

Untersuchungen und Empfehlungen zur Dimensionierung und Anordnung von Bypass-anlagen bei Wasserkraftanlagen

Boris Lehmann und Beate Adam

Zusammenfassung

Im Rahmen eines von August 2013 bis Dezember 2015 bewilligten FuE-Projekts des Bundesamtes für Naturschutz wurden im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt vergleichende Verhaltensuntersuchungen mit Fischen durchgeführt, um die Anforderungen an die Gestaltung und den Betrieb von Bypässen zu präzisieren. Darüber hinaus flossen in dieses Projekt die Erkenntnisse aus einer von der Bezirksregierung Düsseldorf beauftragten Freilandstudie an einem Wasserkraftstandort an der Wupper ein, an dem zeitgleich mittels HDX-Technologie das Abwanderverhalten von Fischen untersucht wurde. Ziel des FuE-Projekts war es, alternative Abwanderkorridore für abstiegswillige Fische unterschiedlicher Arten und Entwicklungsstadien sicher auffindbar und zügig passierbar zu gestalten. Im Einzelnen galt es:

- Regeln für die korrekte Anordnung von Bypässen an Wanderhindernissen mit und ohne Wasserkraftanlagen zu erarbeiten,
- geometrische und hydraulische Dimensionierungsvorgaben für die Gestaltung von Bypasseinläufen zu ermitteln und
- Grenzwerte für den Betrieb solcher Abwanderwege abzuleiten.

Das FuE-Vorhaben wurde in transdisziplinärer Zusammenarbeit von Ingenieuren der TU Darmstadt und Fischbiologen des Instituts für angewandte Ökologie durchgeführt, wobei letztere auch die Studie am Auer Kotten bearbeiten. Begleitet wurde das Projekt von einem Beirat aus wasserbaulichen, fischereilichen und naturschutzfachlichen Behördenvertretern, Ingenieurwissenschaftlern und Vertretern/innen aus der Wasserkraftbranche.

Planungsgrundlage für die Versuchsreihen im Modellgerinne an der TU Darmstadt bildeten die konstruktiv-hydraulischen Realbedingungen des mit mehreren Bypässen und Abwanderkorridoren ausgestatteten Ausleitungsstandortes „Auer Kotten“ an der Wupper (ENGLER & ADAM 2015). Diese Bedingungen wurden im Modellgerinne situativ ähnlich nachgebildet, um die Reaktionen und Verhaltensweisen von Lachs-Smolts, Blankaalen und diversen potamodromen Fischarten darauf zu untersuchen. Eine detaillierte Darstellung aller Ergebnisse des FuE-Projekts wird im Rahmen der Schriftenreihe Naturschutz und Biologische Vielfalt in 2016 durch das Bundesamt für Naturschutz veröffentlicht werden. Nachfolgend können lediglich exemplarisch einige Erkenntnisse dargestellt werden.

1 Veranlassung und Untersuchungsansatz

Infolge der Novellierung des Wasserhaushaltsgesetzes sind nach § 35 an Wasserkraftanlagen geeignete Maßnahmen zum Schutz der Fischpopulation zu ergreifen. Gegenwärtig stellt vor allem der Bau und Betrieb funktionsfähiger Fischschutz- und -abstiegsanlagen eine Herausforderung dar, da im Gegensatz zum Fischaufstieg noch keine fundierten Regelwerke, sondern allenfalls erste konstruktive Empfehlungen zur Verfügung stehen. Ein wesentliches Hindernis für die Entwicklung von wirksamen Bypässen, die abwandernde Fische aus sie gefährdenden Anlagenbereichen ableiten sollen, ist die weitgehend fehlende Kenntnis des Verhaltens dieser

Tiere insbesondere bei ihrer Annäherung an ein Wanderhindernis - insbesondere wenn dieses mit einer Wasserkraftanlage ausgestattet ist.

Um diese Wissenslücken zu schließen, wurden die TU Darmstadt und das Institut für angewandte Ökologie (Kirtorf-Wahlen) mit der Durchführung ethohydraulischer Untersuchungen beauftragt. Die Arbeiten fanden im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt in statt. Das FuE-Vorhaben mit einer Laufzeit von 2,25 Jahren wurde vom Bundesamt für Naturschutz mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gefördert.

Im Rahmen einer parallel laufenden Untersuchung im Auftrag der Bezirksregierung Düsseldorf monitort das Institut für angewandte Ökologie seit September 2013 am Ausleitungskraftwerk „Auer Kotten“ im Unterlauf der Wupper das Abstiegsverhalten von Fischen über die dort vorhandenen Wanderkorridore, u. a. das Mutterbett, diverse Bypässe und Fischaufstiegsanlagen. Durch Einsatz modernster Methoden zur individuellen Markierung und automatischen Detektion von Fischen konnten hier die präferierten Abwanderkorridore identifiziert sowie Bewertungen zu deren Auffindbarkeit und Akzeptanz vorgenommen werden.

Diese Erkenntnisse aus dem Freiland wurden mit dem methodischen Vorgehen bei den ethohydraulischen Tests im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt gekoppelt, um letztlich fischbiologisch begründete technische Anforderungen an Bypässe zu erarbeiten (Abb. 1).

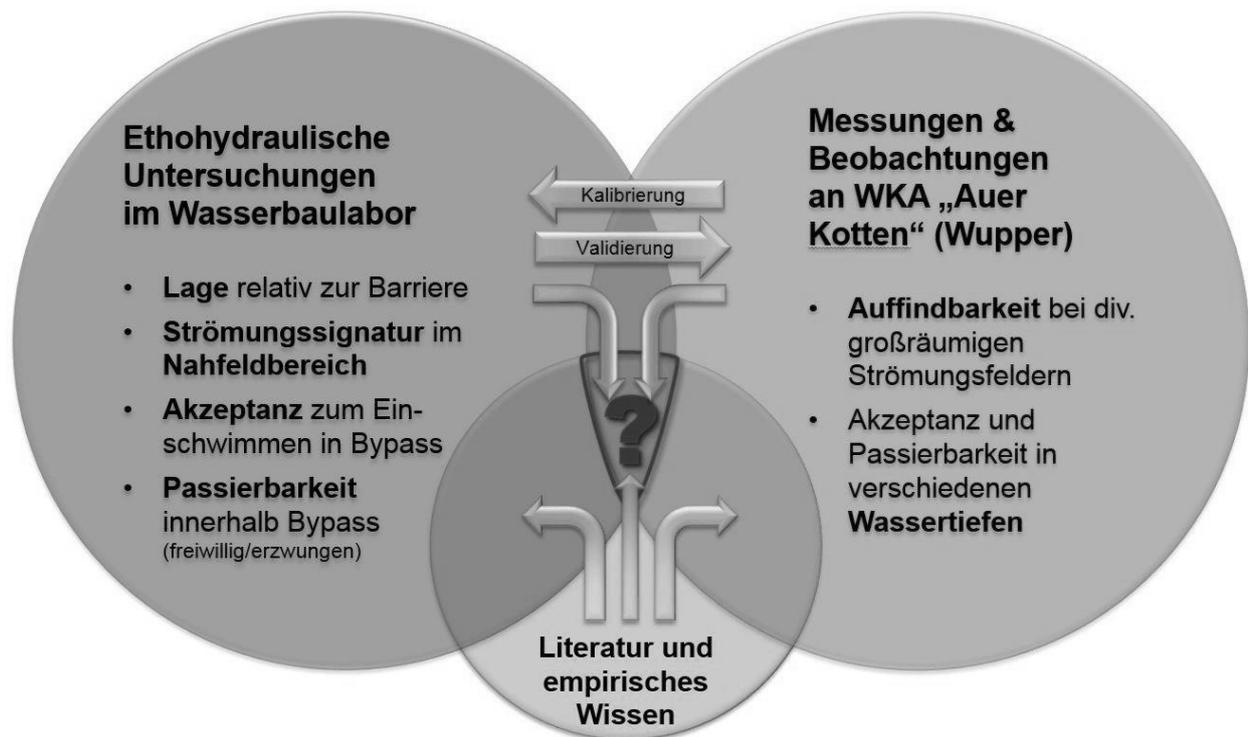


Abb. 1 Verknüpfung von Literaturstudium sowie ethohydraulischen Labor- und Felduntersuchungen im Rahmen des FuE-Projekts der TU Darmstadt und des Instituts für angewandte Ökologie zur Erarbeitung von Regeln und Grenzwerten für Bypässe

2 Wissensstand und -lücken über Bypässe

Das Verständnis darüber, welche Anforderungen an Fischabstiegsanlagen, resp. Bypässe zu stellen sind, geht derzeit in Deutschland weit auseinander. So wird die Notwendigkeit zur Schaffung von Abwanderwegen an energetisch nicht genutzten Stauanlagen grundsätzlich in Frage gestellt. Hingegen sind an einigen Wasserkraftanlagen zur Vermeidung von Fischverlusten an einer Stelle, wo es nicht als betriebsstörend erachtet wurde, mehr oder weniger ständig durchflossene Rohrleitungen vom Ober- zum Unterwasser in der Hoffnung installiert, dass abwandernde Exemplare diese Verbindungswege schon finden werden.

Der geringe Stand des Wissens darüber, wie funktionsfähige Fischabstiegsanlagen anzuordnen, zu dimensionieren, zu beaufschlagen und zu betreiben sind, hat vielfältige Ursachen: Einerseits wurde das Problem des Fischabstiegs Jahrzehntlang vernachlässigt und es wurden entsprechend keine Untersuchungen oder Forschungen zu diesem Thema durchgeführt. Andererseits wurden selbst an sogenannten Pilotanlagen installierte Fischabstiegsanlagen und Bypässe nur selten, und wenn, dann zumeist nur diskontinuierlich und/oder mit unzulänglichen Methoden überprüft. Schließlich befinden sich die Ergebnisse ausgeführter Monitoringuntersuchungen oftmals unter Verschluss, weil Entwickler, Planer und Eigentümer von Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen, die sich als funktionsuntüchtig erwiesen haben, finanzielle oder rechtliche Konsequenzen befürchten.

Vor diesem Hintergrund basiert das heute verfügbare Wissen über Fischabstiegsanlagen primär auf Untersuchungen aus dem Ausland mit Fischarten, die in Deutschland nicht heimisch sind, oder wie der Lachs, hier keine selbsterhaltenden Populationen bilden. Auch an deutschen Wasserbauinstituten wurde bislang kaum über Fischabstiegsanlagen geforscht und wenn, standen rein technisch-konstruktive Aspekte im Fokus des Interesses. Aufgrund eines fehlenden anerkannten Standes der Technik über wirksame Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen steht bis heute außer Einzelpublikationen (u. a. DUMONT et al. 2005, DWA 2005, EBEL 2013) kein allgemein gültiges Regelwerk zur Verfügung, das eine planerische Grundlage für solche Anlagen darstellen und eine Beurteilung der Funktion existierender Installationen ermöglicht.

Derzeit werden mechanische Barrieren in Form von Feinstrechen oder Siebbändern vorgeschlagen, um Fische physisch vor einem Eindringen in für sie gefährliche Anlagenbereiche zu schützen. Ebenso werden Barrieren wie ein Louver empfohlen, welche aufgrund des von der grundsätzlich passierbaren Barriere erzeugten Strömungsfeldes von Fischen oder bestimmten Zielarten nicht durchschwommen werden (KRIEWITZ-BUYN 2015). Außer um abwandernde Tiere vor Verletzungen zu schützen, gilt es auch, Fische einen alternativen Abwanderkorridor anzubieten, der sie sicher und zügig ins Unterwasser des Abwanderhindernisses bringt. Um diesen zu erreichen wird heute zumeist die Schräganordnung einer für Fische unpassierbaren Abwanderbarriere zur Anströmrichtung empfohlen oder ein möglichst flach zur Sohle geneigter Feinstrechen. Das Ursachen-Wirkungsgefüge, ob, wie und unter welchen Bedingungen Fische auf solche Konstruktionen reagieren, ist bis dato weder systematisch untersucht, noch verstanden. Alle solche Empfehlungen basieren vielmehr hauptsächlich auf hydraulische Messungen der Strömungsverhältnisse vor solchen Barrieren in Kombination mit Annahmen darüber, welche Wirkung diese Bedingungen wohl auf sich annähernde Fische haben könnten.

Hinsichtlich der Gestaltung von Abstiegsanlagen, worunter in erster Linie Bypässe in Form von Druckleitungen zwischen Ober- und Unterwasser zu verstehen sind, werden zwei grundsätzliche Prinzipien verfolgt:

- einerseits wird abstiegswilligen Fischen relativ zu ihrer Schwimmleistung ein moderat durchströmter Bypass angeboten, in den sie eigenmotiviert hinein schwimmen;
- andererseits werden Bypasskonstruktionen konzipiert, denen sich Fische zumindest im Nahfeld nicht mehr entziehen können, da sie angesogen, von umlaufenden Trögen aufgefangen und an eine andere Stelle transportiert oder fortgespült werden.

Die Wirksamkeit von Bypässen ist bisher artspezifisch und/oder hängt vom Entwicklungsstadium der jeweiligen Fischart ab. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass die Funktion von Bypässen maßgeblich von den Aspekten der Auffindbarkeit und Akzeptanz abhängig ist, d.h. dass abwanderwillige Fische einerseits den Einstieg in die Abstiegsanlage ohne große zeitliche und kräftezehrende Verzögerung finden und andererseits die Öffnung tatsächlich auch passieren, um ihren Weg ins das Unterwasser fortzusetzen.

Das vorliegende FuE-Projekt befasst sich vor allem mit dem Verhalten von verschiedenen Zielarten und -entwicklungsstadien im Nahfeld von Bypassöffnungen unterschiedlicher Konstruktion und Beaufschlagung, um Vorgaben zu erarbeiten, welche die Auffindbarkeit und Akzeptanz für ein möglichst breites Zielartenspektrum sicherstellen.

3 Durchgeführte Untersuchungen

3.1 Probanden

Im Rahmen der ethohydraulischen Laboruntersuchungen wurde auf der Grundlage einer tierschutzrechtlichen Genehmigung mit mehr als 1.000 Individuen von Lachs-Smolts, Blankaalen sowie 11 potamodromen Arten gearbeitet (Tabelle 1). Details zur Herkunft, Längenfrequenz der Arten sowie Zusammensetzung der beobachteten Fischgruppen sind dem Projektabschlussbericht zu entnehmen.

Tab. 1 Verwendete Fische bei den ethohydraulischen Labortests

Zielarten	Untersuchungszeitraum
Lachs-Smolts (348 Exemplare)	24. April bis 06. Mai 2014
	13. bis 21. April 2015
potamodrome Gemischtarten (431 Exemplare)	25. August bis 05. September 2014
	29. Juni bis 10. Juli 2015
Blankaale (286 Exemplare)	10. bis 20. November 2014
	26. Oktober bis 6. November 2015

3.2 Laborrinne und Hältereinrichtungen

Als Basiseinrichtung steht im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt eine Laborrinne (L x B x H = 40 m x 2 m x 1,5 m) mit einem regelbaren Durchfluss von bis zu 800 l/s zur Verfügung (Abb. 2). Durch ein Auslaufschütz können unterschiedliche Wasserstands- und Fließgeschwindigkeitszustände in der voll verglasten Rinne eingestellt werden, um die Reakti-

onen und Verhaltensmuster von Fischen unterschiedlicher Arten und Größen auf unterschiedliche Bypasskonstruktionen beobachten zu können. Jeweils eine nahezu strömungsneutrale Fluchtsperre am Ein- und Auslauf der Laborrinne hindert die mit einem Starkäfig in den Versuchsstand eingesetzten Fische daran, in den Tiefbehälter zu entweichen, der das Wasserreservoir für den pumpengetriebenen Wasserkreislauf und die Fischhälterung darstellt (ADAM & LEHMANN 2011). Außerhalb der Laborrinne angeordnet, befindet sich ein Nebenkompartment, welches rechtwinklig an der linken Gerinnewand an den Versuchsstand angeschlossen ist. Der Zu- und Abfluss zu diesem Behälter im Nebenschluss wird mittels Schiebern sowie bedarfsweise mit Pumpen geregelt, so dass in Kombination mit dem hydraulischen Geschehen in der Rinne eine Sogströmung in das Nebenkompartment hinein erzeugt werden kann.



Abb. 2 Laborrinne (oben) vom Einlauf aus gesehen; Rinnenabschnitt mit seitlichem Bypass zum Nebenkompartment (links unten); Modulare Einbauten (rechts unten) hier: horizontaler Schrägrechen mit anschließender runder Bypassöffnung

Unmittelbar neben der Rinne sind drei Langstrombecken ($L \times B \times H = 4 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) aufgestellt, die via Tauchpumpen aus dem Wasserreservoir des Tiefbehälters im Durchfluss gespeist werden. Die Wasserqualität in den mit Deckeln verschlossenen Hälterbecken, in denen die Fische zwischen den ethohydraulischen Tests aufbewahrt wurden, wird täglich mit Messgeräten hinsichtlich der Parameter Temperatur, Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt und -sättigung sowie pH-Wert kontrolliert.

3.3 Versuchseinbauten

Mit Hilfe modularer Einbauten, u. a. einem 12 mm-Feinstrechen mit senkrechten oder horizontalen Stäben oder einer nicht durchflossenen Trennwand mit diversen Öffnungsblenden, wurden in der Laborrinne verschiedene Setups hergestellt. Ein Setup bestand immer aus einer für die Fische nicht passierbaren Barriere und eine oder mehrere Bypassöffnungen unter-

schiedlicher Anordnung zur Barriere, die sich in einem Abwanderkorridor nach stromabwärts fortsetzte. Die Setups unterschieden sich dabei in:

- der Anzahl von Bypassöffnungen,
- Kontur und Kubatur der Bypassöffnung (Abb. 3),
- Position der Bypassöffnung zur Strömung (Abb. 3),
- Typ der Barriere (nicht durchströmte Wand oder durchströmter Feinstrechen mit horizontal oder vertikal ausgerichteten Rechenstäben),
- Anordnung der Barriere zu Anströmung (senkrecht angeströmt bei der Wand und dem Vertikalrechen, im Winkel von etwa 30° schräg angeströmt als Schrägrechen mit horizontalen Stäben).

Ergänzt wurde das jeweilige Setup noch um die hydraulischen Randbedingungen, welche durch eine entsprechende Steuerung des Versuchsstandes erzeugt wurden:

- mittlere Fließgeschwindigkeit in der Rinne (v_{Rinne}),
- Anströmgeschwindigkeit vor der/den Bypassöffnung/en (v_{Bypass}),
- Anströmgeschwindigkeit vor dem Abwanderhindernis (v_{Barriere}).

Mit Blick auf die Durchführbarkeit eines Versuchsplans unter Berücksichtigung der situativen Ähnlichkeit zu den Verhältnissen an real existierenden Wasserkraftstandorten, wurden aus der enormen Vielfalt möglicher Setup-Varianten die sich ähnlichsten Barriere-Bypass-Konfigurationen zu folgenden Setup-Komplexen zusammengefasst (Abb. 4):

- Setup-Komplex „Wand“:

In eine Wand eingelassene Bypassöffnungen sind oft in Nischen an energetisch genutzten oder ungenutzten Abwanderbarrieren realisiert. Da bei dieser Barriere-Bypasskonfiguration das Verhalten der Fische vor dem Abwanderkorridor nicht durch eine Konkurrenzströmung beeinflusst wird, dienen die an einer Wand gewonnenen Verhaltensbeobachtungen als Referenz für Tests mit Konkurrenzströmungen.

- Setup-Komplex „Vertikalrechen“:

An Wasserkraftanlagen mit einem Vertikalrechen ist eine Bypassöffnung in der Regel neben der Rechenebene in unterschiedlichen Wassertiefen angeordnet. Da die zwischen Rechen und Bypass auftretende Konkurrenzströmung die Strömungsbedingungen vor der Bypassöffnung und damit das Verhalten von Fischen maßgeblich beeinflussen kann, wurden mit diesem Setup-Komplex wesentliche Anforderungen an die Form, Größe, Position und Anströmung einer Bypassöffnung untersucht.

- Setup-Komplex „Schrägrechen“:

Ein am abstromigen Ende eines schräg zur Anströmung ausgerichteten, senkrecht stehenden Rechens mit horizontalen Rechenstäben unpassierbarer lichter Weite (kurz: Schrägrechen) angeordneter Bypass wird derzeit aufgrund einer angenommenen Leitwirkung als für alle Fische sehr gut auffindbar propagiert. Mit diesem Setup-Komplex wurde die Wirkung solcher u. a. auch am Auer Kotten installierten Schrägrechen auf die in den ethohydraulischen Tests eingesetzten Zielarten, insbesondere in Hinblick auf die Auffindbarkeit eines Bypasses untersucht.

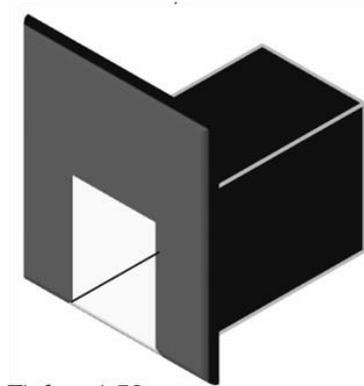
3.4 Erfassung von Strömungssignaturen

Die Erfassung und Dokumentation von Strömungssignaturen erfolgte auf zwei Arten. Mit einer simplen Fadenharfe (ADAM & LEHMANN 2011) wurden die Stromlinien eines Strömungsfeldes unmittelbar sichtbar gemacht und photographisch dokumentiert. Um Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen jedoch punktuell quantifizieren zu können, kam ein Accoustic-Doppler-Velicometer (ADV-Sonde) zum Einsatz. Diese Sonde ermöglichte die Erfassung und Aufzeichnung des Strömungsgeschehens an in-situ-Messpunkten. Gemessen wurden die Fließgeschwindigkeiten in allen drei Raumrichtungen mit einer Datenaufnahme von 20.000 Werten pro Sekunde. Das in den Setup-Komplexen aufgespannte Messraster vor einer Barriere sowie im Nahbereich einer Bypassöffnung umfasste insgesamt 766 Messpunkte. An jedem Messpunkt betrug die Messzeit 60 Sekunden, um ggf. vorhandene Strömungsschwankungen erfassen zu können. Daraus resultierten pro eingemessenem Setup ca. 920.000.000 Datenpakete mit den zeit- und punktbezogenen Strömungsgeschwindigkeiten in x-, y- und z-Richtung. Mittels geeigneter Analyse- und Darstellungssoftware (WIN-ADV und TechPlot) wurden aus den Messwerten Isotachen- und/oder Vektordiagramme sowie ethohydraulische Signaturen erstellt, die eine wichtige Grundlage für die Interpretation des beobachteten Fischverhaltens bildeten.

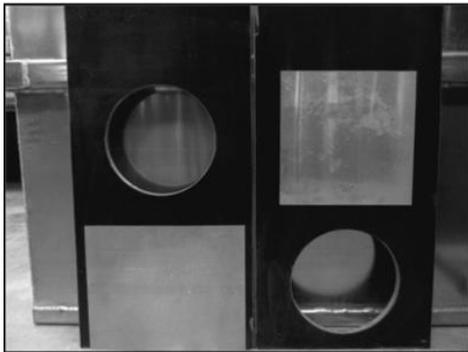
Parallel dazu wurden alle Setup-Komplexe mit einem räumlich hoch aufgelösten dreidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Strömungsmodell (FLOW3D™) nachgebildet. Anhand der gemessenen punktuellen Strömungswerte konnte das Strömungsmodell mit sehr guter Genauigkeit kalibriert und genutzt werden, um ganzheitliche Strömungssignaturen für den Untersuchungsraum zu erstellen.

Kontur „Rechteckförmig“

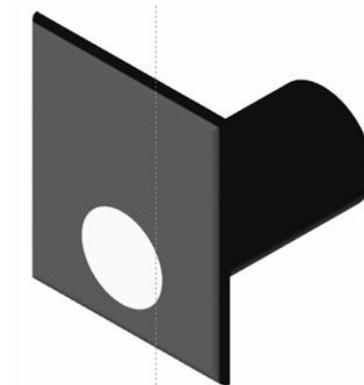
Breite x Höhe = 0,3 m x 0,5 m
 sohlnah / oberflächennah
 Umfang = 1,60 m
 Fläche = 0,15 m²

Kubatur „Kanal“

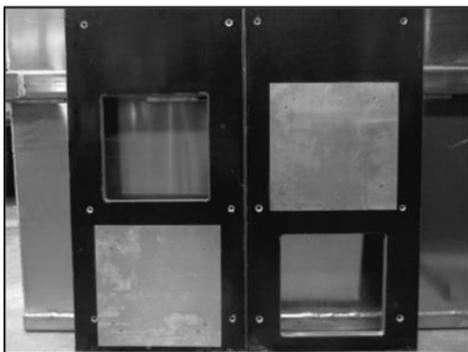
Tiefe = 1,50 m

Kontur „Kreisförmig“

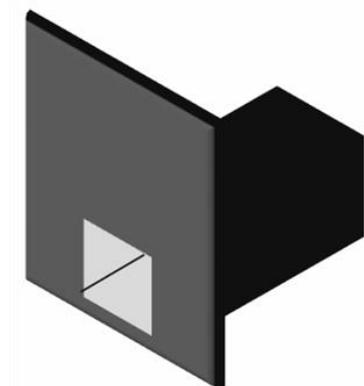
Durchmesser = 0,3 m
 sohlnah / oberflächennah
 Umfang = 0,94 m
 Fläche = 0,07 m²

Kubatur „Röhre“

Tiefe = 1,50 m

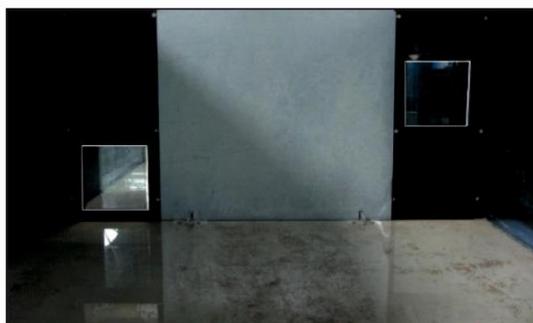
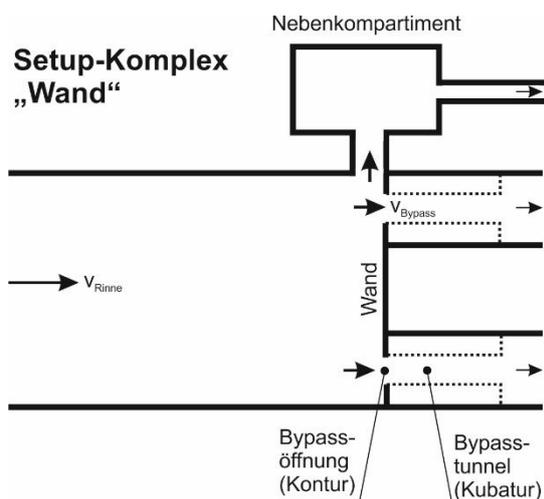
Kontur „Quadratisch“

Breite = Höhe = 0,3 m
 sohlnah / oberflächennah
 Umfang = 1,20 m
 Fläche = 0,09 m²

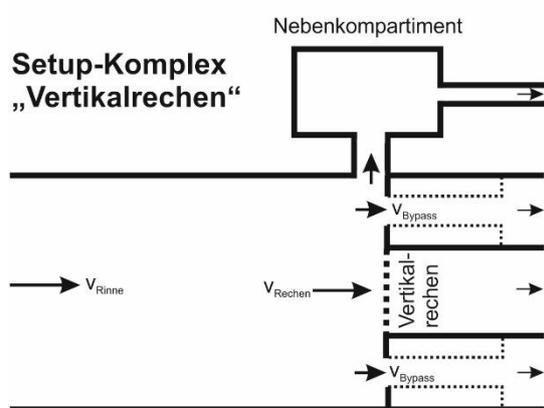
Kubatur „Kanal“

Tiefe = 1,50 m

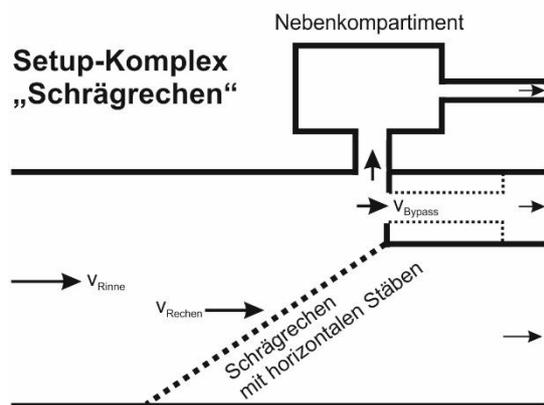
Abb. 3 In ethohydraulischen Tests untersuchte Bypasskonturen (Form der Öffnungsblende) und -kubaturen (Form der Ableitung) sowie Varianten der Anordnung



Ansicht des Setupkomplex „Wand“ in Fließrichtung gesehen. Als Bypasskontur wurde hier eine quadratische Öffnung sowohl sohl-nah (links) als auch oberflächennah (rechts) angeordnet. Eine Kubatur war bei dieser Aufnahme nicht montiert, ebenso war der Bypass zum Nebenkompartment verschlossen.



Ansicht des Setupkomplex „Vertikalrechen“ in Fließrichtung gesehen. Montiert sind bei dieser Aufnahme die selben Konturen wie in der Beispielaufnahme zum Setup „Wand“



Ansicht des Setupkomplex „Schrägrechen“ in Fließrichtung gesehen. Montiert ist bei dieser Aufnahme die rechteckförmige Kontur ohne Kubatur und der Bypass zum Nebenkompartment ist verschlossen.

Abb. 4 Aufbau der in den ethohydraulischen Tests eingesetzten Setup-Komplexe. Die Pfeile kennzeichnen die Fließpfade des Wassers sowie mögliche Abwanderkorridore

4 Versuchsdurchführung und Erarbeitung von Befunden

Alle ethohydraulischen Versuche zu den einzelnen Setup-Komplexen wurden mit Einhaltung der transdisziplinären Arbeitsvorgaben nach ADAM & LEHMANN (2011) durchgeführt. Das wissenschaftlich-methodische Verfahren wird ausführlich in der beabsichtigten Publikation des Endberichtes des FuE-Projekts in der Schriftenreihe Naturschutz und Biologische Vielfalt des Bundesamtes für Naturschutz zu entnehmen sein und ist vereinfachend in Tab. 2 skizziert. Zur

Verortung reproduzierbarer, d. h. stets in gleicher oder ähnlicher Form ablaufender Reaktionen oder komplexerer Verhaltensweisen von Fischen vor einer Barriere und einem Bypass wurde der Begriff „Reaktionsraum“ eingeführt (Abb. 5).

Tab. 2 Transdisziplinäre methodische Vorgehensweise zur Erarbeitung ethohydraulischer Befunde und daraus abgeleiteter Empfehlungen für die Konstruktion von Bypässen

Biologische Analysen	Ingenieurliche Analysen
Verhalten von Fischen in Reaktionsräumen (Rinne, Abwanderbarriere, Bypassöffnung, Bypass)	Lokalisierung und Vermessung von Reaktionsräumen mit u. a. ADV und HN-Modellen
Verhalten als reproduzierbare Reiz-Reaktionen in Abhängigkeit von Strukturen und Hydraulik	Ermittlung der Grenzwerte verhaltensauslösender Reize (Geometrien, Fließgeschwindigkeiten und -vektoren)
Auffindbarkeit und Akzeptanz eines Bypass (artspezifisches Verhalten, zeitliche Abläufe, Passagezahlen)	Technische Charakteristika (Anordnungen, Kontur, Kubatur) und hydraulischen Signaturen
Verschneidung der ethohydraulischen Befunde mit Erkenntnisse über die Bypässe am „Auer Kotten“ an der Wupper	
Ableitung von Empfehlungen für Konstruktion und Betrieb von Bypässen	

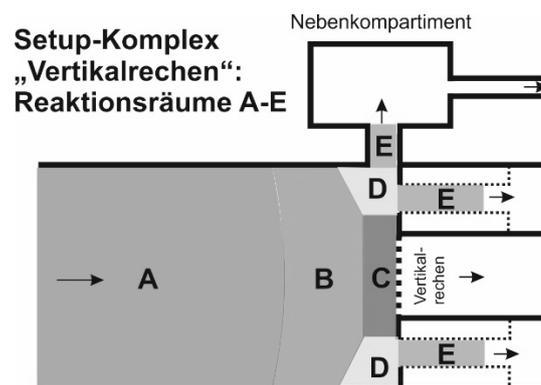


Abb. 5 Exemplarische Darstellung von identifizierbaren Reaktionsräumen beim Setup-Komplex „Vertikalrechen“

- Reaktionsraum A – Fernfeld

Der Reaktionsraum A liegt weit oberstrom einer Barriere. Die dort ausgeprägten Strömungssignaturen beeinflussen die abstrom angeordnete Barriere-Bypasskonfiguration hydraulisch nicht. Folgende verhaltensspezifische Aspekte waren in diesem Reaktionsraum von Interesse:

- Wie schwimmen die Fische stromabwärts?
- Wie orientieren sie sich dabei? Nähern sie sich gezielt einem speziellen Reaktionsraum an, oder weichen sie einem vor ihnen liegenden Reaktionsraum aus?
- Interagieren sich stromab bewegende Fische? Sind schwarmspezifische Verhaltensmuster zu erkennen?

- Reaktionsraum B – Annäherung an die Barriere

In diesem Reaktionsraum sind die Anströmungsbedingungen vor der jeweiligen Barriere für die Fische spürbar:

- Ab wann und wie wird die Barriere von den Fischen wahrgenommen?
- Wie reagieren Fische auf die Barriere und verändert sich ihr Verhalten in unterschiedlichen hydraulischen Situationen?
- Zeigen die Fische ein Suchverhalten vor der Barriere, um ggf. einen Alternativen Abwanderkorridor aufzufinden?

- Reaktionsraum C – Nahfeld vor der Bypassöffnung

In diesem Reaktionsraum entscheidet sich, ob der Fisch eine Bypassöffnung findet und auch annimmt. Während beim Setup „Wand“ der Reaktionsraum C von den meisten Fischen kaum belegt wird, ändert sich dies, sobald ein durchströmter Rechen eingesetzt wird. Ferner hat sich in den ethohydraulischen Tests gezeigt, dass die Bedeutung und Ausdehnung dieses Reaktionsraums zunimmt, je stärker die Barriere angeströmt wird.

- Ab wann und wie wird die Bypassöffnung von den Fischen wahrgenommen?
- Wird die Bypassöffnung akzeptiert und durchschwommen?
- Welche geometrischen und/oder hydraulischen Bedingungen sind der Passierbarkeit förderlich?

- Reaktionsraum D – Stromab hinter der Bypassöffnung

Dieser Reaktionsraum hat sich aus der Beobachtung ergeben, dass Fische in einem Bypass offenbar andere Strömungspräferenzen haben, als vor der Bypassöffnung. Deshalb ist die Passage einer Bypassöffnung keine Gewähr dafür, dass ein Fisch dem alternativen Korridor auch tatsächlich stromabwärts folgt. Daher stellten sich für diesen Reaktionsraum folgende Fragen:

- Wie verhält sich der Fisch nach seiner Passage der Bypassöffnung?
- Wie müssen die Bedingungen in einem Bypass beschaffen sein, damit ein Fisch diesem Korridor nach stromabwärts folgt?

Im Rahmen des FuE-Projekts konnten zu all diesen Fragen Antworten erarbeitet werden, welche die Ableitung neuer Konstruktions- und Bemessungshinweise für die Anordnung, Gestaltung und den Betrieb von Bypässen und eine Beurteilung der Wirksamkeit vorhandener Abwanderkorridore erlauben.

5 Empfehlungen für Bypässe zum Fischabstieg

Die nachstehende Tab. 3 enthält einen Auszug der Ergebnisse der ethohydraulischen Untersuchungen in Kombination mit Erkenntnissen aus dem Freilandprojekt an der Wupper. Eine ausführlichere Darstellung und Diskussion aller Einzelergebnisse des FuE-Projekts bleibt aufgrund des Umfangs der künftigen Veröffentlichung im Rahmen der BfN-Schriftenreihe vorbehalten.

Tab. 3 Zusammenstellung einiger Erkenntnisse zur Gestaltung, Anordnung und Anströmung eines Bypasses

Aspekt, Grenzwert	Aal und Wels	Lachs-Smolts	Potamodrome
günstigster Barrieretyp	unpassierbarer Vertikal- oder Schrägrechen	unpassierbarer Schrägrechen, 30° zur Anströmung mit Bypass am abstromigen Ende	
maximale lichte Weite der Rechenstäbe (für untersuchte Fischgrößen)	12 mm (Totallänge: 45 bis 90 cm)	12 mm (Totallänge: 11 bis 19 cm)	12 mm (Totallänge: 10 bis 50 cm)
Schutz vor Impingement bei maximaler Anströmung des Rechens v_{Rechen}	< 0,5 m/s	1 m/s	< 0,8 m/s
Ausrichtung der Rechenstäbe	horizontal oder vertikal		
Lage der Bypassöffnung zur Barriere	seitlich neben einem Vertikalrechen auf gleicher Ebene oder am abstromigen Ende eines Schrägrechens, ohne Kehrströmungen oder Totwasserzonen		
Abstand der Bypassöffnung zur Barriere	so nah wie möglich neben der Barriere, aber von der Anströmung der Barriere entkoppelt		
Position der Bypassöffnung in der Wassersäule	keine Empfehlung möglich	oberflächennah bis 1 m unter Wasser	keine Empfehlung möglich
Kontur	egal	eckig, möglichst als Trichter geformt	
Kubatur	Röhre, geradlinige Führung ohne Knicke		
Mindestgröße der Bypassöffnung	so groß wie möglich, mindestens jedoch 0,1 m ²		
Ausrichtung, Winkel des Bypass zur Hauptfließrichtung	0° zur Fließrichtung		
zulässige Anströmgeschwindigkeit der Barriere v_{Barriere}	0,5 m/s	1,0 m/s	0,8 m/s

zulässige Anströmgeschwindigkeit der Bypassöffnung v_{Bypass}	< 0,5 m/s	0,5 bis 0,8 m/s	0,3 bis 0,5 m/s
	ggf. zielartenspezifisch zeitliches Betriebsmanagement		
Suchverhalten	Aal: nein Wels: ja	nein	nein
Wartung	ungehinderte Zugänglichkeit zu und/oder automatische Spülmöglichkeit insbesondere sohlennaher Bypässe		

5.1 Fläche, Kontur und Kubatur einer Bypassöffnung

Die Bypassöffnung sollte eine möglichst große Querschnittsfläche besitzen, da Fische vor zu kleinen Öffnungen zurückscheuen, anstelle sie zu passieren. Als Mindestfläche kann ein Wert von 0,1 m² angegeben werden, wobei sich Aale bezüglich dieses Parameters als etwas weniger anspruchsvoll gezeigt haben, als Potamodrome und insbesondere Lachs-Smolts.

Die beiden letztgenannten bevorzugen eine eckige Kontur der Bypassöffnung, da sie die geringer durchströmten Eckbereiche oftmals nutzen, um sich vorsichtig der Öffnung zu nähern und diese auszukundschaften. Wiederum haben sich in diesem Aspekt Aale, aber auch Welse als unsensibler gezeigt, da sie offenbar keinen Unterschied zwischen einer kreisförmigen und eckigen Kontur machen.

Unabhängig von der Art hat sich aber in allen Tests eine röhrenförmige Kubatur des Bypasses mit einem radialsymmetrischen Geschwindigkeitsprofil als optimal erwiesen. Demgegenüber führt ein eckiger Kanal dazu, dass Fische in den strömungsarmen Ecken verharren und diese sogar nicht selten nutzen, um gegen die Strömung den Bypass wieder zu verlassen. Der Übergang von der Öffnungskontur zur röhrenförmigen Kubatur sollte allmählich mittels eines strömungsgünstigen Verzugsstückes, einem sogenannten Konfusor erfolgen, damit sich keine plötzlichen Strömungsablösungen ausbilden, welche die Fische bei der Passage des Bypasses beeinträchtigen oder sogar behindern.

5.2 Lage und Anströmung einer Bypassöffnung

Damit ein Bypass aufgefunden werden kann, muss sich seine Öffnung so dicht wie möglich neben der Abwanderbarriere befinden. Grund dafür ist, dass die meisten abwanderwilligen Fische mit der Hauptströmung vor einem Turbineneinlauf mit Rechenanlage eintreffen.

Die Öffnung des Bypasses ist stets so anzuordnen, dass sie in Fließrichtung der Hauptströmung, also im Winkel von 0°, ausgerichtet ist. Ethohydraulische Tests mit einem rechtwinklig zur Fließrichtung angeordneten Bypass haben sich demgegenüber sowohl für Lachs-Smolts, potamodrome Arten samt Wels und auch Blankaale als uneffektiv erwiesen; selbst wenn der Abstand zur Abwanderbarriere minimal war.

In welcher Tiefe eine Bypassöffnung liegen sollte, konnte aufgrund der begrenzten Wassersäule im Laborgerinne nicht für alle beobachteten Arten befriedigend ermittelt werden. Zurückgreifend auf die Erkenntnisse aus der Freilanduntersuchung stellt sich dieser Parameter allerdings sehr artspezifisch dar: Während Lachs-Smolts und die meisten potamodromen Arten einen Bypasseinstieg bevorzugt nahe der Wasseroberfläche bis in etwa 1 m Tiefe erwarten, zeigen

Aale eine eher sohlennahe Präferenz, während Welse aufgrund ihres ausgeprägten Suchverhaltens eine Bypassöffnung in nahezu jeder Wassertiefe auffinden werden.

Die Sogströmung in einen Bypass hinein, die als Anströmung mit der Geschwindigkeit v_{Bypass} bezeichnet wird, ist der wesentlichste Faktor sowohl für die Auffindbarkeit, als auch für die Akzeptanz einer Bypassöffnung. So wird die Auffindbarkeit eines Bypasses insbesondere dadurch konterkariert, wenn eine voluminösere Konkurrenzströmung in der Nachbarschaft eines Bypasses vorhanden ist, welche einen Großteil der eher schwachen Bypass-Sogströmung mit sich fort reißt.

Aber nicht nur auf eine hydraulische Entkopplung von Teilströmen ist zu achten, sondern auch auf die Anströmgeschwindigkeit v_{Bypass} : Während Lachs-Smolts nämlich erst ab Anströmgeschwindigkeiten über 0,5 m/s ein aktives Einschwimmverhalten zeigen, scheuen potamodrome Arten und Aale bei solchen Geschwindigkeiten vor der Bypassöffnung zurück und fliehen stromaufwärts. Eine Akzeptanz zeigen diese Arten nur bei sehr viel niedrigeren Werten im Bereich zwischen 0,3 m/s und 0,5 m/s.

In der Praxis ergibt sich daraus das Problem, dass mit konstanter Anströmung beaufschlagte Bypässe artselektiv wirksam sind, in dem ein Teil der Arten von zu hohen Geschwindigkeiten abgeschreckt wird, während andere Arten die angebotene Fließgeschwindigkeit nicht attraktiv finden. Diesem Dilemma kann nur begegnet werden, in dem ein Bypass mit einer Armatur für eine Durchflussregelung ausgestattet wird, um die Sogströmung in Abhängigkeit von der Abwanderperiode der verschiedenen Arten auf den jeweils artspezifisch präferierten Wert einstellen zu können. Die Ergebnisse der Studie zeigen damit auf, dass ein für alle Fischarten zu jeder Zeit akzeptabler Bypasstyp wahrscheinlich nicht zu realisieren ist, sondern vielmehr ein zeitlich angepasstes Betriebsmanagement für Bypässe benötigt wird.

5.3 Auffindbarkeit eines Bypasses

Sowohl im Labor, als auch im Feld durchgeführte ethohydraulischen Untersuchungen zeigen übereinstimmend, dass die verschiedenen Fischarten ein gänzlich unterschiedliches Verhalten gegenüber - wie in den vorliegenden Fällen - unpassierbaren Rechen an den Tag legen:

- Lachs-Smolts und Potamodrome verharren mit Ausnahme des Wels positiv rheotaktisch vor einer Barriere, solange die Anströmgeschwindigkeit nicht zu hoch ist. Der von ihnen eingehaltene Sicherheitsabstand zum Rechen beträgt dabei grob überschlägig $\frac{1}{2} \cdot v_{\text{Rechen}}$.
- Aale halten sich hingegen nur bei sehr geringen Anströmgeschwindigkeiten unter 0,3 m/s vor einem Rechen auf. Zumeist und vor allem bei höheren Anströmgeschwindigkeiten führen sie vor dem Rechen eine Umkehrbewegung aus und kehren nach stromauf zurück. Ein seitlich orientiertes Suchverhalten entlang einer Barriere zeigt diese Fischart unter realen Anströmbedingungen vor einem Rechen so gut wie nie, weshalb Bypässe auch nur dann gefunden werden, wenn abwandernde Aale bereits aus großer Distanz kommend auf eine solche Öffnung zusteuern.

Impingement, d. h. das von der Anströmung gegen die Rechenfläche angepresst werden, tritt nicht nur bei Aalen ab $v_{\text{Rechen}} \geq 0,5$ m/s auf (ADAM et al. 1999), sondern je nach Leistungsfähigkeit auch bei anderen Fischarten. Beobachtet wurde ein Impingement bei Welsen ab $v_{\text{Rechen}} \geq 0,5$ m/s, bei anderen Potamodromen ab $v_{\text{Rechen}} \geq 0,8$ m/s und bei Lachs-Smolts erst ab $v_{\text{Rechen}} \geq 1$ m/s.

Ein Schrägrechen mit horizontaler Stabausrichtung begünstigt zweifellos die Auffindbarkeit eines an seinem Ende angeordneten Bypass. Ursächlich verantwortlich hierfür sind nicht die in der Fachliteratur immer wieder beschriebenen Faktoren:

- tangentielle Strömungskomponenten vor der Rechenebene,
- Zunahme der Anströmgeschwindigkeit in Richtung eines Bypasses aufgrund des hydraulischen Widerstandes der Barriere,
- ein sich nach oberstrom auswirkender Staudruck oder
- ein aktives Suchverhalten der Fische.

In den ethohydraulischen Tests wurde vielmehr festgestellt, dass die sich vor dem Rechen einfindenden Fische parallel zur Rechenebene nach stromabwärts gieren, wo sie sich früher oder später vor der Bypassöffnung konzentrieren. Dieses Gierverhalten tritt allerdings nur bei Lachs-Smolts und potamodromen Arten auf, die ihre Längsachse etwa orthogonal zur Rechenebene ausrichten. Auf diese Weise entsteht zwischen der Luv- und Leekörperflanke eines Fisches infolge der Anströmung ein Druckunterschied, der das Tier - vergleichbar einer Gierfähre oder einem Scherbretthamen - ohne eigene Schwimmbewegungen nach abstrom gleiten lässt.

Ob zur Auslösung dieses erstmals beschriebenen Gierverhaltens die Schrägstellung des Rechens von den Fischen wahrgenommen werden muss, der Rechen eine bestimmte Schräganordnung bzw. Stabkonstellation aufweisen muss und/oder die Anströmgeschwindigkeit v_{Rechen} innerhalb bestimmter Werte liegen muss, konnte im Rahmen des abgeschlossenen FuE-Projekts nicht untersucht werden. Diese Fragen werden u. a. Gegenstand der nachfolgenden ethohydraulischen Forschungen der TU Darmstadt und des Instituts für angewandte Ökologie sein.

Literatur

ADAM, B., U. SCHWEVERS & U. DUMONT (1999): Beiträge zum Schutz abwandernder Fische - Verhaltensbeobachtungen in einem Modellgerinne. - Solingen (Verlag Natur & Wissenschaft), Bibliothek Natur und Wissenschaft 16, 63 S.

ADAM, B. & B. LEHMANN (2011): Ethohydraulik - Grundlagen, Methoden und Erkenntnisse. Springer-Verlag, Heidelberg.

DUMONT, U., P. ANDERER & U. SCHWEVERS (2005): Handbuch Querbauwerke. - Düsseldorf (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen).

DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) (2005): Themen: Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen - Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. - Hennef, 2. überarbeitete Auflage.

EBEL, G. (2014): Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen: Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. - Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie, Band 4.

KRIEWITZ-BUYN, C.-R. (2015): Leitrechen an Fischabstiegsanlagen: Hydraulik und fischbiologische Effizienz. - Dissertation der ETH Zürich.

Anschrift der Verfasser

Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik

Technische Universität Darmstadt
Franziska-Braun-Straße 7
64287 Darmstadt
Tel.: +49 6151/16-21165
Fax: +49 6151/16-21164
E-Mail: wabau@wb.tu-darmstadt.de

Dr. rer. nat. Beate Adam
Institut für angewandte Ökologie

Neustädter Weg 25
36320 Kirtorf-Wahlen
Tel.: +49 6692/6044
Fax: +49 6692/6045
E-Mail: ifoe@schwevers.de