



Schlussbericht vom 19.09.2025

EFIGUS, Ethohydraulische Modellversuche an elektrifizierten Fischleitrechen (Teil II)

EFIGUS, Etho-hydraulic model study on electri- fied fish guidance structures (Part II)





ETH zürich



Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie

Datum: 19.09.2025

Ort: Zürich

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

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

Autor/in:

Anita Moldenhauer-Roth, ETH Zürich, moldenhauer@vaw.baug.ethz.ch
Dr. Ismail Albayrak, ETH Zürich, albayrak@vaw.baug.ethz.ch
Dr. Oliver Selz, oliver.selz@icloud.com (vormals EAWAG)
Prof. Dr. 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/502035-01

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



Zusammenfassung

Die ökologische Nachhaltigkeit der Wasserkraftnutzung wird zunehmend kritisch hinterfragt, insbesondere aufgrund ihrer nachteiligen Auswirkungen auf aquatische Ökosysteme. Zur Verbesserung der Längsvernetzung untersucht die vorliegende Arbeit elektrifizierte Fischleit- und Einlaufrechen als Massnahme zu Verbesserung des Fischschutzes an Wasserkraftanlagen. Ziel ist es, die Schutzwirkung für verschiedene Fischarten zu maximieren und gleichzeitig hydraulische Verluste sowie betriebliche Einschränkungen zu minimieren. Es wurden drei Rechentypen analysiert: 1) die Elektrifizierung bestehender frontal angeströmter vertikaler Einlaufrechen mit grossem Stababstand ($s_b = 90$ mm) als potentielle Nachrüstlösung für Grossanlagen, 2) Elektrifizierung von schräg in der Strömung angeordneten Leitrechen mit gebogenen Rechenstäben ($s_b = 50$ mm) mit angrenzendem Bypass-System (*curved bar rack*, CBR-BS/f-CBR-BS) sowie 3) elektrifizierte, schräg in der Strömung angeordnete Horizontalrechen ($s_b = 50$ mm) mit angrenzendem Bypass-System (HBR-BS). Die Wirksamkeit elektrifizierter Rechen hängt von der Rechengeometrie, der Intensität des elektrischen Feldes, der Leitfähigkeit des Wassers, der Fischart sowie von Parametern des gepulsten Gleichstroms wie Pulslänge und Frequenz ab. Zur Bestimmung geeigneter Gleichstrom-Pulsparameter wurden Verhaltensversuche mit Bachforellen (*Salmo trutta*), Alet (*Squalius cephalus*), Barben (*Barbus barbus*) und Europäischen Aalen (*Anguilla anguilla*) in einem homogenen elektrischen Feld durchgeführt. Auf der Grundlage dieser Versuche wurde ein Pulsmuster mit einer Pulslänge von 2 ms und einer Frequenz von 10 Hz bei den nachfolgenden Lebendfischversuchen mit elektrifizierten Rechen verwendet. Es wurden vier Elektrodenkonfigurationen evaluiert: (i) Verwendung des Rechens als Elektrode mit einer zusätzlichen Elektrodenreihe stromabwärts, (ii) vertikale Stabelektroden, die an der Vorderseite der Rechenstäbe angebracht sind oder unabhängig davon verwendet werden, (iii) alternierende Verwendung der Rechenstäbe als Anode und Kathode, und (iv) Verwendung des Rechens als Elektrode kombiniert mit einer Elektrode, die entlang des Gerinnebodens und der Wasseroberfläche angebracht ist. Die Experimente wurden mit wild gefangenen Bachforellen, Alet und Aalen bei Anströmgeschwindigkeiten von 0.15, 0.3 und 0.6 m/s durchgeführt. Es wurden inkrementell erhöhte elektrische Spannungen getestet, um minimal notwendige Feldstärken zu bestimmen, bei welchen eine Rechenpassage zuverlässig verhindert wird. Damit soll das Verletzungsrisiko für Fische minimiert werden. Die Ergebnisse zeigen artspezifische Unterschiede im Vermeidungsverhalten: Während Alet und Aal eine hohe Sensitivität gegenüber elektrischen Feldern aufwiesen, war die Schutzwirkung für Bachforellen geringer. Für einen elektrifizierten Einlaufrechen mit $s_b = 90$ mm wurde die höchste Fischschutzwirkung (FPE) mit einer stromabwärts des Rechens platzierten Elektrodenreihe erzielt, welche bei Aalen 76-92% sowie bei Alet 78-95% in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit betrug. Ohne Elektrifizierung hatte dieser Rechen keinen Fischschutzeffekt. Für Bachforellen hingegen konnte für diesen Rechen keine zufriedenstellende Schutzwirkung erzielt werden. Im Gegensatz dazu wurden für den nicht-elektrifizierten f-CBR-BS/ CBR-BS beträchtliche FPE von 92% für Alet und 63-88% für Aale in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit beobachtet. Die Schutzwirkung des f-CHR für Bachforellen war ohne Strom gering (FPE = 43%). Durch die Elektrifizierung mit einer Elektrode unterstrom konnten diese FPE-Werte auf bis zu 100% für Aal und 68% für Bachforellen verbessert werden. Aufgrund der hohen Schutzwirkung ohne Strom wurde der Rechen für Alet nicht elektrifiziert getestet. Versuche mit elektrifizierten HBR-BS wurden mit alternierend als Anode und Kathode elektrifizierten Rechenstäben durchgeführt. Obwohl hohe FPE beobachtet wurden, hat sich diese Art der Elektrifizierung als sehr sensitiv auf kleine Spannungsänderungen erwiesen, wodurch die Rechenpassage einer Bachforelle zu tödlichen Verletzungen führte. Diese Art der Elektrifizierung wird daher für die Praxis nicht empfohlen. Die Ergebnisse unterstreichen das Potenzial elektrifizierter Rechensysteme als Nachrüstlösung bzw. Fischschutzlösung für bestehende Wasserkraftwerke und als Beitrag zur ökologischen Sanierung. Der Bedarf an weiterführender Forschung sowie Vor- und Nachteile unterschiedlicher Elektrifizierungen wird diskutiert. Insbesondere hinsichtlich artspezifischer Reaktionen auf räumlich begrenzte elektrische Felder, der Optimierung von Pulsmustern sowie der Evaluierung des potenziellen Verletzungsrisikos sind weitere Untersuchungen notwendig.



Résumé

La durabilité écologique de l'énergie hydraulique est de plus en plus remise en question, notamment en raison de son impact négatif sur les écosystèmes aquatiques. Pour améliorer la connectivité longitudinale, le présent travail étudie les grilles d'entrée et grilles de guidage électrifiées comme une mesure pour améliorer la protection des poissons migratoires dans les centrales hydroélectriques. L'objectif est de maximiser l'effet protecteur pour différentes espèces de poissons tout en minimisant les pertes hydrauliques et les restrictions d'exploitation. Trois types de grilles ont été analysés: 1) l'électrification de grilles d'entrée verticales existantes avec un grand espacement entre les barreaux ($s_b = 90$ mm), 2) l'électrification de grilles de guidage à barreaux courbes ($s_b = 50$ mm) avec un système de dérivation (*bypass*) adjacent (*curved bar rack*, f-CBR-BS/CBR-BS) et 3) des grilles horizontales électrifiées ($s_b = 50$ mm) avec un système de dérivation adjacent (HBR-BS). L'efficacité des grilles électrifiées dépend de la géométrie de la grille, de l'intensité du champ électrique, de la conductivité de l'eau, de l'espèce de poisson ainsi que des paramètres du courant continu pulsé tels que la longueur et la fréquence de l'impulsion. Afin de déterminer les paramètres d'impulsion de courant continu appropriés, des tests de comportement ont été réalisés sur des truites de rivière (*Salmo trutta*), des chevesnes (*Squalius cephalus*), des barbeaux (*Barbus barbus*) et des anguilles européennes (*Anguilla anguilla*) dans un champ électrique homogène. Sur la base de ces essais, un modèle d'impulsion d'une longueur de 2 ms et d'une fréquence de 10 Hz a été défini et utilisé pour les essais ultérieurs sur les poissons vivants avec des grilles électrifiées. Quatre configurations d'électrodes ont été évaluées : (i) l'utilisation de la grille comme électrode avec une rangée d'électrodes supplémentaires en aval, (ii) des électrodes verticales en forme de tige fixées à l'avant des barres de la grille ou utilisées indépendamment, (iii) l'utilisation alternée des barres de la grille comme anode et cathode, et (iv) l'utilisation de la grille comme électrode combinée avec une électrode fixée le long du fond du canal et de la surface de l'eau. Les expériences ont été menées avec des truites de rivière, des chevesnes et des anguilles européennes capturés dans la nature, à des vitesses d'approche de 0,15, 0,3 et 0,6 m/s. Des tensions électriques augmentées d'une manière incrémentielle ont été testées afin de déterminer les intensités de champ minimales nécessaires pour empêcher de manière fiable le passage de la grille. Le risque de blessure doit ainsi être minimisé. Les résultats montrent des différences spécifiques aux espèces dans le comportement d'évitement: Alors que les chevesnes et l'anguille présentaient une sensibilité élevée aux champs électriques, l'effet protecteur était moindre pour la truite. Pour une grille d'entrée électrifiée avec $s_b = 90$ mm, l'effet de protection des poissons (FPE) le plus élevé a été obtenu avec une rangée d'électrodes placée en aval du dégrilleur et a atteint 76-92% pour les anguilles et 78-95% pour les chevesnes en fonction de la vitesse d'écoulement. Sans électrification, cette grille n'a aucun effet de protection des poissons. Pour les truites, aucun effet protecteur satisfaisant n'a pu être obtenu pour cette grille. En revanche, des FPE considérables de 92% pour la chevesne, de 43% pour la truite de rivière et de 63-88% pour l'anguille ont été observés pour le f-CBR-BS et CBR-BS non électrifié en fonction de la vitesse d'écoulement. L'électrification avec une électrode en aval a permis d'améliorer ces valeurs jusqu'à 100% de FPE pour l'anguille et 68% pour la truite de rivière. Des essais avec des HBR-BS électrifiés ont été réalisés avec des barres de la grille électrifiées alternativement comme anode et cathode. Bien que des FPE élevés aient été observés, ce type d'électrification s'est avéré très sensible aux petites variations de tension, ce qui a entraîné des blessures mortelles pour une truite lors du passage de la grille. Ce type d'électrification n'est donc pas recommandé. Les résultats soulignent le potentiel des systèmes de grilles électrifiées comme mesure prometteuse pour améliorer la protection des poissons dans les centrales hydroélectriques existantes et contribuer à la restauration écologique. En outre, les avantages et les inconvénients des grilles testées sont discutés. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour comprendre les réactions spécifiques des espèces aux champs électriques limités dans l'espace, optimiser les modèles d'impulsions et évaluer le risque potentiel de blessures associé à ces systèmes.



Summary

The ecological sustainability of hydropower is increasingly scrutinized, particularly due to its detrimental effects on aquatic ecosystems. To address these concerns, this study investigates electrified racks as a fish protection measure at run-of-river hydropower plants (HPP). The objectives of the study are twofold: to maximize the protection efficiency of the racks for a range of fish species and to minimize hydraulic losses and operational restrictions. Three types of bar racks were systematically and experimentally investigated: 1) electrification of existing vertical intake trash racks with frontal approach flow and a large bar spacing ($s_b = 90$ mm) as a potential retrofit solution for large HPP, 2) electrification of (foil shaped) angled curved bar racks ($s_b = 50$ mm) with an adjacent bypass system (f-CBR-BS) and 3) electrification of angled horizontal bar racks ($s_b = 50$ mm) with an adjacent bypass system (HBR-BS). The effectiveness of electrified bar racks depends on their geometry, electric field intensity, water conductivity, fish species and parameters of the pulsed direct current (pDC) such as pulse length and frequency. To determine optimal pDC parameters, a series of behavioural tests were performed with brown trout (*Salmo trutta*), chub (*Squalius cephalus*), barbel (*Barbus barbus*) and European eel (*Anguilla anguilla*) in a homogeneous electric field. Based on these findings, a pulse pattern with a pulse width of 2 ms and a frequency of 10 Hz was selected for subsequent live-fish tests with electrified bar rack in a large ethohydraulic flume. Four electrode configurations were evaluated: (i) use of the rack as an electrode with an additional row of electrodes downstream, (ii) vertical rod electrodes attached to the front of the rack bars or used independently, (iii) alternate use of the rack bars as anode and cathode, and (iv) use of the rack as an electrode combined with an electrode along the channel bed and water surface. The experiments were carried out with wild caught brown trout, chub and European eel at approach flow velocities of 0.15, 0.3 and 0.6 m/s. Incrementally increasing applied voltages were tested to determine the minimum field strengths required to reliably prevent rack passage while minimising the risk of fish injury. Our results revealed species-specific differences in avoidance behaviour. Chub and eel showed a high sensitivity to electric fields, whereas the protective effect for brown trout was lower. For an electrified bar rack with $s_b = 90$ mm, the highest fish protection efficiency (FPE) was achieved with a downstream row of electrodes, reaching 76-92% for eels and 78-95% for chub, depending on the approach flow velocity. In contrast, no satisfactory protective effect could be achieved for this bar spacing for brown trout. Without electrification, this frontally approached bar rack had no fish protection effect. The non-electrified f-CBR-BS and CBR-BS, however, showed considerable FPEs of 92% for chub and 63-88% for eel, varying with the approach flow velocity. Without electrification, FPE's for brown trout were low (43%). Electrification of f-CBR-BS with a downstream row of electrodes improved these values to up to 100% FPE for eel and 68% for brown trout. Tests with the electrified HBR-BS were carried out with rack bars electrified alternately as anode and cathode. Although high FPEs were observed, this type of electrification proved to be very sensitive to small changes in voltage, which resulted in the lethal injury of a brown trout during a rack passage. This type of electrification is therefore not recommended for prototype application. The findings underscore the potential of electrified rack systems as a promising measure to improve fish protection at existing HPP and contribute to ecological restoration. Furthermore, advantages and disadvantages of the tested racks are discussed. Further research is needed to understand species-specific reactions to spatially limited electric fields, to optimize the pulse patterns and to evaluate the potential risk of injury associated with these systems.



Take-home messages

- Electrified turbine inlet trash racks with large bar spacing $s_b > 50$ mm can provide fish protection efficiencies up to 100% at approach flow velocities up to 0.6 m/s in a large laboratory flume.
- The fish protection efficiencies depend on the electrode placement, applied voltage and pulse pattern as well as the fish species, the approach flow velocity and the hydraulic and visual characteristics of the bar rack.
- A pDC pulse pattern of $PW = 2$ ms and $f = 10$ Hz induces controlled avoidance reactions at electrified bar racks.
- Electrification of conventional trash racks with large bar spacing using the rack as a cathode with downstream anodes performed well for European eel and chub. However, it did not prevent rack passage of brown trout.
- Combination of visual and hydraulic cues of an f-CBR with an electric field provided high fish protection efficiencies also for brown trout.
- Electrifying horizontal bar racks with alternatingly using the bars as anode and cathode is not recommended due to the high sensibility of the electric field strength to small changes in the applied voltage and the resulting risk of fish injuries.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	4
Summary	5
Take-home messages	6
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung	10
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	10
1.2 Motivation des Projektes	10
1.3 Projektziele	11
2 Vorgehen und Methode	11
2.1 Fischfang und Hälterung	11
2.2 Elektrifizierung	12
2.3 Numerische Simulationen	13
2.4 Fischreaktion auf elektrische Reize – Aal	14
2.4.1 Versuchsaufbau	14
2.4.2 Versuchsablauf	14
2.5 Fischreaktionen auf elektrische Reize – Bachforelle, Barben und Alet	15
2.5.1 Versuchsaufbau	15
2.5.2 Versuchsablauf	16
2.6 Elektrifizierte Rechen	16
2.6.1 Versuchsaufbau	16
2.6.2 Versuchsablauf	18
2.6.3 Datenauswertung	18
3 Ergebnisse	19
3.1 Fischreaktionen auf elektrische Reize – Aal	19
3.1.1 Numerische Simulation	19
3.1.2 Versuchsprogramm	19
3.1.3 Fischverhalten	20
3.2 Fischreaktionen auf elektrische Reize – Forellen, Barben und Alet	23
3.2.1 Numerische Simulation	23
3.2.2 Versuchsprogramm	24
3.2.3 Ergebnisse	25



3.3	Horizontalrechen	28
3.3.1	Versuchsprogramm	28
3.3.2	Elektrifizierung	29
3.3.3	Fischschutzeffizienz	30
3.4	Leitrechen mit gebogenen Stäben (<i>Curved Bar Rack</i>): CBR und f-CBR	31
3.4.1	Versuchsprogramm	31
3.4.2	Elektrifizierung	32
3.4.3	Fischschutz- und -leitwirkung	33
3.5	Geschwemmselrechen	35
3.5.1	Versuchsprogramm	35
3.5.2	Elektrifizierung	35
3.5.3	Fischschutzwirkung	36
4	Schlussfolgerung und Fazit	38
4.1	Fischreaktion auf elektrische Reize: Alet, Barben, Bachforellen und Europäische Aale	38
4.2	Elektrifizierte Einlaufrechen mit einem Stababstand von 90 mm	38
4.3	Elektrifizierte Fischleitrechen mit gebogenen Stäben (f-CBR/CBR) mit einem Stababstand von 50 mm	39
4.4	Elektrifizierte Horizontalrechen (HBR) mit einem Stababstand von 50 mm	39
4.5	Empfehlungen für die Praxis	40
5	Ausblick	40
6	Nationale und internationale Zusammenarbeit	41
7	Kommunikation/ Vorträge	41
8	Publikationen	42
8.1	Konferenzen	42
8.2	Wissenschaftliche Fachzeitschriften	42
8.3	Dissertation	42
9	Literaturverzeichnis	42



Abkürzungsverzeichnis

BS	Bypass System
BFE	Bundesamt für Energie
CBR	<i>Curved-Bar Rack</i>
f-CBR	<i>foil shaped Curved Bar Rack</i> mit einer gegen Verklausung optimierten Stabform
FGE	<i>Fish Guidance Efficiency</i> (Fischleiteffizienz)
FPE	<i>Fish Protection Efficiency</i> (Fischschutzeffizienz)
gpDC	Gruppiertes gepulstes Gleichstrom
HBR	<i>Horizontal Bar Rack</i> (Fischleitreechen mit horizontalen Stäben)
pDC	regelmässiges gepulstes Gleichstrom
TR	<i>Trash Rack</i> (Geschwemmselreechen)
VAW	Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie



1 Einleitung

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, 2018a; Gruber, 2019). Um die Schutzwirkung dieses Rechentyps zu maximieren, empfehlen neuste Richtlinien den Stababstand von den bisher üblichen 20 mm auf 10–15 mm zu reduzieren (BAFU, 2022). 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. 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, gegenüber der Hauptströmung schräg angeordnete Fischleitrechen mit Stababständen von 25–150 mm empfohlen (*Modified angled bar rack* (MBR), *Curved Bar Rack* (CBR) oder *Louver*). In Laborversuchen konnten an der VAW für MBR und CBR mit 50 mm Stababständen hohe Fischleiteffizienzen für verschiedene Fischarten erzielt werden (Boes & Albayrak, 2017, Albayrak et al., 2020; Beck, 2020). Allerdings konnte für Forellen und Aale keine ausreichende Schutzwirkung beobachtet werden. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Schutzwirkung bei grossen Stababständen besteht in der Elektrifizierung des Rechens bzw. vorgelagerter Elektroden. Erste Versuche (Beck, 2020a; Meister, 2020; Meister et al., 2021a) zeigten hohe Schutzraten, aber auch diverse offene Fragen in Bezug auf eine reduzierte Leitwirkung zum Bypass und mögliche Fischverletzungen.

1.2 Motivation des Projektes

Die Schutz- und Leitwirkung für Aale wurde durch die Elektrifizierung des CBR unter alternierender Verschaltung der Rechenstäbe als Anoden und Kathoden mit $s_b = 50 \text{ mm}$ deutlich verbessert (Beck, 2020b). Die Schutzwirkung des CBR für Schneider lag mit und ohne Elektrifizierung bei 100%. Die Leitwirkung wurde mit dieser Elektrifizierung allerdings verschlechtert. Der HBR wurde mittels einer unterstrom angebrachten Baustahlmatte als Elektrode elektrifiziert (Meister et al., 2021b). Die Schutzwirkung des HBR mit $s_b = 20 \text{ mm}$ war für Aale und für Schneider mit und ohne Elektrifizierung ähnlich hoch. Die Leitwirkung des HBR für Schneider nahm mit der Elektrifizierung jedoch deutlich ab.

Der elektrifizierte CBR wurde auch mit grösseren Stababständen (110 mm, 40 V) getestet. Diese führen zu einer verminderten Strömungssignatur vor dem Rechen und einer geringeren Barrierewirkung, so dass Schneider näher an den Rechen und Aale schneller in die Stabzwischenräume hineinschwimmen. Dies führte zu vermehrten Rechen-Passagen und daher auch zu einem höheren Verletzungsrisiko für die Fische, da das elektrische Feld bei alternierend elektrifizierten Rechenstäben zwischen den Rechenstäben am stärksten ist. Auch beim elektrifizierten HBR führte ein grösserer Stababstand ($s_b = 51 \text{ mm}$) zu mehr Rechen-Passagen von Aalen als mit kleineren Stababständen. Die Schutzwirkung des e-HBR für Schneider war hingegen auch bei grösseren Stababständen ($s_b = 51 \text{ mm}$) hoch. Die Leiteffizienz, d.h. die Anzahl erfolgreicher Bypass-Passagen, war jedoch deutlich geringer als beim HBR ohne Elektrifizierung.

Die Resultate zeigen das grosse Potenzial von elektrifizierten Rechen, aber auch die Risiken und Herausforderungen, diese zielführend zu konstruieren. Die Herausforderung besteht unter anderem darin, das elektrische Feld so aufzubauen, dass die Fische erfolgreich bis in den Bypass geleitet werden, und im Bypass kein elektrisches Feld vorhanden ist, das sie an der weiteren Bypass-Passage hindert. Einige dieser offenen Fragen sollen im vorliegenden Projekt beantwortet werden.



1.3 Projektziele

Das Ziel des vorliegenden BFE-Forschungsprojekts ist die Erweiterung und Weiterentwicklung der im BFE-Projekt EthmMoSt – SI501758-01 und im FiThydro-Projekt zur „Optimierung der Fischleiteffizienz von Leitrechen-Bypass-Systemen“ gewonnenen Erkenntnisse. Es soll ein sowohl für Aale, Salmoniden als auch für potamodrome Arten effizientes Leit- und Schutzsystem entwickelt werden. Dieses basiert auf Versuchen zum Fischverhalten in elektrischen Feldern sowie Versuchen an elektrifizierten, hydraulisch optimierten horizontalen (HBR) und vertikalen Rechen mit gekrümmten Stäben (CBR). Zudem soll die Möglichkeit evaluiert werden, bestehende Einlaufrechen nachzurüsten und so den Fischschutz zu erhöhen an Standorten, wo gegenüber der Strömung schräg angeordnete Fischleitrechen aus ökonomischen Gründen oder Gegebenheiten vor Ort nicht anwendbar sind. Zu diesem Zweck werden verschiedene Versuchsanordnungen getestet:

Fischreaktion auf elektrische Reize:

- Untersuchung der optimalen elektrischen Parameter zur Auslösung einer kontrollierten Vermeidungsreaktion bei den Zielfischarten Alet, Barbe, Bachforelle und Europäischer Aal. Hierzu wurden Grundlagenversuche in einem homogenen elektrischen Feld ausgeführt.

Versuche an elektrifizierten HBR-BS, CBR-BS und Einlaufrechen:

- Elektrifizierte Einlaufrechen mit einem Stababstand von 90 mm – Numerische Simulation des elektrischen Feldes von Verschiedenen Elektrodenanordnungen und Lebendfischversuche zur Bestimmung der Fischschutzrate.
- Elektrifizierte Vertikalrechen mit gekrümmten Stäben (CBR) und einem Stababstand von 25 und 50 mm – Numerische Simulation des elektrischen Feldes von verschiedenen Elektrodenanordnungen und Lebendfischversuche zur Bestimmung der Fischschutzrate.
- Elektrifizierte Horizontalrechen (HBR) mit einem Stababstand von 25 und 50 mm – Numerische Simulation des elektrischen Feldes von Verschiedenen Elektrodenanordnungen und Lebendfischversuche zur Bestimmung der Fischschutzrate.

Dissemination der Ergebnisse:

- Veröffentlichungen in referenzierten Fachzeitschriften.
- *Knowledge and Technology Transfer* (KTT) in die wasserbauliche Praxis (Wasserkraftbetreiber, Ingenieurbüros, Behörden, NGOs) mittels Publikationen in anwendungsorientierten Fachzeitschriften, Vorträgen, Weiterbildungskurs und/oder Workshops.

2 Vorgehen und Methode

2.1 Fischfang und Hälterung

Die für die Versuche benötigten Fische wurden jeweils am Freitag oder Samstag der vorhergehenden Woche mittels Elektrofischfang in nahegelegenen Fließgewässern im Kanton Thurgau und Zürich und Schaffhausen gefangen und anschliessend in die Hälterungstanks der VAW gebracht. Anschliessend wurden sie langsam ($1^{\circ}\text{C}/\text{h}$) auf die Temperatur der Hälterungstanks akklimatisiert, welche zwischen 11.5°C und 15°C gehalten wurde.

Nach der Temperaturanpassung wurden die Fische mit MS-222 anästhesiert und mittels *VIE Elastomer Dye* an den Brustflossen markiert, um die Fische individuell zuordnen zu können und zu vermeiden, dass derselbe Fisch mehrfach mit derselben Konfiguration getestet wird (Abbildung 1). Die Fische konnten sich über das Wochenende an die Hälterungstanks und das Wasser im Labor akklimatisieren.



sieren. Versuche fanden von Montag bis Freitagvormittag statt, im Anschluss wurden die Fische wieder in ihren Ursprungsgewässern ausgesetzt. Während der Zeit im Labor wurden die Fische nicht gefüttert. Die Wasserqualität (Temperatur, pH, Sauerstoffgehalt, Leitfähigkeit) und das Fischverhalten wurden täglich dokumentiert.

Jeder Fisch wurde insgesamt dreimal getestet, wovon maximal einmal pro Versuchstag, um Lerneffekte und Ermüdung zu minimieren.

Über die gesamte Versuchszeit konnte kein Pilzbefall oder Mortalität festgestellt werden, was auf eine geringe Stressbelastung der Tiere durch die ausgeführten Versuche schliessen lässt.

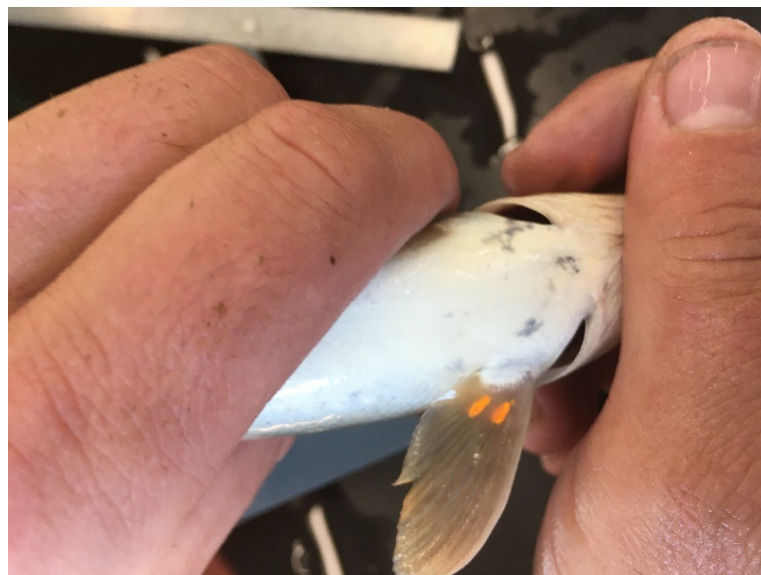


Abbildung 1: Markierung eines Alet mittels VIE Elastomer Dye.

2.2 Elektrifizierung

Alle Versuchskonfigurationen wurden mit gepulstem Gleichstrom unter Verwendung eines 1.5 POW Pulsators der Firma Smith Root elektrifiziert (Abbildung 2a). Dieser erlaubt eine kontinuierliche Variation der angelegten Spannung zwischen 0 und 150 V sowie die Erzeugung von regelmässig pulsierendem Gleichstrom (pDC) und gruppiert gepulstem Gleichstrom, wo eine bestimmte Anzahl von regelmässigen Pulsen sich mit längeren Pausen abwechseln (*gated burst pulsed direct current* gpDC, Abbildung 2b). Zu diesem Zweck können die Parameter Pulslänge (Pulse width PW [ms]), Pausenzeit (Pulse break PB [ms]), Länge einer Pulsgruppe (Burst width BW) und Pause zwischen zwei Pulsgruppen (Burst break BB [ms]) variiert werden. Die verschiedenen Kombinationen können mithilfe des Tastgrads TG (*duty cycle*) verglichen werden (Gl. (1) und (2)). Der Tastgrad beschreibt das Verhältnis der Zeit, während welcher Strom fließt, zu der Zeit, in welcher kein Strom fließt, und ist somit ein Indikator für den Stromverbrauch, aber auch für die Intensität, mit welcher der Strom von den Fischen wahrgenommen wird.

$$\text{pDC: Tastgrad } TG = \frac{PW}{PW + PB} \quad (1)$$

$$\text{gpDC: Tastgrad } TG = \frac{N * PW}{BW + BB} \quad (2)$$



(a)



(b)

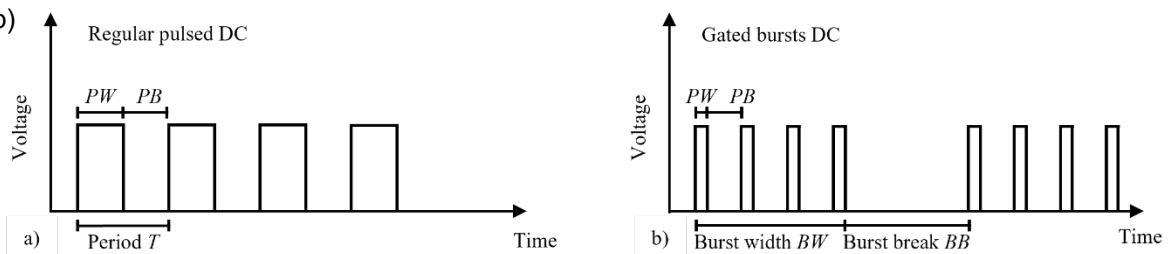


Abbildung 2: (a) 1.5 POW Pulsator und (b) Schema regelmässig (*regular pulsed DC*) und gruppiert gepulster Gleichstrom (*gated burst DC*).

Das elektrische Feld der jeweiligen Konfigurationen wurde mittels einer an der VAW konstruierten Messsonde sowie eines Oszilloskops vermessen. Diese wurde mithilfe eines Plattenkondensators validiert und weist einen Messbereich zwischen 0 und 62.5V auf sowie eine Messgenauigkeit von 0.1V. Gemessen wird jeweils die Spannungsdifferenz zwischen der Kathode und der aktuellen Messposition.

2.3 Numerische Simulationen

Alle in diesem Projekt getesteten elektrifizierten Aufbauten wurden mit Comsol Multiphysics 5.5 und dem Modul für «*electric currents*» numerisch modelliert. Ziel war es, die von den Versuchsaufbauten erzeugten elektrischen Felder für verschiedene Spannungen zu optimieren und zu untersuchen. Die Spannungen wurden an ausgewählten Punkten in der Rinne und systematisch im homogenen elektrischen Feld gemessen, um die numerische Simulation zu validieren. Die folgenden elektrischen Leitfähigkeiten σ wurden im numerischen Modell verwendet: Wasser $\sigma = 0,0312 \text{ S/m}$, Aluminium und Inox $\sigma = 35,5e6 \text{ S/m}$, Beton $\sigma = 1e-8 \text{ S/m}$, Quarzglas, Silikon und Isolierband $\sigma = 1e-14 \text{ S/m}$, Luft $\sigma = 1e-8 \text{ S/m}$. Die Anode und die Kathode wurden als «*Terminals*» mit einer jeweiligen Spannung von Null und der angelegten Spannung angegeben. Die angelegte Spannung bezieht sich auf die Spitzenspannung des pDC-Impulses, gemessen an der Elektrode. Die Simulation wurde unter Annahme von Stromerhaltung auf dem gesamten Netz gerechnet. Für die Simulationen der elektrifizierten Rechen in der großen ethohydraulischen Rinne wurde die gesamte Rinne bis zu 10 m stromaufwärts und 6 m stromabwärts des Rechens in das Modell miteinbezogen. Das Berechnungsnetz wurde mit dem in Comsol enthaltenen Generator erstellt. Die meisten Simulationen wurden in 2D als horizontale oder vertikale Schnitte durch den elektrifizierten Rechen durchgeführt. Für Versuchsanordnungen, die nicht durch einen 2D-Schnitt angenähert werden können, wurden 3D-Simulationen durchgeführt.



2.4 Fischreaktion auf elektrische Reize – Aal

2.4.1 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden im ethohydraulischen Versuchskanal der VAW durchgeführt, in welchem eine 1.5 m breite, 1.5 m lange und 0.9 m hohe, auf allen Seiten verschlossene Box installiert wurde (Abbildung 3). Diese Masse wurden gewählt, um in zwei Richtungen mindestens 1.5x die Körperlänge der grössten getesteten Aale abzudecken. Der Abfluss betrug jeweils 200 l/s, was bei einer Wassertiefe von 90 cm einer Fliessgeschwindigkeit von 0.15 m/s entspricht. Zur Generierung eines annähernd homogenen horizontalen Feldes wurde die unterstrom gelegene Gitterwand als Kathode und die oberstrom gelegene Gitterwand als Anode elektrifiziert. Äquivalent dazu wurde ein vertikales elektrisches Feld durch die Elektrifizierung des Oberflächengitters als Anode und des Bodengitters als Kathode generiert. Die Reaktion der Fische wurde mit einer in der Box installierten GoPro-8 Kamera aufgezeichnet (Abbildung 4). Die Analyse der Feldmessungen und Simulation des elektrischen Feldes ergab, dass die Konstruktion mit fix installierten Gittern aus Metall und daher einer hohen elektrischen Leitfähigkeit nicht optimal war. Dies führte zu Inhomogenitäten des elektrischen Feldes.

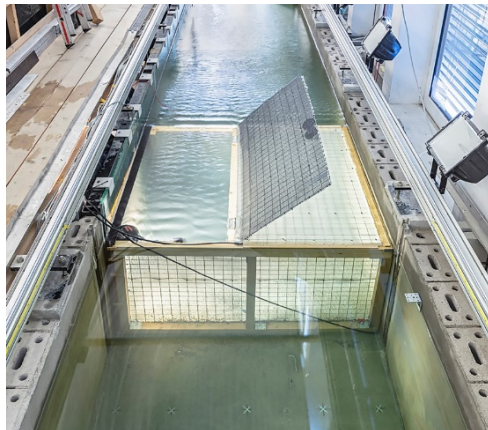


Abbildung 3: Versuchsaufbau für die Evaluation der Fischreaktion auf elektrische Impulse. Elektrifiziert wurde entweder die Oberfläche- und Bodenelektrode oder die Oberstrom- und Unterstromelektrode, um ein annähernd homogenes vertikales bzw. horizontales elektrisches Feld zu generieren.



Abbildung 4: GoPro-Aufnahme aus dem Inneren des Versuchsaufbaus mit einem Aal.

2.4.2 Versuchsablauf

Die Versuche im vertikalen Feld fanden vom 25.08.20 – 28.08.20 und vom 07.09.20 – 09.09.20 statt, die Versuche im horizontalen Feld vom 10.09.20 – 11.09.20. Die Aale wurden an der Thur im Kanton Thurgau gefangen.

Es wurde jeweils ein Aal ohne Betäubung in einer Küvette fotografiert, um etwaige äussere Vorschäden zu quantifizieren und die Markierung abzugleichen. Damit sollte vermieden werden, dass derselbe Aal mehrfach mit demselben Pulsmuster getestet wird. Anschliessend wurde der Aal mittels eines Käschers in den nicht-elektrifizierten Versuchsaufbau gesetzt und die Aufnahme des Verhaltens mittels einer GoPro-8 Kamera gestartet. Nach einer Akklimatisationszeit von mindestens drei Minuten wurde zeitgleich eine Hand vor die GoPro Kamera gehalten und am Computer eine Bildschirmaufnahme gestartet, um die vom Pulsator aufgebrachten Spannungen zu erfassen. Am Versuch waren immer mindestens zwei Personen (P1 und P2) beteiligt.



Die aufgebrachte Spannung wurde mittels eines Drehreglers inkrementell erhöht (P1). P2 beobachtete während des gesamten Versuchs den Fisch und teilte P1 das Verhalten mit. Das Verhalten und die aktuelle Spannung wurden von P1 notiert, und P1 erhöhte die Spannung durch eine leichte Drehung des Drehreglers um 1-3V. Dieses Vorgehen wiederholte sich, bis ein unkontrolliertes Verhalten (Immobilisierung) des Aals beobachtet wurde. Bei Immobilisierung wurde die Spannung sofort ausgeschaltet und der Aal erhielt eine Erholungszeit von 3 Minuten.

Während eines Versuchs wurde die Spannung fünfmal bis zu unkontrolliertem Verhalten erhöht. Dies ergibt fünf Werte pro Aal und getesteter Konfiguration. Vor und nach jedem Durchgang wurde die Atemfrequenz des Aals aufgezeichnet.

2.5 Fischreaktionen auf elektrische Reize – Bachforelle, Barben und Alet

2.5.1 Versuchsaufbau

Aufgrund der Erfahrungen mit dem Versuchsaufbau für Aale (Abschnitt 2.4.1) wurden diverse Verbesserungen vorgenommen, um ein komplett homogenes Feld zu generieren, die Beobachtbarkeit zu verbessern und eine bessere Reproduzierbarkeit sicherzustellen. Die Versuche wurden in einem Plexiglasaquarium von 62x60x62cm mit Bachforellen, Barben und Alet durchgeführt. Die Masse des Aquariums ermöglichten Versuche bis zu einer Fischlänge von bis zu 30cm. Grössere Fische hätten hingegen nicht genügend Reaktionsraum gehabt. Die Elektroden bestanden aus einer Edelstahlplatte, welche mit einem Plastiknetz bespannt wurde, um direkten Kontakt zwischen Elektrode und Fisch zu vermeiden. Die Elektroden wurden im Aquarium so montiert, dass sie jeweils vertikal bzw. horizontal einen Abstand von 60 cm aufwiesen (Abbildung 5). Somit konnte vertikal und horizontal ein identisches Feld generiert werden. Da ausser den Elektroden und dem Wasser nur isolierende Komponenten (Plexiglas) im Versuchsaufbau verwendet wurden, konnte der Strom nur durch das Wasser von der Anode zur Kathode fließen und generierte somit ein komplett homogenes Feld.

Die Versuche wurden kontinuierlich mit einer GoPro-8 Kamera aufgezeichnet. Zudem wurde das Spannungsmessgerät dauerhaft an die Anode und Kathode angeschlossen. Somit konnte die angelegte Spannung einmal pro Sekunde aufgezeichnet werden. Der Drehknopf am Pulsator zur Variierung der angelegten Spannung war mit einer Skala ausgestattet, so dass der Knopf immer um dieselbe Strecke gedreht werden konnte. Im Gegensatz zum Versuchsaufbau für Aale (Abschnitt 2.4.1) wurden die Versuche in stehendem Wasser durchgeführt. Dieses wurde jedoch nach jedem Versuch zu mindestens 50% mit Wasser aus den Hälterungstanks ausgetauscht. Damit wurde der Stress durch Akklimatisierung an eine andere Temperatur minimiert und das Verdünnen von eventuell vorhandenen Botenstoffen im Wasser sichergestellt.

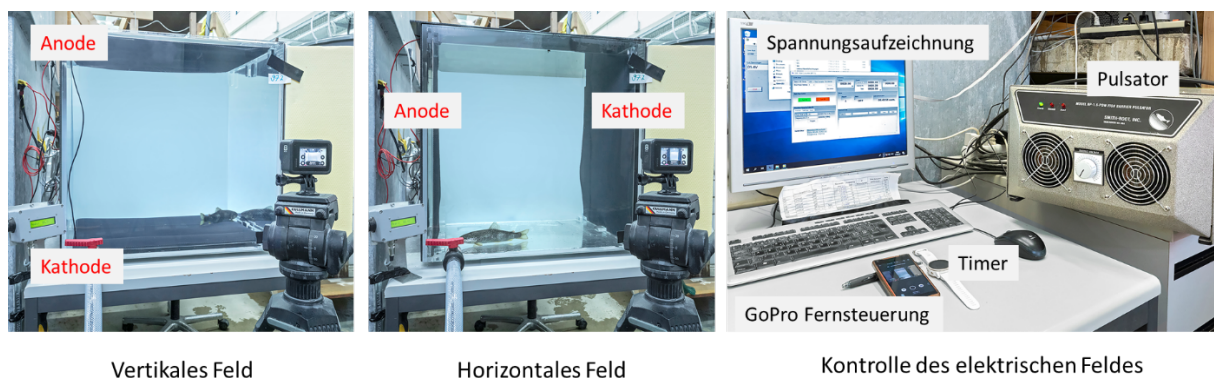


Abbildung 5: Versuchsaufbau homogenes Feld für Alet, Barbe, Forelle.



2.5.2 Versuchsablauf

Die Versuche fanden vom 16.04.21 bis zum 18.06.21 statt. Die Fische wurden in verschiedenen Gewässern der Kantone Thurgau und Zürich gefangen: Alet in der Sihl bei Hütten, Binnenkanal Rohrerbrugg und im Chemebach Märstetten; Barben im Chemebach Märstetten und in der Glatt bei Uzwil; Forellen in der Sihl bei Hütten, Dorfbach Märstetten, Binnenkanal Rohrerbrugg und in der Glatt bei Uzwil. Während die Fische zum Markieren betäubt waren, wurden sie jeweils mit einer Schublehre ausgemessen, um detaillierte Daten zur Totallänge, Standardlänge und Höhe der Fische zu erhalten.

Vor dem Versuch wurde jeweils ein Fisch ohne Betäubung in einer Küvette fotografiert, um etwaige äussere Vorschäden zu quantifizieren und die Markierung abzugleichen. Damit sollte vermieden werden, dass derselbe Fisch mehrfach mit demselben Pulsmuster getestet wird. Anschliessend wurde der Fisch mittels eines Käschers in den nicht elektrifizierten Versuchsaufbau gesetzt und konnte sich während 2 Minuten an die neue Umgebung akklimatisieren. In dieser Zeit wurde die Atemfrequenz aufgezeichnet. Alle beobachteten Verhaltensweisen während des Versuchs wurden mittels des Programms *Behavioral Observation Research Interactive Software* (BORIS, Friard & Gamba (2016)) aufgezeichnet. Dieses erlaubt die Kodierung von Verhaltensweisen auf Tastenkombinationen. Bei Versuchsbeginn wurde zeitgleich via GoPro App die Kamera, das Programm Boris sowie die Aufzeichnung der Spannung gestartet. Somit konnte eine exakte Koordination der aufgebrachten Spannungen mit den beobachteten Verhaltensweisen erzielt werden.

Während des Versuchs wurden die Verhaltensweisen von einer Person in BORIS notiert, während eine zweite Person die Spannung erhöhte. Die Spannung wurde alle 10 s um eine Markierung auf dem Drehregler erhöht, was ca. einer Erhöhung von 2 V entspricht. Dieses Vorgehen wurde so oft wiederholt, bis unkontrolliertes Verhalten des Fisches beobachtet wurde. In diesem Fall wurde die Spannung sofort ausgeschaltet, die Atemfrequenz erneut aufgezeichnet und der Fisch mittels des Käschers in der Kuvette plziert. Dort wurde er erneut fotografiert, um allfällige Schäden aufgrund des Versuches zu erkennen. Im Anschluss wurde der Fisch zurück in die Hälterungsbecken gesetzt.

2.6 Elektrifizierte Rechen

2.6.1 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden im ethohydraulischen Versuchskanal der VAW durchgeführt, welcher 30 m lang, 1.5 m breit und 1.2 m tief ist (Abbildung 6). Der Durchfluss konnte zwischen 200 l/s und 1'200 l/s eingestellt werden, wodurch sich bei einer Wassertiefe von $h_o = 0.90$ m Fliessgeschwindigkeiten von $U_o = 0.15 - 0.90$ m/s ergaben. Im oberstromigen Bereich des Kanals wurde ein Startabteil mit Gittern vom restlichen Kanal abgetrennt, um die Fische an die Strömung akklimatisieren zu können. Der Horizontalrechen (*Horizontal Bar Rack*, HBR) und der Vertikalrechen (*Curved-Bar Rack*, CBR) wurden in der Mitte des Kanals mit einem Winkel von $\alpha = 30^\circ$ zur Strömung eingebaut. Beide Rechen weisen einen Stababstand von $s_b = 5$ cm auf. Anschliessend an den Rechenfuss befand sich ein 25 cm breiter Bypass (Abbildung 6), welcher den Fischen als sicherer Abwanderungskorridor diente. Der Geschwemmsel- bzw. Einlaufrechen mit einem Stababstand von $s_b = 90$ m wurde mit einem Winkel von 90° zur Strömung und einem vertikalen Winkel von 73° eingebaut und überspannte die gesamte Gerinnebreite. Bei diesem Setup gab es keinen Bypass.

Im Kanal wurden fünf in die Wasseroberfläche eingetauchte Kameras installiert (Abbildung 6), mit welchen das Fischverhalten aufgezeichnet wurde. Diese Aufzeichnungen wurden mit einer an der VAW entwickelten *Fish-tracking* Software analysiert (unterstützt durch BFE SI/500957-1), um die Schwimmpfade der Fische analysieren zu können. Somit konnten kritische Punkte erfasst und das Design des Rechen-Bypass-Systems gezielt optimiert werden. Abbildung 7 zeigt ein Standbild der für ausgewählte Versuche zusätzlich am Rechen installierten GoPro Kamera, auf welchem sich ein Aal dem HBR nähert.



Zusätzlich zu den eingetauchten Kameras wurden die Fische visuell durch die verglaste Seitenwand des Kanals beobachtet, wodurch das Verhalten direkt protokolliert werden konnte.

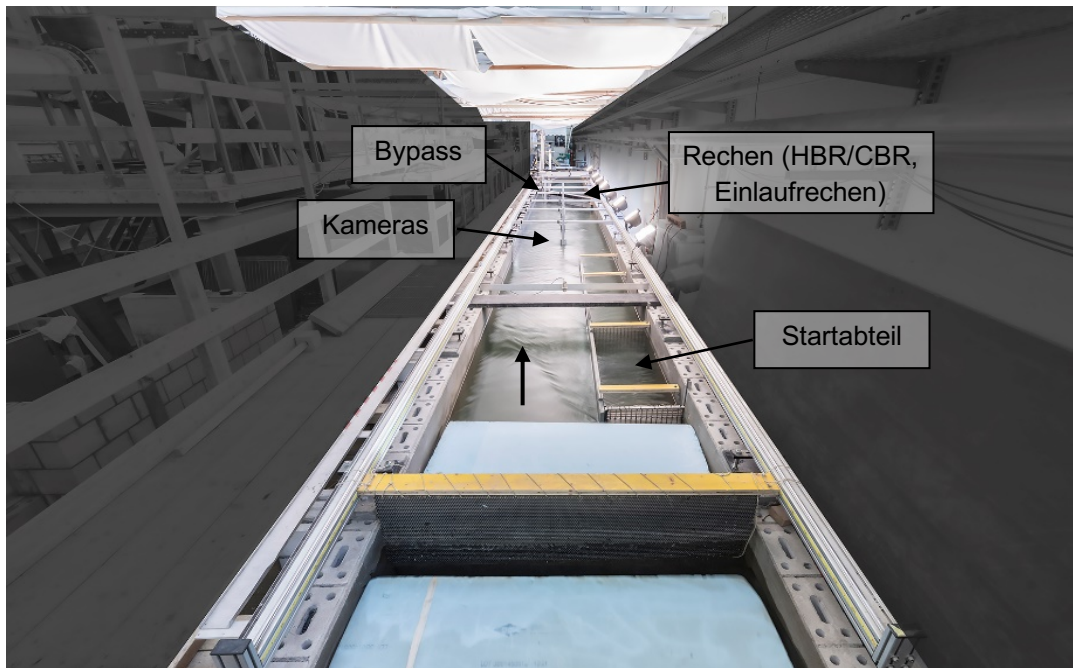


Abbildung 6: Ethohydraulischer Versuchskanal an der VAW mit Startabteil im Vordergrund und Rechen und Bypass im Hintergrund; Blick in Fließrichtung



Abbildung 7: Standbild aus Unterwasser-Videoaufnahme: Versuch mit Horizontalrechen, ein Aal nähert sich dem elektrifizierten Rechen; Fließrichtung von rechts nach links.



2.6.2 Versuchsablauf

Es wurden drei Fische nacheinander ohne Betäubung in einer Küvette 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. Dann wurden die Fische wieder eingefangen, erneut in der Küvette fotografiert und zurück in die Hälterungstanks gebracht.

2.6.3 Datenauswertung

Der ethohydraulische Strömungskanal erlaubt die Variation verschiedener Parameter: Fischart, Rechentyp (CBR oder HBR oder Geschwemmselrechen), Rechenwinkel, Anströmgeschwindigkeit, Stababstand, Bypass typ und Fliessgeschwindigkeit im Bypass.

Die genaue Geometrie der strömungsoptimierten Stäbe des HBR können Meister *et al.* (2020) und diejenige des CBR Beck *et al.* (2020) entnommen werden, die Geometrie des Geschwemmselrechens ist in (Moldenhauer-Roth et al., (2023, 2025) beschrieben.

Es wurden Versuche mit Anströmgeschwindigkeiten $U_o = 0.15, 0.3$ und 0.6 m/s ausgeführt. Bei einer Beschleunigung entlang des Rechens bis zum Bypass Einlauf um 20% der mittleren Anströmgeschwindigkeit, d.h. $U_{By}/U_o = 1.2$, führt dies bei einem horizontalen Anströmwinkel der Rechen von $\alpha = 30^\circ$ zu einer Fliessgeschwindigkeit im Bypass Einlauf von $U_{By,in} = 0.18, 0.36$ und 0.72 m/s. In der Versuchsreihe im Herbst 2020 wurde der HBR und der CBR mit Aalen getestet. In der Versuchsreihe vom Frühjahr 2022 wurden der HBR, f-CBR und der Geschwemmselrechen mit Alet und Forellen getestet. Aufgrund der Resultate der Versuche im homogenen Feld wurden alle Rechenversuche mit Aalen mit einer Pulslänge von 2 ms und einer Frequenz von 10 Hz durchgeführt. Die Versuche im Frühjahr 2022 mit Alet und Forellen wurden hauptsächlich mit den Pulsmustern und 2ms, 10Hz durchgeführt. Versuchsweise wurde auch 1ms, 10 Hz verwendet, dies führte aber zu weniger zuverlässigen Reaktionen.

Es wurden allgemein sehr kontrollierte Fischreaktionen beobachtet. Eine Fluchtreaktion beschränkte sich meist auf 30 – 50 cm oberhalb des Rechens. Teilweise konnte auch eine kontrollierte Leitung entlang des Feldes in den Rechen beobachtet werden. Die im Versuchssetup zu elektrischen Reizen bestimmten Grenzwerte für die Feldstärke können nicht direkt auf den Rechen übertragen werden, da nicht der ganze Körper demselben Feld ausgesetzt wird. Die Versuche liefern jedoch eine untere Schranke welche Feldstärke minimal notwendig ist, um eine Reaktion auszulösen.

Für alle Versuche an Fischleitrechen wurde die Fischleiteffizienz in den Bypass (*Fish Guidance Efficiency*, FGE) und die Fischschutzeffizienz (*Fish Protection Efficiency*, FPE) mit den folgenden Definitionen berechnet.

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

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

Hierbei bedeutet RI = Recheninteraktion, d.h. die Fische waren vor der erfolgreichen Bypass Passage im Nahbereich des Rechens (weniger als 15 cm Abstand).

Am frontal angeströmten Geschwemmselrechen war kein Bypass installiert. Daher wurde nur die Fischschutzeffizienz berechnet. Ein Fisch wurde hier als geschützt betrachtet, wenn er sich dem Rechen näher als 60 cm angenähert hat, diesen aber nicht passiert.



$$\text{Fischschutzeffizienz (FPE)} = \frac{\text{Geschützt}}{\text{Rechen-Passage} + \text{Geschützt}}$$

3 Ergebnisse

3.1 Fischreaktionen auf elektrische Reize – Aal

3.1.1 Numerische Simulation

Das durch die Elektroden generierte elektrische Feld wurde mittels der Software COMSOL Multiphysics 5.5 und dem Modul „*electric currents*“ simuliert und mithilfe von Messwerten im Kanal validiert. Das resultierende elektrische Feld ist in Abbildung 8 ersichtlich. Um im selben Versuchsaufbau ein vertikales und horizontales Feld zu generieren, wurden die Begrenzungen oberstrom, unterstrom, an der Wasseroberfläche und entlang der Kanalsole aus einem Edelstahlgitter gebaut. Wie in der Simulation des vertikalen Feldes (Abbildung 8, rechts) zu erkennen, führt dies zu einem nicht komplett homogenen Feld, da die Leitfähigkeit der Wände grösser ist als jene des Wassers. Somit entsteht an den Ecken eine höhere Feldstärke, während entlang der beiden vertikalen Wände ein „Loch“ mit einem schwachen elektrischen Feld entsteht. Für die Auswertung wurde daher die mittlere Feldstärke im homogenen Teil in der Mitte des Feldes verwendet.

Da die Nichthomogenität des vertikalen Feldes in den Versuchen festgestellt wurde, konnte der Versuchsaufbau für die Versuche mit horizontalem Feld angepasst werden. Hierzu wurde die Elektrode entlang des Kanalbodens entfernt. Dadurch entsteht, wie in Abbildung 8, links ersichtlich, ein homogenes Feld in der unteren Hälfte des Versuchsaufbaus. Für die Auswertung der Fischreaktionen wurde daher die mittlere Feldstärke in diesem Bereich verwendet.

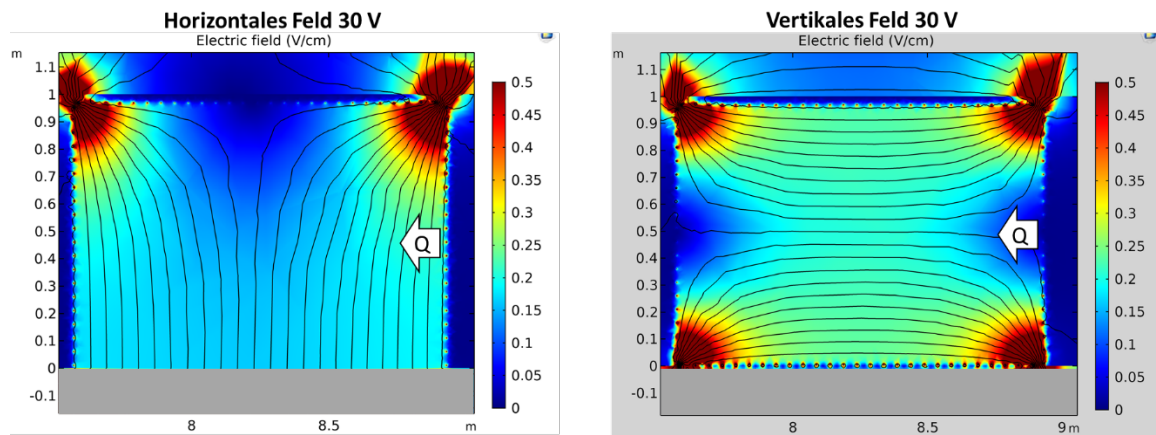


Abbildung 8: Simulation des elektrischen Feldes mit (links) horizontalen und (rechts) vertikalen Elektroden.

3.1.2 Versuchsprogramm

In Tabelle 1 sind alle getesteten Elektrifizierungseinstellungen aufgelistet. Das Versuchsprogramm wurde nach folgenden Kriterien zusammengestellt:

- Es wurden nur Frequenzen unter $f = 30$ Hz getestet, um das Verletzungsrisiko zu minimieren (Snyder, 2003; Rümmler et al., 2004; Snyder, 2003).
- Die getesteten Tastgrade wurden zu < 0.12 gewählt, um einen geringen Energieverbrauch zu gewährleisten. Nach (Zielinski et al., (2019) kann ein tiefer Tastgrad zudem die Sicherheit für



Menschen in Kontakt mit dem elektrischen Feld erhöhen. In Kombination mit $f = 10, 20$ und 30 Hz wurden daher Pulslängen von $1, 2$ und 4 ms getestet.

- V1/H1, V2, V3 und V10 werden von der Firma Smith Root erfolgreich an elektrischen Barrieren für den Schutz vor invasiven Arten in den USA eingesetzt. V10 erlaubt eine Erhöhung der Frequenz auf 50 Hz unter gleichzeitiger Beibehaltung eines tiefen Tastgrades (duty cycle) und konstanter Pulslänge, da auf die Pulsgruppen eine längere Pause folgt.
- V11 wurde von der Firma Procom Inc. im Rahmen des Vorgängerprojekts als geeignetes Pulsmuster empfohlen.

Aufgrund obiger Kriterien wurden Pulslängen von $PW = 1, 2$ und 4 ms sowie Frequenzen von $f = 10, 20$ und 30 Hz in allen Kombinationen im vertikalen Feld getestet. Zudem wurden die beiden gpDC Muster V10 und V11 in das Testprogramm aufgenommen. Im horizontalen Feld wurden aufgrund zeitlicher Einschränkungen nur drei Pulsmuster getestet, um eventuelle Unterschiede im Verhalten klassifizieren zu können.

Jedes Pulsmuster wurde fünfmal mit fünf verschiedenen Fischen getestet. Da jeder Fisch innerhalb eines Versuches fünfmal getestet wurde, ergibt dies 25 Datenpunkte pro Konfiguration. Diese können jedoch aufgrund möglicher Ermüdung und mehrfachen Testens desselben Fisches nicht als statistisch unabhängig betrachtet werden.

Tabelle 1: Versuchsprogramm für europäische Aale. Die elektrischen Parameter werden beschrieben durch die Pulslänge PW , Pause zwischen zwei Pulsen PB , Frequenz f , Anzahl Pulse in einer Pulsgruppe N , Länge einer Pulsgruppe BW und Pause zwischen zwei Pulsgruppen BB . Der Tastgrad TG beschreibt den Anteil der Zeit, während welcher Strom fließt. Versuchsanordnungen V1 – V11 wurden mit einem vertikalen Spannungsgradienten getestet, während bei H1, H2 und H11 ein horizontaler Spannungsgradient vorhanden war.

Waveform	PW [ms]	PB [ms]	f [Hz]	N	BW [ms]	BB [ms]	Duty cycle
V1	2	98	10				0.02
V2	2	48	20				0.04
V3	2	31.33	30				0.06
V4	4	96	10				0.04
V5	4	46	20				0.08
V6	4	29.33	30				0.12
V7	1	99	10				0.01
V8	1	49	20				0.02
V9	1	32.33	30				0.03
V10	2	18	50	12	222	278	0.048
V11	0.3	7	137	5	29.5	170.5	0.0075
H1	2	98	10				0.02
H2	2	48	20				0.04
H11	0.3	7	137	5	29.5	170.5	0.0075

3.1.3 Fischverhalten

Der Versuchsaufbau mit annähernd homogenem Feld diente dazu, die Auswirkung verschiedener Pulsmuster auf das Verhalten der Aale zu untersuchen und ein geeignetes Pulsmuster für die nachfolgenden Rechenversuche festzulegen. Zudem sollten die unterschiedlichen Reaktionen von Aalen auf



Strom dokumentiert und Grenzwerte für diverse Reaktionen bestimmt werden. Mit zunehmender Feldstärke wurden verschiedene Reaktionen dokumentiert, welche von leichtem Zittern der Flossen über schnelles Wegschwimmen bis hin zu einem Gleichgewichtsverlust und Immobilisierung reichen. Zur Analyse der Daten wurde das erste (d.h. tiefste Feldstärke) Auftreten einer beliebigen Reaktion auf den Strom als «*Twitch*» definiert. Als «*uncontrolled*» wurden alle Reaktionen bewertet, welche keine kontrollierte Schwimmrichtung des Fisches mehr zulassen, d.h. Gleichgewichtsverlust oder Immobilisierung. Die Grenzwerte wurden als Funktion der *Power Density*, welche ein Abbild der elektrischen Feldstärke ist, aber zusätzlich die Leitfähigkeit des Wassers berücksichtigt, analysiert.

Abbildung 9 zeigt die beobachteten Grenzwerte im vertikalen elektrischen Feld für alle vertikalen elektrischen Felder (V1-11). Die Analyse mittels eines statistischen Modells (Linear Mixed Model) zeigte auf, dass die Fischlänge keinen Einfluss auf die beobachteten Grenzwerte hat. Eine höhere Frequenz führte zu geringeren Grenzwerten für Immobilisierung während für «*Twitch*» kein klarer Zusammenhang ersichtlich war. Längere Pulsdauern führten zu tieferen Grenzwerten für *Twitch*, aber für Immobilisierung war kein klarer Trend erkennbar. Zur Bestimmung eines geeigneten Pulsmusters zur Verwendung an elektrifizierten Fischleitreechen wurden die vier Kriterien analysiert:

1. **Reaktionszeit** – Die Differenz zwischen der *Power Density*, bei welcher *Twitch*-Reaktionen auftreten, zum Auftreten von Immobilisierung soll möglichst gross sein. Somit soll der Fisch die Möglichkeit haben, aus dem elektrischen Feld zu flüchten, bevor er Gefahr läuft, immobilisiert zu werden. Dies wurde aufgrund der Differenz des Medians *Twitch* zum Median *Uncontrolled* objektiviert.
2. ***Twitch*-Grenzwert** – Der *Twitch*-Grenzwert soll möglichst tief sein. Eine geringe *Power Density*, bei welcher bereits Reaktionen auf das elektrische Feld auftreten, ermöglicht die Verwendung von geringen Spannungen und minimiert daher das Verletzungsrisiko. Dies wurde anhand des Medians *Twitch* objektiviert.
3. **Geringe Variabilität der Grenzwerte** – An einem elektrifizierten Rechen sollen Fische zuverlässig vor einer Rechenpassage geschützt werden. Deswegen wurde es als vorteilhaft klassifiziert, wenn die Bandbreite der Grenzwerte, bei welchen Reaktionen beobachtet wurden, gering war. Dieses Kriterium wurde anhand des interquartilen Spektrums von *Twitch* und *Uncontrolled* bewertet.
4. **Energiekosten** – Die Unterhaltskosten einer elektrischen Barriere hängen vom Stromverbrauch ab. Somit wurde ein geringer Stromverbrauch, approximiert durch das Produkt des Tastgrades mit dem Grenzwert für *Twitch* als vorteilhaft angesehen.

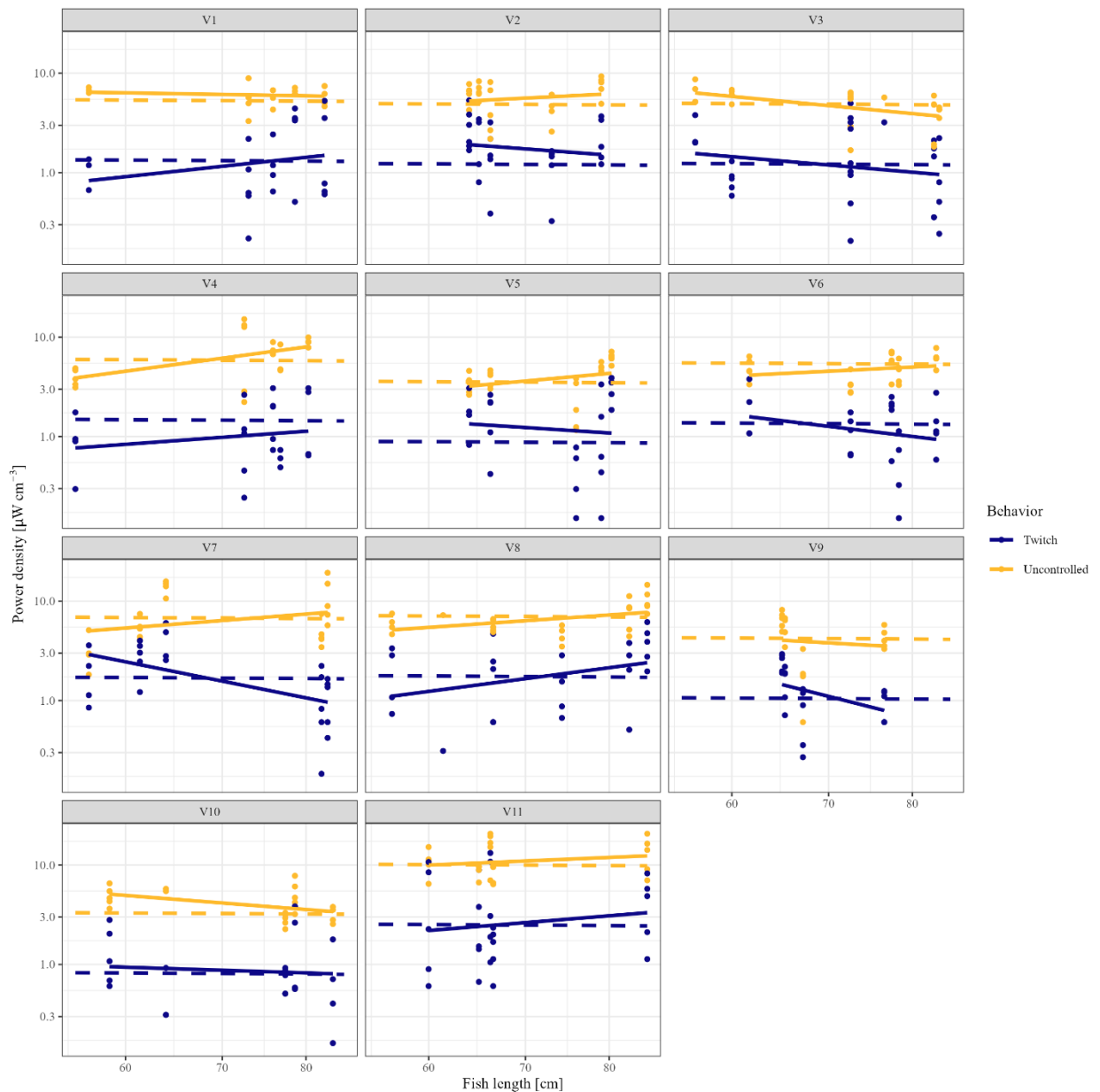


Abbildung 9: Grenzwerte der *Power density* (Messgrösse für die elektrische Feldstärke) für *Twitch*-Reaktionen für alle getesteten vertikalen Pulsmuster. Die Punkte entsprechen den Beobachtungen, die durchgezogene Linie einer linearen Regression der Beobachtungen und die gestrichelte Linie der Vorhersage aufgrund eines statistischen Modells, welches die Fischgrösse, Fischindividuum und Versuchsaufbau (*Setup*) berücksichtigt.

Abbildung 10 zeigt Boxplots der vorteilhaftesten vier Pulsmuster in Bezug auf die Reaktionszeit. Die Darstellung als Boxplot zeigt den Median, sowie den Interquartilbereich der verschiedenen Reaktionen. Unter dem Kriterium der Reaktionszeit sind V4 und V11 am vorteilhaftesten. Allerdings haben beide Pulsmuster eine grosse Variabilität, wann Reaktionen auftreten, insbesondere in Bezug auf Immobilisierung. Bei V11 überschneiden sich sogar die Variabilitätsbereiche von *Twitch* und *Uncontrolled*.



led. V4 hat zudem einen relativ hohen Tastgrad von 0.04 und somit höhere Energiekosten. Unter Berücksichtigung der Minimierung des Grenzwertes *Twitch* hat sich somit über alle Pulsmuster V1 mit einer Pulslänge von 2 ms und einer Frequenz von 10 Hz als das Vorteilhafteste herauskristallisiert.

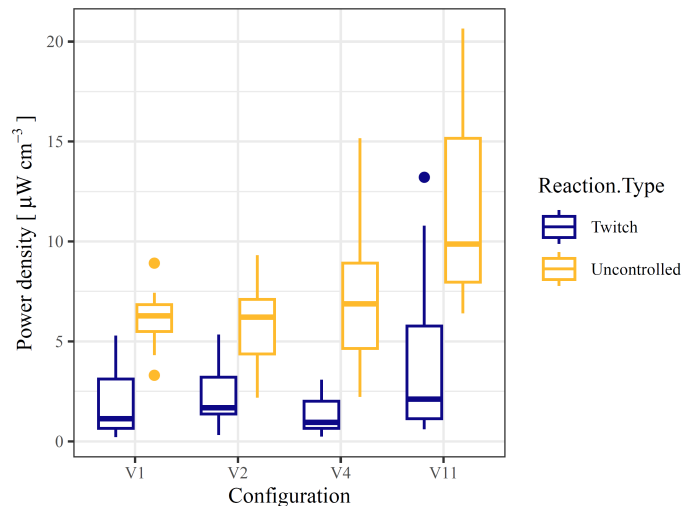


Abbildung 10: Vorteilhafteste Konfigurationen aufgrund des Kriteriums Reaktionszeit – Maximierung der Distanz des Medians *Twitch* zu Median *Uncontrolled*. V11 und V4 wurden aufgrund der grossen Variabilität der Reaktionen aus ungünstig klassifiziert. V2 hat einen höheren *Twitch*-Grenzwert als V1 und eine geringere Distanz zwischen *Twitch* und *Uncontrolled*. Daher wurde V1, $PW = 2$ ms, $f = 10$ Hz aufgrund der definierten Kriterien am vorteilhaftesten bewertet.

3.2 Fischreaktionen auf elektrische Reize – Forellen, Barben und Alet

Die Resultate dieses Kapitels sind in Moldenhauer-Roth et al., (2024) publiziert.

Moldenhauer-Roth, A.; Selz, O.M.; Albayrak, I.; Boes, R.M. (2024). Behavioural response of chub, barbel and brown trout to pulsed direct current electric fields. *Journal of Ecohydraulics*, 1–16, 2470-5357. <http://dx.doi.org/10.1080/24705357.2024.2426806>.

3.2.1 Numerische Simulation

Das durch die Elektroden generierte elektrische Feld wurde mittels der Software COMSOL *Multiphysics* 5.5 und dem Modul *electric currents* simuliert und mithilfe von Messwerten im Versuchsaufbau validiert. Das resultierende elektrische Feld ist in Abbildung 11 ersichtlich. Die parallelen Äquipotentiallinien sowie die einheitliche Feldstärke bestätigen die Homogenität des Feldes. Der Fisch ist somit unabhängig von seiner Position im Aquarium denselben elektrischen Reizen ausgesetzt.

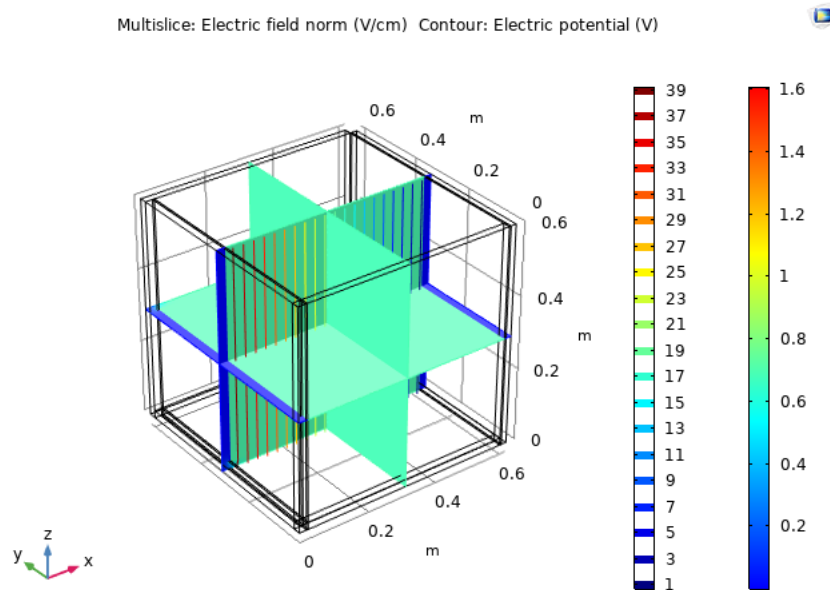


Abbildung 11: Numerische Simulation des horizontalen elektrischen Feldes im Versuchsaufbau mit Alet, Barbe, Forelle

3.2.2 Versuchsprogramm

Alle Konfigurationen wurden mit mindestens 20 verschiedenen Fischen zwischen 96 mm und 200 mm Totallänge getestet. Zusätzlich wurden vier Konfigurationen für Forellen mit mindestens zehn Fischen zwischen 200 mm und 250 mm Totallänge getestet, um den Einfluss der Fischgrösse abbilden zu können. Durch dieses Vorgehen können die Versuchsergebnisse als statistisch unabhängig betrachtet und entsprechend ausgewertet werden.

Aufgrund der hohen Anzahl Wiederholungen pro Konfiguration sowie der verbliebenen Anzahl Fische in der Tierversuchsgenehmigung wurde das Testprogramm (Tabelle 2) gegenüber der Anzahl Konfigurationen, welche mit Aalen getestet wurden, reduziert. Dies führte zu den in Tabelle 2 aufgeführten acht Konfigurationen.

Die Auswahl wurde nach folgenden Kriterien festgelegt:

- Bevorzugung von geringen Tastgraden zur Minimierung des Energieverbrauchs
- Testen einer Frequenz (10 Hz) mit drei verschiedenen Pulslängen (V1, V2, V3).
- Testen einer Pulslänge (1 ms) mit drei verschiedenen Frequenzen (V3, V4, V5).
- Testen der zwei gpDC Konfigurationen (VB1, VB2).
- Testen einer Konfiguration im horizontalen Feld (H1).

Die Totallänge der getesteten Alet betrug im Durchschnitt 148.3 mm (min. 96 mm, max. 265 mm), jene der Barben 151.5 mm (min. 96 mm, max. 256 mm) und jene der Forellen 167.1 mm (min. 103mm, max. 285 mm).



Tabelle 2: Versuchsprogramm für Forellen, Barben und Alet. Die elektrischen Parameter werden beschrieben durch die Puls-länge PW [ms], Frequenz f [Hz], Pausenzeit PB [ms] definiert. Für gated burst gepulster Gleichstrom wird zudem die Dauer einer Pulsgruppe BW [ms], die Pausenzeit zwischen zwei Pulsgruppen BB [ms] sowie die Anzahl Pulse pro Pulsgruppe N definiert. Der *Duty Cycle* beschreibt den Prozentsatz der Zeit, während welcher Strom fließt.

Waveform	PW [ms]	PB [ms]	f [Hz]	N	BW [ms]	BB [ms]	Duty cycle
V1	2	98	10				0.02
V2	4	96	10				0.04
V3	1	99	10				0.01
V4	1	49	20				0.02
V5	1	32.33	30				0.03
VB1	2	18	50	12	222	278	0.048
VB2	0.3	7	137	5	29.5	170.5	0.0075
H1	2	98	10				0.02

3.2.3 Ergebnisse

Die beobachteten Fischreaktionen wurden unterteilt in leichte und unkontrollierte Verhaltensweisen, um die Konfigurationen vergleichbar zu machen. Leichte Reaktionen (*Twitch*) sind ein Zittern der Flossen oder ein leichtes Vibrieren des Körpers. Diese Reaktionen zeigen deutlich, dass das elektrische Feld verspürt wird, reichen aber mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht aus, um einen Fisch an der Rechenpassage zu hindern. Als unkontrolliert wurden Verhaltensweisen protokolliert, wo der Fisch nicht mehr in der Lage ist, seinen Schwimmweg aktiv zu kontrollieren. Dies inkludiert unter anderem ein Seitwärtslegen des Fisches, eine Immobilisierung oder eine eingestellte Atemtätigkeit. Unkontrollierte Reaktionen sind beim Elektrofischen erwünscht, sollten an elektrifizierten Rechen aber weitgehend vermieden werden, da sie zum Andrücken der Fische an den Rechen oder Durchspülen in Richtung der Turbine führen können.

Abbildung 12 zeigt die Fischreaktionen in Abhängigkeit der Energiedichte (y-Achse) und des Fischvolumens (x-Achse). Beide Achsen weisen eine logarithmische Skala auf. Die Energiedichte wird nach Gl. (3) berechnet wobei c_w für die Leitfähigkeit des Wassers (bei der aktuellen Wassertemperatur) und E für die Feldstärke steht. Das Fischvolumen wird nach Gl (4) berechnet. L_{tot} ist die gemessene Total-länge des Fisches, h die gemessene Höhe und b die nach (Ebel, (2018b) berechnete Fischbreite. Die Darstellung mit diesen beiden Grössen erlaubt, die Datenpunkte mit einer exponentiellen Kurve (Linear aufgrund der logarithmischen x- und y-Achse) sehr gut zu approximieren. Zudem erlaubt die Energiedichte, gegebene Konfigurationen eines elektrischen Feldes zwischen verschiedenen experimentellen Versuchsanordnungen und Flüssen zu vergleichen da die Leitfähigkeit des Wassers miteinbezogen wird. Diese hat einen Einfluss darauf, wie stark das Feld von den Fischen wahrgenommen wird.

$$\text{Energiedichte: } p_d = c_w * E^2 \left[\frac{\mu W}{cm^3} \right] \quad (3)$$

$$\text{Fischvolumen: } V = \pi * \frac{L_{tot}}{2} * \frac{h}{2} * b [cm^3] \quad (4)$$

Grössenabhängigkeit

In Abbildung 12 ist gut ersichtlich, dass sowohl twitch als auch unkontrollierte Reaktionen eine Grössenabhängigkeit zeigen. Diese ist für unkontrollierte Reaktionen stärker ausgeprägt. Dies ist im Einklang mit früheren Studien zum Elektrofischen (z.B. Beaumont, 2016), welche bei der Reaktion auf



elektrische Felder allgemein eine Grössenabhängigkeit postulieren, jedoch nur unkontrollierte Reaktionen untersucht haben. Kleine Fische zeigen zwar deutlich später unkontrollierte Reaktionen, aber starke Reaktionen treten bereits bei kleinen Feldstärken bzw. Energiedichten auf. Am Rechen ist eine möglichst grosse Reaktionszeit, also eine grosse Differenz zwischen ersten feinen Reaktionen und einer unkontrollierten Reaktion, unabhängig von der Fischgrösse, wünschenswert.

Orientierung des elektrischen Feldes

Abbildung 12 zeigt die Unterschiede in den Fischreaktionen bei Anwendung eines vertikalen und horizontalen Spannungsgradienten. Twitch Reaktionen treten unabhängig von der Feldorientierung bei sehr geringen Energiedichten auf. Unkontrollierte Reaktionen treten hingegen bei horizontalen Spannungsgradienten bei deutlich geringeren Energiedichten auf als bei vertikalen Spannungsgradienten. Dies kann damit erklärt werden, dass bei einem vertikalen Spannungsgradienten der Fisch die Spannungsdifferenz über seine Höhe wahrnimmt. Bei einem horizontalen Spannungsgradienten hingegen, je nach Schwimmrichtung über seine Breite oder seine Länge. Damit ist die tatsächlich verspürte Spannungsdifferenz bei gleicher Energiedichte im horizontalen Feld höher, und führt dementsprechend zu früherer Immobilisierung. Zudem ist bei einem horizontalen Feld eine deutlich höhere Streuung der Datenpunkte zu sehen. Dies kann ebenfalls darauf zurückgeführt werden, dass die Reaktion bei einem horizontalen Spannungsgradienten stark von der Schwimmrichtung des Fisches abhängt. Bei einem vertikalen Spannungsgradienten wirkt das Feld meist über die Höhe des Fisches da dieser normalerweise horizontal ausgerichtet schwimmt.

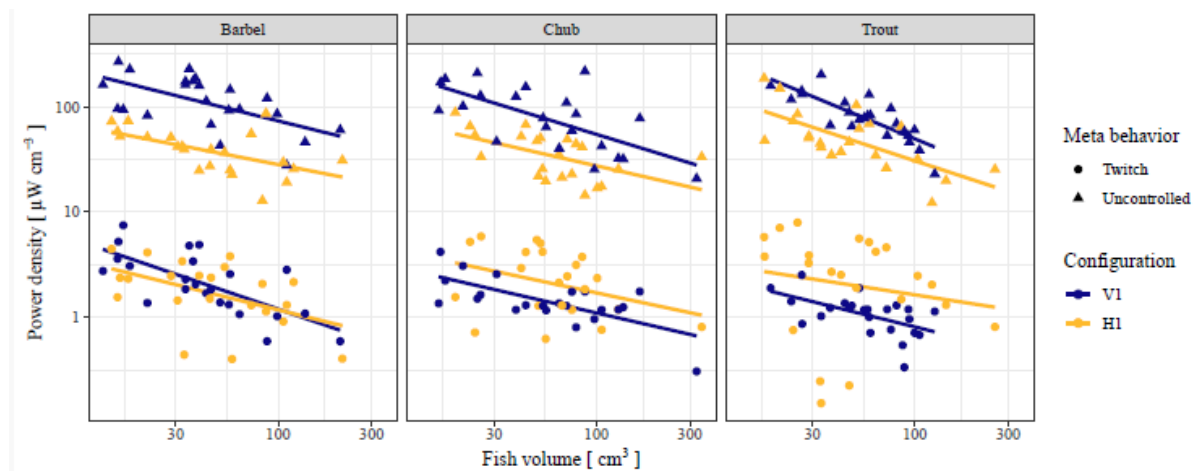


Abbildung 12: Vergleich der Reaktionen von Barben, Alet und Forellen für das Pulsmuster 2 ms, 10 Hz mit vertikalem Spannungsgradienten (V1) und horizontalem Spannungsgradienten (H1) für feine (*twitch*) und unkontrollierte (*uncontrolled*) Reaktionen.

Optimales Pulsmuster

Um zu bestimmen, welches Pulsmuster für elektrische Barrieren optimal geeignet ist, wurden folgende Kriterien angewandt:

- 1) Maximierung der Reaktionszeit
- 2) Minimierung der notwendigen Energiedichte, um eine feine Reaktion zu erzeugen

Da die Variabilität der Daten deutlich geringer ist als bei den Versuchen mit Aalen und hauptsächlich durch die Fischlänge erklärt werden kann, wurde dieses Kriterium hier nicht verwendet. Der Energieverbrauch, also das Produkt des Tastgrades (*duty cycle*) mit dem Grenzwert für *Twitch* ist für diese



Daten aufgrund der Abhängigkeit der Grenzwerte vom Fischvolumen ebenfalls wenig relevant. Im Gegensatz zu den Versuchen mit Aalen wurden auch bereits alle Pulsmuster mit einem Tastgrad grösser 0.04 aussortiert.

Maximierung der Reaktionszeit bedeutet möglichst viel Zeit für den Fisch, um auf das elektrische Feld zu reagieren, ohne dem Risiko einer Immobilisierung ausgesetzt zu sein. Dies ist äquivalent zur Maximierung des Abstandes zwischen dem Auftreten von feinen und unkontrollierten Fischreaktionen. Daher wurde für alle getesteten Konfigurationen die Fläche zwischen der auf die Versuchsdaten angepassten Kurve zwischen einer Fischvolumen von 12 bis 220 cm³ integriert. Tabelle 3 zeigt die resultierende Sortierung der Pulsmuster für alle getesteten Fischarten. V3 und VB2 sind für alle drei Fischarten unter den drei Pulsmustern, welche eine grosse Reaktionszeit aufweisen. V1 ist unter den drei besten für Forellen und Alet und an vierter Stelle für Barben und wird daher im Folgenden ebenfalls vertieft betrachtet. Um ein optimales Pulsmuster zu bestimmen, wurden Pulsmuster V1, V3 und VB2, welche die Reaktionszeit in Bezug auf das Auftreten von feinen Reaktionen maximieren, verglichen (Abbildung 13). Die ersten Reaktionen treten bei allen Fischarten für VB2 bei einer deutlich grösseren Energiedichte auf als für V1 und V3. Zwischen V1 (2 ms) und V3 (1 ms) besteht ein deutlich geringerer Unterschied, eine Pulslänge von 2 ms scheint aber vorteilhaft, da *Twitch* bei geringeren Feldstärken auftritt. Daher wird als Pulsmuster für elektrische Barrieren 2 ms, 10 Hz empfohlen. Versuche am Rechen wurden mit beiden Pulsmustern (1 ms, 10 Hz und 2 ms, 10 Hz) durchgeführt und es hat sich bestätigt, dass die Schutzwirkung bei 2 ms und 10 Hz besser ist. Ein direkter Vergleich von V1 und VB2 an einer ansonsten identischen Rechen-Versuchsanordnung wäre für die weitere Validierung wünschenswert.

Tabelle 3: Sortierung der getesteten Pulsmuster entsprechend der Reaktionszeit zwischen feinen und unkontrollierten Reaktionen.

Barbel				Chub				Trout			
Conf	R^2 Twitch	R^2 Unc	Reaction area	Conf	R^2 Twitch	R^2 Unc	Reaction area	Conf	R^2 Twitch	R^2 Unc	Reaction area
V5	0.308	0.497	4074.51	V5	0.164	0.625	4119.80	H1	0.032	0.477	5507.87
H1	0.235	0.324	4381.25	H1	0.125	0.291	4320.55	V5	0.224	0.804	6517.11
V4	0.753	0.399	6495.38	VB1	0.372	0.686	4787.17	VB1	0.338	0.676	7311.36
VB1	0.432	0.573	8954.56	V4	0.068	0.341	5617.06	V4	0.301	0.778	7977.55
V1	0.496	0.351	12357.9	V2	0.274	0.291	9264.44	V2	0.295	0.747	8122.62
V2	0.424	0.608	13453.6	V1	0.477	0.454	9820.98	V1	0.316	0.678	10267.3
V3	0.671	0.458	16255.5	VB2	0.311	0.638	11805.8	VB2	0.295	0.767	10848.7
VB2	0.587	0.554	21135.4	V3	0.438	0.208	12220.2	V3	0.405	0.830	12710.8

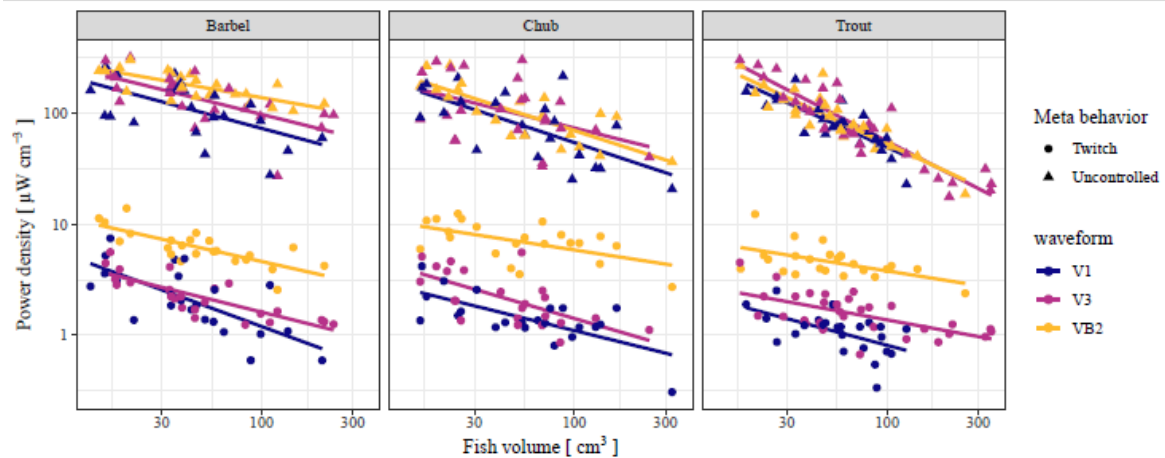


Abbildung 13: Vergleich von VB2 (Pulslänge 0.3 ms), V3 (Pulslänge 1 ms) und V1 (Pulslänge 2 ms) in Bezug auf das erste Auftreten von feinen Reaktionen (*twitch*) und unkontrollierten Reaktionen (*uncontrolled*).

3.3 Horizontalrechen

3.3.1 Versuchsprogramm

Die Versuchsanordnungen mit HBR sind in Tabelle 4 aufgeführt. Am Horizontalrechen wurden zwei Elektrifizierungsarten getestet. Elektrifizierung unter Verwendung jedes Rechenstabes alternierend als Anode und Kathode (E1, E2, C2) und Elektrifizierung unter Verwendung jedes zweiten Rechenstabs als Elektrode (C3-C6, E3, E4). Zur Determinierung der notwendigen Spannung, um eine zuverlässige Schutzwirkung zu erzielen, wurde mit tiefen Spannungen gestartet und graduell erhöht. Sofern innerhalb der ersten zwei Versuche (sechs Fische) mehr als zwei Rechenpassagen beobachtet wurden wurde eine höhere Spannung getestet, um auf vielversprechende Anordnungen zu fokussieren. Da die Versuche mit Aalen zuerst durchgeführt wurden und sich Aale als sehr sensitiv auf das elektrische Feld erwiesen haben, führt dieses Vorgehen zu einer maximalen Spannung bei Aalen von 8.5 V (C3/C4), 11.5 V für Alet (C5) und 15.5 V für Forellen (E4).



Tabelle 4: Versuchsanordnungen mit Horizontalrechen.

	Electrification	Pulse pattern	U [V]	U_0 [m/s]	N		
					Trout	Chub	Eel
C1	No electrification		0	0.60	16	22	
E1	Each bar electrified	2 ms, 10 Hz	1.7	0.30			8
E2			1.7	0.60			4
C2			2.7	0.30			23
C3			8.5	0.30			22
C4	Every second bar electrified	2 ms, 10 Hz	8.5	0.60			21
E3			1 ms, 10 Hz	10	2	3	
C5			1 ms, 10 Hz	11.5		26	
C6			1 ms, 10 Hz	13	21		
E4		1 ms, 10 Hz	15.5	0.60	3		

3.3.2 Elektrifizierung

Abbildung 14 zeigt das vorhandene elektrische Feld für die Anordnungen, welche mit Aalen getestet wurden. Abbildung 14a und b sind Anordnungen, wo die Rechenstäbe alternierend als Anode und Kathode verschaltet wurden, während in Abbildung 14c ein neutraler Stab dazwischengeschaltet ist und somit jeder zweite Stab als Anode und Kathode verschaltet wurde. Die damit einhergehende Erhöhung des Abstands zwischen Anode und Kathode führt zu einer grösseren Ausdehnung des elektrischen Feldes oberstrom des Rechens und somit zu einer besseren Schutzwirkung.

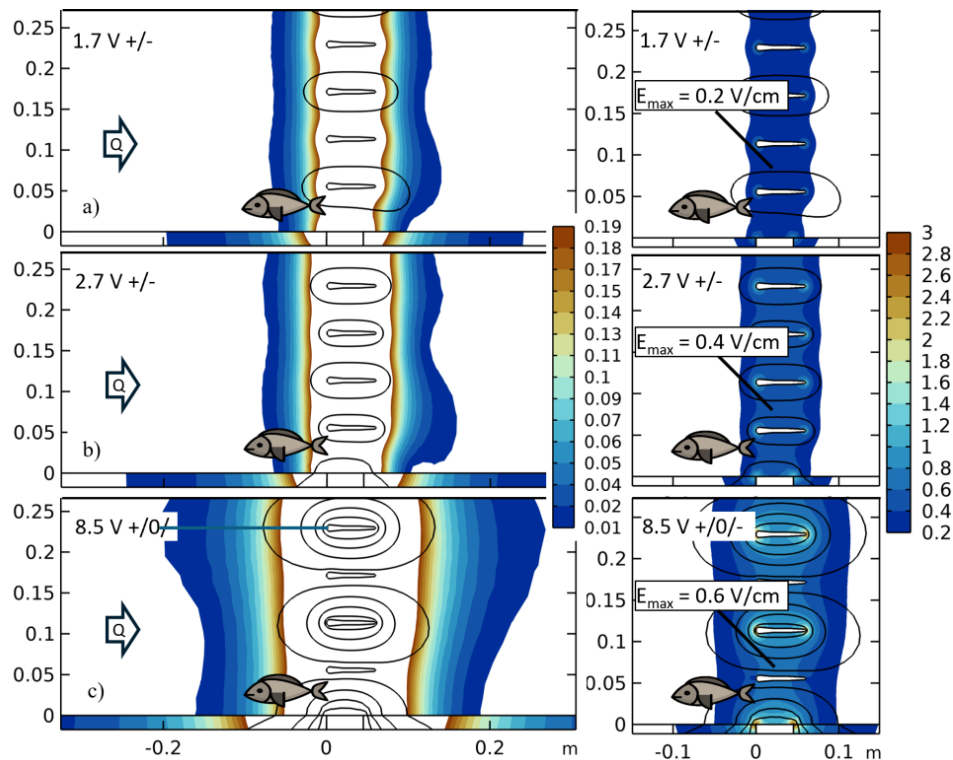


Abbildung 14: Elektrisches Feld in den Versuchen mit elektrifizierten Horizontalrechen und Aalen. a) und b) Alternierende Elektrifizierung der Rechenstäbe als Anode und Kathode. c) Elektrifizierung jedes zweiten Rechenstabes als Anode und Kathode. Die Skala auf der linken Seite zeigt geringe Feldstärken < 0.2 V/cm und die Skala auf der rechten Seite Feldstärken zwischen 0.2 und 3 V/cm.



3.3.3 Fischschutzeffizienz

Europäischer Aal

Tabelle 5 zeigt die getesteten Anordnungen sowie die Fischleiteffizienz (FGE) und Fischschutzeffizienz (FPE) am elektrifizierten HBR. Für eine sehr geringe angelegte Spannung von 2.7 V wurde eine geringe Schutzwirkung von 52% beobachtet. Obwohl keine Referenzversuche ohne Strom durchgeführt wurden, indiziert dies eine sehr geringe Schutzwirkung ohne Elektrifizierung. Die Erhöhung der Spannung auf 8.5 V und eine alternierende Elektrifizierung jedes zweiten Stabes führt zu einer Feldstärke von 0.8 – 1.1 V/cm zwischen den Stäben und einer Ausdehnung vor dem Rechen von 4 cm. Damit konnte die Schutzrate auf ~78- 80% erhöht werden, abhängig von der Anströmgeschwindigkeit.

Tabelle 5: Fischleiteffizienz (FGE) und Fischschutzeffizienz (FPE) für Europäische Aale (*eel*), Forellen (*trout*) und Alet (*chub*) am elektrifizierten HBR (e-HBR).

Configuration	FGE/FPE		
	Trout	Chub	Eel
C1: Ref, $U_0 = 0.60$	0%/6%	0%/5%	
C2: +/-, $U = 2.7V, U_0 = 0.30$			29%/50%
C3: +/-, $U = 8.5V, U_0 = 0.30$			52%/78%
C4: +/-, $U = 8.5V, U_0 = 0.60$			40%/80%
C5: +/-, $U = 11.5V, U_0 = 0.60$		38%/81%	
C6: +/-, $U = 13V, U_0 = 0.60$	17%/30%		

Alet

Wie erwartet konnte ohne Elektrifizierung keine Schutzwirkung des Rechens beobachtet werden (FPE = 5%). Aufgrund der Versuche im homogenen Feld wurden die Versuche mit Elektrifizierung mit 10 V gestartet, da Alet weniger sensibel auf Elektrizität reagieren als Aale. Hier konnte jedoch nur eine schwache Reaktion auf das elektrische Feld beobachtet werden und während der ersten zwei Versuche wurden, mehr als zwei Rechenpassagen beobachtet, weshalb die Versuchsreihe abgebrochen wurde. Mit 11.5 V war die Schutzwirkung höher und das Setup wurde mit 27 Fischen getestet. Die Schutzwirkung konnte auf 81% erhöht werden.

Forelle

Auch für Forellen konnte wie erwartet ohne Elektrifizierung mit einem Stababstand von 50 mm keine Schutzwirkung des Rechens beobachtet werden. Wie für die Alet wurden die elektrifizierten Versuche mit alternierender Elektrifizierung der Stäbe und 10 V gestartet. Da jedoch keine Reaktion auf die Elektrizität beobachtet werden konnte wurde die Spannung direkt auf 13 V erhöht. Auch diese Konfiguration wurde nach zwei Versuchen abgebrochen, da mindestens zwei Rechenpassagen beobachtet wurden. Anschliessend wurden zwei Versuche mit 15.5 V durchgeführt. Ein Fisch, welcher trotz dieser hohen Feldstärke durch den Rechen geschwommen ist, wurde anschliessend am unteren Ende des Kanals gegen das Gitter gedrückt aufgefunden. Er wies die typischen Anzeichen einer Tetanie mit Todesfolge, also eines Todes durch Elektrizität auf, was auch durch ein medizinisches Gutachten der Universität Zürich bestätigt wurde (Abbildung 15). Daher wurde diese Konfiguration abgebrochen und eine Spannung von 13 V für 28 Fische durchgetestet, um die Schutzwirkung für Forellen zu evaluieren. Für 13 V konnte eine Schutzwirkung von 30% erzielt werden, was eine Verbesserung gegenüber



dem nicht elektrifizierten Rechen darstellt. Allerdings ist dies weit von einem zuverlässigen Fischschutz entfernt.



Abbildung 15: Gestorbene Forelle beim e-HBR und 15.5 V.

3.4 Leitrechen mit gebogenen Stäben (*Curved Bar Rack*): CBR und f-CBR

3.4.1 Versuchsprogramm

Die Versuchsanordnungen mit CBR sind in Tabelle 6 aufgeführt. Am CBR wurden sowohl Referenzversuche ohne Elektrifizierung (C1, C2) als auch drei verschiedene Elektrifizierungsarten getestet:

- 1) Elektrifizierung des Rechens als Kathode mit einer zusätzlichen Elektrode entlang des Kanalbodens und der Wasseroberfläche. Diese Elektrifizierung wurde gewählt, um Elektroden auf der stromaufwärts gelegenen Seite des Rechens anbringen zu können, ohne in Konflikt mit einer Rechenreinigungsmaschine zu geraten.
- 2) Elektrifizierung der Stäbe alternierend als Anode und Kathode.
- 3) Verschaltung des Rechens als Kathode und Platzierung einer weiteren Reihe von Elektroden unterstrom.

Wie beim HBR wurden auch hier verschiedene Spannungen getestet. C7, wurde mit Spannungen von 5.5, 8 und 10.5 V mit Bachforellen getestet und jeweils aufgrund geringer Schutzwirkungen verworfen. C8 wurde mit einer geringeren Spannung von 17 V getestet, diese wurde anschliessend auf 38 V erhöht (C9 und C10).



Tabelle 6: Versuchsprogramm für den CBR und f-CBR. Versuche im Herbst 2020 (C3-C5) wurden mit dem CBR durchgeführt da der f-CBR zu diesem Zeitpunkt noch nicht entwickelt war. Das Pulsmuster mit einer Pulsdauer von 1 ms wurde verworfen, da für 2 ms bessere Schutzwirkungen beobachtet wurden.

Setup	Bar shape	$\alpha [^\circ]$ s_b [mm]	Electrode placement	Pulse pattern	U [V]	U_0 [m/s]	N		
							Trout	Chub	Eel
C1	f-CBR	30°, 50	No electrification		0	0.30			24
C2	f-CBR	30°, 50	No electrification		0	0.60		26	25
C3	CBR	30°, 50	Rack as electrode	2 ms, 10 Hz	40	0.15			25
C4	CBR	30°, 50	with electrified	2 ms, 10 Hz	40	0.30			23
C5	CBR	30°, 50	”top - and	2 ms, 10 Hz	40	0.60			20
C6	f-CBR	37°, 25	bottom overlay”	2 ms, 10 Hz	40	0.60	31		
C7	f-CBR	30°, 50	Bars used alternately as electrodes	1 ms, 10 Hz	13	0.60	25		
C8	f-CBR	30°, 50	Rack as electrode with	1 ms, 10 Hz	17	0.60	19		
C9	f-CBR	30°, 50	a row of electrodes	2 ms, 10 Hz	38	0.30	20		26
C10	f-CBR	30°, 50	downstream.	2 ms, 10 Hz	38	0.60	25		6

3.4.2 Elektrifizierung

Abbildung 16 zeigt das elektrische Feld für die Versuche C8-C10. Das elektrische Feld der anderen Versuchsanordnungen ist in Moldenhauer, (2025) publiziert. Während das elektrische Feld, welches durch alternierende Elektrifizierung der Rechenstäbe generiert wird, von der Ausrichtung, der Form und dem Abstand der Stäbe abhängig ist, ist das elektrische Feld, welches mittels einer unterstromigen Elektrodenreihe generiert wird, unabhängig von letzterem. Das elektrische Feld baut sich zwischen den Stäben und auf der unterstrom des Rechens gelegenen Seite auf. Somit ist der Einfluss auf die Leitwirkung möglichst gering. Zudem sind die Äquipotentiallinien parallel zum Rechen ausgerichtet. Ein Fisch, der den Rechen passieren will, ist also immer rechtwinklig zu den Äquipotentiallinien ausgerichtet, und somit wird eine reproduzierbare Wirkung des elektrischen Feldes erzielt.

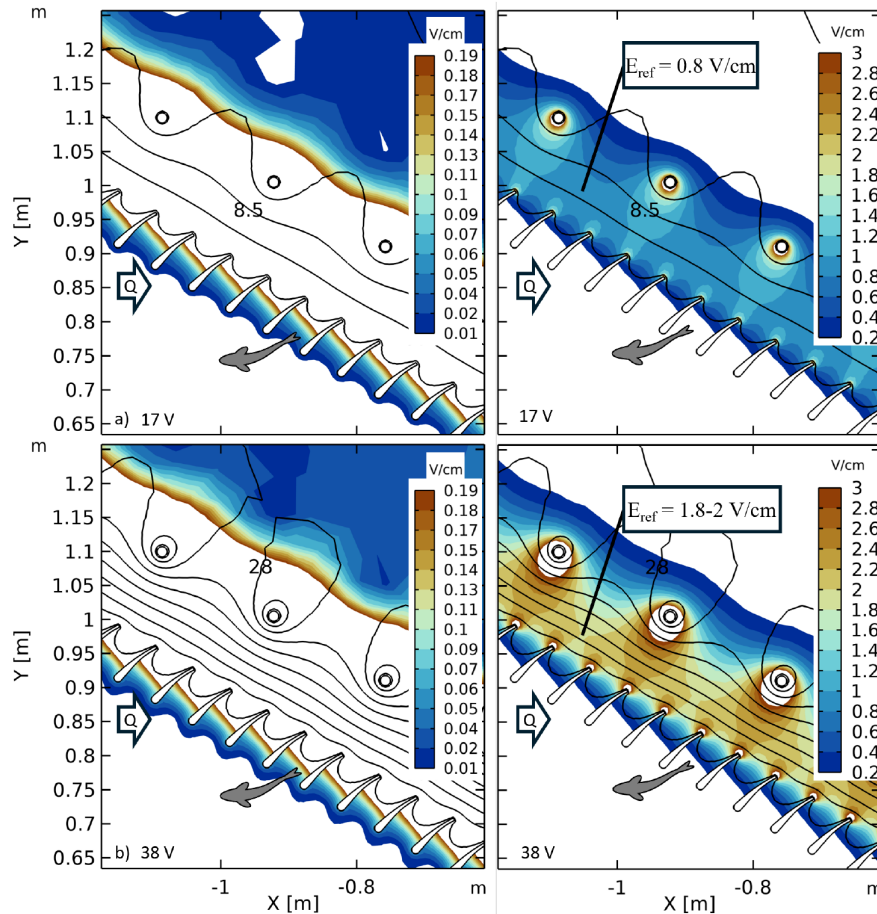


Abbildung 16: Elektrisches Feld bei Verwendung des f-CBR als Kathode und Platzierung einer Anode unterstrom. a) 17 V, C8 und b) 38 V, C9/C10

3.4.3 Fischschutz- und -leitwirkung

Alet

Bereits ohne Elektrifizierung konnte eine Schutzeffizienz von über 90% erzielt werden (Tabelle 7). Dies bestätigt die Resultate von Beck (2020), dass der CBR beziehungsweise f-CBR für Zypriniden sehr gut funktioniert. Die Leiteffizienz lag jedoch nur bei ca. 40%. Da die Schutzeffizienz bereits sehr hoch ist, wurde der f-CBR mit Alet nicht elektrifiziert getestet.



Tabelle 7: Fischleiteffizienz (FGE) und Fischschutzeffizienz (FPE) am f-CBR und CBR. Die Werte für FGE* und FPE* zählen zusätzlich Fische, welche entlang der Glasscheibe in den Bypass geschwommen sind als geschützt. Ref – Nicht elektrifizierter Rechen, OL – Vorgelagerte Elektrode entlang der Sohle und der wasser Oberfläche, Bars – Alternierende Elektrifizierung der Rechenstäbe und DS – Platzierung einer Reihe Elektroden unterstrom des Rechens.

Configuration	FGE, FPE			FGE*, FPE*			$N_{by,int}$ $N_{protected}$ N_{racks} $N_{by,direkt}$		
	Trout	Chub	Eel	Trout	Chub	Eel	Trout	Chub	Eel
C1: Ref, $U_0 = 0.30$ m/s			46%/ 63%			61%/ 73%			11/ 4/ 9/ 9
C2: Ref, $U_0 = 0.60$ m/s		38%/ 92%	52%/ 88%		38%/ 92%	57%/ 89%		10/ 14/ 2/ 0	13/ 9/ 3/ 3
C3: OL, $s_b = 50$ mm, $U_0 = 0.15$ m/s			60%/ 96%			63%/ 96%			15/ 9/ 1/ 2
C4: OL, $s_b = 50$ mm, $U_0 = 0.30$ m/s			61%/ 96%			73%/ 97%			14/ 8/ 1/ 10
C5: OL, $s_b = 50$ mm, $U_0 = 0.60$ m/s			60%/ 95%			72%/ 97%			12/ 7/ 1/ 9
C6: OL, $s_b = 25$ mm, $U_0 = 0.60$ m/s	32%/ 90%			38%/ 91%			10/ 18/ 3/ 3		
C7: Bars, $U_0 = 0.6$ m/s	48%/ 72%			59%/ 78%			12/ 6/ 7/ 7		
C8: DS, 17 V, $U_0 = 0.60$ m/s	29%/ 43%			52%/ 61%			6/ 3/ 10/ 10		
C9: DS, 38 V, $U_0 = 0.30$ m/s	20%/ 40%		62%/ 100%	36%/ 52%		71%/ 100%	4/ 4/ 12/ 5		16/ 10/ 0/ 8
C10: DS, 38 V, $U_0 = 0.60$ m/s	52%/ 68%		°	57%/ 71%		°	13/ 4/ 8/ 3		3/ 2/ 1/ 2

Aale

Am nicht elektrifizierten CBR mit 50 mm Stababstand und einer Anströmgeschwindigkeit von 0.5 m/s wurde eine FPE von unter 43% erzielt (Beck et al., 2020), dies allerdings mit einer geringen Anzahl an Versuchen mit nur 14 Recheninteraktionen. Für den nicht elektrifizierten f-CBR (C1) konnten in der hier durchgeführten Versuchsreihe deutlich bessere Schutzeffizienzen von 63% bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0.3 m/s und 88% bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0.60 m/s erzielt werden. Mithilfe einer Elektrifizierung mit Elektrode unterstrom (C9) konnte die FPE auf 100% gesteigert werden. Die FGE lag im Rahmen von 46% bis 62% (C1, C2, C9). Viele Aale befanden sich zum Versuchsende kurz oberhalb des Rechens und würden voraussichtlich bei längerer Versuchsdauer erneut nach einem Abstiegszug suchen. In einem Pilotprojekt kann daher eine höhere Leitwirkung erwartet werden. Versuche mit einer Elektrifizierung des Rechens mittels einer vorgelagerten Elektrode (C3-C5) führten ebenfalls zu sehr hohen Schutzraten von 95-96%, unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit. Da das elektrische Feld hier aber inhomogen ist über die Wassertiefe und sich Aale dem Rechen generell in Sohlhöhe angenähert haben, ist es unwahrscheinlich, dass sich diese Resultate auf grössere Rechen übertragen lassen.

Forelle

Der f-CBR wurde für Forellen mit zwei Stababständen getestet. Einerseits mit 50 mm und 25 mm zusätzlich im Rahmen des Pilotprojekts Herrentöbeli (Yang et al., 2025).

Für den mit einer geringen Spannung elektrifizierten f-CBR mit 50 mm Stababstand (C8) konnte nur eine sehr geringe Schutzwirkung von 43% beobachtet werden bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0.6 m/s. Diese hat sich bei einem Stababstand von 25 mm (C6) auf 70% erhöht.

Für den f-CBR mit 50 mm Stababstand wurden zwei Elektrifizierungen getestet. Eine alternierende Elektrifizierung der Stäbe führte zu einer deutlichen Erhöhung der Schutzwirkung auf 72%, bei 0.6 m/s (C7), allerdings ist diese Elektrifizierung in der Praxis aufgrund des Korrosionsrisikos schwierig umsetzbar.

Für die Elektrifizierung mittels Rechen als Kathode und unterstrom angelegten Anoden zeigt sich ein geschwindigkeitsabhängiges Bild. Die Kombination einer starken hydraulischen Signatur bei 0.6 m/s mit einer Anode unterstrom und einer Spannung von 38 V erzielte eine gute Schutzwirkung von 68% (C10). Bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0.3 m/s (C9), wo die hydraulische Signatur deutlich schwächer ist, ist die Schutzwirkung hingegen ungenügend. Dies zeigt, dass Forellen nur mit kombinierten Systemen zuverlässig geschützt werden können.



Die bereits gute Schutzwirkung des f-CBR mit 25 mm konnte durch die Platzierung einer Anode entlang der Gerinnesohle und Wasseroberfläche deutlich gesteigert werden auf 90% (C6). Diese Ergebnisse sind allerdings schwierig auf die Praxis zu übertragen, da das generierte elektrische Feld in einem Radius von 30 cm um die vorgelagerte Elektrode am stärksten ist und dies dem generellen Schwimmhorizont der Fische im Versuch entspricht.

3.5 Geschwemmselrechen

Die Resultate dieses Kapitels sind in (Moldenhauer-Roth et al. (, 2025) publiziert.

Moldenhauer-Roth, A.; Selz, O.M.; Albayrak, I.; Boes, R.M. (2025). Comparison of electrified vertical trash racks – electric field and effects on species-specific fish behaviours. *Journal of Ecohydraulics* (accepted)

3.5.1 Versuchsprogramm

Tabelle 8 zeigt das Versuchsprogramm am Geschwemmselrechen. Aufgrund der vorangehenden Versuche mit HBR und CBR wurde mit dem Geschwemmselrechen keine alternierende Elektrifizierung der Rechenstäbe getestet. Stattdessen wurde der Fokus auf die Elektrifizierung des Rechens als Kathode in Kombination mit einer Anode auf der unterstromigen Seite des Rechens gelegt (Anordnung a). Diese Versuchsanordnung führte zu sehr guten Schutzeffizienzen für Alet und Aale, Forellen liessen sich jedoch nicht von einer Rechenpassage abhalten. Daher wurde eine zusätzliche Elektrifizierung getestet, bei welcher Rundstäbe als Elektroden verwendet werden und entweder auf der Vorderseite der Rechenstäbe montiert werden (Anordnung b1) oder ohne die Kombination mit einem Rechen verwendet werden (Anordnung b2). Diese Anordnung wurde in zwei Verschaltungen der Elektroden getestet. Einerseits unter alternierender Verschaltung der Stäbe als Anode und Kathode und andererseits unter Verschaltung der Elektroden in Dreiergruppen.

Tabelle 8: Testprogramm am Geschwemmselrechen. Anordnung a) Elektrifizierung des Rechens als Kathode und Platzierung einer zusätzlichen Reihe von Elektroden auf der unterstromigen Seite des Rechens. Anordnung b1) Stabelektroden auf der Vorderseite der Rechenstäbe montiert und Anordnung b2) Individuelle Stabelektroden ohne Kombination mit Rechenstäben.

	Electrode geometry	Electrification	U	U_0	N_{active}		
			[V]	[m/s]	Trout	Chub	Eel
C1	Setup a: Rack as electrode with a row of electrodes downstream	Rack as	44	0.15	6	23	
C2		cathode, anode		0.30			24
C3		downstream		0.60		22	21
C4	Setup b1: Vertical rod electrodes mounted on the bars of a trash rack	+/-	150	0.15	25		
C5		+++/- - -		0.15	27		
C6	Setup b2: Vertical rod electrodes	+++/- - -	95	0.15		22	
C7				0.60	24	22	3

3.5.2 Elektrifizierung

Abbildung 17 zeigt die elektrischen Feldstärken für die Versuchsanordnungen C5 und C6/C7. Die restlichen Simulationen des elektrischen Feldes sind in (Moldenhauer-Roth , (2025) und; Moldenhauer-Roth et al., (2025) publiziert worden. Die Elektrifizierung von Stabelektroden führt zu einem elektrischen Feld mit einer grossen Ausdehnung von bis zu 1 m oberstrom des Rechens. Da Forellen sich dem Rechen oft mit negativer Rheotaxis annähern, haben sie so die Möglichkeit, eine 180° Wende zu vollziehen und vor einer Rechenpassage geschützt zu werden. Im Gegensatz zu Anordnung a), wo



die Äquipotentiallinien parallel zur Rechenebene sind (siehe Abbildung 16 für den CBR), ist das elektrische Feld, welches der Fisch verspürt, abhängig vom Ort, wo er sich dem Rechen annähert. Der graue Fisch in Abbildung 17 befindet sich direkt vor einem Wechsel zwischen Anoden und Kathoden. Somit sind die Äquipotentiallinien senkrecht zur Rechenebene platziert. Das elektrische Feld wird über die Körperbreite wahrgenommen. Der schwarze Fisch hingegen verspürt den Spannungsgradienten über seine Körperlänge und wird somit bei ansonsten gleicher Feldstärke eine stärkere Reaktion zeigen.

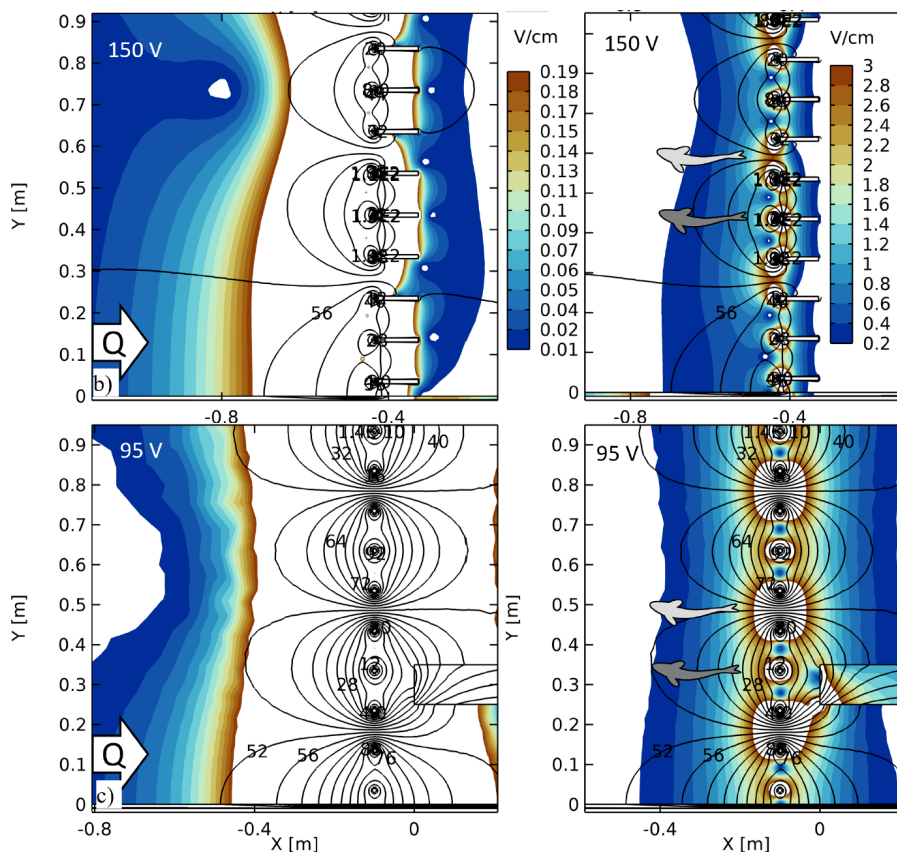


Abbildung 17: Elektrische Feldstärke bei Platzierung von Elektroden auf der Vorderseite der Rechenstäbe in einer Vertiefung (b), C5) und Verwendung von individuellen Rundstabelektroden (c), C6, C7). Beide elektrischen Felder führen zu einer grossen Ausdehnung vor dem Rechen, der Fisch ist allerdings unterschiedlichen Reizen ausgesetzt, je nachdem, wo er sich dem Rechen annähert.

3.5.3 Fischschutzwirkung

Aufgrund des grossen Stababstandes von 90 mm und dem Fehlen eines Bypasses kann davon ausgegangen werden, dass alle Fische, die zum Rechen schwimmen, diesen ohne Elektrifizierung auch passieren würden. Die getesteten Versuchsanordnungen und beobachteten Fischschutzeffizienzen sind in Tabelle 9 ersichtlich. Die Platzierung von Elektroden auf der Stabvorderseite (C4, C5) hat im Laborversuch aufgrund der vorhandenen Materialkombination (Aluminiumstäbe) zu Ablagerungen von Aluminiumoxid geführt. Das generierte elektrische Feld ist praktisch identisch bei der Verwendung von vertikalen Stäben (C6, C7). Daher wurde in einer zweiten Versuchsreihe mit dieser modifizierten Anordnung getestet.



Tabelle 9: Fischschutzeffizienz am Geschwemmselrechen. Anzahl geschützte Fische/ Anzahl Rechenpassagen (Berechnete Fischschutzeffizienz)

Configuration	Fish protection efficiency		
	Trout	Chub	Eel
C1: DS, 0.15 m/s	0/6 (*)	18/5 (78%)	
C2: DS, 0.3 m/s			22/2 (92%)
C3: DS, 0.6 m/s		21/1 (95%)	16/5 (76%)
C4: R, +/-, 0.15 m/s	9/16 (36%)		
C5: R, +++/- - -, 0.15 m/s	14/13 (52%)		
C6: VP, +++/- - -, 0.15 m/s		14/9 (61%)	
C7: VP, +++/- - -, 0.6 m/s	5/19 (21%)	16/5 (76%)	2/0 (**)

Alet

Alet reagieren allgemein sehr gut auf elektrische Reize. Die Schutzeffizienzen sind jedoch abhängig von der Anströmgeschwindigkeit beziehungsweise Rheotaxis bei Annäherung an den Rechen. Für eine Elektrifizierung mit dem Rechen als Kathode und einer Anode unterstrom (C1-C3) wurde bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0.6 m/s eine Fischschutzeffizienz von 95% erzielt. Bei einer geringeren Anströmgeschwindigkeit von 0.15 m/s von 78%. Es wurde eine klare Korrelation mit der Rheotaxis der Fische beobachtet. Bei 0.6 m/s nähern sich praktisch alle Alet dem Rechen mit positiver Rheotaxis. Sobald sie den elektrischen Reiz verspüren, flüchten sie gegen oberstrom. Bei 0.15 m/s nähern sich Alet mit wechselnder Rheotaxis. Dies führt zu der geringeren Schutzeffizienz.

Bei einer Platzierung der Elektroden auf der Stabvorderseite konnte dieselbe Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit festgestellt werden. Allerdings waren die Schutzeffizienzen allgemein geringer. Dies kann mit der Ausrichtung des elektrischen Feldes zusammenhängen. Bei einer Anordnung einer Anode unterstrom ist der Fisch immer rechtwinklig zu den Äquipotentiallinien angeordnet und spürt daher immer denselben elektrischen Impuls. Bei der Platzierung von Elektroden auf der Stabvorderseite kann sich ein Fisch parallel zu den Äquipotentiallinien ausrichten und somit einfacher den Rechen passieren.

Forellen

Die Schutzeffizienzen für Forellen waren für beide Elektrifizierungen sehr gering. Dies unterstreicht die Notwendigkeit eines kombinierten Schutzkonzepts aus hydraulischer Signatur (z.B. CBR) oder geringeren Stababständen kombiniert mit Elektrifizierung, um gute Schutzeffizienzen zu erzielen.

Aale

Die Elektrifizierung von existierenden Geschwemmselrechen ist für Aale ein sehr vielversprechender Ansatz, um die Schutzraten zu erhöhen. Eine Elektrifizierung mit Anoden unterstrom führte zu einer Schutzrate von 92% bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0.3 m/s und 76% bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0.6 m/s. Die leicht niedrigere Schutzrate bei 0.6 m/s kann darauf zurückgeführt werden, dass die kritische Schwimmgeschwindigkeit der getesteten Aale erreicht wurde, und diese Mühe hatten, vom Rechen wegzuschwimmen. In der Praxis können im Grundriss leicht zur Anströmrichtung schräggestellte Rechen eine Lösung sein, um die Normalgeschwindigkeit am Rechen zu reduzieren.

Die Platzierung von Elektroden auf der Stabvorderseite hat sich für Aale als ungünstig erwiesen. Bei erhöhten Anströmgeschwindigkeiten berühren sie beim Umdrehen/Wegschwimmen vom Rechen mit ihrem Körper sowohl Anoden als auch Kathoden. Dies führt zu einer Immobilisierung und Blockierung am Rechen. Eine solche Elektrifizierung ist in Aalgewässern demzufolge als sehr kritisch anzusehen.



und nur bei geringen Fließgeschwindigkeiten oder einem spitzen Winkel des Rechens zur Anströmrichtung ($\leq 30^\circ$) zielführend.

4 Schlussfolgerung und Fazit

Alle getesteten Fischarten (Aale, Schneider, Forellen) reagierten mit einer ausgeprägten Meidreaktion auf das elektrische Feld, auch wenn grosse artspezifische Unterschiede beobachtet wurden. Dies zeigt das grosse Potenzial der elektrifizierten Leitrechen als Fischschutzmassnahme. Es wurden vier Fragestellungen evaluiert:

4.1 Fischreaktion auf elektrische Reize: Alet, Barben, Bachforellen und Europäische Aale

Verschiedene Pulsparameter haben einen unterschiedlichen Effekt auf die Reaktion von verschiedenen Fischarten auf elektrische Felder. Um eine geringe Verletzungswahrscheinlichkeit zu gewährleisten, wurden Pulsmuster mit einer Frequenz < 30 Hz getestet. Um zu untersuchen, welches der getesteten Pulsmuster für die Anwendung an elektrifizierten Rechen am besten geeignet ist, wurde folgende Methodik angewandt:

1) Maximierung der Reaktionszeit des Fisches

Wenn ein Fisch sich dem Rechen annähert, ist es wünschenswert, dass er möglichst viel Zeit hat vom Moment an, wo er das erste Mal einen elektrischen Reiz verspürt, bis zum Moment, wo er nicht mehr schwimmfähig ist. Dies maximiert seine Fluchtmöglichkeiten und die Wahrscheinlichkeit einer kontrollierten Reaktion. Die Reaktionszeit wurde als Differenz der Energiedichte zwischen einer feinen und einer unkontrollierten Reaktion, integriert über die getesteten Fischvolumen, evaluiert und die getesteten Pulsmuster entsprechend geordnet.

2) Minimierung der notwendigen Energiedichte

Die Minimierung der Energiedichte bezieht sich auf die minimal nötige Spannung, welche an einer Sperre angelegt werden muss, um Fische sicher vor dem Einschwimmen zu bewahren. Diese Spannung sollte möglichst klein sein, um den Energieverbrauch klein zu halten, aber auch um das Verletzungsrisiko von Fischen und anderen Wasserlebewesen zu minimieren. Bei der Bewertung der verschiedenen Pulsmuster wurden die drei «besten» Pulsmuster aufgrund der Reaktionszeit miteinander verglichen, bei welchem Pulsmuster feine Reaktionen bei der geringsten Energiedichte auftreten.

Für alle vier Fischarten Alet, Barben, Forellen und Aale war dies jeweils bei 2 ms, 10 Hz der Fall.

Aus diesem Grund wurden die meisten Versuche mit elektrifizierten Rechen mit 2 ms, 10 Hz durchgeführt. Ein direkter Vergleich verschiedener Pulsmuster an einer ansonsten identischen Rechenanordnung wurde nicht durchgeführt.

4.2 Elektrifizierte Einlaufrechen mit einem Stababstand von 90 mm

Ein elektrifizierter Rechen mit einem grossen Stababstand von $s_b = 90$ mm wurde quer zur Strömung über die gesamte Breite des Versuchskanals installiert, und den Fischen stand kein alternativer Abstiegsweg (Bypass) zur Verfügung. Der nicht-elektrifizierte Rechen stellte keine physische Barriere dar und hatte weder hydraulisch noch visuell eine nennenswerte Schutzwirkung, so dass ohne Strom kein Schutz für die getesteten Fischarten gegeben war.

Systematische Lebendfischversuche wurden mit zwei unterschiedlichen Elektrodenanordnungen durchgeführt:

(1) Nutzung des Rechens als Elektrode mit einer zweiten Elektrodenreihe unterstrom des Rechens



(2) Stabelektroden, die entweder an der Vorderseite der Rechenstäbe oder einzeln angebracht wurden.

Es wurden Anströmgeschwindigkeiten von $U_0 = 0.15, 0.30$ und 0.60 m/s getestet.

Die artspezifische Fischschutzwirkung (FPE) zeigte eine hohe Variabilität. Sehr hohe Schutzwirkungen wurden für Alet und Europäische Aale bei Verwendung des Rechens als Elektrode kombiniert mit einer Elektrode unterstrom erzielt. Für Bachforellen wurden unabhängig von der Elektrodenkonfiguration hohe Durchgangsraten beobachtet. Daher ist für einen zuverlässigen Schutz dieser Art eine Kombination aus elektrischem Feld und stärkerer visueller sowie hydraulischer Wirkung des Rechens (z. B. kleinere Stababstände oder gebogene Stäbe) erforderlich.

4.3 Elektrifizierte Fischleitrechen mit gebogenen Stäben (f-CBR/CBR) mit einem Stababstand von 50 mm

Die Effizienz von elektrifizierten und nicht-elektrifizierten CBR und f-CBR in Kombination mit einem angrenzenden Bypass wurde in systematischen Lebendfischversuchen untersucht. Ein Stababstand von $s_b = 25$ und 50 mm wurde mit Alet, Europäischen Aalen und Bachforellen getestet.

Die Kombination aus einem f-CBR mit Elektroden unterstrom ist ein vielversprechendes System, um einen zuverlässigen Fischschutz für verschiedene Fischarten zu gewährleisten, sofern die Anströmgeschwindigkeiten ausreichend hoch sind. Bei moderaten Anströmgeschwindigkeiten $U_0 \leq 0.3$ m/s wurden FPE von bis zu 100% für Europäische Aale und Alet erreicht, während die FPE-Werte für Bachforellen niedrig waren.

Bei hohen Anströmgeschwindigkeiten $U_0 \geq 0.6$ m/s wurden moderate FPE-Werte für Bachforellen (68%) und hohe FPE-Werte für Zypriniden und Aale erreicht.

Ergänzende Versuche, bei denen eine Elektrode entlang des Flusskanalbodens stromaufwärts des f-CBR mit $s_b = 25$ mm kombiniert wurde, zeigten hohe FPE von bis zu 90% für Bachforellen.

Durch den geringen Stabanstand von $s_b = 25$ mm hatte dieser f-CBR ohne Strom für $U_0 = 0.15-0.6$ m/s eine relativ hohe Schutzwirkung mit FPE von 68% (Yang et al., 2025). Die Elektrifizierung mit einer Elektrode entlang des Kanalbodens erzeugte jedoch ein elektrisches Feld, das über die Wassertiefe sehr inhomogen ist und daher schwer auf variable Wassertiefen und höhere Rechen zu skalieren ist.

4.4 Elektrifizierte Horizontalrechen (HBR) mit einem Stababstand von 50 mm

Referenztests ohne Strom bestätigten das Fehlen einer Schutzwirkung des Rechens mit FPE = 5–6% für Bachforellen und Alet. Der Rechen wurde elektrifiziert, indem die Rechenstäbe abwechselnd als Anoden und Kathoden verschaltet wurden, mit einem neutralen, nicht verschalteten Stab in der Mitte. Dadurch entsteht ein elektrisches Feld, das stromaufwärts des Rechens eine relativ geringe Ausdehnung hat, aber bei sehr niedrigen angelegten Spannungen zwischen den Stäben eine hohe Feldstärke aufweist. Es reagiert sehr empfindlich auf kleine Änderungen der angelegten Spannungen (1–2 V). Bei einer Spannung von 15.5 V führte eine Rechenpassage zu tödlichen Verletzungen einer Forelle. Diese Versuchsreihe wurde im Anschluss abgebrochen. Umgekehrt wurde bei einer nur geringfügig kleineren Spannung von 13 V eine niedrige FPE von 30% für Bachforellen beobachtet, sodass 16 Forellen den Rechen ohne äusserlich sichtbare Verletzungen passierten.

Hohe Fischschutzraten FPE $\geq 80\%$ wurden für Alet und Europäische Aale bei niedrigeren angelegten Spannungen von 8.5 und 11.5 V und $U_0 = 0.3$ und 0.6 m/s beobachtet. Diese Ergebnisse bestätigen die artspezifischen Unterschiede in der Reaktion auf elektrische Felder. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit gegenüber kleinen Spannungsänderungen und des damit einhergehenden Verletzungsrisikos wird diese Art der Elektrifizierung nicht empfohlen für den Einsatz in Pilotprojekten. Andere getestete



Elektrifizierungen wie die Platzierung einer Reihe Elektroden unterstrom des Rechens oder Stabelektroden auf der Vorderseite der Rechenstäbe sind jedoch auch in Kombination mit Horizontalrechen vielversprechende Fischschutzsysteme.

4.5 Empfehlungen für die Praxis

Je nach Zielfischart, Stababstand, Anströmbedingungen und Rechentyp sind unterschiedliche Elektrifizierungen zielführend. Empfehlungen für geeignete Feldstärken und Elektrodenpositionierung finden sich in (Moldenhauer-Roth, (2025, Engineering application).

5 Ausblick

Um diese Technologie weiterzuentwickeln und ihren Einsatz zur Verbesserung des Fischschutzes an Wasserkraftwerken zu ermöglichen, sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich. Insbesondere die untenstehend aufgeführten Themen verdienen eine weitere Untersuchung. Die einzelnen Punkte sind in (Moldenhauer-Roth, (2025) im Detail beschrieben.

- Direkter Vergleich von verschiedenen Pulsmustern an einer ansonsten identischen Rechen-Versuchsanordnung in Bezug auf Fischschutzwirkung und Verletzungsrisiko für verschiedene Fischarten
- Korrosionsrisiko von verschiedenen Stromarten und Strategien zur Vermeidung von Korrosion bei Verwendung von gepulstem Gleichstrom
- Notwendige minimale Feldstärke, um bei der Verwendung von gepulstem Wechselstrom eine gute Fischschutzwirkung zu gewährleisten.
- Verletzungsrisiko von gepulstem Wechselstrom und gepulstem Gleichstrom
- Einfluss des Stababstandes auf die Schutzwirkung von verschiedenen Fischarten bei vergleichbaren elektrischen Feldstärken
- Einfluss von Fließgeschwindigkeiten $> 0.6 \text{ m/s}$ auf die Schutz- und Leitwirkung
- Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers auf die Fischschutzwirkung und die Verletzungswahrscheinlichkeit
- Erweiterung des Kenntnisstandes für Bachforellen, Alet und Europäische Aale sowie Versuche mit weiteren Fischarten wie z.B. Lachse und Barben

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. Das Wissen insbesondere zum artspezifischen Verhalten hinsichtlich Geschwindigkeitsgradienten und elektrischen Gradienten und der Interaktion von hydraulische, visuellen und elektrischen Reizen ist weiterhin ungenügend.

Aufgrund der europäischen Wasserrahmenrichtlinie und des Schweizerischen Gewässerschutzgesetzes wird das Thema «Fischleitsysteme an Wasserkraftanlagen» weiterhin von Bedeutung sein, um die Fischdurchgängigkeit 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.



6 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Im Projekt waren neben der VAW keine weiteren Partner direkt involviert. Während der Projektdauer wurde aber ein kontinuierlicher Wissensaustausch mit internationalen Forschungseinrichtungen, Herstellern elektrischer Barrieren sowie Wasserkraftbetreibern und Ingenieurbüros in der Schweiz angestrebt. Insbesondere fand ein regelmässiger Austausch zum aktuellen Forschungsstand mit der Universität Innsbruck (HyFish) statt. In Zusammenarbeit mit Fähr AG, Glarus wurde die Umsetzbarkeit verschiedener Elektrodenkonfigurationen an Wasserkraftanlagen in der Schweiz evaluiert. Weiterer Austausch fand unter anderem mit Procom Inc. und Smith-Root Inc. statt. Im Rahmen zweier Webinare, organisiert durch WA21, wurden lokale und internationale Akteure über den aktuellen Forschungsstand informiert.

7 Kommunikation/ Vorträge

- 13.04.2021, Webinar Wasser Agenda 21: Leitrechen-Bypass-Systeme für einen sicheren Fischabstieg – Stand der Forschung, <https://www.youtube.com/watch?v=D20CBlpj5Yw>.
- 30.04.2021, Bericht im regionalen Fernsehsender Teletop: https://video.toonline.ch/news/video/fokus/20210430_fokus.mp4.
- 17.05.2021, Beitrag im 10 vor 10: <https://www.srf.ch/play/tv/10-vor-10/video/10-vor-10-vom-17-05-2021?urn=urn:srf:video:849a0493-d287-45db-8152-3712f945f9d8&startTime=1083>.
- 29.04.2022, Electrified fish guidance racks, FishPath Workshop, ETHZ, Zurich, Switzerland.
- Moldenhauer-Roth, A., Selz, O. M., Keller, M., Albayrak, I., & Boes, R. (2022). Fish behavioral responses to direct current pulse patterns for use at electric barriers. *Fish Passage Conference 14-17. June 2022, Richland, US*. Aufnahme des Vortrags: <https://www.youtube.com/watch?v=bjHztDpJZs0>, bei 6:33:00.
- 22.09.2023, Elektrifizierte Stabrechen. *Workshop – Lösungen für Fischschutz und Fischabstieg*, Universität Innsbruck, Innsbruck, Österreich.
- 30.01.2024, Electrified inlet racks – protecting downstream moving European Eel at large run-off-river hydropower plants, *Ecohydraulics Day*, ETHZ, Zurich, Switzerland.
- 20.03.2024, Webinar Wasser Agenda 21, Sanierung des Fischabstiegs an Wasserkraftanlagen mittels elektrifizierter Rechen – Stand der Forschung und erste Praxiserfahrungen <https://www.youtube.com/watch?v=tMzByvR1TVI>.
- Moldenhauer-Roth, A., Selz, O. M., Albayrak, I., & Boes, R. (2024). Electrified) curved bar racks for safe downstream fish passage – A promising solution to improve protection and guidance for a wide range of fish species. *Fish Passage Conference*, May 5-9, 2024, Québec City, Canada, Mündliche Präsentation.
- Moldenhauer-Roth, A., Selz, O. M., Albayrak, I., & Boes, R. (2024). Mechanical behavioral (electrified) fish guidance structures for the protection of downstream moving eel. *10th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Junior Researcher Workshop*, June 20, 2024, Zurich Switzerland, Mündliche Präsentation.



8 Publikationen

8.1 Konferenzen

Moldenhauer-Roth, A., Selz, O.M., Unterberger, F., Albayrak, I., Boes, R.M. (2022). Development of Low-Voltage Electrified Fish Guidance Racks for Safe Downstream Fish Migration. *In Proc. of the 39th IAHR World Congress*, 19–24 June 2022, Granada, Spain, 1256-1265, doi://10.3850/IAHR- 39WC2521716X202292.

Moldenhauer-Roth, A., Selz, O. M., Albayrak, I., Boes, R. M. (2023). Retrofitting trash racks with electricity to protect downstream moving fish. *Proceedings of the 40th IAHR World Congress*, 21-25 August 2023, Vienna, Austria (pp. 1268-1277). https://doi.org/10.3850/978-90-833476-1-5_iahr40wc-p0512-cd.

Moldenhauer-Roth, A., Lambert, D., Müller, M., Albayrak, I., Lauener, G. (2023). Improving fish protection and downstream movement at the Maigrauge Dam (Switzerland) using an electric barrier. *Role of Dams and Reservoirs in a Successful Energy Transition: Proceedings of the 12th ICOLD European Club Symposium 2023 (ECS 2023, Interlaken, Switzerland, 5-8 September 2023) (1st ed.)* (Boes, R., Droz, P., & Leroy, R., Eds.). CRC Press: 540-547. <https://doi.org/10.1201/9781003440420>.

8.2 Wissenschaftliche Fachzeitschriften

Meister, J., Moldenhauer-Roth, A., Beck, C., Selz, O.M., Peter, A., Albayrak, I., Boes, R.M. (2021). Protection and Guidance of Downstream Moving Fish with Electrified Horizontal Bar Rack Bypass Systems. *Water*, 13(19), 2786, <https://doi.org/10.3390/w13192786>.

Moldenhauer-Roth, A., Selz, O.M., Albayrak, I., Boes, R.M. (2024). Behavioral response of Chub, Barbel and Brown trout to pulsed direct current electric fields. *Journal of Ecohydraulics*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/24705357.2024.2426806>.

Moldenhauer-Roth, A., Selz, O.M., Boes, R.M., Albayrak, I. (2025). Comparison of electrified vertical trash racks – electric field and effects on species-specific fish behaviours. *Journal of Ecohydraulics*, 1-27. <https://doi.org/10.1080/24705357.2025.2541277>.

8.3 Dissertation

Moldenhauer-Roth, A. (2025). *Electrified fish guidance and intake racks for safe downstream fish passage at water intakes*. VAW-Mitteilung (R. Boes, ed.), Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, ETH Zurich, Switzerland. <https://vaw.ethz.ch/das-institut/publikationen/vaw-mitteilungen/2020-2029.html>

9 Literaturverzeichnis

Albayrak, I., Boes, R. M., Kriewitz-Byun, C. R., Peter, A., & Tullis, B. P. (2020). Fish guidance structures: hydraulic performance and fish guidance efficiencies. *Journal of Ecohydraulics*, 5(2), 113–131. <https://doi.org/10.1080/24705357.2019.1677181>



- BAFU. (2022). Wiederherstellung der Fischwanderung. Gute Praxisbeispiele für Wasserkraftanlagen in der Schweiz (Restoration of fish migration. Good practice examples for hydropower plants in Switzerland). In *Umwelt-Wissen Nr. 2205*. Bundesamt für Umwelt (BAFU). www.bafu.admin.ch/uw-2205-d
- Beck, C. (2020a). *Fish protection and fish guidance at water intakes using innovative curved-bar rack bypass systems* (R. M. Boes, Ed.). VAW-Mitteilung 257.
- Beck, C. (2020b). *Fish protection and fish guidance at water intakes using innovative curved-bar rack bypass systems*. VAW-Mitteilung 257 (R. Boes, Ed.), Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, ETH Zurich, Switzerland. <https://vaw.ethz.ch/das-institut/publikationen/vaw-mitteilungen/2020-2029.html>
- Beck, C., Albayrak, I., Meister, J., Peter, A., Selz, O. M., Leuch, C., Vetsch, D. F., & Boes, R. M. (2020). Swimming Behavior of Downstream Moving Fish at Innovative Curved-Bar Rack Bypass Systems for Fish Protection at Water Intakes. *Water*, 12(11), 3244. <https://doi.org/10.3390/w12113244>
- Boes, R. M., & Albayrak, I. (2017). Fish Guidance Structures : New Head Loss Formula and Fish Guidance. *Proc. of the 37th IAHR World Congress Kuala Lumpur, Malaysia*, 6865(1), 2495–2501.
- Ebel, G. (2018a). *Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen : Handbuch Rechen- und Bypasssysteme ; Ingenieurbilogische Grundlagen ; Modellierung und Prognose ; Bemessung und Gestaltung* (Vol. 4). Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel.
- Ebel, G. (2018b). *Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen : Handbuch Rechen- und Bypasssysteme ; Ingenieurbilogische Grundlagen ; Modellierung und Prognose ; Bemessung und Gestaltung (Fish protection and downstream fish migration at hydropower plants : Manual on trash rack and bypass systems ; Biological engineering principles ; Modelling and prediction ; Dimensioning and design)* (Vol. 4). Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel.
- Friard, O., & Gamba, M. (2016). BORIS : a free, versatile open-source event-logging software for video/audio coding and live observations. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(11), 1325–1330. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12584>
- Gruber, R. (2019). Traun-Kraftwerk Danzermühl nimmt planmässig den Betrieb auf. *ZEK Hydro*, 17(3), 22–27.
- Meister, J. (2020). *Fish Protection and Guidance at Water Intakes with Horizontal Bar Rack Bypass Systems* (R. M. Boes, Ed.). VAW-Mitteilung 258.
- Meister, J., Moldenhauer-Roth, A., Beck, C., Selz, O. M., Peter, A., Albayrak, I., & Boes, R. M. (2021a). Protection and Guidance of Downstream Moving Fish with Electrified Horizontal Bar Rack Bypass Systems. *Water (Switzerland)*, 13(19), 2786. <https://doi.org/10.3390/w13192786>
- Meister, J., Moldenhauer-Roth, A., Beck, C., Selz, O. M., Peter, A., Albayrak, I., & Boes, R. M. (2021b). Protection and Guidance of Downstream Moving Fish with Electrified Horizontal Bar Rack Bypass Systems. *Water*, 13(19), 2786. <https://doi.org/10.3390/w13192786>
- Moldenhauer-Roth, A. (2025). *Electrified fish guidance and intake racks for safe downstream fish passage at water intakes*. VAW-Mitteilung (R. Boes, Ed.), Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, ETH Zurich, Switzerland. <https://vaw.ethz.ch/das-institut/publikationen/vaw-mitteilungen/2020-2029.html>
- Moldenhauer-Roth, A., Selz, O. M., Albayrak, I., & Boes, R. M. (2023). Retrofitting Trash Racks with Electricity to Protect Downstream Moving Fish. *Proceedings of the IAHR World Congress*, 1269–1277. https://doi.org/10.3850/978-90-833476-1-5_jahr40wc-p0512-cd
- Moldenhauer-Roth, A., Selz, O. M., Albayrak, I., & Boes, R. M. (2024). Behavioural response of chub, barbel and brown trout to pulsed direct current electric fields. *Journal of Ecohydraulics*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/24705357.2024.2426806>



- Moldenhauer-Roth, A., Selz, O. M., Albayrak, I., & Boes, R. M. (2025). Comparison of electrified vertical trash racks – electric field and effects on species-specific fish behaviours. *Submitted to Journal of Ecohydraulics*.
- Rümmeler, F., Schreckenbach, K., Göthling, U., & Schiewe, S. (2004). Auswirkungen des Elektrofischfangs auf Fische und Wirbellose. *Österreichs Fischerei*, 166–170.
- Snyder, D. E. (2003). *Electrofishing and its harmful effects on fish*. Information and Technology Report U.S. Geological Survey USGS/BRD/ITR--2003-0002.
- Yang, F., Moldenhauer-Roth, A., Marschall, Y., Vetsch, D. F., Selz, O. M., Zeng, Y., Boes, R. M., & Albayrak, I. (2025). A curved-bar rack- bypass system with innovative foil shaped bars: hydraulics, operational aspects, and swimming behavior of downstream moving brown trout. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2024WR038354>
- Zielinski, D. P., McLaughlin, R., Castro-Santos, T., Paudel, B., Hrodey, P., & Muir, A. (2019). Alternative Sea Lamprey Barrier Technologies: History as a Control Tool. *Reviews in Fisheries Science and Aquaculture*, 27(4), 438–457. <https://doi.org/10.1080/23308249.2019.1625300>