GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Reduktion von Tierversuchen zum Schädigungsrisiko an Wasserkraftanlagen (RETERO-2)

Entwicklung eines Fischreaktionsmodells in hydraulischen Grenzsituationen

Sachbericht
Teil I - Kurzbericht

Stuttgart, 31.03.2025

Autoren: Dr. Ing. Ianina Kopecki
Tobias Hägele M. Sc.
Dr.-Ing. Matthias Schneider

sje - Ecohydraulic Engineering GmbH
Dilleniusstr. 13, 71522 Backnang
URL: www.sjeweb.de
Email: mailbox@sjeweb.de

1 Aufgabenstellung

Die Schwimmaktivität von Fischen kann die Verletzungsrate während der Turbinenpassage beeinflussen (Vowles et al. 2014, Geiger et al. 2020). Die rheotaktisch positive Orientierung von Fischen wird häufig als Reaktion auf eine beschleunigte Strömung beobachtet (Haro et al. 1998, Beck et al. 2020). Das Schwimmen gegen die Strömung kann die Zeit verlängern, die im gefährlichen Bereich in der Nähe von sich bewegenden Maschinenteilen verbracht wird, und daher zu höheren Verletzungsraten bei aktiven Fischen führen. Bislang liegen keine gesicherten Verhaltensdaten für die stromabwärts gerichtete Passage bei hohen Geschwindigkeiten nahe oder oberhalb der Sprintgeschwindigkeit von Fischen vor. Es ist daher weitgehend unbekannt, ob Fische ihre rheotaktisch positive Orientierung beibehalten und welche Schwimmleistung sie unter solchen Bedingungen zeigen können. Auch die Rolle von SVG (Spatial Velocity Gradient) in Hochgeschwindigkeitsströmungen ist noch nicht vollständig untersucht worden.
Der Schwerpunkt des Projekts RETERO-2 ist die Erfassung von Fischreaktionen/-bewegungen in einem Parcours mit ähnlichen Bedingungen wie im Strömungstrakt einer Turbine/Pumpe. Die Hauptaufgaben der Firma SJE waren: Die Erweiterung der ethohydraulischen Untersuchungen zur Wirkung hydraulischer Strömungsparameter als Verhaltenstrigger für die spätere Fischverhaltensmodellierungfür Lachsartige (Salmonide), Karpfenartige (Cyprinidae) und Barschartige (Percidae) APs: 21, 23, 25, 30. Die Erweiterung und Verfeinerung der in RETERO bereits entwickelten numerischen Modelle auf reale Anwendungen und ihre erste Validierung (AP:27, 32). Eine Einführung der Methoden in die Community und in die allgemeine Praxis (AP:28, 29). Die Vorhersage von Fischverhalten in hydraulischen Grenzsituationen mittels Verhaltensmodellen soll perspektivisch eine Basis für die Neuentwicklung und Verfeinerung der schon existierenden Fischschädigungsmodelle für Turbinen und Pumpen bilden.

2 Ablauf des Vorhabens und wesentliche Ergebnisse

Der Ablauf des Vorhabens und die wesentlichen Ergebnisse sind im Folgenden aufgeschlüsselt nach den für SJE relevanten Arbeitspaketen dargestellt.

AP:21 (Erweiterung bestehender CFD/DEM Modelle) In Phase 1 des RETERO-Projekts wurde gezeigt, dass die zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten im Druckbereich der Laborrinne mit einem zweidimensionalen hydrodynamischen Modell (2D-HN-Modell) vorhergesagt werden können. Die Ergebnisse des 2D-Modells bilden die Grundlage für die Auswertung und die Korrelationsanalyse der ethohydraulischen Daten (AP:30). Die zweite Phase des RETERO-Projekts hat mit der Erstellung, Kalibrierung und Validierung von sechs 2D-HN-Modellen für Hypothese 1 mit Barschen begonnen. Darüber hinaus hat SJE eine Masterarbeit an der Universität Weimar betreut, in der die Strömungsvariante der Hypothese 3 (Strömung mit Quergradient) mit einem dreidimensionalen hydrodynamischen Modell simuliert wurde (Laska, 2023). Das bestehende Modell für Bachforellen und Döbel wurde durch Einarbeitung von feinen geometrischen Strukturen der Rinne aktualisiert.

AP:23 ***(Optimierung der Gewichtung der Modellparameter mit maschinellem Lernen)*** SJE stand ISUT und IGF beratend zur Verfügung. Das Ziel war die Definition und Auswahl der Parameter für die Zielfunktion der ISUT-Optimization Algorithm Library OPAL++ des LSS zu erarbeiten.

AP:25 (*Integrationsmodul für die Verknüpfung der Mess-, Beobachtungs- (Roboter- und Realfische) und Modelldaten*) Das in RETERO 1 entwickelte Integrationsmodul ermöglicht das Einlesen von 2D- und 3D-hydrodynamischen Daten, sowie der Fischpositionspunkte aus dem Videotracking. Weiterhin findet eine Koordinatentransformation der Positionen, sowie das Einlesen und die zeitliche Mittelung der Daten der Rucksack-Sensoren statt. Im Laufe der Projektbearbeitung wurden in Zusammenarbeit mit dem IGF zusätzliche Parameter identifiziert, die für die Auswertung und Korrelationsanalyse der Daten sowie der Verhaltensregeln wichtig sind. Die Methodik der Videotrackingdatenauswertung mit der Ableitung von zusätzlichen Parameter ist in einer Publikation beschrieben (Kopecki et al. 2024b).

Die Berechnung der zusätzlichen Parameter ist im Integrationsmodul vollständig implementiert. Die Ausgabe der Daten erfolgt in Tabellen und Graphiken und ist für die Integration in eine öffentliche Datenbank dokumentiert (AP29). Durch die mit dem Integrationsmodul ermöglichte Analyse von gekoppelten Videotracking- und Sensordaten ergab sich eine neue Methode zur Bestimmung der tatsächlichen Schwimmgeschwindigkeit der Fische (Kopecki et al. 2024a).

AP:27 ***(Plausibilitätsprüfung und Erstellung Fischreaktionsmodelle inkl. Cypriniden)*** Die Auswertung der experimentellen Daten zeigt, dass der SVG eine wichtige Rolle bei der Verhaltensreaktion von Fischen spielt. Die Fische zeigen aber auch Reaktionen ohne SVG in Bereichen mit hohen Geschwindigkeiten, die über ihrer Sprintkapazität liegen. Die neu entwickelte Methodik für die Ermittlung und Bewertung von Fischverhalten und Fischreaktionen (AP:25) wurde für alle Versuchsarten angewendet. Die Ergebnisse dieser Auswertung bilden den Grundsteindatensatz für die neu entwickelte Vorhersagemethode zu Abschätzung von Fischschädigungsraten in Turbinen (AP:30).

AP:28, 29 ***(Öffentlichkeitsarbeit, Methoden in die Praxis überführen, Veröffentlichungen)*** Im EU-Projekt Hydro4U (Horizon 2020 Forschungs- und Innovationsförderung der Europäischen Union) kooperiert SJE eng mit führenden Forschungseinrichtungen im Themenbereich Ethohydraulik und Herstellern hydraulischer Maschinen und informiert regelmäßig über die in RETERO entwickelten Methoden. Mit den Partnern ist SJE an mehreren Veröffentlichungen und Präsentationen bei internationalen Konferenzen beteiligt (siehe Literaturliste).

AP:30 ***(Auswertung und Korrelationsanalyse der Daten aus Laborrinne, Erstellung von Verhaltensregeln)*** SJE hat eine Doktorarbeit in Rahmen des European Union Horizon 2020 Research and Innovation Programms (Marie Sklodowska-Curie Action RIBES) betreut (Elings 2024). Mit der in der Doktorarbeit angewendeten Hidden Markov Methode konnten wichtige Grundlagen zur Einteilung von Fischreaktionen in Bereichen mit sehr hohen Fließgeschwindigkeiten erarbeitet werden. Zusätzlich wurde eine neuartige Methode für die Vorhersage von Fischmortalität in Niederdruckturbinen entwickelt, deren Anwendung im Rahmen von AP:32 erfolgte.

AP:32 ***(Anwendung des Verhaltensmodells auf eine reale Anlage)*** Das neue Fischmortalitätsmodell wurde für die Bachforelle am Beispiel einer Wasserkraftanlage mit alten und modifizierten Kaplan-Turbinen angewendet.

3 Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Die Arbeiten von SJE erfolgten in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern:
Mit dem **IGF** erfolgte ein enger Austausch bei der Optimierung des Post-Processing von Videoaufnahmen und der Definition der Funktionalitäten und der Ausgaben des Systems für die Zusammenführung der Daten. Auch die Entwicklung des Vorhersagemodellkonzepts und die Validierung des Modells erforderten eine intensive Kooperation. **TalTech** lieferte die Daten der Rucksacksensoren. Teil des Datenaustausches war eine eingehende Diskussion über die Möglichkeiten der zeitlichen Synchronisation der Sensoren mit den Videodaten. Das **IWD** lieferte wertvolle Informationen für die Kalibrierung Strömungsmodelle und detaillierte Angaben zu den Randbedingungen und zur Geometrie der Versuchsrinne. Eine enge Abstimmung fand bei der Umsetzung der manuellen Videotracking-Georeferenzierung statt. Weiterhin spielten die vom IWD berechneten vorläufigen Ergebnisse der 3D-Strömungmodellierung mit dem Modell OpenFoam für die Entwicklung des Datenkopplungssystems eine wichtige Rolle. Zwischen SJE und dem **OVGU** (ISUT) waren enge Abstimmungen hinsichtlich der 3D-Modelldaten (Modell StarCCM+) und deren Integration und Verwendung im Vorhersagemodell notwendig.

4 Literaturverzeichnis

Beck, C., Albayrak, I., Meister, J., Peter, A., Selz, O., Leuch, C., Vetsch, D., and Boes, R. (2020). "Swimming behavior of downstream moving fish at innovative curved-bar rack bypass systems for fish protection at water intakes". Water 12: 3244.

Haro, A., Odeh, M., Noreika, J., and Castro-Santos, T. (1998). "Effect of water acceleration on downstream migratory behavior and passage of Atlantic salmon smolts and juvenile American shad at surface bypasses." Transactions of the American Fisheries Society, 127 (1): 118–127.

Geiger, F., Cuchet, M., Rutschmann, P. (2020): "Zur Berechnung der Schädigungsraten von Fischen bei der Turbinenpassage." Wasserwirtschaft, 110(12): 33–40.

Vowles, A.S., Karlsson, S.P., Uzunova, E.P., and Kemp, P.S. (2014). "The importance of behaviour in predicting the impact of a novel small-scale hydropower device on the survival of downstream moving fish." Ecological Engineering 69: 151–159.

Wesentliche Publikationen, die im Rahmen von RETERO-2 entstanden sind:

Elings, J. (2024). How fish move : linking fine-scale movement and decision processes to hydraulic data. Ghent University. Faculty of Bioscience Engineering, Ghent, Belgium.

Elings, J., Kopecki, I., Wagner, F., Mawer, R., Bruneel, S., Pauwels, I., Goethals, P. (2025) Understanding Fish Behaviour under Extreme Flows during Downstream Movement. Eingereicht bei Ecological Engineering

Kopecki, I., Tuhtan, J., Wagner, F., Roessger, T., Hägele, T., Schneider, M., Hoerner, S. (2024a) Estimating fish swimming speed using non-invasive backpack sensors in a laboratory flume at high flow velocities International Symposium on Ecohydraulics and Fish Passage 2024.

Kopecki, I., Wagner, F., Hoerner, S. (2024b) Quantifying fish response to extreme hydraulic conditions during downstream passage. 10th International Symposium on Hydraulic Structures (ISHS 2024), Zurich, Switzerland, June 17-19, 2024. http://hdl.handle.net/20.500.11850/676018

Roth, M.S., Wagner, F., Roessger, T., Kopecki, I., Powalla, D. and Stamm, J. (2025), An Experimental Approach for the Quantitative Assessment of Downstream Swimming Fish Behavior. River Res Applic, 41: 499-514. https://doi.org/10.1002/rra.4375

Wagner, F., Kopecki, I., Elings, J., Enders, U., Lindig, A., Maltzahn, K., Roessger, T., S. Roth, M., Royan, M., Stamm, J., and Hoerner, S. (2025) Behavior of downstream swimming brown trout in hydraulic conditions typical for turbine and pump intakes. Eingereicht bei PLOS ONE.

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Reduktion von Tierversuchen zum Schädigungsrisiko an Wasserkraftanlagen (RETERO-2)

Entwicklung eines Fischreaktionsmodells in hydraulischen Grenzsituationen

Sachbericht
Teil II

Backnang, 31.03.2025

Autoren: Dr.-Ing. Ianina Kopecki
Tobias Hägele M. Sc.
Dr.-Ing. Matthias Schneider

sje - Ecohydraulic Engineering GmbH
Dilleniusstr. 13, 71522 Backnang
URL: www.sjeweb.de
Email: mailbox@sjeweb.de

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 2
2 Datenbasis und Methodik ... 2
2.1 Datenquellen ... 3
2.1.1 Videotrackingdaten ... 3
2.1.2 Daten der Rücksacksensoren ... 3
2.1.3 Hydrodynamisch-numerische Simulationen ... 4
2.2 Koordinatensysteme und Datenverknüpfungen ... 4
2.3 Übersicht der ethologischen, physikalischen und rechnerischen Setups ... 5
3 Numerische Analysen ... 7
4 Auswertung der Tierversuche ... 8
4.1 Fischbewegungsmodi und Bewegungsmoduswechselpunkte ... 8
4.2 Schwimmkraft, Reaktionspunkte und Reaktionsstärke ... 9
4.3 Methode zu Berechnung der Schwimmgeschwindigkeit mittels Daten Rucksack-Sensoren 10
5 Vorhersagemodell für die Fischmortalität in Niederdruckturbinen ... 11
5.1 Grundprinzip ... 12
5.2 Wahrscheinlichkeit der Fischreaktionsstärke ... 12
5.3 Modell zur Vorhersage der Fischmortalität ... 14
6 Anwendung des Fischmortalitätsmodells in einer Fallstudie ... 16
6.1 Fallbeispiel ... 16
6.1.1 HPP Daten ... 16
6.1.2 Versuche zur Fischsterblichkeit ... 18
6.1.3 Daten der 3D-Strömungssimulation ... 18
6.1.4 Vorhersagen zur Fischsterblichkeit ... 19
7 Zusammenfassung und Ausblick ... 21
8 Literaturverzeichnis ... 24

Institutionenverzeichnis

IGF	Institut für Gewässerökologie und Fischereibiologie Jena
IWD	Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Technische Universität Dresden
OVGU	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
ISUT	Institut für Strömungstechnik & Thermodynamik (OVGU)
IESY	Institut für Elektrische Energiesysteme (OVGU)
SJE	SJE Ecohydraulic Engineering GmbH
TalTech	Tallinn University of Technology, Department of Computer Systems

1 Einleitung

Der Schwerpunkt des Projekts RETERO-2 für SJE liegt in der Erfassung von Fischreaktionen/-bewegungen in einem Parcours mit ähnlichen Bedingungen wie im Strömungstrakt einer Turbine/Pumpe. Die Schwimmaktivität von Fischen kann die Verletzungsrate während der Turbinenpassage beeinflussen (Vowles et al. 2014, Geiger et al. 2020). Die rheotaktisch positive Orientierung von Fischen wird häufig als Reaktion auf eine beschleunigte Strömung beobachtet (Haro et al. 1998, Beck et al. 2020). Das Schwimmen gegen die Strömung kann die Zeit verlängern, die im gefährlichen Bereich in der Nähe von sich bewegenden Maschinenteilen verbracht wird, und daher zu höheren Verletzungsraten bei aktiven Fischen führen. Bislang liegen keine gesicherten Verhaltensdaten für die stromabwärts gerichtete Passage bei hohen Geschwindigkeiten nahe oder oberhalb der Sprintgeschwindigkeit von Fischen vor. Es ist daher weitgehend unbekannt, ob Fische ihre rheotaktisch positive Orientierung beibehalten und welche Schwimmleistung sie unter solchen Bedingungen zeigen können. Auch die Rolle von SVG (Spatial Velocity Gradient) in Hochgeschwindigkeitsströmungen ist noch nicht vollständig untersucht worden.

Die Hauptaufgaben der Firma SJE in RETERO-2 waren: Die Erweiterung der Methoden für die Erfassung der Fischreaktionen/-Verhaltenstrigger, Erarbeitung der Datenbasis und darauf basierende Erstellung von Verhaltensregeln für Karpfenartige (Cyprinidae) und Barschartige (Percidae) (APs: 21, 23, 25, 30). Die Plausibilisierung bereits erarbeiteter (für Lachsartige (Salmonide)) und Erstellung neuer Reaktionsmodelle für Karpfenartige (Cyprinidae) und Barschartige (Percidae) (AP:27). Anwendung und erste Validierung der entwickelten Reaktionsmodelle auf eine reale Anlage (AP:32). Eine Einführung der Methoden in die Community und in die allgemeine Praxis (AP:28, 29). Die Vorhersage von Fischverhalten in hydraulischen Grenzsituationen mittels Reaktionsmodellen soll perspektivisch eine Basis für die Neuentwicklung und Verfeinerung der schon existierenden Fischschädigungsmodelle für Turbinen und Pumpen bilden.

In der ersten Phase des RETERO-Projekts entstanden wesentliche Vorarbeiten bezüglich experimenteller Datenverarbeitung, numerischen Simulationen und Auswertungsmethoden für die Tierversuche (Kopecki et al. 2022). In dem vorliegenden Sachbericht für die Phase II werden in den entsprechenden Kapiteln 2 (Datenbasis und Methodik), 3 (Numerische Analysen), und 4 (Auswertungen der Tierversuche) nur die Weiterentwicklungen für diese Themen beschrieben. Das Kapitel 5 beschreibt die neu ausgearbeitete Methodik zur Erfassung von Fischreaktionen sowie die Art und Weise wie diese Informationen in das neue Fischschädigungsmodell einfließen. In Kapitel 6 wird die Anwendung des neuen Fischschädigungsmodells an einer Feldstudie, die als Prototyp für die Modellentwicklung diente, beschrieben. Hier werden auch die Ergebnisse der Fischschädigungsuntersuchungen mit den Vorhersagen des neuen Modells verglichen.

2 Datenbasis und Methodik

Die wichtigsten Datenkomponenten der RETERO Phase II bestehen aus: (1) Videoaufzeichnungen der Fischbewegungen im Parcours, die in der Rinne der IWD unter Konzeption und Aufsicht des Partners IGF aufgenommen wurden; (2) die Daten der Rucksacksensoren, die vom Unterauftragnehmer TalTech (assoziierter Partner) entwickelt wurden; (3) die Verteilungen der hydrodynamischen Parameter in der Rinne, die über 2D-HN-Simulationen (SJE) gewonnen wurden. Um die Parameter, die die Reaktionen der Fische im Parcours bestimmen, zu identifizieren, wurden alle Datenquellen zeitlich synchronisiert und in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt. Das während Phase I entwickelte Programm zum Einlesen, Synchronisieren und Übertragen in ein einziges Koordinatensystem und das

Weiterverarbeiten aller verfügbaren Daten wurde an die Experimentbedingungen mit Karpfenartigen (Cyprinidae) und Barschartigen (Percidae) angepasst. Da sich die 2D -Simulationen als robust, schnell und präzise erwiesen hat, wurde in der Phase II auf das Einbeziehen von 3D Simulationen verzichtet.

2.1 Datenquellen

Die wichtigsten Projektdaten werden im Folgenden beschrieben.

2.1.1 Videotrackingdaten

Die Bewegungen der Fische in den Versuchen wurden mit synchronisierten Kameras aufgezeichnet. Bei den Döbelversuchen wurden vier seitliche und vier von oben filmenden Kameras verwendet (siehe Abbildung 1). Bei den Versuchen mit Flussbarschen wurden zusätzlich zwei weitere Kameras angebracht (mit Sicht von Oben), um das Verhalten der Fische auch am Anfang der Rinne besser zu verfolgen. Die Videoframes in den Versuchen mit Döbel und Barschen wurden im Gegenteil zu den Versuchen mit Bachforellen mit einer Bildrate von 40 Bildern pro Sekunde (statt zuvor 60) aufgenommen. Zur Kalibrierung des Beobachtungsbereichs in drei Dimensionen wurde ein räumlicher Kalibrierrahmen verwendet (siehe auch Kopecki et al. 2022).

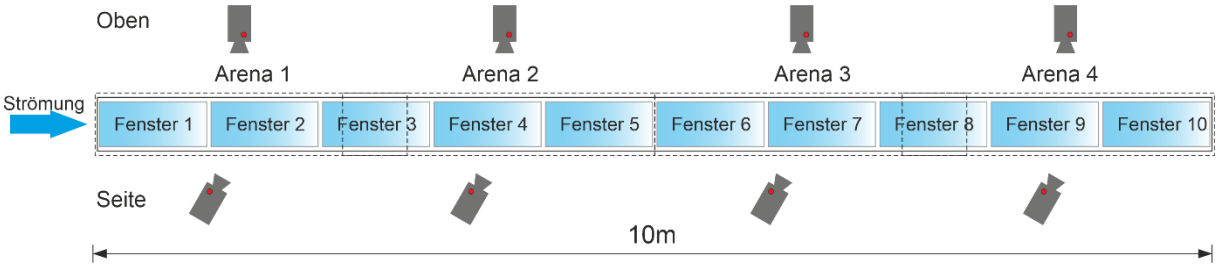


Abbildung 1. Definition der Arenen und Platzierung der oberen und seitlichen Kameras in der Rinne.

Die Videoaufnahmen wurden anschließend vom Partner IWD in der Trackingsoftware *Ethovision XT* (Noldus, Niederlande) verarbeitet, sodass theoretisch eine automatische Verfolgung der Tiere (Kopf-, Körpermitten- und Schwanzflossenposition) möglich sein sollte. Der zeitaufwändigste Teil der Videobearbeitung für die Partner IGF und IWD war die manuelle Korrektur der Kopf-, Körpermitten- und Schwanzflossenpositionen. Wegen des hohen Aufwands für dieses Postprocessing, wie auch bei Auswertungsmethode der ersten Phase mit Bachforellen (Frühjahr 2021, Kopecki et al, 2022), wurden nur die Videoframes von oben verwendet. Dieser Workflow erforderte eine manuelle Kalibrierung jeder Kamera durch SJE. Darüber hinaus konnte die tatsächliche vertikale Position der Fische nicht berücksichtigt werden, daher wurden die virtuelle Fischpositionen im hydraulischen Modell 2,5 cm über der Oberfläche der Rinne angenommen. Letzteres stellte kein wesentliches Problem dar, denn es wurde beobachtet, dass die meisten Versuchstiere die Bewegung am Boden der Rinne vorzogen.

2.1.2 Daten der Rücksacksensoren

Die vom assoziierten Projektpartner TalTech (TalTech, 2022) zusammen mit IGF entwickelten Rucksack-Sensoren (siehe Abbildung 2) sind innovative Vorrichtungen mit denen, ohne einen invasiven Eingriff am Fisch, folgende Parameter gemessen werden können: Gesamtwasserdruck [mbar], sowie jeweils 3 Komponenten der linearen Beschleunigung [m/s²], die Drehgeschwindigkeit [Grad/s] und die Magnetfeldstärke [µT]. Zu Synchronisierungszwecken wird jeder Dateneintrag mit einem Zeitstempel versehen. Die Sensoren wurden für die anschließende Datenverarbeitung mit dem Trackingsystem synchronisiert. Wie schon bei den Versuchen mit Bachforellen wurde ein Teil der Fische bei Döbel- und

Flussbarschversuchen mit angebrachten Rucksacksensoren durchgeführt (s. Übersicht der Versuche im Abschnitt 2.3).

Abbildung 2. Rucksack-Sensor befestigt an einer Flussbarschflosse.

Sensordaten mit einer Datenerfassungsrate von 100 Hz wurden SJE zur Weiterverarbeitung (Synchronisation mit der Videobeobachtung, Zeitmittelung und Visualisierung) in Form einer Textdatei zur Verfügung gestellt. Durch die mit dem Integrationsmodul ermöglichte Analyse von gekoppelten Videotracking- und Sensordaten ergab sich eine neue Methode zur Bestimmung der tatsächlichen Schwimmgeschwindigkeit der Fische (Kopecki et al. 2024a).

2.1.3 Hydrodynamisch-numerische Simulationen

Im Rahmen von RETERO Phase I wurde festgestellt, dass die vom Partner ISUT mit dem 3D-CFD-Modell StarCCM+ ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten für das Setup H3 (starker Quergradient, s. Tabelle 1 und Tabelle 2) starke Abweichungen zu den gemessenen Werten aufweisen. Die Ursachen dieser Abweichungen sollten durch eine von SJE an der Bauhaus-Universität Weimar betreuten Masterarbeit geklärt werden. Zusätzlich sollte die Arbeit helfen, den Einfluss möglicher Abweichungen auf die Vorhersagequalität der Fischreaktionsmodelle zu ermitteln. Die im Rahmen der Masterarbeit durchgeführte 3D Simulationen mit dem Model OpenFoam zeigten, dass sowohl die Wahl des Turbulenzmodells als auch die korrekte Definition der Zulaufrandbedingung wesentlich die Ergebnisse beeinflussten (Laska 2023). Da die Kalibrierung des 3D Modells einen hohen Arbeitsaufwand erforderte und gleichzeitig mit dem 2D Modellierung sehr präzise Ergebnisse erzielt werden konnten, wurde im Rahmen der Phase II auf die Verwendung von 3D Strömungssimulationen verzichtet.

Für die 2D Strömungssimulationen der Phase II wurde, wie in Phase I, das Modell Hydro_AS-2D (Nujic, 2008) verwendet. Die Reibung ist nach dem Manning-Strickler-Ansatz berücksichtigt. Die Simulationen wurden instationär (bis die Strömung einen quasi-stationären Zustand erreicht) auf einem nicht-strukturierten Gitter und unter Verwendung eines parabolischen Turbulenzmodells durchgeführt. Für das Pre- und Postprocessing wurde die kommerzielle Software SMS (Surface Modeling System, Aquaveo) verwendet. Um die Ergebnisse mit den Fischpositionen zu verknüpfen, wurden die hydrodynamischen Parameter (x- und y-Komponenten der zeitlich- und tiefen- gemittelten Fließgeschwindigkeit) auf ein Gitter mit einer einheitlichen Maschenweite von 2,5 cm interpoliert. Eine Übersicht der Setups für die ethohydraulische Versuche mit Döbeln und Flussbarschen sind Tabelle 1 und Tabelle 2 im Abschnitt 2.3 zu entnehmen, die Ergebnisse der 2D-Modellierungen sind im Abschnitt 3 zusammengefasst.

2.2 Koordinatensysteme und Datenverknüpfungen

Abbildung 3 zeigt eine Seitenansicht der Versuchsrinne mit zwei Koordinatensystemen und deren Ursprüngen (Systeme der hydrodynamischen Modelle und der Videokameras). Das Koordinatensystem der Videokameras liegt parallel zum Boden der Rinne und muss für die Umrechnung entsprechend gedreht und linear verschoben werden.

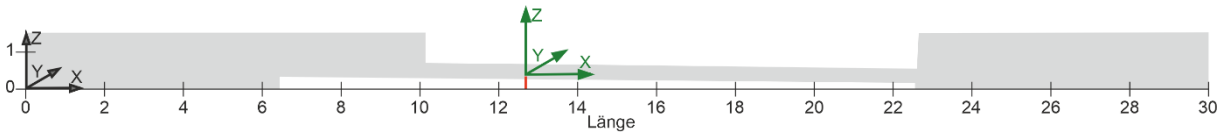


Abbildung 3. Seitenansicht der Versuchsrinne mit zwei Koordinatensystemen und deren Ursprüngen: Koordinatensystem der hydrodynamischen Modelle (schwarz) und Kamerakoordinatensystem (grün).

Das von SJE speziell entwickelte Programm erlaubt:

- das Einlesen und Zusammenführen der einzelnen Videodaten aus vier Arenen für jeden Fisch; Übertragen dieser Daten in ein gemeinsames Koordinatensystem (Koordinatensystem der hydrodynamischen Modelle);
- das Einlesen, eine Mittelung über die Zeit und Zusammenführen der Daten der Rucksack-Sensoren über den Zeitstempel mit den Videodaten,
- das Einlesen der Hydro_AS-2D Modellergebnisse, die Interpolation der hydrodynamischen Parameter vom unstrukturierten Modellgitter auf das regelmäßige Raster, Zusammenführen der Parameter mit den Fischpositionen.
- die Berechnung der tatsächlichen Schwimmgeschwindigkeiten von Fischen im Parcours auf der Grundlage von 2D-hydrodynamischen Parametern, das Mitteln dieser Geschwindigkeiten über die Zeit, um das Rauschen in den Daten zu entfernen; die Bestimmung der Schwimmmodi, Reaktionspositionen und die Reaktionsstärke der Fische mittels speziell entwickelten Algorithmen (s. Kapitel 4 und Kopecki et al. 2024b).

Die aufbereiteten Daten können in Textdateien (.csv-Format) exportiert und als Diagramme in Tabellenkalkulationsprogrammen oder GIS (QGIS) visualisiert werden. So leisten sie einen wichtigen Beitrag zur biologischen Analyse des IGF.

2.3 Übersicht der ethologischen, physikalischen und rechnerischen Setups

Die wichtigsten Daten zu den Varianten der ethologischen Hypothesen, physikalischen Konfigurationen und Modellierungssetups der Phase II des RETERO-Projekts sind für die Versuchsart Döbel Tabelle 1 und für die Versuchsart Flussbarsch Tabelle 2 zu entnehmen. Bei den Flussbarschexperimenten wurde die ursprüngliche Rinnengeometrie geändert: im oberen Bereich der Rinne wurde eine Erhöhung eingebaut um die Reaktionen der Barsche auch bei niedrigeren Geschwindigkeits- und SVG-Werten zu beobachten. Außerdem wurden die Abflüsse an die Fischgroße angepasst, was dann in 6 unterschiedlichen hydrodynamisch-numerischen Simulationen berücksichtig werden musste.

Für die Setups H1, H2 und H4 bei beiden Versuchsarten wurden die hydraulischen Simulationen durchgeführt, für diese Setups liegen auch die Ergebnistabellen als OpenData vor. Da Setup H3 (mit starkem Quergradienten) nur vereinfacht ethologisch evaluiert wurde, wurden die Modellierungsergebnisse, trotz erfolgreichen Modellkalibrierung, nicht mit den Fischpfaden gekoppelt. Für Setup 3 gibt es nur eine einzige hydraulische Simulation, die für alle 3 Fischarten gültig ist („H3-Hydro_AS-2D_brownTrout“). Die Anzahl der Fische in jedem Experiment beinhaltet alle Fische, die bei dem Versuch teilgenommen haben. Einige Tracks sind aber später aus der Evaluierung (Trackingfehler, sichtbaren Fluchtverhalten) ausgeschlossen worden.

Tabelle 1. Übersicht der ethologischen, physikalischen und rechnerischen Setups mit Döbeln.

Setup/Eigenschaften	**H1**	**H2**	**H4**	**H3**
Fischart	Döbel			
Fischgrößen, cm	19 bis 32	25 bis 35	20 bis 37	17 bis 33
Anzahl Fische	50	54	105	107
Rücksack-Sensor	-	-	+	-
Physikalisches Setup	Beschleunigungsabschnitt im oberen Rinnenabschnitt, Bereich mit starker Strömung im engen unteren Rinnenabschnitt			Beschleunigungsabschnitt zusätzlich mit starkem Quergradienten im oberen Rinnenabschnitt, Bereich mit starker Strömung im engen unteren Rinnenabschnitt
Abfluss in der Rinne, m³/s	0.5			0.5
Lichtverhältnisse	hell	dunkel	hell	hell
2D-HN-Modell	H1-Hydro_AS-2D_chub			H3-Hydro_AS-2D_brownTrout

Tabelle 2. Übersicht der ethologischen, physikalischen und rechnerischen Setups mit Flussbarschen.

Setup/Eigenschaften	**H1**	**H2**	**H4**	**H3**
Fischart	Flussbarsch			
Fischgrößen, cm	11 bis 36	10 bis 35	17 bis 41	14 bis 20
Anzahl Fische	55	55	96	115
Rücksack-Sensor	-	-	+	-
Physikalisches Setup	Beschleunigungsabschnitt im oberen Rinnenabschnitt, Bereich mit starker Strömung im engen unteren Rinnenabschnitt			Beschleunigungsabschnitt zusätzlich mit starkem Quergradienten im oberen Rinnenabschnitt, Bereich mit starker Strömung im engen unteren Rinnenabschnitt
Abfluss in der Rinne, m³/s	0.160; 0.260; 0.305; 0.365; 0.430; 0.460			0.5
Lichtverhältnisse	hell	dunkel	hell	hell
2D-HN-Modell	H1_Perch_Q160, H1_Perch_Q260, H1_Perch_Q305, H1_Perch_Q365, H1_Perch_Q430, H1_Perch_Q460			H3-Hydro_AS-2D_brownTrout

3 Numerische Analysen

In Kapitel 4 wird gezeigt, dass eine genaue Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten an den Stellen, an denen sich die Fische während der Versuche aufhielten, essentiell ist. Aus der Differenz zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Fischgeschwindigkeit im kalibrierten Video lässt sich die absolute Bewegungsgeschwindigkeit der Tiere berechnen. Die Positionen, an denen sich die Schwimmgeschwindigkeit der Fische ändert, geben Aufschluss darüber, auf welche Werte der hydrodynamischen Parameter die Fische besonders stark reagieren.

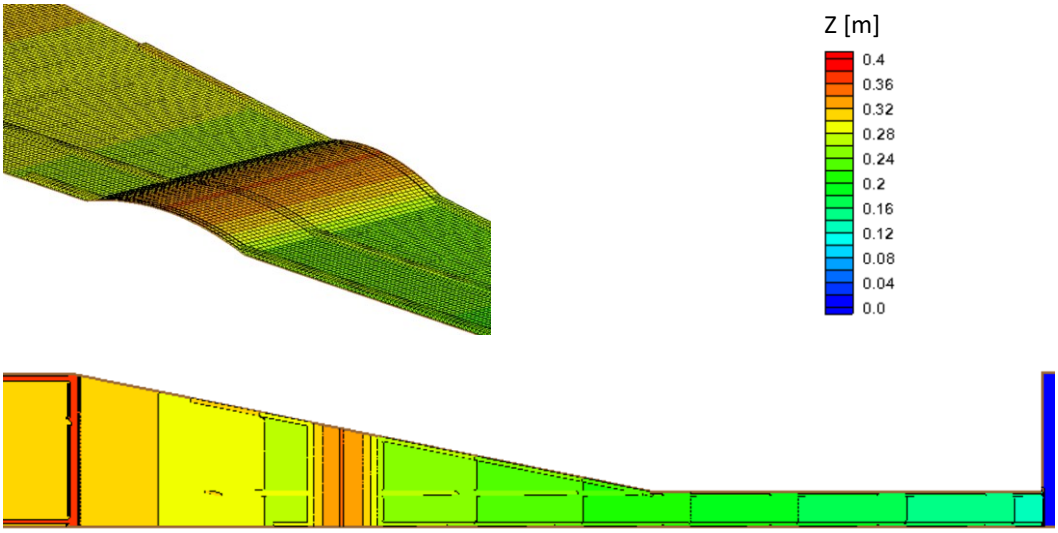


Abbildung 4. Fragment des Berechnungsnetzes (oben) und Draufsicht der Modellgeometrie (unten) für Setup 1 für die Barsche mit Erhöhung und Lichtkanälen (Ausschnitt Beobachtungsbereich).

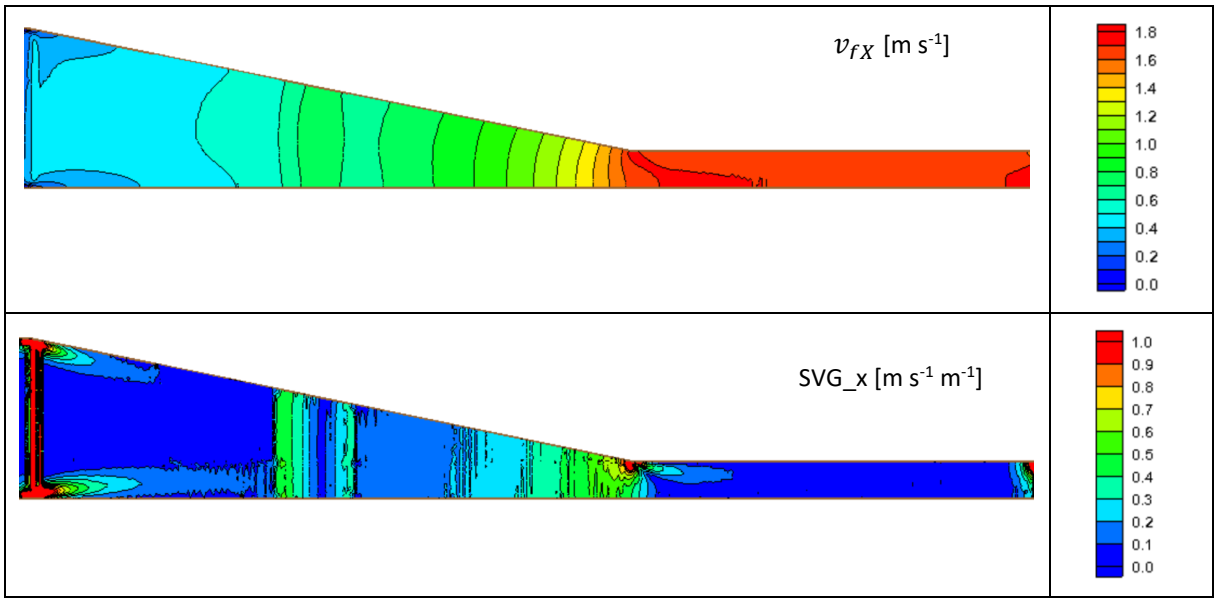


Abbildung 5. Verteilungen der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit v_{fX} (oben) und SVG_x (unten) bei einem Abfluss von 305 l/s, Ergebnisse der 2D Modellierung für Setup H1 (H2 und H4) für die Experimente mit Flussbarschen.

Im Rahmen der von SJE betreuten Masterarbeit (Laska 2023) wurden die kleinsten Strukturen der Rinne vermessen (Lichtstreifen, konstruktive Unebenheiten) um den Einfluss dessen auf die Ergebnisse der 3 Simulationen zu berücksichtigen. Die neue Geometrie wurde auch in das Netz der 2D

Simulationen integriert. 2D-HN-Ergebnisse für jedes Setup und bei jedem Abfluss wurden über die Messungen mit Keilsensoren (IWD) validiert.

Die Aktualisierung der Modelle durch die Integration der feineren Strukturen, die Berücksichtigung der fischgrößenabhängigen Sprintgeschwindigkeit durch sechs unterschiedliche Abflüsse und der zusätzliche Einbau von einer Erhöhung der Rinnensohle für die Experimente mit Barschen resultierte in insgesamt sieben zusätzlichen 2D Modellen für die Hypothese 1. Da die Hypothesen 2 und 4 die gleichen hydraulischen Verhältnisse benötigen, wurden diese Modelle auch für diese Fischtracks eingesetzt. Abbildung 4 zeigt eine Draufsicht des Höhenmodells der Rinne und einen Ausschnitt des 2D Netzes im Bereich der lokalen Erhöhung für die Experimente mit Flussbarschen.

Die entwickelten Modelle geben die gemessene Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung gut wieder. Die maximale Abweichung beträgt 0,14 m/s in Arena 4, die meisten Werte weichen aber nur um ± 0,05 m/s von den gemessenen Werten ab. Die Abweichungen waren zu dem unabhängig von der Messposition in der Rinne (ähnlich Abweichung in langsamen und schnellen Bereichen). Die vorausgesagten tiefengemittelten Geschwindigkeiten wurden ohne Berücksichtigung der möglichen geringfügigen Reduktion im bodennahen Bereich für die Berechnung der Schwimmgeschwindigkeiten und die Vorhersage der Fischreaktionen verwendet. Das ist gerechtfertigt, da die Oberfläche der Rinne aus Plexiglas besteht und die Werte der mittleren Kerngeschwindigkeit schon bei einem geringen Abstand vom Boden erwartet werden können. Die Verteilung der Fließgeschwindigkeit v_{fX} und des SVG_x sind für Setup H1 (H2 und H4) (mit Erhöhung) für den Abfluss von 305 l/s beispielhaft in Abbildung 5 dargestellt.

4 Auswertung der Tierversuche

Im Rahmen der ersten Phase des Projekts RETERO wurden grundlegende Techniken für die Auswertung der Tierversuche entwickelt und Erfahrungen mit der Datenverarbeitung gesammelt. Diese wurden im Rahmen der zweiten Phase weiter verifiziert und verfeinert, so dass ein neuartiges System für die Auswertung von Fischversuchen in sehr schnellen Strömungen entstanden ist. Einzelheiten der Auswertungsmethode sind der Publikation (Kopecki et al. 2024b) zu entnehmen. Die Methodik wurde für eine Reihe weiterer im Rahmen von RETERO entstanden Publikationen verwendet: Roth et al. (2025), Elings (2024), Elings et al. (2025), Wagner et al. (2025). Die neue Methodik, insbesondere die erfassten Statistiken für die Reaktionen der Fische in der Form von „Fish Reaction Strength“-Diagrammen bilden eine Basis für das neue Fischschädigungsvorhersagemodell (s. Kapitel 5).

4.1 Fischbewegungsmodi und Bewegungsmoduswechselpunkte

Die Kenntnis der tatsächlichen Geschwindigkeit von Fischen unter komplexen hydrodynamischen Bedingungen ist für die Erkennung von Schwellenwerten für Reaktionsauslöser sowie für die Bewertung der Reaktionsfähigkeit von Fischen unerlässlich. Anhand der Positionen der Fische in georeferenzierten Videobildern und der Kenntnis der Videobildraten wird die absolute Geschwindigkeit u_{abs} (genannt „ground speed”) berechnet. Basierend auf der absoluten Geschwindigkeit u_{abs}, kombiniert mit den Ergebnissen der Strömungssimulationen, kann die relative Bewegungsgeschwindigkeit der Fische u_{rel} berechnet werden. Da die Fische in den Experimenten die meiste Zeit parallel zur Hauptströmungsrichtung ausgerichtet waren, lässt sich der Wert der relativen Geschwindigkeit u_{rel} aus der absoluten Geschwindigkeit u_{abs} und der x-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit v_{fX} berechnen:

$$u_{rel} = u_{abs} - v_{fX} \ [m/s]$$

Die Strömungsgeschwindigkeit v_{fX} für die Berechnung der relativen Geschwindigkeit wird aus einem 2D-hydrodynamischen Modell gewonnen, während die absolute Geschwindigkeit u_{abs} aus der Position des Fischkörpers in der Videotrackingdaten mit bekannter Bildfrequenz (z. B. 60 Hz für Bachforellen und 40 Hz für Flussbarsche und Döbel) abgeleitet wird.

Vergleicht man die absoluten Werte und Richtungen dieser Geschwindigkeitskomponenten, lassen sich fünf Bewegungsmodi für Fische unterscheiden (siehe Tabelle 3): aktive Bewegung flussabwärts (rheotaktisch negativ), passive Drift (rheotaktisch negativ oder positiv), aktive Drift, „stationäre" Modus und aktive Bewegung flussaufwärts (rheotaktisch positiv).

Tabelle 3.: Fischbewegungsmodi in ethohydraulischen Experimenten, gekennzeichnet durch die Rheotaxis (RN=rheotaktisch negativ, RP=rheotaktisch positiv) und die Kombination aus absoluter Geschwindigkeit u_{abs}, relativer Geschwindigkeit u_{rel} der Fische und Fließgeschwindigkeit v_{fX} (nach Laska, 2023)

Bewegungs-modus	Beobachtetes Fischverhalten	Rheota-xis	Geschwindigkeiten		
			v_{fX}	u_{rel}	u_{abs}
1	Aktive Bewegung flussabwärts	RN	→	→	→
2	Passive Drift	RN or RP	→	0	→
3	Aktive Drift	RP	→	←	→
4	Bleibt visuell auf der Stelle (stationär)	RP	→	←	0
5	Aktive Bewegung flussaufwärts	RP	→	←	←

Ein Wechsel im Bewegungsmodus kann auf eine Reaktion der Fische auf einen hydrodynamischen Parameter deuten. Beispielsweise kann der Wechsel von Modus 2 (passive Drift) zu Modus 3 (aktive Drift) in den Bereichen mit zunehmender Geschwindigkeit auf eine spezifische Reaktion hinweisen, die aus dem Versuch der Fische resultiert, während der stromabwärts gerichteten Passage mehr Körperkontrolle zu erlangen. Zeigen viele Fische eine ähnliche Reaktion in einem bestimmten Teil des Gerinnes, kann der Wert eines hydrodynamischen Parameters an dieser Stelle als Schwellenwert für einen wichtigen Verhaltensauslöser angesehen werden (Kopecki et al. 2024b).

4.2 Schwimmkraft, Reaktionspunkte und Reaktionsstärke

Bei der Auswertung der Daten wurde deutlich, dass Fische, die in einem Schwimmmodus, z. B. Modus Aktive Drift, absteigen, ihre Geschwindigkeit u_{rel} erheblich variieren können. Ein plötzlicher Anstieg der Schwimmgeschwindigkeit kann auf eine Reaktion der Fische auf Umweltfaktoren hinweisen. Um diese Reaktionen erkennen und charakterisieren zu können, wurde die benötigte Leistung des Fisches für eine Bewegung mit einer bestimmten Relativgeschwindigkeit definiert. Ein Fisch, der mit der Geschwindigkeit u_{rel} schwimmt, muss die Strömungswiderstandskraft F_{drag} überwinden (Kopecki et al. 2024b):

$$F_{drag} = \frac{1}{2}\rho\, A\, u_{rel}^2 C_d \text{ [N]}$$

ρ ist die Dichte des Wassers [kg/m³], A ist die Bezugsfläche [m²], C_d ist der Widerstandskoeffizient [-].

Die Schwimmleistung, unabhängig von der rheotaktischen Orientierung und basierend auf dem absoluten Wert der relativen Schwimmgeschwindigkeit $|u_{rel}|$ ist definiert durch:

$$P_{drag} = F_{drag}|u_{rel}| = \frac{1}{2}\rho\, A|u_{rel}|^{\,3}\, C_d \quad [\mathrm{N\ m\ s^{-1}}]$$

Zum Vergleich des Schwimmverhaltens und der Leistungsfähigkeit von Fischen unterschiedlicher Größe und Sprintfähigkeit bei verschiedenen Wassertemperaturen wird die aktuelle Schwimmleistung auf die artspezifische Maximalleistung P_{sprint} normiert. Mit der Sprintgeschwindigkeit u_{sprint}, die mit den gildenspezifischen Modellen von Ebel (2024) berechnet wird, ergibt sich die normierte Leistung:

$$P_{norm} = \frac{P_{drag}}{P_{sprint}} \approx \frac{|u_{rel}|^{\,3}}{|u_{sprint}|^{\,3}}$$

Anhand der relativen Geschwindigkeit u_{rel} kann die normalisierte Leistung P_{norm} für alle Fischpositionen in den Experimenten kalkuliert werden. Des Weiteren postulieren wir, dass ein Wechsel von Schwimmen mit geringer Leistung zu Schwimmen mit hoher Leistung, oder generell Schwimmen mit erhöhtem Energieaufwand, ein wichtiger Indikator für die Reaktion der Fische auf die Strömung sind.

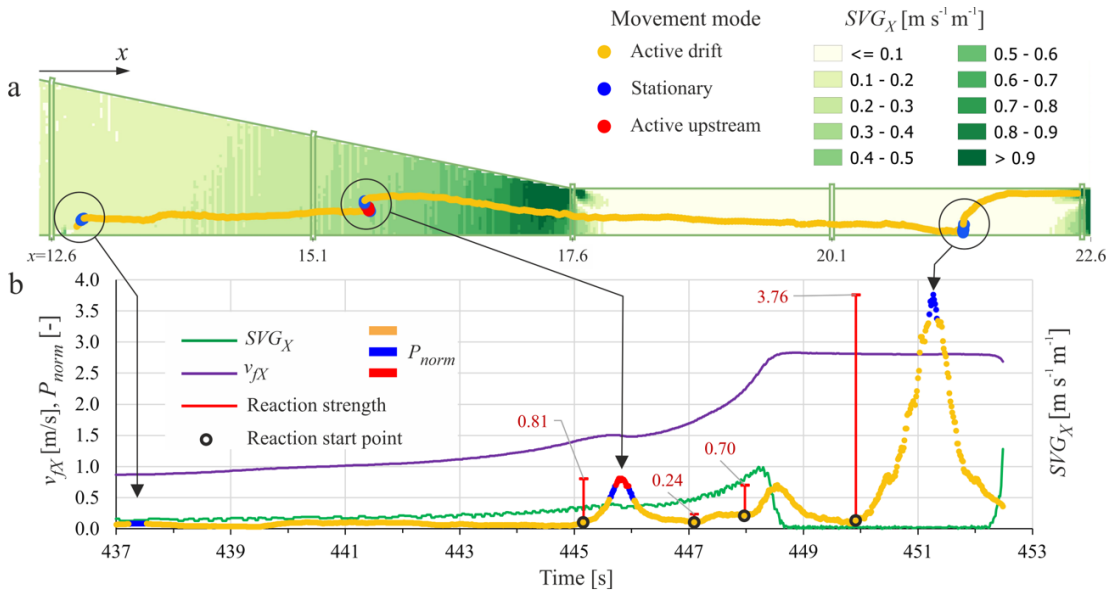


Abbildung 6. Abstieg der Bachforelle N38 im Tageslicht-Setup: (a) Kategorisierte Bewegungsmodi in den Arenen 1 bis 4; (b) Strömungsgeschwindigkeit v_{fX}, normierte Fischleistung P_{norm} (Farben der Legende entsprechen dem Bewegungsmodi), Absolutwerte von SVG_X und erkannte Reaktionsstartpunkte (schwarze Kreise) mit angegebener Reaktionsstärke (senkrechte rote Linien mit Werten) (aus Kopecki (2024b)).

Positionen plötzlicher Energiesteigerungen, z. B. Verhaltensumschaltungen, können mit den Umweltauslösern in Verbindung gebracht werden, ähnlich wie beim Umschalten des Schwimmmodus. Verknüpft man Startpositionen dieser Reaktionen mit einem maximal entwickelten Wert der Leistung P_{norm}^{max}, kann die Stärke einer Reaktion ermittelt werden (s. Abbildung 6).

4.3 Methode zu Berechnung der Schwimmgeschwindigkeit mittels Daten der Rucksacksensoren

Die Analyse der Daten der Rucksacksensoren in Verbindung mit der relativen Schwimmgeschwindigkeiten der Fische ermöglichte es, eine interessante Korrelation nachzuweisen. Diese lässt den Schluss zu, dass die Schwimmgeschwindigkeit von Bachforellen während Schwimmen mit Sprintgeschwindigkeit mit der Frequenz der Schwanzflossenschläge korreliert. Experimente bestätigen, dass die Beziehung zwischen der Schwanzflossenschlagfrequenz und der Schwimmgeschwindigkeit von der

Körperlänge der Fische abhängt und für Schwanzschlagfrequenzen über 5 Hz einzigartige Merkmale aufweist. Diese Ergebnisse werden durch die Grundlagenforschung zur Fortbewegung von Fischen unterstützt. Unsere Ergebnisse geben wertvolle Einblicke in die Reaktionen von Bachforellen auf Hochgeschwindigkeitsströmungen, wie sie in Fischaufstiegshilfen, Bypässen und in Turbinen und Pumpen vorkommen. Diese Ergebnisse wurden auf der wissenschaftlichen Konferenz in Quebec, Kanada, vorgestellt (Kopecki, 2024a).

5 Vorhersagemodell für die Fischmortalität in Niederdruckturbinen

Not for publishing

5.1 Grundprinzip

Not for publishing

Not for publishing

5.3 Modell zur Vorhersage der Fischmortalität

Not for publishing

Not for publishing

Not for publishing

6 Anwendung des Fischmortalitätsmodells in einer Fallstudie

6.1 Fallstudie

Die hier vorgestellte Feldstudie befasst sich mit der Genehmigung der modifizierten Kaplanturbine, die von der Firma Andritz Hydro für das Kraftwerk am Main entwickelt wurde. Die Entwicklung der neuen Turbine wurde in den Jahren 2016-2018 durchgeführt. Hauptziel der Modifikation war eine Verbesserung der Überlebensrate von Fischen während der Turbinenpassage. Nur das Laufrad der Kaplanturbine wurde geändert, die anderen mechanischen Komponenten blieben unverändert. In den Jahren 2020-2021 wurden Versuche zur Ermittlung von Fischmortalität durchgeführt, um die Effektivität des neuen Laufrads zu testen. Leider erwiesen sich die Ergebnisse dieser Versuche als nicht sehr aussagekräftig, da die Wiederfangrate der Fische nach der Turbinenpassage sehr niedrig war. Daher hat sich die Firma Andritz Hydro an das RETERO-Team gewandt. Die Hauptfrage war, wie die niedrigen Wiederfangraten zu erklären sind. Im Gegenzug stellte Andritz technische Daten zu den ursprünglichen und modifizierten Turbinen, Ergebnisse aus 3D-Strömungssimulationen sowie Daten zu Fischverletzungs- und Fischmortalitätsraten für die Entwicklung des Vorhersagemodells zur Verfügung.

6.1.1 HPP Daten

Bei der Fallstudie handelt es sich um ein Wasserkraftwerk mit geringer Fallhöhe, das am Main in Deutschland liegt (siehe Abbildung 10).

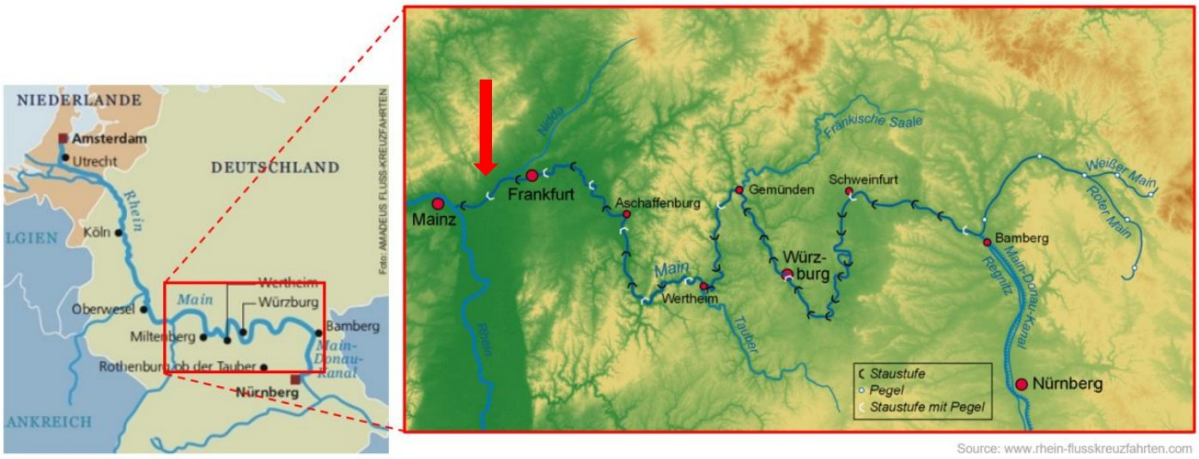
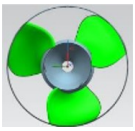
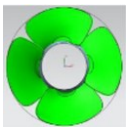


Abbildung 10. Geografische Lage der Feldstudie am Main, Deutschland (Quelle: Andritz Hydro).

Die Nennfallhöhe des Kraftwerks beträgt 2,82 m und der Auslegungsabfluss einer Turbine beträgt 60 m³/s. Die alte Turbine hat 4 Schaufeln und die neue 3 Schaufeln mit einem optimierten Profil (siehe Abbildung 11). Experimente zur Schädigung und Mortalität von Fischen wurden jeweils für die zwei Lastfälle der beiden Turbinen durchgeführt: 30 und 60 m³/s (s. Tabelle 5). Kontrollversuche ohne Fischpassage durch die Turbinen wurden ebenfalls bei denselben Abflüssen durchgeführt und mit den Buchstaben „C“ gekennzeichnet. Alle anderen technischen Details, die für die Anwendung des Mortalitätsvorhersagemodells erforderlich sind, sind in entsprechenden Tabellen in Abschnitt 6.1.4 zu finden.

Tabelle 5. Zusammenfassung der Testfälle in Feldstudie

Testfall	Konfiguration der Turbine		Abfluss, m³/s
			
Halblast	T1Q1	T2Q1	30
Vollast	T1Q2	T2Q2	60
Kontrolle	C1Q1, C1Q2	C2Q1, C2Q2	30/60

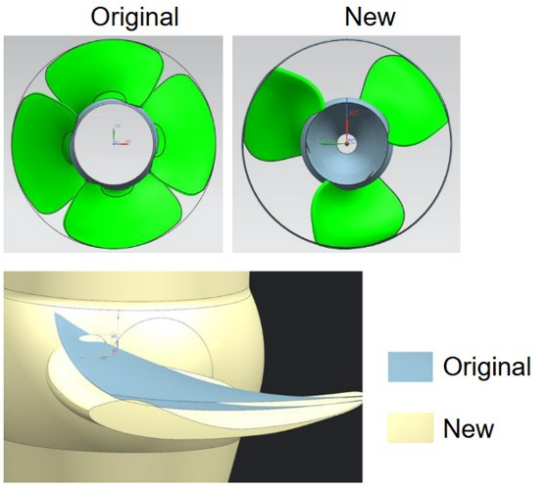


Abbildung 11. Laufradschaufeln und Profile des ursprünglichen und des modifizierten Laufrads.

6.1.2 Fischversuche

In den 2021 durchgeführten Fischversuchen wurde die Passage von Rotaugen (November 2021, mittlere Länge = 16,5 cm), Bachforellen (März 2021, mittlere Länge = 23 cm) und Europäischen Aalen (Oktober 2021, mittlere Länge > 60 cm) getestet.

Hier zeigen wir die Anwendung des neuen Mortalitätsmodells für die Bachforelle (siehe die beobachteten Mortalitätsraten in Tabelle 6). Die Wassertemperatur während der Bachforellenversuche betrug 9°C.

Tabelle 6. Ergebnisse der Fischversuche mit Bachforellen in der Fallstudie.

Versuch	Fischzahl	N gefangen	Wiederfansgrate	N tot nach 48 Stunden	Mortalitätsrate
T1Q1 (new/part)	150	64	**42.7 %**	3	4.7 %
T1Q2 (new/full)	150	96	64.0 %	2	2.1 %
T2Q1 (old/part)	150	90	60.0 %	8	8.9 %
T2Q2 (old/full)	150	108	72.0 %	7	6.5 %
C1Q1 (control/part)	150	55	**36.6 %**	0	0 %
C1Q2 (control /full)	150	109	72.7 %	1	0.9 %
C2Q1 (control/part)	150	100	66.7 %	0	0 %
C2Q2 (control /full)	150	118	78.7 %	0	0 %

Die Ergebnisse der Fischversuche zeigen, dass insbesondere beim geringen Turbinenabfluss von 30 m^3/s (Teillast) viele Fische der Strömung entkommen konnten und daher während der Versuche nicht in den Turbinenausläufen nachgewiesen wurden (besonders niedrige Überlebensraten: 42,7 % in T1Q1 und 36,6 % in C1Q1). Die Kontrollexperimente zeigen Überlebensraten von nahezu 100 % unabhängig vom Abfluss.

6.1.3 Daten der 3D-Strömungssimulation

Andritz Hydro führte dreidimensionale hydraulisch-numerische Simulationen durch, um die Leistungsfähigkeit der Turbinen zu bewerten. Für jedes Setup wurde die folgende Anzahl von Strömungslinien mit Ursprung im Bereich der Fischinjektion (siehe Abbildung 7) erstellt:

- T1Q1 (neu/teilweise): 121
- T1Q2 (neu/vollständig): 109
- T2Q1 (alt/teilweise): 121
- T2Q2 (alt/vollständig): 121

Nach Ebel (2024) liegt die Sprintgeschwindigkeit von Bachforellen mit einer mittleren Länge von 23 cm bei einer Wassertemperatur von 9°C zwischen 2,03 m/s (bei einer Zeitdauer von 1 s) und 1,65 m/s (bei einer Zeitdauer von 10 s). Die 3D Simulationen ergaben, dass die Strömungsgeschwindigkeit im Bereich der Fischinjektion bei Teillast etwa 0,43 m/s und bei Volllast 0,85 m/s betrug. Diese im Vergleich zur Sprintgeschwindigkeit der Fische geringen Strömungsgeschwindigkeiten erklären die niedrigen Wiederfangraten in den Experimenten.

6.1.4 Vorhersagen zur Fischmortalität

Die Fischmortalitätsraten wurden anhand der in Abschnitt 5.3 angegebenen Gleichungen ermittelt. Für beide Turbinenkonfigurationen wurde die entsprechen-de Schaufelblattdicke verwendet (12 cm für die neue und 4 cm für die alte Turbine). Es wurden zwei Arten von Berechnungen durchgeführt: (1) basierend auf den theoretischen Werten der Turbinengeschwindigkeiten gemäß der 1D-Näherung der Strömung (Ebel, 2024); (2) basierend auf den mit dem 3D-Modell vorhergesagten Strömungsgeschwindigkeitswerten. Die Werte der Eingangsparameter und die ermittelten Mortalitätsraten für den theoretischen Fall sind in Tabelle 7 angegeben für den Fall, der auf 3D-Strömungssimulationen beruht, in Tabelle 8.

Für den theoretischen Fall wurde angenommen, dass die Fische die Turbine auf Höhe des mittleren Turbinendurchmessers passieren. Die Referenzgeschwindigkeit entspricht hierbei der theoretischen Axialgeschwindigkeit. Im zweiten Fall wird angenommen, dass die Fische entlang der vorhergesagten Strömungslinien absteigen und den Rotorbereich an jener Stelle erreichen, an der diese Linien die tatsächliche vertikale Position der oberen Schaufelkante kreuzen. Für beide Szenarien wurde die in Abschnitt 5.3 definierte Expositionszeit zugrunde gelegt. Die initiale Mortalitätsrate im Simulationsfall wurde auf Basis des mittleren Durchmessers in der Mitte aller Rotor-Eintrittspunkte berechnet. Der Winkel θ wurde lastabhängig aus den simulierten Geschwindigkeitskomponenten bestimmt.

Tabelle 7. Parameter und Ergebnisse des neuen Modells (basierend auf den theoretischen Werten der Strömungsgeschwindigkeiten), Fischexperimentergebnisse und Ergebnisse anderen Referenzmodelle (Ebel, 2024)

Parameter	**Einheit**	**Versuch/Lastfall**			
		T1Q1 (neu, 50%)	T1Q2 (neu, 100%)	T2Q1 (alt, 50%)	T2Q2 (alt, 100%)
Q	m³/s	30	60	30	60
H	m	3.44	3.48	3.49	3.45
z	-	3	3	4	4
n	1/s	1.25	1.25	1.25	1.25
g	m/s²	9.81	9.81	9.81	9.81
η	-	0.89	0.87	0.86	0.87
d_{max}	m	4.1	4.1	4.1	4.1
d_{min}	m	1.8	1.8	1.8	1.8
d_{mean}	m	2.95	2.95	2.95	2.95
CL_{mean}	m	9.27	9.27	9.27	9.27
u_{mean}	m/s	11.58	11.58	11.58	11.58
v_{ax}	m/s	2.81	5.63	2.81	5.63
θ	°	42.71	24.53	42.01	24.22
t_b	m	0.12	0.12	0.04	0.04
t_e	s	0.133	0.133	0.1	0.1
L	m	0.23	0.23	0.23	0.23
T_w	°C	9	9	9	9
u_{sprint}	m/s	2.44	2.44	2.50	2.50
P_{norm}	-	1.54	12.34	1.43	11.41
M_i	%	1.75	1.07	1.69	1.04
M_s	%	4.02	0.78	4.28	0.83
$\boldsymbol{M_t}$	%	**5.77**	**1.85**	**5.97**	**1.87**
M_t (Feldversuch)	%	**4.70**	**2.10**	**8.90**	**6.50**
Empirisch, Larinier & Dartiguelongue 2002a		8.15	8.15	9.19	9.19
Empirisch, Larinier & Dartiguelongue 1989		7.43	7.43	9.07	9.07
Phys, Monten, 2 Fassung		13.83	7.32	18.45	9.76
Phys, Turnpenny 2000		11.10	6.87	14.97	9.19
Phys, von Raben 1 Fassung		22.51	13.94	30.35	18.63
Phys, Monten, 1 Fassung		14.88	7.87	19.84	10.50

Tabelle 8. Parameter und Ergebnisse des neuen Modells (basierend auf simulierten Strömungsgeschwindigkeitswerten)

Parameter	Einheit	Versuch/Lastfall			
		T1Q1 (neu, 50%)	T1Q2 (neu, 100%)	T2Q1 (alt, 50%)	T2Q2 (alt, 100%)
Q	m³/s	30	60	30	60
H	m	3.44	3.48	3.49	3.45
z	-	3	3	4	4
n	1/s	1.25	1.25	1.25	1.25
η	-	0.89	0.87	0.86	0.87
$d_{m\ Abstieg}$(Laut 3D Modell)	m	2.58	2.72	2.67	2.77
Höhe Schaufeloberkante	m	0.33	0.48	0.45	0.57
v_{ax}	m/s	2.83	5.18	2.89	4.97
θ	°	46.85	27.14	47.72	29.75
t_b	m	0.12	0.12	0.04	0.04
t_e	s	0.133	0.133	0.1	0.1
L	m	0.23	0.23	0.23	0.23
T_w	°C	9	9	9	9
M_i	%	2.17	1.28	2.07	1.34
M_s	%	4.31	0.95	4.08	1.24
$\boldsymbol{M_t}$	%	**6.48**	**2.23**	**6.15**	**2.58**
$\boldsymbol{M_t}$ (Feldversuch)	%	**4.70**	**2.10**	**8.90**	**6.50**
Empirisch, Larinier & Dartiguelongue 2002a		8.15	8.15	9.19	9.19
Empirisch, Larinier & Dartiguelongue 1989		7.43	7.43	9.07	9.07
Phys, Monten, 2 Fassung		13.83	7.32	18.45	9.76
Phys, Turnpenny 2000		11.10	6.87	14.97	9.19
Phys, von Raben 1 Fassung		22.51	13.94	30.35	18.63
Phys, Monten, 1 Fassung		14.88	7.87	19.84	10.50

Zur Bewertung der Ergebnisse des neuen Mortalitätsmodells wurden diese mit den tatsächlich gemessenen Mortalitätsraten aus den Versuchen sowie mit den Vorhersagen von sechs physikalischen und empirischen Modellen (s. Tabelle 7) aus der Literatur verglichen (Ebel, 2024). Dabei zeigte sich, dass das neue Modell – unabhängig davon, ob es auf theoretischen oder simulierten Geschwindigkeiten basiert – die Mortalitätsraten deutlich näher an den beobachteten Werten prognostiziert und in dieser Hinsicht bessere Ergebnisse liefert als die bisherigen empirischen und physikalischen Modelle.

Auffällig ist, dass die vorhergesagte Mortalität für die neue und die konventionelle Turbinenkonfiguration bei gleicher Last vergleichbare Werte aufweist. Dies lässt sich vermutlich dadurch erklären, dass im Modellkonzept bislang die genaue geometrische Form der Laufschaufeln nicht berücksichtigt wurde. Die fischfreundlichere Geometrie des neuen Turbinendesigns könnte zu einem potenziell geringerem Verletzungsrisiko führen. Zudem sagt das Modell niedrigere als beobachtet Mortalitätsraten für die konventionelle Turbine voraus – den Ursachen dieses Effekts sollte in weiteren Untersuchungen nachgegangen werden.

Die Modellvorhersagen, die auf simulierten Geschwindigkeiten basieren, stimmen etwas besser mit den beobachteten Mortalitätsraten überein als theoretisch basierte Ergebnisse. Die Berücksichtigung des fischfreundlichen Designs könnte die Vorhersagegenauigkeit des Modells künftig weiter verbessern.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Not for publishing

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Im Rahmen des Vorhabens hat SJE umfassende wissenschaftlich-technische Arbeiten geleistet, die zu folgenden Ergebnissen führten:

Ein wichtiges Ergebnis war die Fertigstellung eines Integrationsmoduls zur Verarbeitung hydrodynamischer 2D- und 3D-Daten sowie Fischpositionsdaten aus Videotracking. Dieses Modul ermöglicht zudem die Koordinatentransformation der Fischpositionen sowie die Einbindung und zeitliche Mittelung von Daten der Rucksacksensoren. Damit konnten sämtliche Fischversuche mit Bachforellen, Flussbarschen und Döbeln systematisch prozessiert werden.

Es wurden sechs weitere 2D-hydrodynamische Modelle für die Versuche mit Flussbarschen erstellt, kalibriert und validiert. Zudem wurde im Rahmen einer von SJE mitbetreute Masterarbeit an der Universität Weimar ein dreidimensionales Modell zur Untersuchung einer spezifischen Strömungsvariante (Quergradient) erstellt (Laska, 2023). Das aus Phase 1 des RETERO stammende 2D-hydrodynamische Modell für Bachforellen und Döbel wurde durch die Integration feiner geometrischer Strukturen weiter verbessert. Die kalibrierten hydrodynamischen Modelle ermöglichten eine präzise Ermittlung der tatsächlichen Schwimmgeschwindigkeiten der Fische in den Laborversuchen.

Zur Analyse des Fischverhaltens in sehr schnellen Strömungen wurde ein neuartiges Auswertungssystem entwickelt, das die Grundlage für ein Reaktionsmodell der Fische lieferte. Weiterhin befasste sich eine von SJE mitbetreute Doktorarbeit im Rahmen des Europäischen Doktorandennetzwerks (European Training Network RIBES) unter anderem mit der Untersuchung von Fischreaktionen und deren Klassifizierung auf Basis von Hidden-Markov-Modellen.

Auf Grundlage des entwickelten Reaktionsmodells konnte ein neues physikalisches Modell zur Vorhersage von Mortalitätsraten in Niederdruckturbinen und -Pumpen konzipiert werden. Dieses berücksichtigt neben technischen Parametern der Turbinen auch Umweltbedingungen wie Wassertemperatur sowie artspezifische Eigenschaften der Fische. Das neue Fischschädigungsmodell wurde an Daten einer Feldstudie mit Tierversuchen zur Ermittlung von Mortalitätsraten validiert.

Die erzielten Ergebnisse wurden in mehreren wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht und auf zwei internationalen Fachkonferenzen präsentiert.

Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Das neue Vorhersagemodell zur Fischschädigung in Turbinen und Pumpen wird ab sofort in das Portfolio von SJE aufgenommen und veröffentlicht. Es erweitert die bestehende Modellpalette – bisher bestehend aus habitatbezogenen Modellen zur Analyse von Abflussregelungen, der Leitströmung an Fischaufstiegsanlagen und schnellen Abflussänderungen – um ein Werkzeug zur Bewertung des

Fischabstiegs. Das Modell kann sowohl in vereinfachter Form als auch in Kombination mit komplexer 3D-Strömungsmodellierung angewendet werden.

Die Beratung zur Fischleitung – sowohl bei der Planung als auch beim Betrieb von Wasserkraftanlagen – ergänzt das bestehende Dienstleistungsangebot zur ökologischen Optimierung von Wasserkraftanlagen und erweitert es auf den Bereich der Pumpenanlagen. Zusätzlich wird durch das neue Modell eine fundierte Beratung zur optimalen Konzeption von Fischschädigungsexperimenten an Wasser- und Pumpkraftwerken ermöglicht.

Die im Projekt gewonnenen Erfahrungen und Ergebnisse führten zu neuen Kontakten sowohl zu Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern – insbesondere durch Präsentationen auf Fachkonferenzen – als auch zu Turbinenherstellern. Diese Netzwerke eröffnen vielversprechende Perspektiven für künftige Kooperationen und Anschlussprojekte.

Es wurde kein Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt.

Die erfolgten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NAB:

Konferenzbeiträge und wissenschaftliche Publikationen:

Elings, J., Kopecki, I., Wagner, F., Mawer, R., Bruneel, S., Pauwels, I., Goethals, P. (2025) Understanding Fish Behaviour under Extreme Flows during Downstream Movement. Eingereicht bei *Ecological Engineering*

Kopecki, I., Tuhtan, J., Wagner, F., Roessger, T., Hägele, T., Schneider, M., Hoerner, S. (2024a) Estimating fish swimming speed using non-invasive backpack sensors in a laboratory flume at high flow velocities International Symposium on Ecohydraulics and Fish Passage 2024.

Kopecki, I., Wagner, F., Hoerner, S. (2024b) Quantifying fish response to extreme hydraulic conditions during downstream passage. 10th International Symposium on Hydraulic Structures (ISHS 2024), Zurich, Switzerland, June 17-19, 2024

Roth, M.S., Wagner, F., Roessger, T., Kopecki, I., Powalla, D. and Stamm, J. (2025), An Experimental Approach for the Quantitative Assessment of Downstream Swimming Fish Behavior. River Res Applic, 41: 499-514. https://doi.org/10.1002/rra.4375

Wagner, F., Kopecki, I., Elings, J., Enders, U., Lindig, A., Maltzahn, K., Roessger, T., S. Roth, M., Royan, M., Stamm, J., and Hoerner, S. (2025) Behavior of downstream swimming brown trout in hydraulic conditions typical for turbine and pump intakes. Eingereicht bei PLOS ONE.

Dissertationen und Diplomarbeiten:

Elings, J. (2024). How fish move: linking fine-scale movement and decision processes to hydraulic data. Ghent University. Faculty of Bioscience Engineering, Ghent, Belgium.

Laska, D. (2023). “Vergleich von 2D- und 3D-Modellen als Grundlage für die Vorhersage von Fischreaktionen in einer Laborrinne.” Master Thesis, Bauhaus-Universität Weimar.

Wegen des in sehr großem Umfang im Projekt gewonnenen wertvollen wissenschaftlichen Datenmaterials sind weiterhin folgende **Veröffentlichungen geplant:**

- Grundlagen und Anwendung einer neuartigen Fischschädigungsmodell für Niederdruckturbinen- und -Pumpen. (Arbeitstitel, Journal: Wasserwirtschaft)
- Physically based fish mortality model accounting for fish activity: theory and application example. (Arbeitstitel, Journal: Journal of Ecohydraulics)

- Non-invasive backpack sensors for the assessment of fish activity and reactions in complex hydrodynamic conditions (Arbeitstitel, Journal: zu definieren)
- Strength and Probability of fish reaction in complex hydrodynamic conditions (Arbeitstitel, Journal: ASCE – Journal of Hydraulic Engineering)
- Innovative Methoden zur Aufzeichnung und Analyse von Fischbewegungen in Laborexperimenten (Arbeitstitel, Journal: Wasserwirtschaft)

8 Literaturverzeichnis

Aquaveo. SMS: Software. https://www.aquaveo.com/software/sms-surface-water-modeling-system-introduction.

Beck, C., Albayrak, I., Meister, J., Peter, A., Selz, O., Leuch, C., Vetsch, D., and Boes, R. (2020). "Swimming behavior of downstream moving fish at innovative curved-bar rack bypass systems for fish protection at water intakes". Water 12: 3244.

Enders, E. C.; Gessel, M. H.; Anderson, J. J.; Williams, J. G. (2012): Effects of Decelerating and Accelerating Flows on Juvenile Salmonid Behavior. In: *Transactions of the American Fisheries Society* 141 (2), S. 357–364. DOI: 10.1080/00028487.2012.664604.

Haro, A., Odeh, M., Noreika, J., and Castro-Santos, T. (1998). "Effect of water acceleration on downstream migratory behavior and passage of Atlantic salmon smolts and juvenile American shad at surface bypasses." Transactions of the American Fisheries Society, 127 (1): 118–127.

Geiger, F., Cuchet, M., Rutschmann, P. (2020): "Zur Berechnung der Schädigungsraten von Fischen bei der Turbinenpassage." Wasserwirtschaft, 110(12): 33–40.

Jorde, K., Schneider, M., & Zöllner, F. (2000): Ökologisch begründete Mindestwasserregelungen, Tagungsband: Wasserbewirtschaftung an Bundeswasserstrassen - Probleme, Methoden, Lösungen. *Bundesanstalt für Gewässerkunde, Berlin, Veranstaltungen 2/2000*, 203-224.

Kopecki, I., Schneider, M., & Hägele, T. (2022): RETERO - Reduktion von Tierversuchen zum Schädigungsrisiko bei Turbinenpassagen durch Einsatz von Roboterfischen, Strömungssimulationen und Vorhersagemodellen, Sachbericht Teil II.

Noack, M.; Schneider, M.; Wieprecht, S. (2013): The Habitat Modelling System CASiMiR: A Multivariate Fuzzy Approach and its Applications. In: I. Maddock, A. Har-by, P. Kemp und P. J. Wood (Hg.): *Ecohydraulics. An integrated approach*. Chichester, West Sussex, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc, S. 75–91.

Nujic, M. (2008): Hydro_AS-2D: Ein zweidimensionales Strömungsmodell für die wasserwirtschaftliche Praxis*. Benutzerhandbuch. Rosenheim (Deutschland)*

QGIS: Software. Version 3.22.4-Biatowieza. https://www.qgis.org/de/site/.

TalTech: Fish Backpack Sensor: https://biorobotics.pages.taltech.ee/backpack/en/.

Vowles, A.S., Karlsson, S.P., Uzunova, E.P., and Kemp, P.S. (2014). "The importance of behaviour in predicting the impact of a novel small-scale hydropower device on the survival of downstream moving fish." Ecological Engineering 69: 151–159.