



Ökologische Auswirkungen innovativer und konventioneller Wasserkraftanlagen – Ergebnisse aus 10 Jahren Forschung

Jürgen Geist · Josef Knott · Joachim Pander

Angenommen: 2. August 2024
 © The Author(s) 2024

Zusammenfassung In der vorliegenden Studie wurden über einen Zeitraum von 10 Jahren neun Wasserkraftanlagen mit unterschiedlichen innovativen und konventionellen Kraftwerkstechnologien hinsichtlich ihrer direkten Auswirkungen auf passierende Fische (z. B. Mortalität und Verletzungen) und ihrer Auswirkungen auf den Lebensraum und die Zusammensetzung der aquatischen Lebensgemeinschaft untersucht. Die Ergebnisse aus dem Projekt machen deutlich, dass der Fischabstieg über Wasserkraftanlagen, unabhängig von der Kraftwerkstechnologie, teils erhebliche Fischschädigungen verursachen kann. Die installierten Feinrechen mit lichten Weiten kleiner oder gleich 20 mm konnten einen maßgeblichen Anteil der Fische aus dem natürlichen Fischabstieg nicht effizient von der Turbinenpassage abhalten. Die Identifikation von Turbinentechnologien mit geringerem Verletzungsrisiko für Fische und von effektiveren Ableitstrategien in verletzungsfreie Korridore hat daher eine große Bedeutung für einen erfolgreichen Fischschutz an Wasserkraftanlagen. Bei Fischschutz- und Fischabstiegssystemen ist die Gestaltung und Bemessung sowie deren räumliche Lage zum Kraftwerk entscheidend für ihre Funktionalität bzw. Ableiteffizienz. Darüber hinaus sind Kenntnisse der gewässerspezifischen, tages- und jahreszeitlichen Muster im Fischabstieg für ein ökologisch verträgliches Management von Wasserkraftanlagen von

großer Bedeutung. Neben der Wahl einer potenziell fischverträglicheren Turbinentechnologie kann in geeigneten Fällen ergänzend durch ein gezieltes betriebliches Management ein höherer Fischschutz erreicht werden.

An jedem der in diesem Projekt untersuchten Standorte belegten die Ergebnisse zu den ökologischen Auswirkungen der Kraftwerksanlagen, dass das Fließgewässerkontinuum durch die Kraftwerksanlage bzw. das jeweilige zugehörige Querbauwerk stark unterbrochen wird. Die Installation der verschiedenen Typen innovativer Wasserkraftanlagen hat, entgegen den Versprechungen der Entwickler dieser innovativen Konzepte, die Lebensraumbedingungen für strömungsliebende Arten nicht verbessert. Im Gegenteil, die Nachrüstung bestehender Wehre in Verbindung mit einer Erhöhung des Stauziels hat die Auswirkungen der Unterbrechung des Fließgewässerkontinuums sogar noch deutlich verstärkt und die Lebensraumbedingungen für strömungsliebende Arten im staubeinflussten Oberwasser der Wasserkraftanlagen weiter verschlechtert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass viele der derzeitigen Annahmen zu den erwarteten ökologischen Verbesserungen durch den Einbau innovativer Wasserkraftanlagen nicht zutreffen und unter bestimmten Standortvoraussetzungen und Betriebsweisen sogar größere ökologische Schäden als beim Betrieb konventioneller Wasserkraftanlagen auftreten können. Die Studie liefert wichtige Hinweise, welche Anlagentypen und Betriebsweisen unter welchen Standortbedingungen eine Reduktion von Fischschädigungen und negativen Auswirkungen auf die Lebensräume ermöglichen, was insbesondere bei der Modernisierung bestehender Anlagen zu deutlichen ökologischen Verbesserungen führen kann.

Schlüsselwörter Erneuerbare Energien · Wasserkraft ·

Durchgängigkeit · Fischschädigung · Ökologische Effekte · Wasserrahmenrichtlinie

Ecological effects of innovative and conventional hydropower plants – results from 10 years of research

Abstract In the present study, nine hydropower plants with different innovative and conventional hydropower plant technologies were assessed over a period of 10 years regarding their direct effects on passing fish (e.g. mortality and injuries) and their effects on the habitat and the aquatic community composition. The results of the project clearly demonstrate that the downstream passage of fish via hydropower plants can cause considerable fish damage, regardless of the hydropower plant technology. The installed fine screens with bar spacing of less than or equal to 20 mm could not efficiently prevent a large proportion of the naturally downstream moving fish from passing through the turbines. The identification of turbine technologies with a lower fish injury risk and more effective bypass strategies into hazard-free corridors is therefore of great importance for successful fish protection at hydropower plants. For fish protection and downstream bypass systems, the design, the dimensioning and their spatial location to the hydropower plant are decisive for their functionality and efficiency. In addition, knowledge of the river-specific, daily and seasonal fish downstream movement patterns is of great importance for an ecologically less harmful management of hydropower plants. In addition to installing a less harmful turbine technology, a higher level of fish protection can also be achieved through optimised operational management.

At each of the sites investigated in this project, the results on the ecological effects of the hydropower plants showed that the river continuum is

Prof. Dr. J. Geist (✉) · Dr. J. Knott ·
 Dr. J. Pander
 Lehrstuhl für Aquatische
 Systembiologie, Technische
 Universität München,
 Mühlenweg 22, 85354 Freising,
 Deutschland
geist@tum.de

Dr. J. Knott
josef.knott@tum.de

Dr. J. Pander
joachim.pander@tum.de

severely disrupted by the hydropower plant or the associated transverse structure. Contrary to the promises made by the developers of these innovative concepts, the installation of the various types of innovative hydropower plants has not improved the habitat conditions for rheophilic species. Conversely, retrofitting existing weirs in conjunction with an increase in the damming target has significantly increased the effects of the interruption of the river continuum and further deteriorated the habitat conditions for rheophilic species in the areas upstream of the hydropower plants.

The results of the investigations show that many of the current assumptions regarding the expected ecological improvements through the installation of innovative hydropower plants do not hold true and that, under certain site-specific conditions and operation modes, even greater ecological damage can occur than when operating conventional hydropower plants. The study provides important information on which hydropower plant types and operation modes under which site-specific conditions enable a reduction in fish damage and negative impacts on habitats, which can lead to significant ecological improvements, particularly when retrofitting existing hydropower plants.

Keywords Renewable energy · Hydropower · Fish passage · Fish injury · Ecological effects · Water framework directive

1 Bedeutung der Wasserkraft

Zur Erreichung internationaler Ziele des Klimaschutzes und des Ausbaus erneuerbarer Energien spielt auch die Wasserkraftnutzung als grundlastfähige Form der Energieerzeugung eine wichtige Rolle. Investitionen in Wasserkraftanlagen sind meist von großer Tragweite, da entsprechende Installationen oftmals für deutlich mehr als 50 Jahre Bestand haben. Während in der Vergangenheit beim Ausbau der Wasserkraftnutzung meist ökonomische Ziele im Vordergrund standen, so fließen heute vermehrt auch ökologische Ziele, meist mit Fokus auf den Fischschutz, bei der Entscheidungsfindung ein (Geist 2021). Gerade vor dem Hintergrund des Rückgangs von Fischpopulationen (Mueller et al. 2018) und der weitgehenden Verfehlung der gesteckten Ziele der

Europäischen Wasserrahmenrichtlinie eines „guten ökologischen Zustands“ bzw. „guten ökologischen Potenzials“ in stark überformten Gewässern, spielt beim Ausbau und der Modernisierung von Wasserkraftanlagen die Auswahl von Technologien, die eine möglichst geringe Schädigung der Populationen von Gewässerlebewesen und ihren Lebensräumen nach sich ziehen, eine zentrale Rolle.

In den letzten Jahren gab es verschiedene Neu- und Weiterentwicklungen von Wasserkraft-Technologien, die oft unter dem Begriff „innovative Wasserkraft“ zusammengefasst werden. Seitens der Hersteller wird oftmals auch der Begriff „fischfreundliche Wasserkraft“ verwendet, der allerdings impliziert, dass der Einbau entsprechender Anlagen zu einer Verbesserung der Fischökologie und nicht nur zu einer Verminderung negativer Auswirkungen führen würde. Zu den prominenten innovativen Wasserkraftanlagen zählen u. a. das bewegliche Kraftwerk, die Wasserkraftschnecke, die VLH-Turbine und das Schachtkraftwerk.

Ziel eines im Rahmen des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz finanzierten und vom Bayerischen Landesamt für Umwelt begleiteten Forschungsprojekts war es, verschiedene innovative und nachgerüstete konventionelle Wasserkraftanlagen auf ihre ökologischen Auswirkungen zu untersuchen. Hierbei wurden die direkte Fischschädigung bei der Anlagenpassage sowie Auswirkungen der Anlagen auf die Habitatqualität und die aquatische Lebensgemeinschaft betrachtet.

In diesem Artikel fassen wir die wesentlichen Erkenntnisse aus 10 Jahren Forschung zu innovativen und konventionellen Wasserkraftanlagen am Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie der Technischen Universität München zusammen, deren Details bereits in internationalen und öffentlich zugänglichen Publikationen mit Peer-Review-Verfahren veröffentlicht wurden (siehe Literaturverzeichnis).

2 Methodik

In der vorliegenden Studie wurden neun Wasserkraftanlagen (acht Standorte mit jeweils einer Kraftwerksanlage, ein Standort mit zwei verschiedenen Kraftwerksanlagen) mit unterschiedlichen Kraftwerkstechnologien untersucht (Abb. 1). Es handelt sich einer-

seits um innovative Wasserkraftanlagen (VLH-Turbine, Wasserkraftschnecke, Schachtkraftwerk und das bewegliche Kraftwerk) sowie andererseits um konventionelle Anlagen mit Kaplan-Rohrturbine und Konzepten zum Fischschutz und Fischabstieg. Für eine umfassende ökologische Bewertung der verschiedenen Wasserkraftanlagen wurden die direkten Auswirkungen auf abwärts wandernde oder driftende Fische (Nutzung der Abstiegskorridore, Barrierefunktion von Fischschutzrechen, Fischschädigung, physikalische Bedingungen bei der Turbinenpassage und Fischverhalten vor der Wasserkraftanlage) und die Auswirkungen auf den Lebensraum und die aquatische Lebensgemeinschaft untersucht.

2.1 Nutzung der Abstiegskorridore und Barrierefunktion von Fischschutzrechen

Um den Fischabstieg an den untersuchten Wasserkraftanlagen möglichst vollumfänglich zu erfassen, wurden die verschiedenen Abstiegskorridore für Fische (Turbinen, technische oder naturnahe Fischaufstiegsanlagen und Bypasssysteme wie Spülrippen, Spülklappen oder oberflächen- bzw. sohlennahe Abstiegsfenster) mittels Netzfangeinrichtungen beprobt. Dabei wurden sowohl natürlicher Weise abwandernde Wildfische als auch Versuchsfische bekannter Kondition in die Untersuchungen einbezogen. Je nach standörtlichen Gegebenheiten wurden ein bis zwei Hamen pro Turbine in die U-Profile der Revisionsverschlüsse am Turbinenauslauf eingesetzt. Ein Hamen ist ein sich trichterförmig verjüngender Netzsack mit abnehmender Maschenweite, an dessen Ende sich ein Fangnetz, Steertreuse genannt, befindet (zu Details und Aufbau siehe Pander et al. 2018, Smialek et al. 2021). Dazu wurden umfangreiche Vorversuche am Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie der Technischen Universität München durchgeführt, bei denen verschiedene Fangtechniken hinsichtlich Effizienz und Fischverträglichkeit verglichen wurden, wobei sich die verwendeten Fangeinheiten am geeignetsten erwiesen (Pander et al. 2018). Der Fischabstieg über technische und naturnahe Fischaufstiegsanlagen wurde mit Hamen bzw. Reusen erfasst. Für die Beprobung von Spülrippen, Spülklappen und Abstiegsfenstern wurden jeweils

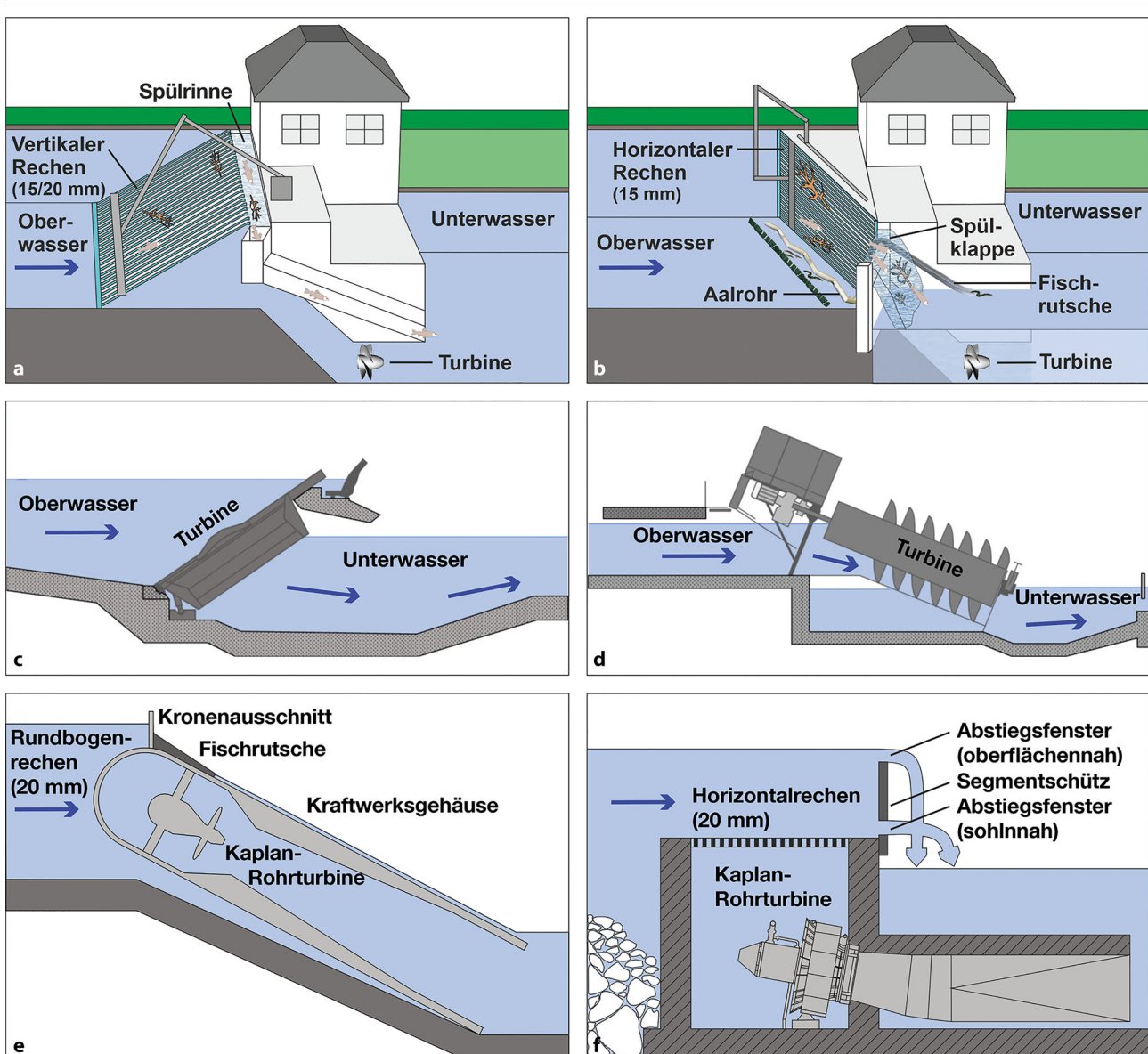


Abb. 1 Schemata der untersuchten konventionellen und innovativen Kraftwerkstechnologien. (a) konventionelle Wasserkraftanlage mit Kaplan-Rohrturbine, zur Sohle geneigtem Vertikalrechen und oberflächennahem Bypass (Spülrinne), (b) konventionelle Wasserkraftanlage mit Kaplan-Rohrturbine und zur Flussachse geneigtem Horizontalrechen, oberflächennaher Abstiegsoffnung (Spülklappe) sowie Aalrohr mit Fischrutsche, (c) VLH-Turbine, (d) Wasserkraftschnecke, (e) bewegliches Kraftwerk mit Kaplan-Rohrturbine, Rundbogenrechen mit vertikalen Stäben und oberflächennahem Bypass (Kronenausschnitt in Abschwemmklappe), (f) Schachtkraftwerk mit Kaplan-Rohrturbine und horizontaler Einlaufebene mit integriertem Horizontalrechen sowie sohl- und oberflächennahen Fischabstiegsöffnungen in überströmten Segmentschützen. Blaue Pfeile kennzeichnen die Fließrichtung

individuelle trichterförmige Fangsäcke konstruiert.

Der natürliche Fischabstieg wurde jeweils im Frühjahr und im Herbst an insgesamt 312 Versuchstagen verteilt auf die acht Untersuchungsstandorte (25–49 Versuchstage je Standort) beprobt. Die Netzleerungen erfolgten in der Regel alle zwei Stunden und wurden gleichmäßig auf die erste Tageshälfte (Sonnenaufgang bis 12:00 Uhr), die zweite Tageshälfte (12:00 Uhr bis

Sonnenuntergang), die erste Nachthälfte (Sonnenuntergang bis 00:00 Uhr) und die zweite Nachthälfte (00:00 Uhr bis Sonnenaufgang) verteilt.

2.2 Fischschädigung

Um die potenzielle Schädigung (Mortalität und Verletzungen) von Fischen bei der Turbinenpassage zu ermitteln, erfolgten jeweils im Frühjahr und im Herbst Versuche mit stan-

dardisierten Fischzugaben der Arten Aal (19,6–71,4 cm), Nase (3,5–29,7 cm), Bachforelle (2,9–42,0 cm), Flussbarsch (4,1–25,8 cm), Barbe (4,0–37,4 cm), Rotauge (4,2–21,7 cm), Äsche (4,8–30,0 cm) und Huchen (7,0–60,0 cm). Diese Versuche wurden bei unterschiedlichen Turbinenlastzuständen durchgeführt. Im Gegensatz zu Schadensbildern bei Wildfischen, die aufgrund von möglichen Vorschädigungen nicht einer spezifischen Anlage und spezifischen

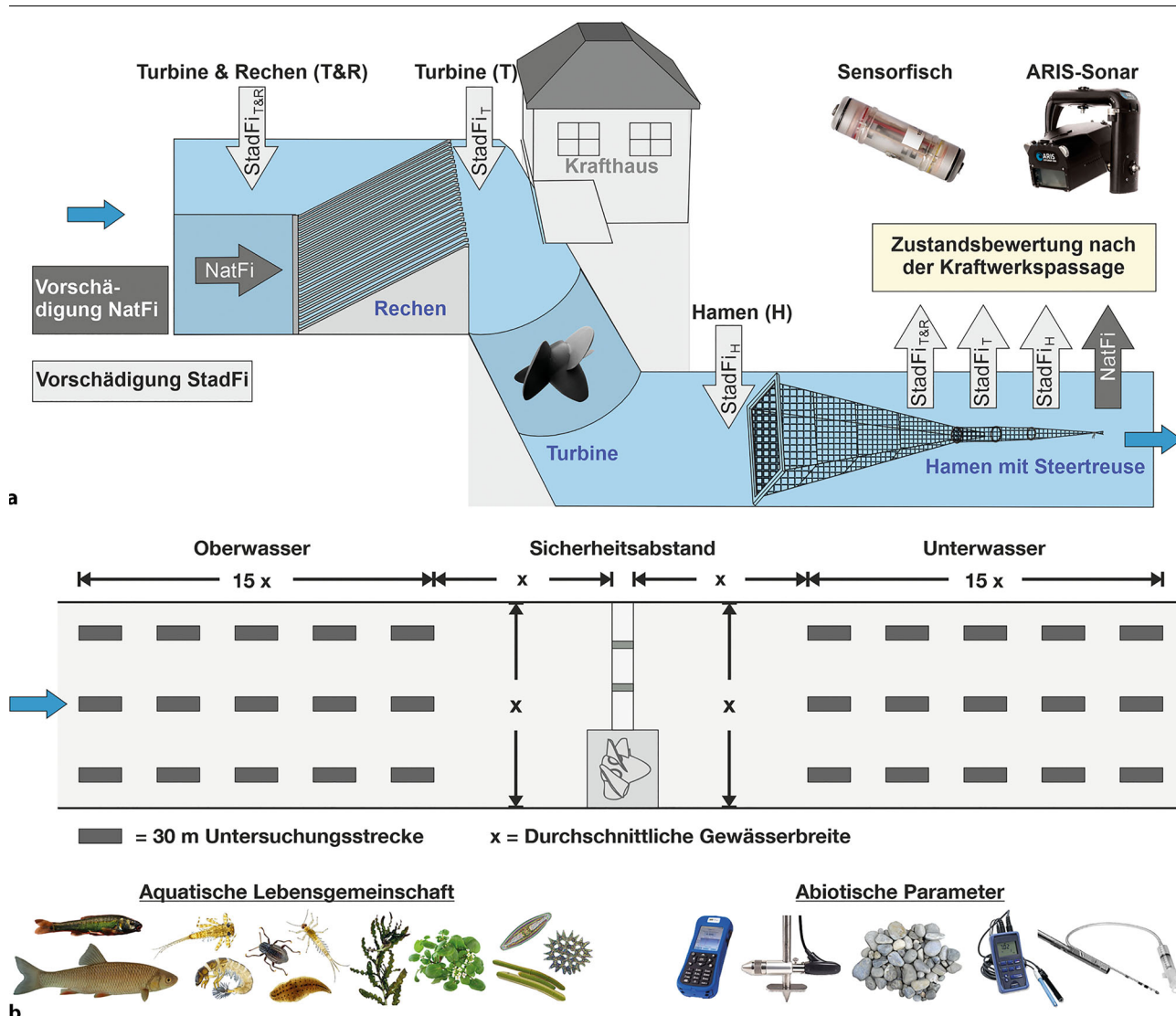


Abb. 2 a Schematische Darstellung der verschiedenen Zugabe- und Entnahmestellen für Fische des natürlichen Fischbestands (NatFi) und aus den standardisierten Fischzugaben (StadFi), abgeändert nach Mueller et al. (2017). T&R Passage der Fische durch Turbine und Rechen bei Fischzugabe oberhalb des Rechens, T Passage der Fische durch die Turbine bei Fischzugabe zwischen Rechen und Turbine, H Kontrollgruppe an Fischen, die nur den Hamen passiert haben, b schematische Darstellung des Untersuchungsdesigns zur Bewertung der aquatischen Lebensgemeinschaft und abiotischer Parameter im Ober- und Unterwasser der untersuchten Wasserkraftanlagen, abgeändert nach Mueller et al. (2011). (Die blauen Pfeile in (a) und (b) kennzeichnen die Fließrichtung)

Anlagenteilen zugeordnet werden können, konnten durch dieses Versuchsdesign auch genaue Vergleiche zwischen Fischen nach der Passage unterschiedlicher Anlagenteile mit dem genau charakterisierten Vorher-Zustand erfolgen. Die Fischzugaben erfolgten soweit möglich an drei Stellen (Abb. 2a): oberhalb des Rechens (Versuchsgruppe „Turbine & Rechen“), unmittelbar vor der Turbine (Versuchsgruppe „Turbine“) und am Eingang des Hamens unterhalb des Kraftwerks (Kontrollgruppe „Hamen“). Dadurch konnte gezielt zwischen dem Einfluss des Rechens

und der Turbine sowie fangbedingten Verletzungen differenziert werden. Die Netzleerungen erfolgten in der Regel stündlich. Die wiedergefangenen Fische wurden auf ihre äußeren Verletzungen untersucht und zur Berechnung der Mortalitätsraten herangezogen. Um ein möglichst naturnahes Verhalten der Versuchsfische zu ermöglichen, wurde darauf verzichtet, diese durch Scheuchmaßnahmen zum Abstieg zu veranlassen. Stattdessen wurde bei der Fallzahlplanung berücksichtigt, dass ein Teil der besetzten Fische im Oberwasser verbleibt und möglicherweise nicht ab-

steigen wird. Anhand von Stichproben (insgesamt 12.903 Fische) wurde zudem vor Beginn der Versuche untersucht, ob und mit welchen Vorschädigungen die Versuchsfische aus den Fischzuchten und nach dem Transport am Standort eintrafen. Die in den Ergebnissen dargestellten Mortalitätsraten bei den standardisierten Fischzugaben beinhalten sowohl die sofortige als auch die verzögerte Mortalität innerhalb von 96 h nach der Hamenleerung und sind bereits um handling- und fangbedingte Effekte (Kontrollgruppe „Hamen“) korrigiert (Mueller et al. 2022). Wäh-

rend der Untersuchungen wurden dreimal täglich die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Wassers im Hauptstrom (Temperatur, Sauerstoffkonzentration, Leitfähigkeit, pH-Wert und Trübung) sowie die Strömungsgeschwindigkeiten am Rechen und an den Hamen gemessen.

Die äußerlich sichtbaren Verletzungen der Fische wurden mit einem standardisierten Protokoll erfasst. Mit dieser Methode lässt sich für jeden Fisch ein Verletzungsmuster aus 86 Kombinationen von möglichen Verletzungstypen (z. B. Schuppenverluste, Quetschungen, Amputationen), betroffenen Körperteilen (z. B. Kopf, Körper, Flossen) sowie fünf allgemeinen Gesundheitskriterien (Vitalität, Atemfrequenz, Ernährungszustand, Verpilzung und Parasiten) dokumentieren (Mueller et al. 2017). Gegenstand der Untersuchungen waren auch innere Verletzungen der Fische. Zu diesem Zweck wurden von einer Stichprobe an Fischen (insgesamt 11.154 Individuen) Röntgenbilder mittels Kontaktradiographie erstellt. Wie bei den äußerlich sichtbaren Verletzungen erfolgte die Auswertung der Röntgenbilder mit einem standardisierten Protokoll (Mueller et al. 2020). Zur Bestimmung der verzögerten Mortalität wurden die Fische getrennt nach Arten und Versuchsgruppen über maximal 96 h in wassergefüllten Becken, die ständig mit Frischwasser aus dem jeweiligen Untersuchungsgewässer durchströmt wurden, gehältert und täglich kontrolliert.

2.3 Physikalische Bedingungen

Die physikalischen Bedingungen, die bei der Passage der Kraftwerke auf die Fische einwirken, wurden mittels sogenannter „Sensorfische“ untersucht. Ein Sensorfisch ist ein autonomes Messgerät, das Beschleunigung, Rotation, Druck und Temperatur direkt während der Turbinenpassage bzw. der Passage alternativer Korridore messen und aufzeichnen kann (Deng et al. 2007). Die Ergebnisse der Sensorfisch-Messungen erlauben Rückschlüsse darauf, welchen Kräften und Ereignissen – wie Druckabfällen, Kollisionen und starken Turbulenzen – die Fische während der Passage von Turbinen und alternativen Korridoren ausgesetzt sind (Boys et al. 2018).

2.4 Fischverhalten

Um das Fischverhalten im Oberwasser der Wasserkraftanlagen zu untersuchen, wurde ein hochfrequentes Multibeam-Sonar verwendet (ARIS Explorer 3000). Die Sonartechnik ist für die Erfassung von Fischbewegungen vor Wasserkraftanlagen besonders gut geeignet, da sie unabhängig von Wassertrübung, Lichtverhältnissen sowie Wassertiefe arbeitet (Egg et al. 2018). Das ARIS-Sonargerät wurde beispielweise während der Wanderung von Blankaalen eingesetzt, um die Funktionalität eines Aalbypasses und das zeitweilige Öffnen des Leerschützes als alternative Managementoption für den Aalabstieg zu überprüfen (Egg et al. 2017). Weiterhin wurde das ARIS-Sonargerät während der Untersuchungsperioden im Frühjahr und Herbst eingesetzt, um das Verhalten von standardisiert zugegebenen Versuchsfischen und von natürlich absteigenden Fischen am Fischschuttrechen des Turbineneinlaufs zu untersuchen (Funk et al. 2024).

2.5 Bewertung des Lebensraums

Zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen auf den Lebensraum Fluss wurden die Zusammensetzung der aquatischen Lebensgemeinschaft sowie abiotische Umweltfaktoren im Ober- und Unterwasser der Wasserkraftanlagen untersucht (Knott et al. 2024). Wasserkraftanlagen schränken die Durchwanderbarkeit eines Gewässers ein (Fragmentierung), beeinflussen aber auch wichtige Habitateigenschaften des Fließgewässers. Der Aufstau des Flusses verlangsamt die Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser und erhöht die Wassertiefe. Dadurch verändert sich auch die Substratzusammensetzung: Im Staubereich lagert sich verstärkt Sediment an, der Geschiebetransport wird unterbunden oder stark eingeschränkt. Der Einbau von Turbinen kann die Habitateigenschaften an einem bereits bestehenden Querbauwerk weiter verändern. Das Wehr wird nach dem Kraftwerksbau in der Regel nicht mehr auf der gesamten Breite überströmt, da sich der Abfluss auf die Turbinenseite konzentriert. Diese Veränderungen können sich auf die aquatische Lebensgemeinschaft auswirken. Ziel der Untersuchungen war es, die Auswirkungen der Unterbrechung des Fließgewässerkontinuums (serielle Diskontinuität) sowie Lebensraumverän-

derungen nach dem Bau der jeweiligen Kraftwerke im Vergleich mit den Vorher-Bedingungen (Querbauwerk ohne Kraftwerk) zu charakterisieren und zu quantifizieren.

Die Gewässerabschnitte wurden zu diesem Zweck im unmittelbaren Ober- und Unterwasser jeweils vor und nach dem Kraftwerksbau mit einem standardisierten Versuchsdesign systematisch untersucht (Mueller et al. 2011): Standardmäßig wurden das Ober- und Unterwasser in mehrere Längsspuren eingeteilt, in denen wiederum einzelne Untersuchungsstrecken mit einer Länge von je 30 m verteilt lagen (Abb. 2b). An den innovativen Kraftwerksstandorten fanden die Beprobungen in der Regel an jeweils zwei Terminen im Frühjahr und im Sommer/Herbst vor dem Bau des Kraftwerks und nach dem Bau des Kraftwerks statt. Zur Charakterisierung der Habitateigenschaften in den verschiedenen Gewässerabschnitten wurden in jeder Untersuchungsstrecke folgende abiotische Parameter erfasst: Wassertiefen, Strömungsgeschwindigkeiten, physikalisch-chemische Eigenschaften (Sauerstoffkonzentration, Temperatur, pH-Wert, Leitfähigkeit, Redoxpotenzial) im Freiwasser und im Porenwasser des Interstitials (Kieslückensystems), und Sedimentqualität (Substratzusammensetzung und flächige Verteilung der Substrattypen).

Für eine aussagekräftige Charakterisierung des Lebensraums ist es wichtig, zusätzlich zu den abiotischen Messungen möglichst viele Ebenen biologischer Organisation zu betrachten. Sie reagieren teilweise unterschiedlich auf veränderte Habitateigenschaften. Untersucht wurden daher folgende taxonomische Gruppen: Periphyton (Aufwuchsalgen am Gewässergrund), Makrophyten (Wasserpflanzen), Makrozoobenthos (am Gewässergrund lebende wirbellose Kleintiere) und Fische.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Nutzung der Abstiegskorridore und Barrierefunktion von Fischschuttrechen

Die meisten Fische, die die Anlagen während der Untersuchung des natürlichen Fischabstiegs passierten, gehörten, abgesehen von Arten wie Barbe und Äsche, zu eher kleinwüchsigen Arten. Insgesamt hatten kleinwüchsige Fischarten bzw. junge Altersstadien mit

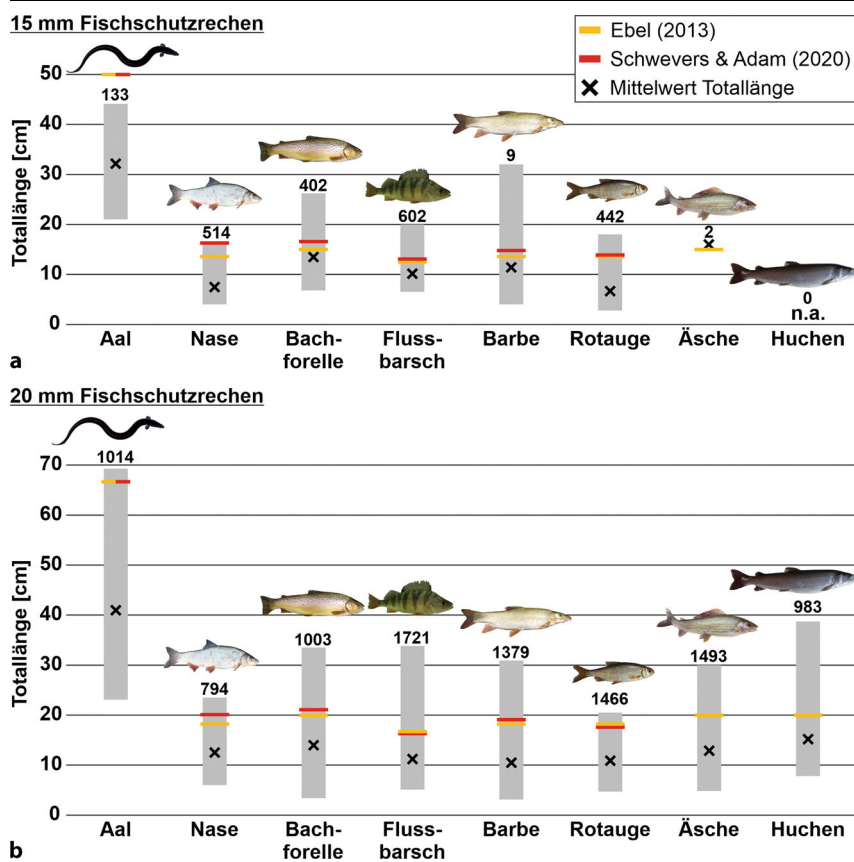


Abb. 3 Totallängen der acht am häufigsten gefangenen Wild- und Versuchsfischarten, die die untersuchten Fischschutzrechen mit 15 mm (a) und 20 mm (b) Stababstand passierten. (Farbige Balken symbolisieren die maximale artspezifische Totallänge nach Ebel (2013) (orange) und Schwevers und Adam (2020) (rot), bis zu der ein Fisch physikalisch in der Lage sein sollte, einen Fischschutzrechen mit 15 mm bzw. 20 mm Stababstand zu passieren)

einer Totallänge von ≤ 15 cm einen Anteil von 92 % am Gesamtfang des natürlichen Fischabstiegs. Die starke flussabwärts gerichtete Verbreitung dieser Fischarten bzw. -größen durch aktive Wanderung oder passive Drift wurde bislang offensichtlich deutlich unterschätzt (Pander et al. 2013). Dies deutet darauf hin, dass auch diese Arten und speziell kleine Fischgrößen stärker in die Überlegungen zum Fischschutz an Kraftwerksanlagen einbezogen werden müssen.

Über alle Standorte hinweg war die mittlere Zahl der gefangenen Fische nachts (6 Fische pro Stunde) doppelt so hoch wie tagsüber (3 Fische pro Stunde). Eine deutliche Präferenz für einen Abstieg bei Nacht wurde dabei für die Arten Barbe, Mühlkoppe, Zander, Elritze und Nase beobachtet. Eine Präferenz für einen Abstieg bei Tageslicht war weniger deutlich ausgeprägt, wurde aber tendenziell für die Arten Rotfeder,

Schneider und Laube festgestellt (Knott et al. 2020). Über alle Standorte war die mittlere Zahl der gefangenen Fische pro Untersuchungsstunde im Herbst (6 Fische) deutlich höher als im Frühjahr (2 Fische). Allerdings bevorzugten die einzelnen Fischarten unterschiedliche Jahreszeiten für den Abstieg. Während im Herbst verstärkt die Arten Rotaugen, Hasel, Flussbarsch, Nase, Zander, Äsche und Elritze gefangen wurden, wurden im Frühjahr vor allem Rotfeder, Blaubandbärbling, Gründling, Kaulbarsch, Schleie und Rutte in größerer Individuenzahl als im Herbst in den Fangrichtungen der Abstiegskorridore nachgewiesen (Knott et al. 2020).

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass auch die installierten Fischschutzrechen an den Standorten Lindesmühle, Baiersdorf-Wellerstadt, Eixendorf, Großweil und Höllthal (mit geneigten Vertikal- und Horizontalrechen bzw. Rundbogenrechen und

lichten Stabweiten von 15 und 20 mm) einen maßgeblichen Anteil der Fische nicht effizient von der Turbinenpassage abhalten konnten. Dies ist zu großen Teilen darauf zurückzuführen, dass es sich bei den Fischen, die die Turbinen passierten, überwiegend um kleine Fischarten bzw. junge Altersstadien handelt, für die die Rechenanlagen physisch passierbar waren.

An allen Standorten mit Fischschutzrechen ≤ 20 mm wurden jedoch auch größere Individuen in den Turbinenhamen nachgewiesen, welche die kritischen Körperlängen nach Ebel (2013) und Schwevers und Adam (2020) deutlich überschritten. Insbesondere bei den Fischarten Huchen (Eixendorf, Großweil und Höllthal), Bachforelle (Eixendorf) und Barbe (Großweil) kam es zu deutlichen Überschreitungen der kritischen Körperlängen für die angenommene Passierbarkeit eines Fischschutzrechen mit 20 mm Stababstand zwischen 65 und 94 % (Knott et al. 2023a). Die untersuchten Fischschutzrechen mit 15 und 20 mm Stababstand konnten von adulten Barben, Bachforellen und Flussbarschen bis zu einer Totallänge von 32 cm (15 mm) bzw. 34 cm (20 mm) passiert werden. Darüber hinaus konnten die 20 mm-Fischschutzrechen von Huchen bis 39 cm Totallänge passiert werden (Abb. 3). Dies war zum einen auf Abweichungen vom nominalen Stababstand, größere Öffnungen zwischen dem Rechen und dem Betonbauwerk (z. B. Spalt zwischen Betonwand und Rechen in Eixendorf und Großweil) oder Schäden am Rechen zurückzuführen. Zum anderen lassen sich die Abweichungen von der Modellierung zu den Ergebnissen dieser Studie auch dadurch erklären, dass die Kondition einzelner Fische je nach Ernährungszustand und Fortpflanzungsaktivität variieren kann, sodass sich Körperbreite und -höhe sogar bei gleichen Totallängen innerhalb einer Art unterscheiden können. Ein weiterer Grund für die Abweichungen von den Modellen ist, dass beispielsweise in Ebel (2013) identische Schwellenwerte für die Salmoniden Bachforelle, Äsche und Huchen angenommen wurden. Die Ergebnisse dieser Studie zeigten jedoch, dass deutlich größere Huchen als Bachforellen und Äschen die Fischschutzrechen passieren konnten, was wahrscheinlich auf Unterschiede in Morphologie und Verhalten dieser Arten zurückzuführen ist. So haben Huchen in den untersuchten Größen-

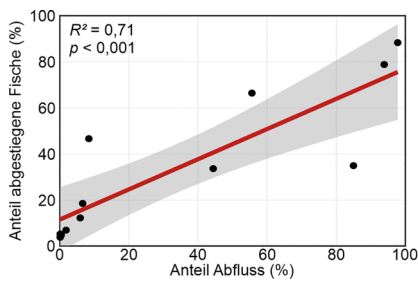


Abb. 4 Anteil der abgestiegenen Fische pro Abstiegskorridor (Turbinen & Bypässe) als Funktion des Anteils des jeweiligen Korridorabflusses (Wertespanne 0,1–97,8 %) im Verhältnis zum Gesamtabfluss. Der graue Bereich kennzeichnet das 95 %-Konfidenzintervall

klassen bei gleicher Gesamtlänge meist eine geringere Körperbreite als Bachforellen (Knott et al. 2023a). Zudem können sich neben dem Aal vermutlich auch weitere Fischarten durch Öffnungen quetschen, die kleiner als deren maximale Körperbreite sind.

Trotz vorhandener Bypässe und Fischschutzrechen mit 15 und 20 mm Stababstand, die Fische von der Turbinenpassage abhalten sollen, passierte ein großer Teil der Fische (35–88 %) die Turbinen. Die überwiegend schlechte Effizienz der untersuchten Bypässe war wahrscheinlich auf den geringen Abfluss und die ungünstige Lage bzw. Auffindbarkeit der Bypässe zurückzuführen (Knott et al. 2019, 2023b). Die verschiedenen Bypass-Typen wurden aufgrund artspezifischen Verhaltens und unterschiedlicher Fischartengemeinschaften je nach Standort von unterschiedlichen Fischarten und -größen genutzt. Die Wirksamkeit der untersuchten Abstiegskorridore (Turbinen & Bypässe) korrelierte positiv mit dem Anteil des verfügbaren Abflusses (Abb. 4). Um die negativen ökologischen Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf flussabwärts wandernde bzw. driftende Fische zu verringern, sind gut funktionierende Bypässe erforderlich, die nicht nur die aktuellen Anforderungen an Design, Dimensionierung und Lage, sondern auch die standortspezifische Fischgemeinschaft berücksichtigen. Bypässe sollten idealerweise für ein möglichst breites Arten- und Größenspektrum funktionieren, was durch weniger selektive Bypass-Typen wie Bypässe, die die gesamte Wassersäule abdecken oder eine Kombination verschiedener Bypass-Systeme erreicht werden kann (Knott et al. 2019, 2023b).

3.2 Fischschädigung

Bei den standardisierten Fischzugaben lagen die mittleren Mortalitätsraten durch Turbine und Rechen an den neun untersuchten Wasserkraftanlagen über alle getesteten Fischarten und Lastzustände zwischen 2 % (VLH-Turbinen Au) und 43 % (Kaplan-Rohrturbine Lindesmühle) (Abb. 5). Bei der Berechnung wurden die fangbedingte Mortalität und die verzögerte Mortalität bereits berücksichtigt (Mueller et al. 2022).

Die geringste Mortalität über alle Fischarten von 2–6 % wurde an den VLH-Turbinen am Standort Au an der Iller beobachtet, gefolgt von den Wasserkraftschnecken am Standort Höllthal an der Alz mit 3–6 % und dem ebenfalls am Standort Höllthal installierten konventionellen Kraftwerk mit Kaplan-Rohrturbine mit 5–8 %. Die Mortalitätsraten an der Wasserkraftschnecke am Standort Heckerwehr und am Schachtkraftwerk am Standort Großweil lagen über alle Fischarten mit 4–13 % bzw. 9–13 % im Mittelfeld der untersuchten Wasserkraftanlagen. Die höchste Mortalität über alle Fischarten wurde mit 35–43 % an der konventionellen Wasserkraftanlage mit Kaplan-Rohrturbine Lindesmühle ermittelt, gefolgt vom beweglichen Kraftwerk mit Kaplan-Rohrturbine am Standort Eixendorf mit 22–25 % und der konventionellen Wasserkraftanlage mit Kaplan-Rohrturbinen am Standort Baiersdorf-Wellerstadt mit 13–21 %. An der VLH-Turbine am Standort Baierbrunn wurden mit 15–19 % ähnliche Mortalitätsraten über alle Fischarten wie an den Standorten Eixendorf und Baiersdorf-Wellerstadt mit Kaplan-Rohrturbinen ermittelt (Abb. 5). Auffallend an diesen Ergebnissen ist, dass auch bei einem innovativen Kraftwerkskonzept wie dem beweglichen Kraftwerk, welches von einem wirksamen Ableiten der Fische durch die integrierte Fischschutz- und Fischabstiegsanlage ausgeht, durch den Einsatz einer konventionellen Kaplan-Rohrturbine (Drehzahl: 333 U/min, Laufraddurchmesser: 1 m; Fallhöhe: ca. 5 m) hohe artspezifische Mortalitätsraten von bis zu 59 % (Nase bei Niedriglast) auftreten können. Aber auch als „fischverträglich“, „wenig fischschädlich“ oder gar „fischfreundlich“ bezeichnete Turbinentypen (VLH-Turbine, Wasserkraftschnecke) können annähernd hohe oder sogar höhere artspezifische Mortalitätsraten als die hier

untersuchten konventionellen Kraftwerke mit Kaplan-Rohrturbinen erzeugen (z. B. 64 % bei der VLH-Turbine am Standort Baierbrunn für das Rotaugel bei Niedriglast, 26 % bei der Wasserkraftschnecke am Standort Höllthal an der Alz für die Nase bei Hochlast).

Der Lastzustand wirkte sich sowohl bei den Kaplan-Rohrturbinen als auch bei den VLH-Turbinen auf die Mortalitätsraten aus. Bei den Kaplan-Rohrturbinen stellte sich eine niedrige Turbinenlast aufgrund der engeren Stellung der Turbinenschaufeln und dem damit verbundenen höheren Kollisionsrisiko vor allem für größere Individuen in der Regel als fischschädlicher heraus als eine hohe Turbinenlast (z. B. Nase, Äsche, Huchen in Eixendorf; Nase, Barbe, Rotaugel, Äsche, Huchen in Großweil; Nase, Äsche in Höllthal). Bei der drehzahlvariablen VLH-Turbine, bei der bei Niedriglast ebenfalls die Turbinenschaufeln enger gestellt waren und zusätzlich die Drehzahl etwas geringer war, wurde dieser Effekt bei bestimmten Fischarten (Bachforelle, Äsche in Baierbrunn und Au) ebenfalls beobachtet.

Die äußeren und inneren Verletzungen der Fische aus den standardisierten Fischzugaben waren auch bei gleichem Turbinentyp in Abhängigkeit von den standortspezifischen Bedingungen teils sehr unterschiedlich. Darüber hinaus waren die Intensität und die Art der Verletzungen, die durch die Passage der Kraftwerke verursacht wurden, stark artspezifisch. Durch die Passage der VLH-Turbinen am Standort Au und der Wasserkraftschnecken am Heckerwehr und in Höllthal entstanden überwiegend Verletzungen, die nicht sofort tödlich waren. Dazu zählten etwa Schuppenverluste, Hautverletzungen und Pigmentveränderungen. Es ist aber davon auszugehen, dass diese subletalen Verletzungen erheblich zur verzögerten Mortalität beigetragen haben. An diesen Standorten kamen Verletzungen wie Amputationen von Körperteilen, die meist zum sofortigen Tod der Fische führen, nur sehr selten vor (<1 % der Fische). Im Gegensatz dazu wiesen nach der Passage der Kaplan-Rohrturbinen in Lindesmühle und in Eixendorf 22 % bzw. 14 % der gefangenen Fische Amputationen von Körperteilen auf.

Generell können manche Verletzungen, die potenziell bei der Turbinenpassage auftreten können (vgl. Abb. 6), auch Folgeverletzungen verursachen, die vermutlich entscheidend zu der in diesem Projekt beobachte-

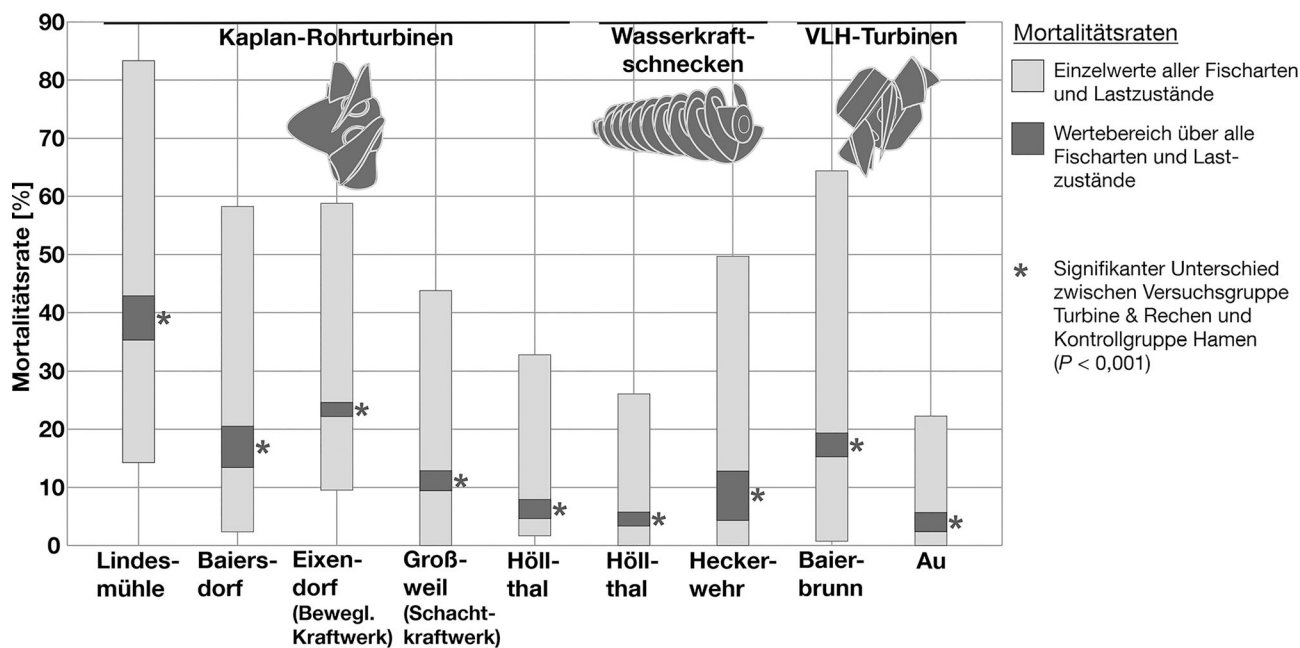


Abb. 5 Mortalitätsraten über alle Fischarten und an den jeweiligen Kraftwerksanlagen untersuchte Lastzustände bei den standardisierten Fischzugaben nach Korrektur um die Mortalität der Kontrollgruppe. Für die Berechnung wurde die Summe sofort und verzögert nach 96 h gestorbener Fische berücksichtigt. Der hellgraue Balken symbolisiert den Wertebereich der fischartenspezifischen Mortalitätsraten, der dunkelgraue Balken den Wertebereich der über alle Fischarten und Lastzustände berechneten Mortalitätsraten (siehe Mueller et al. 2022). Statistisch signifikante Unterschiede nach Proportion-Test zwischen der Anzahl toter Individuen in den Versuchsgruppen mit Turbinenpassage und der Kontrollgruppe sind mit * gekennzeichnet

ten verzögerten Mortalität beigetragen haben. Im Gesamtdatensatz über alle Fischarten stellte sich heraus, dass ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen einer nach der Turbinenpassage stark vergrößerten bzw. geplatzten Schwimmblase und einem Anstieg in der Verletzungsschwere besteht. Dieser Zusammenhang war besonders stark bei Bachforelle, Flussbarsch, Barbe und Äsche ausgeprägt. Die Anfälligkeit von Flussbarschen gegenüber Barotrauma-Verletzungen, wie einer geplatzten Schwimmblase, ist bekannt, da Flussbarsche als Physoclisten keinen Verbindungsgang zwischen Schwimmblase und Darm besitzen und der Gasausgleich bei einem schnellen Druckabfall daher deutlich länger dauert als bei physostomen Fischarten mit Schwimmblasengang (Abernethy et al. 2001). Allerdings wurden auch bei physostomen Fischarten nach der Turbinenpassage überfüllte bzw. geplatzte Schwimmblasen beobachtet. Physostome Fischarten können ihr Schwimmblasenvolumen zwar generell schneller anpassen als Physoclisten (Brown et al. 2014, Pflugrath et al. 2018), offensichtlich ist die geringe Zeitspanne (meist

< 1 s) des raschen Druckabfalls während der Turbinenpassage aber auch für physostome Fischarten zu gering, um den notwendigen Druckausgleich schnell genug vorzunehmen (Abernethy et al. 2001), was wiederum schwerwiegende Folgeverletzungen verursachen kann (Rummer und Bennet 2005). Die Ergebnisse in diesem Projekt deuten darauf hin, dass die Anfälligkeit gegenüber Barotrauma-Verletzungen, die durch den raschen Druckabfall während der Turbinenpassage verursacht werden, bei physostomen Fischarten bisher unterschätzt wird (Mueller et al. 2020). Artübergreifend führten zudem Frakturen der Wirbelsäule und der Rippen, die entweder durch Überfüllung bzw. Platzen der Schwimmblase oder Kollisionen während der Turbinenpassage verursacht wurden, zu einer statistisch signifikant erhöhten Intensität von inneren Blutungen.

3.3 Physikalische Bedingungen

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der durchgeführten Sensorfisch-Messungen, dass Fische auch bei der Passage von innovativen Turbinentypen wie Wasserkraftschnecken und VLH-Turbinen mitunter erheblichen physikali-

schen Kräften (vor allem Kollisionsergebnissen) ausgesetzt sein können. Die potenziellen physikalischen Belastungen der Fische bei der Turbinenpassage waren dabei sehr standortspezifisch und auch bei gleicher Turbinentechnik wurden mitunter deutliche Unterschiede festgestellt. Dieser Befund entspricht auch den stark von den jeweiligen Standortbedingungen abhängigen Ergebnissen zur turbinenbedingten Mortalität und den äußeren und inneren Verletzungsmustern. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass der Sensorfisch nicht die exakt gleichen Eigenschaften wie ein lebender Fisch aufweist (z.B. keine aktive Bewegung, Unterschiede in Form und Viskosität). Die mit den Sensorfischen gemessene Häufigkeit und Schwere von Kollisionen ist daher nur eingeschränkt auf lebende Fische übertragbar, da beispielsweise vitale, schwimmstarke Fische feststehenden Bauteilen vermutlich besser ausweichen und dadurch Kollisionen vermeiden können als passiv driften- de Sensorfische. Im Gegensatz dazu werden die gemessenen Druckveränderungen (z.B. Tiefst- und Dekompressionsrate) nicht von den Eigenschaften des Sensors beeinflusst. Daher ist davon

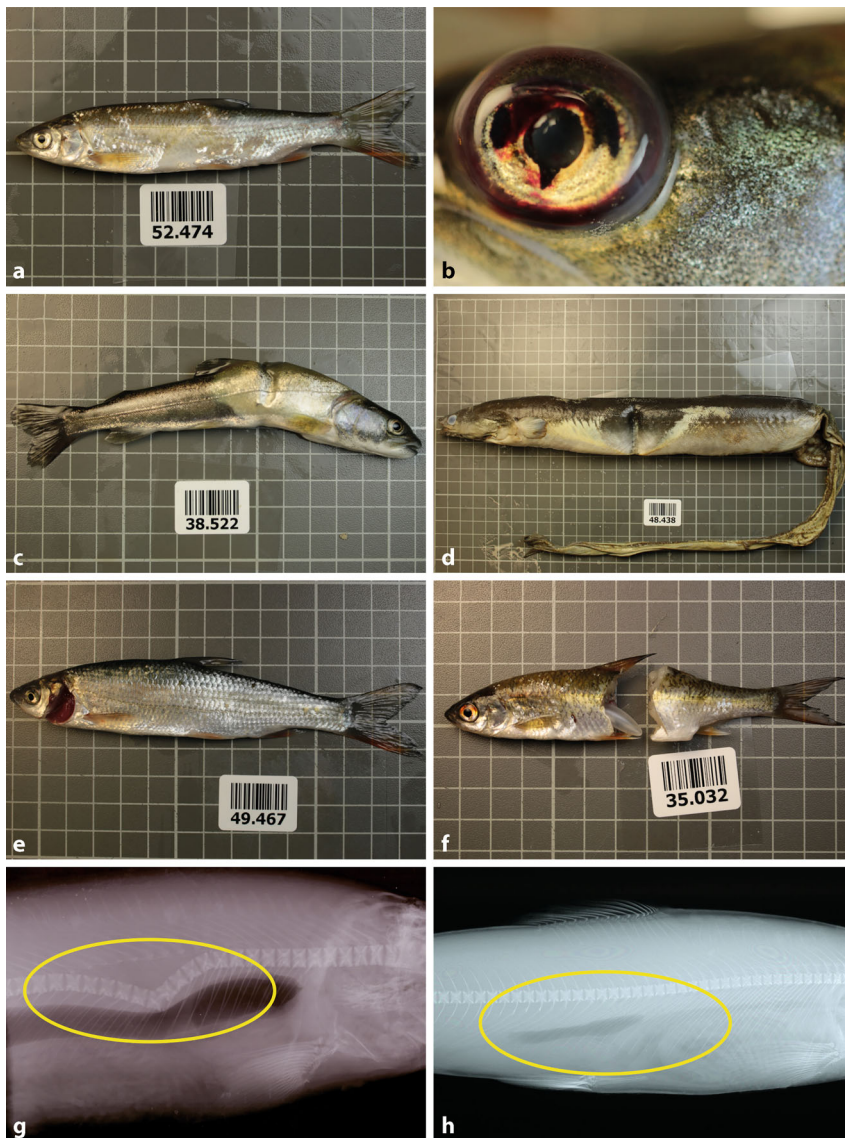


Abb. 6 Beispielbilder zu erfassten äußeren und inneren Verletzungen von Fischen nach der Kraftwerkspassage. (a) Schuppenverlust, (b) Exophthalmus mit Einblutungen und Gasblasen, (c & d) Quetschung und Pigmentveränderung, (e) Amputation des Kiemendeckels, (f) Totaldurchtrennung, (g) Fraktur und Verformung der Wirbelsäule, (h) geplatzte Schwimmblase)

auszugehen, dass lebende Fische, im Vergleich zu den mittels Sensorfischen aufgezeichneten Werten, sehr ähnliche Druckveränderungen erfahren.

Schwere Kollisionsereignisse >95 g (zur Einstufung siehe Hou et al. 2018), die anhand der Beschleunigung des Sensorfisches gemessen werden und deren Stärke als Faktor der Erdbeschleunigung g ($= 9,81 \text{ m/s}^2$) beurteilt wird, traten wiederholt an allen untersuchten Kraftwerksanlagen bei der Turbinenpassage auf (vgl. Abb. 7). Schwere Kollisionen >95 g können für Fische unmittelbar tödlich sein oder

schwerwiegende Verletzungen hervorrufen (Deng et al. 2005). Die schwersten Kollisionen wurden dabei am Schachtkraftwerk in Großweil (max. 348 g), am beweglichen Kraftwerk in Eixendorf (max. 316 g) und an der VLH-Turbine in Baierbrunn (max. 281 g) gemessen. Auffällig war vor allem der hohe Anteil an schweren Kollisionsereignissen >95 g an der VLH-Turbine in Baierbrunn (56 %) und Au (36 %), welcher mit Ausnahme der Kaplan-Rohrturbine in Eixendorf (54 %) sogar höher war als an den übrigen Standorten mit Kaplan-turbinen (Baiersdorf-Wellerstadt

26 %, Großweil 34 %, Höllthal 23 %). Ursächlich dafür ist vermutlich die hohe Anzahl von acht Schaufelblättern, die insbesondere an der VLH-Turbine in Baierbrunn in Kombination mit einer für diesen Turbinentyp fallhöhenbedingt ungewöhnlich hohen Drehzahl schwerwiegende und vergleichsweise häufig auftretende Kollisionen hervorruft. Vermutlich können aber auch bereits mäßige Kollisionsereignisse zwischen 40 und 95 g, die sowohl an den untersuchten konventionellen als auch an den innovativen Wasserkraftanlagen sehr häufig gemessen wurden, zu ernsthaften Verletzungen führen. Insgesamt wurden Kollisionen während der Turbinenpassage als Haupttodesursache identifiziert, was sowohl anhand der beobachteten Amputationen, inneren Frakturen und Hautverletzungen als auch anhand der Sensorfisch-Messungen (Boys et al. 2018, Knott et al. 2023c) deutlich wird.

Ein starker Druckabfall während der Turbinenpassage deutlich unterhalb des atmosphärischen Drucks ($=$ rund 101 kPa auf Meereshöhe) und damit ein hohes Risiko für Barotrauma-Verletzungen wurde an den Kaplan-Rohrturbinen in Baiersdorf-Wellerstadt (mittlerer Tiefst-Druck 67 kPa), Eixendorf (69 kPa) und Höllthal (70 kPa) gemessen. Aber auch an der VLH-Turbine in Baierbrunn war der Tiefst-Druck während der Turbinenpassage in einem ähnlichen Bereich wie an den Kaplan-Rohrturbinen in Baiersdorf-Wellerstadt, Eixendorf und Höllthal. Im Gegensatz dazu wurde an den VLH-Turbinen in Au sowie an den Wasserkraftschnecken in Höllthal und am Heckerwehr kein starker Druckabfall beobachtet. Der mit dem Sensorfisch gemessene Tiefst-Druck während der Turbinenpassage lag an diesen Standorten in einem ähnlichen Bereich wie der atmosphärische Druck (Mittlerer Tiefst-Druck Wasserkraftschnecken Höllthal: 96 kPa, Heckerwehr: 99 kPa, VLH-Turbinen Au: 107 kPa). Vergleichsweise niedrige maximale Druckveränderungsraten ($=$ Tiefst-Druck/Akklimatisierungsdruck; Wertebereich von 0 (maximale Druckveränderung) bis 1 (keine Druckveränderung)), die ernsthafte Barotraumata verursachen können (Boys et al. 2016), wurden an den Kaplan-Rohrturbinen in Baiersdorf-Wellerstadt (Mittelwert 0,43), Eixendorf (0,47) und Höllthal (0,54) sowie an der VLH-Turbine in Baierbrunn (0,55) gemessen. Die höchste maximale Druckveränderungsrate

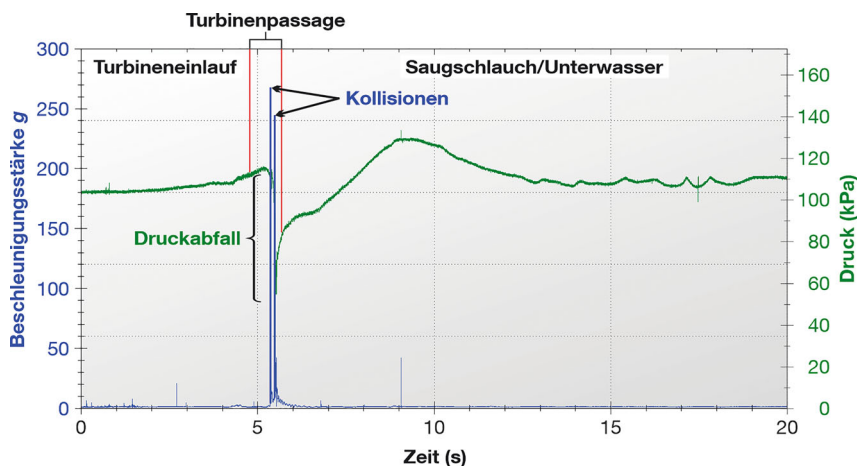


Abb. 7 Beispiel eines typischen Druck- und Beschleunigungsprofils, das mit dem Sensorfisch bei der Passage der Kaplan-Rohrturbine des beweglichen Kraftwerks in Eixendorf während hoher Turbinenlast aufgezeichnet wurde. (Die Spitzenausschläge der *blauen Linie* (Beschleunigung) zeigen Kollisionsereignisse an, die der *grünen Linie* (Druck) Dekompressionsereignisse. Die Beschleunigung wird als Faktor der Erdbeschleunigung g ($= 9,81 \text{ m/s}^2$) angegeben)

(0,92) und damit das geringste Risiko für druckbedingte Verletzungen wurde an der Wasserkraftschnecke am Heckerwehr festgestellt.

Die Ergebnisse der Sensorfisch-Messungen an den alternativen Abstiegskorridoren der Standorte Eixendorf, Großweil und Baierbrunn zeigten, dass Kollisionen die Hauptgefährdungsursache für Fische bei der Passage dieser Korridore sind. Schwere Kollisionen $>95 \text{ g}$, die potenziell tödlich für Fische sein können (Deng et al. 2005), traten zumindest vereinzelt an nahezu allen Abstiegskorridoren auf. Das höchste Ri-

siko für schwere Kollisionen $>95 \text{ g}$ wurde dabei bei der Passage des Klappenwehrs mit anschließender rauen Rampe am Standort Großweil (mittlere Kollisionsstärke 121 g) festgestellt. Schwere Kollisionsereignisse $>95 \text{ g}$ ereigneten sich überwiegend beim nahezu senkrechten Absturz der Sensorfische über das Klappenwehr aus ca. $1,4 \text{ m}$ Höhe auf die betonierte Sohle im oberen Bereich der Rampe. Der Aufprall erfolgte hier unmittelbar auf eine betonierte Fläche, da an diesem Standort kein Unterwasserpolster vorhanden ist (Abb. 8). Generell hat die Ausgestaltung des Un-

terwassers, insbesondere in Bezug auf Wassertiefe und Strukturen, mit denen Fische kollidieren können, eine entscheidende Bedeutung für das Verletzungspotenzial beim Abstieg über Wehre (Pflugrath et al. 2019).

3.4 Fischverhalten

Die Sonaruntersuchungen an den Standorten Baiersdorf-Wellerstadt und Lindesmühle lieferten wichtige Erkenntnisse zum Aalverhalten und Aalabstieg an Wasserkraftanlagen. Das Aalrohr nach Hassinger und Hübner (2009), das am Standort Lindesmühle installiert war, hatte unter den standörtlichen Gegebenheiten nicht die erwünschte Wirkung für den Aalabstieg. Einfache Alternativlösungen wie das zeitweilige Öffnen eines Leerschützes, wie am Standort Lindesmühle, können dagegen einen weitaus wirksameren Abstiegskorridor für die Abwanderung der Aale darstellen, sofern Aale durch geeignete Fischschutz- und Fischleitsysteme effizient vom Turbineneinlauf abgeleitet werden können. Der am Standort Lindesmühle verbaute schräge Horizontalrechen mit einem Stababstand von 15 mm hat sich für Aale $>50 \text{ cm}$ Totallänge als geeignete Barriere erwiesen. Bei einer Leerschützöffnung von 20 cm sind durchschnittlich 23 Aale pro 15 min Beobachtungsintervall abgestiegen im Vergleich zu durchschnittlich 3 Aale pro 15 min Beobachtungsintervall bei einer Öffnungsweite von 10 cm (Egg et al. 2017).

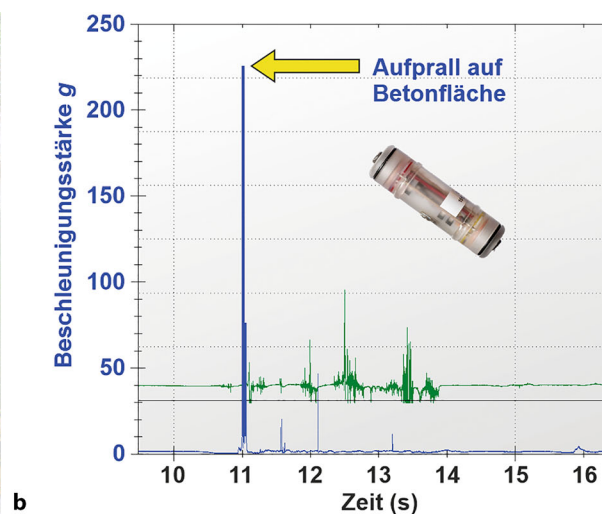


Abb. 8 **a** Klappenwehr ohne Unterwasserpolster, **b** Beschleunigungsprofil, das mit dem Sensorfisch bei der Passage des Klappenwehrs aufgezeichnet wurde. (Die Spitzenausschläge der *blauen Linie* zeigen Kollisionsereignisse an. Die Beschleunigung wird als Faktor der Erdbeschleunigung g ($= 9,81 \text{ m/s}^2$) angegeben)

Die am Standort Großweil durchgeführten Verhaltensbeobachtungen von standardisiert zugegebenen Versuchsfischen und natürlich vorkommenden Fischen am Rechen der horizontalen Einlaufebene mittels Sonaruntersuchung lassen darauf schließen, dass die Wirksamkeit von verhaltensbeeinflussenden Effekten durch den installierten Rechen mit 20 mm Stababstand, die beispielsweise ein deutliches Meidungsverhalten oder eine gerichtete Ableitung der Fische in Richtung der alternativen Abstiegskorridore hervorgerufen hätten, relativ gering ist (Funk et al. 2024). Da die Grenzen für die physische Passierbarkeit von Rechen mit 20 mm Stababstand in den bestehenden Modellen (siehe Ebel 2013; Schwevers und Adam 2020) meist deutlich unterschätzt werden (vgl. Abb. 3; Knott et al. 2023a), ist eine Barrierefunktion nur für einen geringen Anteil des vorkommenden Fischarten- und Größenspektrums und für deutlich weniger als 10% der

abwandernden Individuen zuverlässig gegeben.

3.5 Bewertung des Lebensraums

An jedem der Untersuchungsstandorte zeigten die Ergebnisse zu den ökologischen Auswirkungen der Kraftwerksanlagen, in welchem Ausmaß das Fließgewässerkontinuum durch die Kraftwerksanlage bzw. das jeweils zugehörige Querbauwerk unterbrochen wird. Die Stärke der seriellen Diskontinuität spiegelte sich sowohl in unterschiedlichen abiotischen Habitateigenschaften als auch in einer unterschiedlichen Zusammensetzung der aquatischen Lebensgemeinschaft zwischen Ober- und Unterwasser der Kraftwerksanlagen wider (vgl. Abb. 9). Dabei waren die Auswirkungen der Unterbrechung des Fließgewässerkontinuums je nach Standort unterschiedlich stark ausgeprägt.

Abgesehen von diesen standortspezifischen Unterschieden ließen sich

über alle Gewässer hinweg folgende Kernaussagen ableiten: Der Unterschied in der Zusammensetzung der aquatischen Lebensgemeinschaft (Fische, Makrozoobenthos, Makrophyten, Periphyton) zwischen Ober- und Unterwasser zeichnete sich vor allem durch einen höheren Anteil von Fischarten und Makrozoobenthos-Taxa im Oberwasser aus, die bezüglich verschiedener Umweltfaktoren wie Strömungsverhältnisse oder Habitatstrukturen keine besonders hohen Ansprüche an ihren Lebensraum stellen (= Generalisten). Dazu zählen etwa die indifferente Fischart Rotaugen oder Makrozoobenthos-Taxa wie Wenigborster (Oligochaeta) und Zuckmückenlarven (Chironomidae). Zudem war im Oberwasser der Anteil von Makrophyten an der aquatischen Lebensgemeinschaft höher (z.B. Schmalblättrige Wasserpest), während Periphyton-Taxa (z.B. Kieselalgen) im Unterwasser höhere Anteile an der aquatischen Lebensgemeinschaft hatten. Diese Unterschiede

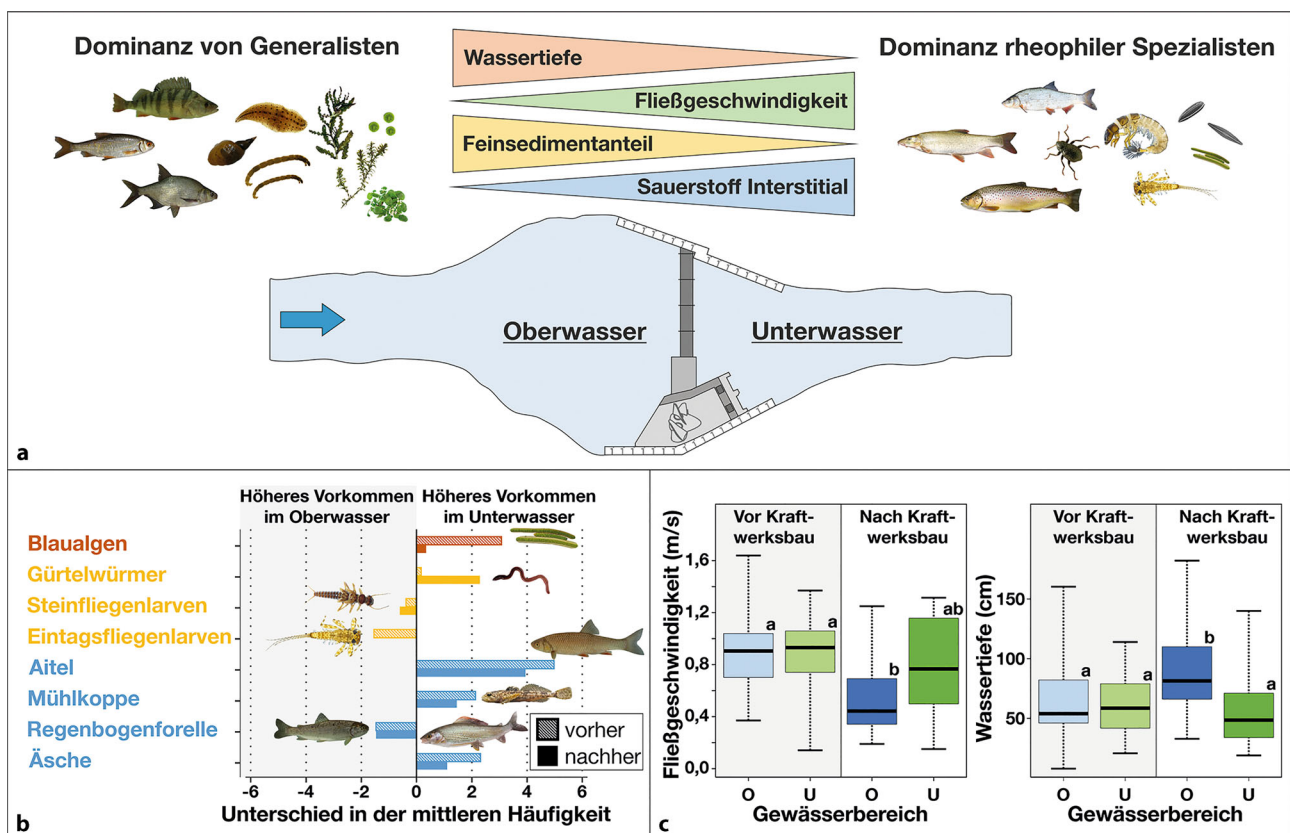


Abb. 9 a Schematische Darstellung der Auswirkungen der Unterbrechung des Fließgewässerkontinuums durch Querbauwerke auf die aquatische Lebensgemeinschaft und abiotische Habitatparameter in angrenzenden Ober- und Unterwasserbereichen; der *blaue Pfeil* kennzeichnet die Fließrichtung, **b** & **c** Exemplarische Unterschiede in der Zusammensetzung der aquatischen Lebensgemeinschaft (b) und den abiotischen Parametern Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe (c) zwischen Oberwasser (O) und Unterwasser (U) vor und nach Einbau einer innovativen Wasserkraftanlage

in der Zusammensetzung der aquatischen Lebensgemeinschaft sind auf die unterschiedlichen abiotischen Habitatsigenschaften im Ober- und Unterwasser zurückzuführen und entsprechen auch den Beobachtungen, die bei einer früheren Untersuchung an fünf weiteren Querbauwerken in Bayern gemacht wurden (Mueller et al. 2011). Im Oberwasser war generell die Strömungsgeschwindigkeit verringert und die Wassertiefe im Vergleich zum Unterwasser erhöht. Der Aufstau und die dadurch verringerte Schleppkraft des Wassers führt zu einer erhöhten Ablagerung von Feinsediment. Dementsprechend wurde im Oberwasser an den meisten Untersuchungsstandorten ein höherer Feinsedimentanteil im Substrat als im Unterwasser vorgefunden. Sowohl durch die geringere Strömung als auch durch das feinere Substrat im Oberwasser wird das Wachstum von Makrophyten gegenüber dem Wachstum von Periphyton begünstigt. Anspruchsvollere, auf stärkere Strömung und kiesiges Substrat angewiesene Taxa, wie z. B. Eintags- und Steinfliegenlarven, kommen im staubeinflussten Oberwasser meist in deutlich geringerer Anzahl vor als im Unterwasser, wohingegen Generalisten wie Wenigborster und Zuckmückenlarven im Oberwasser meist sehr zahlreich vertreten sind. An Makrophyten laichende oder geringe Strömungsgeschwindigkeiten bevorzugende Fischarten (z. B. Rotaugen, Bitterling) finden im staubeinflussten Oberwasser noch geeignete Lebensraumbedingungen vor, während das Vorkommen strömungsliebender, kieslaichender Fischarten (z. B. Äsche, Barbe) im Vergleich zum Unterwasser reduziert ist.

Aus dem Vergleich der Untersuchungen vor und nach dem Einbau der innovativen Kraftwerksanlagen lässt sich schließen, dass die stärksten Unterschiede in der Zusammensetzung der aquatischen Lebensgemeinschaft zwischen Ober- und Unterwasser der bereits bestehenden Querbauwerke schon vor Kraftwerksbau bestanden. Entgegen den Versprechungen der Entwickler dieser innovativen Konzepte hat die Installation der verschiedenen Typen innovativer Wasserkraftanlagen die Lebensraumbedingungen für strömungsliebende Arten nicht verbessert. An keinem der innovativen Kraftwerksstandorte kam es nach dem Kraftwerksbau zu einer statistisch signifikanten Erhöhung der Individuendichten von

strömungsliebenden Fisch- und Makrozoobenthos-Arten. Im Gegenteil, die Nachrüstung bestehender Wehre in Verbindung mit einer Erhöhung des Stauziels an den Standorten Großweil und Au hat die dortigen Auswirkungen der Unterbrechung des Fließgewässerkontinuums sogar noch deutlich verstärkt und die Habitatbedingungen für strömungsliebende Arten im staubeinflussten Oberwasser der Wasserkraftanlagen weiter verschlechtert. Dies zeigte sich insbesondere beim Makrozoobenthos im wehrnahen Oberwasserbereich, wo nach dem Bau der Wasserkraftanlagen eine signifikante Abnahme der Dichte strömungsliebender Eintags-, Stein- und Köcherfliegenlarven beobachtet wurde (Knott et al. 2024). Darüber hinaus kann durch den Kraftwerksbau auch Lebensraum im unmittelbaren Unterwasser der Anlagen verloren gehen (z. B. Laichplätze für strömungsliebende Fischarten am Standort Eixendorf; Knott et al. 2021), wenn der überwiegende Abfluss durch die Turbinen fließt und das Querbauwerk nicht mehr oder nur noch unregelmäßig überströmt wird.

4 Fazit

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass viele der derzeitigen Annahmen zu den erwarteten ökologischen Verbesserungen durch den Einbau innovativer Wasserkraftanlagen nicht zutreffen und unter bestimmten Standortvoraussetzungen und Betriebsweisen nicht die erwarteten geringeren, sondern sogar größere ökologische Schäden als beim Betrieb konventioneller Wasserkraftanlagen auftreten können. Diese Ergebnisse unterstreichen einerseits die Notwendigkeit für eine umfassende und vergleichende ökologische Bewertung verschiedener Anlagentypen unter realistischen Freilandbedingungen, da einige Effekte, z. B. bezüglich der fischgrößenabhängigen Rechenpassierbarkeit, der Fischschädigung und der Veränderungen der Habitatbedingungen und der aquatischen Lebensgemeinschaft nur aufgrund dieses Untersuchungsdesigns verlässlich charakterisiert werden konnten. Andererseits liefern die Ergebnisse auch wichtige Hinweise, unter welchen Standortvoraussetzungen eine Reduktion von Fischschädigungen und Auswirkungen auf die Lebensräume ermöglichen, was insbesondere bei

der Modernisierung bestehender Anlagen zu deutlichen ökologischen Verbesserungen führen kann. Viele der im Projekt erarbeiteten Ergebnisse wurden inzwischen für technische Weiterentwicklungen genutzt, die nun ebenfalls unter realistischen Freilandbedingungen überprüft werden sollten.

Danksagung Wir danken Herrn Prof. Dr. Markus Aufleger und Herrn Dr. Christian Jähnel von der Universität Innsbruck für die freundliche Einladung zur Einreichung dieses Beitrags für die ÖWAW-Ausgabe zum Thema „Wasserkraft und Biodiversität“. Dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) und dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) danken wir für die Finanzierung, Projektkoordination und fachliche Begleitung des Projekts. Unser Dank gilt auch den Fischereifachberatungen sowie allen Beteiligten an den zuständigen Wasserwirtschaftsämtern, Landratsämtern und Regierungen, den Fischereirechtsinhabern und Grundstücksanliegern für die Erteilung der erforderlichen Genehmigungen und die Unterstützung bei den Feldprobenahmen. Bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Kraftwerksbetreiber möchten wir uns für die Möglichkeit zur Durchführung der Untersuchungen und für die Unterstützung vor Ort bedanken. Wir danken außerdem der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München für die Bereitstellung des Röntgenlabors und die Unterstützung bei der Bewertung innerer Verletzungen. Bei den Tierschutzbeauftragten der Technischen Universität München (TUM) möchten wir uns für die fachliche Beratung und Begleitung der genehmigten Tierversuche bedanken. Dank gebührt auch internationalen Experten des Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) in den USA, des New South Wales Department of Primary Industries (DPI) in Australien und der Charles Sturt University (CSU) in Australien für die Unterstützung bei den Sensorfisch-Untersuchungen. Ein besonderer Dank gilt auch unseren Studierenden, Praktikantinnen und Praktikanten, Hilfskräften sowie den freiwilligen Helferinnen und Helfern für ihr Engagement bei den durchgeführten Untersuchungen. Großer Dank gebührt ferner allen nationalen und internationalen Experten, die bei der Methodenentwicklung und -abstimmung zum Projekt mit Ihrer Fachex-

peritise beratend zur Seite standen, u. a. im Rahmen eines Methodenworkshops des „Forum Fischschutz“, der projektbegleitenden Arbeitsgruppe und den internationalen Experten, die in anonymisierten Begutachtungsverfahren die Validität der wissenschaftlichen Studien prüften.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht.

Literatur

- Abernethy, C. S., Amidan, B. G. & Cada, G. F. (2001):** Laboratory studies of the effects of pressure and dissolved gas supersaturation on turbine-passed fish (No. PNNL-13470). Pacific Northwest National Lab., Richland, WA, US.
- Boys, C., Pflugrath, B., Mueller, M., Pander, J., Deng, Z. & Geist, J. (2018):** Physical and hydraulic forces experienced by fish passing through three different low-head hydropower turbines. *Marine and Freshwater Research* 69: 1934–1944.
- Boys, C. A., Robinson, W., Miller, B., Pflugrath, B., Baumgartner, L. J., Navarro, A., Brown, R. & Deng, Z. (2016):** A piecewise regression approach for determining biologically relevant hydraulic thresholds for the protection of fishes at river infrastructure. *Journal of Fish Biology* 88(5): 1677–1692.
- Brown, R. S., Colotelo, A. H., Pflugrath, B. D., Boys, C. A., Baumgartner, L. J., Deng, Z. D., Silva, L. G. M., Brauner, C. J., Mallen-Cooper, M., Phonekhampeng, O., Thorncraft, G. & Singhanouvong, D. (2014):** Understanding barotrauma in fish passing hydro structures: a global strategy for sustainable development of water resources. *Fisheries* 39(3): 108–122.
- Deng, Z., Guensch, G. R., McKinsty, C. A., Mueller, R. P., Dauble, D. D. & Richmond, M. C. (2005):** Evaluation of fish-injury mechanisms during exposure to turbulent shear flow. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 62(7): 1513–1522.
- Deng Z., Carlson T. J. & Richmond M. C. (2007):** Six-degree-of-freedom sensor fish design and instrumentation. *Sensors* 7(12): 3399–3415.
- Ebel, G. (2013):** Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. *Ingenieurbioologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung*. Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, 1. Auflage, Halle (Saale).
- Egg, L., Mueller, M., Pander, J., Knott, J. & Geist, J. (2017):** Improving European Silver Eel (*Anguilla anguilla*) downstream migration by undershot sluice gate management at a small-scale hydro-power plant. *Ecological Engineering* 106: 349–357.
- Egg, L., Mueller, M., Pander, J. & Geist, J. (2018):** Comparison of sonar-, camera- and net-based methods in detecting riverine fish-movement patterns. *Marine and Freshwater Research* 69: 1905–1912.
- Funk, N., Knott, J., Pander, J. & Geist, J. (2024):** Fish behavior at the horizontal screen of a novel shaft hydropower plant. *River Research and Applications*.
- Geist, J. (2021):** Editorial: Green or red: Challenges for fish and freshwater biodiversity conservation related to hydropower. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 31: 1551–1558.
- Hassinger, R. & Hübner, D. (2009):** Entwicklung eines neuartigen Aal-Abstiegssystems mit Hilfe von Laborversuchen. *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 2(5): 276–281.
- Hou, H., Deng, Z. D., Martinez, J. J., Fu, T., Duncan, J. P., Johnson, G. E., Lu, J., Skalski, J. R., Townsend, R. L. & Tan, L. (2018):** A hydropower biological evaluation toolset (HBET) for characterizing hydraulic conditions and impacts of hydro-structures on fish. *Energies* 11(4): 990.
- Knott, J., Mueller, M., Pander, J. & Geist, J. (2019):** Fish Passage and Injury Risk at a Surface By-pass of a Small-Scale Hydropower Plant. *Sustainability* 11: 6037.
- Knott, J., Mueller, M., Pander, J. & Geist, J. (2020):** Seasonal and diurnal variation of downstream fish movement at four small-scale hydropower plants. *Ecology of Freshwater Fish* 29: 74–88.
- Knott, J., Nagel, C. & Geist, J. (2021):** Wasted effort or promising approach—Does it make sense to build an engineered spawning ground for rheophilic fish in reservoir cascades?. *Ecological Engineering* 173: 106434.
- Knott, J., Mueller, M., Pander, J. & Geist, J. (2023a):** Bigger than expected: Species- and size-specific passage of fish through hydropower screens. *Ecological Engineering* 188: 106883.
- Knott, J., Mueller, M., Pander, J. & Geist, J. (2023b):** Downstream fish passage at small-scale hydropower plants: Turbine or bypass?. *Frontiers in Environmental Science* 11: 400.
- Knott, J., Mueller, M., Pander, J. & Geist, J. (2023c):** Ecological assessment of the world's first shaft hydropower plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 187: 113727.
- Knott, J., Mueller, M., Pander, J. & Geist, J. (2024):** Habitat quality and biological community responses to innovative hydropower plant installations at transverse in-stream structures. *Journal of Applied Ecology*: 61: 606–620.
- Mueller, M., Pander, J. & Geist, J. (2011):** The effects of weirs on structural stream habitat and biological communities. *Journal of Applied Ecology* 48: 1450–1461.
- Mueller, M., Pander, J. & Geist, J. (2017):** Evaluation of external fish injury caused by hydropower plants based on a novel field-based protocol. *Fisheries Management and Ecology* 24: 240–255.
- Mueller, M., Pander, J. & Geist, J. (2018):** Comprehensive analysis of >30 years of data on stream fish population trends and conservation status in Bavaria, Germany. *Biological Conservation* 226: 311–320.
- Mueller, M., Sternecker, K., Milz, S. & Geist, J. (2020):** Assessing turbine passage effects on internal fish injury and delayed mortality using X-ray imaging. *PeerJ* 8: e9977.
- Mueller, M., Knott, J., Pander, J. & Geist, J. (2022):** Experimental comparison of fish mortality and injuries at innovative and conventional small hydropower plants. *Journal of Applied Ecology* 59: 2360–2372.
- Pander, J., Mueller, M. & Geist, J. (2013):** Ecological functions of fish bypass channels in streams: migration corridor and habitat for rheophilic species. *River Research and Applications* 29: 441–450.
- Pander, J., Mueller, M., Knott, J. & Geist, J. (2018):** Catch-related fish injury and catch efficiency of stow-net-based fish recovery installations for fish-monitoring at hydropower plants. *Fisheries Management and Ecology* 25(1): 31–43.
- Pflugrath, B. D., Boys, C. A., Cathers, B. (2018):** Predicting hydraulic structure-induced barotrauma in Australian fish species. *Marine and Freshwater Research* 69(12): 1954–1961.
- Pflugrath, B. D., Boys, C. A., Cathers, B. & Deng, Z. D. (2019):** Over or under? Autonomous sensor fish reveals why overshot weirs may be safer than undershot weirs for fish passage. *Ecological Engineering* 132: 41–48.
- Rummer, J. L. & Bennet, W. A. (2005):** Physiological Effects of Swim Bladder Overexpansion and Catastrophic Decompression on Red Snapper. *Transactions of the American Fisheries Society* 134: 1457–1470.
- Schwevers, U. & Adam, B. (2020):** Fish protection technologies and fish ways for downstream migration. Springer Nature, Cham, Switzerland, 279 S.
- Smialek, N., Pander, J., Heinrich, A. & Geist, J. (2021):** Sneaker, Dweller and Commuter: Evaluating Fish Behavior in Net-Based Monitoring at Hydropower Plants—A Case Study on Brown Trout (*Salmo trutta*). *Sustainability* 13(2): 669.

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.