

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Gisen, David

Modellierung aufwärtsgerichteter Fischwanderung auf Basis der „Eulerian-Lagrangian-agent method“. FuE-Abschlußbericht B3953.01.04.70007

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106572>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2018): Modellierung aufwärtsgerichteter Fischwanderung auf Basis der „Eulerian-Lagrangian-agent method“. FuE-Abschlußbericht B3953.01.04.70007. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

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

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

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

FuE-Abschlussbericht
Modellierung aufwärtsgerichteter
Fischwanderung auf Basis der
„Eulerian-Lagrangian-agent method“

B3953.01.04.70007

Dezember 2018

FuE-Abschlussbericht
Modellierung aufwärtsgerichteter
Fischwanderung auf Basis der
„Eulerian-Lagrangian-agent method“

Beginn des Vorhabens: Juli 2015

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3953.01.04.70007

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Binnenbereich
 Referat: W1 Wasserstraße und Umwelt
 Projektleiter: David Gisen
 Bearbeiter: David Gisen

Karlsruhe, Dezember 2018

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

Zusammenfassung

Die aufwärtsgerichtete Fischwanderung in den deutschen Bundeswasserstraßen wird durch viele Stauanlagen behindert. Der Bau von effizienten Fischaufstiegsanlagen kann dieses ökologische Problem verringern. Effizienz im Feld oder im Labor zu bestimmen, ist jedoch kostspielig und langwierig. Ein numerisches Modell, das Fischverhalten auf räumlichen und zeitlichen Skalen von Dezimetern beziehungsweise Sekunden simuliert, kann Planungsentscheidungen unterstützen und das wissenschaftliche Verständnis der Auswirkungen verschiedener Bauweisen fördern.

Die „Eulerian-Lagrangian-agent“-Methode (ELAM) wurde für die Entwicklung eines neuen individuenbasierten Modells („ELAM-de“) herangezogen. Das Modell wurde mit 3D-Strömungsdaten gespeist, die mit der quelloffenen Softwarebibliothek OpenFOAM® auf Netzen aus beliebigen Polyedern berechnet wurden. Sechs Verhaltensmuster wurden abgeleitet aus Bewegungsdaten von lebenden Bachforellen in zwei unterschiedlichen Strömungsfeldern in einer großen Laborrinne (Länge x Breite x Wassertiefe 11,78 m x 2,50 m x 0,60 m). Mittels der Verhaltensmuster wurde das individuenbasierte Modell erstellt, kalibriert und validiert.

Im ersten Strömungsfeld, das einen Jet mit erhöhter Geschwindigkeit enthielt, betrug die Differenz zwischen kalibriertem Modellergebnis und Beobachtung bei allen sechs Mustern maximal $\pm 18,3$ Prozentpunkte. Die Validierung im zweiten, homogeneren Strömungsfeld ergab mit denselben Modellparametern eine qualitative Übereinstimmung bei fünf Mustern. Der Betrag der advektiven Beschleunigung und der hydrostatische Druck waren entscheidende hydraulische Stimuli für die Wiedergabe des beobachteten Verhaltens. Auch Akklimatisierung mit Hilfe einfacher Gedächtnisfunktionen war ein wichtiger Bestandteil des individuenbasierten Modells. ELAM-de liefert Schätzwerte für Passageraten und metabolische Kosten in einer Rinne, die - nach erfolgreicher weiterer Validierung - verwendet werden können, um die Effizienz verschiedener Bau- und Betriebsweisen von Fischaufstiegsanlagen zu vergleichen.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
1.1	Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens	1
1.2	Bedeutung für die WSV	1
1.3	Untersuchungsziel	1
2	Untersuchungsmethoden	2
3	Ergebnisse	4
4	Diskussion	5
5	Schlussfolgerungen und Ausblick	5
6	Literaturverzeichnis	7

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Ein ELAM-Modell verbindet Euler'sche, Lagrange'sche und eine Agenten-Komponente. (a) Visualisierung der Modellinformation und der zugehörigen Komponente. (b) Implementierung der Komponenten und Informationsfluss: Hydraulische Daten werden aus einem Computational-Fluid-Dynamics-Modell (CFD) gewonnen und liegen auf einem diskreten Netz vor. Das Verhaltensmodell verwendet diese sowie gespeicherte Zustandsvariablen, um Geschwindigkeit und Richtung eines Individuums zu berechnen. Das Software-Framework bewegt das Individuum in Raum und Zeit und speichert die aufgenommenen Informationen entlang des Wegs. Dieser Ablauf wird für jeden Zeitschritt wiederholt.	3
Bild 2: Modellierter Schwimmpfad einer Bachforelle. Schnitt durch das Geschwindigkeitsfeld 0,07 m über der Sohle (Wassertiefe 0,60 m). (a) mit Schlitz, (b) ohne Schlitz. Durchflüsse $Q_{\text{FAA}} = 0,200 \text{ m}^3/\text{s}$ (jeweils unten im Bild) und $Q_{\text{Rechen}} = 0,800 \text{ m}^3/\text{s}$ (oben).	4

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: <i>Dissertation „Modeling upstream fish migration in small-scale using the Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM)“</i>	
---	--

Dieser Bericht ist eine deutschsprachige Kurzfassung der Dissertation „Modeling upstream fish migration in small-scale using the Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM)“ (Gisen 2018, Anlage 1) und wurde in Teilen bereits in der Reihe Forschung Xpress¹ veröffentlicht.

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Seit Jahrhunderten werden Stauanlagen zur Energieerzeugung, zur Schiffbarmachung von Flüssen, zur Verbesserung des Schutzes vor Hochwasser und zum Zweck der Speicherung von Trink- und Betriebswasser errichtet. Dies führte im Zusammenspiel mit der Zerstörung von Laichgewässern sowie Überfischung und Wasserverschmutzung zu einem dramatischen Rückgang der Fischbestände (Lenders et al. 2016). Bei der Errichtung der meisten Stauanlagen an den Bundeswasserstraßen Main, Neckar und Mosel wurden Fischtreppe angelegt, um eine Wanderung flussaufwärts zu ermöglichen. Diese waren jedoch oftmals zu steil, zu klein oder zu weit von natürlichen Wanderrouten entfernt und wurden zudem nicht ausreichend gewartet, um einen bestandserhaltenden Fischeaufstieg zu gewährleisten. Die Entwicklungen des internationalen und nationalen Umweltschutzes, die einem breiten gesellschaftlichen Bewusstseinswandel Rechnung trugen, führten ab den 1970er-Jahren sukzessive zu einer Verbesserung der Wasserqualität. Ein umweltpolitischer Meilenstein war die Verabschiedung der Europäischen Wasser-Rahmenrichtlinie (WRRL) durch das Europäische Parlament im Jahr 2000. Diese fordert die EU-Mitgliedstaaten auf, Maßnahmen zur Verbesserung der ökologischen Bedingungen in heimischen Fließgewässern zu ergreifen. Ziel ist es, einen „guten ökologischen Zustand“ oder bei erheblich veränderten Gewässern ein sogenanntes „gutes ökologisches Potenzial“ zu erreichen.

1.2 Bedeutung für die WSV

Um die Ziele der WRRL in Bezug auf die ökologische Durchgängigkeit zu erfüllen, muss die Durchgängigkeit an den Bundeswasserstraßen an ca. 250 Stauanlagen sichergestellt werden. Dies erfordert in den meisten Fällen den Bau einer neuen Fischeaufstiegsanlage. Deren Funktionsfähigkeit und Effizienz soll für mehr als 60 heimische Fischarten gewährleistet werden, obwohl sich Eigenschaften wie Leistungsfähigkeit, Migrationsverhalten und Schwarmverhalten von Art zu Art stark unterscheiden können.

1.3 Untersuchungsziel

Feldstudien zur Gewinnung der notwendigen Daten werden durch die natürliche Variabilität der Fischbestände und weiterer variabler Einflussgrößen erschwert (Cooke und Hinch 2013). Laboruntersuchungen sind in ihren Dimensionen begrenzt und werden durch die künstliche Umgebung beeinflusst. Eine alternative Möglichkeit für die Bewertung der Effizienz von Fischtreppe sind numerische Simulationsmethoden für die Hydraulik und das Verhalten von Fischen. Sie zielen auf eine quantitative Bewertung von baulichen Alternativen ab, wie sie in der Planungs-

¹ https://www.baw.de/DE/service_wissen/forschung_entwicklung/forschung_entwicklung.html

praxis häufig benötigt wird. 2015 wurde in der BAW in enger Kooperation mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ein Forschungsprojekt begonnen, um einen neuen Ansatz auf der Basis individuenbasierter Modellierung (IBM) zu entwickeln. Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines numerischen Verfahrens, welches den quantitativen Vergleich von baulichen und hydraulischen Varianten von Fischaufstiegsanlagen ermöglicht. Es soll wissenschaftliche Erkenntnisse liefern und die Entscheidungsfindung in der Planungsphase unterstützen.

2 Untersuchungsmethoden

Individuenbasierte Modellierung ist eine junge Disziplin der Ökologie, die sich in den letzten Jahrzehnten entwickelt hat. Im Projekt wird sie genutzt, um das Verhalten virtueller Fische in einem numerischen Strömungsmodell abzubilden. Als Modellkonzept wurde die „Eulerian-Lagrangian-agent“-Methode (ELAM, Goodwin et al. (2014)) gewählt. Diese kombiniert numerische Strömungssimulationen in der Euler’schen Beschreibung und individuelle Bewegung und Transport in der Lagrange’schen Beschreibung mittels eines Verhaltensmodells (Agent). Das Verhaltensmodell ist die mathematische Repräsentation eines Fisches (Bild 1).

Beobachtete Verhaltensdaten von Bachforellen in zwei Strömungsfeldern wurden analysiert, um typische Verhaltensmuster für die Entwicklung, Kalibrierung und Validierung des neuen Verhaltensmodells zu identifizieren. Die Daten stammten aus einem weiteren Forschungsprojekt von BAW und BfG, das an der ethohydraulischen Rinne in Karlsruhe durchgeführt wurde (Czerny und Schütz 2017). In diesen Untersuchungen wurde das Verhalten von Fischen unter bestimmten hydraulischen Bedingungen untersucht. Es wurden verschiedene hydraulische Situationen in der Rinne getestet, die sich unter anderem darin unterschieden, dass die Strömung durch die Existenz eines Schlitzes beeinflusst wurde oder nicht.

Für das vorliegende Projekt wurden qualitativ sechs Verhaltensmuster abgeleitet. Diese beziehen sich auf

- Wandnähe
- Sohlhöhe
- Wendepunkte in Längsrichtung der Rinne
- Fische ohne Wende
- Zeitliche Verzögerung vor dem Schlitz
- Erfolgreiches Passieren des Schlitzbereichs

Die dreidimensionalen Strömungsfelder wurden mit dem Löser interFoam (Schulze und Thorenz 2014) aus dem freien Programmpaket OpenFOAM® berechnet (Bild 2). Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die Simulation der freien Wasseroberfläche und der Turbulenz gelegt.

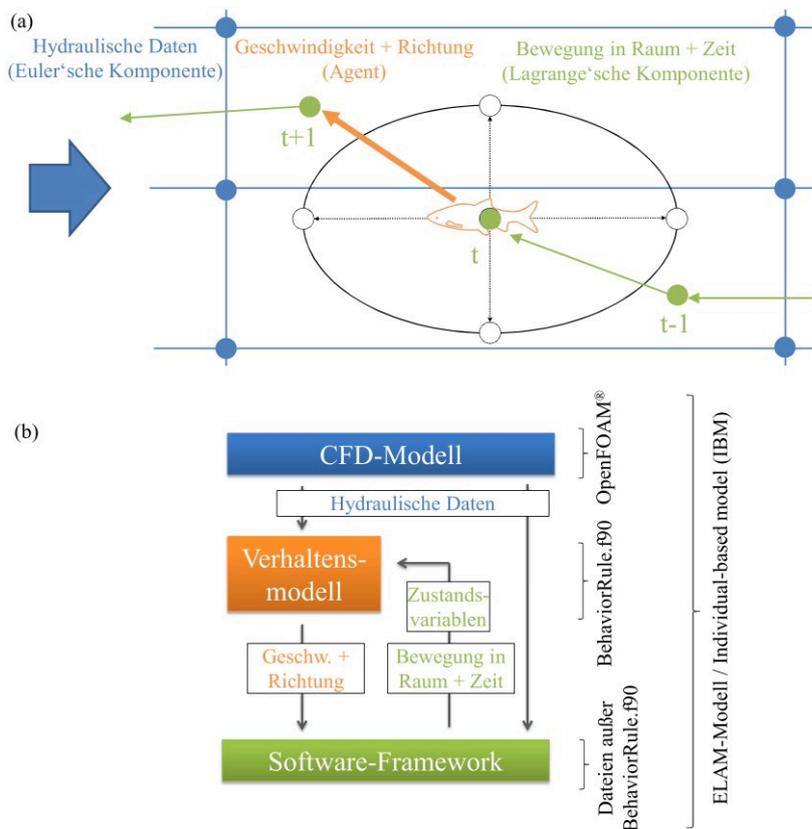


Bild 1: *Ein ELAM-Modell verbindet Euler'sche, Lagrange'sche und eine Agenten-Komponente. (a) Visualisierung der Modellinformation und der zugehörigen Komponente. (b) Implementierung der Komponenten und Informationsfluss: Hydraulische Daten werden aus einem Computational-Fluid-Dynamics-Modell (CFD) gewonnen und liegen auf einem diskreten Netz vor. Das Verhaltensmodell verwendet diese sowie gespeicherte Zustandsvariablen, um Geschwindigkeit und Richtung eines Individuums zu berechnen. Das Software-Framework bewegt das Individuum in Raum und Zeit und speichert die aufgenommenen Informationen entlang des Wegs. Dieser Ablauf wird für jeden Zeitschritt wiederholt.*

Die grundlegende Modellstruktur besteht aus drei Verhaltensweisen (Aufwärtsschwimmen, Verharren, Verdriften). Diese werden aufgerufen je nach dem Verhältnis von zwei primären Variablen, die jedem Fisch zugeordnet sind: die Motivation M und die Erschöpfung F (*Fatigue*). Diese werden mit weiteren Regeln aus dem Strömungsfeld und der Bewegungshistorie ermittelt.

Es wird angenommen, dass Migrationsverhalten stark von der Wahrnehmung des Strömungsfeldes geprägt ist. Andere Stimuli (z. B. visuelle oder akustische Wahrnehmung) wurden zur Vereinfachung des Modells ausgeklammert. Strömungsinformationen, die der Fisch mit seinem Seitenlinienorgan aufnimmt, stehen unter allen Umgebungsbedingungen zur Verfügung und können in Strömungsmodellen durch viele verschiedene hydraulische Parameter modelliert werden, beispielsweise Geschwindigkeitsvektoren, Beschleunigung oder turbulente kinetische Energie. Die Parameter werden vom diskreten numerischen Netz auf den Schwerpunkt des Fisches und sechs umliegende Sensorpunkte interpoliert, die die Wahrnehmung über das Seitenlinienorgan repräsentieren. Im Fall, dass ein Sensorpunkt außerhalb des Strömungsgebiets liegt,

wird der Schwimmvektor entgegen der lokalen Fließgeschwindigkeit ausgerichtet. Dafür wird ausgenutzt, dass die wandnahe Strömung immer parallel zur jeweiligen Wand gerichtet ist.

3 Ergebnisse

Als Modellergebnis wurden Schwimmvektoren der Fische ausgegeben, die sich zu einem Pfad zusammensetzen ließen (Bild 2). Das kalibrierte Modell konnte die sechs in der ethohydraulischen Rinne beobachteten Verhaltensmuster der Bachforellen im Strömungsfeld mit Schlitz erfolgreich reproduzieren. Eine Validierung anhand des Strömungsfelds ohne Schlitz war bei fünf Mustern erfolgreich. Allein die Verzögerung im Schlitzbereich wurde noch nicht zufriedenstellend abgebildet.

Sensitivitätsstudien wurden durchgeführt in Bezug auf Zufallseinfluss (Startwert des Pseudo-Zufalls-Generators), Startposition, Anzahl der simulierten Fische und Zeitschrittweite. Es wurde gezeigt, dass die Ergebnisse sich bei Veränderungen qualitativ nicht nennenswert unterscheiden.

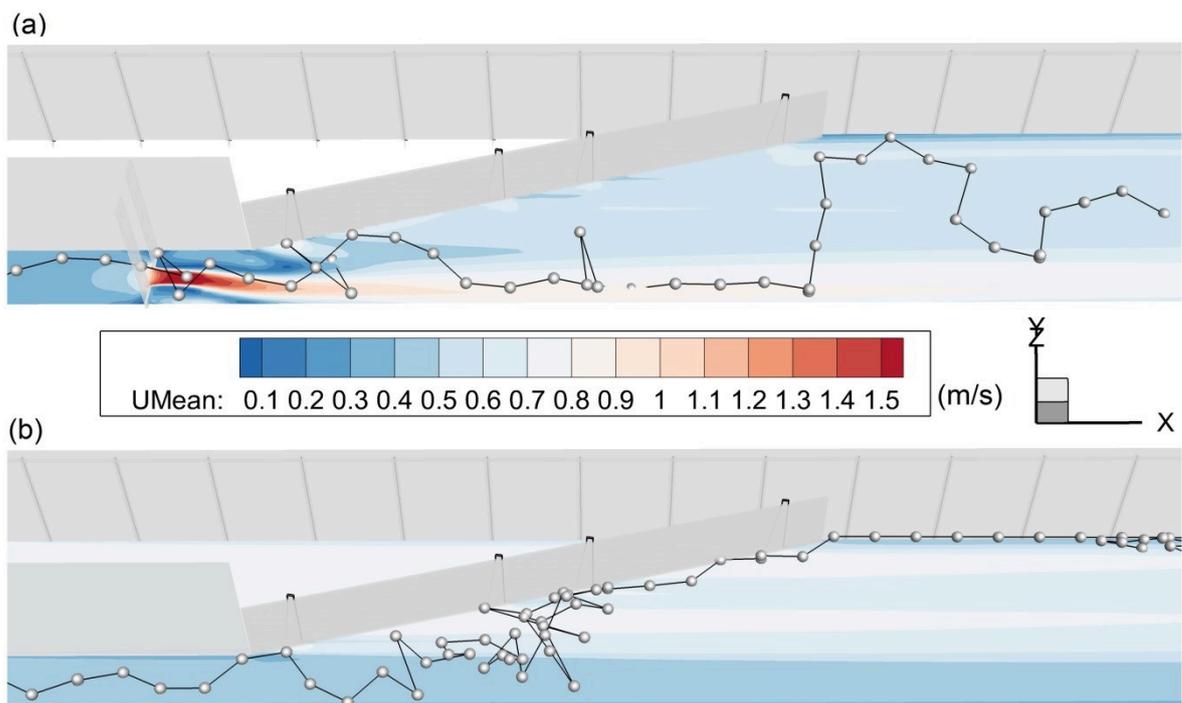


Bild 2: Modellierter Schwimmpfad einer Bachforelle. Schnitt durch das Geschwindigkeitsfeld 0,07 m über der Sohle (Wassertiefe 0,60 m). (a) mit Schlitz, (b) ohne Schlitz. Durchflüsse $Q_{FAA} = 0,200 \text{ m}^3/\text{s}$ (jeweils unten im Bild) und $Q_{Rechen} = 0,800 \text{ m}^3/\text{s}$ (oben).

4 Diskussion

Die Analyse der finalen Struktur des Verhaltensmodells kann Erklärungen für reales Verhalten liefern. Es liegt in der Natur eines Modells, dass die Erkenntnisse über die reale Welt indirekt sind. Es zeigte sich in den hier dargestellten Untersuchungen, dass die advective Beschleunigung ein funktionierender hydraulischer Stimulus für flussaufwärts wandernde Bachforellen ist. Diese Größe wurde bereits in früheren Publikationen zur Simulation von flussabwärts wandernden juvenilen Lachsen an Stauanlagen verwendet (Goodwin et al. 2014; Arenas et al. 2015). Der durch die vertikale Tiefe angenäherte Stimulus Druck war wichtig für die Reproduktion des beobachteten vertikalen Verhaltensmusters. Diese beiden Parameter sollen auch zukünftig weiter untersucht werden.

Eine mögliche Erklärung für die Abweichung des Modells in Bezug auf den Zeitverlust am Schlitz ist, dass dieser durch eine visuelle Reaktion auf die lokale Verengung und nicht durch eine hydraulische Reaktion hervorgerufen wird. Da das Modell diese visuelle Reaktion nicht beinhaltet, kann der Zeitverlust nicht entsprechend wiedergegeben werden.

Der Ansatz, den Fisch immer den aufwärtsliegenden Pfad mit der niedrigsten Geschwindigkeit wählen zu lassen (Zielinski et al. 2018), zeigte für dieses Modell keine erfolgreichen Ergebnisse. Möglicherweise funktioniert dieser nur bei für den Fisch als hoch wahrgenommenen Fließgeschwindigkeiten. Dies war bei den getesteten schwimmstarken Bachforellen nicht der Fall.

Der neuartige Ansatz für das Verhalten an Wänden ist im Vergleich zu bestehenden Ansätzen (Haefner und Bowen 2002; Goodwin et al. 2014; Arenas et al. 2015) flexibler, da er prinzipiell auch in gekrümmten und verwinkelten Geometrien funktioniert. Zudem ist er im Vergleich zu Winkelberechnungen zwischen dem Fisch und umgebenden Wänden einfacher.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das neue IBM für aufwärtsgerichtete Fischwanderung vereint erstmals eine hohe zeitliche Auflösung ($\Delta t = 0,5$ s), hohe räumliche Auflösung ($\Delta x,y,z \leq 5$ cm), ein umfangreiche gegen beobachtete Fischdaten getestetes Verhaltensmodell und ein quelloffenes CFD-Modell.

Der hydraulische Parameter „advective Beschleunigung“ funktioniert als Stimulus für die horizontale Richtungsentscheidung für das getestete Setup auch in aufwärtsgerichteter Schwimmbewegung. Für die vertikale Richtungsentscheidung konnte der schon vorher getestete Parameter „Druck“, genähert durch die vertikale Koordinate, bestätigt werden. Publierte einfache Verhaltensregeln, die den Fisch zur jeweils niedrigsten Umgebungsgeschwindigkeit schwimmen lassen, wurden dagegen nicht bestätigt.

Die grundlegende Modellstruktur mit drei Verhaltensweisen (Aufwärtsschwimmen, Verharren, Verdriften) hat sich bewährt und ist allgemein genug, um auf Modelle anderer aquatischer Um-

gebungen übertragen zu werden. Die einzelnen Unterregeln müssen noch umfangreicher getestet werden, bevor Aussagen zur Übertragbarkeit möglich sind.

Nach erfolgreichem Abschluss der hier dargestellten ersten Projektphase soll das Forschungsprojekt zusammen mit der BfG in den Bereichen Softwareentwicklung, Untersuchung weiterer Arten und Weiterentwicklung für Untersuchungen im Feld fortgesetzt werden. Von besonderem Interesse ist dabei die Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen. Mit dem gewählten interdisziplinären Ansatz steht ein neues Werkzeug bereit, um die Wirkung der Strömung auf den Fisch besser zu verstehen und zu nutzen.

Bundesanstalt für Wasserbau
Karlsruhe, Dezember 2018

6 Literaturverzeichnis

- Arenas, Antonio; Politano, Marcela; Weber, Larry; Timko, Mark (2015): Analysis of movements and behavior of smolts swimming in hydropower reservoirs. In: *Ecological Modelling* 312, S. 292–307. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2015.05.015.
- Cooke, Steven J.; Hinch, Scott G. (2013): Improving the reliability of fishway attraction and passage efficiency estimates to inform fishway engineering, science, and practice. In: *Ecological Engineering* 58, S. 123–132. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.06.005.
- Czerny, Rebekka; Schütz, Cornelia (2017): Ethohydraulische Versuche zur Untersuchung der Passierbarkeit von Einstiegsbecken in Fischaufstiegsanlagen. In: HTG (Hg.): Tagungsunterlagen. HTG Kongress. Duisburg. Hafentechnische Gesellschaft.
- Gisen, David C. (2018): Modeling upstream fish migration in small-scale using the Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM). Dissertation. Universität der Bundeswehr München, München. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105158>.
- Goodwin, Richard Andrew; Politano, M.; Garvin, J. W.; Nestler, J. M.; Hay, D.; Anderson, James J. et al. (2014): Fish navigation of large dams emerges from their modulation of flow field experience. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (14), S. 5277–5282. DOI: 10.1073/pnas.1311874111.
- Haefner, James W.; Bowen, Mark D. (2002): Physical-based model of fish movement in fish extraction facilities. In: *Ecological Modelling* 152 (2-3), S. 227–245. DOI: 10.1016/S0304-3800(02)00006-6.
- Lenders, H. J. R.; Chamuleau, T. P. M.; Hendriks, A. J.; Lauwerier, R. C. G. M.; Leuven, R. S. E. W.; Verberk, W. C. E. P. (2016): Historical rise of waterpower initiated the collapse of salmon stocks. In: *Scientific reports* 6, S. 1–9. DOI: 10.1038/srep29269.
- Schulze, Lydia; Thorenz, Carsten (2014): The Multiphase Capabilities of the CFD Toolbox OpenFOAM for Hydraulic Engineering Applications. In: R. Lehfeldt und R. Kopmann (Hg.): Proceedings of the 11th International Conference on Hydrosience & Engineering. ICHE. Hamburg, S. 1007–1014.
- Zielinski, D. P.; Voller, VR.; Sorensen, P. W. (2018): A physiologically inspired agent-based approach to model upstream passage of invasive fish at a lock-and-dam. In: *Ecological Modelling* 382, S. 18–32. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2018.05.004.



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

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

www.baw.de