

# **Orientierungs- und Suchverhalten von Fischen vor Rechen – Anwendung von Ethohydraulik in der wasserbaulichen Forschung**

Elena-Maria Klopries, Imke Böckmann, Catrina Brüll, Andreas Hoffmann, Sebastian Hudjetz und Holger Schüttrumpf

## **Abstract**

Bar rack bypass systems can be an effective measure for the protection of fish migrating downstream at hydro-power plants. There are still outstanding issues concerning the design of such systems. To gather new information about the design, a research project about the orientation and search behaviour of fish in front of bar racks has been conducted at the institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management at RWTH Aachen University since January 2015. In the course of this project, ethohydraulic tests are conducted in which fish behaviour in front of a bar rack is tested at different flow velocities and bar rack geometries. By means of statistical tests, it is investigated which flow and bar rack geometries cause behavioural differences in the fish. Thus, it is possible to gain knowledge about relevant parameters concerning the fish behaviour. This knowledge can be used to improve the design of bar rack bypass systems at existing hydro-power plants.

## **Zusammenfassung**

Rechen-Bypass-Systeme können eine effektive Maßnahme zum Schutz abwandernder Fische an Wasserkraftanlagen darstellen. Die Bemessung solcher Systeme ist jedoch vor allem für große Bestandsanlagen schwierig und noch mit vielen Fragen behaftet. Um neue Erkenntnisse für die Bemessung von Rechen-Bypass-Systemen hinsichtlich der biologischen Wirksamkeit zu erlangen, wird am Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University seit Januar 2015 ein Forschungsprojekt zum Orientierungs- und Suchverhalten von Fischen vor Rechen durchgeführt. Im Zuge des Projekts werden in einer Versuchsrinne ethohydraulische Versuche durchgeführt, in denen das Verhalten von Fischen vor einem Modellrechen bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten und verschiedenen Rechengeometrien beobachtet wird. Mittels statistischer Testverfahren wird geprüft, bei welchen Strömungs- und Rechenparametern Unterschiede im Verhalten der Fische aufgetreten sind. Hieraus lassen sich Erkenntnisse zu den relevanten Einflussfaktoren auf das Verhalten von Fischen ableiten. Diese können wiederum dafür genutzt werden, die Bemessung von Rechen-Bypass-Systemen an bestehenden Wasserkraftanlagen zu verbessern.

## 1 Projektmotivation

Die auf- oder abwärts gerichtete Durchgängigkeit von Fließgewässern ist für die langfristige Entwicklung einer stabilen Fischpopulation unerlässlich. Hiervon sind sowohl Langdistanzwanderfische wie Aale und Lachse als auch potamodrome Arten wie beispielsweise Bachforellen hinsichtlich der Suche nach geeigneten Laich-, Aufwuchs- oder Nahrungshabitaten betroffen. Stauanlagen oder sonstige Querbauwerke können diese Wanderungen unterbrechen. Bei Stauanlagen mit integrierter Wasserkraftnutzung kann es neben einer Unterbrechung oder Verzögerung der Abwanderung zudem zu Verletzungen der Fische kommen, wenn diese den Abstieg über das Krafthaus und damit die Turbinen wählen.

Bei der Turbinenpassage können Fische auf unterschiedliche Art und Weise verletzt werden. Die Schädigungsfaktoren lassen sich grundsätzlich in hydraulisch und mechanisch bedingte Faktoren unterteilen. Die häufigsten Ursachen für Verletzungen sind dabei Druckeffekte, Scherkräfte und Turbulenzen sowie Kollisionen (DAVIES, 1988; COUTANT UND WHITNEY, 2000; LARINIER UND TRAVADE, 2002; SALE ET AL., 2002).

Die Höhe des Drucks nimmt vom Turbineneinlauf bis zur Turbine kontinuierlich zu und nimmt beim Durchlaufen der Turbine schlagartig ab. Von der Höhe und Geschwindigkeit dieses Druckunterschieds hängt ab, ob und wie stark ein Fisch bei der Turbinenpassage geschädigt wird (TURNPENNY ET AL., 2000; SALE ET AL., 2002). Es kann vor allem zu Verletzungen des Seitenlinienorgans und der luftgefüllten Bereiche der Fische wie der Schwimmblase kommen.

Die Strömung im Bereich des Krafthauses zeichnet sich durch eine starke Turbulenz und damit verbunden durch Verwirbelungen und Änderungen der Strömungsrichtung auf allen Größenskalen aus. Diese Änderungen der Strömungsrichtung können dazu führen, dass Fische von verschiedenen Strömungen erfasst werden und durch das entstehende Moment in Drehbewegungen geraten (TURNPENNY ET AL., 2000). Diese unkontrollierten Bewegungen erhöhen die Gefahr der Kollision mit Anlagenteilen, wodurch es zu Prellungen, Abschürfungen oder Platzwunden kommen kann.

Darüber hinaus können Fische, die den Triebwasserkanal einer Wasserkraftanlage passieren, mit Anlagenteilen wie den beweglichen Laufradschaufeln kollidieren und in Spalten zwischen den Laufradschaufeln und dem Turbinenmantel eingequetscht werden. Mögliche Einflussfaktoren für die Höhe der Schädigung können die Länge des Fisches, die Umdrehungsgeschwindigkeit der Turbine, die Anzahl der Laufradschaufeln, die Größe der Turbine, die Aufprallgeschwindigkeit sowie das Vorhandensein von Spalten und Kanten sein (RABEN, 1957; TURNPENNY ET AL., 2000). Die Kollisionen können bei den Fischen zu Platzwunden, Blutergüssen und Teil- sowie Totaldurchtrennungen führen (HOLZNER, 2000; KÜHLMANN, 2011).

Es sind verschiedene Ansätze vorhanden, wie die Schädigung verhindert oder reduziert werden kann (EPRI ET AL., 2001; ATV-DVWK, 2005; MINISTERIUM FÜR UMWELT UND

NATURSCHUTZ, 2005; BÖS ET AL., 2012; EBEL, 2013; PIANC, 2013; KLOPRIES ET AL., 2016):

- fischfreundliche Turbinen
- fischangepasste Betriebsweisen
- Fang und Transport
- Verhaltensbarrieren
- Rechen-Bypass-Systeme

Der Bau von Rechen-Bypass-Systemen als Schutzinstrument kann dazu beitragen, dass Fische daran gehindert werden, in Wasserkraftanlagen einzuschwimmen und sie stattdessen einen alternativen Wanderweg nutzen. Bei der Dimensionierung des Rechens sind vor allem die beiden Parameter „Passierbarkeit des Rechens“ und „Gefahr der Anpressung“ zu berücksichtigen, um den erwarteten positiven Effekt zu erreichen. Derzeitige Vorschriften in NRW schreiben für Rechen vor Wasserkraftanlagen einen Stababstand  $< 20$  mm (10 mm für Lachse bzw. 15 mm für Aale) und eine Anströmgeschwindigkeit des Rechens  $< 0,5$  m/s vor (LANDTAG NORDRHEIN-WESTFALEN, 2010). Letzteres kann bei Anströmgeschwindigkeiten des Kraftwerks  $> 0,5$  m/s dadurch erreicht werden, dass der Einbauwinkel des Rechens verringert wird. Für Wasserkraftanlagen mit einem Maximalabfluss  $< 100$  m<sup>3</sup>/s gibt es bereits Bemessungsansätze, wie diese Anforderungen effektiv umgesetzt werden können (EBEL, 2013). Bei großen Bestandsanlagen bereitet die Umsetzung dieser Anforderungen jedoch einige Schwierigkeiten, sodass hier allgemeingültige Bemessungsansätze bislang fehlen.

Die Anströmsituation eines Rechens ist ein dreidimensionaler, äußerst heterogener und turbulenter Zustand, der neben der Hydraulik vor allem von der Gestaltung des Rechens (Neigung, Stababstand) und der Verlegung beeinflusst wird. Die Anströmsituation kann vor allem bei der ersten Annäherung von Fischen an einen Rechen einen großen Einfluss darauf haben, wie die Tiere sich verhalten und damit, ob sie den Rechen passieren, nach einem alternativen Abstiegsweg suchen oder gar an den Rechen gepresst werden.

## 2 Forschungsvorhaben OVeR

Ziel des Forschungsvorhabens „Untersuchungen zum Orientierungs- und Suchverhalten von Fischen vor Rechenanlagen von Wasserkraftanlagen“ (OVeR) ist es daher, die Zusammenhänge zwischen dem Verhalten der Fische und der Strömung vor einem Rechen sowie den Gestaltungsparametern eines Rechens zu identifizieren. Mit diesem Wissen können Hinweise dafür geschaffen werden, wie Rechensysteme vor großen Wasserkraftanlagen mit besonderen Anströmsituationen dimensioniert werden sollen, damit sie möglichst effektiv für den Fischschutz sind.

Das Projekt wird finanziert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV) und die innogy SE und hat einen Projektzeitraum von Januar 2015 bis Dezember 2017. Bearbeitet wird das Projekt durch den Lehrstuhl und das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University und das Büro für Umweltplanung, Gewässermanagement und Fischerei (BUGeFi) aus Bielefeld.

Das Projekt ist in zwei Untersuchungsphasen gegliedert. In der ersten Phase sollen Hinweise darauf erarbeitet werden, wie die Zusammenhänge zwischen Rechen, Strömung und Fischverhalten sind, um auf dieser Grundlage Erkenntnisse bezüglich der Bemessung von Rechen und der Positionierung von Bypass-Systemen zu gewinnen. In der zweiten Phase sollen Bypässe untersucht werden, um Hinweise zu erarbeiten, wie sich die Zusammenhänge zwischen Bypässen, der Strömung und dem Fischverhalten gestalten. In beiden Projektphasen sollen ethohydraulische Untersuchungen als Werkzeug genutzt werden, um die gewünschten Erkenntnisse zu generieren.

### **3 Ethohydraulik**

#### **3.1 Prinzip**

Ethohydraulik ist vergleichbar mit dem klassischen wasserbaulichen Versuchswesen. In physikalischen Modellversuchen wird im wasserbaulichen Labor untersucht, welche Strömungssituationen sich an einem Bauwerk einstellen. Neben den klassischen Geschwindigkeits-, Durchfluss- und Pegelmessungen beinhaltet das Fachgebiet der Ethohydraulik zusätzlich die Aufnahme von Verhaltensbeobachtungen von Fischen, die im physikalischen Modell eingesetzt werden (ADAM UND LEHMANN, 2011).

Das Ziel ethohydraulischer Untersuchungen ist es dabei, durch die direkte Zusammenarbeit von Wasserbauingenieuren und Biologen kausale Zusammenhänge zwischen den physikalischen Strömungsgrößen und dem Verhalten der Fische herzustellen (WILKES ET AL., 2013). Mit Hilfe statistischer Auswertungen können Zusammenhänge zwischen der Strömung und dem Verhalten ermittelt werden, mit Hilfe des Expertenwissens der Biologen und Ingenieure können diese Zusammenhänge interpretiert und auf die Natur übertragen werden.

#### **3.2 Anforderungen der Ethohydraulik**

Anstelle eines klassischen, maßstäblich verkleinerten Ähnlichkeitsmodells nach Eulerschem-, Reynold'schem-, Froudeschem-, Cauchy-Machschem- oder WeberschemModellgesetz (MARTIN UND POHL, 2009) wird im ethohydraulischen Versuch ein Ausschnittsmodell genutzt. Da Fische nicht maßstäblich verkleinert werden können und das Grö-

ßenverhältnis von Bauwerk und Fisch für die Untersuchungen relevant sind, ist es erforderlich, das zu untersuchende Wasserbauwerk im Maßstab 1:1 im Modell abzubilden (Abb. 1). Prinzipiell sind jedoch meist sowohl das Platzangebot in der Versuchshalle als auch die Pumpenleistung beschränkt, sodass eine Abbildung des gesamten betrachteten Bauwerks nicht möglich ist. Daraus ergibt sich, dass lediglich der für die Betrachtungen relevante Ausschnitt des Naturbauwerks in Form eines Ausschnittsmodells abgebildet wird. Um den nicht abgebildetem Teil des Naturbauwerks trotzdem zu berücksichtigen, muss im Modell die sogenannte situative Ähnlichkeit sichergestellt werden (ADAM UND LEHMANN, 2011).



**Abb. 1:** Ausschnittsmodell, in dem sowohl der Rechen als auch die Fische im Maßstab 1:1 abgebildet werden, um die Größenverhältnisse einzuhalten

Die situative Ähnlichkeit setzt voraus, dass die für das Verhalten der Fische relevanten Parameter der Natur im Modell abgebildet werden müssen. Eine vollständige Abbildung der situativen Ähnlichkeit ist meist im ethohydraulischen Versuch nicht möglich. Es bedarf daher bei der Planung des Modells und des Versuchsablaufs der Zusammenarbeit der Wasserbauingenieure und Biologen, um die Aspekte der Natursituation identifizieren zu können, die die größte Relevanz für das Verhalten der Fische haben und daher im Modell abgebildet werden müssen. Diese sind neben den geometrischen Abmessungen des Bauwerks vor allem die Strömungsgrößen, die Platzverhältnisse, die Wassertemperatur, der Sauerstoffgehalt und der Stresslevel der Fische (ADAM UND LEHMANN, 2011).

Im Gegensatz zu Verhaltensuntersuchungen in der Natur müssen bei ethohydraulischen Untersuchungen bei der Interpretation der Ergebnisse und bei der Übertragung dieser auf die Natur stets die eingeschränkte situative Ähnlichkeit und mögliche weitere Modell-

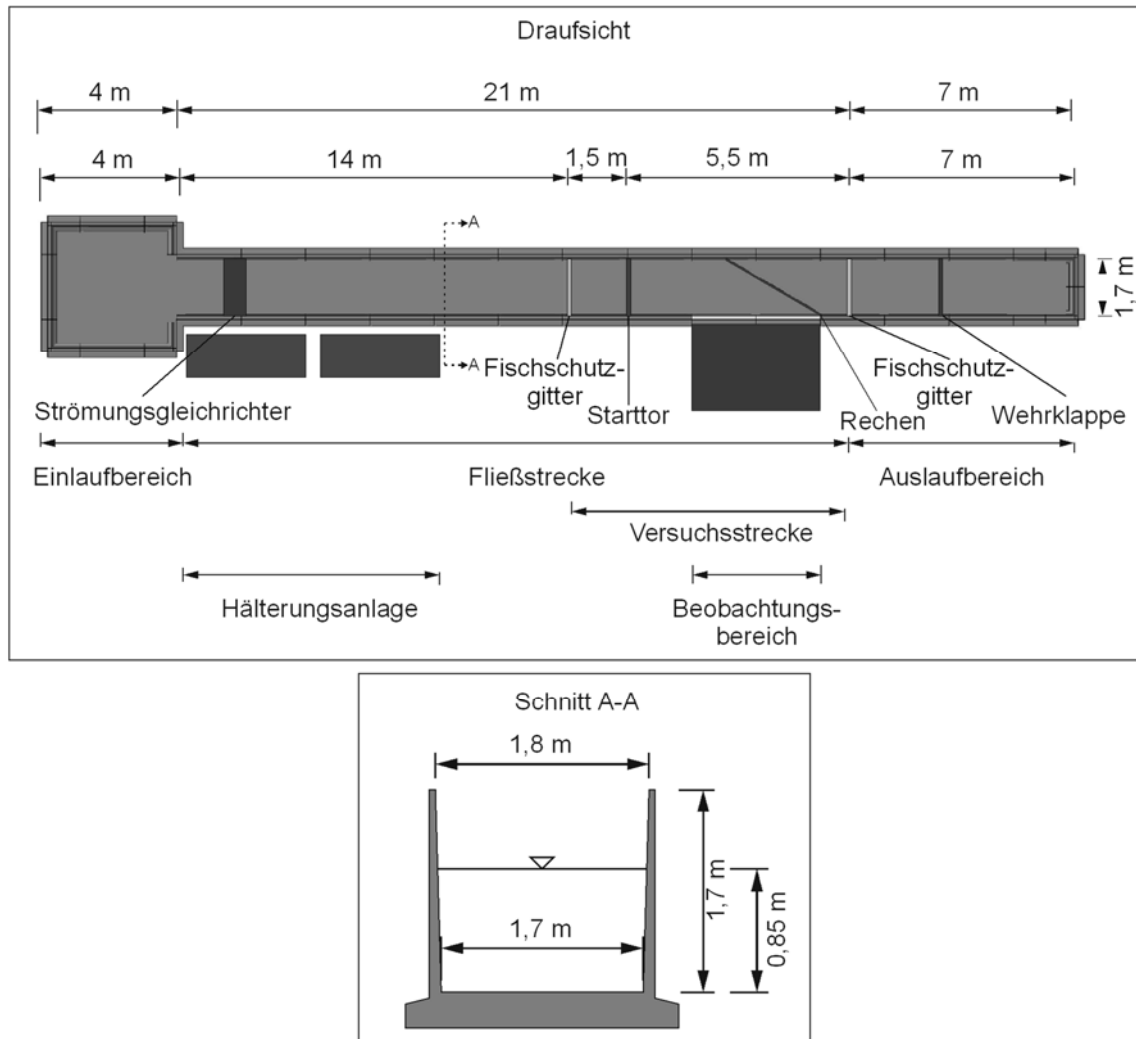
effekte berücksichtigt werden. Hierunter fallen vor allem die geometrischen Abmessungen des Modells (Wasserstand und Breite der Versuchsrinne), welche im Vergleich zur Natursituation stark verkleinert sind. Daher sind Aussagen beispielsweise zur Bevorzugung von sohlnahen oder oberflächennahen Strukturen nur eingeschränkt möglich. Im ethohydraulischen Versuch kann somit nicht jede Fragestellung beantwortet werden, die in der Natur beantwortet werden könnte.

Dahingegen ist der Vorteil ethohydraulischer Untersuchungen, dass das Modell besser zugänglich ist als das Naturbauwerk und alle Versuchsparameter wie der Durchfluss, die Wassertemperatur, die Wassertrübung und die Zahl und Art der untersuchten Fische stets kontrollierbar sind. Auf diese Weise ist die systematische Untersuchung des Einflusses einzelner hydraulischer und geometrischer Parameter möglich.

### **3.3 Umsetzung im Modell in Aachen**

Für die ethohydraulischen Untersuchungen ist in der Wasserbauhalle des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft ein Versuchsstand errichtet worden, welcher zum einen aus einer Versuchsrinne mit allen hydraulischen Regelungsbauwerken, einer Steuerungs- und Messtechnik sowie ethohydraulisch relevanten Bauwerken und zum anderen aus einer Hälterungsanlage mit einem autarken Wasserkreislauf und Einrichtungen zur Sicherstellung einer ausreichenden Wasserqualität besteht (Abb. 2). Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dem Labor auf die Natur ist das Prinzip der situativen Ähnlichkeit angewandt worden. Hierfür sind in Absprache zwischen den Biologen und Ingenieuren die für das Fischverhalten wesentlichen Faktoren berücksichtigt worden (Tab. 1).

Des Weiteren ist das tatsächliche Verhalten der Fische im Modell mit dem in der Natur verglichen worden. Hierzu haben Sonaraufnahmen vor dem Einlaufbereich einer Wasserkraftanlage als Vergleichsmaterial gedient. Es konnten in Hinblick auf das Schwimmverhalten, auf Ausweichreaktionen sowie artspezifische Verhaltensmuster vergleichbare Verhaltensweisen im Modell und der Natur nachgewiesen werden, sodass eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus dem Modell in die Natur durchaus möglich ist.



**Abb. 2:** Ethohydraulischer Versuchsaufbau mit der Versuchsrinne inklusive aller Bauteile sowie der Halterungsanlage

**Tab. 1:** Vergleich gewählter Faktoren im ethohydraulischen Versuch zur Sicherstellung der situativen Ähnlichkeit

Faktor	Natur	Modell	Situative Ähnlichkeit eingehalten?
Anströmgeschwindigkeit	< 2 m/s	0,3 m/s bis 0,8 m/s	+
Rechenstababstand	10 mm bis > 80 mm	10 mm, 20 mm, 40 mm	+
Rechenneigung	30° bis 70°	30°, 70°	+
Wassertemperatur	10° C bis 20° C	12° C bis 20° C	(+)
Belichtung	Wechselnde Lichtverhältnisse, Dämpfung des Lichts durch Wassertrübung und Wassertiefe	Keine direkte Beleuchtung	(+)

### 3.4 Kopplung mit Strömungsdaten

Zur Kopplung der Verhaltensbeobachtungen mit der Hydraulik ist es erforderlich, die Strömungssituation zu kennen. Da die Strömung vor einem Rechen nicht homogen, sondern von turbulenten Strukturen und dreidimensionalen Strömungsmustern durchzogen ist, kann die Strömung nicht überschlägig abgeschätzt werden, sondern muss im Versuchsstand gemessen werden.

Hierfür werden zum einen strömungsphysikalische Messungen mittels eines Acoustic Doppler Velocimeters (ADV) durchgeführt, welche die Fließgeschwindigkeit in alle drei Raumrichtungen innerhalb eines fein aufgelösten Messrasters im gesamten Bereich vor dem Rechen aufnehmen. Dies gibt Aufschluss über die Größe der Anströmgeschwindigkeit, mögliche Sekundärströmungen sowie turbulente Bereiche. Mittels des ADV kann nicht in allen Bereichen die Strömung gemessen werden, etwa zwischen den Rechenstäben. Um trotzdem ein Bild von der Strömung zwischen den Rechenstäben zu bekommen, werden zusätzlich hydronumerische Berechnungen durchgeführt.

### 3.5 Durchführung der Versuche

Die ethoyhydraulischen Versuche setzen sich aus vier Versuchsphasen zusammen (Abb. 3):

- Einsetzen der Fische: Es werden stets sechs Individuen einer Art in einem Versuch eingesetzt. Dafür werden diese aus ihrer Hälterungsanlage in einen Transportbehälter gesetzt und von dort in die Versuchsrinne verbracht.
- Akklimatisierung: Die Fische befinden sich zunächst 15 Minuten lang mit geschlossenem Starttor im Startbereich der Versuchsrinne. In dieser Zeit sollen sie sich an die Strömung akklimatisieren, die in dieser Phase bei durchschnittlich 0,15 m/s liegt. Nach Ablauf der 15 Minuten wird der Durchfluss erhöht, sodass eine Strömungsgeschwindigkeit von durchschnittlich 0,3 m/s erreicht wird, und das Starttor öffnet.
- Verhaltensbeobachtung: Das Verhalten der Fische wird 15 Minuten lang mittels einer Protokoll-App und zweier Kameras protokolliert und aufgezeichnet. Nach Ablauf der 15 Minuten wird die Strömungsgeschwindigkeit erhöht und die Verhaltensbeobachtung für das nächste hydraulische Setup durchgeführt. Das Prozedere wird für alle vier hydraulischen Setups durchgeführt (Tab. 2).
- Zurücksetzen der Fische: Nach Durchlauf aller vier hydraulischen Setups wird der Zufluss zum Versuchsstand abgeschaltet und die Fische wieder aus der Versuchsrinne entnommen. Nach Ende des Versuchs werden die Fische vermessen und zurück in die Hälterungsanlage gesetzt. Um zu verhindern, dass Fische an einem Tag mehrere Versuche durchlaufen, werden die bereits zum Einsatz gebrachten Fische in gesonderte Becken der Hälterungsanlage verbracht.



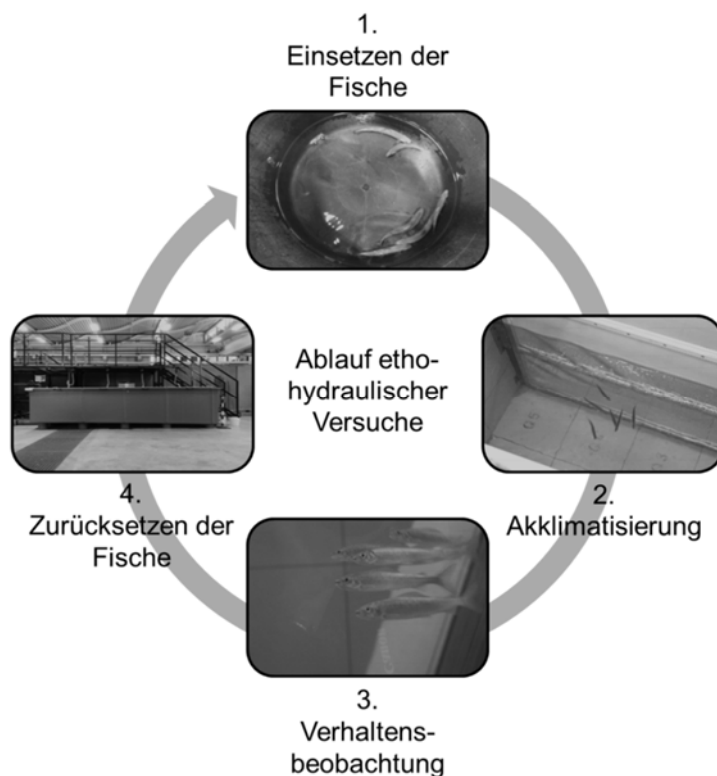


Abb. 3: Ablauf ethohydraulischer Versuche

Tab. 2: Wasserstand und zugehörige mittlere Anströmgeschwindigkeit der im Projekt getesteten hydraulischen Setups

Hydraulisches Setup	Wasserstand	Mittlere Anströmgeschwindigkeit
Akklimatisierung	0,85 m	0,15 m/s
Setup 1	0,85 m	0,3 m/s
Setup 2	0,85 m	0,45 m/s
Setup 3	0,85 m	0,6 m/s
Setup 4	0,85 m	0,8 m/s

Vom 5. April 2016 bis zum 14. Dezember 2016 sind über 100 ethohydraulische Versuche durchgeführt worden. Etwa 90 Versuche hiervon gehen in die Ergebnisauswertung ein (Tab. 3). Die übrigen Versuche waren Nachtversuche, Nullversuche oder Gemischtgruppenversuche, die den Zweck hatten, den Einfluss unterschiedlicher Tageszeiten oder der Interaktion verschiedener Arten herauszufinden.

Pro Rechensetup und Fischart sollten fünf Replikate durchgeführt werden. Die Replikate pro Setup dienen dazu, neben einer qualitativen Auswertung der Verhaltensbeobachtung ebenfalls eine statistisch belegbare Auswertung zu ermöglichen.

Tab. 3: Im Jahr 2016 durchgeführte ethohydraulische Versuche (Zahlen entsprechen der Anzahl an Replikaten, die durchgeführt wurden)

Rechensetup	Aal*	Lachs	Äsche	Barsch	Rotaugen
70°, 10 mm	5	5	5	5	5
70°, 20 mm	10	6	6	4	5
70°, 40 mm	4	4	3	5	5
30°, 20 mm	7	5	-	-	-
* aufgrund teilweise fehlender Motivation sind nicht alle Aalversuche auswertbar					

## 4 Auswertung und Ergebnisse

### 4.1 Methodik

Bei der Auswertung der Daten zur Verhaltensbeobachtung der Fische gibt es zwei Ebenen, auf denen Aussagen getroffen werden können. Zum einen können anhand der aufgenommenen Videos und der Livebeobachtungen Verhaltensweisen vom Beobachter erkannt und subjektiv gedeutet werden. Diese Vorgehensweise setzt voraus, dass der Beobachter über ein ausreichendes Expertenwissen in Hinblick auf Fische und deren Verhaltensweisen verfügt. Die so gewonnenen Erkenntnisse haben einerseits dazu beigetragen, den Versuchsstand und den Versuchsablauf zu optimieren. Andererseits ist der subjektive Erkenntnisgewinn wichtig, um bereits in einer frühen Projektphase mögliche Verhaltensweisen und -beeinflussungen zu identifizieren und den Schwerpunkt der Untersuchungen im Folgenden auf die relevanten Fragestellungen legen zu können.

Zum anderen können die Daten mittels statistischer Testverfahren ausgewertet werden. Diese Vorgehensweise bietet den Vorteil, dass sie eine belastbare Interpretation der Versuchsergebnisse zulässt. Bei der statistischen Auswertung werden die Ergebnisse der verschiedenen Setups miteinander verglichen und geprüft, ob ein statistisch signifikanter Unterschied vorliegt. Zwischen den Vergleichssetups wird stets nur ein Parameter geändert, um den Einfluss dieses Parameters auf das Verhalten bestimmen zu können. Zur Auswertung der Daten wurden nicht-parametrische Testverfahren angewendet (Tab. 4). Diese können auch dann angewendet werden, wenn wie im vorliegenden Fall den Daten aufgrund einer kleinen Stichprobengröße (N=5) keine Normalverteilung und Varianzhomogenität unterstellt werden kann (BORTZ, 1999).

Aus den Einzelergebnissen der Replikate lassen sich in einem ersten Schritt beispielsweise über den Mittelwert Trends bezüglich des Einflusses eines bestimmten Parameters bestimmen (Abb. 4, oben). Ob diese Trends zufällig auftreten oder statistisch belastbar sind, lässt sich schließlich über die Anwendung der oben genannten Testverfahren ermitteln (Abb. 4, unten).

Tab. 4: Nicht-parametrische Testverfahren zur Analyse der im Projekt variierten Parameter

Parameter	Beschreibung	Testverfahren
Geschwindigkeit	Vergleich mehrerer (> 2) abhängiger Stichproben	Friedmann-Test
Stababstand	Vergleich mehrerer (> 2) unabhängiger Stichproben	Kruskal-Wallis-Test
Fischart	Vergleich mehrerer (> 2) unabhängiger Stichproben	Kruskal-Wallis-Test
Rechenneigung	Vergleich von 2 unabhängigen Stichproben	Mann-Whitney-U-Test

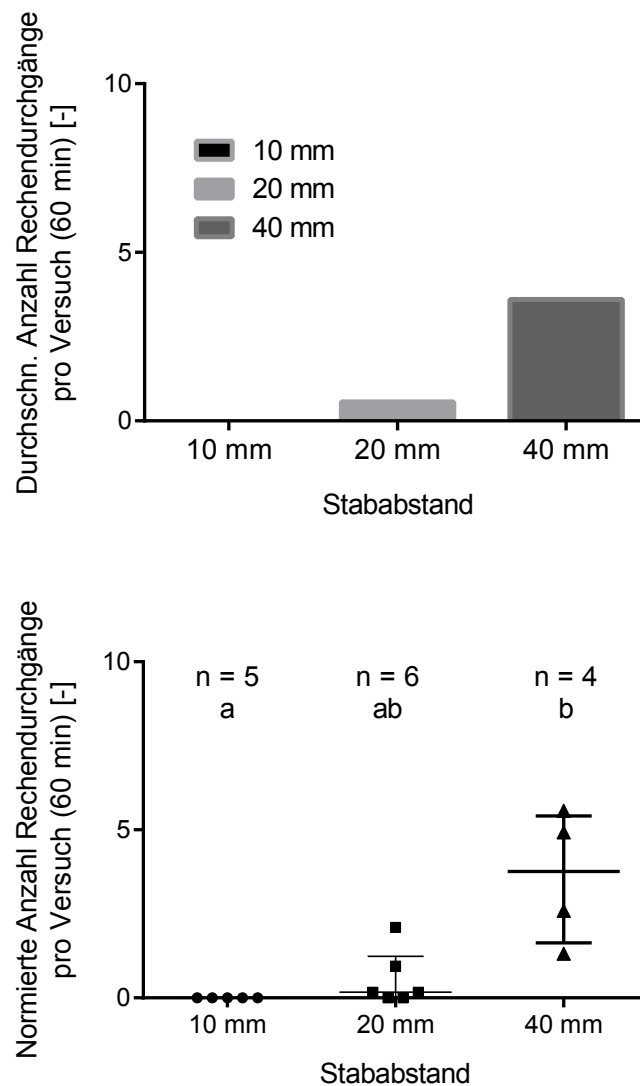


Abb. 4: Rechenpassagen pro Versuch beim 70° geneigten Rechen mit unterschiedlichen Stababständen für den Lachs, oben: qualitative Darstellung anhand des Mittelwertes, unten: Darstellung der Einzelwerte der Replikate und des Medians, Ermittlung statistisch signifikanter Unterschiede mittels Kruskal-Wallis-Test ( $p < 0,05$ )

Bei der Auswertung der verschiedenen Daten gibt es drei Testebenen, die jeweils eine andere Zahl berücksichtigter Parameter aufweisen (Abb. 5). Soll beispielsweise der Einfluss des Stababstands auf die Wahrscheinlichkeit der Rechenpassage geprüft werden, können in der ersten Testebene über alle Fischarten und alle Geschwindigkeiten hinweg die Ergebnisse der verschiedenen Stababstände verglichen werden. In der zweiten Testebene kann ein weiterer Parameter beispielsweise die Fischart festgelegt werden und so der Einfluss des Stababstands für die unterschiedlichen Fischarten getrennt untersucht werden. Auf der zweiten Testebene kann daher beispielsweise gesondert für die Fischart Lachs über alle Geschwindigkeiten hinweg der Einfluss des Stababstands ausgewertet werden. Auf der dritten Ebene kann zusätzlich die Anströmgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Etwa könnte für die Fließgeschwindigkeit 0,3 m/s für die Fischart Lachs der Einfluss des Stababstands ermittelt werden.

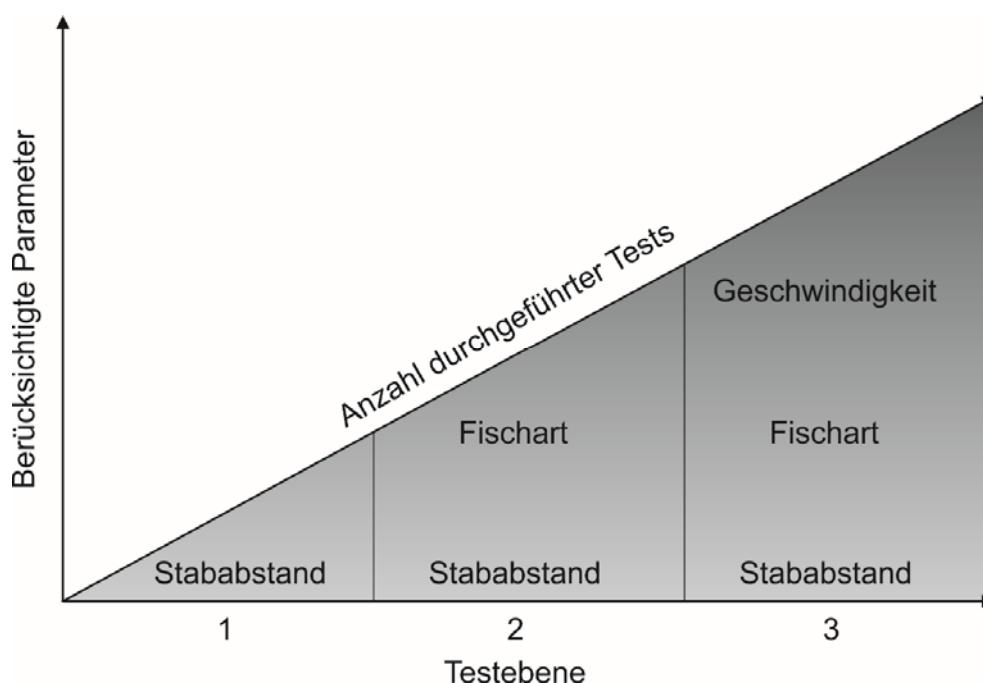


Abb. 5: Berücksichtigte Parameter bei der statistischen Auswertung auf den unterschiedlichen Testebenen

Nach diesem Schema ergibt sich eine Vielzahl an erforderlichen Tests, die im Zuge der Auswertung der Ergebnisse durchgeführt werden müssen. Werden diese systematisch durchgeführt, können die Ergebnisse der statistischen Tests auf mögliche Trends und ihre Aussagekraft untersucht werden.

## 4.2 Ergebnisse

An dieser Stelle werden beispielhaft für die Frage des Einflusses des Stababstands auf die Wahrscheinlichkeit der Rechenpassage die Auswertungsergebnisse dargestellt (Tab. 5). In 13 der 21 durchgeführten Tests zur Untersuchung des Unterschieds zwischen den Rechenstababständen sind keine statistisch signifikanten Unterschiede zu

erkennen beziehungsweise lässt die Datengrundlage keine belastbaren Aussagen zu. In 7 Fällen ist ein Unterschied zwischen 10 mm und 40 mm festgestellt worden und in jeweils 2 Fällen ein Unterschied zwischen 10 mm und 20 mm beziehungsweise 20 mm und 40 mm.

Tab. 5: Ergebnisse der statistischen Auswertungen (Kruskal-Wallis-Test) in Hinblick auf den Einfluss des Stababstands auf die Wahrscheinlichkeit der Rechenpassage – der unterstrichene Wert in der letzten Spalte gibt an, bei welchem Stababstand die größere Zahl an Rechenpassagen gemessen wurde

Untersuchungs- ebene	Einfluss des Stababstands auf die Rechenpassage				
	Setup			Analyseergebnis	
	Neigung	Art	Geschwindigkeit	Signifikanz	Zwischen
1	70°	alle	alle	**	10 mm/ <u>40 mm</u>
				**	10 mm/ <u>20 mm</u>
2	70°	Lachs	alle	**	10 mm/ <u>40 mm</u>
	70°	Äsche	alle	*	10 mm/ <u>20 mm</u>
	70°	Rotaugen	alle	n.s.	-
	70°	Barsch	alle	**	10 mm/ <u>40 mm</u>
3	70°	Lachs	v <sub>1</sub>	n.s.	-
	70°	Lachs	v <sub>2</sub>	** *	10 mm/ <u>40 mm</u> 20 mm/ <u>40 mm</u>
	70°	Lachs	v <sub>3</sub>	**	10 mm/ <u>40 mm</u>
	70°	Lachs	v <sub>4</sub>	** *	10 mm/ <u>40 mm</u> 20 mm/ <u>40 mm</u>
	70°	Rotaugen	v <sub>1</sub>	n.s.	-
	70°	Rotaugen	v <sub>2</sub>	n.s.	-
	70°	Rotaugen	v <sub>3</sub>	n.s.	-
	70°	Rotaugen	v <sub>4</sub>	n.s.	-
	70°	Barsch	v <sub>1</sub>	**	10 mm/ <u>40 mm</u>
	70°	Barsch	v <sub>2</sub>	n.s.	-
	70°	Barsch	v <sub>3</sub>	k.A.	-
	70°	Barsch	v <sub>4</sub>	k.A.	-
	70°	Äsche	v <sub>1</sub>	n.s.	-
	70°	Äsche	v <sub>2</sub>	n.s.	-
	70°	Äsche	v <sub>3</sub>	n.s.	-
	70°	Äsche	v <sub>4</sub>	n.s.	-

\*: p < 0,05    \*\*: p < 0,01    n.s.: nicht signif. k.A.: keine Angabe möglich

Dabei weisen bei allen signifikanten Unterschieden die größeren Stababstände die größere Zahl an Rechenpassagen auf. Im Gegensatz zu den Lachsen und Barschen liegt bei den Rotaugen und Äschen die größte Zahl der Rechendurchgänge bei 20 mm und

nicht bei 40 mm Stababstand. Dieser Trend kann zwar aus den Daten interpretiert werden, ist jedoch mit dem verwendeten Testverfahren statistisch nicht belegbar. Bei Betrachtung der Ergebnisse der dritten Testebene fällt auf, dass die Unterschiede zwischen den Rechenstababständen bei Betrachtung der einzelnen Geschwindigkeiten für Rotaugen, Äschen (und Barsche) nicht mehr so groß beziehungsweise nicht signifikant sind. Im Gegensatz zu fast allen anderen signifikanten Unterschieden liegt das Signifikanzniveau beim Unterschied zwischen 20 mm und 40 mm lediglich bei  $p < 0,05$ . Des Weiteren liegt ein signifikanter Unterschied zwischen 20 mm und 40 mm nur für den Lachs vor und nur, wenn gleichzeitig ein signifikanter Unterschied zwischen 10 mm und 40 mm nachgewiesen werden konnte.

Neben der Frage nach den Einflussfaktoren auf die Rechenpassage sind noch zwei weitere Forschungsfragen untersucht worden. Diese befassen sich mit der Frage nach dem Abwanderungsverhalten und der Gefahr der Anpressung an den Rechen. Erste Ergebnisse, die sich aus der Betrachtung aller drei Forschungsfragen ableiten lassen, sind folgende:

- Die getesteten Fischarten (Lachs, Aal, Barsch, Äsche, Rotaugen) zeigen ein unterschiedliches Abwanderungsverhalten;
- Erkenntnisse aus der ersten Projektphase zu bevorzugten Aufenthaltsorten können Aufschluss über sinnvolle Positionen von Bypassöffnungen geben;
- der Rechen mit 10 mm Stababstand ist für die getesteten Individuen physikalisch undurchlässig;
- für die untersuchten Lachse (15 cm bis 25 cm Körperlänge) können im Vergleich zu 10 mm und 20 mm bei einem 40 mm Rechenstababstand statistisch signifikant mehr Rechendurchgänge beobachtet werden;
- der Rechen mit 40 mm Stababstand hat für die getesteten Individuen kein Anpressungsrisiko aufgewiesen.

Darüber hinaus sind auch allgemeingültige Erkenntnisse bezüglich des Forschungsgebietes der Ethohydraulik erarbeitet worden:

- Ethohydraulische Untersuchungen zur Frage der Zusammenhänge zwischen dem Verhalten der Fische und der Strömung vor einem Rechen sowie den Gestaltungsparametern eines Rechens sind möglich;
- statistische Auswertungen liefern belastbarere Erkenntnisse als Untersuchungen mit wenigen Individuen ohne Replikate;
- die Zusammenarbeit von Biologen und Ingenieuren ist bei der Modellplanung sowie der Versuchsdurchführung unerlässlich;
- die Motivation der Versuchsfische ist bei der Versuchsplanung zu beachten.

## 5 Ausblick

Im Frühjahr 2017 starten die Untersuchungen der zweiten Projektphase zur Frage der Zusammenhänge zwischen Bypassöffnungen, der Strömung sowie dem Fischverhalten. Hierfür werden drei verschiedene Bypassöffnungen im ethohydraulischen Modell umgesetzt und es wird geprüft, wie groß die Akzeptanz der jeweiligen Bypassöffnung durch verschiedene Fischarten bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten ist. Als Grundlage für die Auswahl der zu untersuchenden Bypassöffnungen dienen zum einen Erkenntnisse aus anderen ethohydraulischen Untersuchungen sowie Freilanduntersuchungen. Zum anderen werden die Ergebnisse bezüglich der bevorzugten Aufenthaltsorte der Fische in der ersten Projektphase genutzt.

## 6 Literatur

Adam, B.; Lehmann, B. (2011): Ethohydraulik. Grundlagen, Methoden und Erkenntnisse. Heidelberg: Springer.

ATV-DVWK (2005): Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen. Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. 2. korrigierte Auflage. Hennef: ATV-DVWK.

BORTZ, J. (1999): Statistik. Für Sozialwissenschaftler. Fünfte, vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).

BÖS, T.; EGLOFF, N.; PETER, A. (2012): Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren, mitteleuropäischen Flusskraftwerken. Zwischenbericht zum Literaturstudium der Eawag. EAWAG. Kastanienbaum.

COUTANT, C. C.; WHITNEY, R. R. (2000): Fish Behavior in Relation to Passage through Hydropower Turbines: A Review. In: *Transactions of the American Fisheries Society* 2000 (129, 2), S. 351–380.

DAVIES, J. (1988): A review of information relating to fish passage through turbines: implications to tidal power schemes. In: *Journal of Fish Biology* (33), S. 111–126.

Ebel, G. (2013): Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen; Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Halle (Saale): Ebel Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie (Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie 4).

EPRI; PALO ALTO; ALLEGHENY ENERGY SUPPLY; DOMINIOM; DUKE ENERGY CORP.; EXELON POWER; HYDRO-QUÉBEC; NEW YORK POWER AUTHORITY; ONTARIO POWER GENERATION INC.; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY HYDROPOWER PROGRAM (2001): Review and Documentation of Research and Technologies on Passage and Protection of Downstream Migrating Catadromous Eels at Hydroelectric Facilities, zuletzt aktualisiert am 12.10.2001.

HOLZNER, M. (2000): Untersuchungen über die Schädigung von Fischen bei der Passage des Mainkraftwerks Dettelbach. Dissertation. TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN. Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau.

KLOPRIES, E.-M.; KROLL, L.; JÖRGENSEN, L.; TEGGERS-JUNGE, S.; SCHÜTTRUMPF, H. (2016): 20 Jahre aktive Partnerschaft für den Aal an Mosel und Saar. Aalschutz-Initiative Rheinland-Pfalz & innogy SE: Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz.

KÜHLMANN, M. (2011): Experimentelle Untersuchungen zur Schädlichkeit einer Kleinwasserkraftanlage mit Kaplanturbine und geringer Fallhöhe für Jungfische und Neunaugen. RUHRVERBAND.

Landtag Nordrhein-Westfalen (2010): Verordnung zum Landesfischereigesetz (Landesfischereiverordnung - LFischVO). LFischVO. Online verfügbar unter [https://recht.nrw.de/lmi/owa/br\\_text\\_anzeigen?v\\_id=10000000000000000523](https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_text_anzeigen?v_id=10000000000000000523).

LARINIER, M.; TRAVADE, F. (2002): Downstream Migration: Problems and Facilities. In: *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, S. 181–207.

Martin, H.; Pohl, R. (2009): Technische Hydromechanik. Band 4. Hydraulische und numerische Modelle. 2. Aufl. Berlin: Huss-Medien.

MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, L. U. V. L. N.-W. ((Hg.) (2005): Handbuch Querbauwerke. Handbuch. Unter Mitarbeit von Ulrich Dumont, Pia Anderer und Ulrich Schwevers.

PIANC (Hg.) (2013): PIANC REPORT No 127. Fish Passage.

RABEN, K. von (1957): Zur Frage der Beschädigung von Fischen durch Turbinen. In: *WasserWirtschaft* 48 (4), S. 97–100.

SALE, M.; CADA, G.; CARLSON, T.; DAUBLE, D.; HUNT, R.; SOMMERS, G.; RINEHART, B.; FLYNN, J.; BROOKSHIER, P. (2002): DOE Hydropower Program. Annual Report for FY 2001.

TURNPENNY, A. W. H.; CLOUGH, S.; HANSON, K. P.; RAMSEY, R.; MCEWAN, D. (2000): Risk Assessment For Fish Passage Through Small, Low-head Turbines. ETSU H/06/00054/REP.

Wilkes, M. A.; Maddock, I.; Visser, F.; Acreman, M. C. (2013): Incorporating Hydrodynamics into Ecohydraulics: The Role of Turbulence in the Performance and habitat Selection of Stream-Dwelling Fish. In: Ian Maddock (Hg.): Ecohydraulics. An integrated approach. Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley-Blackwell, S. 9–30.



**Anschriften der Verfasser**

Elena-Maria Klopries, M.Sc. RWTH

Dr.-Ing. Catrina Brüll

Dr.-Ing. Sebastian Hudjetz

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf

Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University

Mies-van-der-Rohe-Straße 17

52074 Aachen

klopries@iww.rwth-aachen.de

bruell@iww.rwth-aachen.de

hudjetz@iww.rwth-aachen.de

schuettrumpf@iww.rwth-aachen.de

M.Sc. Imke Böckmann

Dr. Andreas Hoffmann

Büro für Umweltplanung, Gewässermanagement und Fischerei

Krackser Straße 18 b

33659 Bielefeld

i.boeckmann@bugefi.de

a.hoffmann@bugefi.de