alle drei Arbeitshypothesen in den geplanten Versuchsanordnungen zu überprüfen.

Die Ergebnisse der Laborexperimente mit der Barbe (*Barbus barbus*) zeigen deutlich, dass der räumliche Geschwindigkeitsgradient (*SVG*) das Schwimmverhalten von Fischen an Bypasseinstiegen beeinflusst. Es konnte nachgewiesen werden, dass die im Labor beobachteten Effekte auch

auf reale Bypasssysteme im Feld – insbesondere am Standort in Zentralasien – und auf die lokale Zielart *Schizothorax eurycephalus* übertragbar sind.

Durch die Optimierung der Bypasseinstiege und die Reduktion der Geschwindigkeitsgradienten unterhalb eines Schwellenwertes von 0,3 m/s/m konnte im Labor eine signifikante Verringerung von Meidungsreaktionen erzielt werden. Alle drei aufgestellten Arbeitshypothesen wurden bestätigt:

1. **Hypothese 1:** Starke Geschwindigkeitsgradienten, wie sie an den meisten bestehenden Bypasseinstiegen auftreten, führen bei vielen stromabwärts wandernden Fischen zu deutlichen Meidungsreaktionen.
2. **Hypothese 2:** Überschreiten die Geschwindigkeitsgradienten einen bestimmten Schwellenwert, steigt die Wahrscheinlichkeit von Meidungsreaktionen signifikant an.
3. **Hypothese 3:** Wird der die Geschwindigkeitsgradienten unterhalb des Schwellenwertes gehalten, treten signifikant weniger Meidungsreaktionen auf als bei hohen Gradienten.

Im nächsten Schritt wird die Geometrie des Bypasses am Standort Shakhimardan angepasst, um die Geschwindigkeitsgradienten weiter zu reduzieren. Anschließend soll untersucht werden, wie sich diese Optimierungen auf die Passage von *Schizothorax eurycephalus* auswirken.

Darüber hinaus sind in der bereits bewilligten Anschlussphase *OptiPass II* zusätzliche Experimente geplant, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf salmonide Arten, insbesondere die Bachforelle (*Salmo trutta*), zu überprüfen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse sollen schließlich Handlungsempfehlungen und Richtlinien für eine breitere Gruppe an Fischarten hinsichtlich geeigneter *SVG* - Werte an Bypasseinstiegen entwickelt werden.

Literaturhinweise

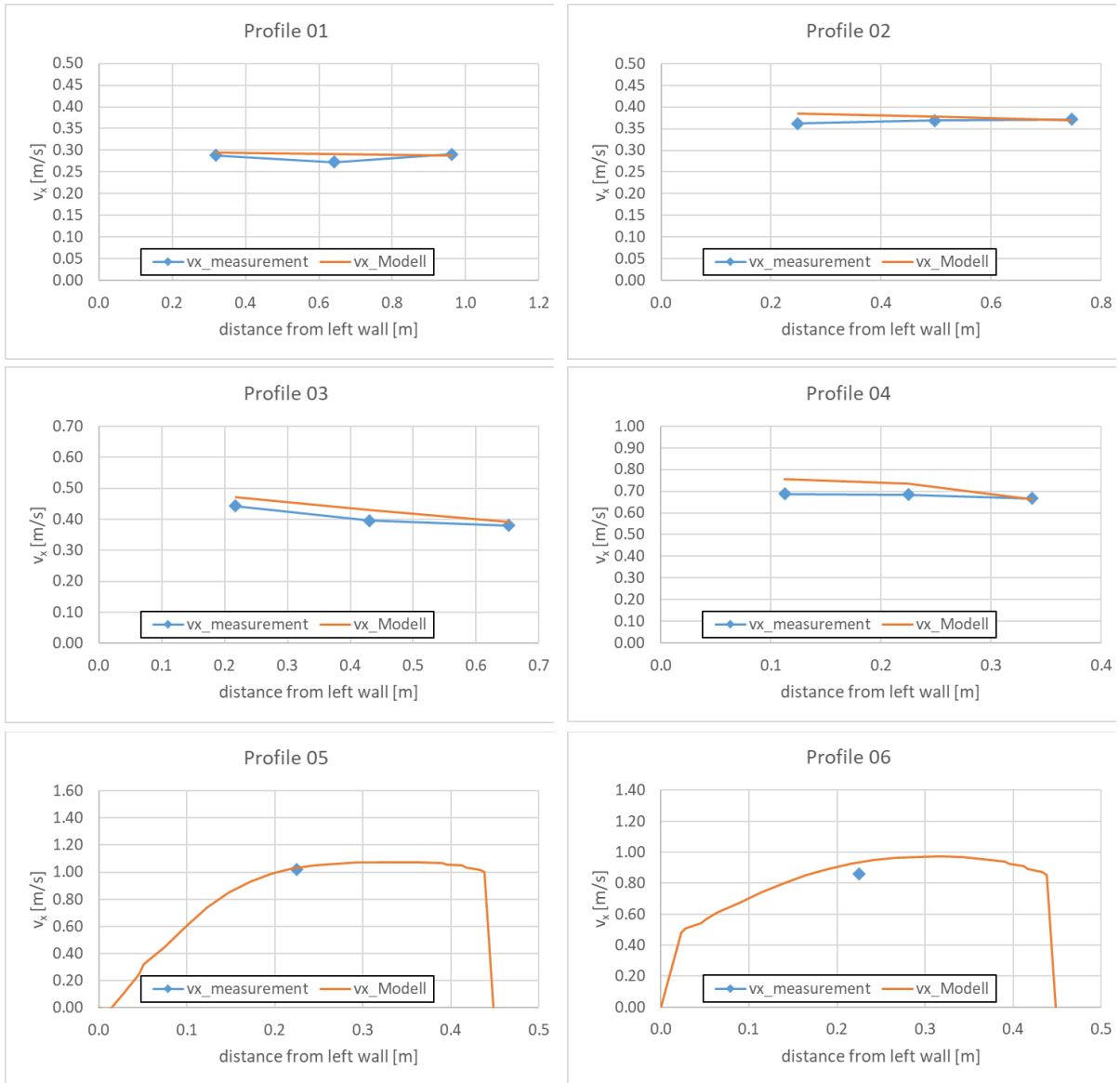
- AQUAVEO, 2016. SMS User Manual v11.1 - Surface-water Modeling System. <http://www.aquaveo.com/>.
- BEACH, M. H., 1978. The use of infra-red light and closed circuit TV to validate records from automatic fish counters. *Journal of Fish Biology*. Volume 13. Issue 5. pp. 521 - 654
- BENSING, K., TUHTAN, J. A., TOMING, G., BECKER, A., KOPECKI, I., SCHNEIDER, M., ORTLEPP, J., LEHMANN, B., 2022. Application of a fish-shaped probe at an angled rack: introducing the fish sensory sonde (FSS). 14th International Symposium on Ecohydraulics. Nanjing, China. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR)
- BLASEL, K., 2009. Funktionskontrollen an Fischabstiegsanlagen in Baden-Württemberg. (pp. 89-96). Landesfischereiverband Baden-Württemberg e.V.
- DUMONT, U., ANDERER, P. und SCHWEVERS, U., 2005. Handbuch Querbauwerke. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- DWA, 2014. Merkblatt DWA-M 509 - Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. DWA.
- EBEL, G., 2024. Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen - Handbuch Rechen und Bypassysteme, Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung, Qualitätssicherung, Praxisbeispiele, Volume 4 Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie. Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie, 4. Edition. Ort: Halle (Saale).
- EBEL, G., 2013. Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen - Handbuch Rechen und Bypassysteme, Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung, Qualitätssicherung, Praxisbeispiele, Volume 4 Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie. Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie, 1. Edition. Ort: Halle (Saale).
- EBRAHIMI, E., KAMRANI, E., HEYDARNEJAD, M. S., & SAFARI, O., 2017. Daily rhythms of locomotor and demand-feeding activities in *Schizothorax pelzami* (Kessler, 1870). *Chronobiology international*, 34, 1366–1376.
- ENDERS, E., GESSEL, M., ANDERSON, J. und WILLIAMS, J., 2012. Effects of Decelerating and Accelerating Flows on Juvenile Salmonid Behavior. *Transactions of the American Fisheries Society*, 141:357–364.
- ENDERS, E. C., GESSEL, M. H. und WILLIAMS, J. G., 2009. Development of successful fish passage structures for downstream migrants requires knowledge of their behavioural response to accelerating flow: *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 66(12):2109–2117.
- KOPECKI, I., WAGNER, F., & HOERNER, S., 2025. A method for high resolution underwater bathymetry using coupled SfM and hydrodynamic modelling, p. 454-462, *River Flow 2024 – Carnacina et al. (Eds) 2025*, ISBN 978-1-032-75721-6, DOI: 10.1201/9781003475378-67.
- LEHMANN, B., ADAM, B., ENGLER, O., HECHT, V. und SCHNEIDER, K., 2016. Ethohydraulische Untersuchungen zur Verbesserung des Fischschutzes an Wasserkraftanlagen. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 151.
- LAI, Y. G., 2008: SRH-2D version 2: Theory and User's Manual., U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado
- LUBW, 2006. Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern Teil 2 – Umgebungsgewässer und fischpassierbare Querbauwerke. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) Referat 41 – Fließgewässer, Integrierter Gewässerschutz.

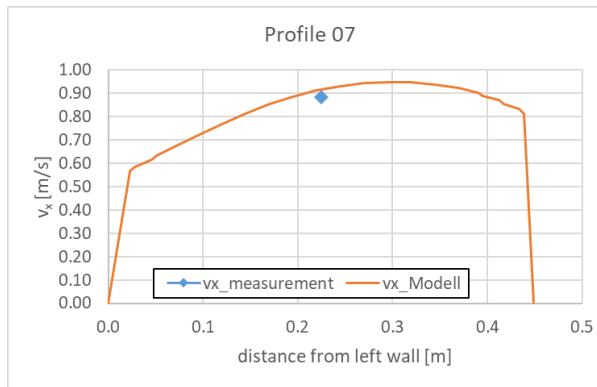
- MADDAHI, M. R., HAGENBUCHLI, R., MENDEZ, R., ZAUGG, C., BOES, R. und ALBAYRAK, I., 2022. Field Investigation of Hydraulics and Fish Guidance Efficiency of a Horizontal Bar Rack-Bypass System. *Water*, 14:776.
- MEISTER, J., SELZ, O., BECK, C., PETER, A., ALBAYRAK, I. und BOES, R., 2022. Protection and guidance of downstream moving fish with horizontal bar rack bypass systems. *Ecological Engineering* 178 (2022): 106584.
- NESTLER, J., GOODWIN, R., SMITH, D., ANDERSON, J. und LI, S., 2008. Optimum fish passage designs are based on the hydrogeomorphology of natural rivers. *River Research and Applications*, 24:148–168.
- NIVUS, 2015. Betriebsanleitung. Durchflussmessumformer NivuFlow 750. 1. Auflage. Firmware Revision: 1.14 Originalbetriebsanleitung Deutsch
- ROTH, M. S., WAGNER, F., ROESSGER, T., KOPECKI, I., POWALLA, D. und STAMM, J., 2024. An Experimental Approach for the Quantitative Assessment of Downstream Swimming Fish Behavior. *River Research and Applications*. 0:1-16.
- SCHMALZ, M., 2012. Optimierung von Bypässen für den Fischabstieg: Bericht des durch die DBU geforderten Projektes Az. 26632-14/0.
- SCHMALZ, W., 2002. Untersuchung der Möglichkeit der Anwendung und Effektivität akustischer Scheueinrichtungen zum Schutz der Fischfauna vor Turbinenschäden. Abschlussbericht zum DBU-Projekt Az. 15864.
- SCHWEVERS, U. und ADAM, B., 2020. Fish protection technologies and fish ways for downstream migration. Springer, Cham, 1. Edition.
- VDI, 2014. Wasserkraftanlagen – Technik und Planung. Richtlinie 4620 Blatt 2. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI).
- VOWLES, A. und KEMP, P. S., 2012. Effects of light on the behaviour of brown trout (*Salmo trutta*) encountering accelerating flow: Application to downstream fish passage. *Ecological Engineering*, 47:247–253.
- WAGNER, F., KOPECKI, I., ELINGS, J., ENDERS, U., LINDIG, A., MALTZAHN, K., ROESSGER, T., S. ROTH, M., ROYAN, M., STAMM, J., HOERNER, S., eingereicht. Behavior of downstream swimming brown trout in hydraulic conditions typical for turbine and pump intakes. *PLOS ONE*.
- WAGNER, F. ET AL., 2025. Sachbericht – Reduktion von Tierversuchen zum Schädigungsrisiko an Wasserkraftanlagen (RETERO II) – taxonomische Erweiterung und Optimierung des Rucksacksensors - Teil II Eingehende Darstellung, FKZ: 16LW0168. Abschlussbericht. Jena: Institut für Gewässerökologie und Fischereibiologie Jena. p. 21.
- WAGNER, F., ELINGS, J., KOPECKI, I., ROESSGER, T., & HOERNER, S., 2024. Quantitative Behavior Analysis of Fish Passage in a Flume Modeling Hydraulic Conditions in Turbine and Pump Inlets. Quebec, Canada.
- WAGNER, F., 2022. Wann ist ein Rechen ein Fischschutzrechen? Die funktionalen Elemente eines Fischschutzsystems. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 15(2):115–120.
- WAGNER, F., 2016. Vergleichende Analyse des Fischabstiegs an drei Wasserkraftanlagen einer Kraftwerkskette. *Wasserwirtschaft*, 2-3:35–41.
- WAGNER, F., 2013. Überprüfung der Fischschutz- und Fischabstiegseinrichtungen sowie der Fischschädigung an der WKA Lutzschena/Weise Elster - Endbericht, Studie im Auftrag des WKA-Betreibers Josef Bauer.

ANHANG

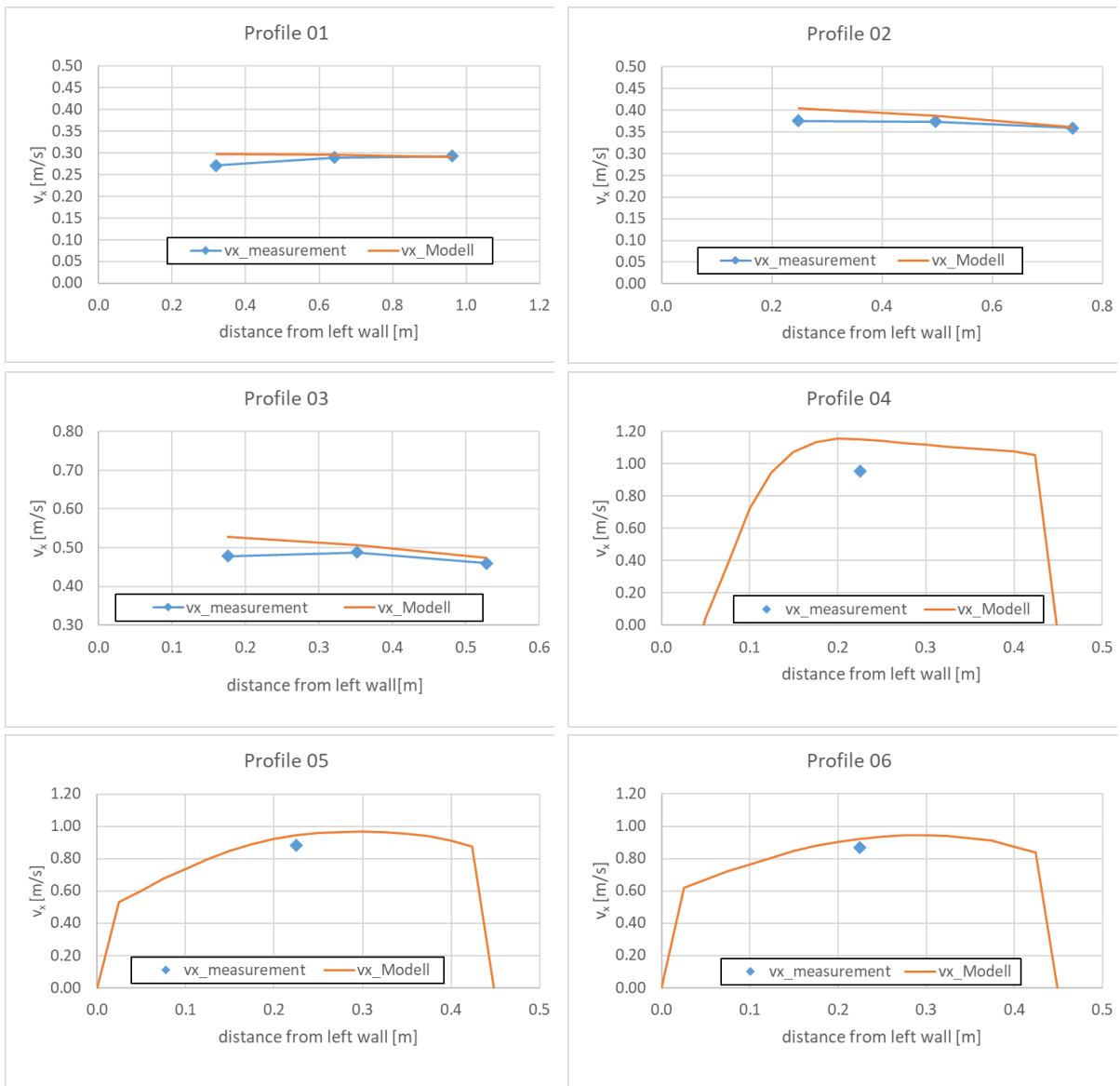
VALIDIERUNG DES 2D-HN-MODELLS (LABORUNTERSUCHUNGEN)

S1





S2a



S2b

