



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 30.03.2020

EthoMoSt, Etho-hydraulische Modellversuche an elektrifizierten Fischleittrechen

EthoMoSt, Etho-hydraulic model study on electrified fish guidance structures



Fotos: VAW 2018/2019



ETH zürich



Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie

Datum: 30.03.2020

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
<http://www.bfe.admin.ch>
energieforschung@bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

ETH Zürich
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)
Hönggerbergring 26
CH-8093 Zürich
www.vaw.ethz.ch

Autor/in:

Julian Meister, ETH Zürich, meister@vaw.baug.ethz.ch
Claudia Beck, ETH Zürich, beck@vaw.baug.ethz.ch
Anita Roth, ETH Zürich, roth@vaw.baug.ethz.ch
Dr. Helge Fuchs, ETH Zürich, helge.fuchs@bfe.admin.ch
Dr. Ismail Albayrak, ETH Zürich, albayrak@vaw.baug.ethz.ch
Dr. Oliver Selz, EAWAG, oliver.selz@eawag.ch
Dr. Prof. Robert Boes, ETH Zürich, boes@vaw.baug.ethz.ch

BFE-Projektbegleitung:

Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch
Dr. Klaus Jorde, klaus.jorde@kjconsult.net

BFE-Vertragsnummer: SI/501758-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Der Fischabstieg durch Turbinen oder über Wehre von Kraftwerken kann erhebliche Verletzungen und Mortalitätsraten verursachen. Das ist einer der Faktoren, der zum Rückgang von Fischbeständen wesentlich beiträgt. Fischleitrechen mit horizontalen oder vertikalen Stäben und einem Bypass bilden ein effektives Fischleitsystem, um diese negativen Auswirkungen zu reduzieren und somit die freie Fischwanderung zu verbessern. Ziel des vorliegenden Projekts ist es, die Fischleiteffizienz solcher Fischleitrechen durch die Ausstattung mit einem schwachen elektrischen Feld für Fischarten mit bisher eher tiefen Effizienzen zu erhöhen. Im Herbst 2018 und Frühling 2019 wurden hydraulisch günstige Horizontal- und Vertikalrechen ohne Elektrifizierung mit sechs verschiedenen Fischarten in einem grossen etho-hydraulischen Versuchsstand getestet. Diese Daten sind als Referenz verwendet worden, um den Einfluss der Elektrifizierung zu quantifizieren. Nach einer umfangreichen Literaturrecherche wurden die elektrifizierten Fischleitrechen in Vorversuchen mit Bachforellen (*Salmo trutta fario*) und Aalen (*Anguilla anguilla*) im Juni 2019 getestet. Nach der Optimierung des Setups wurden die Hauptversuche mit Europäischen Aalen (*Anguilla anguilla*) und Schneidern (*Alburnoides bipunctatus*) im Herbst 2019 abgeschlossen. Alle getesteten Fischarten reagierten mit einer ausgeprägten Meidreaktion auf das elektrische Feld, was den elektrifizierten Fischleitrechen ein grosses Potenzial als Fischschutz- und allenfalls auch als Fischleitmassnahme bescheinigt. Kleine Änderungen im Aufbau des elektrischen Felds haben aber einen grossen Einfluss auf das Fischverhalten. Die Herausforderung besteht darin, elektrische sowie geometrische Parameter zu finden, um die Fische effizient in den Bypass zu leiten. Weitere Forschung ist nötig, um die Funktionsweise der elektrifizierten Fischleitrechen nicht nur als Fischschutz-, sondern auch als Fischleitmassnahme zu gewährleisten.

Résumé

La dévalaison des poissons à travers les turbines ou par-dessus les déversoirs des centrales hydroélectriques peut causer des blessures et des taux de mortalité importants. C'est l'un des facteurs qui contribuent de manière significative à la diminution des stocks de poissons. Les grilles constituées de barres horizontales ou verticales avec un exutoire forment un système efficace de protection et de guidage des poissons pour réduire ces effets négatifs et ainsi améliorer la libre migration des poissons. L'objectif du présent projet est d'augmenter l'efficacité de ces grilles en leur fournissant un champ électrique faible pour des espèces de poissons dont l'efficacité était auparavant assez faible. En automne 2018 et en printemps 2019, des grilles horizontales et verticales hydrauliquement favorables sans électrification ont été testées avec six espèces de poissons différentes dans un essai étho-hydraulique de grande taille. Ces données ont été utilisées comme référence pour quantifier l'impact de l'électrification sur l'efficacité de ces grilles. Après une analyse bibliographique approfondie, les grilles électrifiées de protection et de guidage des poissons ont été testés lors d'essais préliminaires avec des truites brunes (*Salmo trutta fario*) et des anguilles (*Anguilla anguilla*) en juin 2019. Après avoir optimisé les paramètres électriques et géométriques, les principaux essais avec des anguilles européennes (*Anguilla anguilla*) et des spirlins (*Alburnoides bipunctatus*) ont été achevés en automne 2019. Toutes les espèces de poissons testées ont réagi en évitant fortement le champ électrique, ce qui atteste du grand potentiel des grilles électrifiées pour la protection des poissons. Cependant, de petites modifications de la structure du champ électrique ont une influence majeure sur le comportement des poissons. Le défi consiste à trouver des paramètres électriques et géométriques pour guider efficacement le poisson dans l'exutoire.



Summary

Downstream fish passage through turbines or over spillways of hydropower plants may cause significant fish injury or mortality, resulting in a decline of fish populations. Horizontal or Vertical Bar Racks with a Bypass System are effective fish guidance technologies to mitigate such impacts. This project aims at increasing the fish guidance efficiency of these systems by adding a low-voltage electrical field. In autumn 2018 and spring 2019, hydraulically optimized horizontal and vertical racks were tested with six different fish species in a large-scale etho-hydraulic flume without an electric field. The results of these live-fish tests serve as a basis to assess the effect of electric field on fish guidance efficiency of the guidance racks. An intensive literature review was carried out and the electrification of the guidance racks was planned. The set-up was optimized after the preliminary experiments with brown trouts (*Salmo trutta fario*) and European eels (*Anguilla anguilla*), which were carried out in June 2019. The main experiments with European eels (*Anguilla anguilla*) und spirlins (*Alburnoides bipunctatus*) were completed in autumn 2019. All tested fish species reacted with a distinct behavior to the electric field, which shows the large potential of electrified fish guidance racks as a fish protection measure. Small changes in the setup of the electric field had a large effect on the fish behavior, which makes it challenging to guide fish into the bypass efficiently.

Take-home messages

- Alle getesteten Fischarten (Aale, Schneider, Forellen) reagierten mit einer ausgeprägten Meidreaktion auf das elektrische Feld. Die elektrifizierten Fischleitrechen haben daher grosses Potenzial als Fischschutzmassnahme. Mit elektrifizierten Fischleitrechen können Fische effizient am Einschwimmen in die Turbinen gehindert werden. Die Herausforderung besteht jedoch darin, das elektrische Feld so aufzubauen, dass die Fische auch erfolgreich in den Bypass geleitet werden.
- Das Fischverhalten hängt sehr stark von den Pulsparametern des angelegten Stroms ab. Diesbezüglich ist in der Literatur sehr wenig Wissen dokumentiert.
- Wenn der Aufbau des elektrischen Feldes nicht optimal ist, können schon geringe Spannungen (38 V) zu schwerwiegenden Fischverletzungen führen.
- Es gibt verschiedene Arten, das elektrische Feld aufzubauen. Der unterschiedliche Aufbau des elektrischen Feldes hat einen grossen Einfluss auf dessen Ausbreitung im Wasser und somit auf das Fischverhalten. Eine detaillierte Vermessung des elektrischen Feldes ist unumgänglich, um Fischverletzungen ausschliessen und das beobachtete Fischverhalten erklären zu können.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Take-home messages	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	7
1.2 Motivation des Projekts	7
1.3 Projektziele	8
1.4 Referenzprojekte	9
2 Anlagenbeschrieb	9
2.1 Versuchskanal	9
2.2 Rechen und Elektrifizierung.....	11
3 Vorgehen und Methode	13
3.1 Genereller Versuchsablauf	13
3.2 Auswertung des Fischverhaltens.....	13
3.3 Versuchsprogramm	15
4 Resultate	16
4.1 Vorversuche.....	16
4.2 Hauptversuche HBR.....	16
4.3 Hauptversuche CBR.....	17
5 Diskussion der Ergebnisse	18
5.1 Vorversuche.....	18
5.2 Hauptversuche HBR.....	18
5.3 Hauptversuche CBR.....	19
5.4 Fischverletzungen	20
6 Schlussfolgerungen und Fazit	22
7 Ausblick und zukünftige Umsetzung	23
8 Publikationen	24
9 Literaturverzeichnis	24
10 Anhang	25



Abkürzungsverzeichnis

BS	Bypass System
BFE	Bundesamt für Energie
CBR	<i>Curved-Bar Rack</i> (= Vertikaler Fischleitrechen mit optimierter Stabform)
FGE	<i>Fish Guidance Efficiency</i> (Fischleiteffizienz)
FIWI	Zentrum für Fisch- und Wildtiermedizin
FPE	<i>Fish Protection Efficiency</i> (Fischschutzeffizienz)
HBR	<i>Horizontal Bar Rack</i> (= Fischleitrechen mit horizontalen Stäben)
RI	Recheninteraktion
VAW	Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie
VBR	<i>Vertical Bar Rack</i> (= Fischleitrechen mit vertikalen Stäben)



1 Einleitung

Mit dem Bau von Querbauwerken, wie z.B. Wasserkraftwerke oder Schwellen und Abstürze zur Sohlstabilisierung, wurde die Fischwanderung seit der Industrialisierung stark eingeschränkt. Das 2011 in Kraft getretene revidierte Schweizerische Gewässerschutzgesetz fordert die Wiederherstellung der Fischgängigkeit in der Schweiz bis 2030. Dies beinhaltet unter anderem die Längsvernetzung von Flüssen und die damit verbundene ungehinderte flussauf-, sowie flussabwärts gerichtete Fischwanderung. Infolgedessen werden seit einigen Jahren Anstrengungen unternommen, Wasserkraftwerke für Fische in beide Richtungen passierbar zu machen. Fischleitrechen mit horizontalen oder vertikalen Stäben und einem Bypass können ein effektives Fischleitsystem bilden, indem sie abwandernde Fische vor der Turbinenpassage schützen und ihnen eine sichere Abwanderung ins Unterwasser ermöglichen.

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Im deutschsprachigen Raum wurden bisher vor allem horizontale Leitrechen zum Fischschutz an kleineren bis mittleren (Ausbauwassermenge $Q_A < 120 \text{ m}^3/\text{s}$) Laufwasserkraftwerken (LWK) installiert (Ebel, 2013; Gruber, 2019). Um die Schutzwirkung dieses Rechentyps zu maximieren, tendieren Richtlinien immer mehr dazu, den empfohlenen Stababstand von den bisher üblichen 20 mm auf 10–15 mm zu reduzieren. Kleinere Stababstände erhöhen allerdings die Fliessgeschwindigkeiten zwischen den Stäben, was vor allem für kleinere und schwimmschwache Fische zu Rechen-Passagen oder zu einem Andrücken an den Rechen führen kann. Und selbst Rechenabstände von 10-15 mm bieten keinen vollständigen Schutz, da bestimmte Altersklassen (Jungfische) jeder Fischart aufgrund der Größenverteilung trotz kleinerer Stababstände den Rechen passieren können. Daneben kann ein solch geringer Stababstand zu erheblichen betrieblichen Problemen führen, da z.B. Laub, Äste, Gräser und Algen den Rechen stark verlegen und die hydraulischen Verluste deutlich erhöhen.

Im Gegensatz dazu wurden in Europa noch keine grösseren LWK ($Q_A \geq 120 \text{ m}^3/\text{s}$) mit Fischleitrechen ausgestattet; für diese werden mit Bezug auf nordamerikanische Anlagen eher vertikale Fischleitrechen mit Stababständen von 25–150 mm empfohlen. In Laborversuchen konnte die VAW mit 50 mm Stababständen relativ hohe Fischleiteffizienzen erzielen (Boes & Albayrak, 2017; Albayrak *et al.*, 2020). Noch grössere Stababstände sind aber sowohl aus betrieblicher Sicht (geringere Verlegung und Aufwand für Rechenreinigung) als auch wegen der geringeren Rechen- und damit Produktionsverluste wünschenswert.

1.2 Motivation des Projekts

Zu Beginn des Projekts wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, welche das Potenzial von elektrifizierten Fischleitrechen bestätigt (Rost *et al.*, 2014; Parasiewicz *et al.*, 2016; Brinkmeier *et al.*, 2017; Berger, 2018). Es konnte allerdings keine Studie gefunden werden, in welcher sowohl potamodrome als auch diadrome Fischarten an verschiedenen elektrifizierten Rechen untersucht wurden. Bisher wurden an den Universitäten Darmstadt (Berger, 2018) und Innsbruck (Brinkmeier *et al.*, 2017; Tutzer *et al.*, 2019) ethohydraulische Versuche mit elektrifizierten Fischleitrechen durchgeführt. Mit beiden Universitäten besteht ein kontinuierlicher Informationsaustausch, welcher in die Planung des vorliegenden Projekts eingeflossen ist.

Zur Weiterentwicklung der Leitrechen für den Fischabstieg wurden an der VAW im Rahmen des EU Horizon 2020 Projekts *Fishfriendly Innovative Technologies for hydropower (FIThydro)* hydraulische Laborversuche zu horizontalen und vertikalen Fischleitrechen durchgeführt. Das Design beider Rechentyphen wurde optimiert, um negative Auswirkungen (z.B. hydraulische Verluste und asymmetrische Turbinenanströmung) auf den Kraftwerksbetrieb zu minimieren. In einem weiteren Schritt wurden an den



optimierten Rechenkonfigurationen ethohydraulische Versuche mit Fischen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden als Referenz genommen um zu testen, ob ein elektrifizierter Fischleitrechen positive oder negative Auswirkungen auf die Fischschutz- und Leiteffizienz der getesteten Fischart hat.

Im Rahmen des vorliegenden BFE-Forschungsprojekts wurden die genannten Fischleitrechen elektrifiziert. Die Ausstattung eines Fischleitrechens mit einem schwachen elektrischen Feld (38 - 80 V) führt, ähnlich wie bei einem elektrifizierten Weidezaun, zu einer zusätzlichen Scheuchreaktion, wodurch gemäss unserer Hypothese die Schutz- und Leitwirkung erhöht wird (vgl. Kapitel 1.3). Die Fische sollten den Rechen früher erkennen, sodass der Reaktionsraum der Fische grösser wird und sie nicht den erhöhten Geschwindigkeiten zwischen den Rechenstäben ausgesetzt sind. Der Einbauwinkel des Rechens schräg zur Anströmung erzeugt eine rechenparallele Geschwindigkeitskomponente, welche die Fische zum Bypass leitet. Sogenannte Hybridrechen, bei denen die hydraulischen Strömungssignaturen durch ein elektrisches Feld unterstützt werden, könnten die Schutzwirkung insbesondere für kleine Fische und schwimmschwache Fischarten (z.B. Aal) erhöhen.

Sowohl horizontale als auch vertikale Leitrechen führen bei entsprechender Bemessung zu geringen hydraulischen Verlusten (Albayrak *et al.*, 2019; Beck *et al.*, 2019; Meister *et al.* 2020). Falls die Rechen durch Schwemmholtz, Laub oder Sedimente verlegt sind, steigen die Verluste jedoch stark an. Durch die Elektrifizierung des Rechens kann der Stababstand vergrössert werden. Hydraulische Verluste sowie Reinigungs- und Instandhaltungsaufwand könnten durch grössere Stababstände deutlich reduziert werden. Die Fischleiteffizienz bleibt unserer Hypothese zufolge hoch, während negative betriebliche Aspekte minimiert werden.

1.3 Projektziele

Das Ziel dieses BFE-Forschungsprojekts liegt in der Ergänzung des laufenden FlHydro-Projekts zur Maximierung der Fischleiteffizienz von Leitrechen-Bypass-Systemen. Das Schwimmverhalten an elektrifizierten Leitrechen soll für verschiedene Fischarten, unter anderem auch potamodrome und den Aal, ermittelt werden. Konkret soll u.a. die Frage beantwortet werden, ob Fische bei grösserem Stababstand die für sie passierbaren Zwischenräume nutzen oder ob elektrische Reize sie erfolgreich davon abhalten. Als Referenz dienen die Daten der etho-hydraulischen Versuche ohne Elektrifizierung, welche im Herbst 2018 durchgeführt wurden. Falls die Elektrifizierung der Leitrechen bei grösseren Stababständen nicht zu einer deutlichen Erhöhung der Fischleiteffizienz führt, soll zudem untersucht werden, ob die Leiteffizienz für die üblichen Stababstände von 50 mm für vertikale Fischleitrechen und 10-20 mm für horizontale Leitrechen gesteigert werden kann. Im Fokus stehen dabei vor allem kleine Fischarten und solche, die sich von einem Fischleitrechen ohne Elektrifizierung nicht gut leiten lassen. Es werden somit die folgenden zwei Forschungsschwerpunkte untersucht:

- F1: Durch die Elektrifizierung des Rechens (HBR oder CBR) kann der Stababstand erhöht werden, um die gleiche Schutzwirkung wie ohne Elektrifizierung zu erreichen
- F2: Bei gleichem Stababstand wird die Schutzwirkung des Rechens (HBR oder CBR) durch die Elektrifizierung erhöht

Die Erkenntnisse der Untersuchung können einerseits genutzt werden, um Empfehlungen für die optimale Auslegung von Fischschutzsystemen zu ergänzen. Andererseits wird das Wissen über das Fischverhalten in elektrischen Feldern erweitert.

1.4 Referenzprojekte

In den letzten Jahren wurden verschiedene Projekte mit elektrifizierten Fischleitrechen durchgeführt. Dafür wurde das in Parasiewicz *et al.* (2016) beschriebene NEPTUN-System der Firma Procom System S.A. verwendet (<http://www.procomsystem.pl>). Brinkmeier *et al.* (2017) und Tutzer *et al.* (2019) führten etho-hydraulische Versuche an elektrifizierten Elektroseilrechen durch und konnten zeigen, dass die Fischschutzwirkung des Seilrechens durch das elektrische Feld erhöht wird (Abbildung 1a). Die horizontal angeordneten Seile wurden abwechselnd als Anode und Kathode elektrifiziert, beziehungsweise als Gruppe verschaltet, um die Ausdehnung des elektrischen Feldes zu erhöhen. Berger (2018) untersuchte einen elektrifizierten Horizontalrechen mit einem Stababstand von $s_b = 30$ mm mit Aalen, bei welchem der Horizontalrechen als Anode und eine hinter dem Rechen befestigte Baustahlgittermatte als Kathode elektrifiziert wurde (Abbildung 1b). Für einen Anströmwinkel von $\alpha = 30^\circ$ reduzierten sich die Rechen-Passagen von 12.5% ohne Elektrifizierung auf 0% mit Elektrifizierung. Rost *et al.* (2014) untersuchte elektrifizierte, vertikale Fischleitrechen, bei welchem die Stäbe einzeln oder als Gruppe verschaltet wurden (Abbildung 1c).

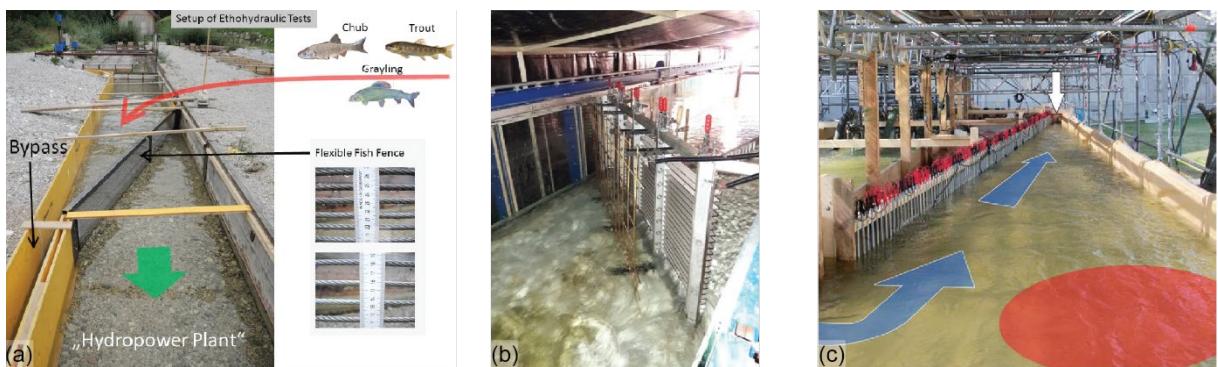


Abbildung 1: (a) Versuchsrinne mit elektrifizierten Seilrechen (Brinkmeier *et al.*, 2017). (b) Versuche mit elektrifizierten Horizontalrechen (Berger, 2018). (c) Versuchsbecken mit elektrifiziertem, vertikalem Fischleitrechen (Rost *et al.*, 2014)

2 Anlagenbeschrieb

2.1 Versuchskanal

Die Versuche wurden im etho-hydraulischen Versuchskanal der VAW durchgeführt, welcher 30 m lang, 1.5 m breit und 1.2 m tief ist (Abbildung 2). Der maximale Durchfluss beträgt 1'200 l/s, wodurch bei einer Wassertiefe von $h_o = 0.90$ m Fliessgeschwindigkeiten bis zu $U_o = 0.90$ m/s eingestellt werden können. Im oberstromigen Bereich des Kanals wurde ein Startabteil mit Gittern vom restlichen Kanal abgetrennt, um die Fische an die Strömung akklimatisieren zu können. Die Rechen wurden in der Mitte des Kanals mit einem Winkel von $\alpha = 30^\circ$ zur Strömung eingebaut. Ein modularer Aufbau ermöglichte einen schnellen Wechsel zwischen dem Horizontalrechen (HBR) und dem Vertikalrechen (CBR). Anschliessend an den Rechenfuss befand sich ein 25 cm breiter Bypass (Abbildung 2), welcher den Fischen als sicherer Abwanderungskorridor diente.



Im Kanal wurden fünf in die Wasseroberfläche eingetauchte Kameras installiert (Abbildung 2), mit welchen das Fischverhalten aufgezeichnet wurde. Diese Aufzeichnungen wurden mit einer speziell entwickelten 3D-fish-tracking Software analysiert (unterstützt durch BFE SI/500957-1), um die Schwimmwege der Fische analysieren zu können. Somit konnten kritische Punkte erfasst und das Design des Rechen-Bypass-Systems gezielt optimiert werden. Abbildung 3 zeigt ein Standbild einer dieser Kameras, auf welchem sich drei Schneidegeräte entlang des HBRs dem Bypass nähern.

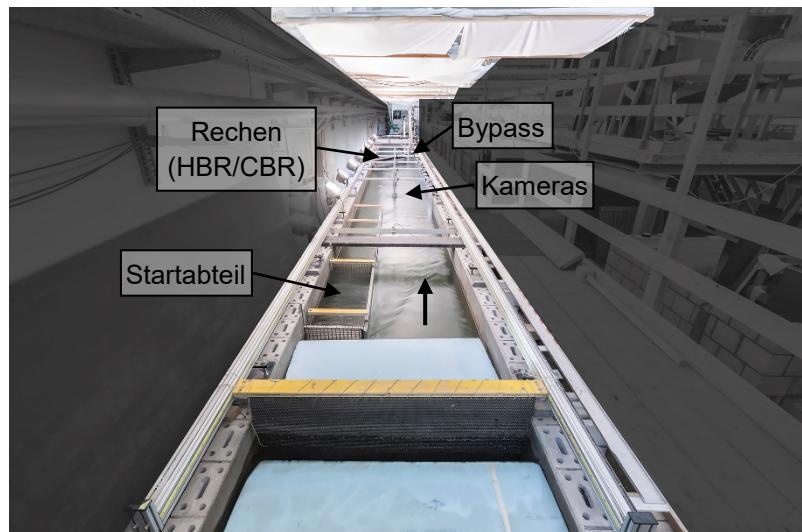


Abbildung 2: Der etho-hydraulische Versuchskanal an der VAW mit dem Startabteil im Vordergrund und dem Rechen und Bypass im Hintergrund; Blick in Fließrichtung



Abbildung 3: Standbild aus Unterwasser-Videoaufnahme, Versuch mit Horizontalrechen, drei Schneidegeräte nähern sich dem Bypass (rechts)

Zusätzlich zu den eingetauchten Kameras wurden die Fische visuell durch die verglaste Seitenwand des Kanals beobachtet, wodurch allfällige Auffälligkeiten protokolliert werden konnten. Abbildung 4 zeigt aus dem Beobachtungsraum aufgenommene Fotos des HBRs (Abbildung 4a) und des CBRs (Abbildung 4b), auf welchen sich jeweils ein Fisch dem Bypass nähert.

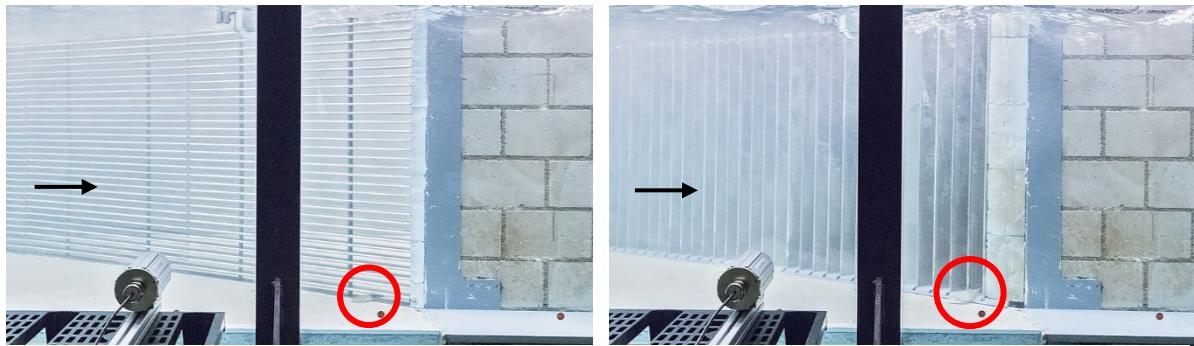


Abbildung 4: Blick aus dem Beobachtungsraum während der ethohydraulischen Laborversuche mit (a) Horizontalrechen und (b) Vertikarechen; die Fische (rote Kreise) befinden sich im Bereich des Bypass einlaufs und tasten die Rechenstruktur mit ihrer Schwanzflosse ab

2.2 Rechen und Elektrifizierung

Der etho-hydraulische Strömungskanal erlaubt die Variation verschiedener Parameter: Fischart, Rechentyp (CBR oder HBR), Rechenwinkel, Anströmgeschwindigkeit, Stababstand, Bypassstyp und Fliessgeschwindigkeit im Bypass. Alle Versuche mit elektrifizierten Fischleitrechen wurden für hydraulische Bedingungen durchgeführt, mit welchen ohne Elektrifizierung hohe Fischleiteffizienzen erreicht wurden. Die genaue Geometrie der strömungsoptimierten Stäbe des HBRs können Meister *et al.* (2020) und diejenige des CBRs Beck *et al.* (2019) entnommen werden. Die durchschnittliche Anströmgeschwindigkeit betrug $U_o = 0.5$ m/s und die Fliessgeschwindigkeit im Bypass einlauf war $U_{By,in} = 0.6$ m/s, bei einem horizontalen Anströmwinkel der Rechen von $\alpha = 30^\circ$. Es wurde auch untersucht, ob der Stababstand der Rechen durch die Elektrifizierung vergrössert werden kann, ohne dass sich dies negativ auf die Schutz- und Leitfunktion der Rechen auswirkt. Dies würde in der praktischen Anwendung nicht nur die hydraulischen Verluste reduzieren, sondern auch die Verklausungswahrscheinlichkeit mit Geschwemm sel und somit den betrieblichen Aufwand.

Die Rechen wurden wie bei den in Kapitel 1.4 beschriebenen Projekten mit gepulstem Gleichstrom (38-80 V), mit dem gemieteten NEPTUN-System der Firma Procom (Abbildung 5a, <http://www.procomsystem.pl>), elektrifiziert. Die Gleichstrompulse sollen eine Meidreaktion der Fische bewirken, sodass sie die Leitrechen nicht passieren. Dabei können neben der Spannungsstärke auch die Anzahl der Pulse, die Pulsdauer, die Pausendauer und die Wiederholungszeit angepasst werden (Abbildung 5b). Daraus kann der sogenannte *duty cycle* (Arbeitszyklus) berechnet werden, welcher der prozentualen Zeitdauer entspricht, während welcher Strom im Wasser ist.

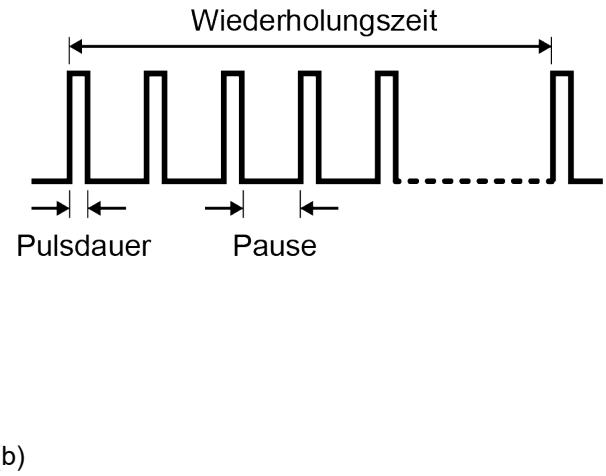


Abbildung 5: (a) Steuerschrank des NEPTUN-Systems der Firma Procom und (b) Schema des gepulsten Gleichstroms

Der elektrifizierte Vertikalrechen wurde mit lichten Stababständen von $s_b = 50$ und 110 mm untersucht (Abbildung 6a,b). Die einzelnen Rechenstäbe wurden dabei gegen die Kanalsohle und den Horizontalträger mit PVC-Platten isoliert. Dadurch konnten die einzelnen Rechenstäbe jeweils abwechselnd als Anode und Kathode elektrifiziert werden. Um ein grösseres elektrisches Feld zu erzeugen, wurde auch eine Gruppenverschaltung getestet. Dafür wurden abwechselnd jeweils drei Rechenstäbe als Anode und drei Rechenstäbe als Kathode elektrifiziert.



Abbildung 6: Elektrifizierung des Vertikalrechens mit einem lichten Stababstand von (a) $s_b = 50$ mm und (b) $s_b = 110$ mm

Der Horizontalrechen besteht aus horizontalen Rechenstäben, welche über vertikale Gewindestangen und Distanzhülsen miteinander verbunden sind (Abbildung 7a). Daher war es nicht möglich, die einzelnen Rechenstäbe abwechselnd als Anode und Kathode zu verschalten. Aus diesem Grund wurde, analog zu Berger (2018) in einem rechtwinkligen Abstand von 18 cm hinter dem Rechen ein Edelstahlgitter eingebaut, welches als Kathode fungierte (Abbildung 7b). Der lichte Stababstand des Horizontalrechens wurde zwischen $s_b = 20, 51$ und 100 mm variiert.

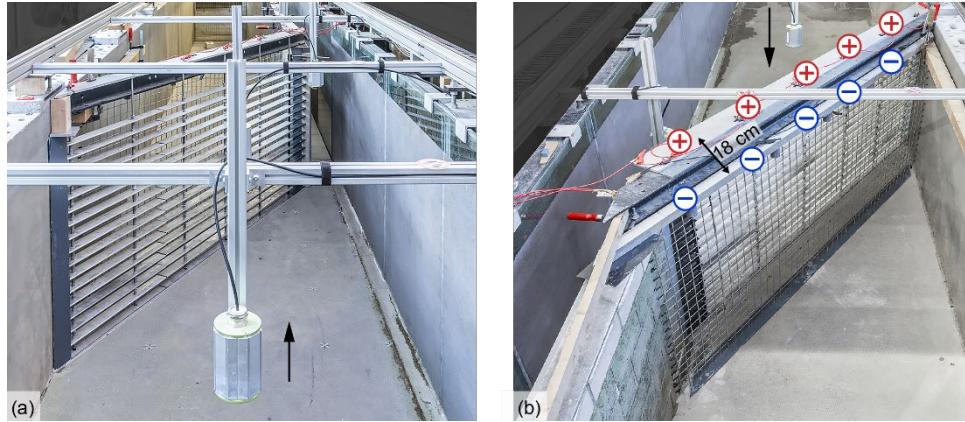


Abbildung 7: Blick auf den Horizontalrechen mit $s_b = 51$ mm (a) in Fließrichtung und (b) gegen die Fließrichtung. Der Horizontalrechen wurde als Anode (+) und das Edelstahl-Gitter als Kathode (-) elektrifiziert

3 Vorgehen und Methode

3.1 Genereller Versuchsablauf

Die für die Versuche benötigten Fische wurden jeweils zu Beginn der Woche mittels Elektrobefischung in nahegelegenen Fließgewässern gefangen (Himmelbach, Thur, Seitenkanal Murg) und anschliessend in die Hälterungstanks der VAW gebracht. Am darauffolgenden Tag wurde mit den ersten Versuchen begonnen. Dafür wurden drei Fische ohne Betäubung in einer Cuvette fotografiert, um etwaige äussere Vorschäden zu quantifizieren, und anschliessend in das Startabteil gesetzt. Dort konnten sich die Fische für 15 Minuten an die Strömungsbedingungen des etho-hydraulischen Versuchskanals gewöhnen. Dann wurde das unterstromige Begrenzungsgitter des Startabteils geöffnet und die Fische konnten sich frei im Kanal bewegen. Der Versuch wurde beendet, sobald alle drei Fische eine Reaktion auf den Rechen zeigten oder die maximale Versuchsdauer von 30 Minuten überschritten wurde oder wenn davon ausgegangen werden musste, dass sich ein Fisch beim Versuch verletzt hat (Kontakt mit oder Passage des elektrifizierten Rechens). Dann wurden die Fische wieder eingefangen und zurück in die Hälterungstanks gebracht. Um die Anzahl an benötigten Fischen zu reduzieren, wurden die Fische an unterschiedlichen Tagen mehrmals verwendet. Um Lerneffekte zu reduzieren, wurden die Fische maximal fünf Mal getestet. Allfällige Lerneffekte von Fischen nach Berührung mit Strom können aber nicht quantifiziert werden. Nach einer maximalen Hälterungszeit von vier Tagen für die Schneide- und Forellen und acht Tagen für Aale wurden die Fische wieder in ihren Herkunftsgewässern ausgesetzt.

3.2 Auswertung des Fischverhaltens

Abbildung 8 zeigt eine Draufsicht auf den für die Versuche relevanten Teil des etho-hydraulischen Versuchskanals. Die y-Koordinate wurde mit der Kanalbreite unterstrom des Rechens $w_{ds} = 1150$ mm normiert und die x-Koordinate mit der Zuflusswassertiefe $h_o = 900$ mm. Der Koordinatenursprung befindet sich am Bypasseinlauf. Um systematisch überprüfen zu können, ob die Fische mit dem Rechen interagiert haben, wurde in einem rechenparallelen Abstand von 15 cm ein Sektor definiert (Abbildung 8, Sektor „Rechen“). Zudem wurden drei Linien festgelegt:

Linie 1: Relevanter Versuchsbereich, 7.5 m oberstrom des Bypasseinlaufs ($x/h_o = -8.3$, in Abbildung 8 nicht abgebildet).

Linie 2: Oberstromiges Ende Sektor „Rechen“, 2.4 m oberstrom des Bypasseinlaufs ($x/h_o = -2.7$, Abbildung 8).

Linie 3: 1.6 m unterstrom des Bypasseinlaufs ($x/h_o = 1.8$, Abbildung 8).

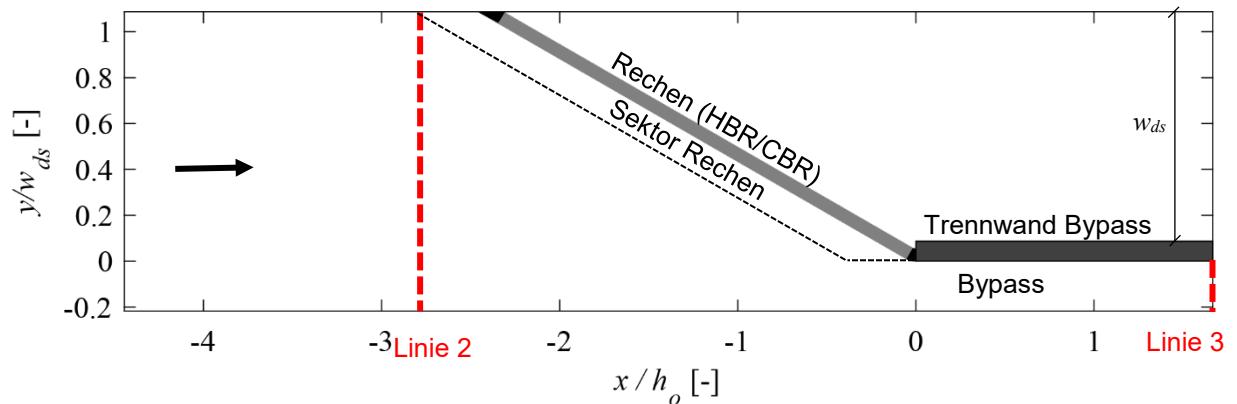


Abbildung 8: Grundriss eines Ausschnitts des ethohydraulischen Versuchskanals mit Rechen und Bypass. Die strichlierten Linien wurden definiert, um das Fischverhalten zu analysieren; Fließrichtung von links nach rechts

Das Fischverhalten wurde mit Kameras aufgezeichnet und anschliessend mit der speziell optimierten 3D-fish-tracking Software ausgewertet. Zur Auswertung des Schwimmverhaltens wurden die folgenden sechs Fischreaktionen unterschieden, wobei die maximale Versuchsdauer 30 Minuten betrug:

- 1) Der Fisch ist innerhalb der Versuchsdauer nicht über die Linie 1 ($x/h_o \approx -8$, in Abbildung 8 nicht dargestellt) geschwommen.
- 2) Der Fisch ist zwar über die Linie 1, aber innerhalb der Versuchsdauer nicht über die Linie 2 geschwommen.
- 3) Bypass-Passage ohne Recheninteraktion (RI): Der Fisch ist ohne Recheninteraktion über die Linie 3 geschwommen, d.h. der Schwimmpfad des Fisches hat den Sektor „Rechen“ nicht gekreuzt.
- 4) Bypass-Passage mit Recheninteraktion (RI): Der Fisch ist mit Recheninteraktion über die Linie 3 geschwommen, d.h. der Schwimmpfad des Fisches hat den Sektor „Rechen“ gekreuzt.
- 5) Rechen-Passage.
- 6) Verweigerung: Der Fisch ist über Linie 2 geschwommen, hat aber weder den Rechen, noch den Bypass passiert.

Dabei wurde jeweils nur das zuerst gezeigte Verhalten jedes Fisches gezählt. Alle Fische, welche weder über Linie 1 noch über Linie 2 geschwommen sind, wurden als nicht abwanderungswillig klassifiziert und von der Analyse ausgenommen. Die Fischreaktion „Bypass-Passage ohne Recheninteraktion“ kann verwendet werden, um die Akzeptanz des Bypasses zu überprüfen, Aussagen bezüglich der Schutz- und Leiteffizienz des Rechens sind aber nur bedingt möglich. Daher wurden auch Fische, welche ohne Recheninteraktion in den Bypass geschwommen sind, von weiteren Analysen ausgeschlossen. Alle



weiteren Fischreaktionen wurden verwendet, um einerseits die Fischleiteffizienz in den Bypass zu bestimmen (*Fish Guidance Efficiency*, FGE) und andererseits die Fischschutzeffizienz (*Fish Protection Efficiency*, FPE) mit den folgenden Definitionen zu berechnen:

$$\text{Fischleiteffizienz (FGE)} = \frac{\text{Bypass-Passage (mit RI)}}{\text{Bypass-Passage (mit RI)} + \text{Rechen-Passage} + \text{Verweigerung}}$$

$$\text{Fischschutzeffizienz (FPE)} = \frac{\text{Bypass-Passage (mit RI)} + \text{Verweigerung}}{\text{Bypass-Passage (mit RI)} + \text{Rechen-Passage} + \text{Verweigerung}}.$$

3.3 Versuchsprogramm

Im Juni 2019 wurden 12 Vorversuche mit Gruppen von jeweils drei Aalen bzw. Forellen durchgeführt, um die Funktionstüchtigkeit der Elektrifizierung zu überprüfen und erste Erkenntnisse zu gewinnen. Dabei wurde neben dem Rechentyp und dem Stababstand auch die Spannung zwischen 38, 50 und 89 Volt variiert. Nach der Optimierung des Setups wurden im Herbst 2019 weitere 122 Versuche mit jeweils drei Aalen bzw. Schneidern durchgeführt, welche im Folgenden detailliert beschrieben werden. Aale sind aufgrund ihrer Körperproportionen besonders stark von Verletzungen beim Abstieg betroffen. Weil Aale unsensibel auf hydraulische Strömungssignaturen reagieren und sich auch durch schmale Spalten zwängen, können sie ohne Elektrifizierung nur mit sehr geringen Stababständen geschützt werden. Weil Aale aufgrund ihrer Körperlänge ein grösseres elektrisches Potenzial als kleine Fische abgreifen, scheint die Elektrifizierung grosses Potenzial für den Aalschutz zu haben. Im Gegensatz zu den Aalen konnte in den Versuchen ohne Elektrifizierung gezeigt werden, dass Schneider sowohl mit dem HBR als auch mit dem CBR effizient geschützt und geleitet werden können. Um zu überprüfen, ob diese gute Schutz- und Leiteffizienz nicht durch das elektrische Feld reduziert wird, wurden die Versuche mit elektrifizierten Fischleitrechen auch mit Schneidern durchgeführt.

Tabelle 1 zeigt alle mit dem HBR getesteten Elektrifizierungseinstellungen, wie der Spannung U , der Pulsdauer L_{pulse} , der Pausendauer L_{gap} , der Anzahl Pulse N_{pulse} , der Wiederholungszeit t_{rep} und des *duty cycles*, mit der jeweiligen Anzahl an durchgeführt Versuchen. Die überwiegende Mehrheit der Versuche wurde mit den in der ersten Zeile dargestellten Einstellungen durchgeführt, welche im Folgenden als Standardeinstellung HBR bezeichnet wird. Mit dieser Standardeinstellung wurden 12 Versuche mit Schneidern mit $s_b = 20$ mm, 17 Versuche mit Schneidern mit $s_b = 51$ mm, fünf Versuche mit Aalen mit $s_b = 20$ mm, 24 Versuche mit Aalen mit $s_b = 51$ mm und ein Versuch mit Aalen mit $s_b = 100$ mm durchgeführt. Es wurden immer wieder von der Standardeinstellung abweichende Pulsparameter getestet, welche jedoch nicht zu einer Verbesserung des Fischschutzes führten. Daher wurde mit diesen abweichenden Pulsparametern auch nur eine geringe Anzahl an Versuchen durchgeführt, welche für die Berechnung der Resultate nicht berücksichtigt wurden.

Tabelle 1: Versuchsprogramm Elektrifizierung des Horizontalrechens mit L_{pulse} = Pulsdauer, L_{gap} = Pausendauer, N_{pulse} = Anzahl Pulse in einer Pulsgruppe, t_{rep} = Wiederholungszeit

U [V]	L_{pulse} [ms]	L_{gap} [ms]	N_{pulse} [-]	t_{rep} [ms]	<i>Duty cycle</i> [%]	# Versuche [-]
38	0.3	7	5	200	0.75	59
38	0.2	0	1	100	0.2	5
38	0.3	0	1	40	0.75	3
38	0.4	10	7	300	0.93	1
38	0.2	7	3	80	0.75	4
80	0.3	7	5	200	0.75	1



Die für den HBR verwendete Standardeinstellung wurde auch mit dem CBR bei zwei verschiedenen Stababständen ($s_b = 50$ mm und 110 mm) getestet (CBR3, Tabelle 2). Da diese Einstellung beim CBR zu sehr unkontrollierten, hektischen Reaktionen und bei $s_b = 110$ mm sogar zu inneren und äusseren Verletzungen bei den Fischen führte (siehe Kapitel 4.3 und 5.4), wurden noch weitere Einstellungen getestet.

Tabelle 2: Versuchsprogramm Elektrifizierung des curved-bar racks (CBR) mit s_b = lichter Stababstand, L_{pulse} = Pulsdauer, L_{gap} = Pausendauer, N_{pulse} = Anzahl Pulse in einer Pulsguppe, t_{rep} = Wiederholungszeit

Test	U [V]	s_b [mm]	L_{pulse} [ms]	L_{gap} [ms]	N_{pulse} [-]	t_{rep} [ms]	Duty cycle [%]	Fischart	# Versuche [-]
e-CBR1	38	50	0.2	0	1	100	0.20	Schneider	8
								Aal	7
e-CBR2	38	110 50	0.2	11	2	200	0.20	Schneider	4
								Aal	2
e-CBR3	38	50 110	0.3	7	5	200	0.75	Schneider	8
								Aal	5
								Schneider	3*
								Aal	6**
e-CBR4	38	50	0.4	10	7	300	0.93	Aal	4*

* Abbruch dieser Konfiguration wegen Fischverletzung

** Diese Konfiguration wurde auch mit einer 3x3-Stab Schaltung und einer Gegenelektrode getestet, aber wegen Fischverletzungen abgebrochen

4 Resultate

4.1 Vorversuche

Aufgrund der geringen Anzahl an Vorversuchen ist die Berechnung der Fischleiteffizienz nicht sinnvoll, die Funktionsfähigkeit der elektrifizierten Rechen konnte aber bestätigt werden. Die getesteten Aale und Forellen wurden gut von den elektrifizierten Rechen geschützt, sie zögerten aber, in den Bypass einzuschwimmen. Lokale Spannungsmessungen im Bypass zeigten, dass sich das Stromfeld bis in den Bypass ausdehnte. Daraufhin wurde der Versuchsaufbau verbessert, indem beispielsweise ein vertikaler Stahlträger beim Bypasseinlauf durch einen elektrisch nichtleitenden Holzträger ersetzt wurde. Außerdem wurde der Horizontalrechen im Bereich des Bypasseinlaufs isoliert (auf 30 cm), um die Spannung im Bypass zu reduzieren. Es hat sich auch gezeigt, dass die Fische bei geringeren Spannungen (38 V) kontrollierter auf das elektrische Feld reagierten als bei höheren Spannungen (50 V, 80 V).

4.2 Hauptversuche HBR

Abbildung 9 zeigt die Resultate der Hauptversuche mit der Standardkonfiguration HBR mit Aalen und Schneidern. Als Referenz sind jeweils die Ergebnisse ohne Elektrifizierung für Aale (Abbildung 9a) und Schneider (Abbildung 9d) aufgeführt, die im Rahmen des Projekts FIThydro erzielt wurden. Die weissen Zahlen geben jeweils die absolute Anzahl an Fischen an, welche die jeweilige Reaktion gezeigt haben. Auf der x-Achse sind die prozentualen Effizienzen angegeben. Die Fischleiteffizienz (FGE) kann dabei

am Ende des grünen Balkens abgelesen werden (Beispiel (c) HBR, Aal, $s_b = 51$ mm, mit Elektrifizierung FGE = 63%) und die Fischschutzeffizienz am Ende des gelben Balkens (Beispiel (c) HBR, Aal, $s_b = 51$ mm, mit Elektrifizierung FPE = 67%).

- (a) HBR, Aal, $s_b = 20$ mm, ohne Elektrifizierung
- (b) HBR, Aal, $s_b = 20$ mm, mit Elektrifizierung
- (c) HBR, Aal, $s_b = 51$ mm, mit Elektrifizierung
- (d) HBR, Schneider, $s_b = 20$ mm, ohne Elektrifizierung
- (e) HBR, Schneider, $s_b = 20$ mm, mit Elektrifizierung
- (f) HBR, Schneider, $s_b = 51$ mm, mit Elektrifizierung

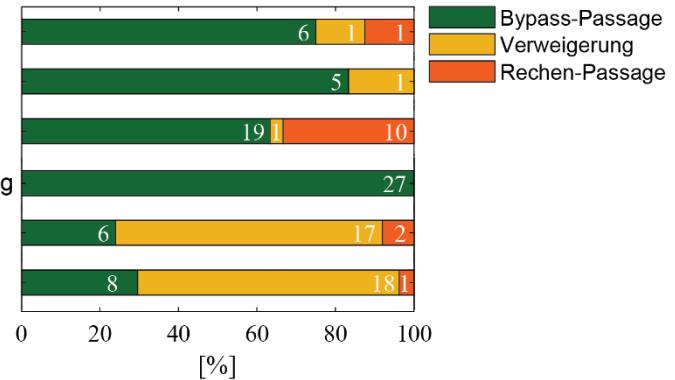


Abbildung 9: Resultate des HBRs mit und ohne Elektrifizierung für Aale und Schneider mit verschiedenen Stababständen

Trotz der geringen Anzahl an Versuchen ohne Elektrifizierung zeigt Abbildung 9a, dass der Grossteil der Aale mit dem HBR mit $s_b = 20$ mm gut geschützt wurde. Lediglich ein Aal mit einer totalen Körperlänge von $TL \approx 45$ cm hat den Rechen passiert. Durch die Elektrifizierung des HBRs mit $s_b = 20$ mm wurde ein vergleichbares Ergebnis erreicht (Abbildung 9b), woraus geschlossen werden kann, dass das elektrische Feld die Leiteffizienz von Aalen nicht reduziert hat. Durch die Vergrösserung des Stababstands auf $s_b = 51$ mm reduzierte sich die Fischleiteffizienz deutlich auf FGE $\approx 60\%$ (Abbildung 9c). Für diese Konfiguration war aufgrund der vielen Rechen-Passagen auch die Fischschutzeffizienz gering (FPE $\approx 65\%$).

Ohne Elektrifizierung wurden alle Schneider sehr gut vom HBR geschützt und der Bypass wurde gut angenommen (FGE = FPE = 100%, Abbildung 9d). Durch die Elektrifizierung des HBRs mit $s_b = 20$ mm, reduzierte sich die FGE auf $\approx 25\%$ und der Grossteil der Schneider verweigerte die Bypass-Passage (Abbildung 9e). Zudem wurden zwei Rechen-Passagen beobachtet. Die Vergrösserung des Stababstandes auf $s_b = 51$ mm führte zu einem sehr ähnlichen Ergebnis (Abbildung 9f).

4.3 Hauptversuche CBR

Abbildung 11 zeigt die Resultate der Hauptversuche mit dem CBR ohne Elektrifizierung (a) und mit den beiden Konfigurationen CBR1 und CBR3 (vgl. Tabelle 2). Die Darstellung ist gleich zu lesen, wie in Kapitel 4.2 beschrieben.

Die Fischleit- und Schutzeffizienz des CBR mit $s_b = 50$ mm ist für Aale sehr tief (Abbildung 10a). Aale reagierten nicht auf die vom CBR induzierten Strömungsstrukturen vor dem Rechen, sondern schwammen meistens negativ rheotaktisch auf den Rechen zu und zwischen den Stäben hindurch. Mit der Elektrifizierung konnte die Fischleiteffizienz deutlich gesteigert werden von FGE = 27% auf FGE = 75% mit CBR1 bzw. FGE = 78% mit CBR3. Die Schutzeffizienz stieg dabei von FPE = 27% ohne Elektrifizierung auf FPE = 100% mit Elektrifizierung (Abbildung 10b,c).

Schneider hingegen reagierten sehr sensitiv auf die hydraulischen Strömungsstrukturen vor dem Rechen und liessen sich ohne Elektrifizierung gut zum Bypass leiten. Da keine Rechen-Passage beobachtet wurde, lag die Schutzeffizienz bei FPE = 100%. Die Leiteffizient lag mit FGE = 85% ebenfalls sehr hoch, d.h. nur sehr wenige Schneider verweigerten das Rechen-Bypass-System ohne Elektrifizierung (Abbildung 10a). Schneider reagierten allerdings auch sehr sensibel auf das elektrische Feld des elektrifizierten CBR, was mehr Verweigerungen zur Folge hatte (Abbildung 10b,c). Die Fischleiteffizienz sank

daher von FGE = 85% ohne Elektrifizierung auf FGE = 45% mit CBR 1 bzw. FGE = 60% mit CBR3. Die Fischschutzeffizienz blieb auch mit der Elektrifizierung bei FPE = 100%, d.h. es wurden keine Rechen-Passagen beobachtet.

Für den CBR mit $s_b = 110$ mm konnten keine Pulsparameter gefunden werden, die nicht zu unkontrollierten Reaktionen, vermehrten Rechen-Passagen und/oder Fischverletzungen führten. Da ein Versuch bei einer Fischverletzung sofort abgebrochen wurde, wurden für diese Konfigurationen teilweise nur einzelne Versuche durchgeführt, deren Ergebnisse hier wegen zu geringer Aussagekraft nicht weiter dargestellt werden.

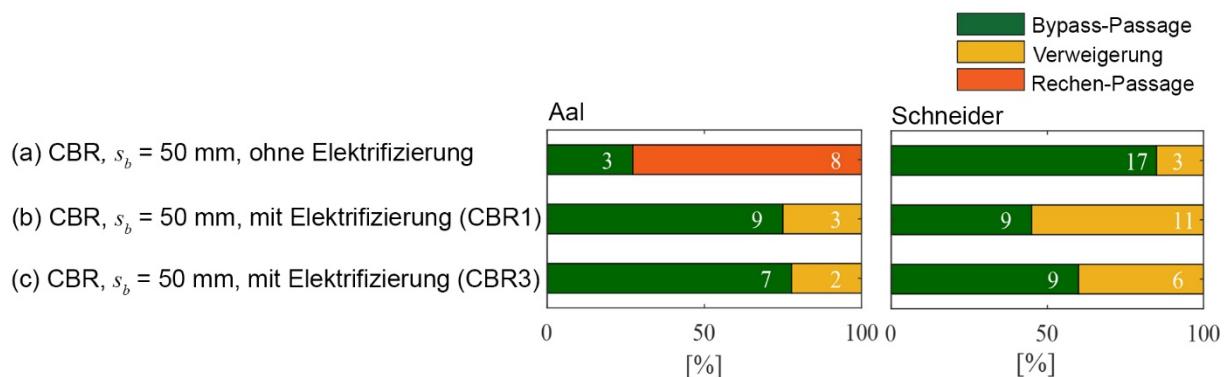


Abbildung 10: Resultate des CBR mit $s_b = 50$ mm für Aale und Schneider (a) ohne Elektrifizierung und (b), (c) mit Elektrifizierung und verschiedenen Pulsparametern gemäss Tab. 2

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Vorversuche

Die Vorversuche haben gezeigt, dass die Fische die elektrifizierten Fischleitrechen meiden. Es wurden nur einzelne Rechen-Passagen beobachtet, was das Potenzial der elektrifizierten Fischleitrechen bestätigte. Dass der Bypass von den Fischen grösstenteils nicht gut angenommen wurde, zeigt, wie wichtig ein elektrifizierungsfreier Bypass ist. Dies kann durch Austauschen von Metallteilen mit Holzteilen oder die Isolation mit PVC- oder Holzplatten optimiert werden. Weil die Fische während der Vorversuche bei geringeren Spannungen kontrollierter auf das elektrische Feld reagierten und weil einzelne Forellen nach Rechenkontakt bei allen Spannungen (38 – 80 V) schwarze Flecken aufwiesen, wurden die Hauptversuche primär mit 38 Volt durchgeführt. Tiefere Spannungen konnten bei dem geliehenen Steuergerät nicht erzeugt werden.

5.2 Hauptversuche HBR

Das Fischverhalten der Aale am elektrifizierten HBR war stark von ihrer Orientierung abhängig. Aale, welche sich dem Rechen rechtwinklig annäherten (Abbildung 11a), wurden effizient an der Rechen-Passage gehindert. Im Gegensatz dazu schwammen die Aale bei den meisten Rechen-Passagen parallel zum Rechen (Abbildung 11b). Nach den Fischversuchen wurde das elektrische Feld für jede mit Fischen getestete Konfiguration vermessen. Die detaillierte Auswertung dieser Messungen ist Gegenstand des Nachfolgeprojekts. Erste Auswertungen zeigen aber, dass die Equipotenziallinien (Linien gleicher Spannung) durch die Anordnung des HBRs als Anode und des Edelstahlgitters als Kathode annähernd parallel zum Rechen verlaufen. Wenn sich ein Fisch rechtwinklig an den Rechen annähert (Abbildung 11a), greift er ein grosses elektrisches Potenzial zwischen seinem Kopf und Schwanz ab

und reagiert mit einer Fluchtreaktion. Im Gegensatz dazu ist der Spannungsunterschied bei einer parallelen Rechenannäherung gering (Abbildung 11b), wodurch die vielen Rechen-Passagen erklärt werden können.

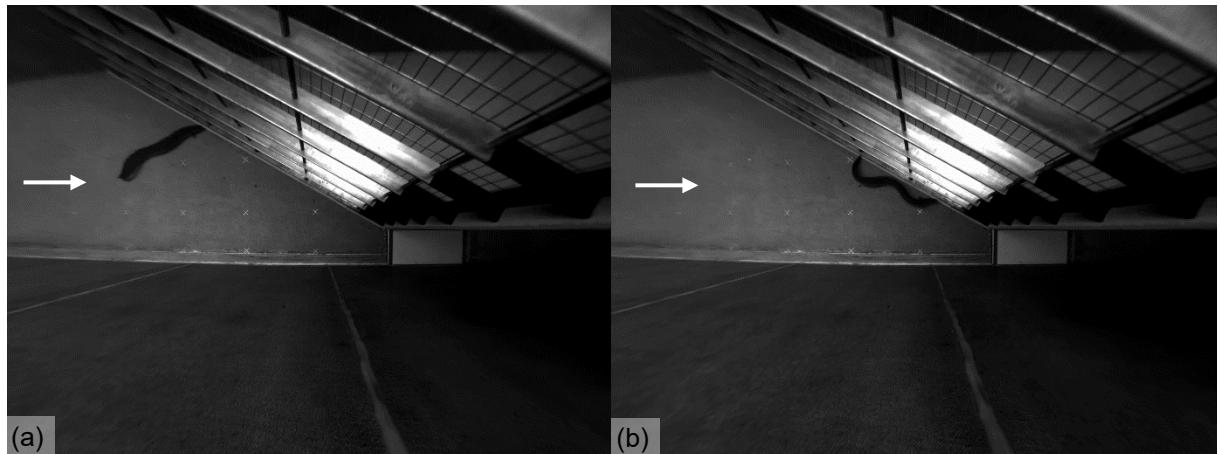


Abbildung 11: (a) Ca. rechtwinklige und (b) parallele Annäherung eines Aals an den HBR mit einem lichten Stababstand von $s_b = 100$ mm

Da davon auszugehen ist, dass ein HBR ohne Elektrifizierung mit $s_b = 51$ mm eine geringe Schutzwirkung für Schneider hat, kann die hohe Schutzeffizienz mit $s_b = 51$ mm auf das elektrische Feld zurückgeführt werden. Dass der Bypass von den Schneidern so schlecht angenommen wurde, kann dadurch erklärt werden, dass der Bypass trotz der Optimierung des Versuchsaufbaus nicht spannungsfrei war. Nur ein Schneider passierte den elektrifizierten HBR mit $s_b = 51$ mm (Abbildung 9f). Normalerweise näherten sich die Schneider dem Rechen rheotaktisch positiv ausgerichtet, d.h. mit der Schwanzflosse voraus, gegen die Strömung ausgerichtet. Dadurch konnten sich die Schneider langsam in Richtung des elektrischen Feldes tasten und beim Überschreiten eines kritischen Reizes jederzeit gegen die Fliessrichtung flüchten. Im Gegensatz dazu näherte sich der Schneider, welcher den Rechen passierte, dem Rechen mit einer negativen Rheotaxis, d.h. Kopf voraus, in Fliessrichtung gerichtet. Durch die aufgrund der rheotaktisch negativen Ausrichtung erhöhte Schwimmgeschwindigkeit blieb dem Fisch beim Wahrnehmen des elektrischen Feldes nur ein sehr geringer Reaktionsraum, wodurch die Fluchtreaktion in diesem Fall durch den Rechen erfolgte beziehungsweise der Fisch nicht rechtzeitig aus dem elektrischen Feld entkommen konnte.

5.3 Hauptversuche CBR

Die Schutz- und Leitwirkung des CBR mit $s_b = 50$ mm für Aale konnte durch die Elektrifizierung gesteigert werden, die Leitwirkung für Schneider nahm allerdings deutlich ab. Ein Grund dafür könnte sein, dass Schneider grundsätzlich viel sensibler auf elektrische Reize reagieren. Die Konfiguration e-CBR4 ($s_b = 50$ mm) hat auch bei den getesteten Aalen eine heftige, teilweise unkontrollierte Fluchtreaktion ausgelöst und sie mehr gescheucht als geleitet. Da gegenüber den Konfigurationen e-CBR1 und e-CBR3 nur die Pulsparameter verändert wurden, muss der höhere «duty cycle» von 0.93% ausschlaggebend sein für die heftigere Reaktion. Die Konfiguration e-CBR4 wurde schliesslich nach vier Versuchen abgebrochen, da bei einem Aal nach Rechenkontakt schwarze Flecken auf der Haut festzustellen waren (siehe Kapitel 5.4). Das Zentrum für Fisch- und Wildtiermedizin (FIWI) hat bei diesem Aal innere Blutungen festgestellt (Bericht im Anhang).

Für grössere Stababstände ($s_b = 110$ mm) konnten keine Pulsparameter gefunden werden, die nicht zu unkontrollierten Reaktionen, vermehrten Rechen-Passagen und/oder Fischverletzungen führten. Bei

diesem Stababstand sind die Strömungsstrukturen vor dem Rechen vermutlich zu gering, um eine Meidreaktion bei Schneidern auszulösen, und sie stellen auch für Aale ein noch geringeres Hindernis dar als der CBR mit kleinerem Stababstand. Das führt dazu, dass die Fische näher an den Rechen oder sogar in die Stabzwischenräume schwimmen. Wenn die Fische sich dem Rechen orthogonal zu den Stromlinien annähern, verspüren sie das elektrische Potential über ihre seitliche Breite (blauer Fisch in Abbildung 12). Der gefühlte Potentialunterschied ist gering und eine kontrollierte Reaktion ist möglich. Gelangt der Fisch aber zu weit zwischen die Stäbe und richtet sich ungünstig aus (parallel zu den Stromlinien) verspürt er sehr plötzlich den maximalen Potentialunterschied über die gesamte Körperlänge (roter Fisch in Abbildung 12). Der Stromgradient ist dann so hoch, dass eine kontrollierte Reaktion nicht mehr möglich ist, der Fisch flüchtet oder erfährt Galvanotaxis, d.h. der Strom löst eine Muskelreaktion aus, die den Fisch zur Anode leitet oder sogar kurzzeitig betäubt (Galvanonarkose, siehe Kapitel 5.4).

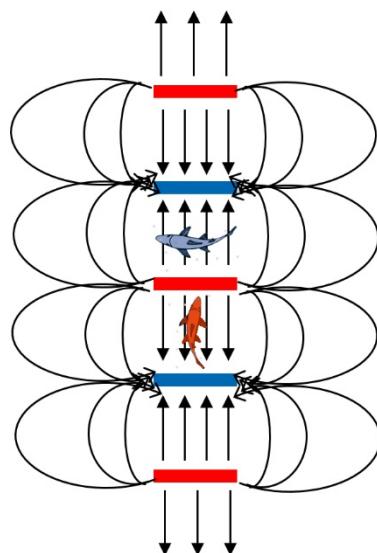


Abbildung 12: Vereinfachte schematische Darstellung (Draufsicht) des elektrischen Feldes an einer Reihe von Plattenkondensatoren. Das Feld am CBR baut sich wie bei einem Plattenkondensator zwischen den einzelnen Stäben aus und ist dort am stärksten

Ähnlich wie in Kapitel 5.2 für den HBR beschrieben, führt die gewählte Elektrifizierung des CBR dazu, dass die Ausrichtung des Fisches zum Rechen und damit zu den Stromlinien entscheidend ist für die Fischreaktion. Die Reaktion findet daher früher und kontrollierter statt, wenn der Fisch wie der Aal negativ rheotaktisch oder wie der Schneider positiv rheotaktisch orthogonal zur Rechenebene ausgerichtet ist. Vor allem Aale richten sich am Rechen aber parallel zur Rechenebene aus, sodass sie leichter in Berührung mit den Rechenstäben kommen.

5.4 Fischverletzungen

In keinem der in Kapitel 1.4 vorgestellten Referenzprojekten wurde auf Fischverletzungen eingegangen. Gemäss Tutzer *et al.* (2019) sind Spannungen im Niedervoltbereich für Lebewesen auf jeden Fall ungefährlich. Demgegenüber ist aus der Elektrofischerei bekannt, dass nicht die absoluten Spannungen, sondern die jeweiligen Spannungsgradienten für Fischreaktionen und schlussendlich auch Fischverletzungen entscheidend sind. Dabei ist gepulster Gleichstrom (pDC) schädlicher als Gleichstrom (DC). Als Grundregel soll der Spannungsgradient für gepulsten Gleichstrom beim Elektrofischen zwischen 0.1 und 1.0 V/cm liegen, wobei der genaue Wert von der Leitfähigkeit des Wassers und den Pulsparametern abhängt (Beaumont, 2016). Ab einem Spannungsgradienten von ca. 0.1 V/cm kann es zu einer durch

Muskelkontraktion erzwungenen Schwimmbewegung in Richtung der Anode kommen. Tetanie kann bereits ab 0.5 V/cm eintreten (Beaumont, 2016), wodurch das Schwimmverhalten des Fisches stark eingeschränkt wird oder der Fisch sogar kurzzeitig betäubt ist. Folglich kann es zu einer aktiven oder durch die Fliessgeschwindigkeit zu einer passiven Rechen-Passage kommen, während welcher die Fische einem noch höheren Spannungsgradienten zwischen der Anode und Kathode ausgesetzt werden. Weil sich die Spannung zwischen dem HBR und dem Edelstahlgitter näherungsweise linear abbaut, muss bei einer Spannung von 38 Volt und einer Distanz von 18 cm zwischen Anode und Kathode (Abbildung 7b, Kapitel 2.2), von einem Spannungsgradient von ≈ 2.0 V/cm ausgegangen werden. Beim CBR sind die Anode und Kathode nur über den Stababstand getrennt, was bei $s_b = 50$ mm zu einem Spannungsgradient von 7.6 V/cm und bei $s_b = 110$ mm von 3.5 V/cm führt.

Bei den Versuchen wurden sowohl beim CBR als auch beim HBR schwarze Verfärbungen der Haut beobachtet, v.a. dann, wenn die Fische Kontakt zu den Rechenstäben hatten (Abbildungen 13 und 14). Die Verfärbungen sind auch nach mehreren Tagen im Labor nicht verschwunden, was ein Indiz für innere Blutungen ist. Um festzustellen, ob es sich dabei nur um oberflächliche oder gravierende Verletzungen handelte, wurden zwei Schneider und ein Aal vom FIWI untersucht (siehe Berichte im Anhang). Abbildung 13 zeigt den in Kapitel 5.2 beschriebenen Schneider, welcher den elektrifizierten HBR mit $s_b = 51$ mm mit negativer Rheotaxis passierte. Nach der Rechen-Passage war das Schwimmverhalten dieses Schneiders eingeschränkt. Das FIWI hat schwerwiegende Verletzungen, u.a. ein Bruch des Spinalkanals und Blutungen im Spinalkanal, festgestellt. Abbildung 14 zeigt den in Kapitel 5.3 beschriebenen Aal, der sich parallel zur Rechenebene ausrichtete und die elektrifizierten Rechenstäbe berührte. Das FIWI stellte direkt unter den schwarzen Verfärbungen keine inneren Verletzungen fest. Allerdings wurden Blutungen im Rückenmark, an der Wirbelsäule und in der Bauchflosse diagnostiziert. Die Fische wurden vor jedem Versuch auf äussere Verletzungen untersucht. Es kann jedoch nicht beurteilt werden, ob diese inneren Verletzungen vom Stromschlag während des ethohydraulischen Versuchs stammten oder ob die Fische bereits bei der Ankunft im Labor innere Verletzungen hatten.

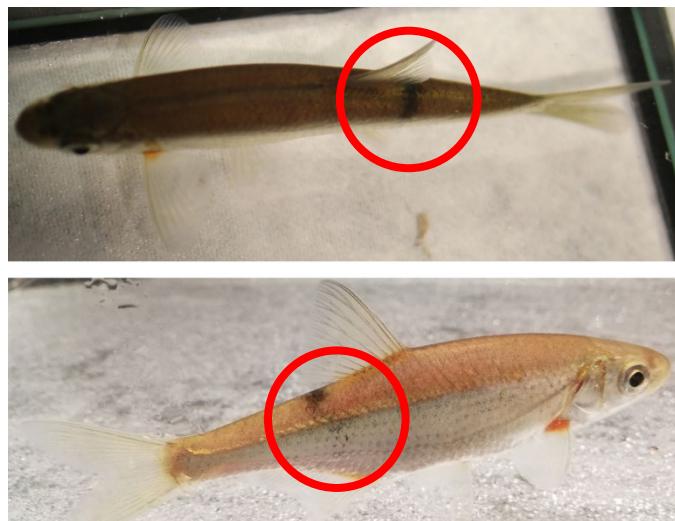


Abbildung 13: Äusserliche Verletzungen eines Schneiders nach der Rechen-Passage. Das FIWI diagnostizierte u.a. einen Bruch des Spinalkanals.

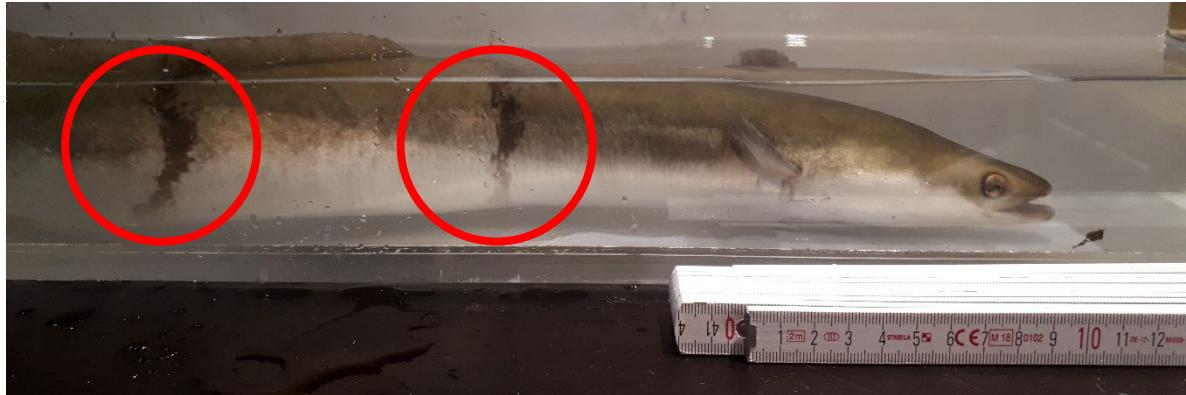


Abbildung 14: Äußerliche Verletzungen eines Aals nach Stabkontakt am CBR. Das FIWI diagnostizierte Blutungen im Rückenmark, an der Wirbelsäule und in der Bauchflosse, die aber nicht zwingend vom Rechenkontakt stammten.

6 Schlussfolgerungen und Fazit

Alle getesteten Fischarten (Aale, Schneider, Forellen) reagierten mit einer ausgeprägten Meidreaktion auf das elektrische Feld, was das grosse Potenzial der elektrifizierten Leitrechen als Fischschutzmaßnahme aufzeigt. Es wurde gezeigt, dass Fische mit elektrifizierten Fischleitrechen effizient am Einschwimmen in die Turbinen gehindert werden können.

Wir haben zwei Forschungsschwerpunkte formuliert:

F1: Durch die Elektrifizierung des Rechens (HBR oder CBR) kann der Stababstand erhöht werden, um die gleiche Schutzwirkung wie ohne Elektrifizierung zu erreichen.

F1 konnte für den CBR nicht und für den HBR nur mit Schneidern bestätigt werden. Beim CBR führten grössere Stababstände zu einer verminderten Strömungssignatur vor dem Rechen und einer geringeren Barrierefunktion, sodass Schneider näher an den Rechen und Aale schneller in die Stabzwischenräume hineinschwimmen. Dies führt zu vermehrten Rechen-Passagen und daher auch zu einem höheren Verletzungsrisiko für die Fische. Auch beim HBR führte ein grösserer Stababstand zu mehr Rechen-Passagen bei Aalen. Die Schutzwirkung des HBR für Schneider war hingegen auch bei grösseren Stababständen ($s_b = 50$ mm) hoch. Die Leiteffizienz, d.h. die Anzahl Bypass-Passagen war jedoch deutlich geringer als beim HBR ohne Elektrifizierung.

F2: Bei gleichem Stababstand wird die Schutzwirkung des Rechens (HBR oder CBR) durch die Elektrifizierung erhöht

F2 konnte insbesondere für den CBR mit Aalen bestätigt werden. Die Schutz- sowie die Leitwirkung der Aale wurde deutlich verbessert durch die Elektrifizierung. Die Schutzwirkung des CBR für Schneider lag mit und ohne Elektrifizierung bei 100%. Die Leitwirkung wurde mit der Elektrifizierung allerdings verschlechtert. Die Schutzwirkung des HBR ist für Aale und für Schneider mit und ohne Elektrifizierung ähnlich hoch. Die Leitwirkung des HBR für Schneider nimmt mit der Elektrifizierung jedoch deutlich ab.

Die Herausforderung besteht jedoch darin, das elektrische Feld so aufzubauen, dass die Fische nicht nur vor einer Rechenpassage geschützt, sondern auch erfolgreich in den Bypass geleitet werden. Damit der Bypass von den Fischen angenommen wird, sollte dieser weitgehend spannungsfrei sein. Das Fischverhalten hängt sehr stark von den Pulsparametern ab. Diesbezüglich ist in der Literatur sehr wenig Wissen vorhanden. Es wurde jedoch sowohl für den Horizontal- als auch für den Vertikalrechen neben ungünstigen Einstellungen auch jeweils mindestens eine vielversprechende Einstellung für beide



in den Hauptversuchen getesteten Fischarten (Aal und Schneider) gefunden. Wenn der Aufbau des elektrischen Feldes nicht optimal ist, können schon geringe Spannungen (38 V) zu schwerwiegenden Fischverletzungen führen. Es gibt verschiedene Arten, das elektrische Feld aufzubauen. Der unterschiedliche Aufbau des elektrischen Feldes hat einen grossen Einfluss auf die Ausbreitung des elektrischen Feldes und somit auch das Fischverhalten. Eine detaillierte Kenntnis des elektrischen Feldes ist unumgänglich, um Fischverletzungen ausschliessen und das beobachtete Fischverhalten erklären zu können.

Da der CBR eine hohe Schutz- und Leiteffizienz aufweist für Fischarten, die sensibel auf Strömungssignaturen reagieren, stellt die Elektrifizierung vor allem für Aale einen vielversprechenden, zusätzlichen Schutz dar. Da v.a. Blankaale sehr konzentriert abwandern, könnte eine mögliche Lösung darin bestehen, den Rechen nur während ein paar Tagen oder Wochen im Jahr zu elektrifizieren. Dies hätte auch den Vorteil, dass der Materialverschleiss des Rechens durch Oxidation gering bleibt.

7 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Aufgrund der vielversprechenden Resultate des vorliegenden Projekts ist vorgesehen, elektrische Fischleitsysteme an der VAW im Rahmen eines Nachfolgeprojektes weiter zu untersuchen (BFE Finanzierungsantrag, Ethohydraulische Modellversuche an elektrifizierten Fischleitrechen (Teil II)).

Im Rahmen dieses Folgeprojektes sollen insbesondere folgende Fragestellungen im Detail untersucht werden:

- Systematische Vermessung des elektrischen Feldes, um Verständnis der Fischreaktionen zu erhöhen
- Entwicklung einer numerischen Simulation des elektrischen Feldes, welches sich um und zwischen den Rechenstäben aufbaut.
- Entwicklung von elektrischen (Spannung, Pulsmuster) und geometrischen Parametern (Anordnung der Elektroden), welche eine effiziente Leit- und Scheuchwirkung ohne Verletzungsgefahr gewährleisten können. Insbesondere liegt der Fokus auf elektrischen Feldern, welche unabhängig von der Orientierung der Fische wirken und eine geringe Verletzungswahrscheinlichkeit aufweisen.
- Ethohydraulische Versuche der auf der Basis der numerischen Simulation und den bisherigen Ergebnissen entwickelten Konfigurationen.
- Ethohydraulische Versuche mit Spannungsgradienten von weniger als 1V/cm testen, um eine Tetanie oder Verletzungen durch Stromeinwirkung der Versuchsfische zu verhindern. Dies ist insbesondere auch von Relevanz für kleine Fische (Larven, Jungfische), die in Fliessgewässern durch Verdriftung passiv abwandern. Damit kann sichergestellt werden, dass bei einer Rechenpassage der Jungfische keine Verletzungen durch Stromeinwirkung stattfindet.
- Detailliertes Monitoring zur Quantifizierung von Fischverletzungen.
- Detaillierte Analyse des Fischverhaltens im elektrischen Feld mittels einer optimierten *fish-tracking* Software.
- Abwägung von Sicherheitsfragen für Mensch und Tier beim Betrieb eines elektrifizierten Leitrechens an einem Prototypstandort.



- Ausarbeitung von Empfehlungen zur Installation und Nachrüstung von elektrischen Leitanlagen an bestehenden und neuen Wasserkraftanlagen.
- Veröffentlichungen (vorzugsweise in referenzierten Fachzeitschriften).

Bei einer Weiterführung der Versuche an der VAW können die Fischhälterungsinfrastruktur sowie der Versuchskanal weiter genutzt werden. Zudem kann das erworbene Wissen optimal weiterentwickelt werden.

Weiterführende Studien zu operativen Fragestellungen wie Sedimenttransport und Schwemmmholz für eine optimierte Rechenkonfiguration sind erforderlich. Um eine verzögerungsfreie Akzeptanz des By-passes zu erreichen, sind weitere grundlegende Laboruntersuchungen notwendig, in denen ausgewählte Parameter systematisch und einzeln variiert werden können. Die Studienlage insbesondere zum Verhalten von potamodromen Arten hinsichtlich Geschwindigkeitsgradienten und elektrischen Gradien-ten ist weiterhin sehr dünn.

Aufgrund der europäischen Wasserrahmenrichtlinie wird das Thema «Fischleitsysteme an Wasserkraftanlagen» weiterhin von Bedeutung sein, um die Durchgängigkeit an Stauanlagen gewährleisten zu können. Die Minimierung der hydraulischen Verluste und kosteneffiziente Lösungen sind dabei von grosser Wichtigkeit, um die Wirtschaftlichkeit und Effizienz der Wasserkraftnutzung nicht zu verschlechtern.

8 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Projektleitung dieses Teilprojekts wurde durch die VAW, ETH Zürich, ausgeführt. Bei den ethohydraulischen Versuchen und bei der Gesuchstellung der Tierversuchsbewilligung wurde die VAW durch Oliver Selz von der EAWAG und durch Dr. Armin Peter von Peter Fish Consulting (FCO) unterstützt. Im Rahmen des Projekts wurde ein enger Austausch zu elektrifizierten Fischleitrechen mit dem Fachbereich Wasserbau der Universität Innsbruck gepflegt.

9 Publikationen

Roth, A., Meister, J., Beck, C., Selz, O., Albayrak, I., Boes, R. (2020). Fish behavior at low-voltage electrified fish guidance racks. Fish Passage Conference, Lisbon, 2020 (accepted for oral presentation).

10 Literaturverzeichnis

Albayrak, I.; Maager, F.; Boes, R.M. (2019). An experimental investigation on fish guidance structures with horizontal bars. *Journal of Hydraulic Research*, 52(3): 1–15. <http://doi.org/10.1080/00221686.2019.1625818>.

Albayrak, I., Boes, R.M., Kriewitz, C.R., Peter, A., Tullis, B.P. (2020). Fish guidance structures: new head loss formula, hydraulics and fish guidance efficiencies. *Journal of Ecohydraulics*, <https://doi.org/10.1080/24705357.2019.1677181>.



- Beaumont, W.R.C. (2016). Electricity in fish research and management – Theory and practice. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, UK.
- Beck, C., Albayrak, I., Meister, J., & Boes, R. M. (2019). Hydraulic performance of fish guidance structures with curved bars – Part 1: Head loss assessment. *Journal of Hydraulic Research*, <https://doi.org/10.1080/00221686.2019.1671515>.
- Berger, C. (2018). Rechenverluste und Auslegung von (elektrifizierten) Schrägrechen anhand ethohydraulischer). *PhD Thesis*, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt, Germany.
- Boes, R.M., Albayrak, I. (2017). Fish guidance structures: new head loss formula and fish guidance efficiencies. *Proceedings of the 37th IAHR World Congress*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2495-2501.
- Brinkmeier, B., Boettcher, H., Tutzer, R., Aufleger, M. (2017). Fish protection using electric flexible fish fences. *Proc. Hydro 2017 Conference*, Sevilla, Spain.
- Ebel, G. (2013). Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen - Handbuch Rechen- und By-passsysteme. *Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie*, Dr. Ebel (Ed.), Halle (Saale), Deutschland.
- Gruber, R. (2019). Traun-Kraftwerk Danzermühl nimmt planmäßig den Betrieb auf. *zekHydro*: 17(3): 22-27.
- Meister, J.; Fuchs, H.; Beck, C.; Albayrak, I.; Boes, R.M. (2020). Head Losses of Horizontal Bar Racks as Fish Guidance Structures. *Water*, 12(2): 475. <http://dx.doi.org/10.3390/w12020475>.
- Parasiewicz, P.; Wisniewolski, W.; Mokwa, M.; Ziola, S.; Prus, P.; Godlewska, M. (2016). A low-voltage electric fish guidance system - NEPTUN. *Fisheries Research*, 181: 25–33.
- Rost, U., Weibel, U., Wüst, S., Haupt, O. (2014). Versuche zum Scheuchen und Leiten von Fischen mit elektrischem Strom. Biologische Durchgängigkeit von Fließgewässern - Ausgewählte Beiträge aus der Fachzeitschrift *Wasserwirtschaft*: 7-8, 492–499.
- Roth, A., Meister, J., Beck, C., Selz, O., Albayrak, I., Boes, R. (2020). Fish behavior at low-voltage electrified fish guidance racks. Fish Passage Conference, Lisbon, 2020 (accepted for oral presentation).
- Tutzer, R.; Brinkmeier, B.; Böttcher, H.; Aufleger, M. (2019). Der Elektro-Seilrechen als integrales Fischschutzkonzept. *Wasserwirtschaft*: 109(2-3): 36-40.

11 Anhang

Berichte des Zentrums für Fisch- und Wildtiermedizin (FIWI)

Roth, A., Meister, J., Beck, C., Selz, O., Albayrak, I., Boes, R. (2020). Fish behavior at low-voltage electrified fish guidance racks. Fish Passage 2020, Lisbon, Portugal (accepted for oral presentation).