



Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen

Zusammenfassung zum Abschlussbericht 2020

Band 11: Standortübergreifende
Verbesserungsmöglichkeiten für den
Fischschutz und die Gewässerökologie



wasser





Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen

Zusammenfassung zum Abschlussbericht 2020

**Band 11: Standortübergreifende
Verbesserungsmöglichkeiten für den
Fischschutz und die Gewässerökologie**

Impressum

Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen
Zusammenfassung zum Abschlussbericht 2020
Band 11: Standortübergreifende Verbesserungsmöglichkeiten für den Fischschutz und die Gewässerökologie

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: 0821 9071-0
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Bearbeitung:

Dr. Melanie Mueller, Dr. Josef Knott, Dr. Joachim Pander, Prof. Dr. Jürgen Geist:
Technische Universität München
Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie
Mühlenweg 18–22, 85354 Freising
Tel: 08161 71-3947
Email: aquasys@tum.de
Internet: www.fisch.wzw.tum.de

LfU: Diana Genius, Dr. Madlen Gerke, Hannah Ingermann, Dr. Heidi Kammerlander, Birgit Lohmeyer, Dr. Christoph Mayr

Bildnachweis:

Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie/TUM: Abb. 1

Stand:

2. aktualisierte Auflage: Juli 2022

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 0 89 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

1	Projektübersicht	4
2	Planungs- und Umsetzungshinweise zum fischökologischen Monitoring von Fischschädigungen an Wasserkraftanlagen	7
3	Verbesserungsmöglichkeiten für den Fischschutz und die Gewässerökologie	9
3.1	Maßnahmen für Fischschutz- und Fischabstiegsmöglichkeiten an Wasserkraftanlagen	9
3.1.1	Anlagen- und Turbinentechniken	10
3.1.2	Turbinen- beziehungsweise Anlagenmanagement	11
3.1.3	Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen	13
3.2	Verbesserungsmöglichkeiten für die gewässerökologische Situation	16
4	Literatur	18

1 Projektübersicht

Im Projekt „Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen“ wurden in den Jahren 2014 bis 2021 neun Wasserkraftanlagen (acht Standorte mit jeweils einer Kraftwerksanlage, ein Standort mit zwei Kraftwerksanlagen) mit unterschiedlichen Kraftwerkstechnologien untersucht (Abb. 1). Es handelt sich einerseits 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. Ziel war es, die verschiedenen Anlagen bezüglich ihrer direkten Wirkung auf abwärts wandernde oder verdriftende Fische (Projektteil A) und bezüglich ihrer Auswirkungen auf den Gewässerlebensraum (Projektteil B) zu untersuchen. Im Einzelnen waren dies folgende Untersuchungsstandorte:

- **Au an der Iller:** zwei VLH-Turbinen, Grobrechen mit 300 mm Stababstand
- **Baierbrunn an der Isar:** VLH-Turbine in einem Restwasserkraftwerk, Grobrechen mit 120 mm Stababstand, raue Rampe neben dem Turbineneinlauf (Breite 40 m, Dotation 31 % des Gesamtabflusses)
- **Eixendorf an der Schwarzach:** bewegliches Kraftwerk mit Kaplan-Rohrturbine, Rundbogenrechen mit vertikalen Stäben (lichter Stababstand 20 mm) und oberflächennahem Bypass (Kronenausschnitt in Abschwemmklappe)
- **Großweil an der Loisach:** Schachtkraftwerk mit zwei Kaplan-Rohrturbinen und horizontaler Einlaufebene mit integriertem Horizontalrechen (lichter Stababstand 20 mm) sowie einem sohnahen und zwei oberflächennahen Fischabstiegsöffnungen in überströmten Segmentschützen
- **Heckerwehr an der Roth:** Wasserkraftschnecke, Grobrechen mit 120 mm Stababstand
- **Höllthal an der Alz:** Anlage mit zwei Wasserkraftschnecken (Gobrechen mit 150 mm Stababstand) und einem konventionellen Kraftwerk mit Kaplan-Rohrturbine und zur Sohle geneigtem Vertikalrechen (lichter Stababstand 20 mm, Neigungswinkel 45°)
- **Baiersdorf-Wellerstadt an der Regnitz:** konventionelle Anlage mit zwei Kaplan-Rohrturbinen, zur Sohle geneigtem Vertikalrechen (lichter Stababstand 15 mm, Neigungswinkel 27°) und oberflächennahem Bypass (Spülrinne)
- **Lindesmühle an der Fränkischen Saale:** konventionelle Anlage mit Kaplan-Rohrturbine und zur Flussachse geneigtem Horizontalrechen (lichter Stababstand 15 mm, Neigungswinkel 30°), oberflächennaher Abstiegsöffnung (Spülklappe) sowie Aalrohr mit Fischrutsche

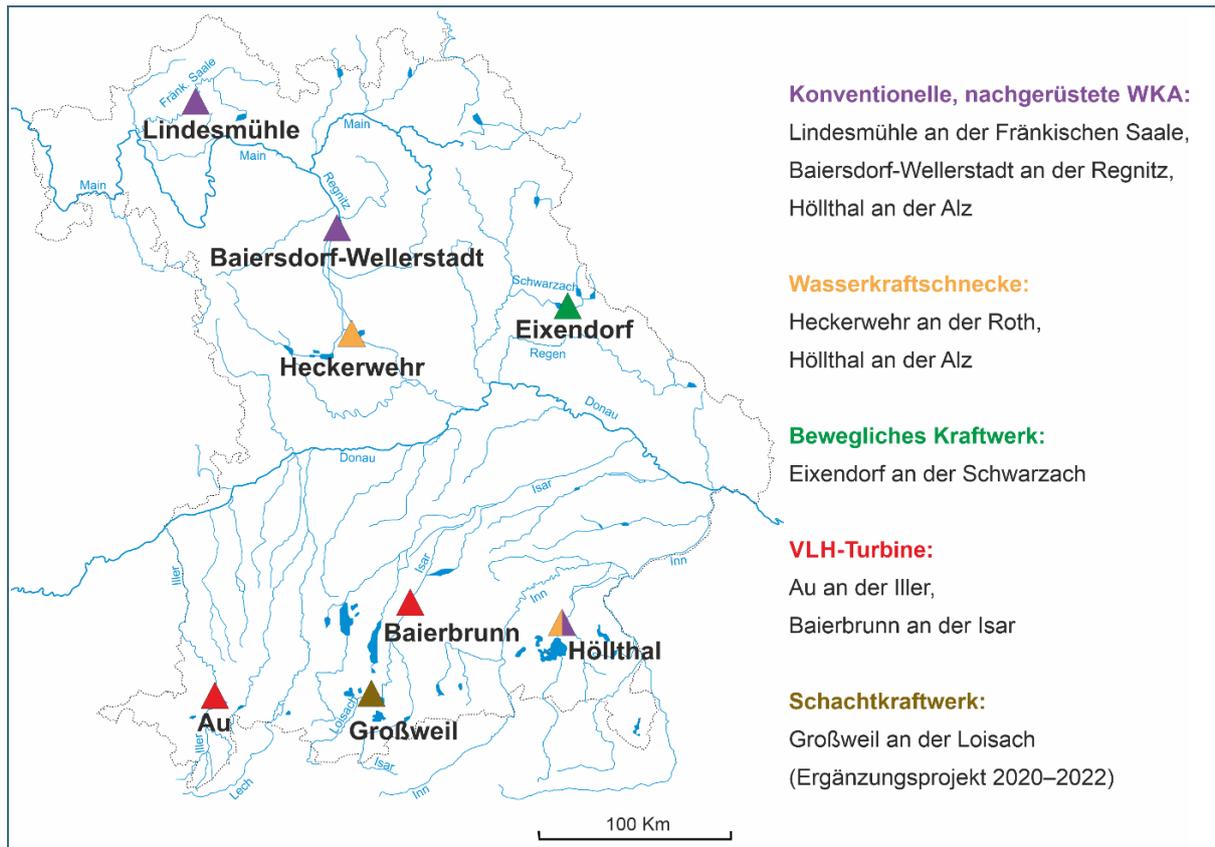


Abb. 1: Bayernkarte mit Verortung der Projektstandorte unterschieden nach Kraftwerkstypen

Eine Übersicht über die Anlagenkennwerte der an den einzelnen Standorten eingesetzten Turbinen (z. B. Fallhöhe, Drehzahl) ist in Tab. 1 enthalten. Das Gesamtprojekt zum fischökologischen Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen wird in Projektband 1 (Mueller et al. 2022a, 2. aktualisierte Auflage 2022) beschrieben. Die Ergebnisse der methodischen Vorversuche zur fangbedingten Fischschädigung und zur sonarbasierten Erfassung des Fischabstiegs sind in den Projektbänden 2a (Pander et al. 2020) und 2b (Egg et al. 2020) dargestellt. Ausführliche Informationen über einzelne Untersuchungsstandorte und die dort für das Monitoring verwendete technische Ausstattung sowie die Untersuchungsergebnisse enthalten die Projektbände 3 bis 10 (Knott et al. 2022a, Mueller et al. 2020c–i). Standortübergreifende Verbesserungsmöglichkeiten für den Fischschutz und die Gewässerökologie sind in Band 11 beschrieben (Mueller et al. 2022b, 2. aktualisierte Auflage 2022). Eine ausführliche Darstellung der Gesamtbetrachtung aller untersuchten Kraftwerke erfolgt in Projektband 12 (Knott et al. 2022b).

Tab. 1: Überblick über die wichtigsten Anlagenkennwerte beziehungsweise untersuchten Turbinendaten unter Niedriglast- und Hochlastbetrieb der Standorte Lindesmühle an der Fränkischen Saale, Baidersdorf-Wellerstadt an der Regnitz, Eixendorf an der Schwarzach, Großweil an der Loisach, Höllthal an der Alz, Heckerwehr an der Roth, Baierbrunn an der Isar und Au an der Iller. Die Standorte Lindesmühle und Baidersdorf-Wellerstadt wurden nur unter Niedriglastbedingungen untersucht. Die Umfangsgeschwindigkeit wurde aus der Drehzahl (n) des entsprechenden Lastzustandes und dem Turbinendurchmesser (d) errechnet mit $v_U = n \cdot d \cdot \pi / 60$ (Ebel 2013).

Standorte	Lindesmühle an der Fränkischen Saale Kaplan-Rohrturbine	Baidersdorf-Wellerstadt an der Regnitz Kaplan-Rohrturbine	Eixendorf an der Schwarzach Kaplan-Rohrturbine/ Bewegliches Kraftwerk	Großweil an der Loisach Kaplan-Rohrturbine/ Schachtkraftwerk	Höllthal an der Alz Kaplan-Rohrturbine	Höllthal an der Alz Wasserkraftschnecke	Heckerwehr an der Roth Wasserkraftschnecke	Baierbrunn an der Isar VLH-Turbine	Au an der Iller VLH-Turbine
Anzahl der Turbinen	1	2	1	2	1	2	1	1	2
Turbinendurchmesser [m]	1,5	2,0	1,0	1,75	2,5	4,3	3,2	3,55	5,0
Untersuchte Drehzahl (MIN–MAX) [U/min]	212	150	333	156	100	6–19	3–26	39–56	22–33
Untersuchte Umfangsgeschwindigkeit (MIN–MAX) [m/s]	16,7	15,7	17,4	14,3	13,1	1,4–4,3	0,5–4,4	7,2–10,4	5,8–8,6
Untersuchte Fallhöhe (MIN–MAX) [m]	2,7–2,8	2,4–2,5	4,6–4,8	2,1–2,5	1,9–2,4	1,8–2,4	1,6–2,3	3,5–4,0	1,1–2,3
Untersuchter Abfluss pro Turbine (MIN–MAX) [m³/s]	2,0–3,3	12,1–13,6	1,9–4,5	3,7–11,0	10,5–17,1	2,5–8,5	1,0–4,8	5,0–12,1	8,0–24,1
Ausbauabfluss pro Turbine [m³/s]	10,8	16,0	4,5	11,0	18,0	9,0	5,0	14,5	27,0

2 Planungs- und Umsetzungshinweise zum fischökologischen Monitoring von Fischschädigungen an Wasserkraftanlagen

Aus dem Projekt können grundsätzliche Erkenntnisse zur Planung und Durchführung fischökologischer Monitorings an Wasserkraftanlagen abgeleitet werden. Der Umfang des Monitorings und des Untersuchungsdesigns ist dabei immer vom Untersuchungsziel abhängig und kann je nach Anforderung individuell ausgestaltet werden, unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen.

Planungshinweise:

- Notwendige Genehmigungen frühzeitig vor Beginn der Untersuchungen beantragen (siehe Mueller et al. 2022a, Kapitel 5, 2. aktualisierte Auflage 2022)
- Die Fischartenauswahl für standardisierte Fischzugaben sollte nach klaren fachlichen Kriterien erfolgen. Relevant können hier beispielsweise besonders bedeutsame Zielfischarten, die Berücksichtigung unterschiedlicher Morphologie, Anatomie und Verhaltensweisen sowie der natürlich vorkommende Fischbestand (siehe fischfaunistische Referenzzönosen) sein.
- Bezugsquellen für Versuchsfische, die bei standardisierten Fischzugaben eingesetzt werden sollen, mindestens ein Jahr vor Beginn der Untersuchungen festlegen und kontaktieren, um eine ausreichende Qualität der Versuchsfische und die Verfügbarkeit zum geplanten Untersuchungszeitpunkt sicherzustellen
- Ein möglichst breites Größenspektrum der verwendeten Fischarten abdecken (abhängig von der Untersuchungsmethode sind unterschiedliche Fischgrößen detektierbar, z. B. Sonar > 10 cm, Kamera > 15 cm (bei ausreichenden Lichtverhältnissen und geringer Trübung); vergleiche Egg et al. 2018). Mittels Netzfangeinrichtungen können auch Fische < 5 cm erfasst werden (abhängig von der Maschenweite der Fangeinrichtung).
- Die Untersuchung von Vorschädigungen und fangbedingten Schädigungen (Mortalität, äußere und innere subletale Verletzungen) ist für eine belastbare Ermittlung anlagenbedingter Schädigungsraten unerlässlich
- Bei der Planung eines Monitorings an einer neu zu errichtenden Wasserkraftanlage, sollte die Positionierung der Fangvorrichtungen und die notwendigen Vorkehrungen (z. B. Nutzung der Revisionsverschlüsse, bündiges Aufsetzen auf der Sohle, Hindernisse im Unterwasser) früh in den Planungsprozess eingebracht werden
- Alle Untersuchungen sollten einen hohen Qualitätsstandard erfüllen und unabhängig überprüfbar sein. Die Publikation von Ergebnissen in anerkannten Zeitschriften mit einem Peer-Review Verfahren zur Qualitätssicherung von wissenschaftlichen Veröffentlichungen, wie im Projekt realisiert, ist zu empfehlen.
- Die Beachtung der im Projekt etablierten Methodik, insbesondere zur Fangmethodik und handlingbedingten Effekten (Pander et al. 2018), der Erfassung äußerer und innerer Verletzungen (Mueller et al. 2017 & 2020), der Charakterisierung der physikalischen Einwirkungen bei der Anlagenpassage mittels Sensorfischen (Kollisionen, Druckänderungen, Scherkräfte; vergleiche Boys et al. 2018) sowie der Bewertung der Auswirkungen auf die Habitatqualität und Biozönosen (vergleiche Mueller et al. 2011) in zukünftigen Monitorings ermöglicht einen Vergleich neuer Anlagen mit dem breiten Spektrum der hier untersuchten Technologien

Umsetzungshinweise:

- Nutzen der im Projekt etablierten Methodik und Protokolle, z. B. zur Erfassung der Mortalität und der äußeren und inneren Verletzungen
- Hälterung der Fische (idealerweise für 96 Stunden), um eine potenzielle verzögerte Mortalität nach der Kraftwerkspassage zu ermitteln
- Auf möglichst hohe Qualität beziehungsweise Ausgangskondition der Versuchsfische achten, für die Versuche nur vollkommen vitale Fische verwenden
- Die physikalisch-chemischen Randbedingungen während der Versuchsdurchführung, bei Hamenbefischungen insbesondere die Treibgutmenge pro Leerung und Strömungsgeschwindigkeiten am Rechen, am Hameneingang und im Bereich der Steertreue, sollten regelmäßig durch entsprechende Messungen dokumentiert werden, um eine korrekte Interpretation der Ergebnisse sicherzustellen
- Dokumentation der Anlagenkennwerte beziehungsweise Turbinendaten (z. B. Fallhöhe, Drehzahl, Durchfluss etc.) während der Untersuchungen
- Beim Einsatz von Hamen knotenloses, fischschonendes Netzmaterial verwenden. Dimensionierung des Hamens (Länge, Öffnung, Maschenweiten etc.) muss für den untersuchten Abflussquerschnitt ausgelegt sein.
- Fängigkeit des Hamens regelmäßig mit Dummies überprüfen, um Schäden am Hamen frühzeitig zu erkennen
- Bei Hamenuntersuchungen Strömungsgeschwindigkeiten $> 0,5$ m/s in der Fangeinheit durch eine ausreichend lange Ausführung des Hamens und der Fangeinheit vermeiden
- Bei Hamenuntersuchungen auf ausreichende Platzverhältnisse und Gewässertiefen achten. Der Hamen inklusive Fangeinheit sollte frei schwimmen können und nicht an Bauteilen scheuern.
- Bei Hamenuntersuchungen Leerungsintervalle so kurz wie möglich halten (idealerweise 1 Stunde), insbesondere während Untersuchungsperioden mit hohem Treibgutaufkommen und hohen Abstiegszahlen und daraus resultierender hoher Fischbiomasse oder Treibgutmenge in der Fangeinheit
- Ausreichend Personal für Versuchskoordination, Leerung der Fangeinrichtungen, Auswertung der Fischverletzungen, tierschutzgerechtes Versorgen der Fische, Messung abiotischer Parameter etc. für einen reibungslosen Versuchsablauf einsetzen
- Versuchsstation sollte sich in unmittelbarer räumlicher Nähe zur untersuchten Wasserkraftanlage befinden, um kurze Wege im Versuchsablauf zu gewährleisten und dadurch handlingbedingte Effekte zu reduzieren
- Beprobung des natürlichen Fischabstiegs auch während Dämmerungsphasen und in der Nacht, um das Fischartenspektrum möglichst repräsentativ zu erfassen

3 Verbesserungsmöglichkeiten für den Fischschutz und die Gewässerökologie

Im Folgenden werden grundsätzliche Möglichkeiten dargestellt, welche Verbesserungen für den Fischschutz und die Gewässerökologie an Wasserkraftanlagen mit ähnlicher Konfiguration wie die der untersuchten Anlagen in Betracht gezogen werden können. Die Übertragbarkeit auf andere Standorte muss jeweils im Hinblick auf die technische Machbarkeit sowie auf die tatsächlichen Wirkungen für den Fischschutz und die Gewässerökologie geprüft werden. Bei der Sanierung bestehender Wasserkraftanlagen sowie ggf. einem Neubau an bestehenden Querbauwerken sollte der **Anlagentyp und die Turbinentechnik** entsprechend der **standörtlichen Gegebenheiten** (Fallhöhe, Durchfluss) und des **gewässerspezifischen Fischartenspektrums** bestmöglich ausgewählt werden. Von einem Neubau an freifließenden Standorten ohne bereits bestehende Querbauwerke muss auf Basis der Ergebnisse des Projekts abgeraten werden. An bereits bestehenden Querbauwerken ohne Wasserkraftanlage ist ein Rückbau des Querbauwerks dem Einbau einer Wasserkraftanlage aus ökologischer Sicht vorzuziehen.

3.1 Maßnahmen für Fischschutz- und Fischabstiegsmöglichkeiten an Wasserkraftanlagen

Zur Ableitung geeigneter Maßnahmen, um die kraftwerksbedingte Mortalität und Verletzungen von Fischen bei der Kraftwerkspassage zu reduzieren, ist die Kenntnis der grundsätzlichen Zusammenhänge und Verletzungsmuster an den untersuchten Turbinen notwendig. Die Identifikation von Turbinentechnologien mit geringerem Verletzungsrisiko für Fische und von effektiveren Ableitstrategien hat daher eine große Bedeutung für einen erfolgreichen Fischschutz an Wasserkraftanlagen. Bei Fischschutz- und Fischabstiegssystemen ist die Gestaltung und Bemessung der alternativen Abstiegskorridore sowie deren räumliche Lage zum Kraftwerk entscheidend für ihre Funktionalität beziehungsweise Ableiteffizienz. Darüber hinaus sind Kenntnisse der gewässerspezifischen, tages- und jahreszeitlichen Muster im Fischabstieg für ein ökologisch verträgliches Management von Wasserkraftanlagen von großer Bedeutung. Bei Betrachtung aller Untersuchungsergebnisse lassen sich folgende grundsätzliche Zusammenhänge identifizieren:

- Größere Fallhöhen führen zu höheren Mortalitätsraten (Anteil toter Fische am Gesamtfang über alle getesteten Arten)
- Höhere Drehzahlen der Turbine führen zu höheren Mortalitätsraten
- Höhere Umfangsgeschwindigkeiten¹ (abhängig vom Turbinendurchmesser und der Drehzahl) führen zu höheren Mortalitätsraten
- Für die Höhe der Mortalitätsraten ist bei Wasserkraftanlagen nicht der Anlagentyp allein entscheidend. Der gleiche Anlagentyp kann je nach Standort und den dort gegebenen Randbedingungen im Ergebnis deutliche Unterschiede bei den Mortalitätsraten aufweisen. Aufgrund der standort- und artspezifischen Randbedingungen wird für die Beurteilung eines Standortes immer eine Einzelfallbetrachtung notwendig bleiben.
- Ein Großteil der Fische nutzt den Bereich der Hauptströmung, d. h. in der Regel den Turbinenpfad, als Abstiegskorridor für die abwärts gerichtete Wanderung oder wird in diesem Bereich verdriftet

¹ Umfangsgeschwindigkeit Turbine = Drehzahl * Durchmesser * π / 60 (Ebel 2013)

- Trotz installierter Feinrechen mit Stababständen von 15 mm beziehungsweise 20 mm gelangt ein großer Anteil der Fische aus dem natürlichen Fischabstieg in den Turbinenkorridor. Ein Großteil der gefangenen Fische aus dem natürlichen Fischabstieg (92 %) waren kleinwüchsige Fischarten beziehungsweise junge Altersstadien mit einer Körperlänge von kleiner gleich 15 cm.

Anhand der Verletzungsmuster können folgende Ursachen für einen Großteil der beobachteten Mortalität benannt werden (Sortierung nach absteigender Relevanz):

- Kollisionen (Quetschungen, Amputationen, Frakturen, Verformungen von Skelettteilen)
- Druckveränderungen (Barotraumata, z. B. Kompression oder Expansion der Schwimmblase, Gasblasen im Körper, innere Blutungen)
- Stress sowie nicht sofort tödliche Verletzungen, die eine verzögerte Mortalität zur Folge haben können

3.1.1 Anlagen- und Turbinentechniken

Je nach Anlagentyp und Turbinentechnik können unterschiedliche Konzepte für den Fischschutz und den Fischabstieg an Wasserkraftanlagen verfolgt werden. Im Folgenden werden die aus den Projektergebnissen abgeleiteten Verbesserungsmöglichkeiten zur Anlagen- und Turbinentechnik, zum betrieblichen Management und zu Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen dargestellt.

An VLH-Turbinen, an Wasserkraftschnecken und sogar an konventionellen Kaplan-Rohrturbinen können unter bestimmten Randbedingungen vergleichsweise geringe Mortalitätsraten erreicht werden. Diese teils niedrigen Mortalitätsraten gelten aber nicht für alle Fischarten gleichermaßen. Deshalb müssen immer auch die standörtlichen Gegebenheiten (z. B. Turbinendurchmesser und Drehzahl, Fallhöhe, Fischartenspektrum) berücksichtigt werden.

Folgende Verbesserungsvorschläge lassen sich aus den Untersuchungsergebnissen für VLH-Turbinen und für Kaplan-Rohrturbinen ableiten, insbesondere aufgrund der nachgewiesenen Kollisionsgefahr bei diesen Anlagentypen (vergleiche Mueller et al. 2022c):

- Anzahl der Schaufelblätter minimieren
- Möglichst großer Abstand zwischen den Schaufelblättern
- Schaufelkanten möglichst dick beziehungsweise breit und abgerundet ausführen
- Auf möglichst geringe Drehzahl achten

Die Bedeutung der Drehzahl auch innerhalb des gleichen Turbinentyps ist an folgenden Standortbeispielen deutlich zu erkennen: Für die VLH-Turbine wurden am Standort Au an der Iller mit Drehzahlen bis maximal 33 U/min deutlich geringere Mortalitätsraten festgestellt, als am Standort Baierbrunn an der Isar mit Drehzahlen bis zu 56 U/min. Auch bei Kaplan-Rohrturbinen traten beispielsweise am Standort Höllthal an der Alz bei einer Drehzahl von 100 U/min deutlich geringere Mortalitätsraten auf, als an den anderen Standorten, wie beispielweise Eixendorf an der Schwarzach mit einer Drehzahl von 333 U/min. Es ist zu beachten, dass das Kraftwerk mit Kaplan-Rohrturbine am Standort Höllthal an der Alz mit einer Fallhöhe von etwa 2 m insgesamt relativ geringe Mortalitätsraten im Vergleich zu den anderen konventionellen Wasserkraftanlagen mit Kaplan-Rohrturbine und auch im Vergleich mit Literaturwerten zu diesem Turbinentyp aufwies.

Durch **Wasserkraftschnecken** verursachte Verletzungen gehen überwiegend auf Kollisionen zurück, insbesondere an den Eintrittskanten und am Turbinenauslauf. Aus anderen Untersuchungen und den

Ergebnissen beider Standorte mit Wasserkraftschnecke in diesem Projekt können folgende Empfehlungen abgeleitet werden:

- Anbringen einer Gummilippe, beziehungsweise eines Kunststoffschutzes an den Eintrittskanten (Kibel et al. 2011, Schmalz 2010) oder die Eintrittskanten möglichst wenig scharfkantig ausführen
- Minimierung des Spaltmaßes zwischen Schnecke und Trog (Schmalz 2010) oder eine Bürstendichtung zum Verschluss des Ringspalts. Außen gelagerte Schnecken können hierbei Vorteile aufweisen.
- Ausreichend tiefe Ausgestaltung des Unterwassers am Turbinenauslauf und die Vermeidung von Strukturen, mit denen Fische kollidieren können (Boys et al. 2018)

Zudem sollten Turbulenzen im Auslaufbereich von Wasserkraftschnecken möglichst vermieden werden. Dies kann z. B. durch bauliche Anpassungen der Schnecke erfolgen (gute Einbindung ins Unterwasser, günstige Ausformung des Schneckenaustritts beziehungsweise Wellenendes). Darüber hinaus zeigen die in Pauwels et al. (2020) festgestellten Mortalitätsraten (3 % beim Aal bis 37 % bei der Brachse) an einer 22 m langen Wasserkraftschnecke mit einer Fallhöhe von 10 m, dass bei großen Fallhöhen und Schneckenlängen zum Teil erhebliche Mortalitätsraten auftreten können.

Beim **beweglichen Kraftwerk** sollte geprüft werden, ob die technischen Möglichkeiten beziehungsweise standörtlichen Gegebenheiten es erlauben, diesen Kraftwerkstyp mit einer potenziell weniger fischschädlichen Turbinentechnik auszustatten (z. B. einer Kaplan-Rohrturbine mit geringerer Drehzahl und größerem Durchmesser). Zumindest am Standort Eixendorf an der Schwarzach (Fallhöhe 5 m) kann das bewegliche Kraftwerk mit der dort installierten Kaplan-Rohrturbine (Durchmesser 1 m, Drehzahl 333 U/min) nicht als „fischverträglicher“ als konventionelle Wasserkraftanlagen bewertet werden.

Gleiches gilt für das **Schachtkraftwerk**: auch hier sollte geprüft werden, ob die Ausstattung mit einer potenziell weniger fischschädlichen Turbinentechnik möglich ist. Weiterhin können folgende Empfehlungen abgeleitet werden:

- Sohlgleicher Anschluss der Rechenebene
- Optimierung der hydraulischen Bedingungen im Bereich des Rechens durch bauliche Gewährleistung einer gleichmäßigen dreiseitigen Anströmung
- Erhöhung der Bemessung und Dotation der Abstiegsfenster (siehe dazu auch Kapitel 3.1.3)
- Installation weiterer Abstiegsfenster wie im ursprünglichen Konzept zu diesem Kraftwerkstyp vorgesehen
- Ausreichend dimensioniertes Unterwasserpolster am Wehrüberfall des Klappenwehres herstellen (siehe dazu auch Kapitel 3.1.3)

3.1.2 Turbinen- beziehungsweise Anlagenmanagement

Neben der Wahl einer potenziell fischverträglicheren Technik kann in geeigneten Fällen ergänzend durch ein gezieltes betriebliches Management ein höherer Fischschutz erreicht werden. Diese Managementmethoden lassen sich grundsätzlich auch auf Bestandsanlagen übertragen. Für den Betrieb von Wasserkraftanlagen kann aus den Ergebnissen des Projektes die Empfehlung abgeleitet werden, dass das **Turbinenmanagement** entsprechend des Turbinentyps und der Regelungsart an das gewässerspezifische Fischartenspektrum sowie an jahres- und tageszeitliche Muster des Fischabstiegs angepasst werden sollte (vergleiche Knott et al. 2020).

Generell ist für ein effizientes Turbinenmanagement festzuhalten, dass die Abstiegsmuster verschiedener Fischarten je nach Art, Habitatausstattung, Tages- und Jahreszeit gewässerspezifisch abweichen. Die gewässerspezifischen, tages- und jahreszeitlichen Muster im Fischabstieg sollten für ein fischverträglicheres Turbinenmanagement daher im jeweiligen Gewässersystem ausreichend bekannt sein.

Zum Aalschutz im Aal-Einzugsgebiet ist unter den gegebenen Bedingungen ein spezielles Aalmanagement notwendig. Grundsätzlich sind beispielsweise die Nächte im Herbst bei auflaufendem Wasser die Hauptzeit für die Abwanderung laichbereiter Blankaale (Euston et al. 1997, Durif et al. 2003, Behrmann-Godel & Eckmann 2003, Egg et al. 2017), was im natürlichen Verbreitungsgebiet des Aals in Bayern (komplettes Main-Einzugsgebiet) von hoher Relevanz ist. Im Rahmen der Untersuchungen hat sich das Öffnen von Leerschützen als wahrnehmbarer Wanderkorridor während der Aal-Hauptwanderzeiten in den Nächten im Herbst mit auflaufendem Wasser bewährt (Egg et al. 2017).

Bei allen untersuchten Kraftwerkstypen kann dies bedeuten, Turbinen temporär abzuschalten, um z. B. zu Hauptwanderzeiten innerhalb eines klar zu definierenden Zeitraums effektiv viele Fische einer oder mehrerer standörtlich relevanten Art(en) schützen zu können.

Im Speziellen bei konventionellen Anlagen mit **Kaplan-Rohrturbinen**, aber auch beim beweglichen Kraftwerk und beim Schachtkraftwerk ist ein Betrieb im niedrigen Lastzustand möglichst zu vermeiden. Bei diesem Turbinentyp wurde ein Zusammenhang zwischen dem Betrieb bei Niedriglast und höherer Mortalität festgestellt. So kann an Standorten mit mehr als einer Turbine (mit Laufradregelung) bei Niedrigwasserbedingungen der Betrieb von nur einer Turbine mit höherer Last und weiter Laufradschaufelstellung anstatt von zwei Turbinen mit geringerer Last und enger Laufradschaufelstellung vorgezogen werden.

An den Anlagen mit **VLH-Turbine(n)** wurden bei einigen Fischarten (Äsche, Bachforelle) geringere Mortalitätsraten bei Betrieb mit hoher Last als bei niedriger Last festgestellt. Bei anderen Fischarten unterschieden sich die Ergebnisse zum Teil auch je nach Standort stark voneinander. Da jedoch bei den Sensorfischuntersuchungen an den VLH-Turbinen schwere Kollisionen deutlich häufiger bei Niedriglast auftraten als bei Hochlast, sollte ein Betrieb im niedrigen Lastzustand mit enger Stellung der Turbinenschaufeln möglichst vermieden werden. Für den Fischschutz der Zielfischart Aal kann aus den Ergebnissen beider Standorte eindeutig abgeleitet werden, dass sich die VLH-Turbine mit sehr geringen Mortalitätsraten von kleiner 1 % als für den Aal relativ verträgliche Technologie erweist. Dies spricht für eine besondere Beachtung dieser Technik im Main-Einzugsgebiet, dem ursprünglichen Aal-Verbreitungsgebiet in Bayern. Grundsätzlich sollte die VLH-Turbinentechnik nicht bei Fallhöhen an der oberen Grenze ihres Anwendungsbereiches eingesetzt werden (≥ 4 m; Juhrig 2013, <https://www.stellba-hydro.de/vlh-turbine/>, aufgerufen am 24.06.2022), da ansonsten hohe Mortalitäts- und Verletzungsraten zu erwarten sind, die vergleichbar mit konventionellen Kaplan-Rohrturbinen sind.

Auch bei den Standorten mit **Wasserkraftschnecken** fielen die Mortalitätsraten zwischen den beiden Lastzuständen je nach Fischart sehr unterschiedlich aus, wodurch keine eindeutigen Empfehlungen zum Turbinenmanagement abgeleitet werden können. Für den Fischschutz der Zielfischart Aal kann aus den Projektergebnissen aber ebenfalls eindeutig abgeleitet werden, dass sich die untersuchten relativ kurzen Wasserkraftschnecken (5,0 m in Höllthal, 5,4 m am Heckerwehr) im Bereich der hier betrachteten Fallhöhen (1,6–2,4 m) mit geringen Mortalitätsraten von kleiner 2 % als für den Aal relativ verträgliche Technologie erweist. Dies spricht also auch für eine besondere Beachtung dieser Technik im Main-Einzugsgebiet, dem ursprünglichen Aal-Verbreitungsgebiet in Bayern.

Bei **kombinierten Anlagen** mit Kaplan-Rohrturbinen und Wasserkraftschnecken (z. B. im Zuge einer Nachrüstung als Restwasserkraftwerk) können für den Betrieb folgende Empfehlungen aus den Ergebnissen am Standort Höllthal an der Alz abgeleitet werden:

- Bei der Abflussaufteilung sollte darauf geachtet werden, dass ein Betrieb der Kaplan-Rohrturbine(n) unter Hochlast gegenüber einem Niederlastbetrieb zu bevorzugen ist. Der restliche Abfluss sollte über die Wasserkraftschnecke(n) abgearbeitet werden.
- Unter Abflusssituationen, bei denen der Betrieb eines Kraftwerkstyps ausreicht, um den Gesamtabfluss zu verarbeiten, wäre die Nutzung der fischverträglicheren Technik Wasserkraftschnecke vorzuziehen

3.1.3 Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die installierten Feinrechen mit lichten Weiten kleiner oder gleich 20 mm einen maßgeblichen Anteil der Fische aus dem natürlichen Fischabstieg (insbesondere mit Körperlängen bis etwa 20 cm) nicht effizient von der Turbinenpassage abhalten können. Je nach Standort gibt es dafür unterschiedliche Ursachen.

Am Standort Baiersdorf-Wellerstadt an der Regnitz, an dem ein um 30° zur Sohle geneigter Vertikalrechen mit einem Stababstand von 15 mm installiert ist, wurde beispielsweise eine hohe mittlere **Anströmgeschwindigkeit am Rechen** (1 m/s) gemessen. Dadurch war die Leitwirkung, die auch an physisch durchlässigen Rechen durch geringe Neigungswinkel erzeugt werden kann (Wirkung des Rechens als Verhaltensbarriere), für bestimmte Fischarten vermutlich stark reduziert. Die Ergebnisse am Kraftwerk Lindesmühle zeigen aber, dass die Anströmgeschwindigkeit nicht alleine über die Wirksamkeit von Schutz- und Abstiegseinrichtungen entscheidet. Hier konnte an einem mit 30° zur Flussachse geneigten Rechen mit einem Stababstand von 15 mm auch bei deutlich niedrigeren mittleren Anströmgeschwindigkeiten von 0,12 m/s nur für Aale von mehr als 38 cm Körperlänge eine eindeutige Ableitwirkung erkannt werden.

Generell lassen die Ergebnisse des Projekts darauf schließen, dass **Dotation und Lage von Bypässen beziehungsweise alternativen Abstiegskorridoren** hinsichtlich der Leitwirkung von Fischschutz- und Abstiegseinrichtungen von zentraler Bedeutung sind. An den Standorten mit installierten Feinrechen waren die Bypässe vergleichsweise gering dotiert (0,1–8 % des Gesamtabflusses) und meist auf einen bestimmten Bereich der Wassersäule begrenzt (z. B. oberflächennah am Standort Eixendorf an der Schwarzach und Baiersdorf-Wellerstadt an der Regnitz beziehungsweise oberflächen- und sohnah am Standort Großweil an der Loisach und Lindesmühle an der Fränkischen Saale). Mit maximal 21 % der gefangenen Fische des natürlichen Fischabstiegs beziehungsweise aus standardisierten Fischzugaben (Eixendorf an der Schwarzach und Großweil an der Loisach) gelangte ein vergleichsweise geringer Anteil über den Bypass ins Unterwasser. Am Projektstandort Baierbrunn an der Isar hingegen passierten trotz des dort installierten Grobrechens insgesamt 70 % aller gefangenen Fische des natürlichen Fischabstiegs die direkt neben dem Turbineneinlauf gelegene raue Rampe (Dotation 31 % des Gesamtabflusses, Breite 40 m). Durch den dort vorgeschalteten Rechen kann bei 120 mm Stababstand nicht von einer physischen Barrierewirkung ausgegangen werden, insbesondere vor dem Hintergrund der Ergebnisse an den anderen untersuchten Standorten. Weiterhin zeigten die Sonaruntersuchungen an Aalen am Standort Lindesmühle an der Fränkischen Saale einen deutlichen Anstieg der Abwanderung über ein Leerschütz mit größerer Öffnungsweite (20 cm anstatt 10 cm), höherer Beaufschlagung und Strömungsgeschwindigkeit am Eintrittsprofil. Dies zeigt einen **positiven Effekt einer höheren Beaufschlagung** und damit eine daraus resultierende bessere Auffindbarkeit des Bypasses für abstiegswillige Fische.

Am Standort Großweil an der Loisach deutet der hohe Anteil an Turbinenpassagen von 75 % bei den standardisierten Fischzugaben darauf hin, dass der horizontal angeordnete Rechen mit einem Stababstand von 20 mm und Strömungsgeschwindigkeiten von rund 0,3 m/s keine effektive physische Barriere darstellt und auch die Leitwirkung in Richtung Bypass als gering einzustufen ist. Eine deutliche **Erhöhung der Dotation** durch eine **Vergrößerung der oberflächennahen und des sohnahen Abstiegsfensters** würde den hydraulischen Reiz für Fische in Richtung Bypässe vermutlich erhöhen und damit die Effektivität verbessern. Zudem könnte die Installation von weiteren ausreichend hoch dotierten Abstiegsfenstern, entsprechend des ursprünglichen Schachtkraftwerk-Konzeptes, die Bypass-Effektivität dieser Strukturen erheblich verbessern.

Die Untersuchungen an zwei unterschiedlichen Öffnungsgrößen des **oberflächennahen Kronenausschnitts am beweglichen Kraftwerk** (Eixendorf an der Schwarzach) zeigen, dass eine alleinige Vergrößerung der Querschnittsfläche (hier: auf das Vierfache) und Erhöhung der Dotation (von 1 % auf 4 % des Gesamtabflusses) nicht für jeden Bypassstyp ausreichend ist, um die Effizienz wesentlich zu verbessern (9,6 % des Gesamtfangs im Bypass anstatt 7,1 % bei kleinerer Öffnung, siehe Knott et al. 2019, Mueller et al. 2020g). Neben der Dotation, die für eine gute Bypass-Effizienz nach Larinier und Travade (2002) und Klopries et al. (2018) mindestens 2–10 % beziehungsweise 2–35 % des Turbinendurchflusses betragen soll, sind für eine optimale Funktionalität eines Bypasses unter anderem auch Lage, hydraulische Bedingungen am Eingang und Leitstrukturen von entscheidender Bedeutung. Nur wenn diese Randbedingungen optimal sind, kann auch mit einer Dotation im unteren Bereich dieser Empfehlungen eine gute Bypass-Effizienz erreicht werden (Klopries et al. 2018). Am Standort Eixendorf war der oberflächennahe Kronenausschnitt für bodenorientierte Fischarten wie z. B. Aal und Barbe nahezu wirkungslos. Um die Effektivität des Fischabstiegs an diesem Anlagentyp zu erhöhen, wäre es sinnvoll, zusätzlich zum existierenden Kronenausschnitt, alternative Abstiegskorridore am Gewässergrund und in der Mitte der Wassersäule anzubieten. Auch der temporäre sohnnahe Fischabstieg unter dem angehobenen Kraftwerk bei erhöhten Abflüssen kann aufgrund der dadurch entstehenden extremen hydraulischen Bedingungen und dem daraus resultierenden hohen Verletzungsrisiko für absteigende Fische nicht empfohlen werden.

Das **Aalrohr** kann für einen effizienten Aalabstieg unter den Bedingungen am Standort Lindesmühle an der Fränkischen Saale nicht empfohlen werden. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass sich das Aalrohr an diesem Standort auf einer Blockschüttung befindet, die im Vergleich zu einer betonierten Sohle vielfältige anderweitige Versteckmöglichkeiten bietet. Zum anderen waren die relativ kleinen Einstiegsöffnungen gerade während der Blankaal-Abwanderung bei Hochwasser im Herbst teilweise sehr schnell mit Laub zugesezt und somit für Aale nicht mehr zugänglich.

Das Öffnen des Leerschützes kurz vor Abflusserhöhungen kann für den Aal, aber auch für andere Fischarten, die in diesen Zeiten vermehrt abwandern, einen Abstieg ermöglichen. Für ein möglichst effektives Management wäre eine automatische Steuerung des Leerschützes sinnvoll, durch die das Schütz bei bestimmten Abflüssen und Rahmenbedingungen (z. B. Jahreszeit, Temperatur) geöffnet wird. Für eine flächendeckende Anwendung dieser Maßnahme zur Aalableitung wäre es sinnvoll, zukünftig z. B. mithilfe von Sensorfisch-Messungen zu überprüfen, ob und unter welchen Bedingungen es möglicherweise auch beim Abstieg über Leerschütze zu Schädigungen an den Fischen kommen kann (Pflugrath et al. 2019). Im Rahmen dieses Projekts war eine derartige Untersuchung nur am angehobenen Segmentschütz in Großweil möglich. Als Alternative zu einem geöffneten Leerschütz wäre es auch denkbar, dass unter bestimmten Hochwasserabflussverhältnissen, die standortspezifisch festzulegen wären, ein gelegtes **Schlauchwehr beziehungsweise eine geöffnete Kiesschleuse** möglicherweise als sehr effektive und potenziell weniger fischschädliche Abstiegskorridore fungieren können. Falls keine dieser oben genannten Beispiele zur Verbesserung des Aalabstieges möglich sind,

müssen weitere Managementmaßnahmen, wie das zeitweise Abstellen der Turbinen, in Betracht gezogen werden. Das sogenannte „Catch and Carry“, d. h. der Fang von Aalen vor Kraftwerken und der anschließende Transport zur Nordsee, kann unterstützend Anwendung finden, um eine ausreichend hohe Anzahl an unverletzten Aalen bei der Abwanderung zu gewährleisten.

Aus den Ergebnissen des Projekts lässt sich außerdem ableiten, dass der **Bypasseintritt beziehungsweise alternative Abstiegskorridor für Fische** nicht nur auffindbar, sondern auch **attraktiv und mit geringem Schädigungspotenzial** gestaltet sein muss. Beispielsweise passierten am Standort Höllthal an der Alz über 66 % der Fische des natürlichen Fischabstiegs die Kaplan-Rohrturbine mit einem Feinrechen (20 mm Stababstand) und nur 34 % die Wasserkraftschnecken trotz eines Abflussanteils von 44 % als alternativen Abstiegskorridor. Im Gegensatz dazu war die direkt neben dem Turbineneinlauf gelegene raue Rampe am Standort Baierbrunn an der Isar weitaus stärker frequentiert als der höher beaufschlagte Turbinenkorridor. Obwohl hier am Turbineneinlauf nur ein Grobrechen mit 120 mm Stababstand installiert ist, nutzten nur 20 % aller gefangenen Fische des natürlichen Fischabstiegs den Turbinenkorridor für den Abstieg, wohingegen 70 % die raue Rampe und weitere 10 % den Raugerinne-Beckenpass passierten, welcher die raue Rampe mit dem Unterwasser am Turbinenauslauf des Kraftwerks verbindet.

Darüber hinaus muss bei der **Ausgestaltung von Spülrinnen oder Kronenausschnitten und dem Anschlussgerinne beziehungsweise -bypass** ins Unterwasser auf Bauteile, die Verletzungen verursachen können, geachtet und diese zwingend vermieden werden, d. h. ohne Ecken beziehungsweise Kanten ausführen, hervorstehende Bauteile wie z. B. Schraubenköpfe, Schweißnähte etc. abdecken, entgraten beziehungsweise vermeiden (Knott et al. 2019). Außerdem sollte bei Anschluss in das Unterwasser über einen freien Überfall (z. B. über ein Wehr oder einen Bypass) grundsätzlich auf ein ausreichendes Unterwasserpulster geachtet werden. Nach Baumgartner et al. (2006) und Pflugrath et al. (2019) sollte dieser 70 % des Unterschiedes zwischen Ober- und Unterwasserspiegel betragen. In DWA (2005) und U.S. Fish and Wildlife Service (2017) wird ein Unterwasserpulster von einem Viertel der Fallhöhe gefordert, mindestens jedoch eine Wassertiefe von 0,9 m (DWA 2005) beziehungsweise 1,2 m (U.S. Fish and Wildlife Service 2017). Da sich im vorliegenden Projekt gezeigt hat, dass auch bei Einhaltung der Vorgaben nach DWA (2005) noch Verletzungen und Mortalität auftreten können (z. B. bei der Passage der Abstiegsfenster am Standort Großweil), wird empfohlen, sich an den Empfehlungen von Baumgartner et al. (2006) und Pflugrath et al. (2019) zu orientieren, um einen möglichst verletzungsfreien Fischabstieg zu ermöglichen und das Mortalitätsrisiko zu minimieren.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen weiterhin, dass Fischschutz-, Leit- und Abstiegseinrichtungen nicht ausschließlich auf der Wirkung einer physischen Barriere basieren dürfen. Vielmehr muss das Fischverhalten bei der Bemessung, Gestaltung und Dimensionierung von Fischschutz- beziehungsweise Leiteinrichtungen und Abstiegskorridoren berücksichtigt werden. Bei den folgenden Empfehlungen ist grundsätzlich zu beachten, dass alle im Projekt untersuchten Lösungsmöglichkeiten für den Fischschutz und Fischabstieg speziell auf den jeweiligen Standort und Anlagentyp ausgelegt sind und sich entsprechend stark voneinander unterscheiden. Darüber hinaus wurden zusätzliche Erfahrungswerte aus der Literatur herangezogen.

Empfehlungen zur Verbesserung der Fischschutz- und Leitwirkung, soweit situationsbedingt möglich:

- Eine Verbesserung der Fischschutz- und Leitwirkung von mechanischen Barrieren kann durch eine weitere Reduktion der lichten Stabweite in Kombination mit flachen Rechenwinkeln (möglichst schräg zur Fließrichtung) erreicht werden (Ebel 2013). Die Optimierung der physischen Barrierewirkung ist aber nur dann zielführend, wenn gut auffindbare und ausreichend dimensionierte Abstiegskorridore (Bypass) über die komplette Wassersäule zur Verfügung stehen.

- Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die **Anströmgeschwindigkeit am Rechen** kleiner gleich dem aus der Literatur bekannten kritischen Wert von 0,5 m/s (Ebel 2013) liegt. Dies kann hydraulisch durch eine größere Rechenfläche kompensiert werden (z. B. durch Verwendung eines schräg zur Fließrichtung geneigten Horizontalrechens).
- Weitere **technische Möglichkeiten zur Verbesserung des Fischschutzes** können die Kombination mechanischer Barrieren (auch von Bestandsanlagen) beispielsweise mit einer Verhaltensbarriere durch Elektrifizierung (Berger & Lehmann 2017) oder mit dem elektrischen Seilrechen (Egg et al. 2019, Kammerlander et al. 2020) darstellen. Auch derartige Hybridbarrieren müssen immer mit einem gut auffindbaren Fischabstiegskorridor kombiniert werden.
- Nach Angaben aus Ebel (2013) werden für die **Beaufschlagung von Bypässen** zum Fischabstieg an mechanischen Barrieren ohne Leitwirkung (beziehungsweise Schräganströmung) etwa 5 % bis 10 % und an Barrieren mit Leitwirkung 2 % bis 5 % des Turbinendurchflusses empfohlen. Der Effekt der Dotation ist nach Ebel (2013) auch insgesamt stark abhängig von weiteren standortspezifischen Faktoren: der Rechengeometrie, den Anströmgeschwindigkeiten am Rechen und am Eintrittsprofil in den Bypass und der räumlichen Ausdehnung der für Fische wahrnehmbaren Strömung.
- Zumindest am Standort Baierbrunn an der Isar scheint für den Fischabstieg die günstige **Positionierung** der rauen Rampe zwischen dem Turbineneinlauf und dem Ufer in Kombination mit der **hohen Dotation** von 31 % des Gesamtabflusses sowie der großen **Breite** von 40 m (= 35 % der Gesamtgewässerbreite) insbesondere für in Ufernähe driftende Jungfische entscheidend für die Auffindbarkeit und Akzeptanz dieses Korridors im Vergleich zum Turbinenkorridor gewesen zu sein. Es ist zu beachten, dass die Wasserkraftanlage am Standort Baierbrunn an der Isar ein Restwasserkraftwerk ist, das zusammen mit der rauen Rampe eine Restwasserstrecke dotiert. Die vergleichsweise hohe Dotation der rauen Rampe im Verhältnis zum Turbinenkorridor ergibt sich aus den hohen Anforderungen an die Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Isar. Somit handelt es sich hier um eine Sonderlösung im Vergleich zu den anderen Standorten.
- Für technische Bypässe werden mehrere Einstiegsmöglichkeiten über die Wassersäule verteilt für sohlennah, mittig und oberflächennah wandernde Fische empfohlen (vergleiche Wagner 2021). Grundsätzlich würde an Anlagen mit flach geneigten Horizontalrechen ein Bypass nach Stand der Technik (Ebel 2013) ebenfalls zu einer Verbesserung führen.

3.2 Verbesserungsmöglichkeiten für die gewässerökologische Situation

An jedem der in diesem Projekt untersuchten Standorte belegten die Ergebnisse zu den ökologischen Auswirkungen der Kraftwerksanlagen, dass das Fließgewässerkontinuum durch die Kraftwerksanlage beziehungsweise das jeweilige zugehörige Querbauwerk stark unterbrochen wird. Dies spiegelte sich in Unterschieden der abiotischen Habitateigenschaften und in der Zusammensetzung der aquatischen Lebensgemeinschaft zwischen Oberwasser- und Unterwasser wider, die je nach Standort mehr oder weniger stark ausgeprägt waren. Durch den Einbau von Turbinen wurden keine wesentlichen Veränderungen dieser Unterschiede zwischen Ober- und Unterwasser im Vergleich zu der Situation vor dem Kraftwerksbau nachgewiesen, obwohl einige der untersuchten innovativen Anlagen die Zielsetzung haben, fließgewässerdynamische Prozesse, wie z. B. den Geschiebetransport oder die Verfrachtung von Totholz, zu verbessern. Daher wäre es zu erwarten gewesen, dass in einigen Fällen (z. B.

Schachtkraftwerk, bewegliches Kraftwerk) die Auswirkungen der Unterbrechung des Fließgewässerkontinuums nach dem Bau einer solchen innovativen Anlage geringer werden, was jedoch nicht der Fall war.

Nur am Standort Au an der Iller wurden nach dem Kraftwerksbau positive Lebensraumveränderungen festgestellt (z. B. ein Angleich der Substratzusammensetzung zwischen Ober- und Unterwasser), die sich wahrscheinlich auf den Umbau der festen Wehranlage in ein absenkbares Schlauchwehr mit Kiesschleuse zurückführen lassen. Auf Basis der Ergebnisse der hier durchgeführten Untersuchungen kann sich an alpin geprägten Gewässern wie der Iller eine **Kiesschleuse** langfristig positiv auf die abiotischen Habitateigenschaften und dadurch möglicherweise auch auf die aquatische Lebensgemeinschaft auswirken. Die Geschiebeproblematik sollte verstärkt insbesondere an Wasserkraftanlagen in stark geschiebeführenden Gewässern berücksichtigt werden.

In diesem Projekt wurde nur das unmittelbare Umfeld der einzelnen Wasserkraftanlagen betrachtet, so dass keine großräumigen Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt werden können. Generell ist es insbesondere für den Schutz strömungsliebender, kieslaichender Fischarten von großer Bedeutung, möglichst viele freie Fließstrecken zu erhalten, wiederherzustellen und/oder strukturell aufzuwerten. Solange dies nicht realisierbar ist, kann die **Schaffung fischökologisch funktionaler Ersatzlebensräume** zu einer Verbesserung der fischökologischen Situation beitragen. Beispielsweise ermöglichen richtig angelegte, funktionale, naturnahe Umgehungsgewässer Fischen nicht nur eine Durchgängigkeit, sondern können auch zusätzlichen Lebensraum schaffen und somit zumindest teilweise als Ersatz für die durch den Aufstau verlorengegangenen Schlüssellebensräume wie Juvenilhabitate und Laichplätze fungieren (Nagel et al. 2018, Pander et al. 2013, 2015 & 2021).

Am Standort Eixendorf konnten positive Effekte für Kieslaicher durch die Schaffung von Laichplätzen unterhalb des Turbinenauslaufs festgestellt werden (Knott et al. 2021). Auch der Rückbau von Ufer- und Sohlsicherungen, Struktureinbringungen, eine Abflachung von Uferböschungen, wann immer möglich, und die Schaffung von Flachwasserzonen als Juvenilhabitate können sich positiv auf die Fischökologie auswirken, wobei neben der Herstellung solcher Teilhabitate auch deren Konnektivität von großer Bedeutung ist (Pander & Geist 2013, Pander et al. 2017, Nagel et al. 2018, Geist 2021).

4 Literatur

- Baumgartner, L. J., Reynoldson, N. & Gilligan, D. M. (2006): Mortality of larval Murray cod (*Maccullochella peelii peelii*) and golden perch (*Macquaria ambigua*) associated with passage through two types of low-head weirs. *Marine and Freshwater Research* 57(2): 187–191.
- Behrmann-Godel, J. & Eckmann, R. (2003): A preliminary telemetry study of the migration of silver European eel (*Anguilla anguilla* L.) in the River Mosel, Germany. *Ecology of Freshwater Fish* 12: 196–202.
- Berger, C. & Lehmann, B. (2017): Bemessung von Horizontalrechen an Wasserkraftanlagen für die Abwanderung von Lachssmolts und Aalen. *Bemessung im Wasserbau – Klimaanpassung, Untersuchungen, Regeln, Planung, Ausführung* 58: 339–350.
- 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.
- Durif, C., Elie, P., Gosset, C., Rives, J. & Travade, F. (2003): Behavioural study of downstream migrating eels by radiotelemetry at a small hydroelectric powerplant. In: Dixon, D. A. (Ed), *Biology, management, and protection of catadromous eels*. American Fisheries Society Symposium 33, Bethesda, USA, pp. 343–356.
- DWA (2005): *Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen: Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle*. DWA Themen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- Ebel, G. (2013): *Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme*. Ingenieurbiologische 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 hydropower plant. *Ecological Engineering* 106: 349–357.
- Egg, L., Pander, J., Mueller, M. & Geist, J. (2018): Comparison of sonar-, camera- and net-based methods in detecting riverine fish-movement patterns. *Marine and Freshwater Research* 69: 1905–1912.
- Egg, L., Pander, J., Mueller, M. & Geist, J. (2019): Effectiveness of the electric fish fence as a behavioural barrier at a pumping station. *Marine and Freshwater Research* 70(10): 1459–1464.
- Egg, L., Mueller, M., Pander, J., Knott, J. & Geist, J. (2020): *Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen: Band 2b Vergleich von sonar-, kamera- und netzbasierten Monitoringmethoden*. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising. 20 Seiten.
- Euston, E. T., Royer, D. D. & Simons, C. L. (1997): Relationship of emigration of Silver American Eels (*Anguilla rostrata*) to environmental variables at a low head hydro station. In: Mahoney, D. J. (Ed), *Waterpower'97*. American Society of Civil Engineers, New York, USA, pp. 549–558.

- Geist, J. (2021): Green or red: Challenges for fish and freshwater biodiversity conservation related to hydropower. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 31(7): 1551–1558.
- Juhrig, L. (2013): Die Very-Low-Head-Turbine – Technik und Anwendung. In Heimerl S. (Ed), *Wasserkraftprojekte*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 327–333.
- Kammerlander, H., Schlosser, L., Zeiringer, B., Unfer, G., Zeileis, A. & Aufleger, M. (2020): Downstream passage behavior of potamodromous fishes at the fish protection and guidance system “Flexible Fish Fence”. *Ecological Engineering* 143: 105698.
- Kibel, P. & Coe, T. (2011): Archimedes Screw Risk Assessment: Strike and Delay Probabilities. Final Report RA1108. Fishtek Consulting Ltd, Moretonhampstead, Devon, UK.
- Klopries, E. M., Deng, Z. D., Lachmann, T. U., Schüttrumpf, H. & Trumbo, B. A. (2018): Surface bypass as a means of protecting downstream-migrating fish: lack of standardised evaluation criteria complicates evaluation of efficacy. *Marine and Freshwater Research* 69: 1882–1893.
- Knott, J., Mueller, M., Pander, J. & Geist, J. (2019): Fish Passage and Injury Risk at a Surface Bypass 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., Suttor, C., Klarl, M., Mueller, M., Pander, J. & Geist, J. (2022a): Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen: Band 10 Großweil an der Loisach. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising. 127 Seiten.
- Knott, J., Mueller, M., Pander, J. & Geist, J. (2022b): Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen: Band 12 Gesamtbewertung. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising. 170 Seiten.
- Larinier, M. & Travade, F. (2002): Downstream migration: problems and facilities. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 364: 181–207.
- 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(3): 240–255.
- Mueller, M., Knott, J., Egg, L., Suttor, C., Pander, J. & Geist, J. (2020c): Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen: Band 3 Baidersdorf-Wellerstadt an der Regnitz. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising. 92 Seiten.
- Mueller, M., Knott, J., Egg, L., Suttor, C., Pander, J. & Geist, J. (2020d): Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen: Band 4 Lindesmühle an der Fränkischen Saale. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising. 95 Seiten.

- Mueller, M., Knott, J., Suttor, C., Pander, J. & Geist, J. (2020e): Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen: Band 5 Au an der Iller. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising. 93 Seiten.
- Mueller, M., Knott, J., Suttor, C., Pander, J. & Geist, J. (2020f): Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen: Band 6 Heckerwehr an der Roth. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising. 102 Seiten.
- Mueller, M., Knott, J., Bierschenk, B., Suttor, C., Pander, J. & Geist, J. (2020g): Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen: Band 7 Eixendorf an der Schwarzach. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising. 88 Seiten.
- Mueller, M., Knott, J., Bierschenk, B., Suttor, C., Pander, J. & Geist, J. (2020h): Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen: Band 8 Baierbrunn an der Isar. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising. 95 Seiten.
- Mueller, M., Knott, J., Bierschenk, B., Suttor, C., Pander, J. & Geist, J. (2020i): Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen: Band 9 Höllthal an der Alz. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising. 102 Seiten.
- Mueller, M., Sternecker, K., Milz, S. & Geist, J. (2020l): Assessing turbine passage effects on internal fish injury and delayed mortality using X-ray imaging. *PeerJ* 8: e9977.
- Mueller, M., Knott, J., Egg, L., Bierschenk, B., Pander, J. & Geist, J. (2022a): Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen: Band 1 Hintergrund und Methoden. Abschlussbericht, 2. aktualisierte Auflage 2022. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising. 191 Seiten.
- Mueller, M., Knott, J., Pander, J. & Geist, J. (2022b): Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen: Band 11 Standortübergreifende Verbesserungsmöglichkeiten für den Fischschutz und die Gewässerökologie. Abschlussbericht, 2. aktualisierte Auflage 2022. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising. 25 Seiten.
- Mueller, M., Knott, J., Pander, J. & Geist, J. (2022c): Experimental comparison of fish mortality and injuries at innovative and conventional small hydropower plants. *Journal of Applied Ecology*, online early. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14236>.
- Nagel, C., Mueller, M., Pander, J., Eirich, C., Klarl, M., Ipfelkofer, D. & Geist, J. (2018): Bewertung von habitatverbessernden Maßnahmen zum Schutz von Fischpopulationen. Projektbericht im Auftrag der Verbund Innkraftwerke GmbH. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising. 157 Seiten.
- Pander, J. & Geist, J. (2013): Ecological indicators for stream restoration success. *Ecological Indicators* 30: 106–118.
- 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. & Geist, J. (2015): Succession of fish diversity after reconnecting a large floodplain to the upper Danube River. *Ecological Engineering* 75: 41–50.

- Pander, J., Mueller, M., Knott, J., Egg, L. & Geist, J. (2017): Is it worth the money? The functionality of engineered shallow stream banks as habitat for juvenile fishes in heavily modified water bodies. *River Research and Applications* 33(1): 63–72.
- Pander, J., Mueller, M., Knott, J. & Geist, J. (2020): Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen: Band 2a Versuche zur fangbedingten Schädigung. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising. 43 Seiten.
- Pander, J., Nagel, C. & Geist, J. (2021): Integration of constructed floodplain ponds into nature-like fish passes supports fish diversity in a heavily modified water body. *Water* 13(8): 1018.
- Pauwels, I. S., Baeyens, R., Toming, G., Schneider, M., Buysse, D., Coeck, J. & Tuhtan, J. A. (2020): Multi-Species Assessment of Injury, Mortality, and Physical Conditions during Downstream Passage through a Large Archimedes Hydrodynamic Screw (Albert Canal, Belgium). *Sustainability* 12(20): 8722.
- 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.
- Schmalz, W. (2010): Untersuchungen zum Fischabstieg und Kontrolle möglicher Fischschäden durch die Wasserkraftschnecke an der Wasserkraftanlage Walkmühle an der Werra in Meiningen. Abschlussbericht. Fischökologische & Limnologische Untersuchungsstelle Südthüringen, Breitenbach.
- U.S. Fish and Wildlife Service (2017): Fish passage engineering design criteria. USFWS, Northeast Region R5, Hadley, MA.
- Wagner, F. (2021): Wann ist ein Rechen ein Fischschutzrechen? Die funktionalen Elemente eines Fischschutzsystems. Forum Fischschutz & Fischabstieg, Fact Sheet 05.



Eine Behörde im Geschäftsbereich
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

