

LEHRSTUHL FÜR AQUATISCHE SYSTEMBIOLOGIE

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen

Abschlussbericht 2020, 2. aktualisierte Auflage 2022
Band 1: Hintergrund und Methoden



Dr. Melanie Mueller, Dr. Josef Knott, Dr. Leonhard Egg, Dr. Beate Bierschenk,
Dr. Joachim Pander, Prof. Dr. Jürgen Geist

30. JUNI 2020 – 2. AKTUALISIERTE AUFLAGE 30. JUNI 2022

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
Glossar	XII
Vorwort	1
1. Einleitung	3
1.1. Hintergrund	3
1.2. Projektziele.....	5
2. Beschreibung der innovativen Kraftwerkstechnologien.....	7
2.1. Very Low Head Turbine.....	7
2.2. Wasserkraftschnecke.....	8
2.3. Bewegliches Kraftwerk.....	9
2.4. Schachtkraftwerk	10
3. Fischschutzeinrichtungen an konventionellen Kraftwerksanlagen.....	12
3.1. Feinrechen	12
3.2. Spülklappen/-rinnen.....	15
3.3. Bypasssysteme.....	15
3.4. Weitere Fischschutzeinrichtungen.....	16
4. Übersicht der Untersuchungsstandorte	18
5. Notwendige Genehmigungen zur Projektdurchführung.....	21
6. Methoden im Projektteil A	24
6.1. Fang von Fischen an Wasserkraftanlagen mittels netzbasierter Fangtechniken.....	28
6.2. Erfassen äußerlich sichtbarer Verletzungen.....	31
6.2.1. Standardisiertes Protokoll zur Erhebung äußerer Verletzungen	33
6.3. Erfassen innerer Verletzungen.....	41
6.3.1. Röntgendiagnostik	42

6.3.2.	Standardisiertes Protokoll zur Erhebung innerer Verletzungen	45
6.4.	Erfassen verzögerter Mortalität	51
6.5.	Datenverwaltung Fischschädigung	55
6.6.	Standardisierte Fischzugaben an den Untersuchungsstandorten	57
6.6.1.	Auswahl der Versuchsfische.....	59
6.6.2.	Herkunft der Versuchsfische.....	64
6.6.3.	Versuchsablauf.....	67
6.7.	Beprobung des natürlichen Fischabstiegs an den Untersuchungsstandorten.....	71
6.8.	Validierung der Fangeffektivität der Hamen.....	72
6.9.	Messung abiotischer Gewässerparameter	74
6.10.	Messung abiotischer Turbinenparameter mittels Sensorfisch	75
6.11.	Sonaruntersuchungen zum Fischverhalten an Wasserkraftanlagen	79
6.12.	Datenanalyse und Statistik Projektteil A.....	84
6.12.1.	Fallzahlplanung.....	84
6.12.2.	Berechnung von Mortalitätsraten.....	89
6.12.3.	Univariate Methoden zur Auswertung von Wiederfang, Mortalität, Vitalität und Verletzungsmustern.....	93
6.12.4.	Multivariate Methoden zur Auswertung der Verletzungsmuster der Fische ..	94
6.13.	Durchgeführte Untersuchungen Projektteil A	99
7.	Methoden im Projektteil B	104
7.1.	Habitatkartierung mittels Side-imaging Sonar.....	107
7.2.	Physikalische und chemische Habitateigenschaften.....	110
7.3.	Aquatische Lebensgemeinschaft	111
	Periphyton	111
	Makrophyten.....	111
	Makrozoobenthos	112
	Fische	112

7.4. Datenanalyse und Statistik Projektteil B.....	114
7.5. Durchgeführte Untersuchungen Projektteil B.....	116
8. Zusammenschau Ergebnisse Projektteil A und B.....	118
9. Grenzen des Projekts.....	119
9.1. Übertragbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse.....	119
9.2. Untersuchungszeitpunkte und Verfügbarkeit der Fische.....	120
9.3. Wiederfang und Berechnung von Mortalitätsraten.....	121
9.4. Limitierungen bei der Bewertung des natürlichen Fischabstiegs.....	122
Literaturverzeichnis	124
Anhang.....	XXV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schema der integrativen Bewertung der Hauptkomponenten in den Projektteilen A und B	6
Abbildung 2 Schematische Darstellung einer VLH-Turbine im Fluss und Foto der in Au an der Iller eingebauten VLH-Turbine bei abgesenktem Wasserstand	8
Abbildung 3 Schematische Darstellung einer Wasserkraftschnecke im Fluss und Foto der am Heckerwehr an der Roth eingebauten Wasserkraftschnecke	9
Abbildung 4 Schematische Darstellung eines beweglichen Kraftwerks im Fluss und Foto des in Eixendorf errichteten beweglichen Kraftwerks.....	10
Abbildung 5 Schematische Darstellung eines Schachtkraftwerks und Foto des in Großweil errichteten Schachtkraftwerks.....	11
Abbildung 6 Schematische Darstellung eines geneigten Vertikalrechens mit Fischabstieg über eine Spülrinne	13
Abbildung 7 Schematische Darstellung eines geneigten Horizontalrechens mit Fischabstieg über eine Spülklappe, Aalrohr mit vorgelagertem Aalbesen sowie einer Aalrutsche zum Transfer der Aale ins Unterwasser.....	14
Abbildung 8 Bayernkarte mit Verortung der Projektstandorte unterschieden nach Kraftwerkstypen	18
Abbildung 9 Schematische Darstellung der Untersuchungen im Projektteil A.....	25
Abbildung 10 Schematische Darstellung der verschiedenen Zugabe- und Entnahmestellen für Fische des natürlichen Fischbestands und aus den standardisierten Fischzugaben.....	25
Abbildung 11 Aufsicht auf einen Fließgewässerausschnitt mit einem konventionellen Laufkraftwerk. Die Turbinen werden durch einen vorgeschalteten Rechen vor dem Eindringen von Treibgut und Geschiebe geschützt.....	27
Abbildung 12 Schematische Darstellung einer VLH-Turbine	28
Abbildung 13 Schematische Darstellung eines am Turbinenauslauf angebrachten Fanghamens mit abnehmender Maschenweite und Steertreue.....	30
Abbildung 14 Beispielbilder zu Amputationen, Schuppenverlust, Flosseneinrissen, Flossenamputationen, Einblutungen in den Augen und Flossen und Quetschungen in verschiedenen Intensitätsstufen	35
Abbildung 15 Beispielbilder zu den Verletzungstypen Hautverletzung, Verletzung Rückgrat, Pigmentveränderung und Gasblasen in verschiedenen Intensitätsstufen.....	36

Abbildung 16 Einteilung des Fischkörpers in verschiedene Bereiche zur Dokumentation der auftretenden Verletzungen	37
Abbildung 17 Protokollblatt zur Dokumentation der äußeren Verletzungen der Fische	39
Abbildung 18 Nummerierungssystem für die individuelle Zuordnung der Daten zu den einzelnen Versuchsfischen	40
Abbildung 19 Gasblasen im Darm eines Rotauges auf dem Röntgenbild, Darm des präparierten Rotauges sowie Gasblasen im herauspräparierten Darm.....	44
Abbildung 20 Anatomie eines Flussbarsches	45
Abbildung 21 Protokollblatt zur Dokumentation der inneren Verletzungen der Fische	47
Abbildung 22 Beispiele zu den Verletzungskategorien der möglichen inneren Verletzungen von Fischen nach der Kraftwerkspassage.....	51
Abbildung 23 Schematische Darstellung eines Hälterungssystems am Beispiel von zehn Langstromrinnen	53
Abbildung 24 Schematische Darstellung eines Hälterungseinsatzes zur Bildung von Kompartimenten für die separierte Haltung der Fische einzelner Versuchsdurchgänge.....	53
Abbildung 25 Hälterungsstreifen zur individuellen Zuordnung der Fische in der Hälterung	54
Abbildung 26 Pin zur Kennzeichnung der Hälterungseinsätze.....	54
Abbildung 27 Login-Formular beim Start der Datenbank zur Dokumentation von Bearbeiter und Eingabedatum	56
Abbildung 28 Eingabeformular der Datenbank zum Einpflegen der Fischschäden.....	56
Abbildung 29 Automatisch generiertes Output-Excel File der Abfrage der Fischschäden aus der Datenbank.....	57
Abbildung 30 Schematische Darstellung des Versuchsdesigns für die standardisierten Fischzugaben an den verschiedenen Kraftwerksstandorten	58
Abbildung 31 Schematische Darstellung morphologischer Unterschiede bei Fischen bezüglich Körperform, Schuppentyp und Flossenstrahlen	60
Abbildung 32 Fischtransportzug des Lehrstuhls mit Tandemhochlader und thermoisolierten Fischfässern	68
Abbildung 33 Fischzugabe von Aalen der Versuchsgruppe Turbine & Rechen und Auswertung der gefangenen Fische	70
Abbildung 34 Validierung der Fangeffektivität der Hamennetze	73

Abbildung 35 Schematische Skizze der Messpunkte für die Strömungsmessungen am Fanghamen	75
Abbildung 36 Sensorfisch mit den drei verschiedenen Messachsen entlang derer Beschleunigung und Rotation gemessen werden	76
Abbildung 37 Sensorfisch mit montiertem Auftriebskörper	77
Abbildung 38 Schematische Darstellung der drei verschiedenen Sonartypen.....	81
Abbildung 39 Stationäres Modul mit Halter und Befestigungsarm und mobiles Modul I befestigt auf einem Carolina Skiff J14	82
Abbildung 40 Mobiles Modul II vor der Wasserkraftanlage Lindesmühle/Fränkische Saale in Bad Kissingen	83
Abbildung 41 Untersuchungsdesign zu den Habitatuntersuchungen im Projektteil B	104
Abbildung 42 Schematische Darstellung der Untersuchungen in Projektteil B.....	106
Abbildung 43 Side Sonaraufnahmen mit Totholz (rot umrandet) im Unterwasser der Iller am Kraftwerksstandort Au, aufgenommen mit 455 kHz und mit 800 kHz	108
Abbildung 44 Brückenpfeiler im Unterwasser der Loisach, aufgenommen mit 455 kHz....	108
Abbildung 45 Sonaraufnahme des Unterwassers der Loisach	109
Abbildung 46 Übersicht der verschiedenen, anhand der Sonaruntersuchung generierten Habitattypen am Standort Eixendorf	109
Abbildung 47 Schematische Darstellung der Normalisierungsmethode zur integrativen Gesamtauswertung aller biotischen Daten nach Mueller et al. (2014b)	116

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht über die Untersuchungsstandorte.....	20
Tabelle 2 Übersicht der erforderlichen Genehmigungen, die für die Durchführung von Projektteil A und Projektteil B beantragt werden mussten.....	23
Tabelle 3 Fischart, Totallänge und Anzahl bei der Lieferung sowie Herkunft der Versuchsfische.....	65
Tabelle 4 Exemplarische Aufstellung der 2 h Beprobungsintervalle während eines Untersuchungsblocks zum natürlichen Fischabstieg.....	72
Tabelle 5 Sensorfisch-Durchgänge und verwertbare Datensätze an den drei im September 2016 getesteten Turbinentypen.....	78
Tabelle 6 Darstellung der Anzahl an Fischen in den Versuchsgruppen und Kontrollgruppen für die verschiedenen Versuchsgruppen und Wiederholungen an den unterschiedlichen Anlagentypen sowie der Gesamtzahl an Fischen aufgeschlüsselt nach Anlagentyp, Art und Standort	88
Tabelle 7 Zeitplan der durchgeführten Untersuchungen für den Methodenversuch zur fangbedingten Schädigung am Standort Moosach/Freising.....	99
Tabelle 8 Zeitplan der durchgeführten Untersuchungen an den konventionellen und innovativen Wasserkraftanlagen.....	100
Tabelle 9 Zeitplan der durchgeführten Untersuchungen für den Projektteil B Ökologische Auswirkungen aufgeteilt nach den verschiedenen Standorten	117
Tabelle 10 „Score Sheet“ mit den Kriterien zur Einteilung der Intensität der äußeren Einzelverletzungen im Fischschädenprotokoll	XXV
Tabelle 11 Erläuterungen zur Einstufung der allgemeinen Kriterien des Fischschäden-Protokollblatts	XXVIII
Tabelle 12 „Score Sheet“ mit den Kriterien zur Einteilung der Intensität der inneren Einzelverletzungen im Fischschädenprotokoll	XXIX
Tabelle 13 Exemplarischer Ausschnitt aus einem Dienstplan für die standardisierten Fischzugaben in Baiersdorf.....	XXXII
Tabelle 14 Exemplarischer Ausschnitt aus einem Dienstplan für die Beprobung des natürlichen Fischbestandes in Baiersdorf.....	XXXIII
Tabelle 15 Liste der in die multivariaten Modelle zur Analyse der Zusammenhänge zwischen Verletzungsmustern und abiotischen Parametern eingegangenen erklärenden Variablen..	XXXIV
Tabelle 16 Terminübersicht Wasserkraftprojekt.....	XXXVI

Abkürzungsverzeichnis

AIC	Akaike Information Criterion
ANOVA	Analysis of Variance
ANOSIM	Analysis of Similarities; nicht-parametrische statistische Methode zur Varianzanalyse multivariater Daten
ArcGIS	Software zur Analyse von Geodaten
ARIS	Adaptive Resolution Imaging Sonar
AVBayFiG	Ausführungsverordnung zum Bayerischen Fischereigesetz
AÜW	Allgäuer Überlandwerke
BayFiG	Bayerisches Fischereigesetz
BEST	Biota-Environment-Stepwise matching
ca.	Circa
DIDSON	Dual Frequency Identification Sonar
DIVERSE	Funktion im Programm PRIMER zur Berechnung von Diversitätsindices
DistLM	Distance based linear modelling; statistische Methode zur Analyse von Zusammenhängen zwischen biotischen und abiotischen Daten
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
et al.	Und andere, gibt bei Literaturziten weitere Autoren an
etc.	Et cetera

EU	Europäische Union
FFH	Fauna Flora Habitat
g	Erdbeschleunigung (= 9,81 m/s ²)
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
IUCN	International Union for Conservation of Nature
KG-Rohr	Kanalgrundrohr
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
Lf	Elektrische Leitfähigkeit
LfL	Landesanstalt für Landwirtschaft
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LS	Lehrstuhl
mA	Milliampere
Max	Maximum
Min	Minimum
Min-Max	Minimum-Maximum, Wertebereich
MS 222	Triacin Methan Sulfonat, Narkosemittel für Fische

MW	Arithmetischer Mittelwert
MZB	Makrozoobenthos
NaCl	Natriumchlorid, Kochsalz
NatFi	Natürlicher Fischabstieg
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff
Nitrat-N	Nitrat-Stickstoff
NMDS	Non-metric multidimensional scaling
O ₂	Konzentration des gelösten Sauerstoffs
Ortho-P	Orthophosphat
ÖIB	Ökoenergieinstitut Bayern
pH	pH-Wert
PRIMER	Softwareprogramm zur statistischen Analyse von multivariaten Daten
Q	Abfluss
R	Softwareprogramm zur statistischen Datenanalyse
R^2	Bestimmtheitsmaß
RL	Richtlinie
RPC	Ratio of pressure change
SchO	Schifffahrtsordnung

SD	Standardabweichung; symbolisiert durch „±“
SIMPER	Similarity Percentages; statistische Methode zur Analyse der Stetigkeit von Arten
sp.	Nicht näher bezeichnete Spezies einer Gattung innerhalb der biologischen Taxonomie
spp.	Mehrere Spezies einer Gattung
StadFi	Standardisierte Fischzugaben
StMUV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
StMWi	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie
TU	Technische Universität
TUM	Technische Universität München
UK	United Kingdom
USA	United States of America
U/min	Umdrehungen pro Minute
VLH	Very low head, in Bezug auf die „very low head“-Turbine mit Einsatz bei geringen Fallhöhen
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
z.B.	Zum Beispiel

Glossar

Absturz:	Höhenversatz in der Sohle eines Fließgewässers, über den das Wasser nach unten fällt.
Adulti:	Ist die Mehrzahl von Adultus und bezeichnet ein ausgewachsenes, geschlechtsreifes Tier.
Akal:	Fein- und Mittelkies ($> 0,2\text{--}2,0\text{ cm}$).
ARIS Sonar:	Sonargerät, das Schallwellen aussendet und die rückkehrenden Echos in digitale Bilder umwandelt, ähnlich wie ein medizinisches Ultraschallgerät. Es können damit Unterwasservideos aufgenommen werden, die in ihrer Qualität nicht von der Sichttiefe bzw. Trübung des Wassers beeinflusst werden.
Barotrauma:	Ein Barotrauma ist eine Verletzung, die bei schnellem Luftdruckwechsel bzw. als Folge schneller bis plötzlicher Luftdruckzunahme oder -abnahme auftritt.
Bindegewebe:	Bindegewebe ist die Bezeichnung für die Organe umhüllendes, verbindendes und stützendes Gewebe.
Bray-Curtis Koeffizient	Index für die Ähnlichkeit von Verletzungsmustern zwischen Fischen bzw. Versuchsgruppen sowie für die Ähnlichkeit von Artengemeinschaften zwischen Transekten bzw. Gewässerbereichen, kann Werte zwischen 0 (Werte sind maximal verschieden) und 1 (Werte sind identisch) annehmen.
Cypriniden:	Familie der karpfenartigen Fische.
DIDSON Sonar:	Sonargerät; Vorgängerversion des ARIS Sonar.
Dornfortsatz:	Der Dornfortsatz ist der nach hinten gerichtete Fortsatz eines Wirbels.

Dotation:	Wasserzuführung.
Drift/verdriften:	Passive Bewegung von Fischen in Strömungsrichtung ohne aktive Schwimmbewegung.
<i>Ductus pneumaticus</i> :	Als <i>Ductus pneumaticus</i> wird der Verbindungsgang zwischen der Schwimmblase und dem Vorderdarm von Knochenfischen bezeichnet.
Elastomermarkierung:	Markierung von Fischen mit Elastomerfarbstoffen auf Silikonbasis. Der Farbstoff wird i.d.R. mit einer Insulinspritze unter die Haut der Fische gespritzt, härtet dort aus und ist im Fischgewebe über mehrere Jahre sichtbar.
Epidermis:	Oberhaut der Wirbeltiere, bildet die Schutzschicht zur Umwelt.
Epipotamal:	Bei der längszonalen Gliederung von Fließgewässern oberster Abschnitt des Unterlaufs; entspricht der Barbenregion in der Fischregionengliederung.
Epirhithral:	Bei der längszonalen Gliederung von Fließgewässern oberster Abschnitt des Oberlaufs; entspricht der oberen Forellenregion in der Fischregionengliederung.
Equilibrium:	Gleichgewicht.
Ethmoid:	Als Ethmoid werden die knöchernen Strukturen der Nase beim Fisch bezeichnet.
Euthanasie:	Als Euthanasie wird das Einschläfern von Tieren mit einer tödlichen Dosis eines Schlafmittels bezeichnet.
Expansion:	Starke räumliche Ausdehnung (besonders von Gasen).
Fallhöhe:	Unterschied des Wasserspiegels oberhalb und unterhalb eines Wehres bzw. Kraftwerkes.

Feinrechen:	Rechen mit engem Stababstand (≤ 20 mm), um größere Fische daran zu hindern in die Turbine zu gelangen.
Fischabstieg:	Mit der Strömung gerichtete Flussabwärtswanderung von Fischen, die aktiv oder passiv durch Drift erfolgen kann.
Fließgewässerkontinuum:	Nicht unterbrochener Verlauf eines Fließgewässers von der Quelle bis zur Mündung.
Fraktur:	Als Fraktur wird ein Knochenbruch bezeichnet.
Francis-Turbine:	Die Francis-Turbine ist eine im Jahr 1849 in den USA von dem Ingenieur J.B. Francis entwickelte Wasserturbine. Das Wasser wird durch ein schneckenförmiges Rohr, die Spirale, in zusätzlichen Drall versetzt und anschließend durch ein feststehendes Leitrad mit verstellbaren Schaufeln auf die gegenläufig gekrümmten Schaufeln des Laufrads gelenkt. Die Francis-Turbine kommt bei mittleren Fallhöhen des Wassers und mittleren Durchflussmengen v.a. in Laufwasserkraftwerken und Speicherkraftwerken zum Einsatz.
Gasresorption:	Wiederaufnahme bzw. Rücklösung vom Gas in einer Flüssigkeit, in diesem Fall im Blut der Fische.
Gewässersohle:	Grund des Gewässers.
Gieren:	Drehbewegung um die Vertikalachse.
Grobrechen:	Rechen mit weitem Stababstand (> 20 mm).
Habitat:	Aufenthaltsbereich von Tieren, Pflanzen oder Organismen, in welchem diese natürlicherweise oder normalerweise anzutreffen sind.
Hämatom:	Blutaustritt aus verletzten Blutgefäßen im Körpergewebe.

Hamen:	Trichterförmiges Netz zum Fang von Fischen in Fließgewässern. Der Netzsack von mehreren Metern Länge hat eine abnehmende Maschenweite und verjüngt sich nach hinten. Am hinteren Ende wird die eigentliche Fangeinrichtung, der sogenannte Steert, angebracht.
Horizontalrechen:	Rechen mit horizontal angeordneten Rechenstäben.
Hyporheisches Interstitial:	Durchflossenes Lückensystem unter und neben der Gewässersohle.
Hyporhithral:	Bei der längszonalen Gliederung von Fließgewässern unterer Abschnitt des Oberlaufs; entspricht der Äschenregion in der Fischregionengliederung.
Indifferent:	Bezeichnung für Organismen, die keine ausgeprägte Präferenz bezüglich eines lebensraumbestimmenden Faktors zeigen.
Kammschupper:	Fische mit am Hinterrand kammartig gezähnten Schuppen.
Kaplan-Rohrturbine:	Weiterentwicklung der Kaplan-Turbine für Fallhöhen bis max. 25 m und einer Leistung von bis zu 75 MW, deren Welle mit Laufrad horizontal in Richtung des strömenden Wassers eingebaut wird. Laufrad und Leitapparat sind verstellbar.
Kaplan-Turbine:	Die Kaplan-Turbine ist eine axial angeströmte Wasserturbine mit verstellbarem Laufrad. Sie wurde vom österreichischen Ingenieur V. Kaplan im Jahr 1913 aus der Francis-Turbine weiterentwickelt. Das Laufrad gleicht einem Schiffspropeller, dessen Flügel verstellbar sind. Die Kaplan-Turbine ist für den Einsatz bei Fallhöhen bis zu 80 m geeignet sowie bei großen und schwankenden Durchflussmengen. Sie ist damit prädestiniert für große Flusskraftwerke.

Kavitationskräfte:	Bildung und Auflösung von gasgefüllten Hohlräumen in Flüssigkeiten. Die häufigsten Ursachen von Kavitation sind schnell bewegte Objekte im Wasser, z.B. in Wasserturbinen.
Kompression:	Als Kompression bezeichnet man sowohl das Zusammenpressen von Gasen, was zu einer Erhöhung des Drucks und verkleinerten Volumens führt, als auch die Quetschung eines Organs oder einer Körperstelle durch mechanische Einwirkung.
Kontaktradiographie:	Die Kontaktradiographie ist ein fotografisches Aufnahmeverfahren ohne Kamera, bei dem die Fische auf einen mit einer fotografischen Schicht versehenen Film gelegt werden. Durch die in jedem Körper natürlicherweise enthaltenen radioaktiven Substanzen wird der Film durch das aufgelegte Material je nach Art und Konzentration der radioaktiven Stoffe unterschiedlich stark geschwärzt.
Kronenausschnitt:	Ausschnitte auf der Wehroberkante, um oberflächennah wandernden Fischen den Abstieg zu ermöglichen.
Lachssmolt:	Junger Lachs, der aus dem Fluss, in dem er geboren wurde, in den Ozean abwandert. In diesem Stadium finden auch physiologische Veränderungen statt, um den Wechsel vom Süßwasser ins Meer zu ermöglichen.
Lastzustand:	Der Lastzustand einer Turbine wird durch die Durchflussmenge bestimmt. Entsprechend des Lastzustands verändert sich die Stellung der Turbinenschaufeln. Bei Niedrigwasserabfluss und damit geringer Durchflussmenge läuft die Turbine in minimalem Lastzustand, die Turbinenschaufeln sind eng beieinander.
Lebensgemeinschaft:	Mit der aquatischen Lebensgemeinschaft ist in diesem Bericht die Gesamtheit aller Organismen der Gruppen Fische, Makrozoobenthos, Periphyton und Makrophyten gemeint, die bei den Untersuchungen im Projektteil B erfasst wurden.

Leibeshöhle:	Als Leibeshöhle (Coeloma) wird derjenige Hohlraum im Körper bezeichnet, welcher den Darmkanal und seine Anhänge (Leber etc.) sowie die anderen Eingeweide umschließt.
Letale Verletzung	Tödliche Verletzung.
Limnophil:	Bezeichnung für Organismen, die stehende Gewässer bevorzugen.
Lithophil:	Organismen, die kiesiges bis kiesig-sandiges Laichsubstrat bevorzugen.
Löslichkeitsprodukt:	Das Löslichkeitsprodukt gibt an, welche Menge eines Stoffes (Salz oder Gas) bei einer bestimmten Temperatur maximal gelöst sein kann. Bei der Überschreitung des Löslichkeitsproduktes kommt es zum Ausperlen (Gas) oder Ausfallen (Salz) des Stoffes.
Makrolithal:	Kopfgroße Steine vorherrschend, mit variablen Anteilen von Steinen, Kies und Sand (> 20–40 cm).
Makrophyten:	Bezeichnung für alle mit bloßem Auge erkennbaren untergetaucht lebenden Wasserpflanzen. In Gewässern zählen Wassermoose, Armleuchteralgen und Gefäßpflanzen zu den Makrophyten.
Makrozoobenthos:	Als Benthos wird die Gesamtheit der im und am Gewässerboden lebenden Organismen bezeichnet. Unter Makrozoobenthos werden hierbei die tierischen Organismen zusammengefasst, die mit dem bloßen Auge noch erkennbar sind (z.B. Würmer, Insektenlarven, Krebstiere, Egel).
Megalithal:	Große Steine, Blöcke und anstehender Fels (> 40 cm).
Meiofauna:	Anteil der bodenlebenden Organismen, die zwischen 0,30 mm und 1 mm groß sind. In Gewässern wird die Meiofauna von

verschiedenen Gliederwürmern, Nematoden, benthischen Rädertierchen und ähnlichen Organismen gebildet.

Mesolithal:	Faust- bis handgroße Steine, mit variablem Kies- und Sandanteil (> 6,3–20,0 cm).
Metapotamal:	Bei der längszonalen Gliederung von Fließgewässern mittlerer Abschnitt des Unterlaufs; entspricht der Brachsenregion in der Fischregionengliederung.
Metarhithral:	Bei der längszonalen Gliederung von Fließgewässern mittlerer Abschnitt des Oberlaufs; entspricht der unteren Forellenregion in der Fischregionengliederung.
Mikrolithal:	Grobkies mit Anteilen von Mittel-, Feinkies und Sand (> 2,0–6,3 cm).
Nadir-Druck:	Niedrigster Druck während der Turbinenpassage.
Oberwasser:	Wasserkörper oberhalb (stromaufwärts) eines Wehres.
Olfaktorisches System:	Geruchssinn.
OPDB:	Orthoclaadiinae, Podonominae, Diamesinae, Buchonomyiinae (Unterfamilien der Zuckmücken).
Orografisch:	In Fließrichtung gesehen.
<i>Os frontale</i> :	Das <i>Os frontale</i> , auch Stirnbein genannt, ist ein Teil des Fischeschädels, der eine schützende Funktion für das Gehirn besitzt.
Ösophagus:	Speiseröhre, bei Knochenfischen die Verbindung zwischen Kiemendarm und Magen bzw. Mitteldarm.

Peer-Review:	Verfahren zur Qualitätssicherung von wissenschaftlichen Publikationen. Dabei werden unabhängige Gutachter aus dem gleichen Fachgebiet wie das der Autoren herangezogen, um die Eignung zur Veröffentlichung zu beurteilen.
Periphyton:	Aufwuchs auf untergetauchten Oberflächen (z.B. Steinen) in Seen und Flüssen. Der Aufwuchs setzt sich aus Algen, Cyanobakterien („Blaualgen“) und Mikroben zusammen.
Physoclisten:	Als Physoclisten werden diejenigen Knochenfische bezeichnet, bei denen die Schwimmblase keine Verbindung zum Darm hat. Die Befüllung der Schwimmblase (Gasaustausch) erfolgt über das <i>Rete mirabile</i> . Zu den Physoclisten gehören z.B. Barschartige, Stichlinge und Dorsche.
Physostomen:	Als Physostomen wird der Teil der Knochenfische bezeichnet, bei denen die Schwimmblase über den <i>Ductus pneumaticus</i> mit dem Ösophagus/Vorderdarm verbunden ist. Die Schwimmblase wird durch Schlucken von Luft gefüllt. Zu den Physostomen gehören z.B. Hechte, Salmoniden und viele der Cypriniden.
Piscivor:	Als piscivor werden fischfressende Tiere bezeichnet.
Plankton:	Bezeichnung für Organismen, die im Wasser leben und deren Schwimmrichtung von den Wasserströmungen vorgegeben wird. Man unterscheidet dabei zwischen Phytoplankton (Algen) und Zooplankton (Einzeller, Krebstiere, Weichtiere, Rädertiere etc.).
Potamal:	Unterlauf eines Fließgewässers; sommerwarme (> 20°C) sandig-schlammige Zone eines Fließgewässers; große Temperaturschwankungen im Jahresverlauf.
Psammal:	Sand und/oder sandiger Schlamm (> 0,063–2,0 mm).
Pterygiophoren:	Pterygiophoren, auch Flossenstrahlenträger genannt, bilden den Sockel, an dem die Flossenstrahlen gelenkig ansetzen.

Raphe:	Spaltförmiger Durchbruch in den Schalen der Kieselalgen-Ordnung Pennales. Sie stellt eine Verbindung des Cytoplasmas mit dem umgebenden Medium her und dient als Bewegungsorganell, mit dessen Hilfe sich Kieselalgen mit Geschwindigkeiten von über 20 µm/Sekunde bewegen können. Allerdings wird nicht bei allen raphetragenden Kieselalgen aktive Beweglichkeit beobachtet.
Ratio of pressure change	Verhältnis des niedrigsten Drucks während der Turbinenpassage (Nadir-Druck) zum Akklimatisierungsdruck unmittelbar vor der Turbinenpassage. Das Verhältnis der Druckänderung ist von der Wassertiefe abhängig, auf die ein Fisch vor der Turbinenpassage akklimatisiert war, d.h. je größer die Wassertiefe ist, desto höher ist die Druckänderung.
Raue Rampe:	Überströmtes, fischpassierbares Querbauwerk (Gefälle ca. 1:3 bis 1:10) zur Einschränkung von Tiefenerosion in Fließgewässern. Raue Rampen unterscheiden sich durch ihr Gefälle von Sohlgleiten (1:10 bis 1:30).
Rechen:	Ein Rechen an einer Wasserkraftanlage besteht aus Metallstäben und deckt den Turbineneinlauf ab. Er dient in erster Linie zum Schutz der Turbine vor Treibgut.
Referenzzönose:	Fischartengemeinschaft eines Gewässers, die im natürlichen Zustand ohne Beeinflussung durch den Menschen potenziell vorhanden ist (Leitbild). Die Referenzzönose wird im Monitoring nach Wasserrahmenrichtlinie verwendet, um durch die Abweichung des Ist-Zustands gegenüber der Referenzzönose den ökologischen Zustand von Fließgewässern zu bewerten.
Regeneration:	Neubildung von Schuppen, Flossen oder anderen Körperteilen bei Fischen nach Amputation bzw. Teilamputation.

<i>Rete mirabile</i> :	Als <i>Rete mirabile</i> (lateinisch „Wundernetz“, Plural: <i>Retia mirabilia</i>) wird eine Verzweigung einer Arterie in ein Geflecht aus feinsten Arterien verstanden, das sich anschließend nicht zu einer Vene, sondern wiederum zu einer Arterie vereinigt. Bei Fischen (Physoclisten) dient es zur Befüllung der Schwimmblase.
Reuse:	Reusen sind Vorrichtungen zum Fang von Fischen. Sie sind in der Regel tonnen- oder kegelförmig und bestehen aus Korb-, Netz-, oder Drahtgeflecht mit einem trichterförmigen Eingang. Darin gefangene Fische können durch den trichterförmigen Eingang nicht wieder entfliehen.
Reusenkehle:	Trichterförmiger Eingang in das Innere einer Reuse, der das Entkommen der Fische verhindert.
Review:	Literaturstudie in internationalen Fachzeitschriften.
Revisionsverschluss:	U-förmige Schienen links und rechts an den Wänden eines Turbinenauslaufs. Der Revisionsverschluss dient normalerweise dazu, für Wartungsarbeiten an der Turbine Dammbalken einzusetzen, um die Turbine trocken zu legen.
Rheophil:	Bezeichnung für Organismen, die sich bevorzugt in Gewässern mit starker Strömung aufhalten.
Rhital:	Oberlauf eines Fließgewässers; sommerkalt ($< 20^{\circ}\text{C}$), steinig-kiesige Zone eines Fließgewässers.
Röntgendichtes Material:	Material, das undurchlässig für Röntgenstrahlung ist.
Röntgenstrahlung:	Elektromagnetische Wellen mit kurzer Wellenlänge (10^{-8} – 10^{-12} m), die in der Medizin zur Durchleuchtung des Körpers (Röntgenbild) oder zur Bestrahlung von Tumoren genutzt werden.
Rundschupper:	Fische mit kreisförmigen und glattrandigen Schuppen.

Salmoniden:	Familie der lachsartigen Fische.
Schädigungsrate:	Häufig in der Literatur verwendeter Begriff für Angaben zur Quantifizierung der Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf absteigende Fische. Gemeint sind hier sofortige und verzögerte Mortalität, letale Verletzungen und subletale Verletzungen. Da oft mangels exakter Erläuterungen nicht differenziert werden kann, um welche Angabe es sich genau handelt, wird Schädigungsrate hier als Sammelbegriff verwendet.
Scherspannungen:	Verhältnis einer Kraft, die parallel zu einem Körper wirkt, zu dessen Fläche. Die Wirkung der Kraft führt in der Regel zum Verbiegen des Körpers.
Schlitzpass:	Technische Fischauftiegsanlage. Überwindet auf kleiner Fläche den Höhenunterschied an Querbauwerken.
Schlüsselhabitat:	Unabdingbarer Teillebensraum im Lebenszyklus einer Art.
Schwimmlase:	Mit Luft gefülltes Organ der Knochenfische, das aus dem Vorderdarm bzw. der Schlundwand entstanden ist. Die Schwimmlase ermöglicht den Fischen das Schweben im Wasser ohne großen Energieaufwand und die Wahrnehmung von Druckschwankungen.
Sektion:	Kunstgerechte Leichenöffnung und -zergliederung zur Erkennung der Todesursache.
Serielle Diskontinuität:	Biotisches und abiotisches Gefälle zwischen Unter- und Oberwasser eines Querbauwerks in Fließgewässern.
Sezieren:	Präparierendes Zerlegen einer Leiche bzw. von deren Teilen für anatomische Untersuchungen.
Speleophil:	Reproduktionsgilde bei Fischen: In Höhlen brütend.

Spülrinne:	Wasserbauliche Einrichtung an einem Wasserkraftwerk, über die das Treibgut und Fische vom Oberwasser in das Unterwasser abgeleitet werden können.
Stagnophil:	Ruhigwasserliebend.
Stauchung:	Als Stauchung versteht man die relative Längenänderung eines durch Druckkräfte beanspruchten Körpers. Durch Stauchen verändern Materialien ihre Form, Länge oder Dicke, ohne jedoch ihr ursprüngliches Volumen zu verlieren.
Steert:	Fangeinrichtung am Ende eines Hamens in Form einer Reuse oder eines Fangkorbs.
Steertreuse:	Reuse am Ende eines Hamens.
Stress-Wert:	Kennziffer der mehrdimensionalen Skalierung, welche die Güte der Konfiguration angibt und damit beschreibt, wie gut die Ähnlichkeitsverhältnisse zwischen den Proben in der grafischen Darstellung wiedergegeben werden können.
Subletale Verletzung:	Eine beinahe tödliche Verletzung.
Unterwasser:	Wasserkörper unterhalb (stromabwärts) eines Wehres.
Versuchsgruppe:	Gruppe von Proben/Individuen (hier Fische), die in einer Versuchsreihe oder einem Experiment der gleichen Behandlung (engl. Treatment) ausgesetzt werden, um Aussagen über vorab gestellte Hypothesen treffen zu können. In diesem Projekt beinhaltet eine Versuchsgruppe Individuen, die an derselben Stelle des Kraftwerks zugegeben wurden, z.B. bei der Versuchsgruppe Turbine & Rechen oberhalb vom Kraftwerksrechen.
Vertikalrechen:	Rechen mit vertikal angeordneten Rechenstäben.

VLH-Turbine:	Innovative Wasserkraftturbine zum Einsatz bei geringen Fallhöhen. Die Turbine weist geringere Drehzahlen und Druckunterschiede im Vergleich zu herkömmlichen Turbinen auf und gilt daher als fischverträglicher.
Wehr:	Wasserbauliche Einrichtung zum Stauen von Wasser, die den Zufluss oder Abfluss eines Gewässers regelt. Wehre können zeitweise überströmt sein (vor allem bei Hochwasser).
Wehrkrone:	Wehroberkante.

Vorwort

Im Zusammenhang mit der Energiewende wird derzeit eine stark emotional geprägte Diskussion um die Wasserkraftnutzung in Bayern geführt. Um diese Diskussion zu versachlichen und mit wissenschaftlich belastbaren Erkenntnissen zu untermauern, hat das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) ein Pilotprojekt zur Untersuchung der Auswirkungen innovativer Wasserkraftanlagen auf Fließgewässer und ihre Lebensgemeinschaften initiiert. Ein Projekt dieser Größenordnung wurde bisher in Bayern noch nicht durchgeführt und ist auf die Unterstützung zahlreicher Personen angewiesen. Die Projektkonzeption mit der derzeitigen Aufgabenverteilung zwischen Technischer Universität München und Bayerischen Landesamt für Umwelt erweist sich bei Projekten dieser Größenordnung als optimal für einen reibungslosen Ablauf der wissenschaftlichen Untersuchungen seitens der Universität. Für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung während des Projekts möchten wir uns bei allen Beteiligten herzlich bedanken. Unser besonderer Dank gilt dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) für die Finanzierung des Projektes, insbesondere Herrn G. Overhoff, Herrn M. Popp, Herrn T. Keller, Herrn B. Schaipp, Herrn Dr. A. Kolbinger, Frau B. Wolf sowie dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU), vertreten durch Herrn C. Kumutat, Herrn Dr. C. Mikulla, Herrn Dr. A. Otto, Herrn C. Tausch, Herrn Dr. C. Mayr, Herrn P. Linde, Frau Dr. M. Gerke, Frau Dr. H. Kammerlander, Frau H. Ingermann, Herrn F. Di Tullio, Frau B. Thome, Frau J. Felkl, Frau B. Lohmeyer sowie Frau D. Genius für die Projektkoordination.

Der Dank gilt weiterhin den Fischereifachberatungen sowie allen Beteiligten an den zuständigen Wasserwirtschaftsämtern, Landratsämtern und Regierungen, den Fischereirechtsinhabern und Grundstücksanliegern für die Erteilung von Genehmigungen und die Unterstützung bei den Feldprobenahmen. Für die Unterstützung vor Ort bei den Probenahmen möchten wir uns bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Kraftwerksbetreiber bedanken. Ein besonderer Dank gilt auch unseren Studierenden, Praktikantinnen und Praktikanten, Hilfskräften sowie den freiwilligen Helferinnen und Helfern für ihr Engagement bei den durchgeführten Untersuchungen.

Der vorliegende Bericht gliedert sich in 12 Bände, welche Hintergrund und allgemeine Methodik (hier vorliegend, Band 1), methodische Vorversuche zur Fangeffektivität und fangbedingten Verletzungen (Band 2a und 2b), die Untersuchungen und Ergebnisse an den einzelnen Kraftwerksstandorten (Bände 3–10), standortübergreifende Verbesserungsmöglichkeiten für den Fischschutz und die Gewässerökologie (Band 11) sowie

die vergleichende Bewertung der untersuchten Wasserkraftanlagen (Band 12) behandeln. Der Standortband 10 (Großweil an der Loisach) wurde im Rahmen des Ergänzungsprojekts im Jahr 2022 fertiggestellt. Als Anlage zum Abschlussbericht ist außerdem eine ausführliche Erläuterung der Ergebnisdarstellungen in Abbildungs- und Tabellenform beigefügt (Statistikglossar) sowie eine Anlage mit Standortinformationen zu den ursprünglich geplanten, aber aufgrund von Verzögerungen im Genehmigungsverfahren der Wasserkraftanlagen im Rahmen dieses Projekts nicht mehr untersuchten Standorten (Volkmannsdorf und Pielmühle).

1. Einleitung

1.1. Hintergrund

Die Nutzung der Wasserkraft hat in Bayern eine lange Tradition und ist mit einem Anteil von derzeit etwa 30% an der Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien eine wichtige Energiequelle (LfStat 2019). Neben den großen Flüssen werden traditionell auch mittlere und kleinere Fließgewässer zur Energiegewinnung genutzt. Daraus resultierende anlagenbedingte Querverbauungen, Begradigungen und Veränderungen des Abflussregimes führen zu einer Veränderung der Fließgewässerhabitate, einer Fragmentierung des Fließgewässerkontinuums und einer Entkopplung der ursprünglich intensiv miteinander vernetzten Systeme Fließgewässer und Aue (March & Fisher 1999, Jungwirth et al. 2003, Pander & Geist 2010, Pander et al. 2015). Die dadurch hervorgerufenen Veränderungen der aquatischen Lebensräume und ihre Auswirkungen auf verschiedene Tiergruppen sind Gegenstand vieler Untersuchungen (Cramer & Oligher 1964, Berg 1987, Holzner 1999, Bratrich et al. 2004, Bernhardt et al. 2005, Kondolf et al. 2007, Renöfält et al. 2009, Geist 2011, Mueller et al. 2011, Pander & Geist 2013, Pander et al. 2013). Derzeit existieren in Bayern insgesamt 4.214 kleine und große Wasserkraftanlagen (https://www.energieatlas.bayern.de/thema_wasser/daten.html, Stand 2021, aufgerufen am 18.05.2022). Von diesen erzeugen 223 größere Anlagen mit einer Ausbauleistung von ca. 11.000 GWh pro Jahr den Hauptanteil des produzierten Wasserkraftstroms. Im Jahr 2020 betrug der Anteil der Energie aus Wasserkraft an der Bruttostromversorgung in Bayern rund 15%. Von der Bayerischen Staatsregierung wurde ein 10-Punkte Fahrplan für eine ökologische und naturverträgliche Wasserkraftnutzung (StMUV 2012) entwickelt. Die Stromerzeugung aus Wasserkraft soll ausgehend vom Stand Ende 2018 von 10,7 TWh durch Modernisierung und Nachrüstung bestehender Anlagen und Neubau bis zum Jahr 2022 um 1 TWh gesteigert werden (StMWi 2019). Dazu sollen die vorhandenen Potenziale zur Wasserkraftnutzung besser ausgeschöpft und unter Berücksichtigung der im Wasserhaushaltsgesetz des Bundes (WHG, § 35) aus dem Jahre 2010 auf Basis des europäischen Rechts festgeschriebenen Regelungen zum Populationsschutz der Fische (Bundesministerium der Justiz 2010) umweltverträglich ausgebaut werden (StMUV 2012). Die meisten Wasserkraftanlagen in Europa sind derzeit mit Francis- oder Kaplan-Turbinen ausgestattet. Es bestehen erhebliche Kritikpunkte an dieser konventionellen Wasserkraftnutzung bezüglich der Schädigung von Fischen bei der Turbinenpassage (zu Projektbeginn bekannte Spanne Schädigungsraten Kaplan-Turbine: 1–42% bei Salmoniden, 11–97% beim Aal, Francis-Turbine: 0–90% bei Salmoniden, 0–71% beim Aal; Ebel 2013) sowie der Veränderung des Fließgewässerlebensraumes durch bestehende Querbauwerke. Um einen umweltverträglichen Ausbau der Wasserkraft zu ermöglichen, soll die Forschung

über energetische und ökologische Verbesserungen an Wasserkraftanlagen intensiviert und neue Technologien zur Erzeugung von Energie aus Wasserkraft eingesetzt werden. Systematische Untersuchungen, die eine objektive Bewertung der tatsächlichen Fischverträglichkeit von innovativen Kraftwerkstechnologien nach wissenschaftlich haltbaren Standards und im Sinne des Fischschutzes nach WHG § 35 zulassen, gibt es bisher nur sehr eingeschränkt. Während viele Einzelstudien zu Fischschädigungsraten bei konventioneller Turbinentechnik durchgeführt wurden (z.B. Schoeneman et al. 1961, Turbak et al. 1981, Bell & Kynard 1985, Taylor & Kynard 1985, Eicher et al. 1987, Čada 1990, Stokesbury & Dadswell 1991, Mathur et al. 1996, Navarro et al. 1996, Sorenson et al. 1998, Coutant & Whitney 2000, Čada 2001, Williams et al. 2001, Wertheimer & Evans 2005, Winter et al. 2006, Schilt 2007, Calles et al. 2010, Keefer et al. 2013, Stich et al. 2014, Klopries & Schüttrumpf 2020, Vikström et al. 2020, Ammar et al. 2021), finden sich bislang naturgemäß wenige Untersuchungen zu Schädigungen von Fischen an neuen innovativen Kraftwerks- und Turbinenanlagen. Eine umfassende Literatursuche (webbasiert und Literaturlisten einschlägiger Fachbücher) nach Studien zur Fischschädigung an VLH-Turbinen, beweglichen Kraftwerken, Wasserkraftschnecken und Schachtkraftwerken ergab nur sehr wenige Treffer. Die Literatur beschränkte sich zu Beginn des Projekts hauptsächlich auf einzelne Fachartikel zur Turbinentechnik (z.B. VLH-Turbine: Fraser et al. 2007, Juhrig 2013, Wright & Rival 2013; bewegliches Kraftwerk: Bundesverband Deutscher Wasserkraftwerke 2010; Wasserkraftschnecke: Lubitz et al. 2014; Schachtkraftwerk: Rutschmann et al. 2011), Literaturstudien (z.B. zur VLH-Turbine: Cooke et al. 2011) und wenige Untersuchungsberichte über Einzelfallstudien zur Verträglichkeit in Bezug auf die Fische (VLH-Turbine: Lagarrigue et al. 2008, Lagarrigue & Frey 2010, Leclerc 2012; bewegliches Kraftwerk: Blasel 2011; Wasserkraftschnecke: Späh 2001, Tombek & Holzner 2009, Schmalz 2010; konventionell nachgerüstete Anlagen: Schneider et al. 2012).

Vor diesem Hintergrund hat das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) den Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie der TU München beauftragt, in dem bayernweiten Forschungsvorhaben „Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen“ unterschiedliche Ansätze innovativer Wasserkraftanlagen wissenschaftlich fundiert, ergebnisoffen und vergleichend zu untersuchen. Finanziert wird das Forschungsvorhaben vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV). Als Untersuchungsstandorte wurden verschiedene Pilotanlagen in Bayern ausgewählt, die nachgerüstete Bestandsanlagen sind oder sich derzeit in der Planungs- bzw. Bauphase befinden. Dort wurden zwischen 2014–2022 die Auswirkungen verschiedener neuartiger Anlagentypen und Techniken auf die Gewässerökologie untersucht. Zu diesen

innovativen Anlagentypen zählen Kraftwerke mit VLH-Turbinen, Wasserkraftschnecken, bewegliche Kraftwerke sowie Schachtkraftwerke. Zusätzlich sind drei mit Fischschutz- und Fischabstiegseinrichtungen nachgerüstete konventionelle Wasserkraftanlagen mit Kaplan-Rohrturbinen Gegenstand des Forschungsprojekts.

1.2. Projektziele

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden Untersuchungen zu den bauart- und betriebsbedingten Auswirkungen von neuen innovativen Wasserkraftanlagen (Pilotanlagen) oder umgebauten konventionellen Anlagen auf absteigende Fische (Rechen- und Turbinenschäden) und auf die Lebensraumqualität des Fließgewässers durchgeführt. Potenzielle Vor- und Nachteile der neuen oder umgerüsteten konventionellen Anlagen wurden im relativen Vergleich zu den Ausgangszuständen vor Implementierung oder Umbau ermittelt. Das Untersuchungsprogramm wurde in zwei Forschungsmodule gegliedert (Abbildung 1). Im Projektteil A „Auswirkungen des Turbinenbetriebs“ wurden der Fischabstieg und die direkten Verletzungen an Fischen durch den Turbinen- und Anlagenbetrieb untersucht und bewertet. Im Projektteil B „Ökologische Auswirkungen“ wurden das Fischartenspektrum, Makrozoobenthos, Makrophyten und Periphyton sowie wichtige abiotische Habitatvariablen im Ober- und Unterwasser der Anlagen bzw. vor und nach dem Umbau untersucht. Aus einem relativen Vergleich der Ausgangszustände vor Implementierung oder Umbau wurden qualitative und quantitative Aussagen zu potenziellen Verbesserungen in Bauart und Betrieb abgeleitet. Diese Erkenntnisse sollen zukünftig sowohl Betreibern als auch Genehmigungsbehörden und Fachstellen als Hilfestellung bei der Beurteilung dieser Techniken dienen.

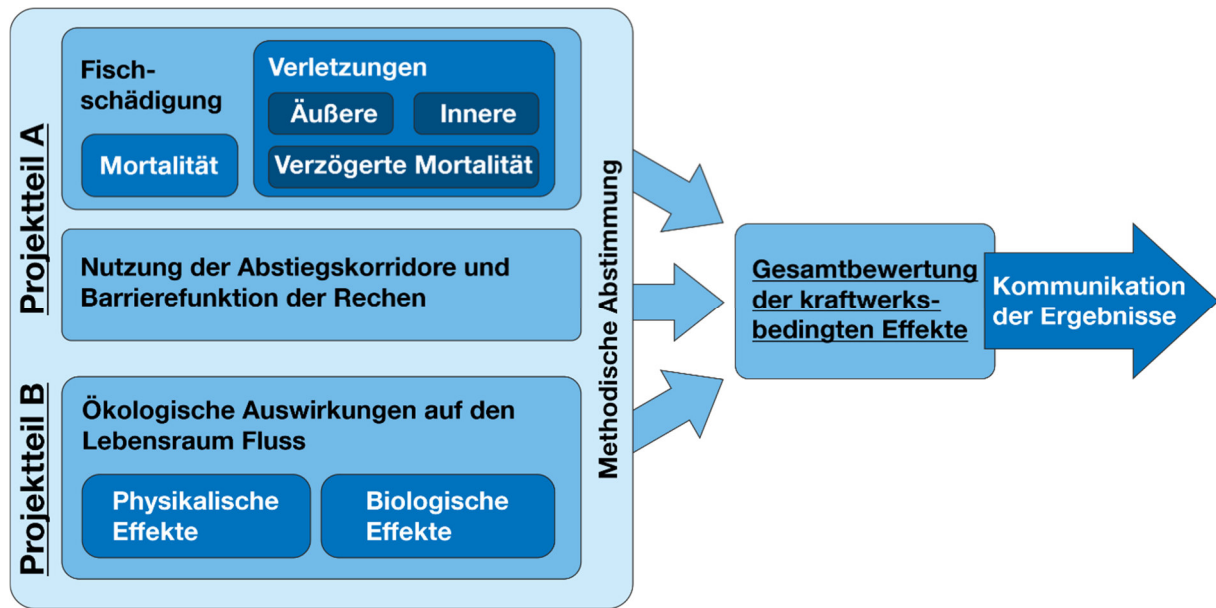


Abbildung 1 Schema der integrativen Bewertung der Hauptkomponenten in den Projektteilen A und B.

2. Beschreibung der innovativen Kraftwerkstechnologien

2.1. Very Low Head Turbine

Im Gegensatz zu der herkömmlichen Kaplan-Turbine, die bei Fallhöhen bis zu 80 m eingesetzt werden kann, wurde die „Very-Low-Head“ Turbine (VLH-Turbine, Abbildung 2) für die Anwendung bei sehr kleinen Höhen konzipiert (≤ 5 m) und weist im Gegensatz zu klassischen Turbinen für Standorte mit niedrigem Gefälle einen großen Laufraddurchmesser und geringe spezifische Durchflüsse auf (Fraser et al. 2007, Juhrig 2013). Vor allem auf Grund ihrer geringeren Drehzahlen (9–40 Umdrehungen pro Minute), der damit verbundenen Verringerung der Kollisionswahrscheinlichkeit und den geringeren Druckunterschieden wird die VLH-Turbine als fischverträglicher im Vergleich zu herkömmlichen Turbinen angesehen (Fraser et al. 2007, Hartmann & Seifert 2010, Ebel 2013, Hogan et al. 2013). In Deutschland bestehen bislang nur zwei Wasserkraftanlagen mit VLH-Turbinen, die im Jahr 2015 am Standort Au an der Iller bei Kempten bzw. im Jahr 2017 am Standort Baierbrunn an der Isar bei München in Betrieb genommen wurden. Die meisten Anlagen in Europa befinden sich in Frankreich (Stand Januar 2015 26 Anlagen). Systematische Untersuchungen, die eine objektive Bewertung der tatsächlichen fischökologischen Verträglichkeit der VLH-Turbine nach wissenschaftlich haltbaren Standards und im Sinne des Fischschutzes nach WHG § 35 zulassen, gibt es bisher nicht. Während viele Einzelstudien zu Fischschädigungsraten bei konventioneller Turbinentechnik durchgeführt wurden (z.B. Review in Eicher et al. 1987, Čada 1990, Coutant & Whitney 2000, Čada 2001, Schilt 2007), finden sich bislang wenige Untersuchungen zu Schädigungen von Fischen an neuen innovativen Kraftwerks- und Turbinenanlagen. Die Literatur beschränkt sich hier hauptsächlich auf einzelne Fachartikel zur Turbinentechnik (z.B. Fraser et al. 2007, Juhrig 2013, Wright & Rival 2013, Haghighi et al. 2019), Literaturstudien (Cooke et al. 2011), Untersuchungsberichte zu Einzelfallstudien aus Frankreich an Aalen, Salmoniden (Lachs, Seeforelle) und Cypriniden (Schleie und Karpfen) (Lagarrigue et al. 2008, Lagarrigue & Frey 2010, Leclerc 2012, Lagarrigue 2013) sowie eine Studie mit besenderten Fischen (u.a. mit den Arten Hecht, Schwarz- und Forellenbarsch) an einer VLH-Turbine in Kanada (Tuononen et al. 2022).

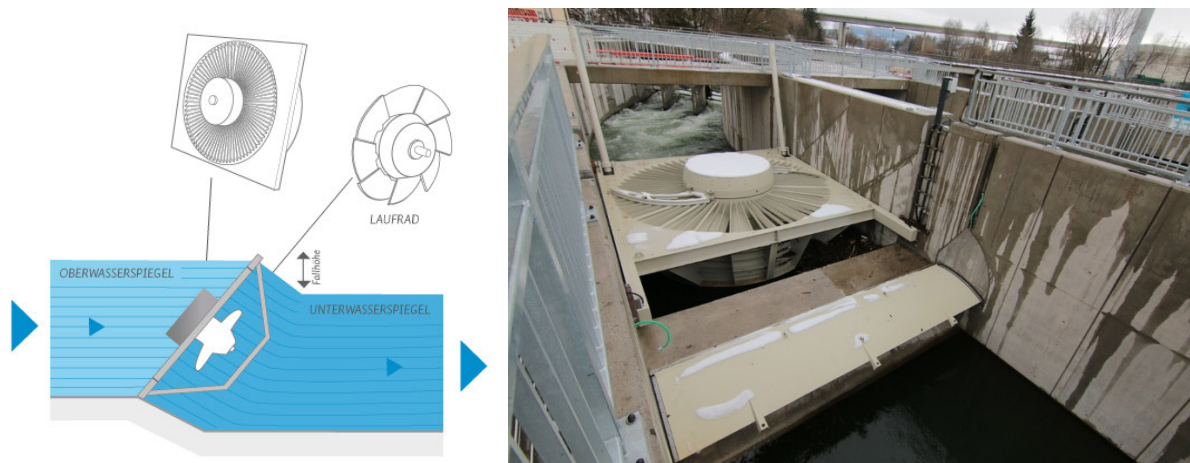


Abbildung 2 Links: Schematische Darstellung einer VLH-Turbine im Fluss, Quelle: www.landeskraftwerke.de. Rechts: Foto der in Au an der Iller eingebauten VLH-Turbine bei abgesenktem Wasserstand.

2.2. Wasserkraftschnecke

Die Wasserkraftschnecke basiert auf der energetischen Umkehr der bereits seit der Antike bekannten „archimedischen Schraube“ und findet in Deutschland seit der Jahrtausendwende Anwendung in der Kleinwasserkraft (Lashofer & Kaltenberger 2013). Das zentrale Bauteil einer Wasserkraftschnecke stellt der aus einem länglichen, zylinderförmigen Mittelteil bestehende Läufer dar. An diesem sind helixförmige Schneckenwindungen angebracht. Die Schnecke befindet sich in einem genau an den Durchmesser angepassten Trog. Der Durchmesser der Schnecke beträgt in der Regel 1,5–3,5 m und der Neigungswinkel der Schnecke 20 bis 30 Grad. Das vom Oberwasser in den Trog herabfallende Wasser setzt die Schnecke durch sein Eigengewicht in Gang (Abbildung 3). Die Wasserkraftschnecke wurde für Fallhöhen von maximal 10 Metern konstruiert. Wegen ihrer geringen Drehzahlen von 20–40 U/min wird sie als Langsamläufer bezeichnet (Hogan et al. 2013, Lubitz et al. 2014). Aufgrund der geringen Drehzahlen, Druckunterschiede und Scherkräfte gilt die Wasserkraftschnecke als fischverträgliche Technologie (Hogan et al. 2013, Nuernbergk & Rorres 2012). Verletzungen an Fischen können dennoch durch scharfkantige Strukturen am Schneckengewinde, im Spalt zwischen Schnecke und Trog, durch Kollisionen der Fische mit der Eintrittskante des Schneckengewindes und durch die starken hydraulischen Impulskräfte im Schneckenaustrittsprofil entstehen (Ebel 2013). Seit 2001 gibt es mehrere auf nationaler Ebene publizierte oder unveröffentlichte Untersuchungsberichte über die Schädigung von Fischen an Wasserkraftschnecken aus Deutschland, Großbritannien, Belgien und den Niederlanden (z.B. Späh 2001, Fishtek Consulting 2007, Merckx & Vriese 2007, Tombek & Holzner 2009, Schmalz 2010, Edler et al. 2011). Die in Ebel (2013) aus diesen Studien zusammengefassten Ergebnisse zur Schädigungsrate liegen zwischen 0% und 33% und gehen damit sehr weit auseinander. In der internationalen wissenschaftlichen Literatur (mit

Peer-Review System) wurden in einer belgischen Studie mit standardisierten Fischzugaben an einer 22 m langen Pump-Wasserkraftschnecke mit einer Fallhöhe von 10 m zum Teil erhebliche Mortalitätsraten beim Fischabstieg festgestellt. So waren unter Berücksichtigung verschiedener Lastzustände durchschnittlich 37% der Brachsen, 19% der Rotaugen und 3% der Aale nach Passage der Wasserkraftschnecke sofort tot (Pauwels et al. 2020). In weiteren Studien an Wasserkraftschnecken lagen die Mortalitätsraten bei besenderten Lachssmolts unter 10% (Havn et al. 2017) und bei absteigenden Aalen an einer Pump-Wasserkraftschnecke unter Berücksichtigung von verzögerter Mortalität zwischen 14% und 19% (Buysse et al. 2015). In einer Studie zur Schädigung von Neunaugen an einer Wasserkraftschnecke in England wurde eine Schädigungsrate von 1,5% ermittelt (Bracken & Lucas 2013).

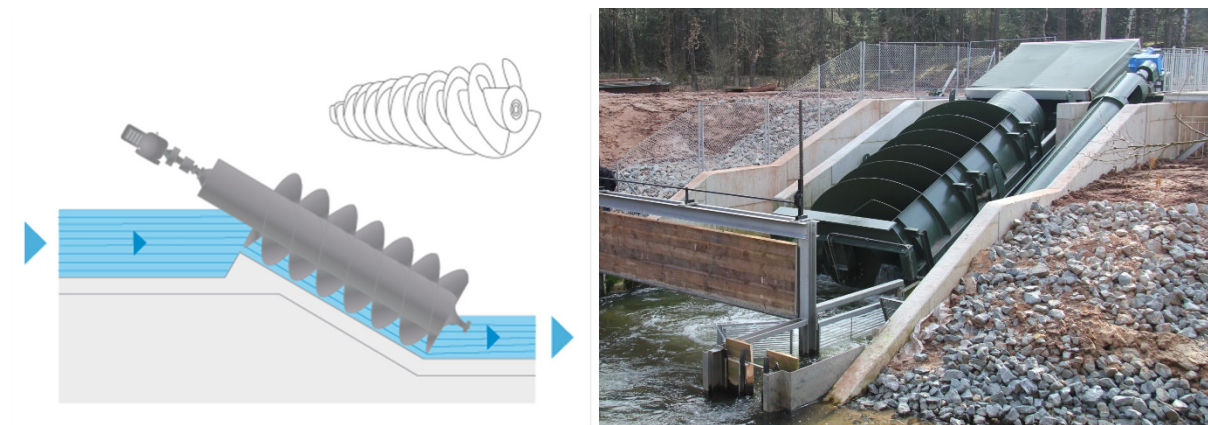


Abbildung 3 Links: Schematische Darstellung einer Wasserkraftschnecke im Fluss, Quelle: www.landeskraftwerke.de. Rechts: Foto der am Heckerwehr an der Roth eingebauten Wasserkraftschnecke.

2.3. Bewegliches Kraftwerk

Beim beweglichen Kraftwerk (Abbildung 4) handelt es sich um eine schwenkbare, über- und unterströmbare Wasserkraftanlage, durch die Fischabstieg, Geschiebetransport und Hochwasserentlastung gleichzeitig realisiert werden sollen. Fische können sowohl ober- als auch unterhalb des Kraftwerks ins Unterwasser gelangen (Bunge 2001). Das bewegliche Kraftwerk ist mit einer axial durchströmten, durch bewegliche Leit- und Laufradschaufeln doppelt regulierten Kaplan-Rohrturbine ausgestattet und ist für Standorte mit bis zu 8 m Fallhöhe geeignet. Der erste Prototyp dieses Kraftwerks wurde 2009 in Thüringen errichtet, bislang sind in Europa sieben Standorte bekannt (Deutschland sechs Standorte, Schweiz ein Standort). In den ersten Untersuchungen zum beweglichen Kraftwerk an der Kinzig in Offenburg und Gengenbach konnte mit Netzfängen und Sonaruntersuchungen bestätigt werden, dass Fische erfolgreich über das Kraftwerk absteigen (Blasel 2011, Hoffmann et al. 2011). Die Auswirkungen des beweglichen Kraftwerks auf den Fischabstieg wurden bislang

für Lachssmolts (Thorstad et al. 2017) und Aale (Økland et al. 2017) in einer Telemetriestudie an der Kinzig untersucht. In diesen Studien wanderten 94% der Smolts (Thorstad et al. 2017) und 65% der Aale (Økland et al. 2017) mit einer geschätzten Mortalität von 3–6% (Smolts) bzw. 0% (Aale) über das Kraftwerk ab. Es wurde dabei allerdings nicht differenziert, über welchen Korridor die Fische am Kraftwerk abgewandert sind (über dem Kraftwerk durch den Kronenausschnitt, durch die Turbine bzw. unter dem Kraftwerk im angehobenen Zustand). Sofern Fische über den Rundbogenrechen des beweglichen Kraftwerks in das Innere eindringen, was für kleinere Fische möglich ist (Stababstände des Rundbogenrechens 15–20 mm), können sie potenziell im Turbinenraum geschädigt werden. Durch den Rechen selbst und die Berührung beim Abstieg mit den äußeren Anlagenteilen ist ebenfalls eine Schädigung möglich.

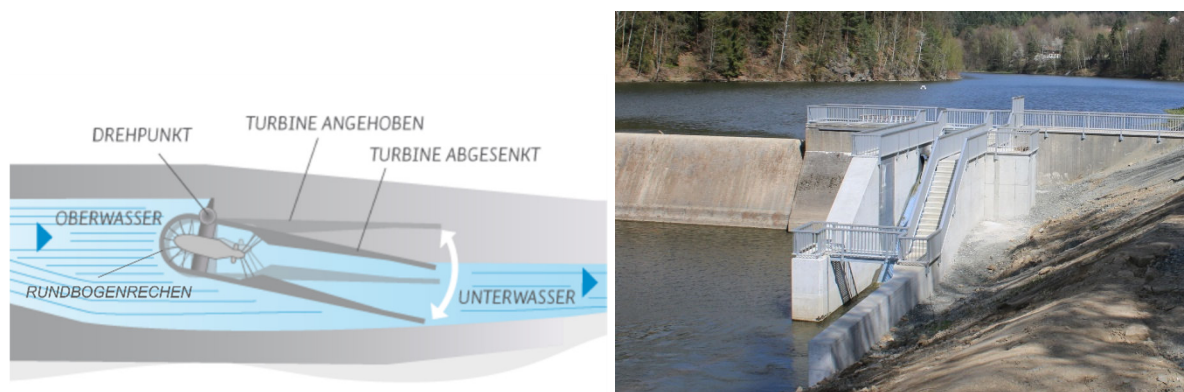


Abbildung 4 Links: Schematische Darstellung eines beweglichen Kraftwerks im Fluss, Quelle: www.landeskraftwerke.de. Rechts: Foto des in Eixendorf errichteten beweglichen Kraftwerks.

2.4. Schachtkraftwerk

Ein weiterer innovativer Anlagentyp ist das vom Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München entwickelte Schachtkraftwerk, bei dem die Maschineneinheit vollständig unter Wasser liegt (Abbildung 5). Eine Einheit aus Turbine und Generator wird in einem Schacht mit einer horizontalen Einlaufebene installiert, der vor dem Wehr in die Oberwassersohle integriert ist. Der Abfluss wird über einen den Schacht bedeckenden Horizontalrechen der Turbine zugeführt und über das Saugrohr durch den Wehrkörper in das Unterwasser geleitet (Lucchetti et al. 2013). Es sollen beim Schachtkraftwerk auch geringe Rechenstababstände von ≤ 20 mm ohne gravierende hydraulische Verluste umgesetzt werden können (Sepp & Rutschmann 2014). Ein schadloser Fischabstieg soll dadurch erreicht werden, dass die Anströmgeschwindigkeiten in der Rechenebene 0,5 m/s nicht überschreiten. Die Fische sollen sich dadurch aus eigener Kraft vom Rechenbereich entfernen und über permanent geöffnete Abstiegsfenster in den

Segmentschützen ins Unterwasser absteigen (Rutschmann et al. 2011, Sepp et al. 2016). Nach Sepp et al. (2016) sollte die Dotation der permanent geöffneten Abstiegsfenster ca. 3–5% des Turbinendurchflusses betragen. In der Versuchsanlage des LS für Wasserbau und Wasserwirtschaft in Oberrach wurde eine Modellanlage mit einer Ausbauleistung von 35 kW errichtet, an der bereits physikalische Untersuchungen, numerische Studien und Verhaltensbeobachtungen an Bachforellen und Äschen unter kontrollierten Laborbedingungen durchgeführt wurden (Geiger et al. 2016). Als wesentliche Faktoren für das Funktionieren des Fischabstiegs wurden in diesen Studien die Anströmgeschwindigkeit am Rechen und die daraus resultierende Abflussaufteilung zwischen Turbine und Bypass identifiziert (Auffindbarkeit oberflächennaher Bypass: 100% (9 von 9 Fische, Abflussanteil 7%), sohltnaher Bypass 83% (94 von 113 Fische, Abflussanteil 13%) bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,3 m/s; Geiger et al. 2016). Wissenschaftlich fundierte Ergebnisse zur Schädigung von Fischen an Schachtkraftwerken unter Freilandbedingungen liegen noch nicht vor, da bislang über die Modellanlage in Oberrach hinaus nur ein weiteres Schachtkraftwerk in Dietenheim errichtet wurde (Inbetriebnahme 2021), von dem bisher allerdings keine Untersuchungsergebnisse vorliegen. Die Ergebnisse von Verhaltensbeobachtungen an Modellanlagen sind nur eingeschränkt auf Standorte in natürlichen Fließgewässern übertragbar. Die erste Pilotanlage des Schachtkraftwerks wurde in Großweil an der Loisach 2020 in Betrieb genommen (siehe Abbildung 8).

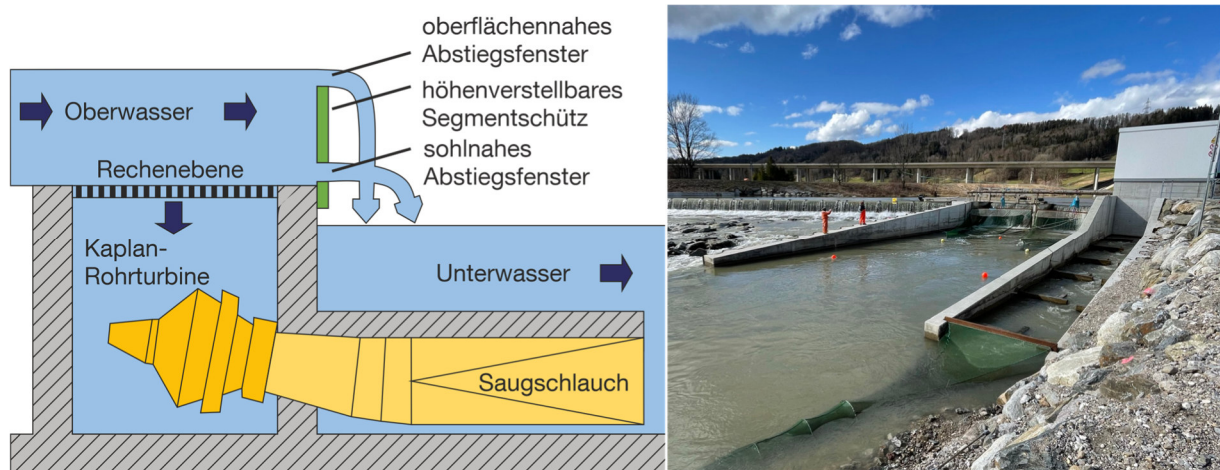


Abbildung 5 Links: Schematische Darstellung eines Schachtkraftwerks, Rechts: Foto des in Großweil errichteten Schachtkraftwerks.

3. Fischschutzeinrichtungen an konventionellen Kraftwerksanlagen

Um die flussabwärtsgerichtete Durchgängigkeit wiederherzustellen und den Fischschutz an konventionellen Wasserkraftanlagen zu verbessern, wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl baulicher Lösungen entwickelt, die dazu dienen, alte Anlagentypen nachzurüsten und die Fischverträglichkeit zu steigern (Skalski et al. 1996, Gosset et al. 2005, Redeker 2014, Calles et al. 2012). Dazu zählen unter anderem zur Sohle und seitlich geneigte Feinrechen mit vertikaler bzw. horizontaler Stabausrichtung (Vertikal- bzw. Horizontalrechen) und verschiedene Bypasssysteme, wie z.B. Spülklappen, Bypassrohre, technische Fischpässe und naturnahe Umgehungsgewässer (Boubée & Haro 2003, Wiegmann et al. 2005, Hassinger & Hübner 2009).

3.1. Feinrechen

Generell sollten Feinrechen nach Möglichkeit in einem flachen Winkel gegenüber der Anströmrichtung angeordnet werden, sodass absteigende Fische in Richtung eines am unterstromigen Ende des Rechens angeordneten Bypasses geleitet werden (Larinier & Travade 2002). Bei zur Sohle geneigten Vertikalrechen (Abbildung 6) soll so die Auffindbarkeit für Fische zu einem oberflächennahen Fischpass verbessert werden (Cuchet et al. 2011). Die am oberen (unterstromigen) Ende des Rechens angeschlossene Spülrinne kann somit gleichzeitig als Abstiegskorridor genutzt werden (Calles et al. 2013). Bei zu hohen Anströmgeschwindigkeiten am Rechen können Fische jedoch verletzt werden, da sie nicht mehr aktiv ausweichen können und an den Rechen gepresst oder zwischen die Rechenstäbe hindurch gepresst werden (Brown et al. 2009 & 2014, Deng et al. 2010, Amaral et al. 2018).

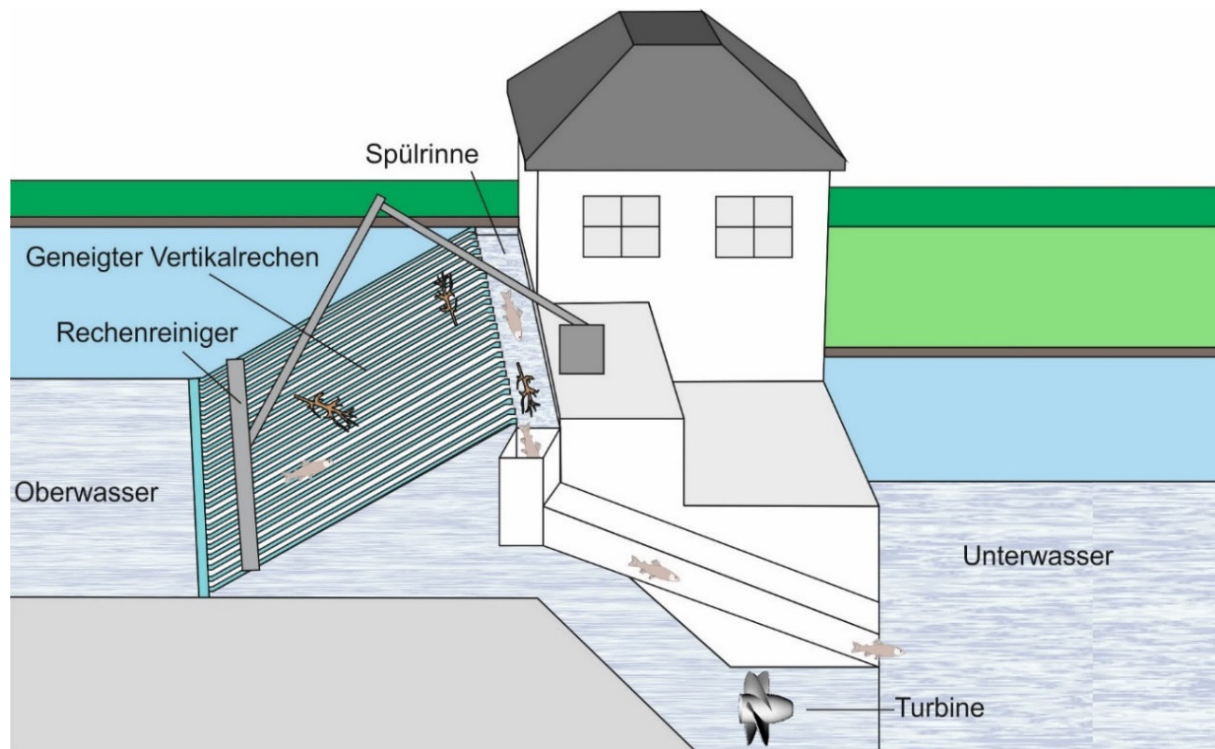


Abbildung 6 Schematische Darstellung eines geneigten Vertikalrechens mit Fischabstieg über eine Spülrinne.

Seitlich geneigte Horizontalrechen sollen die Fische in Richtung einer am unterstromigen Ende des Rechens angeordneten Spülklappe (Bypass) ableiten (Abbildung 7). Hier besteht die Möglichkeit, den Bypasseinstieg über die gesamte Wassersäule anzuordnen. Die horizontale Stabausrichtung hat im Vergleich zur vertikalen Stabausrichtung möglicherweise eine bessere Schutzwirkung, da die meisten Fischarten einen seitlich abgeflachten Körper haben ($\text{Körperhöhe} > \text{Körperbreite}$).

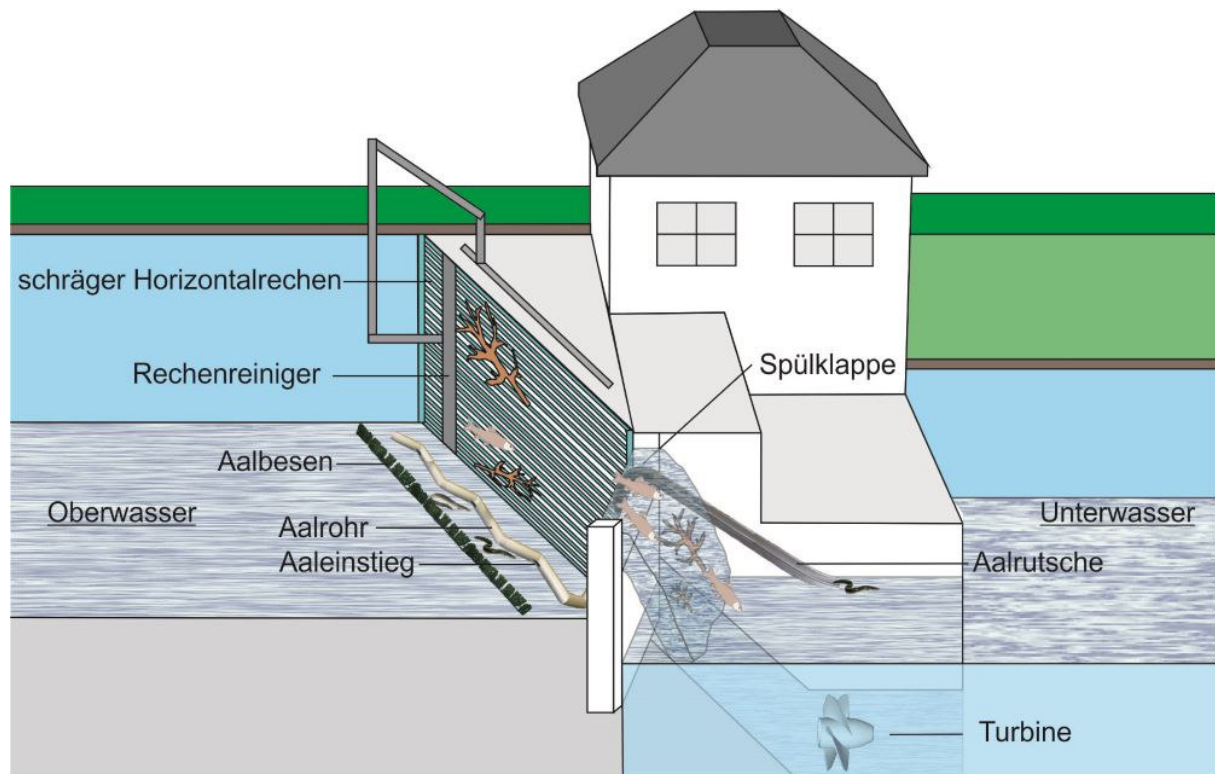


Abbildung 7 Schematische Darstellung eines geneigten Horizontalrechens mit Fischabstieg über eine Spülklappe, Aalrohr mit vorgelagertem Aalbesen sowie einer Aalrutsche zum Transfer der Aale ins Unterwasser.

Erkenntnisse zur Wirkung von Feinrechen auf Fische beziehen sich hauptsächlich auf deren Effizienz als Fischableiteinrichtung für häufig untersuchte Arten wie Lachse, Störe und Aale. Effekte auf andere Arten sind weitgehend unbekannt (Gale et al. 2008). Bei den meisten Studien dazu handelt es sich um Laborexperimente oder Simulationen, in denen die Wirkung verschiedener Stababstände und Neigungswinkel auf die Strömungsverhältnisse (Tsikata et al. 2014) und die Ableiteffizienz unterschiedlicher Fischarten getestet wird (z.B. Floyd et al. 2007, Moser et al. 2008, Russon et al. 2010, Chatellier et al. 2011, Raynal et al. 2013 & 2014, Poletto et al. 2014). Moyle & Israel (2005), Adam et al. (1999) und Calles & Greenberg (2009) weisen darauf hin, dass Feinrechen neben der Ableitfunktion auch ein Verletzungsrisiko für Fische an Kraftwerksanlagen darstellen können. Studien, die an tatsächlichen Kraftwerksstandorten durchgeführt wurden, beschäftigen sich jedoch seit mehreren Jahrzehnten ausschließlich mit der Effizienz verschiedener Feinrechen als Ableiteinrichtung und der Nutzung verschiedener Abstiegskorridore, ohne eine dabei eventuell auftretende Schädigung an den Fischen zu berücksichtigen (z.B. Krcma et al. 1978, Odgaard et al. 1990, Kynard & Horgan 2001, Gosset et al. 2005, Travade et al. 2010, Pedersen et al. 2012, Piper et al. 2013, Ebel et al. 2015). Es konnten trotz umfangreicher Literaturrecherche nur drei nach wissenschaftlichen Standards mit Peer-Review System veröffentlichte Studien gefunden werden, welche die durch den Rechen verursachte Schädigung bzw. Mortalität

berücksichtigen (Winchell & Sullivan 1991: Schuppenverluste bei 21% der Fische; Bestgen et al. 2004: Mortalität der Fische zwischen 5–7,5 cm bis zu 74%, keine rechenverursachte verzögerte Mortalität; Calles et al. 2013: Mortalität für Aale nach Einbau Feinrechen < 10%, keine rechenverursachten Verletzungen).

3.2. Spülklappen/-rinnen

Spülklappen bzw. Spülrinnen dienen primär dazu, Treibgut in das Unterwasser abzuführen. Dieser Korridor kann ebenfalls von abstiegswilligen Fischen genutzt werden. Neben dem oberflächlichen Ablass verfügen Spülklappen oft zusätzlich über einen Grundablass. Beim Grundablass besteht die Möglichkeit diesen speziell für grundnah wandernde Fische während ihrer Hauptwanderungszeiten zu öffnen. Dass Fische Spülklappen und Spülrinnen grundsätzlich als Abstiegskorridor nutzen, ist insbesondere für den Aal (z.B. Boubée & Williams 2006, Travade et al. 2006, Carr & Whoriskey 2008, Breukelaar et al. 2009, Travade et al. 2010, Silva et al. 2013) bekannt. Zu anderen Arten gibt es wesentlich weniger Studien (z.B. Ransom et al. 1996: Lachssmolts, McDougall et al. 2014: Störe). Ähnlich wie beim Feinrechen kann der Abstieg über Spülklappen oder -rinnen allerdings auch Verletzungen bis hin zu Mortalität verursachen (Keefer et al. 2013). Wie stark diese Schädigung tatsächlich ist, ist jedoch bisher kaum untersucht. Während mehrere Autoren Einschätzungen über die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung von Fischen durch den Abstieg über Spülklappen abgeben (z.B. Deng et al. 2007a, Larinier 2008, Eppard et al. 2002), gibt es nur wenige Studien, die zwischen lebenden und toten Tieren bei der Passage unterscheiden (z.B. Watene & Boubée 2005, Calles et al. 2012). Ein potenzieller Einfluss der Besenderung der Tiere bleibt dabei meistens unberücksichtigt. Nur in einer wissenschaftlichen Arbeit wurden bisher die entstehenden Schäden am Fisch genauer untersucht (Schoeneman et al. 1961).

3.3. Bypasssysteme

Neben Spülklappen können Fische vom Rechen in verschiedene andere Bypasssysteme abgeleitet werden. Dazu zählen technische Fischpässe, naturnahe Umgehungsgewässer oder spezielle Bypassrohre. Ein Beispiel für letzteres ist das Aalrohr nach Hassinger & Hübner (2009), welches vor dem Rechen grundnah installiert wird. Hierbei soll der Aal an der Rechenbasis in ein Rohrsystem einschwimmen und durch dieses in das Unterwasser des Kraftwerks gelangen. Dadurch wird nach Hassinger & Hübner (2009) bei einem Rechenabstand von 12,5 mm unter Laborbedingungen ein Durchwanderungsgrad von 90,4% für Aale erreicht. Eine oberflächennahe Einlassöffnung kann weiterhin den Abstieg von

anderen Fischarten ermöglichen. Die Effizienz dieses Bypasssystems ist bislang nur aus einer Einzelstudie unter Laborbedingungen bekannt (Hassinger & Hübner 2009). Im Gegensatz zu Beckenpässen und Umgehungsgewässern besteht beim Fischabstieg durch ein Rohr weiterhin eine erhöhte Verletzungsgefahr an Bauteilen. Über eine potenzielle Schädigung der absteigenden Fische gibt es für dieses Bypasssystem bislang keine Erkenntnisse. Auch für andere oberflächen- oder grundnahe Bypasssysteme gibt es keine Daten zur Fischschädigung. Vorhandene Studien beschäftigen sich insbesondere mit deren Nutzung als Abstiegskorridor durch Lachssmolts oder Aale (z.B. Johnson et al. 2000, Durif et al. 2003, Travade et al. 2006, Wertheimer 2007).

Naturnahe Umgehungsgewässer können sowohl als Wanderkorridor als auch als Habitat für rheophile Fische fungieren (Pander et al. 2013, Pander et al. 2015). Diese Habitatfunktion wurde insbesondere auch für frühe Lebensstadien rheophiler Fische nachgewiesen (Knott 2012, Egg 2015). Der Nachteil naturnaher Umgehungsgewässer besteht in dem relativ großen Flächenbedarf, der an den meisten konventionellen Wasserkraftanlagen nicht mehr zur Verfügung steht. Da der Oberwassereinstieg von naturnahen Umgehungsgewässern meist relativ weit entfernt vom Turbineneinlauf liegt, oft sogar am gegenüberliegenden Ufer, spielt diese Form des Bypasses nach derzeitigem Kenntnisstand meist eine sehr untergeordnete Rolle.

3.4. Weitere Fischschutzeinrichtungen

Über die an den konventionellen Kraftwerksanlagen installierten und in diesem Projekt untersuchten Fischschutzeinrichtungen hinaus sind weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Abstiegskorridore denkbar. Eine dieser Maßnahmen, um den oberflächlichen Abstieg zu verbessern, sind Ausschnitte in der Wehrkrone. Dies wird vor allem bei Anlagen in Lachsgewässern angewandt, um den oberflächennah abwandernden Lachssmolts die Wehrpassage zu erleichtern (Heiss 2015). Auch bei den in diesem Projekt untersuchten innovativen Kraftwerkstechnologien stellt der Ausschnitt in der Wehrkrone vor allem beim Schachtkraftwerk (Rutschmann et al. 2011) und beim beweglichen Kraftwerk einen wichtigen Abstiegskorridor dar.

Neben den passiven Fischschutztechniken wie z.B. Feinrechen, Wehrkronenausschnitte und Bypasssysteme, können auch aktive Techniken Anwendung finden. Hierbei handelt es sich um Scheuchvorrichtungen, die die Fische aktiv davon abhalten sollen, in die Turbine einzuschwimmen. Die elektrische Variante dieser Scheuchanlagen erzeugt ein Scheuchfeld,

in welches Fische nicht einschwimmen, sondern andere Abstiegswege aufsuchen (Ebel 2013). Diese Methode ist nur bei geringen Anströmungsgeschwindigkeiten effektiv und es kann eine starke Barrierewirkung im Gewässer entstehen, welche den Fischauf- und -abstieg erheblich stören kann. Daher wird diese Methode meist bei Wasserentnahmen, wie an den Einlaufbereichen von Kernkraftwerken, angewandt (Halsband 1975). Eine weitere Variante dieser Scheuchvorrichtungen ist der kürzlich an der Universität Innsbruck entwickelte Elektro-Seilrechen (Brinkmeier et al. 2017). Dieser besteht aus horizontal gespannten Drahtseilen, an denen eine elektrische Impulsspannung im Niedervoltbereich bis maximal 80 V Gleichstrom anliegt. Der Seilrechen soll die Fische vor der Turbinenpassage schützen und gleichzeitig zu einer Fischabstiegsmöglichkeit leiten. Weitere Varianten der aktiven Fischschutzeinrichtungen arbeiten mit Licht- oder Schallimpulsen, um einen ähnlichen Effekt der Scheuchwirkung zu generieren. Allerdings ist bekannt, dass Fische sich sehr schnell an diese Störimpulse gewöhnen können, was deren Funktionalität auf lange Sicht erheblich schmälert. Aktive Fischschutzeinrichtungen werden in diesem Projekt nicht untersucht.

4. Übersicht der Untersuchungsstandorte

Zur vergleichenden Untersuchung der ökologischen Auswirkungen verschiedener Wasserkraftstechnologien wurden durch das StMUV und das LfU in Abstimmung mit dem LS Aquatische Systembiologie acht Untersuchungsstandorte ausgewählt (Abbildung 8).

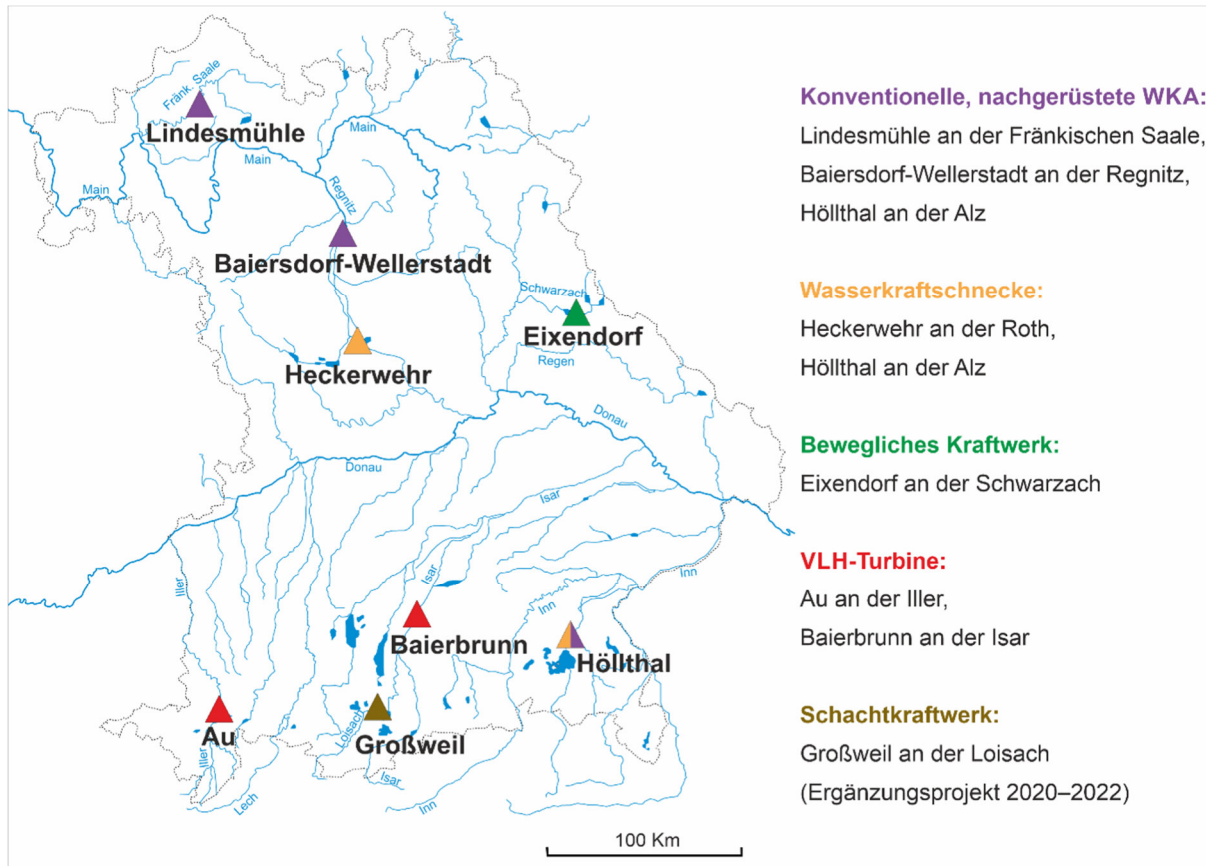


Abbildung 8 Bayernkarte mit Verortung der Projektstandorte unterschieden nach Kraftwerkstypen.

Da auch zwischen Anlagen desselben Typs große standortspezifische Unterschiede bestehen können (Details in der Bauausführung, Ausbauleistung der Anlage, Fallhöhe etc., die zu unterschiedlich starker Auffindbarkeit von Bypässen und Schädigung führen), wurden je nach Verfügbarkeit entsprechender Projekte in Bayern bis zu drei Standorte für eine Technologie berücksichtigt (Tabelle 1). Die Untersuchungsstandorte werden in den jeweils zugehörigen Bänden des Berichts (Bände 3–10) näher beschrieben. Das Schachtkraftwerk in Großweil an der Loisach konnte aufgrund von Verzögerungen bei der Genehmigung der Kraftwerksanlage und beim Baufortschritt nicht im vorgesehenen Zeitraum des Projekts untersucht werden. Die Untersuchungen wurden daher im Rahmen eines Ergänzungsprojekts in den Jahren 2020–2022 nachgeholt. Weiterhin waren ursprünglich Untersuchungen an einem weiteren beweglichen Kraftwerk in Volkmannsdorf und an einem weiteren VLH-Standort in Pielmühle geplant. Diese Standorte konnten aufgrund andauernder Verzögerungen in den

Genehmigungsverfahren nicht in die Untersuchungen mit einbezogen werden. Die Standortbeschreibungen und ggf. Informationen zu bereits durchgeführten Voruntersuchungen für die zwei in diesem Projekt nicht mehr mit einbezogenen Standorte finden sich in der Anlage „Standortinformationen Volkmannsdorf und Pielmühle“.

Tabelle 1 Übersicht über die Untersuchungsstandorte. Konventionell nachgerüstet = Bestandsanlagen mit ein bzw. zwei Kaplan-Rohrturbinen, die mit Fischschutzeinrichtungen nachgerüstet wurden (Feinrechen, Ableitsysteme). VLH = Very Low Head, MQ = mittlerer Jahresabfluss.

Technologie	Turbinentyp	Anzahl Turbinen	Ausbauleistung [kW]	Bypasssystem	Gewässer	MQ [m³/s]	Standort	Landkreis	Bezirk
VLH-Turbine	VLH-Turbine	2	900	Schlitzpass	Iller	46,6	Au/Kempton	Oberallgäu	Schwaben
	VLH-Turbine	1	380	Raugerinne Beckenpass Raue Rampe	Isar	48,5	Baierbrunn	München	Oberbayern
Bewegliches Kraftwerk	Kaplan-Rohrturbine	1	190	Kronenauschnitt	Schwarzach	4,32	Eixendorf	Schwandorf	Oberpfalz
Wasserkraftschnecke	Wasserkraftschnecke	1	80	Aufstiegschnecke	Roth	3,17	Heckerwehr	Roth	Mittelfranken
	Wasserkraftschnecke	2	306	Raugerinne Beckenpass	Alz	51,5	Höllthal	Traunstein	Oberbayern
Schachtkraftwerk	Kaplan-Rohrturbine	2	420	Schlitzpass	Loisach	22,8	Großweil	Garmisch-Partenkirchen	Oberbayern
Konventionell nachgerüstet	Kaplan-Rohrturbine	2	660	Schlitzpass	Regnitz	34,8	Baiersdorf-Wellerstadt	Erlangen-Höchstadt	Mittelfranken
	Kaplan-Rohrturbine	1	280	Naturnahes Umgehungsgewässer	Fränkische Saale	12,1	Lindesmühle	Bad Kissingen	Unterfranken
	Kaplan-Rohrturbine	1	267	Aalrohr Raugerinne Beckenpass	Alz	51,5	Höllthal	Traunstein	Oberbayern

5. Notwendige Genehmigungen zur Projektdurchführung

Für die Durchführung sowohl des Projektteils A „Anlagenbedingte Schädigung“ als auch des Projektteils B „Ökologische Auswirkungen“ waren zahlreiche Genehmigungen von unterschiedlichen Stellen einzuholen (Tabelle 2). Im Einzelnen wurden folgende Genehmigungen eingeholt:

- Einverständnis der Fischereiberechtigten zur Elektrobefischung im jeweiligen Fischrecht
- Genehmigung der zuständigen Kreisverwaltungsbehörde zum Fischfang mit elektrischem Strom nach dem Bayerischen Fischereigesetz (BayFiG) und der Verordnung zur Ausführung des Bayerischen Fischereigesetzes (AVBayFiG)
- Genehmigung der zuständigen Kreisverwaltungsbehörde zur Befahrung der Gewässer mit Motorbooten nach Artikel 28 bayerisches Wassergesetz und SchO §3
- Genehmigung der zuständigen Kreisverwaltungsbehörde zum Betreten von Schutzgebieten (z.B. Vogelschutzgebiete, Landschaftsschutzgebiete, FFH-Schutzgebiete)

Für den Projektteil A waren zusätzlich die folgenden Genehmigungen notwendig:

- Genehmigung eines Tierversuchsvorhabens nach §8 Absatz 1 des Tierschutzgesetzes durch die Bezirksregierung Oberbayern
- Erlaubnis der zuständigen Kreisverwaltungsbehörde nach §11 Absatz 1 Tierschutzgesetz zum Halten und Züchten von Wirbeltieren zu Versuchszwecken
- Wasserrechtliche Erlaubnis der zuständigen Kreisverwaltungsbehörde zur Errichtung von Fischhälterungsbecken, der Wasserentnahme aus dem Gewässer und Wiedereinleitung ins Gewässer (die Beantragung wurde vom ÖIB übernommen)
- Schriftliche Anzeige des Auf- und Abbaus der Fischhälterungsbecken bei der zuständigen Kreisverwaltungsbehörde
- Einverständnis von Fischereirechtsinhaber und zuständiger Fischereifachberatung zum Besatz von Versuchsfischen in den einzelnen Untersuchungsgewässern
- Gesondertes Einverständnis der zuständigen Fischereifachberatungen zum Besatz mit Aal im Donaeinzugsgebiet (die Einholung wurde vom LfU Referat 54 übernommen)

Aufgrund von formalen Verfahrensverzögerungen seitens der Regierung von Oberbayern konnten die Tierversuche erst verspätet genehmigt werden, was wiederum zu Verzögerungen bei der Durchführung führte. Zusätzlich verursachte diese Verzögerung Probleme bei der Bestellung und Beschaffung der Versuchsfische. Allerdings muss an dieser Stelle auch darauf hingewiesen werden, dass durch die Möglichkeit zur persönlichen Projektvorstellung und Interaktion mit der Tierschutzkommission eine sehr zielführende und im Ergebnis sehr positive Diskussion geführt werden konnte.

Tabelle 2 Übersicht der erforderlichen Genehmigungen, die für die Durchführung von Projektteil A und Projektteil B beantragt werden mussten.

Standort	Hälterungsgenehmigung § 11 TierSchG		Befahrungsgenehmigung		Wasserrechtliche Genehmigung		Elektrofischerei- Genehmigung		Tierversuchsgenehmigung	
	Gültigkeits- dauer	Akten- zeichen	Gültigkeits- dauer	Akten- zeichen	Gültigkeits- dauer	Akten- zeichen	Gültigkeits- dauer	Akten- zeichen	Gültigkeits- dauer	Akten- zeichen
Freising/ Moosach	20.03.2014– 31.08.2020	32-568	16.04.2015– 31.12.2016	41-641-3			21.03.2013– 15.02.2022	31-7562	12.05.2015– 31.05.2020	ROB-55.2-2532. Vet_02-15-24
Baiersdorf/ Regnitz	17.04.2015– 16.04.2017	81.5683.1	13.08.2014– 31.12.2016	40 6416	27.4.2015– 31.12.2015	40 6410/40 6451.2	21.03.2013– 15.02.2022	31-7562	23.07.2015– 31.08.2020	ROB-55.2-2532. Vet_02-15-31
Lindesmühle/ Fränkische Saale	17.04.2015– 31.08.2020	33-5680	25.09.2014– 31.12.2016	42-6412-008	24.04.2015– 31.12.2016	42-6451-01-008	21.03.2013– 15.02.2022	31-7562	23.07.2015– 31.08.2020	ROB-55.2-2532. Vet_02-15-31
Au/Ilher	11.06.2015– 31.08.2020	302 -Bi	24.07.2014– 31.12.2016	31-641/12-05/ 14-Gro	01.02.2016– 31.12.2016	SG 31-641/ 1-07/15	21.03.2013– 15.02.2022	31-7562	23.07.2015– 31.08.2020	ROB-55.2-2532. Vet_02-15-31
Heckerwehr/ Roth	08.07.2015– 07.07.2017	41- Leh	31.03.2015– 31.12.2016	44-myr 6415 TUM.Roth	18.11.2015– 31.12.2016	44-myr 647	21.03.2013– 15.02.2022	31-7562	23.07.2015– 31.08.2020	ROB-55.2-2532. Vet_02-15-31
Eixendorf/ Schwarzach	07.03.2017– 31.08.2020	4.13–568	01.01.2017– 31.12.2020	610-646.406	02.01.2017– 31.12.2020	610-641.6547	21.03.2013– 15.02.2022	31-7562	23.07.2015– 31.08.2020	ROB-55.2-2532. Vet_02-15-31
Baierbrunn/ Isar	14.04.2015– 31.08.2020	5.1-5682/TUM/ Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie	17.03.2015– 31.12.2016 01.01.2017– 31.12.2020	6.2-7732/Le 4.4.2-7732/Le	21.11.2016– 31.12.2020	4.4.2-8208/Le	21.03.2013– 15.02.2022	31-7562	12.05.2015– 31.05.2020	ROB-55.2-2532. Vet_02-15-24
Höllthal/Alz	30.07.18– 31.08.2020	5.70- KS	Herbst 2018– Frühjar 2019	4.16-6430.02- 170058	Herbst 2018– Frühjar 2019	4.16-6430.02- 170058	21.03.2013– 15.02.2022	31-7562	12.05.2015– 31.05.2020	ROB-55.2-2532. Vet_02-15-31
Großweil/ Loisach	23.07.2020– 30.06.2022	53-5682-Ho	01.10.2014– 31.12.2016 01.01.2020– 31.12.2022	32-6416/1 32-8502.2	31.08.2020– 31.12.2021	32-6410.3	21.03.2013– 15.02.2022	31-7562	08.03.2020– 07.03.2022	ROB-55.2-2532. Vet_02-19-160

6. Methoden im Projektteil A

Grundsätzlich kann zur Bewertung der Auswirkung von Wasserkraftanlagen auf Fische der natürliche Fischbestand des Untersuchungsgewässers herangezogen werden. Dies bringt den Vorteil, dass die Untersuchungsergebnisse das Fischartenspektrum des jeweiligen Gewässers zu deren natürlichen Wanderzeiten widerspiegeln. Allerdings ist es anhand des natürlichen Fischbestands kaum möglich, Vorschädigungen die z.B. durch Prädation oder weiter oberhalb gelegene Wasserkraftanlagen bedingt sind, von den tatsächlichen Effekten der zu untersuchenden Wasserkraftanlagen zu trennen. Es können zwar Fische mittels Elektrofischungen im Oberwasser gefangen und auf Verletzungen hin geprüft werden. Mit dieser Methode können allerdings nur mobile Fische, die auf Strom reagieren, erfasst werden. Dadurch ließ sich aber zumindest näherungsweise eine potenzielle Vorschädigung des natürlichen Fischbestands vor der Passage des Kraftwerks abschätzen. Darüber hinaus kann bei einer Verwendung des natürlichen Fischbestands lediglich eine Gesamtmortalität ermittelt werden und keine Differenzierung in verschiedene Anlagenteile, wie z.B. Rechen und Turbine, oder nach fangbedingter Mortalität vorgenommen werden. Mittels standardisierter Zugaben von Zuchtfischen können Fische, deren Ausgangszustand anhand einer Stichprobe bestimmt werden kann, an verschiedenen Anlagenteilen zugeben werden und so deren Schädigungspotenzial individuell bestimmt werden. Die fangbedingte Mortalität kann durch Zugaben direkt ins Hamennetz ermittelt und aus dem Gesamtergebnis eliminiert werden. Da beide Vorgehensweisen Vor- sowie Nachteile mit sich bringen, wurden diese im vorliegenden Projekt parallel verfolgt. Zu Beginn des Projekts erfolgte ein umfangreicher Versuchsblock zur Etablierung und Validierung der Untersuchungsmethoden, die im weiteren Projektverlauf an den Kraftwerksstandorten angewandt wurden (Abbildung 9).

Aus den Untersuchungen des natürlichen Fischabstiegs lassen sich Erkenntnisse über die Nutzung der verschiedenen Wanderkorridore (v.a. Turbinenkorridor und Bypass-Systeme) ableiten. Durch die Untersuchungen mit standardisierten Fischzugaben werden die durch die Turbine und den Rechen verursachten Verletzungen der Fische abgeleitet. Hierfür wurden äußerlich sichtbare und innere Verletzungen erfasst. Außerdem wurden die Fische mehrere Stunden nach dem Versuch nochmal bewertet, um auch eine später auftretende, verzögerte Mortalität zu berücksichtigen. Diese Erkenntnisse flossen anschließend in die Gesamtbilanzierung der anlagenbedingten Auswirkungen ein.

Zusätzlich wurden mit Hilfe von sonar-basierten Methoden verhaltensbiologische Untersuchungen von Fischen an Wasserkraftanlagen durchgeführt. Die im Projektteil A angewandten Methoden werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

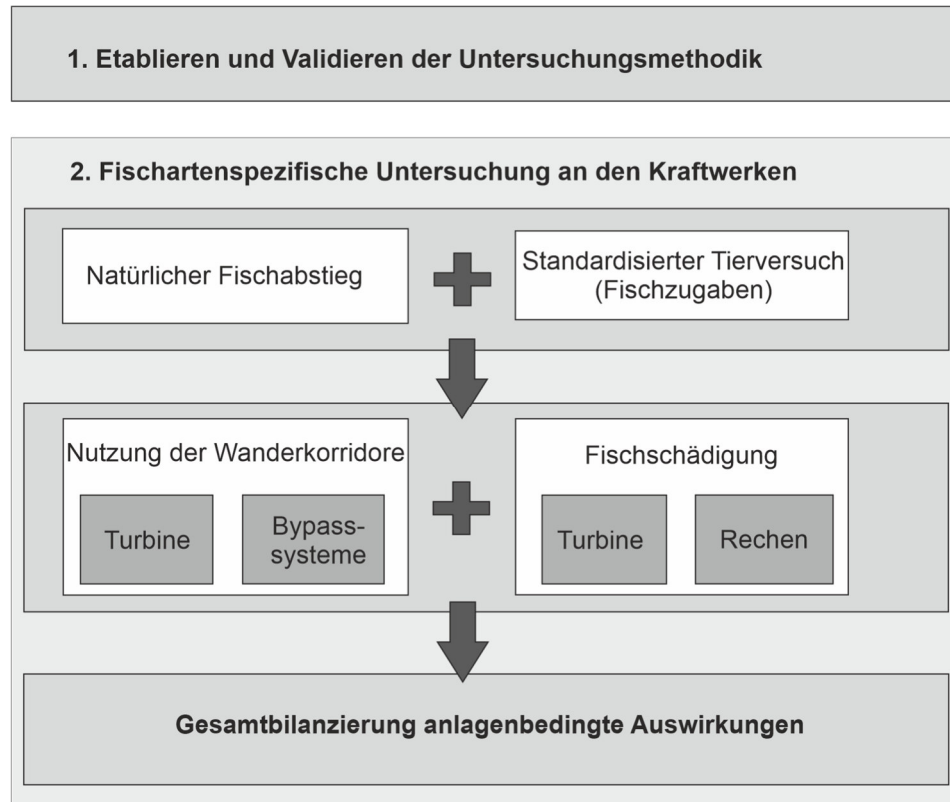


Abbildung 9 Schematische Darstellung der Untersuchungen im Projektteil A.

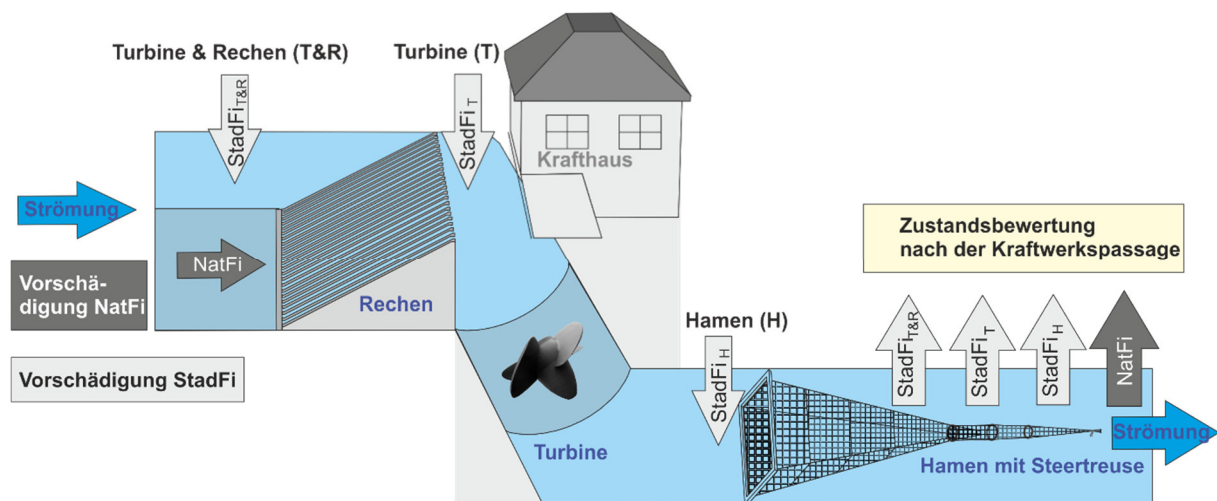


Abbildung 10 Schematische Darstellung der verschiedenen Zugabe- und Entnahmestellen für Fische des natürlichen Fischbestands (NatFi) und aus den standardisierten Fischzugaben (StadFi), abgeändert nach Mueller et al. (2017). T&R = Passage der Fische durch Turbine und Rechen bei Fischzugabe oberhalb des Rechens, T = Passage der Fische durch die Turbine bei Fischzugabe zwischen Rechen und Turbine (an den Standorten Eixendorf und Höllthal baulich bedingt nicht möglich), H = Referenzgruppe an Fischen, die nur den Hamen passiert haben.

Fische können durch verschiedene Anlagenteile von Wasserkraftanlagen geschädigt werden, insbesondere durch Turbine und Rechen (Abbildung 10, Abbildung 11). Für die Schädigung von Fischen in Wasserkraftturbinen sind verschiedene physikalische Mechanismen verantwortlich (Davies 1988, Calles & Greenberg 2009). Neben direktem Schlag durch rotierende Turbinenkomponenten sind es vor allem die extremen hydraulischen Bedingungen, welche Verletzungen hervorrufen können (Deng et al. 2005, Nichtawitz & Grafenberger 2006, Deng et al. 2014). Die spezifischen Wirkungen auf den Fisch sind für konventionelle Turbinentypen aus Laborversuchen und Modellierungen bekannt (z.B. Neitzel et al. 2000, Ferguson et al. 2008, Stephenson et al. 2010, Brown et al. 2012b):

- Druckunterschiede: Vom Turbineneinlauf bis zum Laufrad steigt der Druck an und fällt in der Turbine rapide ab (z.B. Brown et al. 2009). Dabei treten Druckunterschiede von 100–200 kPa auf (Brown et al. 2009, Richmond et al. 2014).
- Schläge und Kollisionen durch/mit Maschinenbestandteilen und Betonwänden im Turbinenraum und Saugschlauch (z.B. Killgore et al. 2001)
- Reibung bei allen im Turbinenraum auftretenden Spalten
- Scherspannungen durch die Nachlaufströmung der Turbinenschaufeln sowie in der Nähe von Spalten und Wänden (z.B. Čada et al. 2007)
- Kavitationskräfte im Turbinenraum
- Turbulenzen im Saugschlauch und im direkt angrenzenden Unterwasser

Rechenanlagen werden an Wasserkraftanlagen in erster Linie dazu eingesetzt, die Turbinen vor dem Eindringen von Treibgut (Holz, Pflanzenteile, Unrat) und grobem Geschiebe (Kies, Steine) zu schützen. Darüber hinaus werden Rechen als physische Barriere zum Fischschutz bzw. zur Ableitung von Fischen in Bypass-Systeme eingesetzt (vgl. Kapitel 3.1). Eine Rechenanlage besteht aus Metallstäben, die horizontal oder vertikal angeordnet sind und aus einem Rechenreiniger, der regelmäßig das am Rechen angelagerte Treibgut in einen Container an Land oder über eine Spülrinne ins Unterwasser des Kraftwerkes befördert. Der Abstand zwischen den Stäben eines konventionellen Rechens beträgt ca. 30–100 mm (Ebel 2013). An Rechenanlagen können Fische durch Anpressen, Stress, innere Verletzungen oder letztendlich durch Einwirken der Rechenreinigungsanlage Schaden nehmen (Nettles & Gloss 1987, Skalski et al. 2002a und b, Adam & Brujis 2006).

Darüber hinaus können Fische beim Absturz über größere Fallhöhen, z.B. wenn überschüssiges Wasser über die Wehranlage abgeführt wird, mechanisch geschädigt werden (z.B. Miracle et al. 2009, Ebel 2013). Dies kann auch in Verbindung mit Spülrinnen und

sonstigen Fischableiteinrichtungen wie Rohren vom Ober- zum Unterwasser der Fall sein (Muir et al. 2001).

Die durch die oben beschriebenen Mechanismen potenziell entstehenden Schädigungen am Fisch sind von artspezifischen Eigenschaften wie dessen Morphologie (Körperform, Schuppen- und Flossentyp etc.), Verhalten (Schwimmverhalten und Schwimmstärke, Meideverhalten), Schleimhauteigenschaften, Vorhandensein einer Schwimmblase (z.B. Colotelo et al. 2012) und deren Morphologie (einkammrige Schwimmblase, mehrkammrige Schwimmblase, Verbindung zum Vorderdarm über *Ductus pneumaticus*) sowie Physiologie abhängig. Weiterhin hat die Fischgröße einen starken Einfluss auf die Schädigungs- und Mortalitätsraten. Kleine Fische sind beispielsweise empfindlicher gegenüber Druckunterschieden (Trumbo et al. 2014), während größere Fische einem höheren Risiko für Kollisionsschädigungen ausgesetzt sind (Gloss & Wahl 1983, Schneider et al. 2012). Die art- und größenspezifische Schädigung wird auch durch die Durchflussmenge der Turbine beeinflusst (Lastzustand). Je nach Durchflussmenge wird die Stellung der Turbinenschaufeln verändert (Abbildung 12). Bei geringem Wasserdurchfluss (minimale Turbinenlast) liegen die Turbinenschaufeln beispielsweise sehr eng beieinander, so dass vor allem für größere Fische ein höheres Verletzungsrisiko besteht. Bei maximaler Durchflussmenge (maximale Turbinenlast) stehen die Schaufeln am weitesten auseinander und bieten den größtmöglichen Platz für die Fische und somit eine größere Wahrscheinlichkeit zwischen den Schaufeln zu passieren ohne diese zu berühren.

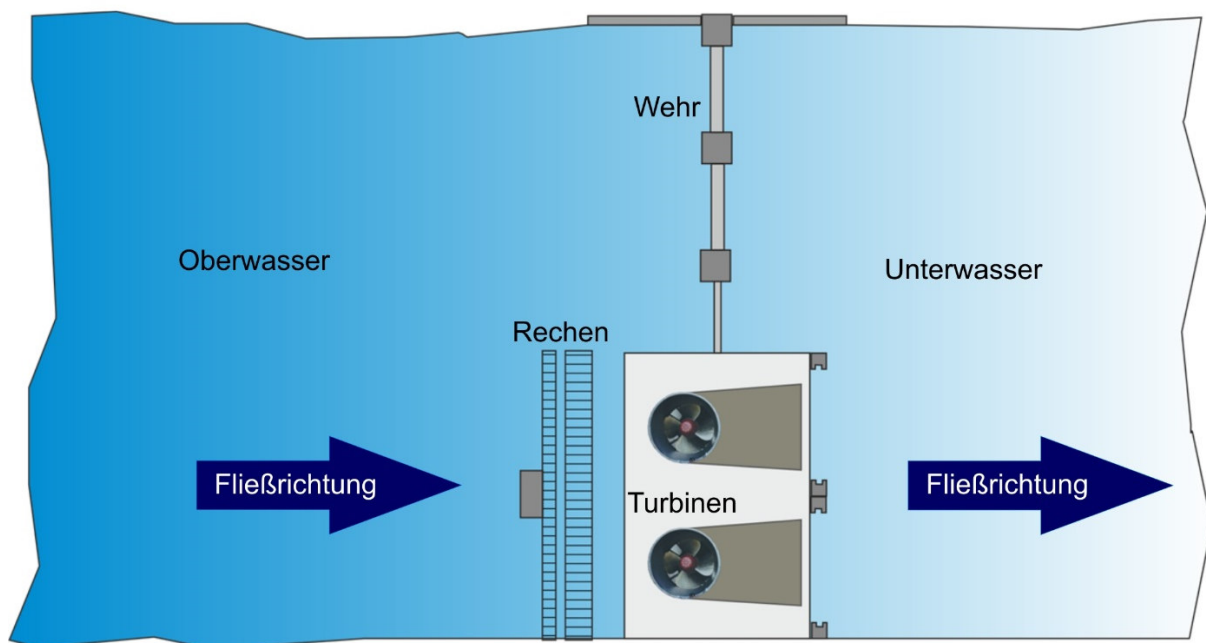


Abbildung 11 Aufsicht auf einen Fließgewässerschnitt mit einem konventionellen Laufkraftwerk. Die Turbinen werden durch einen vorgeschalteten Rechen vor dem Eindringen von Treibgut und Geschiebe geschützt.

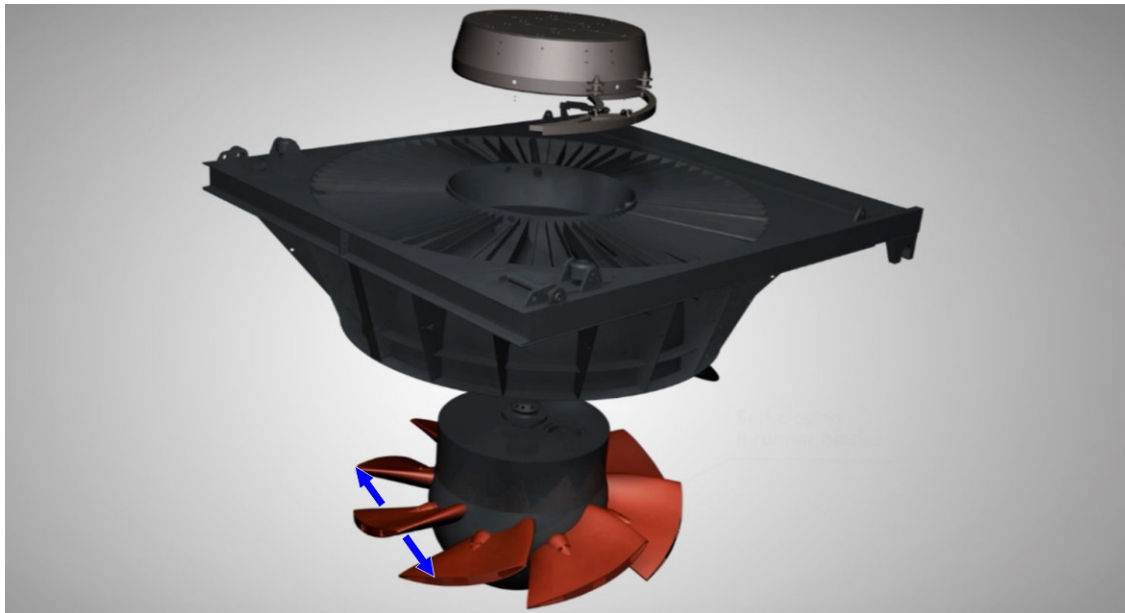


Abbildung 12 Schematische Darstellung einer VLH-Turbine. Quelle: www.power-technology.com.

6.1. Fang von Fischen an Wasserkraftanlagen mittels netzbasierter Fangtechniken

Durch wasserbauliche Anlagen verursachte Mortalitäts- und Verletzungsraten an Fischen müssen in Freilanduntersuchungen bestimmt werden (DWA 2005, DWA 2006), da anlagenspezifische Baudetails und artspezifisches Verhalten sowie Physiologie der Fische in Laborversuchen und Modellen nicht ausreichend nachgebildet werden können. Da der Fischabstieg in größeren Gewässern nur mit erheblichem Aufwand erfasst und quantifiziert werden kann, wurden dazu im europäischen Raum bisher nur vereinzelt Untersuchungen durchgeführt (DWA 2005, z.B. Holzner 1999 & 2000, Schneider et al. 2012). Um den Handlungsbedarf an einer spezifischen Wasserkraftanlage zu ermitteln, muss nach DWA (2005) sowohl das natürliche Abwanderpotenzial im Gewässer als auch die anlagenbedingte Mortalität und Schädigung aller relevanten Fischarten und Größenklassen, unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Abwanderkorridore, möglichst exakt differenziert und quantifiziert werden. Zur Untersuchung dieser beiden Aspekte ist es notwendig, Fische aus dem Wasserkörper zu entnehmen. Im Rahmen der Klärung von Fragen des Fischabstiegs werden dazu in europäischen Fließgewässern in der Regel aus Netzmaterial gefertigte Fangsäcke verwendet, die man je nach Ausführung als Hamen oder Reusen bezeichnet und welche auch in der Fischerei als gängige Methoden Anwendung finden (Abbildung 13). Für die Befischung von großen Querschnitten wie Turbinenauslässen werden Hamen verwendet, während Reusen für die Untersuchung kleinerer Querschnitte wie z.B. Fischpässe geeignet sind. Ein Hamen besteht aus einem mehrere Meter langen, sich verjüngenden Netzsack mit abnehmender Maschenweite, der durch die Strömung offen

gehalten wird. Um auch Neunaugen, Aale und juvenile Fische zu einem möglichst hohen Grad erfassen zu können, sollte die geringste Maschenweite im Netzsackbereich 10 mm nicht überschreiten. Die Hamenöffnung wird üblicherweise an einem Stahlrahmen befestigt, der mit Hilfe eines Krans oder Hebezugs in die Revisionsverschlüsse am Turbinenauslauf eingesetzt werden kann.

Die eigentliche, am Ende des Netzsacks befindliche Fangeinrichtung kann aus einem Fangsack mit mehreren Reusenkehlen, dem sogenannten Steert, oder einem schwimmenden Fangkasten bestehen (Lagarrigue & Frey 2010). Die Kehlen verhindern dabei ein Entweichen des Fangs. Die Fangwirkung des Hamens beruht darauf, dass Fische mit der Strömung durch den Hamen in die Steertreuse transportiert werden. Der Netzsack des Hamens muss so lang sein, dass die Steertreuse außerhalb der Hauptströmung und damit ohne Turbulenzen zum Liegen kommt. Zu Beginn des Projekts wurde am Lehrstuhlstandort an der Moosach ein umfangreicher methodischer Vorversuch durchgeführt, in welchem der Einfluss verschiedener Fangeinrichtungen, Leerungsintervalle und Treibgutmischungen auf die fangbedingte Schädigung der Fische untersucht und die generelle Vorgehensweise bei standardisierten Fischzugaben erprobt wurde. Dieser Versuch ist in Band 2a näher beschrieben; die Ergebnisse wurden bereits in einer internationalen Zeitschrift mit Peer-Review Verfahren publiziert (Fisheries Management and Ecology, Pander et al. 2018, siehe CD Anhang).

Die in diesem Projekt eingesetzten Hamen sind knotenlose Nylonnetze, die sich stufenweise von 30 mm auf 10 mm Maschenweite reduzieren (Abbildung 13). Die Fangnetze werden zusätzlich von vier Rahmentauen verstärkt (Engel Netze, Bremerhaven, Deutschland). Der Hamen-Endring wird immer mit dem Anfangsring ($\varnothing$ 65–70 cm) einer 6,80 m langen Steertreuse verbunden. Das Netz der Steertreuse besteht ebenfalls aus einem knotenlosen Nylonnetz mit einer Maschenweite von 8 mm. Die Steertreuse wird durch drei eingesetzte Aluminiumringe offen gehalten. Das offene Netzsche der Reuse kann verschnürt werden und bildet so einen Fangsack aus. Um den kompletten Gewässerquerschnitt abzudecken, werden die Fangeinheiten in der Regel an Metallrahmen aus Vierkantrohr mit einer aufgeschweißten Relling angeschlagen und in die U-Profile der Revisionsverschlüsse am Turbinenauslauf eingesetzt. Die Hamen an den Wasserkraftanlagen werden je nach Wassertiefe im Unterwasser watend oder vom einem Schlauch- bzw. Pontonboot aus geleert. Das Pontonboot ist als Katamaran ausgeführt, um bei der Hamenleerung unmittelbar über die geschlossene Steertreuse navigieren zu können. Mit Hilfe einer Hebevorrichtung mit einer aufgesetzten elektrischen Seilwinde ist es auch bei hohem Treibgutaufkommen und großem

Wasserdruck möglich, die Steertreuse komplett aus dem Wasser zu heben. Bei steilen Uferböschungen wird eine Holzterrasse errichtet (z.B. Standorte Baiersdorf-Wellerstadt, Au Iller, Heckerwehr, Höllthal), die auf eine schwimmende Arbeitsplattform (Jetfloat System, JETFLOAT International GmbH, Salzburg, Österreich) führt. Von der Arbeitsplattform aus kann das für die Leerung der Steertreusen bereitgestellte Schlauchboot (Honda T38-IE2 3,8 m, Honda Germany, Frankfurt) gefahrlos erreicht werden. Um eine Leerung der Steertreusen auch bei Nacht zu ermöglichen, werden soweit notwendig Baustrahler installiert. Um das Boot zu manövrieren, ist am jeweiligen Anlegeplatz auf Höhe der Reusenenden ein Führungsseil quer über den Fluss gespannt. An zwei parallel zur Fließrichtung verlaufenden Seilen wird das Boot stromaufwärts gezogen und kann bei Bedarf an diesen festgemacht werden. Der bei der Reusenleerung geborgene Netzsack wird in eine im Boot bereitstehende wassergefüllte Fischwanne entleert. Die gefangenen Fische werden per Hand aus dem Schwemmgut aussortiert, bezüglich ihrer Verletzungen untersucht und in die Hälterungen zum Feststellen der verzögerten Mortalität verbracht (siehe Kapitel 6.4).

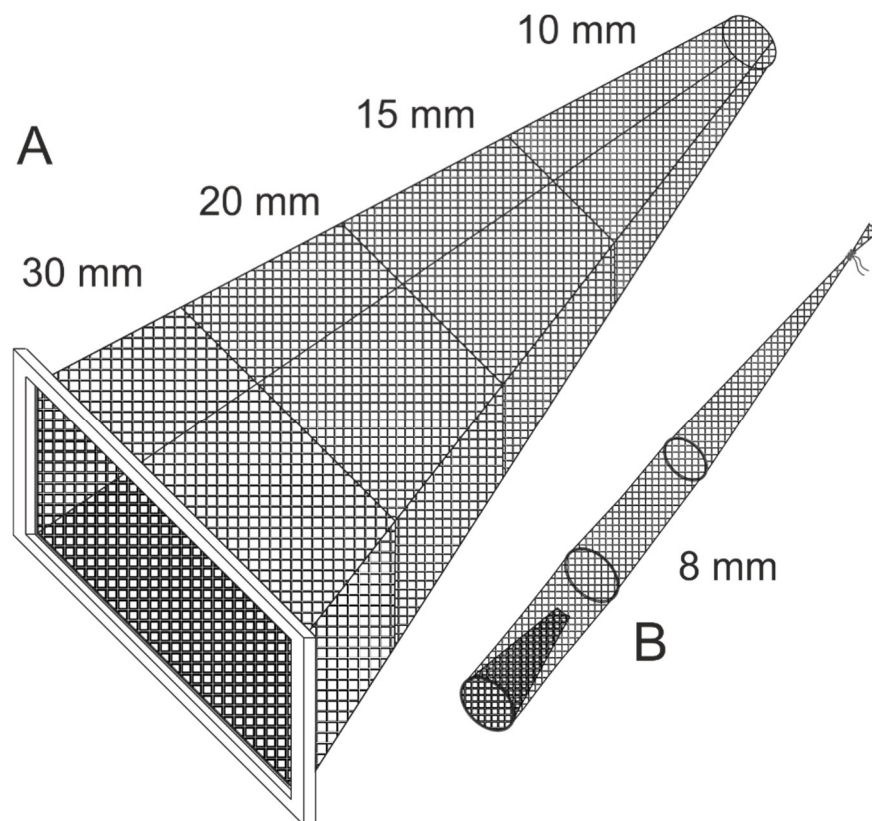


Abbildung 13 Schematische Darstellung eines am Turbinenauslauf angebrachten Fanghamens (A) mit abnehmender Maschenweite und Steertreuse (B). Abgeändert nach Pander et al. (2018).

6.2. Erfassen äußerlich sichtbarer Verletzungen

Die im Steert gefangenen Fische müssen anschließend auf mögliche anlagenbedingte Verletzungen hin näher untersucht werden. Dabei sollte nicht nur die direkte Mortalität erfasst werden, sondern auch subletale Verletzungen und eine eventuell dadurch verursachte verzögerte Mortalität (DWA 2005, Ferguson et al. 2006, Sandford et al. 2012). Zur Bewertung können in erster Linie äußerlich sichtbare Verletzungen wie Schuppenverluste, Epidermisverletzungen, Teil- und Totalabtrennungen, Quetschungen, Hämatome, Fleischwunden, Verletzungen der Augen, Flossen und Kiemendeckel oder Wirbelsäulenbrüche herangezogen werden (Holzner 1999, Schneider et al. 2012), die durch visuelle Begutachtung erfasst werden. Durch Röntgenanalysen der Fische werden innere Verletzungen wie Gewebeverletzungen, Wirbelbrüche, Schwimmblasen- oder Gallenblasenschäden und Einblutungen untersucht (Ebel 2013; vgl. hier Kapitel 6.3).

Bisherige Feldstudien zur Verletzung von Fischen durch Wasserkraftanlagen haben sich fast ausschließlich auf die Mortalität als biologischen Endpunkt fokussiert. In einigen Studien werden zwar auch spezifische Verletzungen exemplarisch genannt (z.B. Winchell & Sullivan 1991, Schneider et al. 2012, Tombek & Holzner 2009, Schmalz 2010), eine standardisierte Vorgehensweise zur differenzierten Erfassung einzelner Verletzungsbilder an Fischen, die einen Vergleich zwischen verschiedenen Wasserkraftanlagen/Studien erlaubt, stand bislang jedoch nicht zur Verfügung. Im Hinblick auf den bevorstehenden Ausbau der Wasserkraft in Bayern (StMUV 2012) und weltweit (Zarfl et al. 2015), ist ein detailliertes Wissen über die Verletzungsmuster, die durch verschiedene Wasserkrafttechnologien verursacht werden, von zentraler Bedeutung für den zukünftigen Schutz der Fischpopulationen. Im Gegensatz zu einer reinen Betrachtung der Mortalitätsrate können bei einer genaueren Betrachtung der verschiedenen auftretenden Verletzungen, differenziert nach Körperteilen und Körperregionen, potenziell Zusammenhänge mit bestimmten Anlagenteilen und anlagentypspezifischen, physikalischen Bedingungen bei der Passage von Wasserkraftwerken hergestellt werden. Vor allem für die Weiterentwicklung von „fischverträglicheren“ Wasserkrafttechnologien kann dies von zentraler Bedeutung sein. Die bislang detaillierteste Vorgehensweise zur Bestimmung der Schädigung von Fischen wurde erstmals von Holzner (1999) in Dettelbach am Main angewandt. Dabei wird der Zustand der Fische je nach Intensität der Verletzungen in fünf Schadenskategorien eingeteilt. Im Projekt war es ursprünglich geplant, diese Einteilung auch für die Untersuchungen an den Projektstandorten anzuwenden. Bei den ersten Probebefischungen an den konventionell-nachgerüsteten Kraftwerksanlagen in Baiersdorf-Wellerstadt und Lindesmühle im Herbst 2014 hat sich jedoch gezeigt, dass eine Vielzahl

verschiedener Verletzungen (z.B. Schuppenverluste, Einrisse der Flossen, Einblutungen, Hautverletzungen, Quetschungen) an den unterschiedlichsten Körperteilen auftritt, die bei der Kategorisierung nach Holzner (1999) teilweise nicht berücksichtigt sind (z.B. Einrisse der Flossen) oder sich nur schwer standardisiert in die fünf Kategorien einteilen lassen. Da jede dieser Verletzungen, auch wenn sie an stark regenerationsfähigen Körperteilen wie den Flossen auftritt, einen Energieverlust und ein erhöhtes Infektionsrisiko für den Fisch darstellt, ist es durchaus für eine Bewertung der Effekte relevant diese zu quantifizieren. Zudem vermittelte der erste Eindruck bereits starke Unterschiede in der Verletzung einzelner Körperpartien zwischen den Arten und Größenklassen. Bei der relativ groben Einteilung nach den bislang praktizierten Schädigungsklassen geht eine Vielzahl an Informationen über die einzelnen Verletzungen an den verschiedenen Körperteilen des Fisches verloren. Diese Informationen sind jedoch wichtig für die Unterscheidung der durch verschiedene Anlagenteile und Anlagentypen verursachten Verletzungsmuster. Daher wurde in diesem Projekt zur Bewertung der kraftwerksbedingten Schädigung erstmalig eine standardisierte, in einzelne Verletzungstypen, Körperteile und Körperpartien differenzierte Erfassungsmethode entwickelt, bei der für jedes Individuum ein Verletzungsmuster bestehend aus 91 verschiedenen Verletzungen dokumentiert wird (bestehend aus 86 Kombinationen von Körperteilen und Verletzungstypen sowie fünf allgemeinen Gesundheitskriterien). Anhand der detaillierten Informationen zu den Verletzungen der einzelnen Körperteile können später Rückschlüsse auf Zusammenhänge zwischen den physikalischen Gegebenheiten und den auftretenden Verletzungsmustern gezogen werden. Beispielsweise wird davon ausgegangen, dass rechenbedingte Schuppenverluste bevorzugt am Schwanzwurzelbereich auftreten. Zur Erfassung dieses spezifischen Schadbildes ist es unerlässlich, den Fischkörper in mehrere Regionen einzuteilen. Die Erfassung der Intensität des Schuppenverlustes nach den standardisierten Kategorien des Protokolls erlaubt eine statistische Verifizierung solcher Effekte. Im weiteren Projektverlauf wird es angestrebt, dazu anhand der mittels standardisierter Fischzugaben an den Kraftwerksanlagen generierten Daten Auswertungen vorzunehmen. Aus diesen Analysen lässt sich letztendlich ein anlagenspezifisches Gefährdungspotenzial für individuelle Arten und Größenklassen ableiten. Folgende Kriterien sollten durch die neue Methode erfüllt werden:

- Aufnahme detaillierter Verletzungsmuster, differenziert nach den einzelnen Körperteilen des Fisches und nach verschiedenen Verletzungsarten und Intensitäten
- Möglichst zeiteffektive und standardisierte Dokumentation im Feld

- Vorschädigung, Handling-Effekte und anlagenbedingte Verletzungen sollen differenziert werden können
- Eine statistische Auswertung der Daten soll möglich sein
- Kriterien zur Anwendung des Protokolls in Tierversuchen müssen erfüllt sein (Ableitung von Belastungsstufen und Abbruchkriterien)

6.2.1. Standardisiertes Protokoll zur Erhebung äußerer Verletzungen

Um ein standardisiertes Protokoll zur Erfassung der Fischschädigung an Kraftwerksanlagen zu entwickeln, wurden in einem ersten Schritt die bei den ersten Untersuchungen im September 2014 äußerlich sichtbaren Verletzungen in einer Liste zusammengetragen. Darüber hinaus wurde in den verfügbaren nationalen und internationalen Studien zur Fischschädigung an Kraftwerken (z.B. Schneider et al. 2012, Schmalz 2010, Holzner 1999, Holzner 2000) und in Ebel (2013) nach weiteren Verletzungstypen gesucht, um eventuell selten auftretende Verletzungen nicht zu übersehen. Die Funktionalität des Protokolls zur Differenzierung von Vorschädigungen und durch die verschiedenen Anlagenteile hervorgerufenen Verletzungen (z.B. Rechen, Turbine) wurde im Rahmen einer wissenschaftlichen Veröffentlichung anhand von 5.349 Fischen aus 32 Arten geprüft (Mueller et al. 2017). Dabei erfolgte auch eine Validierung der visuellen Einschätzung der Verletzungssintensität mit digitalen Methoden und eine Überprüfung von Bearbeitereffekten (Mueller et al. 2017).

Im Folgenden werden die in das Protokoll aufgenommenen Verletzungen aufgezählt und näher beschrieben (Abbildung 14 und Abbildung 15):

Amputation:	Teilweise oder vollständige Abtrennung von Körperteilen (Kopf, Kiemendeckel, Flossen, Totaldurchtrennungen des Körpers). Am Körper ist die Grenze zur Hautverletzung durch ein Eindringen der Verletzung bis in die Leibeshöhle gesetzt (Verletzung des Muskelfleisches = Hautverletzung Kategorie 5, Einschitt am Körper bis in die Leibeshöhle = Amputation 1).
Schuppenverluste:	Schuppenlose Stellen an der Körperoberfläche in normalerweise beschuppten Bereichen. Vor allem häufig bei Rundschuppen, hier auch leicht zu erkennen. Bei Kammschuppen ist ggf. ein Ertasten entschuppter Bereiche notwendig.

Einrisse der Flossen:	Verletzungen der Flossenhäute zwischen den Flossenstrahlen von kleineren Einrissen bis hin zur vollständigen Durchtrennung der Flossenhaut bis zum Flossenansatz.
Einblutungen:	Blutergüsse oder andere blutende Körperstellen. Können in den Augen, Flossen und an sonstigen Körperteilen auftreten.
Quetschungen:	Druckstellen am Körper des Fisches, die zu einer sichtbaren Veränderung der natürlichen Körperform führen.
Hautverletzungen:	Verletzungen der Haut des Fisches von kleineren Abschürfungen bis hin zu Fleischwunden, die in das Muskelfleisch eindringen.
Verletzung Rückgrat:	Äußerlich sichtbare Verformungen des Rückgrats wie z.B. Knicke oder S-Kurven.
Pigmentveränderungen:	Veränderungen der normalen Pigmentierung des Fisches, die vermutlich durch Berührung entstehen. Meist als dunkle, dünne Streifen erkennbar, auch flächige Veränderungen oder aufgehellte Körperbereiche möglich.
Gasblasen:	Unter der Haut eingelagerte, äußerlich sichtbare Luftbläschen, die in den Augen oder in den Flossenhäuten auftreten können.

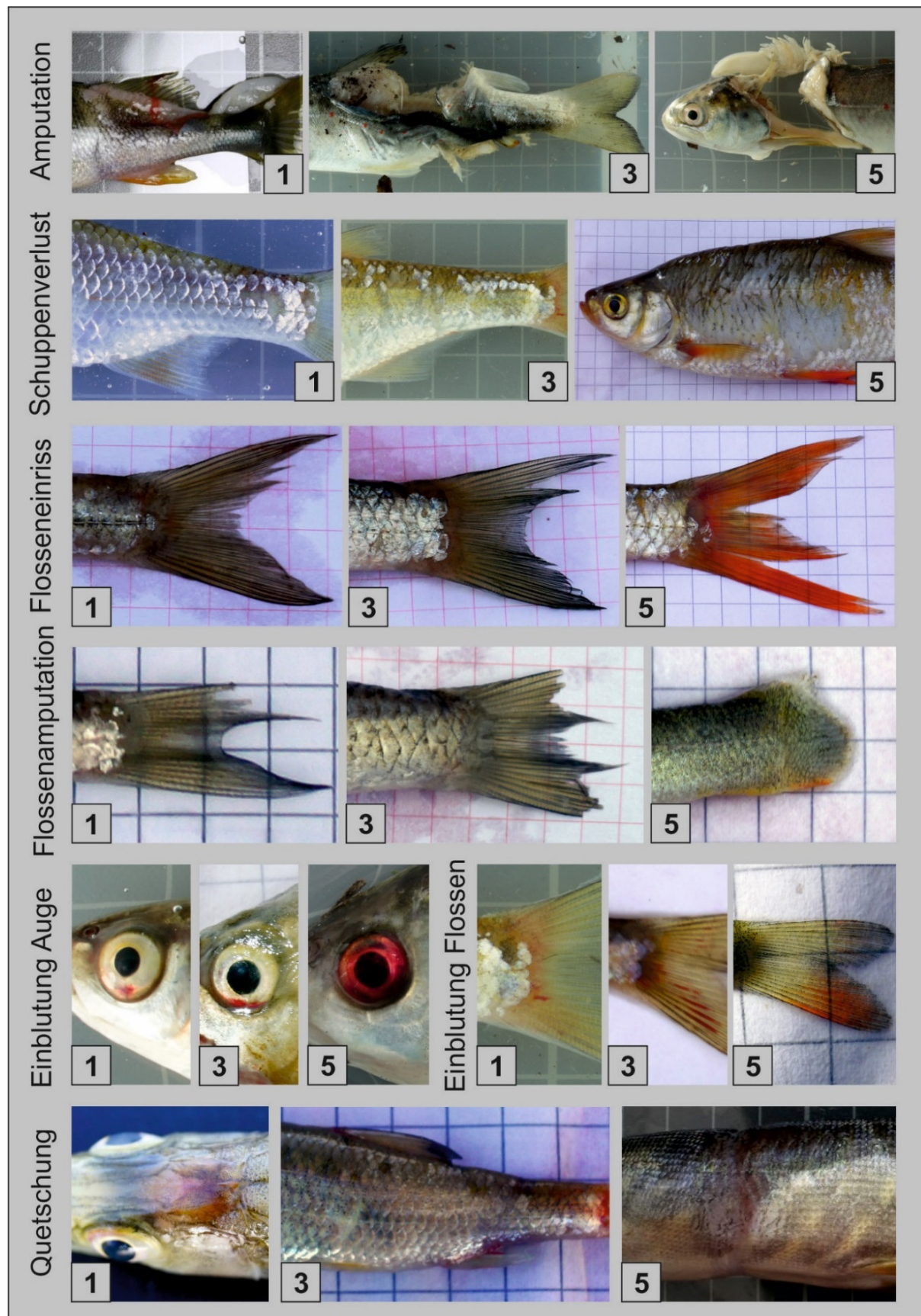


Abbildung 14 Beispielbilder zu Amputationen, Schuppenverlust, Flosseneinrissen, Flossenamputationen, Einblutungen in den Augen und Flossen und Quetschungen in verschiedenen Intensitätsstufen (0 = keine Verletzung, 1 = geringe Intensität, 3 = mittlere Intensität, 5 = hohe Intensität).

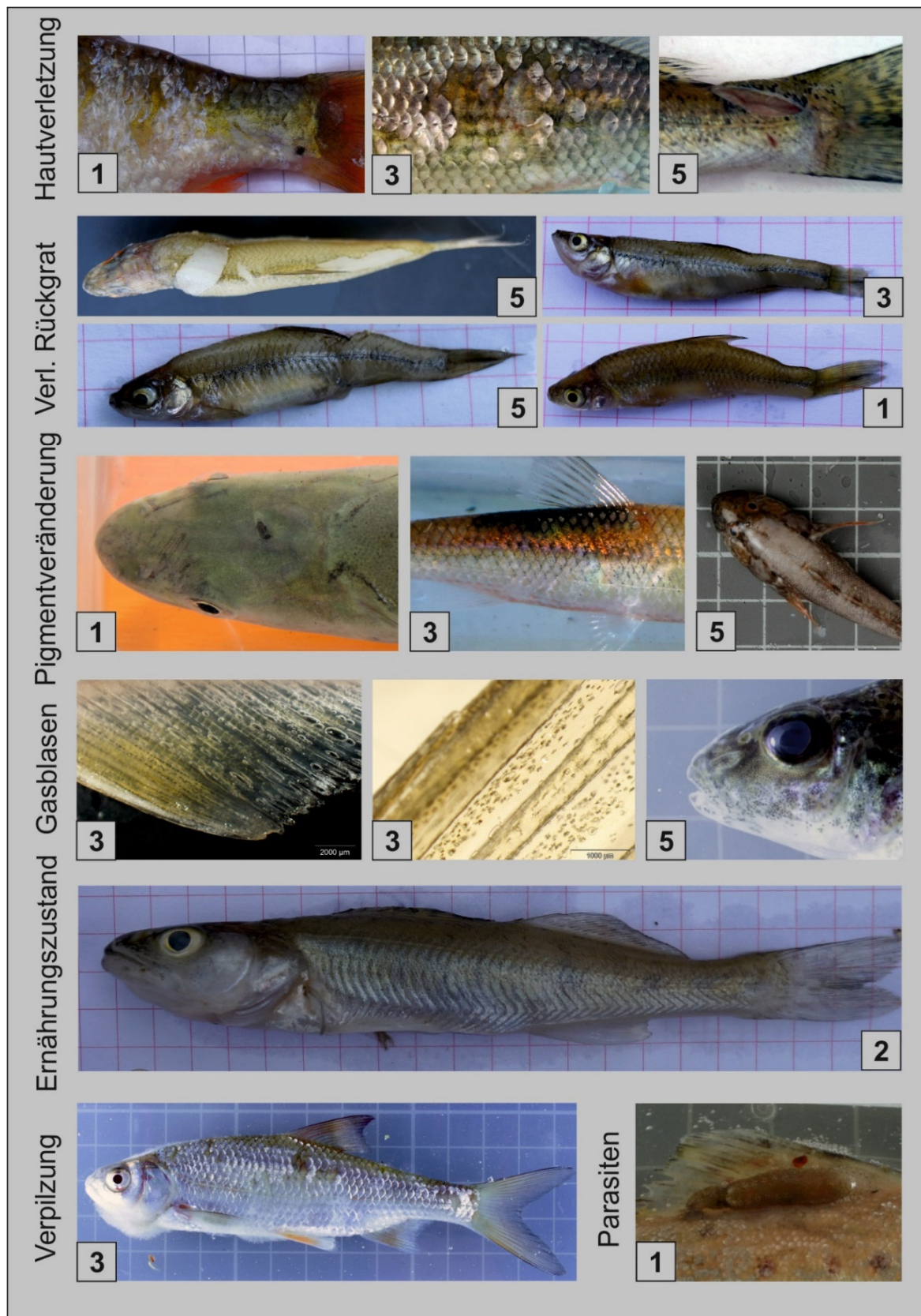


Abbildung 15 Beispielbilder zu den Verletzungstypen Hautverletzung, Verletzung Rückgrat, Pigmentveränderung und Gasblasen in verschiedenen Intensitätsstufen (0 = keine Verletzung, 1 = geringe Intensität, 3 = mittlere Intensität, 5 = hohe Intensität) sowie zu den allgemeinen Kriterien Ernährungszustand (4 = keine Belastung, 3 = geringe Belastung, 2 = mittlere Belastung), Verpilzung und Parasiten in verschiedenen Stufen (0 = keine Belastung, 1 = geringe Belastung, 2 = mittlere Belastung, 3 = starke Belastung, 4 = sehr starke Belastung).

Zur Dokumentation dieser Verletzungen wird der Körper des Fisches in Kopf, Augen, Kiemendeckel, vorderen und hinteren Bereich des Körpers (Trennlinie zwischen vorne und hinten am After), dorsal (Rückenseite), ventral (Bauchseite), Rückenflosse, Schwanzflosse, Afterflosse, Bauchflossen, Brustflossen sowie linke und rechte Körperhälfte eingeteilt (Abbildung 16).

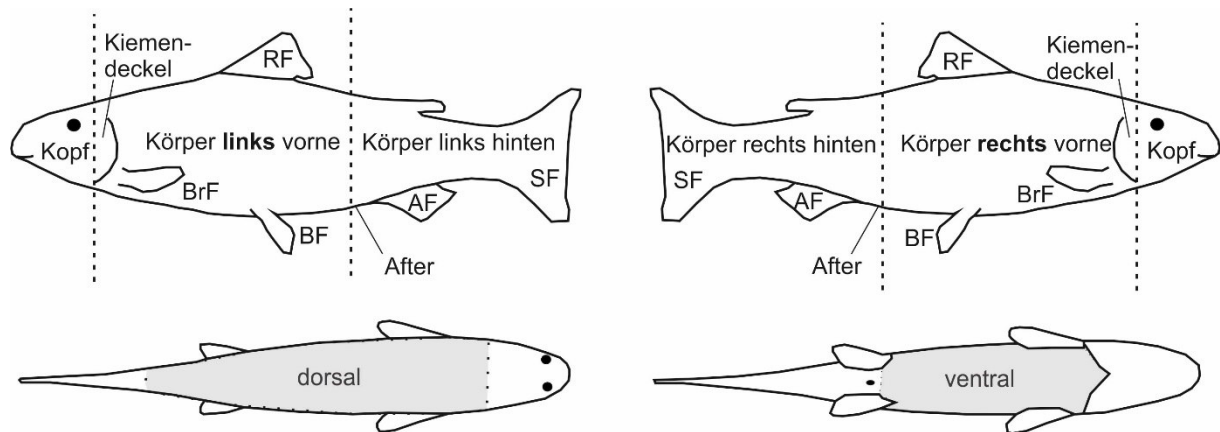


Abbildung 16 Einteilung des Fischkörpers in verschiedene Bereiche zur Dokumentation der auftretenden Verletzungen. RF= Rückenflosse, BrF= Brustflosse, BF= Bauchflosse, AF= Afterflosse, SF= Schwanzflosse.

Die möglichen Kombinationen aus Körperteilen und Verletzungen sind auf dem Protokollblatt in einer Tabelle zusammengefasst (Abbildung 17), in der die Intensität der jeweiligen Verletzungen an den einzelnen Körperteilen in vier Kategorien eingetragen werden kann: 0 = keine Verletzung, 1 = leichte Verletzungsintensität, 3 = mittlere Verletzungsintensität, 5 = hohe Verletzungsintensität. Für die Zuordnung der Intensität zur jeweiligen Ausprägung einer spezifischen Verletzung existiert als Anlage zum Protokoll eine detaillierte Erläuterung in Tabellenform (sogenanntes „Score Sheet“ im Tierversuch, Tabelle 10 im Anhang). Die grobe Abstufung zwischen 0, 1, 3 und 5 wurde gewählt, um deutliche numerische Unterschiede zwischen den verschiedenen Intensitäten zu erhalten und dadurch das „Rauschen“ in den Daten und Bearbeitereffekte zu minimieren. Zusätzlich zur Dokumentation der Einzelverletzungen enthält das Protokoll fünf allgemeine Kriterien, die den Gesundheitszustand des Fisches beschreiben (Vitalität, Atemfrequenz, Ernährungszustand, Pilzinfektionen und Parasitenbefall). Diese Kriterien erlauben Rückschlüsse auf die potenzielle Regenerationsfähigkeit eines Fisches. Vitalität, Atemfrequenz und Ernährungszustand entsprechen den in Tierversuchen anerkannten Abbruchkriterien. Da aus der Einstufung der Abbruchkriterien eine eindeutige Zuweisung der Belastungsstufen möglich sein muss, werden alle allgemeinen Kriterien (außer Ernährungszustand mit den Intensitätsstufen 4 = keine Belastung, 3 = geringe Belastung, 2 = mittlere Belastung) mit den folgenden Intensitätsstufen bewertet: 4 = keine Belastung, 3 = geringe Belastung, 2 = mittlere Belastung, 1 = starke

Belastung, Tier lebt in der Regel noch, 0 = starke Belastung, Tier ist in der Regel tot (Tabelle 11 im Anhang). Für die statistische Datenauswertung werden die beiden Kategorien 0 und 1 der Vitalität, die jeweils nicht überlebende Fische beinhalten, zusammengefasst und die Werte in das 0,1,3,5 Scoring-System transformiert. Dabei wird die Stufe 5 für den maximalen Vitalitätsverlust (tot oder nicht überlebensfähig) vergeben und die Stufe 0 für unbeeinträchtigte Vitalität (dementsprechend werden die Vitalitätsstufen 0 und 1 zu 5, 2 wird zu 3, 3 wird zu 1 und 4 wird zu 0). Wie sich die Ausprägung der einzelnen allgemeinen Kriterien den Intensitätsstufen zuordnen lässt, ist im „Score Sheet“ im Anhang näher erläutert. Noch lebende Individuen, die in einem der Abbruchkriterien die Einstufung 1 erhalten, müssen mit einer Überdosis eines zugelassenen Betäubungsmittels (MS 222, Adam et al. 2013) schmerzfrei getötet werden. Protokollblatt und zugehöriges Score-Sheet für die Bewertung der Verletzungen entsprechen den Standards für die Durchführung von Tierversuchen und wurden mit den Tierschutzbeauftragten der TUM und der Genehmigungsbehörde abgestimmt.

Protokoll „Fischschäden Einzelindividuen“ (für standardisierte Fischzugaben)

Standort: Isar Fangdatum: _____ Fanguhrzeit: _____ Leerungsintervall: ☐ 1h ☐ anderes: _____Last: ☐ hoch ☐ gering ☐ mittel Tag: ☐ 1 ☐ 2 Reuse: ☐ MT ☐ MR1 ☐ MR2 ☐ MFPTreatment: ☐ oberhalb Rechen ☐ Turbine ☐ Hamenschädigung ☐ VorschädigungFischart: ☐ Aal ☐ Äsche ☐ Bachforelle ☐ Barbe ☐ Barsch ☐ Huchen ☐ Nase ☐ Rotaugen Größe (cm): _____

Allgemeine Kriterien sofort:

Vitalität: ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1 ☐ 0Atemfrequenz: ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1 ☐ 0Ernährungszustand: ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2Verpilzung: ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4Parasiten (____): ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4

Allgemeine Kriterien Hälterungskontrolle:

☐ 24h ☐ 48h ☐ 72h ☐ 96h☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1 ☐ 0☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1 ☐ 0☐ 4 ☐ 3 ☐ 2☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 (____)

Bearbeiter Hälterungskontrolle: _____

Schadigungsbedingte Kriterien:

	Schuppen-verlust	Ampu-tation	Einriss	Einblu-tung	Que-tschung	Hautver-letzung/ Wunden	Verletzung Rückgrat	Pigment- Veränderung	Gas- blasen
Kopf	☒		☒				☒		☒
Auge rechts	☒		☒				☒	☒	
Auge links	☒		☒				☒	☒	
Kiemendeckel links	☒		☒				☒		☒
Kiemendeckel rechts	☒		☒				☒		☒
Körper links vorne			☒				☒		☒
Körper links hinten			☒				☒		☒
Körper rechts vorne			☒				☒		☒
Körper rechts hinten			☒				☒		☒
Körper dorsal	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
Körper ventral	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
Brustflosse (BrF) rechts	☒				☒	☒	☒		
Brustflosse (BrF) links	☒				☒	☒	☒		
Bauchflosse (BF) rechts	☒				☒	☒	☒		
Bauchflosse (BF) links	☒				☒	☒	☒		
Afterflosse (AF)	☒				☒	☒	☒		
Schwanzflosse (SF)	☒				☒	☒	☒		
Rückenflosse (RF)	☒				☒	☒	☒		

Eintragen von Verletzungen in den Stufen 0 = keine, 1 = leicht, 3 = mittel, 5 = stark.

sofort: ☐ Fisch eingefroren ☐ fotografiert ☐ gehältert ☐ freigelassenHälterungskontrolle: ☐ Fisch eingefroren ☐ fotografiert ☐ freigelassen

Rinne: _____ Box: _____

Auswerter: _____ Schreiber: _____

Fisch Nr: *hier Etikett kleben!*

Abbildung 17 Protokollblatt zur Dokumentation der äußeren Verletzungen der Fische. Erläuterungen zum Ausfüllen des Protokolls finden sich im Anhang.

Zusätzlich zu den Informationen über den Zustand des Fisches sind auf dem Protokollblatt der Untersuchungsstandort, das jeweilige Datum, das Leerungsintervall, die Versuchsgruppe und die Identifikationsnummer der Fangeinheit einzutragen (Abbildung 17). Die jeweilige Fischart wird mit ihrer Totallänge in cm ebenfalls registriert. Rechts unten auf dem Protokoll befindet sich ein Bereich, in dem jedem Fisch eine eindeutige Identifikationsnummer zugeordnet wird. Dies geschieht mittels fortlaufenden Dreifach-Nummernetiketten (proLogistik GmbH + Co KG, Dortmund, Deutschland). Von den jeweils drei identischen Nummern (Abbildung 18) wird die erste in dem dafür vorgesehenen Bereich auf dem Fischeschadigungsprotokoll aufgeklebt. Die zweite Nummer wird auf den Hälterungsstreifen (siehe Kapitel 6.4) aufgeklebt, der mit den Fischen zur Bestimmung der verzögerten Mortalität in die Hälterung verbracht wird. Die dritte Nummer ist für die Gefrierkonservierung zur Zuordnung der Fische bei späteren Untersuchungen der inneren Verletzungen vorgesehen.

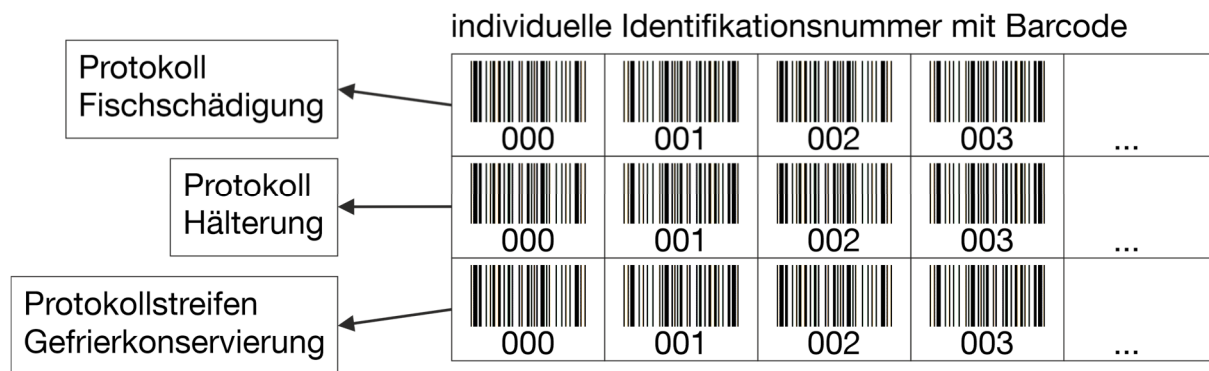


Abbildung 18 Nummerierungssystem für die individuelle Zuordnung der Daten zu den einzelnen Versuchsfischen.

In der Anwendung bei den Felduntersuchungen war das Protokoll unter den äußeren Bedingungen (verschiedene Witterungsverhältnisse, Möglichkeiten zum Einrichten von Arbeitsplätzen etc.) praktikabel. Bewährt haben sich ein Druck der Protokolle auf wasserfestem Papier und die Verwendung wasserfester Kugelschreiber, da bei der Auswertung der Fische sehr viel Spritzwasser das Ausfüllen der Protokollblätter ansonsten erschweren würde. Die detaillierte Erfassung der Fischeschädigungen ist jedoch wesentlich zeitaufwändiger als die Einschätzung von Mortalität oder Schädigungskategorien. Dies kann es erforderlich machen, dass bei erhöhtem Fischeaufkommen mehrere Auswertende parallel arbeiten müssen, um die noch lebenden Fische möglichst zügig auszuwerten und dadurch wenig zu belasten. Dies erfordert neben einem erhöhten personellen Aufwand einen intensiven Eichungs- und Abstimmungsprozess zwischen den einzelnen Auswertenden und Protokollführenden. Bei den großumfänglich durchgeführten Fischzugaben an den Projektstandorten sind daher bis zu vier Auswerteteams parallel im Einsatz.

6.3. Erfassen innerer Verletzungen

Wissenschaftliche Studien zur Schädigung von Fischen durch Wasserkraftturbinen haben bisher überwiegend die äußerlich erkennbaren Verletzungen eines Fisches betrachtet (Deng et al. 2005, Čada et al. 2006). Nur wenige Studien befassen sich mit den Druck- und Kavitationsauswirkungen auf den Fisch und den damit verbundenen inneren Verletzungen. Die bisherigen Ergebnisse beschränken sich zudem meist auf Laborexperimente (Abernethy et al. 2001, 2002, 2003; Brown et al. 2009, 2012 a und b; Becker et al. 2003, Brown et al. 2014, Richmond et al. 2014).

Die Anwesenheit und Verteilung ungelösten Gases im Körper des Fisches kann starke Effekte auf die inneren Verletzungsmuster bei der Turbinenpassage haben, da die Ausdehnung des Gases sich durch die Druckunterschiede verändert (Brown et al. 2012a). Die Schwimmblase ist daher das wichtigste Organ des Fisches im Zusammenhang mit Druckveränderungen (Roberts 2012). Es handelt sich dabei um ein hydrostatisches Organ, welches es den Fischen ermöglicht, die unterschiedlichen Druckverhältnisse, die in verschiedenen Tiefen vorherrschen, durch das Befüllen und Entleeren der Schwimmblase auszugleichen. Bei Physostomen (z.B. Cypriniden, Salmoniden) wird das Befüllen und Entleeren der Schwimmblase über den *Ductus pneumaticus*, einer Verbindung zwischen der Schwimmblase und dem Ösophagus, innerhalb von wenigen Sekunden reguliert. Weiterhin kann die Schwimmblase über spezielle Gasdrüsen und über das *Rete mirabile*, ein Netz aus speziell ausgerichteten Blutkapillaren, befüllt werden. Physoclisten (z.B. Barschartige) besitzen als Adulti keinen *Ductus pneumaticus* und dadurch keine Verbindung zum Ösophagus (Abtrennung erfolgt je nach Fischart nach 6–30 Tagen nach dem Schlupf, Summerfelt 2013, Pimakhin & Zák 2014). Bei Überdruck erfolgt eine Gasresorption im sogenannten ovalen Körper, einem Bereich an der hinteren, dorsalen Innenwand der Schwimmblase. Dieser Prozess kann mehrere Stunden dauern (Storch & Welsch 2009, Abernethy 2001, Brown et al. 2012a, Rieger 2014). Bei bodenlebenden Fischen wurde die Schwimmblase sekundär zurückgebildet, da sie kein hydrostatisches Organ benötigen. Es ist davon auszugehen, dass diese Unterschiede in der Schwimmblasenmorphologie und den damit in Zusammenhang stehenden physiologischen Prozessen zu Unterschieden in den inneren Verletzungen der verschiedenen Fischarten führen.

Durch die rasche Veränderung des Drucks bis zum Nadir-Punkt während der Turbinenpassage können Gasblasen im Blut und im Gewebe entstehen (Colotelo et al. 2012). Die Gasblasen führen zu einem erhöhten Blutvolumen, wodurch der Blutdruck in den Arterien und Venen steigt. Dadurch können lebenswichtige Funktionen von Organen und biologische Prozesse gestört werden. Zudem können Gasblasen kleine Blutgefäße verstopfen und

dadurch die Versorgung von Organen verhindern (Abernethy et al. 2001, Čada et al. 2006, Schilt 2007).

Die Untersuchung der inneren Verletzungen erfolgt in diesem Projekt mit Hilfe von Röntgendiagnostik (vgl. Mueller et al. 2020). Da unter Umständen nicht alle potenziellen inneren Verletzungen mittels Radiographie detektiert werden können (z.B. Verletzungen innerer Organe wie Niere oder Leber) bzw. zu Beginn des Projekts unklar war, welche Methodik am besten geeignet ist, wurden über die Röntgenanalysen hinaus an ausgewählten Stichproben zusätzlich Sektionen durchgeführt und beide Methoden systematisch miteinander verglichen. Auch die Auswirkungen der Konservierung durch Tiefkühlung wurden für beide Methoden untersucht. Im Allgemeinen konnten mit den beiden Methoden Kontaktradiographie und Sektionen dieselben Verletzungstypen festgestellt werden. Blutungen der inneren Organe und Parasiten konnten nur mittels Sektionen festgestellt werden. Auch die genaue Lage der Gasblasen konnte bei den Sektionen besser bestimmt werden, Verletzungen einzelner Wirbel oder Gräten konnten allerdings nur mit der Röntgenanalyse diagnostiziert werden. Die Konservierung durch Tiefkühlung scheint auf die Ergebnisse der Röntgenanalyse geringere Auswirkungen zu haben, da hauptsächlich die Gewebefestigkeit betroffen ist und das Gewebe der Fische in diesem Fall nicht geöffnet werden muss. Aufgrund des schnelleren Arbeitsablaufs und der besseren Möglichkeit zur Konservierung der Fische wird im weiteren Projektverlauf überwiegend mit den Röntgenanalysen gearbeitet (detaillierte Informationen zum Methodenvergleich siehe CD Anhang).

6.3.1. Röntgendiagnostik

Bei der Röntgendiagnostik handelt es sich um eine Radiographie mit Röntgenfilmen, bei der der Körper mit einem Röntgenstrahler durchstrahlt wird. Trifft die Röntgenstrahlung auf den Film, so wird dieser je nach Intensität der Strahlung unterschiedlich stark geschwärzt. Hierbei gilt, je mehr Strahlung auf den Film trifft, desto dunkler ist das Bild. Gewebe mit unterschiedlicher Dichte kann Röntgenstrahlung unterschiedlich stark absorbieren, sodass es zu sogenannten Verschattungen (Radioopazität) und Aufhellungen (Radioluzenz) auf dem Röntgenbild kommen kann. Aufhellungen sind Elemente von niedrigerer Dichte, wie z.B. die luftgefüllte Schwimmblase, und sind durch ihre dunkle Farbe auf den Röntgenbildern gekennzeichnet, da hier mehr Strahlung durchdringen und den Film stärker schwärzen kann. Verschattungen charakterisieren sich durch ihre helle Farbe, da durch eine höhere Dichte mehr Röntgenstrahlung absorbiert wird und so eine geringere Transparenz vorherrscht. Um eine möglichst hohe Filmempfindlichkeit zu erreichen, sind die meisten Röntgenfilme

doppelseitig beschichtet. Die Abfolge der Schichten des Röntgenfilms gliedert sich wie folgt: Schutzschicht – Emulsionsschicht – Haftschrift – Trägerschicht – Haftschrift – Emulsionsschicht – Schutzschicht. Die Emulsionsschicht enthält lichtempfindliche Silberbromidkristalle, die Haftschrift dient zur Verbindung der Emulsionsschicht mit der Trägerschicht, welche meist aus flexiblem Polyester oder Zelluloseacetat besteht. Die Schwärzung des Films erfolgt zu einem kleinen Teil durch die Röntgenstrahlung selbst, einen weitaus größeren Beitrag leistet aber die eng mit dem Film in Kontakt stehende, fluoreszierende Verstärkerfolie. Die Filmkassette schützt den Film während des Röntgenprozesses vor Lichteinfall. Durch die Röntgenstrahlen kommt es zu chemischen Veränderungen in der Emulsionsschicht des Filmes, was zur Entstehung des „latenten Bildes“ führt. Zum Sichtbarmachen dieses Bildes wird die darauffolgende Entwicklung genutzt (Menges 1999, Oberdalhoff et al. 1959).

Die Röntgenanalysen finden in Kooperation mit Herrn Prof. Dr. Milz und Frau Dr. Sternecker am Lehrstuhl II (Neuroanatomie) der Anatomischen Anstalt der Ludwig-Maximilians-Universität München statt. Die Kontaktradiografie wird mit dem HP Cabinet X-Ray System (FAXITRON BIOPTICS, LLC, Tucson, Arizona, USA), DIN A5 Agfa Structurix Filmen (D4 DW ETE / D7 DW 18x24, Agfa-Gevaert N.V., Mortsel, Belgien) und DIN A4 Agfa Structurix Filmen (D4 DW ETE 24x30, Agfa-Gevaert N.V., Mortsel, Belgien) durchgeführt. Die Entwicklung der Bilder erfolgt mithilfe des Entwicklungsautomaten „typon“ SX-2 (Typon Röntgen-Film GmbH, Frankenthal, Deutschland). Die Proben werden auf der Hülle des geschlossenen Films platziert und im Röntgengerät mit verschiedenen Einstellungen (20 Sekunden mit 40 kV, 40 Sekunden mit 40 kV, 60 Sekunden mit 60 kV), je nach Fischgröße, bestrahlt. Durch die eingestellte Röhrenspannung lässt sich die Durchdringungsfähigkeit regeln und an die Beschaffenheit der Probe anpassen (Fischgröße und Lage). Die Stromstärke der Röntgenröhre beträgt konstant 2,0 mA. Anschließend werden die Filme im Dunkeln geöffnet und in den Durchlauf des Entwicklungsautomaten eingelegt, um eine Belichtung des Filmes zu vermeiden. Das Entwicklerbad setzt sich aus 10 L Leitungswasser (15–40°C), 5 L Structurix developer G135 A, 0,5 L Structurix G135 B und 0,5 L Structurix G135 C zusammen. Dieses Gemisch wird nochmals mit 4 L Leitungswasser verdünnt. Das Fixierbad (Replenisher G335) besteht aus 10 L Leitungswasser (15–40°C), 5 L Structurix G 335 A und 1,25 L Structurix G 335 B, welches mit 3,75 L Leitungswasser (15–40°C) vermischt wird. Die entwickelten Bilder werden anschließend mit einer Auflösung von 300 dpi gescannt und in Photoshop bearbeitet. Vergrößerte Aufnahmen werden mit einem Binokular mit Kamera angefertigt (Olympus SZX 10 mit Olympus DP72 Kamerasystem, Olympus Deutschland GmbH, Hamburg, Deutschland). Um einen Rückschluss ziehen zu können, welche der aufgetretenen Verletzungen auf die unterschiedlichen Versuchsgruppen Turbine und Turbine & Rechen sowie Hamen (= Kontrolle)

und Vorschädigung (= Kontrolle) und Lastzustände (niedrig und hoch) zurückzuführen sind, werden neben den „sofort“ und „nach der Hälterungskontrolle“ toten Fischen auch vollkommen vitale Referenzfische (Vitalität 4) „sofort“ und „nach der Hälterungskontrolle“ geröntgt. Je nach Verfügbarkeit werden 5 bis 10 lebende Fische (Vitalität 4) als Referenz pro Art, pro Versuchsgruppe und pro Lastzustand geröntgt.

Die Röntgenbilder werden mithilfe einer Leuchtplatte, einer Lupe und einem Binokular ausgewertet. Einige ausgewählte Individuen werden nach dem Röntgen seziert, um bestimmte Details auf den Röntgenbildern anatomischen Gegebenheiten zuordnen zu können und die Interpretation der Bilder so zu überprüfen (Abbildung 23).

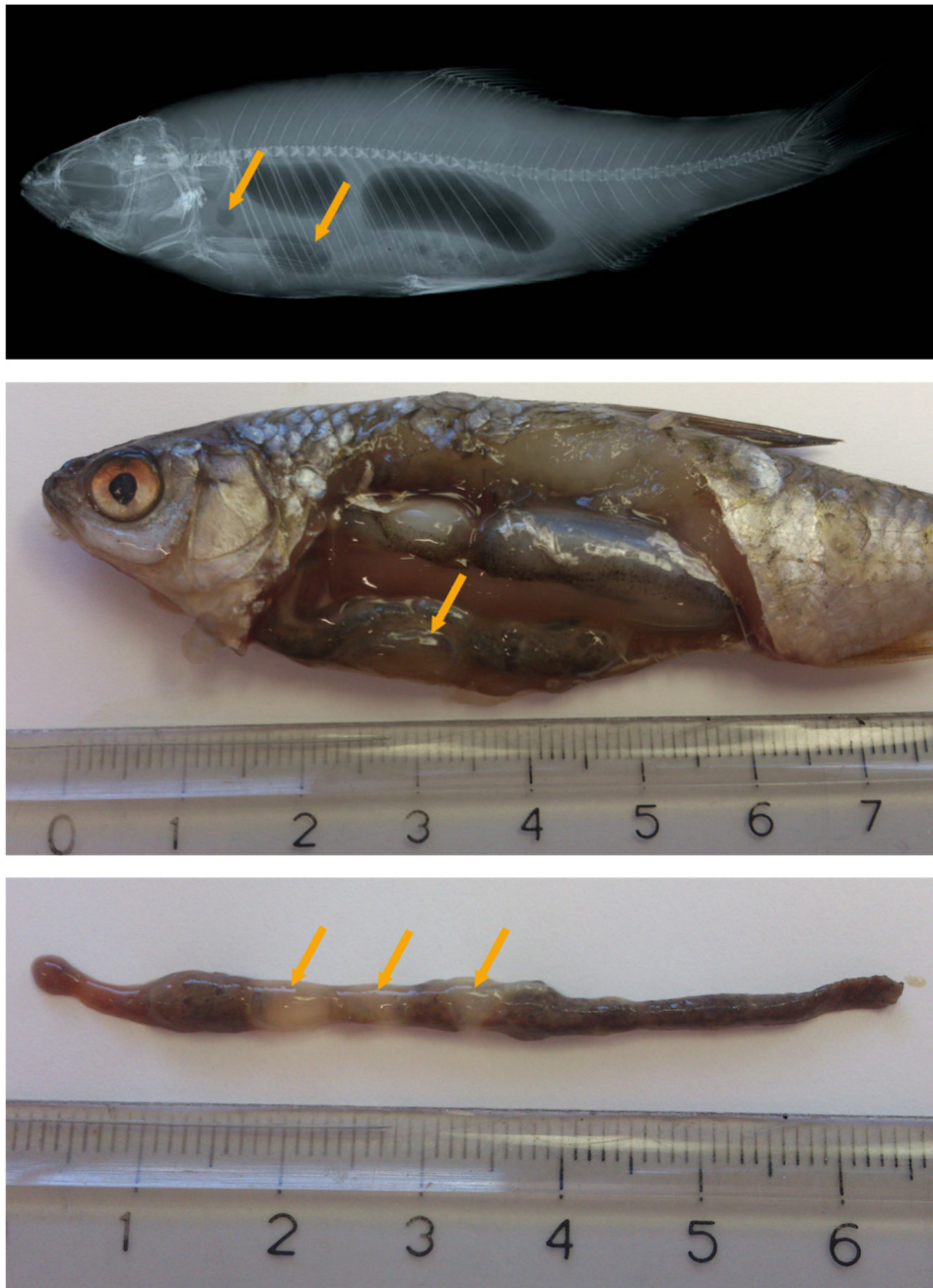


Abbildung 19 oben: Gasblasen im Darm eines Rotauges auf dem Röntgenbild, mitte: Darm des präparierten Rotauges ist zu erkennen, unten: Gasblasen im herauspräparierten Darm.

6.3.2. Standardisiertes Protokoll zur Erhebung innerer Verletzungen

Mithilfe der folgenden anatomischen Eigenschaften eines Knochenfisches wurden die in Abbildung 20 dargestellten Skelettelemente und inneren Weichgewebestrukturen ausgewählt, die auf den Röntgenbildern untersucht werden. Anhand dieser Merkmale wurde die Gliederung des Protokollblattes entwickelt (Abbildung 21). Das Skelett besteht aus Knochen und wird in Kopf- und Rumpfskelett sowie in das Gliedmaßenskelett unterteilt. Das Kopfskelett setzt sich aus einer Vielzahl von Knochen zusammen, die den Schädel bilden (Gregory 1933, Schreckenbach 2012).

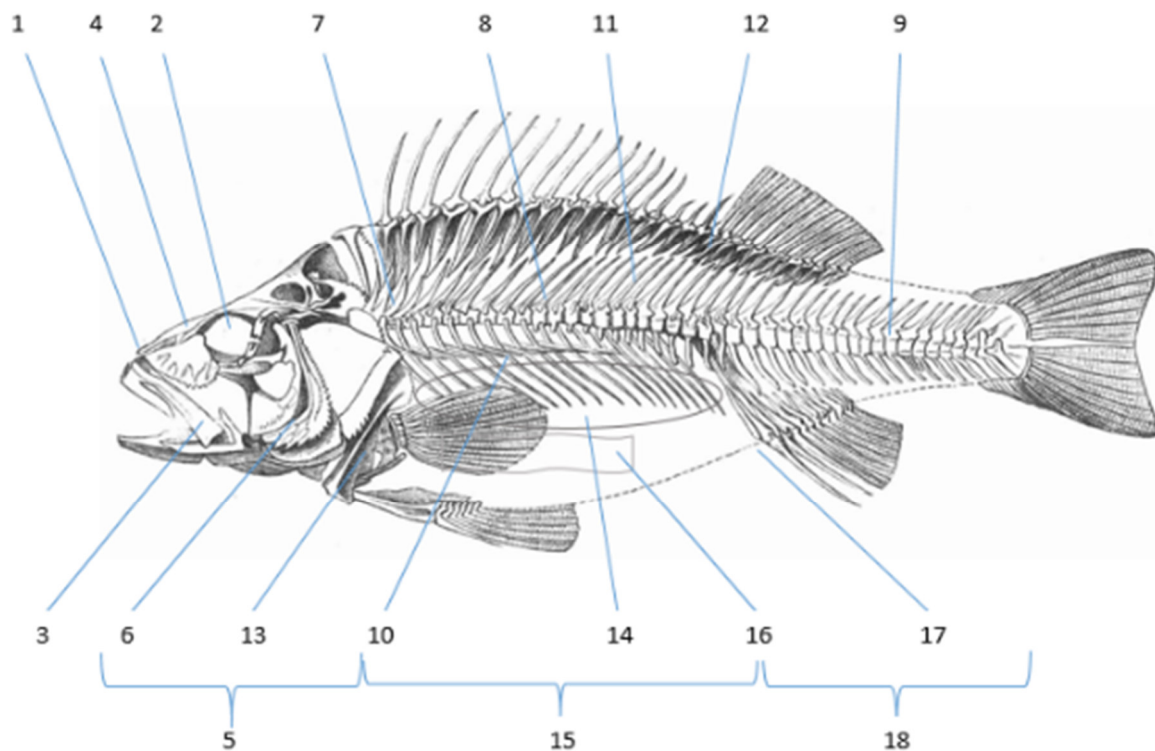


Abbildung 20 Anatomie eines Flussbarsches, 1 = Ethmoid, 2 = Augenhöhle, 3 = Maul, 4 = Os frontale, 5 = Bindegewebe Kopf, 6 = Kiemendeckel, 7 = Halswirbelsäule, 8 = Rumpfwirbelsäule, 9 = Schwanzwirbelsäule, 10 = Rippen, 11 = Dornfortsatz, 12 = Pterygiophoren, 13 = Ansatz Brustflosse, 14 = Schwimmlase, 15 = Leibeshöhle, 16 = Darm, 17 = After, 18 = Schwanzbereich, Abbildungsquelle: WPIRSN, Süßwasserfische in Deutschland.

Die Wirbelsäule (unterteilt in Hals-, Rumpf- und Schwanzwirbel), die Rippen und die Dornfortsätze bilden das Rumpfskelett. Auf die Halswirbelsäule folgt die Rumpfwirbelsäule, die durch das Vorhandensein von Rippen charakterisiert wird. Die sanduhrförmigen Rumpfwirbel besitzen zwei obere, geschlossene Bögen (Neuralbögen), die das Rückenmark umschließen und von denen ein dorsal gerichteter Fortsatz, der sogenannte Dornfortsatz, abgeht. Die Rippen (Pleuralbögen) befinden sich im Bereich der Leibeshöhle an der Unterseite der Wirbelkörper. Das Gliedmaßenskelett besteht aus den knöchernen Flossenstrahlen und deren Sockeln, den Flossenstrahlträgern (Pterygiophoren), an denen die Flossenstrahlen

gelenkig ansetzen. Fische besitzen zum einen paarige Brust- und Bauchflossen sowie eine unpaare Rücken-, After- und Schwanzflosse. Die Flossenstrahlenträger der Brustflossen sind beidseitig über einen Schultergürtel mit dem Schädel verbunden, die Flossenstrahlträger der Rückenflosse sind zwischen den oberen Dornfortsätzen und die der Afterflosse zwischen den unteren Dornfortsätzen der Wirbelsäule in der Muskulatur verankert. An den verbreiteten Dornfortsätzen der letzten Schwanzwirbel sind die Flossenstrahlenträger der Schwanzflosse lokalisiert. Die Leibeshöhle ist mit einer dünnen, silbrigen Haut, dem Peritoneum, ausgekleidet und wird von den Rippen und der Muskulatur der Körperwand umschlossen. In der Leibeshöhle finden sich die Organe des Fisches. Auf den Röntgenaufnahmen können allerdings nur die Schwimmblase als dunkle Elemente und der gefüllte Darm mit hellen Details erkannt werden (Schreckenbach 2012, Storch & Welsch 2009).

Protokoll Innere Schädigungen (für standardisierte Fischzugaben)

Beprobungsort: _____ **Röntgendatum:** _____ **Einstellung:** ____ kV ____ Sek.

Fischart: ☐ Bachforelle ☐ Nase ☐ Äsche ☐ Huchen ☐ Aal ☐ Barbe ☐ Barsch ☐ Rotauge

Fischnummer: _____

☐ Eis ☐ geschnitten

	Fraktur	Verformung/ S-Kurve	Stauchung	Füllung Schwimmbase	Gas- blase	Flüssigkeits- ansammlung	Röntgendichtes Material
Kopf Skelett							
Kopf Bindegewebe							
Auge							
Halswirbelsäule							
Dornfortsatz Halswirbelsäule							
Rumpfwirbelsäule							
Dornfortsatz Rumpfwirbelsäule							
Rippen							
Flossenstrahl-träger							
Rumpf Leibeshöhle							
Rumpf Bindegewebe							
Schwimmbase							
Schwanzwirbelsäule							
Dornfortsatz Schwanzwirbelsäule							
Schwanzbereich Bindegewebe							

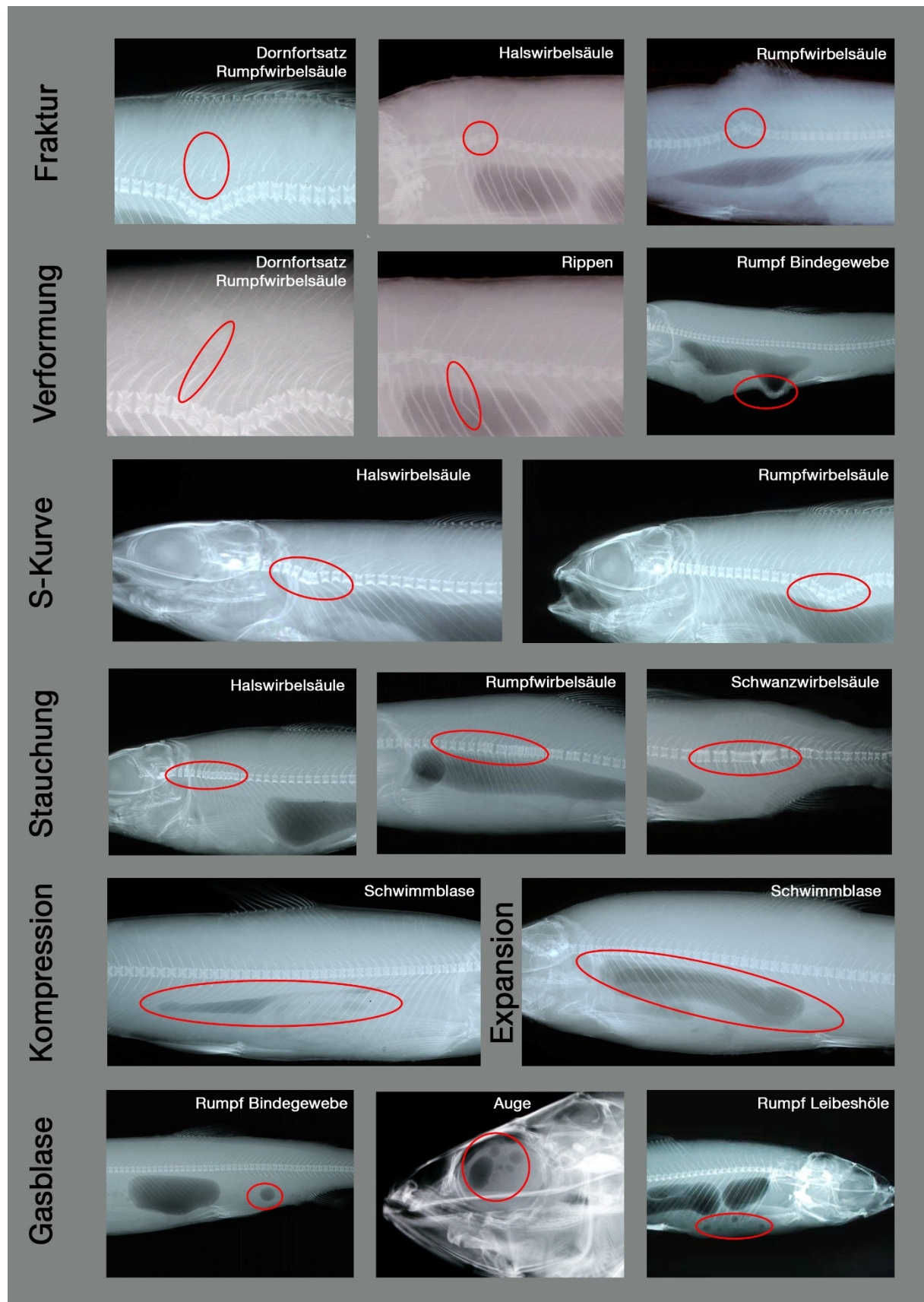
Auswerter: _____ **Datum:** _____

Abbildung 21 Protokollblatt zur Dokumentation der inneren Verletzungen der Fische. kV = Einstellung der Stärke der Röntgenstrahlung in Kilovolt, Sek = Dauer der Exposition des Röntgenfilms; Eis = Vorhandensein von Eisresten vom Auftauen auf dem Röntgenbild, z.B. am Rand des Fischkörpers; geschnitten = Bild eines halben Fisches bei größeren Individuen, die vor dem Röntgen mit einem Diamantmesser in zwei Hälften geteilt werden müssen.

Anhand der Röntgenbilder konnten Diskontinuitäten der Wirbelsäule, Rippen und Dornfortsätze, Flüssigkeitseinlagerungen und Bindegewebsverformungen, Kompressionen und Expansionen der Schwimmblase sowie Gasansammlungen untersucht werden. Darüber hinaus sind auf den Röntgenbildern immer wieder strahlungsundurchlässige Einlagerungen zu erkennen (z.B. mit der Nahrung aufgenommene Steine im Magen-Darm-Trakt). Diese Einlagerungen sind zwar keine Verletzung im eigentlichen Sinne, da allerdings bislang unklar ist, ob diese bei der Turbinenpassage ggf. Verletzungen verursachen können oder es sich beispielsweise um Knochenabsplitterungen handeln kann, wird dieses röntgendichte Material im Protokoll ebenfalls mit aufgenommen. Für die Zuordnung der Intensität zur jeweiligen Ausprägung einer spezifischen Verletzung existiert als Anlage zum Protokoll eine detaillierte Erläuterung in Tabellenform (sogenanntes „Score Sheet“, Tabelle 12 im Anhang). Die in das Protokoll aufgenommenen Veränderungen der inneren Anatomie werden im Folgenden genauer beschrieben und dazugehörige Beispiele in Abbildung 22 gezeigt.

- | | |
|---------------|--|
| Frakturen: | Frakturen charakterisieren sich durch eine Unterbrechung der Kontinuität der Skelettelemente (z.B. im Bereich der Halswirbelsäule, an den Rippen, Dornfortsätzen und den Pterygiophoren) und meist durch deren Symmetrieverlust. |
| Verformungen: | Die knöchernen Elemente weisen eine unnatürliche Richtungsänderung und Verbiegung auf, z.B. tritt das Weichgewebe der Leibeshöhle entweder nach außen oder nach innen, was immer durch eine Verlagerung von dunklem Material auf den Röntgenbildern deutlich wird. |
| S-Kurve: | Eine zusätzliche S-Kurve ist eine Verformung, die nur im Bereich der Hals-, Rumpf- und Schwanzwirbelsäule auftritt. Hierbei handelt es sich um Verschiebungen der Wirbelkörper, sodass die Wirbelsäule keinen geraden Verlauf mehr aufweist, sondern eine S-Form. Natürlicherweise ist dieses Phänomen auch bei einigen Fischen ohne Turbinenpassage anzutreffen, allerdings ist der Verlauf der Wirbelsäule hier weicher und die Verformung tritt nicht so abrupt auf, wie bei Fischen mit Turbinenpassage. |

Stauchungen:	Sie treten nur im Bereich der Hals-, Rumpf- und Schwanzwirbelsäule auf. Hierbei werden die Wirbelkörper so eng aneinandergedrückt, dass es auch zu einer Verformung der Rippen und Dornfortsätze kommt.
Kompression und Expansion:	Die Schwimmblase weist entweder eine Kompression oder Expansion auf. Diese Veränderungen werden durch die Verkleinerung oder Vergrößerung des dunklen Bereichs deutlich, der die Schwimmblase darstellt.
Gasblasen:	Sie kommen in allen Weichgewebereichen des Fischkörpers sowie unterhalb der knöchernen Strukturen des Ethmoids, der Augenhöhle, des <i>Os frontale</i> und des Kiemendeckels, am Ansatz der Dornfortsätze der Schwanzwirbelsäule und dem Ansatz der Brustflossen sowie im Maul vor. Sie charakterisieren sich durch eine kreisrunde Gestalt und durch eine dunkle Färbung, da sie eine geringere Dichte als das umgebende Gewebe aufweisen.
Flüssigkeitsansammlungen:	Sie kommen in denselben Bereichen wie Gasblasen vor, ausgenommen dem Darm, der Schwanzwirbelsäule und dem Brustflossenansatz. Da die Flüssigkeitsansammlungen auch eine andere Dichte als das sie umgebende Gewebe besitzen, werden sie auf den Röntgenbildern durch dunkle Stellen deutlich, die aber im Gegensatz zu den Gasblasen keine kreisrunde Form aufweisen.
Röntgendichtes Material:	Es besitzt auf den Filmen eine sehr helle Farbe, da es sich um strahlungsundurchlässige Stoffe handelt (z.B. mit der Nahrung aufgenommene Steine). Diese kommen im Bereich des <i>Os frontale</i> und des Kiemendeckels, in der Leibeshöhle, dem Darm, After und Schwanzbereich vor.



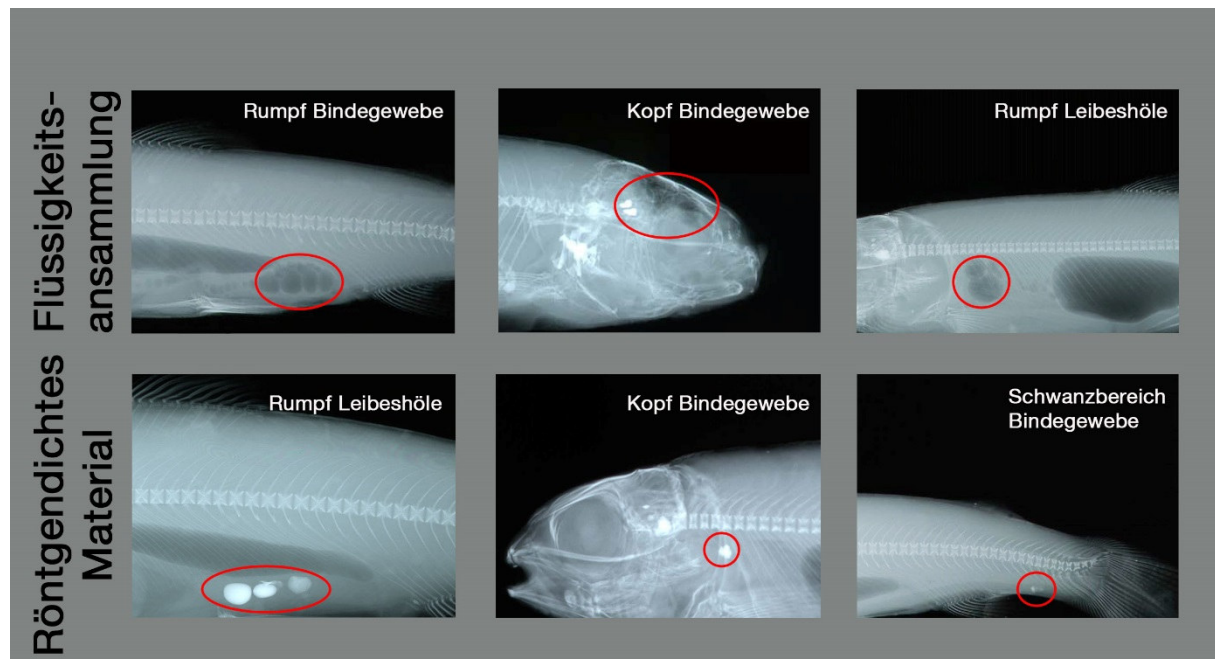


Abbildung 22 Beispiele zu den Verletzungskategorien der möglichen inneren Verletzungen von Fischen nach der Turbinenpassage.

6.4. Erfassen verzögerter Mortalität

Zur Überprüfung der verzögerten Mortalität erfolgt eine Hälterung der Fische getrennt nach Arten und Versuchsgruppen. Die noch lebenden Fische werden dazu in die Hälterungseinsätze des bereits vorbereiteten Hälterungssystems verbracht. Das Hälterungssystem besteht aus Langstromrinnen (GFK, Maße innen: 300 x 70 x 70 cm, Maße außen: 310 x 80 x 90 cm; Aquacultur Fischtechnik GmbH, Nienburg, Deutschland), die ähnlich wie in Abbildung 23 angeordnet werden und mit den unten beschriebenen Hälterungseinsätzen bestückt werden. Die Anzahl der verwendeten Rinnen richtet sich nach der am jeweiligen Standort benötigten, sich aus den einzelnen Versuchsgruppen ergebenden Tierzahlen (15–21 Rinnen). Die Wasserversorgung erfolgt über eine auf Dauerlast ausgelegte Tauchmotorpumpe (Easy-Mix-U20: 1,5 kW, 36,0 m³/h bei 6 m Förderhöhe; Aquacultur Fischtechnik GmbH, Nienburg, Deutschland) direkt aus dem Untersuchungsgewässer. Von der Pumpe wird das Wasser über Druckschläuche mit C-Kupplung in KG-Rohre gepumpt, welche die einzelnen Rinnen versorgen. Um das Ansaugen von größeren aquatischen Lebewesen ausschließen zu können, wurde ein Pumpenkorb mit einer 5 mm Lochung verwendet. Da Fische auf permanenten Lichteinfall mit Stress reagieren, werden die Rinnen mit Abdeckungen (Holzrahmen mit Beschattungsgewebe bespannt) bedeckt. Als Kompartimente wurden bewegliche Einsätze gewählt, die zur Kontrolle zusammen mit allen

Fischen vollständig aus der Langstromrinne herausgehoben werden können. Die Einsätze bestehen aus einer verschließbaren Plastikbox (Allibert Logic Box, 60 x 40 x 44 cm, 70 L, Allibert Home, Villepinte, France). Für einen gleichmäßigen Wasseraustausch sorgen Fenster aus Lochblech (Lochung Rundloch 1,5 mm bzw. Langloch 5 x 20 mm, Jaera GmbH & Co. KG, Laatzen, Deutschland) im Deckel und an den breiten Seiten. Nach Adam et al. (2013) können in einer der verwendeten Langstromrinnen (nutzbares Volumen 1.300 L) ca. 750 Fische einer Größe von bis zu 15 cm gehalten werden. Bei einer angenommenen Wiederfangrate von 77% werden von 103 eingesetzten Fischen pro Durchgang und Art jeweils ca. 80 Fische wieder gefangen, von denen bei einer angenommenen unmittelbaren Mortalität beispielsweise durch die VLH-Turbine von 3% (Lagarrigue et al. 2008) und durch den Hamen von 2,73% (Schneider et al. 2012) ca. 77 Individuen weiter gehältert werden müssen. Für einen Großteil der verwendeten Fische reicht daher ein Hälterungseinsatz pro Fischart und Versuchsgruppe aus. Für größere Fische wird die Besatzdichte in den Hälterungseinheiten jeweils angepasst bzw. Fische > 30 cm werden ohne Hälterungseinsätze in eigens dafür vorgesehene Rinnen verbracht und zur Kontrolle mit knotenlosen Keschern entnommen. Während der Hälterung erfolgt keine zusätzliche Fütterung, um Wasserverschmutzungen durch vermehrte Ausscheidungsprodukte (insbesondere Ammoniak) zu vermeiden. Eine Grundversorgung mit Nahrung ist durch den Eintrag von Kleinstlebewesen (Plankton, Meiofauna, teilweise Makrozoobenthos) über die ständige Frischwasserzufuhr aus dem Untersuchungsgewässer gewährleistet. Die Hälterung der Fische aus der Beprobung des natürlichen Fischbestands erfolgt aus Kapazitätsgründen über 72 h, die der Fische aus den standardisierten Fischzugaben über 96 h. Nach jeder Untersuchungsperiode und vor dem Einsatz an einem neuen Standort wird das gesamte Hälterungssystem jeweils vollständig desinfiziert (Virkon S, Antec International Ltd – a DuPont Company, Suffolk, CO10 2XD, Großbritannien).

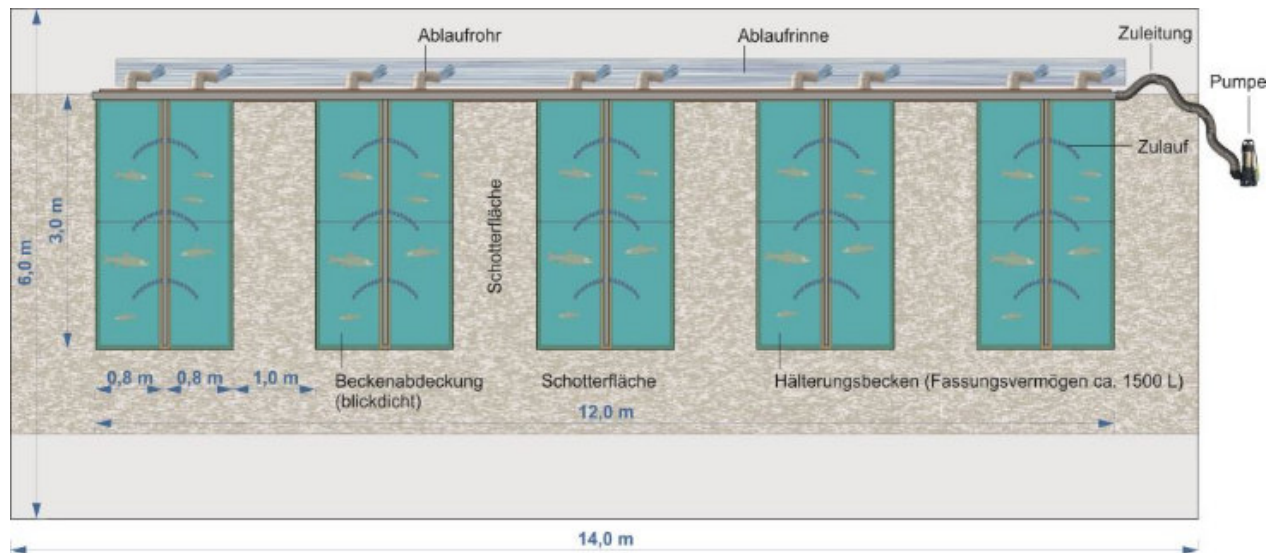


Abbildung 23 Schematische Darstellung eines Hälterungssystems am Beispiel von zehn Langstromrinnen. Die Wasserversorgung erfolgt über eine Pumpe aus dem Untersuchungsgewässer, die Ablaufrinne führt das Wasser nach Durchfluss der Langstromrinnen wieder zurück ins Gewässer.

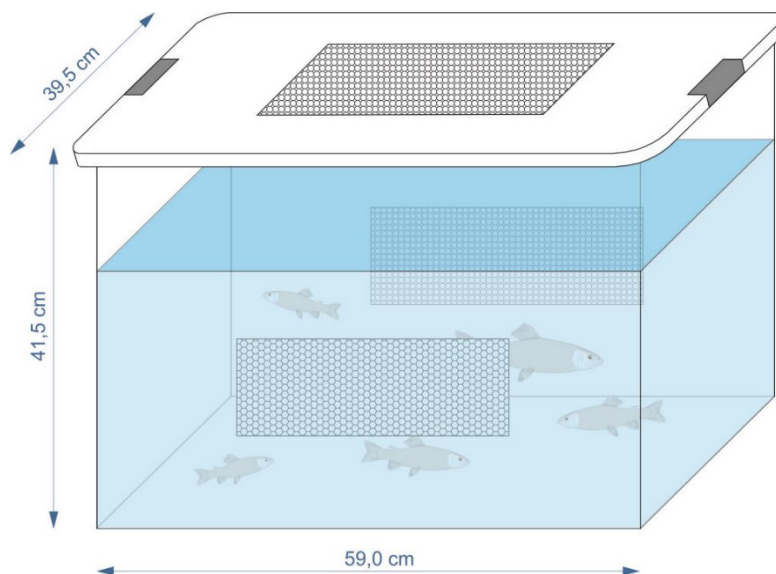


Abbildung 24 Schematische Darstellung eines Hälterungseinsatzes zur Bildung von Kompartimenten für die separierte Haltung der Fische einzelner Versuchsdurchgänge.

Nach der Bewertung der äußeren Verletzungen werden die überlebenden Fische einer Art und Versuchsgruppe zusammen mit einem sogenannten „Hälterungsstreifen“ in einen Hälterungseinsatz verbracht (Abbildung 24). Auf dem Hälterungsstreifen (Abbildung 25) wird während der Auswertung der äußeren Verletzungen für jeden Fisch ein Etikett mit individuellem Barcode aufgeklebt und der Ort der Hälterung (Standort, Rinne, Nummer des Hälterungseinsatzes), Versuchsgruppe (Lastzustand, Korridor, Reuse), Fangdatum, Fanguhrzeit und Fischart vermerkt. Auf dem Deckel jedes Hälterungseinsatzes wird ein sogenannter

„Pin“ befestigt, von dem die Nummer des Einsatzes und der Rinne abgelesen werden kann. Weiterhin wird auf dem Pin vermerkt, wie viele Fische welcher Art und aus welchen Versuchsgruppen sich in dem Hälterungseinsatz befinden (Abbildung 26).

Fischzugabe Standort: Heck. Rinne: <u>17</u> Box: <u>13766</u> Fangdatum: <u>23.9.16</u> Fanguhrzeit: <u>11:45</u> ☐ Fische tot ☒ Fische gehältert ☐ Fische freigelassen Last: ☐ hoch ☒ gering ☐ mittel Tag: ☐ 1 ☒ 2 Treatment: ☐ Oberh. Rechen ☒ Turbine ☐ Hamenschäd. ☐ Vorschädigung Reuse: ☒ RHT ☐ RHFP ☐ RHAS Art: ☐ Aal ☐ Barbe ☐ Barsch ☒ Rotaugen Fischnummern: von <u>28778</u> bis <u>28808</u>	 28.778	 28.779	 28.780
	 28.781	 28.782	 28.783
	 28.784	 28.785	 28.786
	 28.787	 28.788	 28.789

Abbildung 25 Hälterungsstreifen zur individuellen Zuordnung der Fische in der Hälterung.

Fischzugabe Standort: <u>Isar</u> Box: <u> </u> Rinne: <u> </u> Last: ☐ hoch ☐ gering ☐ mittel Tag: ☐ 1 ☐ 2 Treatment: ☐ Oberh. Rechen ☐ Turbine ☐ Hamenschäd. ☐ Vorschädigung Reuse: ☐ MT ☐ MR1 ☐ MR2 ☐ MFP Fangdatum: <u> </u> Fanguhrzeit: <u> </u> Anzahl: <u> </u> Art: ☐ Aal ☐ Äsche ☐ Bachforelle ☐ Barbe ☐ Barsch ☐ Huchen ☐ Nase ☐ Rotaugen Fischnummern: von <u> </u> bis <u> </u> Kontrolle ☐ 24h ☐ 48h ☐ 72h ☐ 96h (je abhaken)

Abbildung 26 Pin zur Kennzeichnung der Hälterungseinsätze.

In den Langstromrinnen und in den Hälterungseinsätzen erfolgt eine tägliche Kontrolle von Sauerstoffkonzentration, Temperatur, pH-Wert und Leitfähigkeit. Eine Kontrolle der Fische erfolgt täglich zur selben Uhrzeit. Dazu werden die Hälterungseinsätze nacheinander auf tote Fische überprüft. Tote Fische werden entnommen, anhand ihrer Größe, Verletzungsmuster und dem Hälterungsstreifen eindeutig identifiziert und der Todeszeitpunkt wird in der grauen Box rechts oben auf dem Fischschädigungsprotokoll (Abbildung 17, Abbildung 25) vermerkt. Anschließend werden tote Fische in Zip-Lock Tüten zusammen mit einem Barcode-Etikett bei -20°C für die anschließenden Röntgenanalysen eingefroren. Nach Ablauf der 96 h wird von den überlebenden Fischen eine Stichprobe von fünf bis zehn Fischen pro Versuchsgruppe mit einer Überdosis MS 222 getötet und anschließend ebenfalls für weiterführende Untersuchungen eingefroren. Für die restlichen überlebenden Fische wird jeweils die Vitalität nach 96 h in die graue Box rechts oben auf dem Fischschädigungsprotokoll eingetragen. Anschließend werden die überlebenden Fische nach Rücksprache mit den Fischereiberechtigten und ggf. der zuständigen Fischereifachberatung in der Regel im Untersuchungsgewässer freigelassen.

6.5. Datenverwaltung Fischschädigung

Die im Feld handschriftlich aufgezeichneten Daten zur Fischschädigung werden in eigens für das Projekt entwickelte Microsoft® Access Datenbanken eingepflegt. Die Dateneingabe beginnt mit einem Login-Formular, welches gewährleistet, dass die Dateneingabe später mit Benutzer und Datum nachvollzogen werden kann (Abbildung 27). Der Aufbau des Dateneingabeformulars ist dem der Protokollblätter angelehnt, um den Ablauf der Dateneingabe zu erleichtern (Abbildung 28). Jedes Dateneingabefeld verfügt über eine „Dropdown“-Liste mit vorgegebenen Auswahlfeldern, um Falscheingaben durch Tippfehler zu minimieren. Jeder Fisch wird mit seinem spezifischen Verletzungsmuster und ergänzenden Angaben wie Totallänge, Fischnummer etc. als einzelner Datensatz gespeichert, welcher in der Rohdatentabelle hinterlegt ist. Mehrere Einzeldatensätze werden mit einem Entnahmedatensatz verknüpft, der Angaben zu Ort und Zeit der Versuchsdurchführung, zur Versuchsgruppe und zur Hälterung der Versuchsfische enthält. Über automatisierte Datenbankabfragen werden Kreuztabellen generiert, in deren Zeilen alle Einzelfische und in deren Spalten alle möglichen Verletzungskategorien aufgelistet sind (Abbildung 29). In den Wertfeldern finden sich die individuellen Intensitätsstufen der einzelnen Verletzungen. Diese Tabellen werden automatisch nach Microsoft® Excel exportiert und können dort für weitere univariate und multivariate Analysen aufbereitet werden.

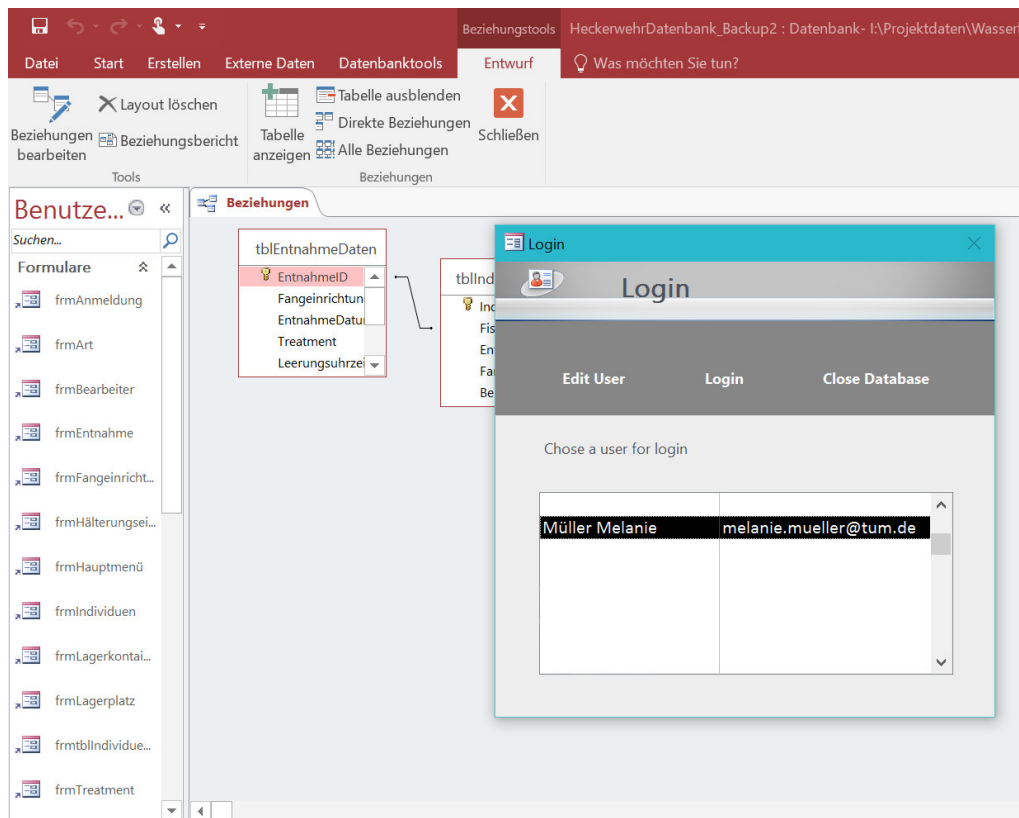


Abbildung 27 Login-Formular beim Start der Datenbank zur Dokumentation von Bearbeiter und Eingabedatum.

Main Data

DateDay: 14-Jan-17
User: Müller Melanie

Data Export | Tabelle sichten | Suche Barcode: | Back to Main | Save

Fangeinrichtung: RHT | Fang: Datum: 23.04.2016 | Leerungsintervall: 2h | Hälterungseinheit: 13743
 Treatment: OR niedrig | Leerungsuhrzeit: 05:00 | Versuchsdurchgang: 1 | Rinne: 19
 EntnahmeID: 8

Fisch Barcode | Taxon: | Länge in cm: | Notiz (Parasiten, sonstige Auffälligkeiten etc.):

ID: (Neu) | sofort | Vitalität: 4 | Atemfrequenz: 4 | Ernährungszustand: 4 | Verpilzung: 0 | Parasiten: 0 | Auswerter: |
 Kontrollzeit: | nach x h Vitalität: 4 | Atemfrequenz: 4 | Ernährungszustand: 4 | Verpilzung: 0 | Parasiten: 0 | Bearbeiter Hälterung: |

	Schuppenverlust	Amputation	Einriss	Einblutung	Quetschung	Hautverletzung/Wunden	Verletzung Rückgrat	Pigmentveränderu	Gasblasen
Kopf	0			0	0	0		0	
Auge rechts	0			0	0				0
Auge links	0			0	0				0
Kiemendeckel links	0			0	0	0		0	
Kiemendeckel rechts	0			0	0	0		0	
Körper links vorne	0	0		0	0	0		0	
Körper links hinten	0	0		0	0	0		0	
Körper rechts vorne	0	0		0	0	0		0	
Körper rechts hinten	0	0		0	0	0		0	
Körper dorsal							0		
Körper ventral				0		0		0	
Brustflosse rechts	0	0		0				0	0
Brustflosse links	0	0		0				0	0
Bauchflosse rechts	0	0		0				0	0
Bauchflosse links	0	0		0				0	0
Afterflosse	0	0		0				0	0
Schwanzflosse	0	0		0				0	0
Rückenflosse	0	0		0				0	0

Fisch eingefroren: | Fisch fotografiert: | Fisch gehalten: | Fisch freigelassen: |
 Larven: | Foto Fisch: | Scan Datenblatt: | Datenblatt archiviert: |

Save and New Input

Abbildung 28 Eingabeformular der Datenbank zum Einpflegen der Fischschädigungen.

	A	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK
1	IndividuenID	Afterflosse_Einblutung	Afterflosse_Pigmentveränderung	Afterflosse_Gasblasen	Auge_rechts_Amputation	Auge_rechts_Einblutung	Auge_rechts_Quetschung	Auge_rechts_Gasblasen	Auge_links_Amputation	Auge_links_Einblutung
2	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	110	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	120	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	130	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	140	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	160	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	170	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	190	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	200	0	0	0	1	0	0	0	0	1
18	210	0	0	0	1	0	0	0	0	1
19	220	0	0	0	1	0	0	0	0	1
20	230	0	0	0	1	0	0	0	0	1
21	240	0	0	0	1	0	0	0	0	1
22	250	0	0	0	1	0	0	0	0	1
23	260	0	0	0	1	0	0	0	0	1
24	270	0	0	0	1	0	0	0	0	1
25	280	0	0	0	1	0	0	0	0	1
26	290	0	0	0	1	0	0	0	0	1
27	300	0	0	0	1	0	0	0	0	1
28	310	0	0	0	1	0	0	0	0	1
29	320	0	0	0	1	0	0	0	0	1
30	330	0	0	0	1	0	0	0	0	1
31	340	0	0	0	1	0	0	0	0	0
32	350	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	360	0	0	0	1	0	0	0	0	0
34	370	0	0	0	0	0	0	0	0	1
35	380	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	390	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	400	0	0	0	1	0	0	0	0	0
38	410	0	0	0	1	0	0	0	0	1
39	420	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	430	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	440	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 29 Automatisch generiertes Output-Excel File der Abfrage der Fischschädigungen aus der Datenbank.

6.6. Standardisierte Fischzugaben an den Untersuchungsstandorten

Da bei einer Beprobung des natürlichen Fischabstiegs die fangbedingte Mortalität nicht eindeutig von der anlagenbedingten Mortalität differenziert werden kann, die genaue Vorschädigung der Fische nicht bekannt ist und Schädigungen durch Turbinen und Rechen nicht differenziert werden können, sind standardisierte Fischzugaben an den Untersuchungsstandorten notwendig. Dabei wird im Rahmen genehmigter Tierversuche (ROB-55.2-2532.Vet_02-15-31, ROB-55.2-2532.Vet_02-15-24 und ROB-55.2-2532.Vet_02-19-160) eine standardisierte Anzahl an Fischen bekannter Vorschädigung direkt in den Hamen, in die Turbine und oberhalb des Rechens eingebracht. Um bei der Zugabe der Fische oberhalb des Rechens Verluste durch eine eventuelle Flucht der Fische abschätzen zu können, wird während der Versuche im Oberwasser ein ARIS Sonar zur Beobachtung der Fische installiert. Da die Mortalitäts- und Verletzungsrate der Fische durch die Auslastung der Turbine beeinflusst werden kann, sollen die Versuche an den innovativen Kraftwerksanlagen bei zwei verschiedenen Lastzuständen durchgeführt werden (niedrige und hohe Turbinenlast, Abbildung 30).

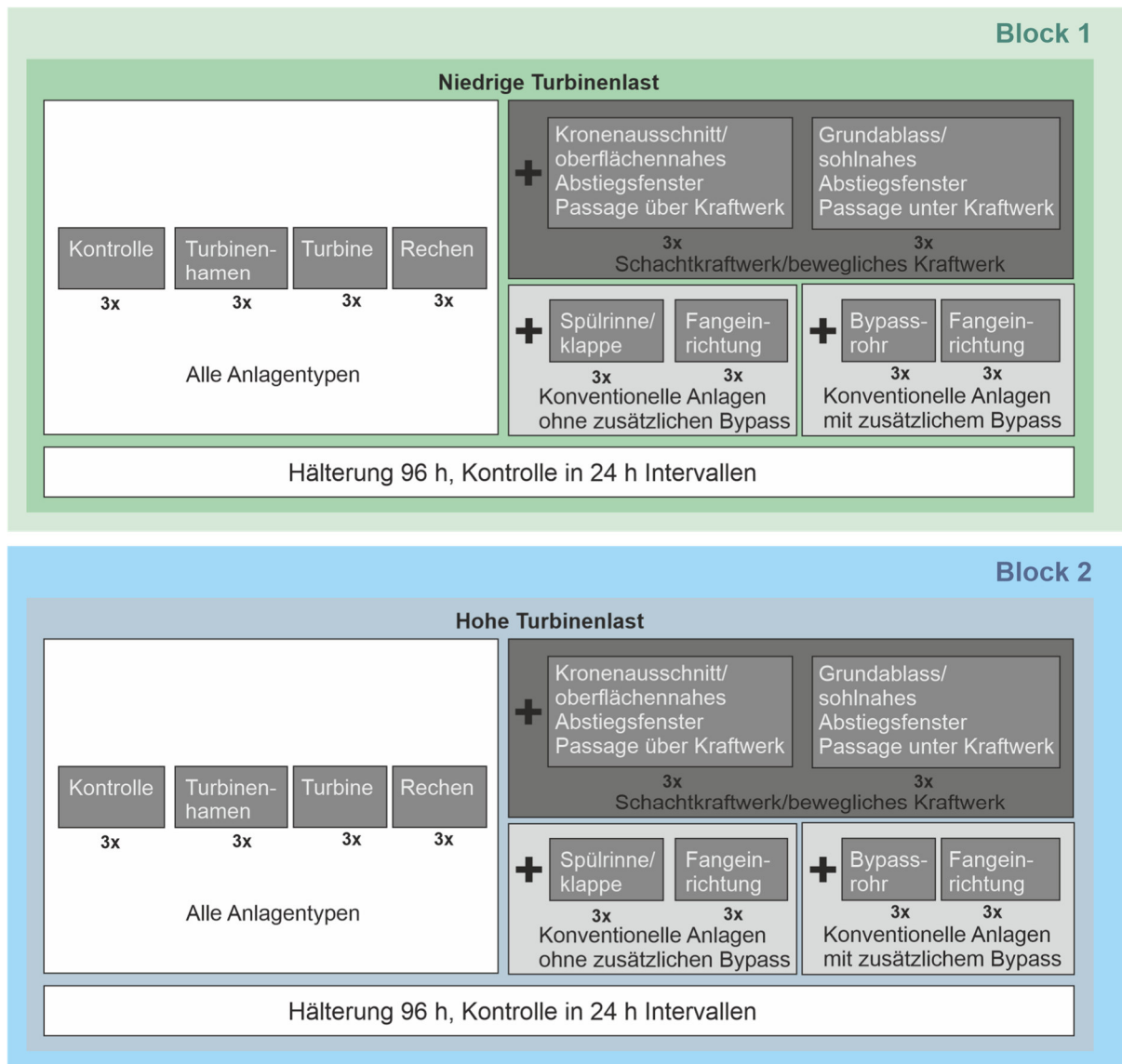


Abbildung 30 Schematische Darstellung des Versuchsdesigns für die standardisierten Fischzugaben an den verschiedenen Kraftwerksstandorten. 3x = Durchführung in drei Wiederholungen, Konventionelle Anlagen ohne zusätzlichen Bypass = Anlagen mit Kaplan-Rohrturbine, die neben der Spülklappe und einer Fischaufstiegsanlage mit keinem weiteren Bypass für den Fischabstieg ausgestattet sind (z.B. Anlage Baidersdorf-Wellerstadt); Konventionelle Anlagen mit zusätzlichem Bypass = Anlagen mit Kaplan-Rohrturbine, die neben der Spülklappe und einer Fischaufstiegsanlage mit einem weiteren Bypass für den Fischabstieg (z.B. Aalrohr, Anlage Lindesmühle) ausgestattet sind, Block 1–2 = Zu einem Versuchsblock gruppierte Versuchsdurchgänge, die jeweils in einem Zeitraum von wenigen Tagen bis Wochen durchgeführt werden.

Die standardisierten Fischzugaben werden in mehrere Versuchsblöcke (nach Lastzuständen und Fischarten) eingeteilt, die jeweils innerhalb weniger Tage durchführbar sind. Die genaue Einteilung der Versuchsblöcke erfolgt dabei standortspezifisch entsprechend der zu untersuchenden Anlagenteile, Abflussbedingungen und Abwanderkorridore. Die Einteilung in mehrere Versuchsblöcke ist aus logistischen Gründen erforderlich (Durchführbarkeit der

Versuchsdurchläufe innerhalb von wenigen Tagen, Unterbringung der Fische im Hälterungssystem unter angemessenen Bedingungen).

6.6.1. Auswahl der Versuchsfische

Damit für das bayernweit angelegte Projekt möglichst repräsentative Ergebnisse erzielt werden können, die für die Genehmigungsbehörden bei zukünftigen Kraftwerksprojekten eine wertvolle Entscheidungshilfe sein können, wurden für sechs morphologische Fischarten (Abbildung 31) jeweils ein bis zwei repräsentative Vertreter ausgewählt (insgesamt acht Fischarten). Bei den morphologischen Typen handelt es sich um Fische mit einem spindelförmigen Körper (Bachforelle, Huchen), mit spindelförmigem, seitlich leicht abgeplattetem Körper (Nase, Äsche), dorsoventral leicht abgeplattete Grundfische (Barbe), hochrückige Fische (Rotaugen), Fische mit schlangenförmigem, im Querschnitt drehrundem Körper (Aal) und Kammschupper mit hartstrahligen Flossen, die nicht über einen *Ductus pneumaticus* verfügen (Flussbarsch) und deshalb empfindlicher auf abrupte Druckveränderungen reagieren als physostome Arten.

Die unterschiedlichen Körperformen wurden gewählt, da davon ausgegangen wird, dass diese sich im Strömungsfeld der Turbine unterschiedlich verhalten und dadurch gegebenenfalls unterschiedlich geschädigt werden (Ebel 2013). Da Kammschupper mit harten Flossenstrahlen sich in der Beschaffenheit der Schuppen und Flossen deutlich von Rundschuppen unterscheiden, wird erwartet, dass auch die Anfälligkeit bezüglich Schuppenverlust, Hautverletzungen und Flossenschäden nicht mit Rundschuppen vergleichbar ist. Daher wurde zusätzlich zu den Vertretern verschiedener Körperformen ein Vertreter der Kammschupper berücksichtigt. Falls sich kurzfristig vor den Versuchen ergibt, dass die notwendige Anzahl an Versuchstieren für eine der ausgewählten Arten nicht bereitgestellt werden kann, fällt diese Art in den Versuchen aus. Die Auswahl der Vertreter der einzelnen morphologischen Typen erfolgte auf Basis der Referenzzönosen der Untersuchungsgewässer (mdl. Mitteilung LfU), aktuellen Befischungsdaten (LfU Kartendienst Gewässerbewirtschaftung, eigene Befischungsdaten) sowie der Relevanz der jeweiligen Arten für die einzelnen Kraftwerkstypen (Gewässertypus, in dem der Anlagentyp eingebaut werden kann). Die Fische sollen in einer Größe von ca. 5–75 cm verwendet werden, wobei die Maximalgrößen (40–75 cm) in der Regel nur beim Aal und Huchen erreicht werden können. Je nach Jahreszeit, Länge des Winters etc. haben die Fische des Vorjahres zum Abrufzeitpunkt unterschiedliche Größen. Die genaue Verteilung der Fische innerhalb des Größenspektrums richtet sich daher nach der dann konkret gegebenen Verfügbarkeit in den

jeweiligen Fischzuchten. Da Zusammenhänge zwischen Fischschädigung und Größe über Korrelationen hergestellt werden können (siehe oben, Datenanalyse), ist es nicht notwendig, für jede Art innerhalb des angegebenen Größenspektrums Größenklassen zu unterscheiden. Dadurch wird die Anzahl der benötigten Individuen pro Art möglichst gering gehalten. Im Folgenden wird die Auswahl für jede einzelne Art begründet.

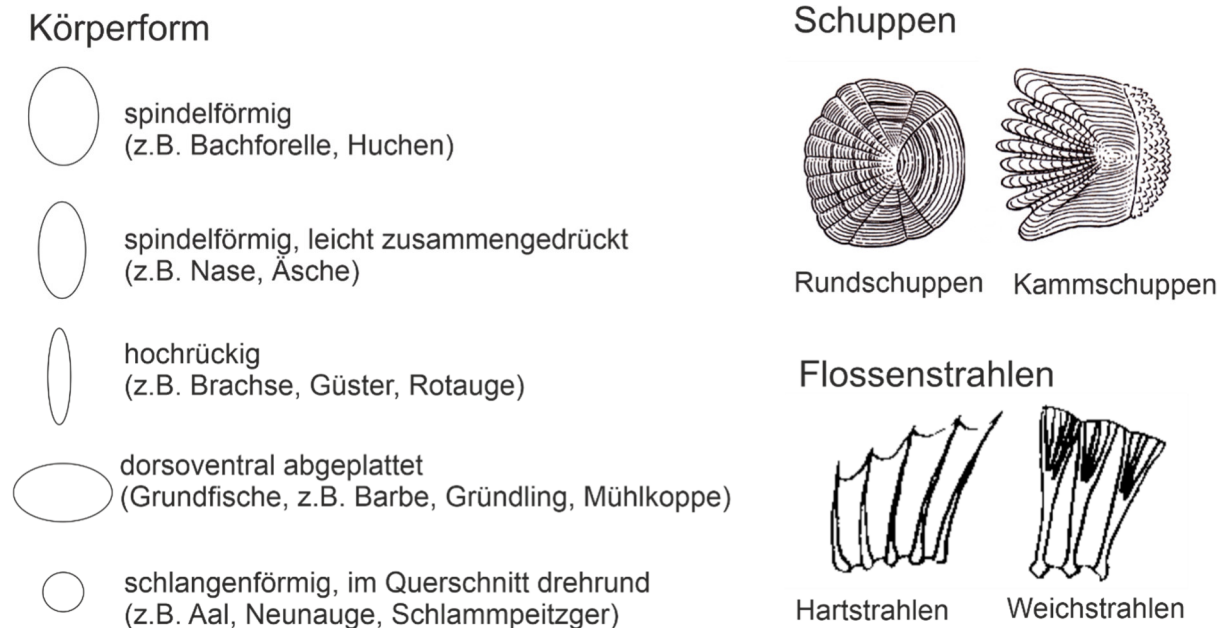


Abbildung 31 Schematische Darstellung morphologischer Unterschiede bei Fischen bezüglich Körperform, Schuppentyp und Flossenstrahlen.

Äsche (*Thymallus thymallus*)

Die Äsche ist in allen Referenzzönosen der Untersuchungsgewässer vertreten und ist im Mittel die häufigste Fischart. Des Weiteren reagiert sie besonders sensibel auf Umweltbelastungen. Als Mitteldistanzwanderer (Jungwirth et al. 2003, Kottelat & Freyhof 2007) muss die Äsche in heutigen Gewässern natürlicherweise immer wieder Wasserkraftanlagen passieren. Erkenntnisse über die Schädigung der Äsche an Wasserkraftanlagen und mögliche Strategien zur Verringerung dieser Schädigungen sind daher von hoher Relevanz für den Schutz der Rote-Liste- (Rote Liste Status 2, Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021) und FFH-Art (FFH Anhang V). Da die Äsche ein beliebter Angelfisch ist, besteht auch großes gesellschaftliches Interesse an der Weiterentwicklung von Schutzstrategien für diese Art. Durch ihre lange Rückenflosse ist die Äsche in ihrer Körperform mit keinem anderen Salmoniden vergleichbar und die Versuche können daher nicht stellvertretend mit ähnlichen aber weniger gefährdeten Arten durchgeführt werden. Neben ihrem Verbreitungsgebiet in Bayern kommt die Äsche in vielen anderen Gewässern in Europa vor, so dass die Versuchsergebnisse in hohem Maße auf andere Wasserkraftstandorte übertragbar sind. Auf Grund der großen Bemühungen in der

kommerziellen Nachzucht der Äsche, vor allem für fischereiliche Besitzmaßnahmen, steht eine große Anzahl an Individuen aus Fischzuchten für die Versuche zur Verfügung, ohne dass die natürlichen Bestände gefährdet werden.

Bachforelle (*Salmo trutta*)

Die Bachforelle ist laut Referenzzönose, nach der Äsche, im Mittel die zweithäufigste Fischart in den Untersuchungsgewässern. Im Vergleich zur Äsche ist die Bachforelle etwas weniger sensibel gegenüber Umweltbelastungen, muss aber als Kurzstanzwanderer (Jungwirth et al. 2003, Kottelat & Freyhof 2007) ebenfalls natürlicherweise immer wieder Wasserkraftanlagen passieren. Erkenntnisse über die Schädigung der Bachforelle an Wasserkraftanlagen und mögliche Strategien zur Verringerung dieser Schädigungen sind daher von hoher Relevanz für den Schutz der Bachforelle (Rote Liste Status V, Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021). Da die Bachforelle ein beliebter Angelfisch ist, besteht auch großes gesellschaftliches Interesse an der Weiterentwicklung von Schutzstrategien für diese Art. Neben ihrem Verbreitungsgebiet in Bayern kommt die Bachforelle in vielen anderen Gewässern Europas vor, so dass die Versuchsergebnisse in hohem Maße auf andere Standorte übertragbar sind. Auf Grund der großen Bemühungen in der kommerziellen Nachzucht der Bachforelle als Speisefisch und für fischereiliche Besitzmaßnahmen steht eine große Anzahl an Individuen für die Versuche aus Fischzuchten zur Verfügung, ohne dass die natürlichen Bestände gefährdet werden.

Huchen (*Hucho hucho*)

Der Huchen, auch Donaulachs genannt, ist der größte in Bayern vorkommende Salmonide und war früher in vielen bayerischen Fließgewässern als Leitart vertreten. Er unterscheidet sich vor allem in seiner Größe, Physiologie und Anfälligkeit gegenüber Störungen von der Bachforelle. Auch heute kommt der Huchen noch in mehreren der Untersuchungsgewässer vor (Loisach, Iller, Isar). Als Mitteldistanzwanderer (Jungwirth et al. 2003, Kottelat & Freyhof 2007) muss der Huchen in heutigen Gewässern natürlicherweise immer wieder Wasserkraftanlagen passieren. Erkenntnisse über die Schädigung des Huchens an Wasserkraftanlagen und mögliche Strategien zur Verringerung dieser Schädigungen sind daher von hoher Relevanz für den Schutz dieser Rote-Liste- (Rote Liste Status 2, Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021) und FFH-Art (FFH Anhang II). Da der Huchen ein beliebter und hochpreisiger Angel- und Speisefisch ist, besteht für diese Art ein besonders großes gesellschaftliches Interesse an der Weiterentwicklung von Schutzstrategien. Im Vergleich zur Bachforelle hat er höhere ökologische Ansprüche. Auf Grund der großen Bemühungen in der

kommerziellen Nachzucht des Huchens als Speisefisch und für fischereiliche Besatzmaßnahmen steht eine große Anzahl an Individuen für die Versuche aus Fischzuchten zur Verfügung, ohne dass die natürlichen Bestände gefährdet werden.

Nase (*Chondrostoma nasus*)

Die Nase kam ehemals in den bayerischen Fließgewässern in sehr großen Beständen vor, von denen vor allem auf Grund der starken morphologischen Degradation nur noch Restbestände übrig sind. Für einen Cypriniden hat die Nase relativ hohe ökologische Ansprüche und eine lange Generationszeit. Sie benötigt für ihre verschiedenen Lebensstadien jeweils eine spezifische Habitatqualität ähnlich wie bei Salmoniden. Die Nase ist ein Mitteldistanzwanderer. Für die Erreichbarkeit der verschiedenen Teilhabitate spielt die Passage von Kraftwerksanlagen mittlerweile eine große Rolle, so dass die Minimierung von damit in Zusammenhang stehenden Schäden und Verbesserungen der Abwandermöglichkeiten durch innovative Kraftwerkstechnologien für die Erhaltung der Rote-Liste-Art (Status 3, Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021) von zentraler Bedeutung sein kann. Da sich mehrere Fischzuchten um die Nachzucht der Nase als Besatzfisch bzw. Teichfisch bemühen, können die Individuen für den Tierversuch aus der Zucht bezogen werden und müssen nicht aus der Natur entnommen werden.

Barbe (*Barbus barbus*)

Ähnlich wie die Nase kam auch die Barbe ehemals in den bayerischen Fließgewässern in sehr großen Beständen vor und ist heute nur noch in geringeren Individuenzahlen vertreten. Die Barbe hat etwas geringere ökologische Ansprüche als die Nase und eine etwas kürzere Generationszeit. Wie die Nase ist auch die Barbe ein Mitteldistanzwanderer und benötigt für ihre verschiedenen Lebensstadien jeweils eine spezifische Habitatqualität. Für die Erreichbarkeit dieser Habitate ist heute oft die Passage von Kraftwerksanlagen notwendig. Eine Minimierung von damit in Zusammenhang stehenden Schädigungen und eine Verbesserung der Abwandermöglichkeiten durch innovative Kraftwerkstechnologien kann für den Erhalt dieser Art von zentraler Bedeutung sein. Mit ihrer typischen Körperform eines Grundfisches können die Versuche mit der Barbe, zumindest in kleineren Größen, auch in gewissem Maße auf andere Grundfische wie Gründlinge (*Gobio gobio*) oder Bachschmerlen (*Barbatula barbatula*) übertragen werden. Da sich mehrere Fischzuchten um die Nachzucht der Barbe als Besatzfisch bemühen, können die Individuen für den Tierversuch aus der Zucht bezogen werden und müssen nicht aus der Natur entnommen werden.

Rotaugen (*Rutilus rutilus*)

Das Rotaugen ist ein Vertreter der Cypriniden mit hochrückiger Körperform, der nicht nur in Stillgewässern, sondern auch in Fließgewässern regelmäßig vorkommt (Referenzzönosen und aktueller Fischbestand). Mit seiner typischen hochrückigen Körperform können die Versuche mit dem Rotaugen auch in gewissem Maße auf andere Cypriniden, wie Rotfeder (*Scardinius erythrophthalmus*), Giebel (*Carassius gibelio*) oder Brachse (*Abramis brama*), übertragen werden. Als Nebenfisch der Teichwirtschaft ist das Rotaugen sehr gut erhältlich und kann auch aus den eigenen Zuchtbeständen am LS Aquatische Systembiologie entnommen werden. Als Versuchsfisch ist das Rotaugen daher sehr gut geeignet.

Flussbarsch (*Perca fluviatilis*)

Der Flussbarsch ist der einzige Vertreter der Kammschupper, der in den Untersuchungsgewässern (Referenzzönosen und aktueller Fischbestand) regelmäßig vorkommt. Zusätzlich besitzt der Flussbarsch als Physoclist keinen *Ductus pneumaticus* und kann daher nicht so flexibel auf abrupte Druckunterschiede reagieren wie physostome Arten. Auch in anderen Gewässern kommt der Flussbarsch als typische Fischart vor und kann in größeren Individuenzahlen für die Versuche bereitgestellt werden.

Aal (*Anguilla anguilla*)

Das natürliche Verbreitungsgebiet des Aals in Bayern ist das Maineneinzugsgebiet und das Elbeeinzugsgebiet. Mittlerweile ist die Fischart aber auf Grund von Besatzmaßnahmen auch im Donaeineinzugsgebiet weit verbreitet und kommt in allen Untersuchungsgewässern vor (aktuelle Befischungsergebnisse, LfU Kartendienst Gewässerbewirtschaftung). Als katadromer Wanderfisch wandert der Aal im Herbst in großen Stückzahlen über lange Strecken flussabwärts, um zu seinen Laichgründen in der Sargassosee zu gelangen. Auf diesem Weg müssen die Aale eine Vielzahl an Kraftwerksanlagen passieren. Aufgrund seiner länglichen, schlangenförmigen Körperform ist der Aal besonders stark gefährdet, durch die Turbinenschaufeln getroffen und geschädigt zu werden. Der Aal gilt weltweit als vom Aussterben bedroht (IUCN = critical endangered). Systematische und vergleichende Erkenntnisse zur Aalverträglichkeit verschiedener Kraftwerkstechnologien sind für den Erhalt dieser auch wirtschaftlich sehr bedeutenden Art höchst relevant. Mit ihrer typischen schlangenförmigen Körperform können die Versuche mit dem Aal, zumindest in kleineren Größen, auch in gewissem Maße auf die morphologisch ähnlichen, naturschutzfachlich höchst relevanten Neunaugenarten übertragen werden (*Lampetra planeri*, *Eudontomyzon* sp.).

Im Gegensatz zu den Neunaugen ist beim Aal eine Entnahme der Versuchsfische aus der Natur nicht notwendig, da die Tiere von Fischfarmen bezogen werden können.

Die Fischarten Barbe, Äsche, Huchen und Rotaugen wurden nicht an den konventionellen Kraftwerksanlagen in Baiersdorf-Wellerstadt und Lindesmühle getestet, sondern nur an Standorten mit innovativen Kraftwerkstechniken. Dieser Ansatz wurde verfolgt, da für konventionellen Kraftwerksanlagen im Vergleich zu innovativen Anlagen bereits umfangreichere Ergebnisse vorliegen und die Tierzahlen für Tierversuche generell möglichst gering zu halten sind. Um dennoch einen mit gleicher Methodik erhobenen Teildatensatz über alle Untersuchungsstandorte zu erhalten, in dem die wichtigsten morphologischen Fischarten vertreten sind, wurden die Fischarten Aal, Nase, Bachforelle und Flussbarsch an allen Anlagen verwendet.

6.6.2. Herkunft der Versuchsfische

Ein Teil der zu untersuchenden Arten wurde vom Bayerischen Landesamt für Umwelt, Referat 54 "Fisch- und Gewässerökologie" (Demollstr. 31, 82407 Wielenbach) zur Verfügung gestellt (Huchen, Bachforelle, Äsche, Nase, Barbe). Weitere Fischarten wurden von verschiedenen Fischzuchten bezogen (z.B. Landesfischzuchtanstalt Mauka, Neufahrner Str. 6, 85376 Massenhausen; Fischzucht Rösch, Am Großen Dürrmaul 1, 95671 Bärnau; Fischereilicher Lehr- und Beispielbetrieb Lindbergmühle, Lindbergmühle 40, 94227 Lindberg; Schwäbischer Fischereihof Salgen mit Wasserschule, Mörgenerstr. 50, 87775 Salgen, Teichwirtschaftlicher Beispielbetrieb Maidbrunn, Mühlhäuserstraße, 97222 Rimpar; Fischzucht Rhönforelle, Fischzucht 1, 36129 Gersfeld (Rhön); Fischzucht Hornauer, Langwieder Str. 1a, 85232 Bergkirchen; GüFisch-Zucht, Gewerbestraße 22, 6822 Satteins, Österreich; Forellenhof Nadler, Am Forellenbach 1, 85386 Eching b. Freising; Fischzucht Heberlein, Plechthammer 8, 92526 Oberviechtach; Kirschauer Aquakulturen GmbH, Friesestraße 31, 02681 Schirgiswalde-Kirschau; Tabelle 3). Die Auswahl der Bezugsquellen erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Referat für Fisch- und Gewässerökologie des bayerischen LfU und konnte häufig erst kurzfristig endgültig festgelegt werden, da sich die Verfügbarkeit der Fische in den einzelnen Zuchten aufgrund unerwarteter Ereignisse verändern kann (z.B. unerwartet hoher Ausfall über den Winter oder durch Infektionen) und vor Versuchsbeginn nochmals kurzfristig geprüft werden musste. Da die Untersuchungen aufgrund des erhöhten Laubfalls im Spätherbst nicht zu den üblichen Abfischzeitpunkten der Fischzuchten stattfinden konnten, hat sich die Beschaffung von Versuchsfischen zum Teil schwierig gestaltet. Unerwarteter Weise stellte es sich als schwierig heraus, qualitativ gute Bachforellen für die Versuche zu

erhalten. Bei den meisten für die Versuche gesichteten Bachforellen wurden bereits im Ausgangszustand starke Schädigungen der Flossen festgestellt. Der Fischereihof in Salgen der Fischereifachberatung des Bezirks Schwaben konnte von allen besichtigten Fischzuchten die höchste Qualität an Bachforellen anbieten.

Tabelle 3 Fischart, Totallänge und Anzahl bei der Lieferung sowie Herkunft der Versuchsfische. MW = Mittelwert.

Fischart	Totallänge (cm)	Anzahl	Alter	Jahr	Herkunft	Einsatzgebiet
Bachforelle	8,2–24,0 (MW 13,5)	6.500	Ein- bis zweisömmrig	2015	Wielenbach, Fischzucht Rösch	Lindesmühle, Baiersdorf
	10,0–23,0 (MW 17,7)	7.000	Zweisömmrig	2015	Fischzucht Mauka	Moosach
	7,6–40,6 (MW 19,5)	7.670	Ein- bis dreisömmrig	2016	Salgen, Wielenbach	Au Iller, Heckerwehr
	4,2–41,0 (MW 17,8)	3.313	0+ - bis dreisömmrig	2017	Salgen	Eixendorf
	3,6–39,7 (MW 17,3)	7.327	0+ - bis dreisömmrig	2018	Salgen	Baierbrunn, Eixendorf
	4,1–42,0 (MW 17,8)	8.900	0+ - bis dreisömmrig	2019	Salgen, Fischzucht Mauka	Höllthal
	2,9–38,8 (MW 13,4)	4.050	0+ - bis dreisömmrig	2021	Salgen, Fischzucht Nadler	Großweil
Huchen	6,0–27,0 (MW 17,3)	1.700	Ein- bis zweisömmrig	2015	Wielenbach	Moosach
	6,0–27,0 (MW 17,3)	3.000		2015	Fischzucht Rösch	Moosach
	7,0–55,8 (MW 24,2)	2.550	Ein- bis dreisömmrig	2016	Wielenbach, Fischzucht Rösch	Au Iller
	9,0–51,3 (MW 23,2)	3.125	Ein- bis dreisömmrig	2017	Lindbergmühle, Wielenbach	Eixendorf
	11,5–60,0 (MW 26,4)	3.040	Ein- bis dreisömmrig	2018	Lindbergmühle, Wielenbach	Baierbrunn
	7,8–60,0 (MW 21,0)	3.600	Ein- bis dreisömmrig	2019	Lindbergmühle, Fischzucht Hornauer	Höllthal
	9,2–59,3 (MW 20,1)	3.620	Ein- bis viersömmrig	2021	Lindbergmühle, Wielenbach, Fischzucht Hornauer	Großweil
Nase	4,0–12,0 (MW 8,2)	6.200	Ein- bis zweisömmrig	2015	Lindbergmühle, Maidbronn	Moosach
	4,0–12,6 (MW 8,0)	6.300	Ein- bis zweisömmrig	2015	Maidbronn	Baiersdorf, Lindesmühle
	5,3–19,3 (MW 10,9)	7.400	Ein- bis dreisömmrig	2016	Wielenbach, Fischzucht Rösch	Au Iller, Heckerwehr
	6,0–20,4 (MW 11,3)	4.500	Ein- bis dreisömmrig	2017	Wielenbach, Fischzucht Rösch, Lindbergmühle	Eixendorf
	6,4–26,4 (MW 13,7)	8.000	Ein- bis zweisömmrig	2018	Wielenbach	Baierbrunn, Höllthal
	7,2–29,7 (MW 13,2)	3.500	Ein- bis dreisömmrig	2021	Wielenbach	Großweil

Fischart	Totallänge (cm)	Anzahl	Alter	Jahr	Herkunft	Einsatzgebiet
Barbe	4,0–11,0 (MW 7,4)	2.500	Einsömmrig	2015	Wielenbach	Moosach
	5,3–17,1 (MW 9,0)	1.925	Einsömmrig	2016	Wielenbach	Au Iller
	4,7–19,8 (MW 14,1)	2.000	Zweisömmrig	2016	Wielenbach	Heckerwehr
	4,0–22,6 (MW 11,0)	8.500	Ein- bis dreisömmrig	2017	Wielenbach, Fischzucht Heberlein	Eixendorf, Baierbrunn
	5,0–21,0 (MW 10,1)	8.795	Ein- bis zweisömmrig	2018	Wielenbach, Fischzucht Rhönforelle	Eixendorf, Baierbrunn, Höllthal
	6,2–37,4 (MW 12,7)	3.500	Ein- bis dreisömmrig	2020	Wielenbach, Fischzucht Heberlein	Großweil
Rotauge	4,0–10,0 (MW 6,3)	7.200	Einsömmrig	2015	Fischzucht Rösch	Moosach
	4,5–14,0 (MW 7,2)	8.000	Einsömmrig	2016	Fischzucht Rösch	Au Iller, Heckerwehr
	3,5–21,7 (MW 10,9)	9.000	Einsömmrig	2017	Fischzucht Rösch	Eixendorf, Baierbrunn
	6,1–16,0 (MW 9,5)	4.500	Einsömmrig	2018	Fischzucht Rösch	Höllthal
	5,2–19,5 (MW 13,1)	3.500	Ein- bis zweisömmrig	2021	Fischzucht Heberlein	Großweil
	4,0–15,0 (MW 10,0)	7.800	Zweisömmrig	2015	Fischzucht Rösch	Baiersdorf, Lindesmühle, Moosach
Fluss- barsch	4,1–13,3 (MW 6,6)	7.000	Zweisömmrig	2016	Fischzucht Rösch	Au Iller, Heckerwehr
	5,4–14,7 (MW 10,6)	8.000	Einsömmrig	2017	Fischzucht Rösch	Eixendorf, Baierbrunn
	5,1–16,1 (MW 11,5)	3.500	Einsömmrig	2018	Fischzucht Rösch	Höllthal
	6,6–25,8 (MW 13,0)	4.500	Ein- bis zweisömmrig	2020	Fischzucht Kirschauer	Großweil
	8,0–23,0 (MW 15,2)	7.300	Einsömmrig	2015	Wielenbach	Moosach
	7,1–20,1 (MW 12,4)	4.900	Einsömmrig	2016	Wielenbach	Au Iller, Heckerwehr
Äsche	6,5–30,0 (MW 15,7)	3.800	Ein- bis zweisömmrig	2017	Wielenbach, Fischzucht Mauka	Eixendorf
	6,3–22,0 (MW 12,7)	4.600	Einsömmrig	2018	Fischzucht Mauka, Fischzucht Rösch	Baierbrunn, Eixendorf
	7,5–29,8 (MW 16,4)	6.200	Ein- bis zweisömmrig	2019	Fischzucht Güffel, Österreich	Höllthal
	4,8–20,3 (MW 11,5)	3.500	Ein- bis zweisömmrig	2021	Fischzucht Rösch	Großweil

Fischart	Totallänge (cm)	Anzahl	Alter	Jahr	Herkunft	Einsatzgebiet
Aal	14,0–75,0 (MW 39,1)	5.000	Zweisömmrig, viersömmrig, siebensömmrig	2015	Fischzucht Rösch	Baiersdorf, Lindesmühle
	13,2–69,0 (MW 41,0)	5.610	Zweisömmrig, viersömmrig, siebensömmrig	2016	Fischzucht Rösch	Au Iller, Heckerwehr
	20,8–71,4 (MW 43,4)	5.914	Zweisömmrig, viersömmrig, siebensömmrig	2017	Fischzucht Rösch	Eixendorf, Baierbrunn
	24,5–71,2 (MW 41,8)	3.675	Zweisömmrig, viersömmrig, siebensömmrig	2018	Fischzucht Rösch	Höllthal
	23,1–66,7 (MW 41,4)	3.500	Zweisömmrig, viersömmrig, siebensömmrig	2020	Fischzucht Rösch	Großweil

6.6.3. Versuchsablauf

Für jeden Versuchstag wurde ein detaillierter Ablauf- und Personalplan erstellt, in dem der zeitliche Ablauf der Aufgaben der einzelnen Teams und Personen dargestellt ist (Tabelle 13 im Anhang). Die Durchführung der standardisierten Fischzugaben erfolgte in den folgenden Schritten:

- Transport
- Akklimatisierung
- Markierung
- Versuchsdurchführung
- 96 h Hälterung

Die praktische Durchführung der einzelnen Versuchsschritte und die dabei notwendigen Eingriffe und Behandlungen der Fische werden im Folgenden erläutert.

Der Transport der Fische erfolgte direkt von der Fischzucht an die Versuchsstandorte mit einem Tandemhochlader mit den Maßen 2,10 m x 4,30 m (Unsinn Anhänger, Holzheim, Deutschland). Auf dem Anhänger wurden zwei thermoisolierte Fischfässer mit Fischschleuse und Ablaufrutsche (Aquacultur, Nienburg, Deutschland) mit 1.100 L Fassungsvermögen rutschsicher befestigt. Um die Sauerstoffversorgung der Fische sicherzustellen, wurde quer zum Anhänger auf dessen Front eine Gasflasche (70 L, 200 bar) mit Druckminderungsventil, Manometer und Durchflussmengenmesser durch eine Stahlkonstruktion fest mit dem

Anhänger verbaut (Abbildung 32). Durch Gasleitungen wurde der Sauerstoff in die Fischfässer geführt, wo dieser durch Schlauchausströmer gleichmäßig im Fischfass verteilt wurde. Kammschupper und größere Räuber wurden getrennt transportiert. Vor dem Transport erfolgte bereits durch die Fischzucht eine sach- und artgerechte Ausnüchterung entsprechend Kraus et al. (2013), um eine Wasserverschmutzung durch Ausscheidungsprodukte (insbesondere Ammoniak) während des Transports zu vermeiden. Die Fischtransportbehälter wurden vor dem Besatz mit Fischen mit Wasser gefüllt, wodurch eine mögliche Beeinträchtigung der Fische auf ein Minimum reduziert werden soll (Kraus et al. 2013). Die notwendigen Transportkapazitäten (ein oder zwei Thermoports, eine oder mehrere Fahrten) wurden entsprechend dem tatsächlichen Gewicht der Fische nach den Tabellen in Adam et al. (2013) und Kraus et al. (2013) ermittelt.

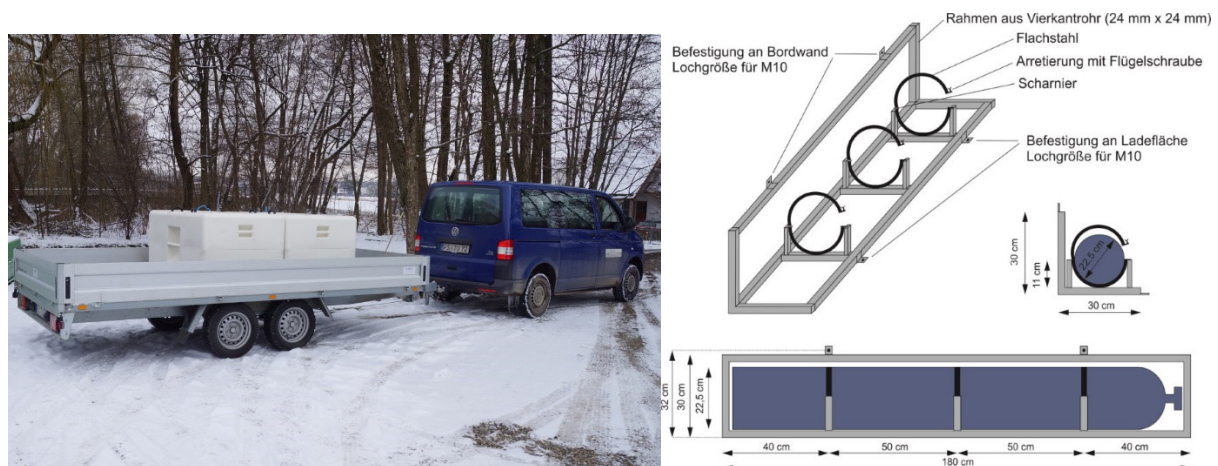


Abbildung 32 Fischtransportzug des Lehrstuhls mit Tandemhochlader und thermoisolierten Fischfässern. Die Sauerstoffversorgung erfolgte über eine in der Front des Anhängers verbaute Sauerstoffflasche (aus Kraus et al. 2013).

Am Ort der Versuchsdurchführung erfolgte eine Akklimatisierung der Fische im Transportbehälter unter sukzessivem Austausch des Transportwassers gegen das Wasser des Untersuchungsgewässers (Adam et al. 2013). Je 2°C Temperaturunterschied wird eine Akklimatisierungszeit von 30 Minuten angesetzt, bei geringeren Temperaturunterschieden jedoch mindestens 30 Minuten. Da der Transport in thermoisolierten Behältern erfolgte, war mit einem Temperaturunterschied von mehr als 2°C nicht zu rechnen. Es wurde während der Akklimatisierungsphase so viel Transportwasser ausgetauscht, wie notwendig war, um das Wasser in dieser Zeit an die Zieltemperatur anzugleichen (ca. 20% pro Stunde).

Nach der Akklimatisierung wurden die Fische aus dem Transportbehälter in Fischwannen überführt und in das am Standort aufgebaute Rinnensystem, getrennt nach Arten und Größenklassen, verbracht. Die benötigte Anzahl an Fischen für die jeweilige Versuchsgruppe

wurde unmittelbar vor der Fischzugabe in Fischwannen abgezählt und zur Unterscheidung der verschiedenen Zugabestellen mittels Flossenschnitt unterschiedlich markiert. Zur Markierung der Fische mittels Flossenschnitt wurde jeder zu markierende Fisch einzeln in der nassen Hand gehalten. Mit einer zuvor desinfizierten Präparier-Feischere wurde mit der anderen Hand ein kleines Stück der Flosse (Brustflosse bzw. Schwanzflosse) gerade abgeschnitten. Bei größeren Fischen wurde der Fisch durch eine zweite Person gehalten. Die Desinfektion der Präparier-Feischere erfolgte mit dem Desinfektionsmittel Virkon-S, welches auch zur Desinfektion der übrigen Gerätschaften verwendet wurde. Alle Fische, die oberhalb des Kraftwerksrechens und in die Bypässe eingesetzt wurden, konnten unmarkiert bleiben, da die Zuchtfische aufgrund ihrer Morphologie und dem einheitlichen Größenspektrum vom Wildfischbestand ausreichend unterscheidbar waren. Fische, die direkt in den Turbinenschacht eingesetzt wurden, wurden an einer Brustflosse markiert, Fische die direkt in das Hamennetz eingesetzt wurden, an der Schwanzflosse. Dadurch war eine schnelle und eindeutige Unterscheidung von Fischen möglich, die in einer Reuse gefangen wurden aber aus unterschiedlichen Zugabestellen am Kraftwerk stammten. Diese minimalen Flossenschnitte ließen sich von geschultem Personal sehr schnell und ohne Betäubung durchführen, wodurch größere Stückzahlen in kürzerer Zeit als z.B. bei Elastomermarkierung bearbeitet werden konnten. Die relativ kleinen Flossenstücke wachsen innerhalb weniger Wochen bis Monate nach (siehe Santamaria & Becerra 1991, Brockes & Kumar 2008, Knopf et al. 2011). Für die Versuche reichte eine nicht dauerhaft anhaltende Markierung aus. Der Einfluss von Flossenschnitten auf die Fitness der Versuchsfische wurde bereits in den 1980er Jahren wissenschaftlich untersucht und nach den Erkenntnissen dieser Studien haben sie keinen Einfluss auf Wachstums- und Überlebensraten (siehe Nicola & Cordone 1973, Gjerde & Refstie 1988, Johnsen & Ugedal 1988). Da auch die Belastung durch eine vorangehende Betäubung entfällt, wurde diese Methode gegenüber der Elastomermarkierung vorgezogen.

Nach der Markierung wurden die Fische direkt in die einzelnen Anlagenteile zugegeben. Dazu wurden die Fische in 20 L Eimern oder 80 L Fischwannen zur Zugabestelle transportiert und vorsichtig entlassen (Abbildung 33 links). Die Fischzugabe erfolgte vom Boot aus oder mit Hilfe von an den Eimern befestigten Seilen. Auch auf ein Scheuchen der Fische in das Kraftwerk wurde bewusst verzichtet, um das natürliche Verhalten möglichst wenig zu beeinflussen. Zudem gibt es Hinweise darauf, dass ein Scheuchen der Fische die Verletzungsmuster und -intensitäten beeinflussen kann. Eine weitere Charge an Fischen wurde direkt den Auswerteteams zur Bewertung der Vorschädigung zugeführt. Nach einer definierten Zeit von 1 h bis max. 2 h wurde der Steert geleert. Die im Steert befindlichen Fische wurden direkt aus dem Netz in eine Fischwanne mit frischem Flusswasser und soweit

notwendig mit Sauerstoffzufuhr überführt. Anschließend wurde jeder Fisch einzeln, lebend und ohne Betäubung in eine transparente Plastikbox (ROTHO clear boxes, ROTHO Kunststoff AG, Würenlingen, Schweiz) mit frischem Flusswasser gesetzt (Abbildung 33 rechts). Der Füllstand der Box wurde dabei so gewählt, dass der Fisch vollständig mit Wasser bedeckt war und alle Flossen entfaltet waren. Die Länge des Fisches wurde mit Hilfe eines am Boden der Plastikbox fixierten Lineals gemessen. Im Anschluss daran wurden die allgemeinen Kriterien (Vitalität, Atemfrequenz, Ernährungszustand, Verpilzung und Parasiten) erhoben sowie die verschiedenen Verletzungstypen an den verschiedenen Körperteilen erfasst. Die Intensität der Verletzungen wurde dabei mit Hilfe der im „Score Sheet“ (Tabelle 10 im Anhang) enthaltenen Informationen von einer Person visuell eingeschätzt, während eine zweite Person alle Informationen auf dem in Kapitel 6.2.1 beschriebenen Protokoll (Abbildung 17) dokumentierte. Alle beteiligten Personen wurden zweimal jährlich (jeweils unmittelbar vor der Feldarbeitsphase im Frühjahr und im Herbst) an einem „Einführungs- und Eichungstag“ mit Hilfe eines Dokumentationsfilms, in praktischen Übungen und anhand des Score-Sheets sowie den für jede Tätigkeit ausformulierten Arbeitsanweisungen (siehe CD Anhang) geschult. Bei der Durchführung der Versuche vor Ort wurde durch die Anwesenheit mindestens eines erfahrenen Wissenschaftlers (i.d.R. Projektkoordinationsstelle) eine zusätzliche Qualitätskontrolle durchgeführt. Tote Fische wurden für weiterführende Untersuchungen innerer Verletzungen (Röntgen) bei -20°C in am Untersuchungsstandort bereitstehenden Gefriertruhen eingefroren. Überlebende Fische wurden zur Bestimmung der verzögerten Mortalität in das Hälterungssystem verbracht (vgl. Kapitel 6.4).



Abbildung 33 Links: Aale der Versuchsgruppe Turbine & Rechen werden zugegeben. Rechts: Auswertung der gefangenen Fische.

6.7. Beprobung des natürlichen Fischabstiegs an den Untersuchungsstandorten

Zusätzlich zu den standardisierten Fischzugaben wurden saisonale Hamenbefischungen des natürlichen Fischbestandes durchgeführt, um die Bedeutung der in den standardisierten Versuchen ermittelten Schädigungsraten in den Untersuchungsgewässern einschätzen zu können (wie viele Fische steigen tatsächlich in welcher Zeiteinheit ab?) und in Bezug zur Funktionalität der Fischschutzeinrichtungen (Feinrechen, Bypasssysteme) setzen zu können (welcher Prozentsatz an Fischen nimmt die Bypasssysteme an und wird dadurch vor Turbinenschäden geschützt?). Die Verteilung der Fische aus dem natürlichen Fischabstieg in den jeweiligen Fangeinrichtungen wurde auch zur Bewertung der einzelnen Abstiegskorridore der Wasserkraftanlage herangezogen (mit Ausnahme der Standorte Eixendorf und Großweil siehe Band 7 und 10). Die saisonalen Hamenbefischungen erfolgten jeweils im Frühjahr und im Herbst über einen effektiven Zeitraum von mindestens 12 Tagen (exklusive Beprobungsausfall durch Hochwasser oder erhöhte Treibgutfrachten). Die Auswertung des natürlichen Fischabstiegs erfolgte ebenfalls mit dem standardisierten Schädigungsprotokoll (Abbildung 17). Da durch die Turbine und andere Anlagenteile verursachte innere Verletzungen, die zunächst äußerlich nicht sichtbar sind, zu einer verzögerten Mortalität führen können, wurden die Fische nach Entnahme aus der Steertreue unter täglichen Kontrollen noch 72 h gehältert (vgl. Kapitel 6.4).

Die Beprobung des natürlichen Fischabstiegs erfolgte sowohl in eigenen Versuchsblöcken („NatFi-Blöcke“) als auch während der standardisierten Fischzugaben („StadFi-Blöcke“). Während der NatFi-Blöcke wurden die Fangeinrichtungen aller vorhandenen Abstiegskorridore in 2 h Intervallen beprobt (Knott et al. 2020). Dazu wurden die Fangeinrichtungen jeweils für 2 h geschlossen gehalten. Die Intervalldauer von 2 h wurde unter Berücksichtigung möglichst geringer fangbedingter Verletzungen (kein signifikanter Unterschied zu 1 h Intervallen, siehe Band 3) und einer ausreichenden Zeitdauer für den Abstieg der Fische gewählt. Die Intervalle wurden gleichmäßig auf die erste Tageshälfte (Sonnenaufgang bis 12:00 Uhr), zweite Tageshälfte (12:00 Uhr bis Sonnenuntergang), erste Nachthälfte (Sonnenuntergang bis Mitternacht) und zweite Nachthälfte (Mitternacht bis Sonnenaufgang) verteilt (Tabelle 4). Bei der Verteilung der Intervalle wurde außerdem darauf geachtet, die Dämmerungsperioden mit abzudecken und dem Team ausreichend Zeit für die Elektrobefischungen (zur näherungsweisen Ermittlung potenzieller Vorschädigung), die Hamenvalidierung und Ruhepausen zu geben. Der zeitliche Ablauf und die personelle

Aufteilung der verschiedenen Tätigkeiten wurden jeweils in einem detaillierten Dienstplan festgehalten (Tabelle 14 im Anhang).

Tabelle 4 Exemplarische Aufstellung der 2 h Beprobungsintervalle während eines Untersuchungsblocks zum natürlichen Fischabstieg.

NatFi Block I			
Tag 1	1. Taghälfte	8:00–10:00	10:00–12:00
	2. Taghälfte		
	1. Nachthälfte	18:00–20:00	20:00–22:00
	2. Nachthälfte		
Tag 2	1. Taghälfte	8:00–10:00	10:00–12:00
	2. Taghälfte		
	1. Nachthälfte	18:00–20:00	20:00–22:00
	2. Nachthälfte		
Tag 3	1. Taghälfte		
	2. Taghälfte	12:00–14:00	14:00–16:00
	1. Nachthälfte		
	2. Nachthälfte	2:00–4:00	4:00–6:00
Tag 4	1. Taghälfte		
	2. Taghälfte	12:00–14:00	14:00–16:00
	1. Nachthälfte		
	2. Nachthälfte	2:00–4:00	4:00–6:00

Während der NatFi-Blöcke richtete sich das Versuchsprogramm nach dem der standardisierten Fischzugaben. Dabei wurde in der Regel tagsüber in 1 h Intervallen geleert und neben den zugegebenen Fischen auch der natürliche Fischabstieg ausgewertet. Bei sehr geringer Wiederfangrate der zugegebenen Versuchsfische wurde die Beprobung mit Leerungsintervallen unterschiedlicher Länge (bedarfsmäßig angepasst) nachts weitergeführt, wobei dabei auch der natürliche Fischabstieg untersucht wurde.

6.8. Validierung der Fangeffektivität der Hamen

Zur Überprüfung der Fangeffektivität der Fischfangeinrichtungen wurden bei den standardisierten Fischzugaben und der Beprobung des natürlichen Fischabstiegs zu Beginn jedes Versuchsblocks Plastikbälle verschiedener Größe und spezifischer Dichte am Hameneingang zugegeben. Es wurden sowohl runde Bälle mit einem Durchmesser von 6,0 cm und ovale Plastikkapseln („Überraschungseier“) mit einer Länge von 4,5 cm und einem Durchmesser von 3,0 cm verwendet. Um unterschiedliche spezifische Dichten zu erhalten, wurde ein Teil der Bälle mit Wasser gefüllt und ein Teil mit gesättigter Kochsalzlösung

(356.000 ppm). Die mit Wasser gefüllten Bälle und Kapseln wurden schwebend in der Wassersäule verdriftet, die mit Salz gefüllten Bälle und Kapseln trieben am oder kurz über dem Gewässergrund und die luftgefüllten Bälle schwammen an der Wasseroberfläche. Pro Versuchsdurchgang zur Überprüfung der Fangeffektivität wurden jeweils von jeder Plastikballgröße 10 luft-, 10 wasser- und 10 salzgefüllte Plastikbälle (Summe = 60 Bälle und Kapseln) vor den Hameneingang ins Gewässer gegeben. Nach 1 h wurden die Fangeinrichtungen geleert und die Summe der wiedergefangenen Bälle und Kapseln aufgetrennt nach Größe und spezifischer Dichte notiert.



Abbildung 34 Validierung der Fangeffektivität der Hamennetze.

6.9. Messung abiotischer Gewässerparameter

Bei der Beprobung des natürlichen Fischabstiegs und den standardisierten Fischzugaben wurden während der Hamenbefischungen täglich physikalische und wasserchemische Parameter erfasst, um für Fischwanderungen wichtige auslösende Faktoren ermitteln zu können und potenzielle Einflüsse von sich ändernden Umweltbedingungen (v.a. Strömung und Treibgut) auf den Fang und die Schädigung der Fische zu dokumentieren. Dreimal täglich wurden die Sauerstoffkonzentration, die Temperatur, der pH-Wert, die Leitfähigkeit und die Trübung im Hauptstrom mit einem Multisonden-Handmessgerät (WTW Multi 3420, WTW, Weilheim, Deutschland) und einem handgeführten Trübungsmessgerät (PhotoFlex Turb 3430, WTW, Weilheim, Deutschland) bestimmt. Dreimal täglich wurden die Strömungsgeschwindigkeiten am Rechen in vier Spuren verteilt auf die gesamte Rechenbreite jeweils an der Rechenbasis, der Rechenmitte und 10 cm unter der Wasseroberfläche gemessen (magnetisch-induktiver Strömungssensor MFpro, OTT Hydromet, Kempten, Deutschland). An der horizontalen Rechenebene des Schachtkraftwerks am Standort Großweil wurden die Strömungsgeschwindigkeiten am Rechen ebenfalls in vier Spuren verteilt auf die gesamte Rechenbreite gemessen, wobei pro Spur jeweils eine Messung am oberstromigen Ende, mittig und am unterstromigen Ende des Rechens erfolgte (= 12 Messwerte pro Durchgang). Im Unterwasser wurden ebenfalls dreimal täglich an jeder Fangeinrichtung jeweils drei Strömungswerte am Hameneingang sowie drei Werte über der überströmten Steertreuse aufgenommen (Abbildung 35, Messpunkte 1–3 und 10–12). Zusätzlich wurde einmal täglich an sechs Messpunkten entlang des Fanghamens jeweils am unteren Ende des Hamens und 10 cm unter der Wasseroberfläche gemessen (Abbildung 35, Messpunkte 4–9, insgesamt 12 Messungen). Kommt es während eines Versuchstages zu starken Abflussschwankungen von mehr als 10%, wurden diese 12 Messungen bis zu dreimal täglich wiederholt. Zusätzlich wurde nach jeder Hamenleerung das Volumen der gefangenen Treibgutmenge in Liter notiert. Darüber hinaus wurden während der standardisierten Fischzugaben stündlich und während der Untersuchungen zum natürlichen Fischabstieg dreimal täglich Leistung, Drehzahl der Turbine, Durchflussmenge sowie Stellung der Leitschaufeln und des Leitapparats notiert.

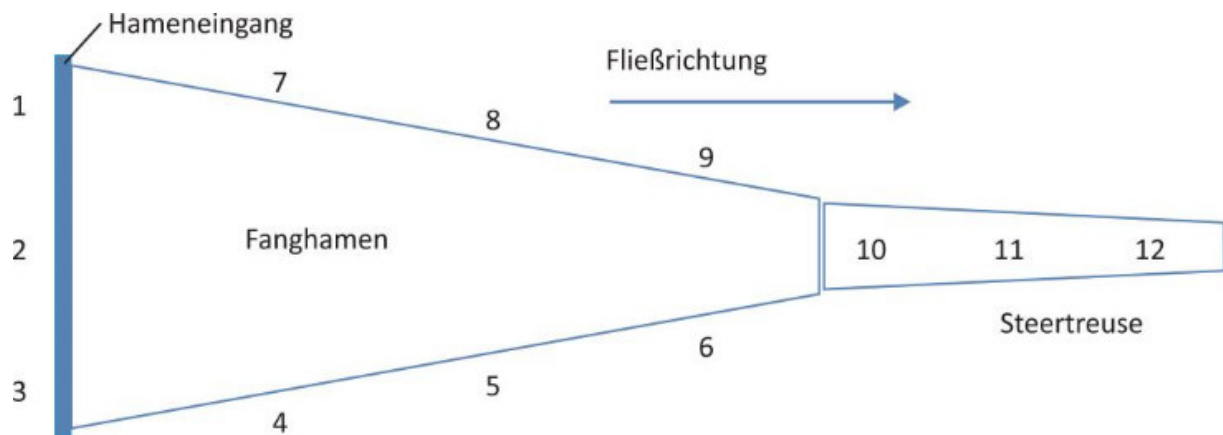


Abbildung 35 Schematische Skizze der Messpunkte (1–12) für die Strömungsmessungen am Fanghamen. An den Messpunkten 1–3 und 10–12 wurde dreimal täglich gemessen. An den Messpunkten 4–9 wurde einmal täglich jeweils eine Messung am unteren Hamenende und 10 cm unter der Wasseroberfläche durchgeführt.

6.10. Messung abiotischer Parameter mittels Sensorfisch

Um die physikalischen Bedingungen während der Turbinenpassage und alternativer Abstiegskorridore zu messen, wurde der sogenannte Sensorfisch, ein autonomes Messgerät, herangezogen (Deng et al. 2007a, Deng et al. 2014). Der Sensorfisch hat einen Durchmesser von 24,5 mm und eine Länge von 90 mm. Er wiegt 42 g und schwimmt im Süßwasser frei in der Wassersäule (Abbildung 36). Die Sensoren im Gerät messen die lineare Beschleunigung in drei Richtungen (hoch-runter, vor-zurück, seitwärts), die Geschwindigkeit in drei Winkelrichtungen (schwanken, drehen, gieren) sowie den absoluten Druck und die Temperatur bei einer Frequenz von 2048 Hz. Die Analyse dieser Daten lässt Rückschlüsse auf den Weg des Sensorfisches durch die Abstiegskorridore zu. Ebenso lassen sich daraus mögliche signifikante Ereignisse wie Druckabfälle, Kollisionen, Beschleunigungen und starke Turbulenzen identifizieren. Alle verwendeten Sensorfische wurden zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme kalibriert, um relative Fehler der linearen Beschleunigungs- sowie der Geschwindigkeitsmessung unter 5% zu halten. Auch die Drucksensoren wurden zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme kalibriert und anschließend in einer Druckkammer mit bekanntem Druck getestet. Der akzeptable Fehler belief sich auf $\pm 13,8$ mbar. Die Sensorfische wurden, mit Ausnahme des Schachtkraftwerks, wo die Zugabe direkt in den Turbinenschacht erfolgte, direkt vor jeder Turbine in das Oberwasser eingesetzt. Zudem wurden die alternativen Abstiegskorridore in Eixendorf (oberflächennahes Abstiegsfenster mit Fischrutsche), Großweil (oberflächen- und sohltnahes Abstiegsfenster, angehobenes Segmentschütz, Klappenwehr mit anschließender rauen Rampe) und Baierbrunn (raue Rampe) untersucht. Mittels Funksender und aufblasbarem Auftriebskörper (Abbildung 37) konnten die

Sensorfische nach der Turbinenpassage bzw. der Passage der alternativen Abstiegskorridore im Unterwasser wieder geborgen werden. Ein Auftriebskörper besteht aus einem handelsüblichen Luftballon, in den eine Hartgelatine kapsel (Capsulae Operculatae, Größe Nr.00, Pharmapol Arzneimittelvertrieb-GmbH, Dägeling, Deutschland) gesteckt wird. Die Hartgelatine kapsel war zu gleichen Teilen mit Natriumhydrogencarbonat (NaHCO_3) und Citronensäure-Pulver vollständig gefüllt ($0,93 \text{ cm}^3$). Unmittelbar vor dem Einsatz wurden 7 mL Wasser in den Auftriebskörper injiziert und die Auftriebskörper anschließend an den Sensorfischen fixiert. Die Hartgelatine kapsel löste sich langsam auf und führte dadurch zu einer verzögerten Reaktion von Wasser mit den trockenen Pulvern. Dies führte dazu, dass Kohlendioxid austritt und sich der Auftriebskörper damit füllt. Die Sensorfische wurden im Unterwasser des Kraftwerks entweder in der Steertreuse des installierten Hamens oder mittels Schlauchboot und Kescher geborgen. Direkt im Anschluss konnten die erhobenen Daten des Sensorfisches auf einen PC übertragen und analysiert werden.

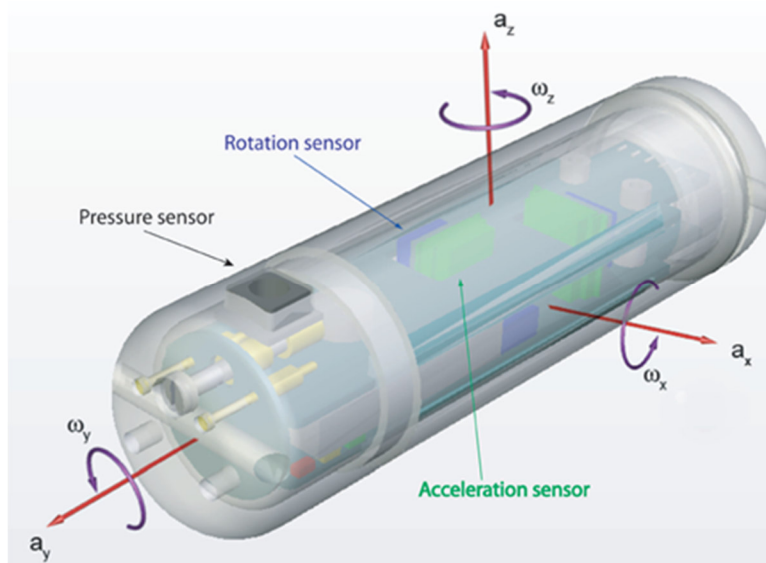


Abbildung 36 Sensorfisch mit den drei verschiedenen Messachsen (x, y und z) entlang derer Beschleunigung (a) und Rotation (ω) gemessen werden. Ebenfalls sind die verschiedenen Sensoren gekennzeichnet: Pressure sensor = Drucksensor, Rotation sensor = Rotationssensoren, Acceleration Sensor = Beschleunigungssensoren (Quelle: Deng et al. 2007a).



Abbildung 37 Am Sensorfisch angebrachter Auftriebskörper (gelb) unmittelbar vor dem Einsatz (links) und vollständig gefüllt nach der Bergung (rechts).

Die Untersuchungen an den beiden VLH-Turbinen an der Iller, der Wasserkraftschnecke am Heckerwehr und der Kaplan-Rohrturbine in Baiersdorf-Wellerstadt wurden in Kooperation mit Wissenschaftlern vom Port Stephens Fisheries Institute, New South Wales Department of Industry, Australien vom 25.09.2016 bis 01.10.2016 durchgeführt (Dr. Craig Boys, Dr. Brett Pflugrath; Boys et al. 2018). Im Rahmen des Ergänzungsprojekts wurden zusätzliche Sensorfisch-Untersuchungen am VLH-Standort in Baierbrunn, am Schachtkraftwerk in Großweil, an der Kaplan-Rohrturbine und den Wasserkraftschnecken in Höllthal sowie am beweglichen Kraftwerk in Eixendorf durchgeführt.

An den Standorten Baiersdorf-Wellerstadt, Heckerwehr, Au, Baierbrunn, Höllthal, Eixendorf und Großweil wurden insgesamt 497 Sensorfisch-Durchläufe mit Turbinenpassage durchgeführt, wovon 354 zu verwertbaren Daten führten. An den alternativen Abstiegskorridoren in Baierbrunn (raue Rampe), Eixendorf (oberflächennahes Abstiegsfenster) und Großweil (oberflächen- und sohlnahes Abstiegsfenster, angehobenes Segmentschütz, Klappenwehr mit rauer Rampe) erfolgten 169 Sensorfisch-Durchgänge, von denen 146 Datensätze ausgewertet werden konnten (Tabelle 5).

Tabelle 5 Sensorfisch-Versuchsdurchgänge und verwertbare Datensätze der Turbinenpassage und der Passage alternativer Abstiegskorridore an den Standorten Baiersdorf-Wellerstadt, Heckerwehr, Au, Baierbrunn, Höllthal, Eixendorf und Großweil.

Standort	Zugabestelle	Last	Versuchs- durchgänge	Verwertbare Datensätze
Baiersdorf- Wellerstadt	Kaplan-Rohrturbine (orografisch links)	niedrig	26	16
Heckerwehr	Wasserkraftschnecke	niedrig	23	17
		hoch	23	15
Au	VLH-Turbinen (orografisch links und rechts)	niedrig	30	19
		hoch	28	15
Baierbrunn	VLH-Turbine	niedrig	26	23
		hoch	29	25
	raue Rampe		40	29
Höllthal	Kaplan-Rohrturbine	niedrig	18	9
		hoch	21	13
	Wasserkraftschnecken (orografisch links und rechts)	niedrig	26	26
		hoch	35	34
Eixendorf	Kaplan-Rohrturbine	niedrig	33	28
		hoch	33	26
	oberflächennahes Abstiegsfenster		29	24
Großweil	Kaplan-Rohrturbine (orografisch rechts)	niedrig	66	27
		hoch	80	61
	Segmentschütz (orografisch rechts)			
	oberflächennahes Abstiegsfenster		35	35
	sohlnahes Abstiegsfenster		36	29
	Spülvorgang (Hub 35 cm)		7	7
	Klappenwehr mit rauer Rampe		22	22
Summe			666	500

Die Druckdaten und die Beschleunigungsdaten wurden in Datenprofilen ausgewertet. Diese Datenprofile wurden, je nach Zone in der sich der Sensorfisch während der Turbinenpassage aufhielt, in verschiedene Segmente unterteilt. Für die Auswertung der Druckdaten wurde das Verhältnis des niedrigsten Drucks während der Turbinenpassage (Nadir-Druck) zum Akklimatisierungsdruck unmittelbar vor der Turbinenpassage berechnet (= Druckveränderungsrate). Dabei ist der Akklimatisierungsdruck vor der Turbinenpassage von der Wassertiefe abhängig, in der sich der Fisch vor der Turbinenpassage aufhielt und sich dieser entsprechend angepasst hat. D.h. je größer diese Wassertiefe und je niedriger der Tiefstdruck während der Turbinenpassage ist, desto höher ist die Druckänderung. Zudem wurden die Dekompressionsraten (= Druckabfall pro Zeiteinheit in kPa/s) berechnet. Eine hohe Dekompressionsrate bedeutet, dass der Druckabfall innerhalb sehr kurzer Zeit erfolgt, was in der Regel das Risiko für Barotrauma-Verletzungen erhöht, da den betroffenen Fischen weniger Zeit für einen potenziellen Druckausgleich bleibt.

Die Ermittlung von Scherspannungen und Kollisionseignissen aus Beschleunigungs- und Rotationsdaten erfolgte nach Deng et al. (2007a). Wenn der Sensorfisch mit harten Oberflächen kollidierte oder einer starken Scherspannung ausgesetzt war, zeigt sich ein hoher Amplitudenausschlag in den zeitlichen Aufzeichnungen der Beschleunigungs- und Rotationsgeschwindigkeitsdaten. Alle Ereignisse mit einem höheren Magnitudenausschlag der Beschleunigung als 10 g wurden als relevantes Ereignis klassifiziert. Zusätzlich wurden drei weitere Klassen für potenzielle Verletzungen eingerichtet ($|a| = 25, 50$ und 95 g). Diese Klasseneinteilung basiert auf bisherigen Sensorfisch-Beprobungen und Beobachtungen von juvenilen Lachsen in Laborversuchen (Deng et al. 2005, Deng et al. 2007b). Die Intensität eines Ereignisses wurde als leicht ($25\text{ g} \leq |a| \leq 50\text{ g}$), mittel ($50\text{ g} < |a| \leq 95\text{ g}$) und schwer ($|a| > 95\text{ g}$) festgelegt. Um die Werte der Beschleunigung besser interpretierbar zu machen, sollen folgende Werte eine Orientierung geben: Beim Schaukeln auf einer Kinderschaukel erfährt der Mensch eine Beschleunigung von ca. 2,5 g, bei 5–6 g tritt beim Menschen die Bewusstlosigkeit ein, bei 100 g liegt die maximale Beschleunigung, die der Mensch ohne schwere Verletzungen überstehen kann. Diese Werte erlauben eine ungefähre Einordnung der Stärke der Kräfte, die der Fisch bei der Passage der verschiedenen Wasserkraftturbinen erfährt.

Kollisions- und Scherereignisse wurden ebenso differenziert. Hierfür wurde die Tatsache, dass Kollisionseignisse einen wesentlich geringeren/schmaleren Spitzenausschlag in Beschleunigung und Rotationsgeschwindigkeit ausmachen als Scherereignisse, herangezogen (Deng et al. 2007c). Die Dauer des Spitzenausschlags wurde definiert nach der Dauer einer Beschleunigung mit 70% des Spitzenwertes sowie folgender Bedingungen für Kollisions- und Scherereignisse: 1) das Ereignis war eine Kollision, wenn der Spitzenwert kürzer als 0,0075 Sekunden andauerte; 2) das Ereignis wurde durch Scherkräfte verursacht, wenn der Spitzenwert länger als 0,0075 Sekunden andauerte. Druck- und Rotationsmessungen wurden in diesem Fall als Validierung der Klassifikation herangezogen.

6.11. Sonaruntersuchungen zum Fischverhalten an Wasserkraftanlagen

Erkenntnisse aus Verhaltensuntersuchungen von Fischen vor einer Turbinenpassage bergen erhebliches Potenzial, zur fischverträglicheren Optimierung der Anlagen beizutragen (Vowles et al. 2014). Grundsätzlich können diese Verhaltensuntersuchungen durch verschiedene Methoden abgedeckt werden. Die Sonartechnik ist für die Erfassung von Fischbewegungen vor Wasserkraftanlagen besonders gut geeignet, da sie unabhängig von Wassertrübung,

Lichtverhältnissen sowie Wassertiefe (bis 300 m) arbeitet und nach derzeitigem Kenntnisstand keine Scheuchwirkung auf die Fische ausübt. Das Konzept und die Funktionalität von aktuellen Fischschutzeinrichtungen basiert derzeit oftmals auf verhaltensbiologischen Erkenntnissen unter Laborbedingungen und auf Annahmen und Erfahrungen aus der Fischerei und dem jahrelangen Betrieb von Wasserkraftanlagen. Fische können jedoch unter natürlichen Bedingungen ein differenziertes Verhalten zeigen. Um diese Lücke zwischen Labor und Realität zu schließen, werden Systeme benötigt, die im Feld unter realen Bedingungen das Fischverhalten aufzeichnen können. Dafür stehen drei Typen von hydroakustischen Systemen zu Verfügung. Sogenannte Single-Beam Sonare oder auch Echolote sind die am weitesten verbreiteten Systeme. Hier wird ein Schallsignal vertikal durch die Wassersäule geschickt und das Echo wieder vom Geber aufgefangen. Da es sich um nur einen Schallimpuls handelt, kann dieses System Objekte oder Fische nicht genau lokalisieren. Die Information beschränkt sich damit auf die Erkenntnis, dass sich das Objekt unterhalb des Gebers in einer bestimmaren Tiefe befindet. Die zweite Generation von hydroakustischen Systemen stellen die Split-Beam Sonare dar. Hier werden vier oder mehrere Schallimpulse vertikal durch die Wassersäule geschickt, was eine grobe Lokalisierung von Objekten zulässt und somit mehr Informationen als das Single-Beam Sonar liefert. Um noch präzisere Aussagen über Position, Länge, Geschwindigkeit und Orientierung von Objekten zu ermöglichen, werden sogenannte Multibeam Sonare verwendet (Abbildung 38). Hier wird im Gegensatz zu den anderen Sonartypen eine Vielzahl von Schallimpulsen durch die Wassersäule geschickt, was die Auflösung und die Fülle an Informationen erheblich erhöht. Diese Technologie erlaubt es, das Fischverhalten vor Fischschutzeinrichtungen zu analysieren und mögliche Verhaltensmuster aufzudecken, was zu einer Verbesserung der Verträglichkeit in Bezug auf Fische an Wasserkraftanlagen beitragen kann. Studien zum Fischmonitoring an Wasserkraftwerken wurden bereits mit Geräten der früheren Sonartechnik-Generation (DIDSON) durchgeführt (z.B. Johnson et al. 2012, Grote et al. 2014). In diesen Studien hat sich gezeigt, dass die Unterwassersonartechnik prinzipiell hervorragend geeignet ist, um individuelles Fischverhalten im Bereich von Wasserkraftanlagen zu untersuchen. Allerdings handelt es sich überwiegend um Einzelfallstudien mit relativ geringer methodischer Standardisierung.

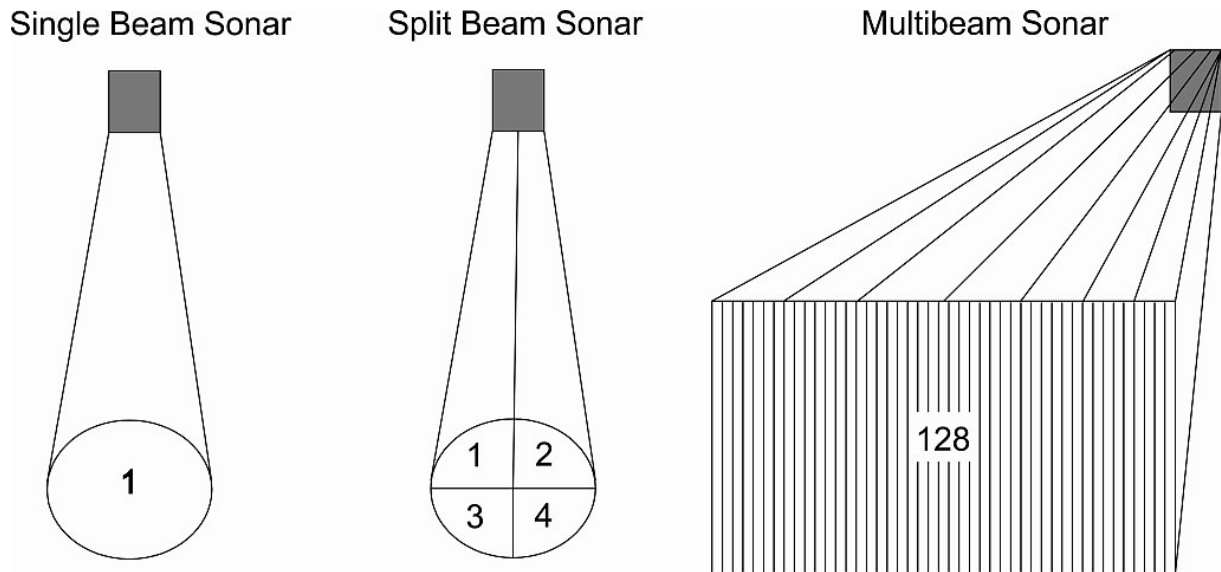


Abbildung 38 Schematische Darstellung der drei verschiedenen Sonartypen. Die Zahlen stehen für die Anzahl an Schallimpulsen, die von dem Geber gesendet werden. Single-Beam Sonar = Einzelnes vertikales Schallsignal; Split-Beam Sonar = Mehrere vertikale Schallsignale, in diesen Fall vier; Multibeam Sonar = Vielzahl an horizontalen Schallsignalen, in diesen Fall 128.

Der ARIS Explorer 3000 (Sound Metrics, Bellevue, WA 98004, USA) ist eines der aktuellsten Modelle dieses Sonartypes. Der ARIS Explorer 3000 arbeitet mit 128 Schallimpulsen, mit einem horizontalen Winkel von jeweils $0,25^\circ$ und einem vertikalen Winkel von 14° . Damit ist es möglich, einen Kegel von maximal 20 m Länge und einen Winkel von 28° zu erzeugen. Als dual-frequentes Sonar arbeitet es mit zwei verschiedenen Frequenzen. Für die Identifizierung von Strukturen in unmittelbarer Nähe (≤ 5 m) nutzt es eine Frequenz von 3,0 MHz und erzeugt so Bilder mit einer höchst möglichen Auflösung von bis zu 3 mm. Alternativ lässt sich das Gerät für die Erfassung von weiter entfernten Strukturen (bis zu 20 m) nutzen, wobei dadurch die Auflösung reduziert wird. Der ARIS Explorer 3000 erzeugt Videos annähernd in Echtzeit (max. 15 Bilder/s).

Zum präzisen Einrichten und eventuellen Korrigieren des Betrachtungswinkels unter Wasser ist es unerlässlich, dass das Gerät in alle Richtungen frei bewegbar ist. Dazu wurde vom Hersteller ein Rotatorarm (ARIS Rotator AR2) entwickelt, welcher feinste Justierungen des Winkels und Bildausschnittes zulässt. Für den flexiblen Einsatz an verschiedenen Kraftwerksstandorten in diesem Projekt wurde der Rotatorarm als zusätzliche Ausstattung angeschafft. Damit das Sonar samt Rotator sicher das Fischverhalten vor Wasserkraftanlagen untersuchen kann, wurden am Lehrstuhl drei Module, ein stationäres, ein Boot-basiertes und ein Ponton-basiertes, entwickelt (Abbildung 39, Abbildung 40). Das stationäre Modul besteht aus einem Stahlhalter und einem Arm, an dem das Sonar befestigt werden kann. Dadurch lässt sich das Sonar in verschiedene Wassertiefen einbringen und ist sicher an Betonwänden

der Wasserkraftanlage befestigt (Egg et al. 2018). Da sich schnell herausstellte, dass das stationäre Modul aufgrund der Bauweise der meisten Kraftwerke nicht überall einsatzfähig ist, wurden zusätzlich zwei weitere Module am Lehrstuhl entwickelt. Das mobile Modul I besteht aus einer Stahlbefestigung, die fest mit einem Boot (Carolina Skiff J14, Carolina Skiff LLC, USA) verbaut ist und kann dadurch uneingeschränkt auf dem gesamten Fluss eingesetzt werden. Zusätzlich ist es mit diesem Modul möglich, Sonaraufnahmen während einer Bootsbefahrung durchzuführen.

Um das Sonar auch an kleinen wasserbaulichen Strukturen flexibel nutzen zu können, wurde ein zweites mobiles Modul (Mobiles Modul II) am Lehrstuhl entwickelt. Das Modul besteht aus einem Edelstahlrahmen, der auf einem Schwimmponton (Abbildung 40) befestigt wird. Das Sonar wird wie bei Modul I an einem Ausleger befestigt, der es ermöglicht, das Sonar in unterschiedliche Wassertiefen zu setzen. Durch die kompaktere Bauweise ist es möglich, das Modul II mit Seilen abzuspannen und die Position ohne großen Aufwand zu verändern (Egg et al. 2017).



Abbildung 39 Links: Stationäres Modul mit Halter und Befestigungsarm; Rechts: Mobiles Modul I befestigt auf einem Carolina Skiff J14.



Abbildung 40 Mobiles Modul II vor der Wasserkraftanlage Lindesmühle/Fränkische Saale in Bad Kissingen.

6.12. Datenanalyse und Statistik Projektteil A

6.12.1. Fallzahlplanung

Vor Durchführung dieses Projekts lagen noch keine statistisch auswertbaren, aus standardisierten Fischzugaben generierten Daten zur Schädigung von Fischen an innovativen oder konventionellen, mit innovativen Techniken nachgerüsteten Wasserkraftanlagen vor. Die einzige international nach Peer-Review System veröffentlichte Studie, in der standardisierte Fischzugaben durchgeführt und die Fische mittels netzbasierter vollquantitativer Befischungsmethodik abgefangen wurden, war eine Untersuchung von Dubois & Gloss (1993) an einer Kaplan-Turbine in den USA. Diese Studie war auch die einzige vergleichbare Studie, in der die Ergebnisse durch wiederholte Versuchsdurchgänge und entsprechende Datenauswertung statistisch abgesichert wurden. In allen übrigen verfügbaren Studien zu standardisierten Fischzugaben an Kraftwerksanlagen wurden alle verwendeten Fische in einem Durchgang durch die Turbine geschickt und lediglich Mortalitätsraten in % errechnet (z.B. Lagarrigue et al. 2008, Lagarrigue & Frey 2010, Schneider et al. 2012).

Für die statistische Fallzahlplanung musste ermittelt werden, wie groß die von den innovativen Anlagen verursachte Mortalität im Vergleich zu einer nicht von Wasserkraftturbinen beeinträchtigten Population ist. Als Referenzzustand wurde daher eine zufällige Mortalität in der unbehandelten Referenzgruppe von 0,1% angenommen. Für die biologisch relevante Differenz wurde von der zu erwartenden Mortalitätsrate der Technologie mit der geringsten erwarteten Mortalität ausgegangen (VLH-Turbine und Wasserkraftschnecke, ca. 3% nach Lagarrigue et al. 2008, Lagarrigue & Frey 2010 und Ebel 2013). Daraus ergab sich eine biologisch relevante Differenz von 2,9%. Dies entspricht einer geringen Effektstärke nach Cohen (Blomberg 2014).

Um bei der späteren Datenanalyse die prozentuale Mortalität zwischen der behandelten Gruppe und der Referenzgruppe statistisch zu vergleichen, ist ein Verhältnistest (Proportion-Test) ideal geeignet. Im Statistikprogramm R (R Core Team 2017) wurde daher mit der Funktion „power.prop.test“ aus dem Paket „stats“ (Blomberg 2014) eine Poweranalyse für die spätere Verwendung des Proportion-Tests durchgeführt. Für die Poweranalyse wurde als Mortalität für die Referenzgruppe 0,1% angenommen, für die behandelte Gruppe (Turbinenmortalität, fangbedingte Mortalität) wurden 3% angenommen. Die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler I. Art (Signifikanzniveau α) wurde mit 5% angesetzt, für einen Fehler II. Art mit 20%. Daraus resultiert eine statistische Power von 80%. Die Poweranalyse für den Proportion-Test lieferte folgende Ergebnisse:

```
> power.prop.test(p1=0.001, p2=0.03, power=0.8, alternative=one.sided)
Two-sample comparison of proportions power calculation

      n = 223.3134
      p1 = 0.001
      p2 = 0.03
sig.level = 0.05
power = 0.8
alternative = one.sided
NOTE: n is number in *each* group
```

Für eine statistische Nachweisbarkeit der Effekte mussten also mindestens 223 Versuchstiere, d.h. 74,3 Fische pro Durchgang bei drei geplanten Durchgängen, verwendet werden. Da eine exakte Übertragbarkeit der Effektstärke von Standorten in Frankreich und anderen Standorten in Deutschland nicht sicher gewährleistet war, wurde für die beantragte Tierzahl zusätzlich ein Sicherheitsfaktor von 5% eingerechnet. Für die exakte Größe eines solchen Faktors gibt es bislang keine wissenschaftlich publizierten Zahlen, weshalb hier auf mündliche Experteneinschätzungen der Mitglieder des Forums „Fischschutz & Fischabstieg“ und der Mitglieder des Sachverständigenkuratoriums für Fischerei zurückgegriffen wurde. Unter Berücksichtigung der hohen Variabilität der Ergebnisse bezüglich anderer Turbinentypen wird die Einbeziehung eines solchen Faktors in der Größenordnung von 5% als wichtig angesehen.

$$74,33 * 1,05 \text{ (Sicherheitsfaktor)} = 78,05 \rightarrow 79 \text{ Fische pro Durchgang}$$

Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass bei manchen Versuchsteilen nur mit einer maximalen Wiederfangrate der zugegebenen Fische von ca. 77% gerechnet werden konnte (Fluchtmöglichkeit der Tiere ins Oberwasser bei Zugabe oberhalb der Turbine, vgl. Schneider et al. 2012).

$$79/77 * 100 \text{ (Kompensation für die Wiederfangrate)} = 102,5 \rightarrow 103 \text{ Fische pro Durchgang}$$

Somit ergaben sich bei einer Wiederfangrate von 77% (vgl. Schneider et al. 2012, Lagarrigue & Frey 2010) 103 Fische pro Versuchsdurchgang (Tabelle 6). Da unterschiedliche Tierzahlen in den Fangeinrichtungen und Hälterungssystemen zu einer Veränderung der Versuchsergebnisse auf Grund dichteabhängiger Effekte führen können (siehe Schneider et al. 2012), musste im Sinne vergleichbarer Ergebnisse für alle Anlagentypen dieselbe Tierzahl verwendet werden, auch wenn in einzelnen Versuchsteilen Wiederfangraten von bis zu 98% erwartet wurden (Zugabe direkt in die Turbine).

Um sicherzustellen, dass die für die primäre Fragestellung berechneten Fallzahlen auch für die Beantwortung der weiterführenden Fragestellungen zur individuellen Schädigung der Fische (Varianzanalyse zum Vergleich der mittleren Verletzungsintensität der einzelnen Fische zwischen den Gruppen) und zu Zusammenhängen mit der Fischgröße (Korrelationsanalysen) ausreichend ist, wurden weitere Poweranalysen durchgeführt. Da die Analysen der Individualschädigung Pilotcharakter haben und zu Projektbeginn noch keine Vorkenntnisse dazu vorlagen, wurde in den Poweranalysen entsprechend der geringen Mortalitätsrate aus Frankreich (Lagarrigue et al. 2008) überprüft, ob mit der aus der primären Fragestellung resultierenden Tierzahl eine geringe Effektstärke nach Cohen mit der gewünschten statistischen Power von 0,8 nachgewiesen werden kann. Die Poweranalysen für ANOVA und Korrelationsanalysen wurden mit den Funktionen „pwr.anova.test“ und „pwr.r.test“ aus dem Paket „pwr“ (Champely 2006) der Statistiksoftware R durchgeführt:

```
> pwr.anova.test (n=223,power=0.8,k=4)
      Balanced one-way analysis of variance power calculation
      k = 4
      n = 223
      f = 0.1108005
      sig.level = 0.05
      power = 0.8
NOTE: n is number in each group
```

Effektstärken nach Cohen bei ANOVA: 0.1 = gering, 0.25 = mittel, 0.4 = hoch

f = Effektstärke

Sig.level = Wahrscheinlichkeit Type I Error

Power = 1-Wahrscheinlichkeit Type II Error

Anzahl Gruppen (k) = 4:

- Zugabe direkt in die Turbine
- Zugabe oberhalb Rechen
- Zugabe direkt in den Hamen
- Kontrolle (nur Hälterung)

```
> pwr.r.test(n=223,power=0.8)
approximate correlation power calculation (arctangh transformation)
      n = 223
      r = 0.186304
sig.level = 0.05
  power = 0.8
alternative = two.sided
```

Effektstärken nach Cohen bei Korrelation: 0.1 = gering, 0.3 = mittel, 0.5 = hoch

r = Effektstärke (hier: Korrelationskoeffizient)

Power = 1-Wahrscheinlichkeit Type II Error

Sig.level = Wahrscheinlichkeit Type I Error

Die Ergebnisse beider Analysen zeigten, dass die für die primäre Fragestellung (Vergleich von Mortalitätsraten zwischen Behandlung und Kontrolle) ermittelten Tierzahlen unter der Annahme einer geringen Effektstärke auch für die Beantwortung der weiterführenden Fragestellungen ausreichend sind. Durch diese mathematische Fallzahlplanung mit Hilfe einer Poweranalyse konnte sichergestellt werden, dass die minimal notwendige Anzahl an Versuchstieren verwendet wird, die für eine statistisch abgesicherte Beantwortung der zu untersuchenden Fragestellungen notwendig war.

Tabelle 6 Darstellung der Anzahl an Fischen in den verschiedenen Versuchsgruppen und Wiederholungen an den unterschiedlichen Anlagentypen sowie der Gesamtzahl an Fischen aufgeschlüsselt nach Anlagentyp, Art und Standort.

Anlagentyp	Versuchsblock	# Versuchsgruppen	Anzahl	Gruppen- größe	Tierzahl	Anzahl	Gruppen- größe	Tierzahl	Tierzahl pro Art und Standort	Anzahl Standorte	Gesamt- tierzahl pro Art	Anzahl der Arten	Gesamt- tierzahl
Vorversuch	Versuchsblock 1	4	3	103	1.236	3	79	237					
	Versuchsblock 2	6	3	103	1.854	3	79	237					
	Versuchsblock 3	2	3	103	618	3	79	237	4.419	1	4.419	8	35.352
VLH-Turbine	Versuchsblock 1	3	3	103	927	3	79	237					
	Versuchsblock 2	3	3	103	927	3	79	237					
	Versuchsblock 3	3	3	103	927	3	79	237	3.492	2	6.984	8	55.872
Bewegliches Kraftwerk	Versuchsblock 1	5	3	103	1.545	3	79	237					
	Versuchsblock 2	5	3	103	1.545	3	79	237					
	Versuchsblock 3	5	3	103	1.545	3	79	237	5.346	2	10.692	8	85.536
Wasserkraftschnecke	Versuchsblock 1	3	3	103	927	3	79	237					
	Versuchsblock 2	3	3	103	927	3	79	237					
	Versuchsblock 3	3	3	103	927	3	79	237	3.492	2	6.984	8	55.872
Schachtkraftwerk	Versuchsblock 1	5	3	103	1.545	3	79	237					
	Versuchsblock 2	5	3	103	1.545	3	79	237					
	Versuchsblock 3	5	3	103	1.545	3	79	237	5.346	1	5.346	8	42.768
Ohne Bypassrohr	Versuchsblock 1	5	3	103	1.545	3	79	237					
	Versuchsblock 2	5	3	103	1.545	3	79	237					
	Versuchsblock 3	5	3	103	1.545	3	79	237	5.346	1	5.346	8	42.768
Mit Bypassrohr	Versuchsblock 1	7	3	103	2.163	3	79	237					
	Versuchsblock 2	7	3	103	2.163	3	79	237					
	Versuchsblock 3	7	3	103	2.163	3	79	237	7.200	1	7.200	8	57.600
gesamt											46.971		375.768

6.12.2. Berechnung von Mortalitätsraten

Zur Berechnung der Mortalitätsraten aus den Daten des vorliegenden Projekts gibt es aufgrund der Untersuchung verschiedener Fischarten und Lastzustände grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten, die im Folgenden näher beschrieben werden und in den Ergebnisbänden der Standorte (Bände 3–10) als mögliche Szenarien dargestellt sind. Um die artspezifische Mortalität über alle getesteten Lastzustände zu ermitteln, kann diese z.B. (i) für jede Last separat berechnet und dann gemittelt werden, oder (ii) basierend auf dem Anteil an toten Individuen am Gesamtfang über alle untersuchten Lastzustände hinweg berechnet werden. Ähnliches gilt für den Umgang mit den Daten zu den einzelnen Fischarten für die Berechnung einer fischartenübergreifenden Mortalität. Weiterhin kann es insbesondere bei sehr geringen kraftwerksbedingten Effekten und limitiertem Wiederfang dazu kommen, dass die Mortalität in der Kontrolle (Versuchsgruppe Hamen) höher ist als in den Versuchsgruppen Turbine & Rechen oder Turbine. Dies führt bei einer streng mathematischen Berücksichtigung der fangbedingten Effekte zu negativen Werten und wirft die Frage auf, wie mit diesen bei der weiteren Mittelwertbildung umgegangen werden soll. Möglich wäre zum einen, (iii) diese einfach streng mathematisch weiter zu verrechnen. Interpretiert man einen stärkeren Effekt in der Kontrolle gegenüber der eigentlichen Behandlung als nicht nachweisbaren Effekt der Behandlung, so könnte man diese Werte auch (iv) gleich 0 setzen. Als weitere Interpretation wäre jedoch auch möglich, dass in diesen Fällen methodische Probleme vorliegen (z.B. zum Nachweis der vorliegenden Effektstärke eine zu geringe Stichprobenzahl) und Fischarten mit negativen Werten daher bei der Gesamtbetrachtung (v) unberücksichtigt bleiben sollten.

Da bislang keiner der möglichen Berechnungswege als nationaler oder internationaler Standard etabliert und anerkannt ist, wurde die Fragestellung im Dezember 2019 beim „Forum Fischschutz“ in Form eines Workshops mit den führenden Experten aus dem deutschsprachigen Raum auf dem Gebiet Fischabstieg und Fischschutz diskutiert. Die Diskussionsrunde bestätigte die bereits aus der projektbegleitenden Arbeitsgruppe vorgeschlagene Variante, verschiedene Berechnungswege durchzuführen und die resultierenden Mortalitätsraten in Diagrammen als „Szenarien“ eines möglichen Ergebnisbereichs darzustellen. Man einigte sich allerdings darauf, von den oben beschriebenen Berechnungswegen, auf die (iii) streng mathematische Weiterverrechnung von negativen Teilergebnissen zu verzichten. Dieses Diskussionsergebnis ist auch im Ergebnispapier des Workshops festgehalten (Naumann et al. 2019).

Generell wurden alle Berechnungen auf Basis der wiedergefangenen Fische durchgeführt, da eine gesicherte Aussage über den Verbleib der nicht wiedergefangenen Tiere nicht möglich ist. Dieses Vorgehen folgt der Annahme von Dubois & Gloss (1993), dass die Mehrzahl der Fische, die nach der Turbinenpassage nicht wiedergefangen wurde, vorher im Oberwasser entkommen ist, bevor die Wasserkraftanlage passiert wurde und entspricht auch den Empfehlungen in der „Arbeitshilfe zur standörtlichen Evaluierung des Fischschutzes und Fischabstieges“ nach Schmalz et al. (2015). Die Benennung der verschiedenen Mortalitätsraten (MR) erfolgte daher zwar in Anlehnung an Schmalz et al. (2015), muss jedoch im Detail abweichen, um den projektspezifischen Anforderungen gerecht zu werden, da z.B. eine Untersuchung verschiedener Fischarten und Lastzustände in den Berechnungsangaben der Arbeitshilfe nicht berücksichtigt ist. Im Folgenden wird näher beschrieben, wie die verschiedenen „Mortalitätszenarien“ in den Standortbänden 3–10 berechnet werden ().

Um einen Überblick zu erhalten, wie stark Effekte der Turbinenpassage über alle Fischarten hinweg im Vergleich zu den handling- und fangbedingten Effekten bei den verschiedenen Lastzuständen waren, wurde in einem ersten Schritt für jeden Standort artübergreifend die versuchsgruppen- und lastzustandspezifische Mortalitätsrate (MR) für die Versuchsgruppen Hamen (= Kontrolle) und Turbine & Rechen getrennt berechnet und einander gegenübergestellt. Dabei wurde nach den unten angegebenen Formeln zum einen (i) über alle Arten hinweg der Anteil toter Individuen am Gesamtfang pro Lastzustand ($MR_{\%}$) berechnet, zum anderen (ii) der arithmetische Mittelwert (MR_{MW}) aus den versuchsgruppen- und lastzustandspezifischen Mortalitätsraten der einzelnen Fischarten gebildet (MR_i).

$$MR_{\%} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (N_{i0} + N_{i96})}{\sum_{i=1}^n N_{i\text{ges}}} \right] \times 100$$

$$MR_{MW} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{N_{i0} + N_{i96}}{N_{i\text{ges}}} \right) \times 100}{n}$$

oder (Kurzform):

$$MR_{MW} = \frac{\sum_{i=1}^n MR_i}{n} \quad \text{mit} \quad MR_i = \left(\frac{N_{i0} + N_{i96}}{N_{i\text{ges}}} \right) \times 100$$

MR = Mortalitätsrate

MW = Mittelwert

% = prozentualer Anteil

N_{i0} = Anzahl der sofort (0 h) nach der Turbinenpassage verstorbenen Individuen einer Art bei einem spezifischen Lastzustand in einer bestimmten Versuchsgruppe

N_{i96} = Anzahl der verzögert nach 96 h verstorbenen Individuen einer Art bei einem spezifischen Lastzustand in einer bestimmten Versuchsgruppe

$N_{i\text{ges}}$ = Gesamtzahl aller wiedergefangenen Individuen einer Art bei einem spezifischen Lastzustand in einer bestimmten Versuchsgruppe

n = Anzahl der untersuchten Fischarten

Im zweiten Schritt wurden die untersuchten Lastzustände miteinander verrechnet und die Mortalität der Versuchsgruppe Turbine & Rechen um die Mortalität der Versuchsgruppe Hamen (= Kontrolle) bereinigt. Entsprechend den Empfehlungen der Arbeitsgruppe DWA WW 8.2 und in Anlehnung an Dubois & Gloss (1993) erfolgte dies indirekt, indem die Überlebensrate der Versuchsgruppe Turbine & Rechen durch die Überlebensrate der Versuchsgruppe Hamen dividiert wird. Da beide Mortalitätsraten nicht unabhängig sind, darf die Korrektur nicht durch Subtraktion der Mortalität der Versuchsgruppe Hamen von der Mortalität der Versuchsgruppe Turbine & Rechen erfolgen. Für die Berechnungen wurde die vereinfachte Grundannahme getroffen, dass Fische nach vorheriger Turbinenpassage mit der gleichen Wahrscheinlichkeit im Hamen durch fangbedingte Effekte sterben, wie Fische ohne vorherige Turbinenpassage nach direkter Zugabe in den Hamen. Ohne diese Grundannahme, die vermutlich nicht exakt den realen Bedingungen entspricht, ist jedoch eine mathematische Korrektur um fangbedingte Effekte nicht möglich. Die sofortige und verzögerte Mortalitätsrate der Versuchsgruppe Vorschädigung (= Kontrolle) wurde grundsätzlich nicht separat in die Berechnungen einbezogen, da diese in allen Versuchsgruppen und damit auch in der sofortigen und verzögerten Mortalitätsrate der Versuchsgruppe Hamen enthalten ist und mit der Korrektur um diese bereits mit berücksichtigt wird (alle Fische, die im Versuch verwendet wurden enthalten zwangsläufig bereits die zucht- und transportbedingten Vorschädigungen). Die Berechnungen wurden sowohl für jede Fischart einzeln als auch über alle Fischarten hinweg durchgeführt und im Überblick in einem Diagramm dargestellt. Auch hier ergaben sich wieder die oben bereits beschriebenen Berechnungsmöglichkeiten, welche bei der Darstellung im Diagramm ebenfalls alle berücksichtigt wurden.

Überlebensrate:

$$\ddot{U}R_i = (1 - MR_i) \times 100 \quad \text{ausführlich:} \quad \ddot{U}R_i = \left[1 - \left(\frac{N_{i0} + N_{i96}}{N_{i\text{ges}}} \right) \right] \times 100$$

Artspezifische Mortalitätsrate, gemittelt über beide Lastzustände:

$$MR_{i\text{ MW}} = \left\{ 1 - \left[\left(\frac{\ddot{U}R_{i\text{ T\&R } h}}{\ddot{U}R_{i\text{ HAM } h}} + \frac{\ddot{U}R_{i\text{ T\&R } g}}{\ddot{U}R_{i\text{ HAM } g}} \right) \times \frac{1}{2} \right] \right\} \times 100$$

Mortalitätsrate gemittelt über alle Arten und beide Lastzustände:

$$MR_{\text{ges MW}} = \frac{\sum_{i=1}^n MR_{i\text{ MW}}}{n}$$

oder (ausführlich):

$$MR_{\text{ges MW}} = \left\{ 1 - \left[\left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{\ddot{U}R_{i\text{ T\&R } h}}{\ddot{U}R_{i\text{ HAM } h}} + \frac{\ddot{U}R_{i\text{ T\&R } g}}{\ddot{U}R_{i\text{ HAM } g}} \right) \right) \times \frac{1}{2 \times n} \right] \right\} \times 100$$

Artspezifische Mortalitätsrate, Anteil toter Individuen am Gesamtfang über beide Lastzustände:

$$MR_{i\%} = \left[1 - \left(\frac{\ddot{U}R_{i\text{ T\&R } g+h}}{\ddot{U}R_{i\text{ HAM } g+h}} \right) \right] \times 100$$

oder (ausführlich):

$$MR_{i\%} = \left[1 - \left(\frac{1 - \frac{N_{i0\text{ T\&R } g+h} + N_{i96\text{ T\&R } g+h}}{N_{i\text{ ges T\&R } g+h}}}{1 - \frac{N_{i0\text{ HAM } g+h} + N_{i96\text{ HAM } g+h}}{N_{i\text{ ges HAM } g+h}}} \right) \right] \times 100$$

Mortalitätsrate, Anteil toter Individuen am Gesamtfang über alle Arten und beide Lastzustände:

$$MR_{\text{ges \%}} = \left\{ 1 - \left[\frac{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (N_{i0\text{ T\&R } g+h} + N_{i96\text{ T\&R } g+h})}{\sum_{i=1}^n N_{i\text{ ges T\&R } g+h}}}{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (N_{i0\text{ HAM } g+h} + N_{i96\text{ HAM } g+h})}{\sum_{i=1}^n N_{i\text{ ges HAM } g+h}}} \right] \right\} \times 100$$

$\ddot{U}R$ = Überlebensrate

MR = Mortalitätsrate

MW = Mittelwert

% = prozentualer Anteil

N = Anzahl verstorbener Individuen bei einem spezifischen Lastzustand in einer bestimmten Versuchsgruppe

0 = sofort (0 h) verstorbene Fische

96 = verzögert nach 96 h Hälterung verstorbene Fische

ges = Gesamtzahl aller wiedergefangenen Individuen einer Art bei einem spezifischen Lastzustand in einer bestimmten Versuchsgruppe

n = Anzahl der untersuchten Fischarten

i = Wert für eine spezifische Fischart

$T\&R$ = Versuchsgruppe Turbine & Rechen

HAM = Versuchsgruppe Hamen (= Kontrolle)

g = geringer bzw. niedriger Lastzustand

h = hoher Lastzustand

Zu beachten ist auch, dass alle in Diagrammen und Tabellen dargestellten Mortalitätsraten nicht um eine eventuelle Entlastung durch die Nutzung von Bypässen (Fischpässe, Spülklappen) mit geringerer Mortalität korrigiert sind, da die Ausstattung mit Bypässen und die Akzeptanz bzw. Auffindbarkeit dieser Fischabstiegseinrichtungen zwischen den Standorten sehr unterschiedlich war. Bei einer derartigen Korrektur wären daher die Ergebnisse zu den unterschiedlichen Turbinentechniken nicht mehr vergleichbar.

6.12.3. Univariate Methoden zur Auswertung von Wiederfang, Mortalität, Vitalität und Verletzungsmustern

Über die Berechnung der Mortalitätsraten hinaus erfolgte ein Vergleich der Wiederfangraten, der Mortalitätsraten, der Vitalität sowie der Verletzungsanzahl und -intensität zwischen den verschiedenen Versuchsgruppen und Fischarten mittels univariater Statistik. Mittels des Proportion-Tests wurde geprüft, ob es signifikante Unterschiede in der Wiederfangrate und Mortalität zwischen den verschiedenen Versuchsgruppen gibt. Um die Vitalität der Fische, die Gesamtintensität aller Verletzungen (Summe der Intensitätsscores 0,1,3,5 über alle Körperteile und Verletzungstypen), Anzahl der Verletzungen und Intensität einzelner Verletzungstypen (Mittelwert der Intensitätsscores 0,1,3,5 über bestimmte Körperregionen je

Verletzungstyp, z.B. bei Flosseneinrissen Summe über alle Flossen) zwischen den Versuchsgruppen zu vergleichen, wurden Varianzanalysen durchgeführt. Zur Analyse von kategorischen Variablen (z.B. Vitalität) wurden nicht-parametrische Testverfahren durchgeführt. Hier kommt der Mann-Whitney U Test für den Vergleich von zwei Versuchsgruppen bzw. der Kruskal-Wallis Test mit anschließendem paarweisen Mann-Whitney U Test für den Vergleich von mehr als zwei Versuchsgruppen in Frage. Bei multiplen Vergleichen wurde zur Korrektur der Irrtumswahrscheinlichkeit die Bonferroni-Korrektur angewandt. Zum Vergleich von erhobenen Messwerten mit Erwartungswerten (z.B. Wiederfangraten unterschiedlicher Hamengrößen) wurde der Chi²-Test angewandt. Um Zusammenhänge zwischen der Größe (Totallänge) der einzelnen Fische und ihren Verletzungen bzw. der Mortalität zu ermitteln, wurden lineare Regressionsanalysen bzw. generalisierte lineare Modelle (binominales Modell für Mortalität) angewandt. Weiterhin wurden bei der Gesamtbewertung der verschiedenen Anlagentypen in Band 12 binomiale logistische Regressionen in R mit dem Paket „brglm“ (Kosmidis 2021) erstellt. Dadurch kann für jeden Standort bzw. jeden Turbinentyp modelliert werden, wie wahrscheinlich es ist, dass ein Fisch einer gegebenen Art und Totallänge die Turbinenpassage nicht überlebt. Dabei wurde auch die Mortalitätswahrscheinlichkeit in der Kontrollgruppe Hamen berücksichtigt. Die mit der Funktion „predict“ aus dem Paket „MASS“ (Ripley et al. 2013) anhand der berechneten Modelle ermittelten Wahrscheinlichkeitswerte, dass ein Fisch einer gegebenen Art und Totallänge die Turbinenpassage nicht überlebt, wurden in einem Diagramm als Wahrscheinlichkeitskurven aufgetragen. Alle univariaten Analysen wurden mit der Statistiksoftware R durchgeführt (R Core Team 2017). Die Testergebnisse wurden bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit (p-Wert) von $P \leq 0,05$ als signifikant eingestuft.

6.12.4. Multivariate Methoden zur Auswertung der Verletzungsmuster der Fische

Da sich die mit den im Rahmen des Projekts entwickelten Protokollen erfassten inneren und äußeren Verletzungen der Fische mit den 86 möglichen Kombinationen von äußeren Verletzungen und Körperteilen, den fünf allgemeinen Kriterien und den 36 Kombinationen von inneren Verletzungen und Körperteilen aus einer Vielzahl an Variablen (127) zusammensetzen, sind multivariate statistische Verfahren für eine vergleichende Bewertung der inneren und äußeren Verletzungsmuster verschiedener Versuchsgruppen am besten geeignet. Mit multivariaten Verfahren besteht die Möglichkeit, alle Verletzungskombinationen integrativ zu betrachten, ohne die Detailinformationen der einzelnen Körperteile und Verletzungen auf eine Gesamtschädigung reduzieren zu müssen (vgl. Mueller et al. 2014b). Darüber hinaus sind

diese Verfahren für Datensätze ohne Normalverteilung und mit wenigen Wiederholungen, wie es für ökologische Datensätze oft der Fall ist, besonders gut geeignet. Für die multivariate Analyse der Fischschädigungen können potenziell sämtliche statistische Methoden, die aus der Ökologie zur Analyse von Artengemeinschaften bekannt sind, übertragen werden. Die einzelnen Verletzungen der verschiedenen Körperteile treten dabei in der Ausgangstabelle an die Stelle der üblicherweise als Variablen analysierten Arten (= Spalten), die für die einzelnen Verletzungen aufgenommen Intensitäten treten entsprechend an die Stelle der Individuenzahl der Arten (= Werte in den Zellen, Abbildung 29). Es soll dabei ermittelt werden, wie sich die einzelnen Versuchsgruppen, Lastzustände und Fischarten bezüglich ihrer Verletzungsmuster (Zusammensetzung aller einzelnen Verletzungen) unterscheiden (Analysis of Similarities, ANOSIM), welche Verletzungen am stärksten zu diesen Unterschieden beitragen oder am regelmäßigsten in einzelnen Versuchsgruppen auftreten (Similarity Percentages, SIMPER) und welche erklärenden Variablen (z.B. Fischgröße, Turbinenparameter) mit den Verletzungsmustern korrelieren (Biota Environmental Stepwise Matching, BEST und multivariate hierarchische gemischte lineare Modelle, R-Paket „Hmsc“). Diese Testverfahren werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert. Die grafische Darstellung der Ergebnisse erfolgt mittels sogenannten Ordinationsdiagrammen, in denen jeder Fisch, ein Mittelwert aus allen Fischen einer Versuchsgruppe oder Mittelwerte aus Stichprobenwiederholungen (Bootstrap Averages) als Punkt dargestellt wird. Die Abbildung erlaubt eine Bewertung, welche Fische bezüglich ihrer Verletzungen zueinander ähnlich (nahe beieinander) bzw. unähnlich (weit voneinander entfernt) sind und wie groß die Variabilität im Datensatz ist (Streuung der Punkte über das Diagramm). Im Projekt werden dazu die Verfahren nicht-metrische und metrische mehrdimensionale Skalierung benutzt (NMDS bzw. MDS), die im Statistikglossar näher erläutert werden.

Statistischer Vergleich der Verletzungsmuster verschiedener Versuchsgruppen

Zur statistischen Absicherung der aus der grafischen Darstellung der NMDS ersichtlichen Unterschiede in den Verletzungsmustern eignen sich Ähnlichkeitsanalysen (ANOSIM). Grundlage für den ANOSIM-Test ist die Berechnung der Ähnlichkeit zwischen den einzelnen Fischen bezüglich aller vorkommenden Verletzungen und deren Intensität. Für die Analyse der Verletzungsmuster ist der Bray-Curtis Koeffizient (Bray & Curtis 1957) ideal als Ähnlichkeitsmaß geeignet, da die Werte hier nicht durch das Hinzufügen oder Ausschließen von Verletzungen, die bei beiden betrachteten Fischen eines paarweisen Vergleichs nicht vorkommen, beeinflusst wird. Da die Wahrscheinlichkeit groß ist, dass nicht alle im Schädigungsprotokoll enthaltenen Verletzungskombinationen bei jedem Fisch vorkommen,

ist diese Eigenschaft des Distanzmaßes für die Auswertung der Fischschädigungen von großer Bedeutung. Der Bray-Curtis Koeffizient kann Werte zwischen 0 (Werte sind maximal verschieden, es gibt keine gemeinsamen Verletzungen) und 1 (Werte sind identisch, identische Anzahl und Intensität an Verletzungen) annehmen. Es besteht nach ANOSIM ein signifikanter Unterschied zwischen zwei Versuchsgruppen (z.B. Fische mit Turbinenpassage und Fische ohne Turbinenpassage), wenn die Variabilität der Verletzungsmuster innerhalb einer Versuchsgruppe kleiner ist, als die Variabilität zwischen den Versuchsgruppen (gemessen anhand der Bray-Curtis Koeffizienten für die paarweisen Vergleiche der einzelnen Fische). Der R-Wert der ANOSIM zeigt an, wie stark die Trennung zwischen den Versuchsgruppen ist. Je kleiner dieser Wert ist, desto stärker ist die Überlappung der Datenpunkte im Ordinationsdiagramm. Je höher der Wert ist, desto klarer ist die Trennung der Punktwolken zweier Versuchsgruppen im Ordinationsdiagramm. Der R-Wert der ANOSIM kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen und ist zwischen verschiedenen Studien vergleichbar. Ein Wert von 0 bedeutet dabei eine maximale Überlappung der Daten verschiedener Versuchsgruppen (i.d.R. visualisiert durch verschiedenfarbige Punktwolken im Ordinationsdiagramm), während ein Wert von 1 eine vollständige Trennung bedeuten würde (z.B. vollständige Trennung der verschiedenfarbigen Punktwolken im Ordinationsdiagramm). Um herauszufinden, welche Verletzungen an welchen Körperteilen hauptsächlich zu dem Unterschied zwischen den durch ANOSIM detektierten Gruppen beitragen, kann die Stetigkeit der einzelnen Arten zwischen den verschiedenen Gruppen mittels SIMilarity PERcentage-Analysen (SIMPER) verglichen werden. Die Ergebnisse der SIMPER Analyse zeigen an, welche Verletzungen/Eigenschaften in einer bestimmten Gruppe besonders stetig vorkommen und daher einen Beitrag zur Ähnlichkeit der Verletzungsmuster innerhalb einer Gruppe bzw. welche Verletzungen einen Beitrag zum Unterschied der Verletzungsmuster zwischen zwei Gruppen leisten. Alle multivariaten Analysen werden mit der Software PRIMER v7 (Plymouth Marine Laboratory, Plymouth, UK) durchgeführt.

Analyse von Zusammenhängen zwischen abiotischen Parametern und Verletzungsmustern

Um Zusammenhänge zwischen der Fischart, Verletzungsmustern, Fischgröße (Totallänge) und den physikalischen Rahmenbedingungen in den verschiedenen Turbinen und Betriebszuständen herauszufinden, wurden multivariate Modelle berechnet. Zur Berechnung der Modelle wurde für jede Leerung der Mittelwert jeder Verletzung sowie der sofortigen und verzögerten Mortalität über alle Fische einer Art gebildet und den für die Leerungszeit passenden Werten der erklärenden Variablen zugeordnet. Für die Berechnung der Modelle wurden ausschließlich Daten von Fischen mit Turbinenpassage (Versuchsgruppen Turbine &

Rechen sowie Turbine) verwendet, um möglichst spezifische Ergebnisse bezüglich der Passage der unterschiedlichen Kraftwerke zu erhalten. Alle Modelle wurden jeweils mit und ohne Berücksichtigung der Vitalität (sofort und verzögert) berechnet. Über alle Fischarten gingen in die Analysen Schädigungsdaten aus 2.075 Leerungen und Daten für 39 erklärende Variablen ein. Eine vollständige Liste der hier eingegangenen erklärenden Variablen findet sich in Tabelle 15 im Anhang.

Die BEST-Analyse (Biota Environmental Setpwise Matching, BEST; Anderson et al. 2008) ist eine nicht-parametrische statistische Methode, die dazu dient herauszufinden, welche Kombination der gemessenen Umweltvariablen die Struktur der biotischen Daten am besten widerspiegelt. Dazu werden sowohl für die biotischen (Verletzungsmuster) als auch für die abiotischen Daten (Turbinenparameter, abiotische Gewässerparameter), wie oben beschrieben, Ähnlichkeits-Matrizen berechnet. Diese Matrizen werden über eine multivariate Spearman-Rank-Korrelation miteinander verglichen. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, eine unbegrenzte Anzahl an Variablen in die Modelle einzuspeisen. Durch schrittweises Hinzufügen weiterer Umweltvariablen wird getestet, bei welcher Kombination der höchste Korrelationskoeffizient (ρ) erzielt werden kann. Dies bedeutet, mit welcher Kombination von Umweltvariablen die Ähnlichkeiten zwischen den Proben in den biotischen und den abiotischen Daten möglichst stark übereinstimmen. Als Ergebnis gibt die BEST-Analyse einen Korrelationskoeffizienten (ρ 0 bis 1 bedeutet 0% bis 100% Übereinstimmung der biotischen und abiotischen Ähnlichkeitswerte zwischen den Proben) und einen Signifikanzwert für die am besten passende Kombination an Umweltvariablen an. Der Prozentsatz der durch Umweltvariablen erklärbarer Variabilität variiert bei ökologischen Zusammenhängen stark. Einzelne Variablen erklären oftmals nur 2% bis 5% der Variabilität in ökologischen Datensätzen (Møller & Jennions 2002), während eine Kombination von Variablen mehr erklären kann. Durch die Komplexität der ökologischen Zusammenhänge und der Wechselwirkung von Faktoren werden bei ökologischen Untersuchungen in der Regel keine 100% erklärte Variabilität erreicht. Die Differenz zwischen dem ausgegebenen Korrelationskoeffizienten und 100% beinhaltet die durch die betrachteten Variablen nicht erklärbare Komponente der Verletzungsmuster der Fische. Diese nicht erklärbare Komponente kommt hauptsächlich durch die hohe natürliche Variabilität und Zufälligkeit, der Datensätze aus Freilandversuchen unterliegen, zustande (Møller & Jennions 2002), beinhaltet aber auch die bisher nicht berücksichtigten bzw. unbekannten Einflussvariablen. Die Zuverlässigkeit des Ergebnisses wird nicht durch schwache Zusammenhänge mit den untersuchten Einflussvariablen beeinflusst, es werden in diesem Fall ein niedriger Korrelationskoeffizient und ein hoher Anteil nicht erklärter Variabilität ausgegeben. Die Korrelationen zwischen den Verletzungsdaten und den verschiedenen Einflussvariablen in

den multivariaten Analysen geben, basierend auf mathematischen Gleichungen, Hinweise zu eventuellen Zusammenhängen. Diese Zusammenhänge müssen nicht zwingend kausal sein, sondern können auch indirekt über eine andere, nicht in der Analyse einbezogene Variable in Verbindung stehen. Wenn eine Variable bei der multivariaten Analyse nicht für das Endmodell ausgewählt wurde, kann dies drei Gründe haben. Entweder ist die Datenauflösung der Variable zu ungenau, oder aber die Variable hat tatsächlich auf dieser Betrachtungsebene keine Bedeutung für die Fischartenzusammensetzung im untersuchten Einzugsgebiet. Ein weiterer Grund kann sein, dass die Variable nur auf einzelne Fischarten wirkt und daher in Modellen über alle Fischarten nicht enthalten ist.

Da die Modellselektion in der BEST Analyse grundsätzlich nicht von Autokorrelation beeinflusst wird, wurde für die multivariaten Analysen auf eine subjektive a priori Auswahl der Variablen verzichtet und Autokorrelationen vor der Modellselektion nicht berücksichtigt. Vielmehr wurde die BEST-Analyse als objektive Auswahlmethode für die Umweltvariablen genutzt, die in weiteren Analysen genauer untersucht werden sollen. Diese Vorgehensweise wurde von der weltweit führenden Expertin in ökologischer Statistik, Prof. M. Anderson, empfohlen. Um Autokorrelation bei der Interpretation der endgültigen Modelle berücksichtigen zu können, wurden für die resultierenden BEST-Modelle sowohl die Korrelationskoeffizienten zwischen den in den Modellen enthaltenen Variablen als auch der „Variance Inflation Factor“ (VIF) berechnet. Der VIF misst das „Aufblähen“ von der Varianz der Variablen durch die Multikollinearität der anderen Variablen (Vatcheva et al. 2016). Werte über 10 (VIF) und über 0,7 (Korrelationskoeffizient) deuten auf eine hohe Korrelation zwischen Variablen hin (Mela & Kopalle 2002, Vatcheva et al. 2016) und die betroffenen Modelle wurden unter Ausschluss der betroffenen Variable(n) erneut berechnet.

Mit den durch die BEST-Analyse identifizierten Umweltvariablen wurden anschließend multivariate hierarchische gemischte lineare Modelle mit dem R-Paket „Hmsc“ berechnet. Bei HMSC (Hierarchical Modelling of Species Communities; Ovaskainen et al. 2017, Ovaskainen & Abrego 2020) handelt es sich um ein „joint species distribution model“, eine Form von Habitatmodellen bzw. Verbreitungsmodellen, die im eigentlichen Sinne die Verbreitungen mehrerer gemeinsam vorkommender Arten in Raum und Zeit in Abhängigkeit von Umweltparametern beschreiben. Diese Methode wurde hier zu Nutze gemacht, um das Auftreten der einzelnen Verletzungen in Abhängigkeit von Turbinenparametern und standortspezifischen Parametern (z.B. Druckveränderungen, Kollisionsstärke- und wahrscheinlichkeit, Drehzahl, Fallhöhe, Anzahl der Schaufelblätter), Fangbedingungen (Leerungsintervall, Treibgutmenge, Biomasse und Strömungsgeschwindigkeit im Steert) und fischspezifischen Eigenschaften (Fischart, Totallänge, Gewicht) zu beschreiben. Im

Gegensatz zur BEST-Analyse, die das Verletzungsmuster der Fische als Gesamtheit betrachtet, kann mit HMSC jede einzelne Verletzung im multivariaten Ansatz betrachtet werden. Daher kann für jede einzelne Verletzung der Anteil erklärter Varianz durch die einzelnen Umweltvariablen ermittelt werden. Die Methode beruht auf der bayesschen Statistik, die mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen arbeitet und auch bei kleiner Datengrundlage verwendbar ist. Das zugrundeliegende Prinzip sind generalisierte lineare Modelle, die im multivariaten (Analyse vieler Variablen gleichzeitig) und gemischten (unter Berücksichtigung von zufälligen Effekten, hier Fischart) Kontext angewandt werden.

6.13. Durchgeführte Untersuchungen Projektteil A

In den nachfolgenden Tabellen sind die Zeiträume der durchgeführten Untersuchungen für den Methodenversuch zur fangbedingten Schädigung am Standort Moosach/Freising (Tabelle 7) und an den konventionellen und innovativen Wasserkraftanlagen (Tabelle 8) für die Projektjahre 2014–2022 aufgelistet.

Tabelle 7 Zeitplan der durchgeführten Untersuchungen für den Methodenversuch zur fangbedingten Schädigung am Standort Moosach/Freising.

Standort		2015		2016
Freising (Moosach)	Standardisierte Fischzugaben	Fangkasten	18.05.2015–19.05.2015 (Äsche, Huchen, Bachforelle; 1h, 12h)	-
			15.06.2015–16.06.2015 (Nase, Rotaugen; 1h, 12h)	
			09.10.2015–10.10.2015 (Barbe, Flussbarsch; 1h, 12h)	
			12.10.2015–14.10.2015 (Barbe, Nase Rotaugen; 12h)	
			18.10.2015–20.10.2015 (Barbe, Flussbarsch, Nase, Rotaugen; 12h)	
	Steertreuse		06.07.2015–08.07.2015 (Huchen, Bachforelle; 12h)	-
			21.07.2015–22.07.2015 (Huchen, Bachforelle; 1h)	
			07.10.2015–08.10.2015 (Barbe, Flussbarsch; 1h, 12h (Flussbarsch))	
			15.10.2015–17.10.2015, 21.10.2015, 26.10.2015 (Barbe, Flussbarsch, Nase, Rotaugen; 12h)	
	Teilhamen		25.06.2015–26.06.2015 (Äsche, Huchen, Bachforelle, Nase, Rotaugen)	-
			27.10.2015–28.10.2015 (Barbe, Flussbarsch)	
	Treibgut- zugaben		27.07.2015–28.07.2015 (Äsche, Huchen, Bachforelle; Grobrechen)	-
			10.08.2015–11.08.2015 (Äsche, Huchen, Bachforelle; Feinrechen)	
			12.10.2015–13.10.2015, 15.10.2015–16.10.2015 (Barbe, Flussbarsch, Nase, Rotaugen)	
ARIS		25.06.2015–26.06.2015	04.07.2016– 06.07.2016	
		27.07.2015–28.07.2015		
		10.08.2015–11.08.2015		

Tabelle 8 Zeitplan der durchgeführten Untersuchungen an den konventionellen und innovativen Wasserkraftanlagen.

Standort			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Lindesmühle (Fränk. Saale)	Standardisierte Fischzugaben	Frühjahr Herbst		21.09.–23.09. (Aal) 28.09.–30.09. (Bachforelle, Flussbarsch, Nase)						
	Natürlicher Fischabstieg	Frühjahr Herbst	09.10.–20.10. (Protokollentwicklung)	28.04.–09.05. 14.09.–05.10.						
	ARIS		18.12.	28.09.–02.10., 24.10.–26.10., 07.11.–09.11., 20.11.–21.11.	16.11.–18.11.					
Baierdorf- Wellerstadt (Regnitz)	Standardisierte Fischzugaben	Frühjahr Herbst		16.09.–18.09. (Aal) 24.09.–26.09. (Bachforelle, Flussbarsch, Nase)						
	Natürlicher Fischabstieg	Frühjahr Herbst	09.10.–05.11. (Protokollentwicklung)	28.04.–08.05. 16.09.–30.09.						
	ARIS		24.10.	15.09.–17.09., 24.09.–26.09.						
	Sensorfisch				29.09.					
Heckerwehr (Roth)	Standardisierte Fischzugaben	Frühjahr			12.04.–15.04. (Bachforelle)					
					20.04.–22.04., 26.04.–28.04. (Äsche, Nase)					
		Herbst			13.09.–16.09. (Aal, Barbe)					
					22.09.–23.09. (Flussbarsch, Rotaugen)					
	Natürlicher Fischabstieg	Frühjahr Herbst			11.04.–02.05. 12.09.–03.10.					
	Sensorfisch				28.09.					

Standort			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Au (Iller)	Standardisierte Fischzugaben	Frühjahr			09.03.–11.03., 15.03.–17.03. (Huchen, Bachforelle)					
					21.03.–23.03., 30.03.–01.04. (Äsche, Barbe)					
		Herbst			06.09.–09.09. (Aal, Nase)					
					27.09.–30.09. (Flussbarsch, Rotaugen, Nase)					
	Natürlicher Fischabstieg	Frühjahr			12.03.–04.04.					
		Herbst			09.09.–04.10.					
	ARIS (ohne Auswertung)				09.03.–10.03.					
	Sensorfisch				26.09.–27.09., 30.09.					
Eixendorf (Schwarzach)	Standardisierte Fischzugaben	Frühjahr				24.04.–28.04. (Äsche, Rotaugen)	10.04.–12.04. (Äsche, Barbe, Bachforelle) Nachuntersuchung			
						09.05.–12.05. (Bachforelle, Huchen)				
						16.05.–19.05. (Nase, Barbe)				
		Herbst				19.09.–22.09. (Aal, Nase, Flussbarsch)				
	Natürlicher Fischabstieg	Frühjahr				24.04.–23.05.	10.04.–12.04.			
		Herbst				08.09.–02.10.				
	ARIS (ohne Auswertung)					24.04.–23.05. (Grundpassage)				
	Sensorfisch									17.06.–18.06.

Standort			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Baierbrunn (Isar)	Standardisierte Fischzugaben	Frühjahr					20.03.–23.03. (Äsche, Nase, Barbe)			
							26.03.–29.03. (Bachforelle, Huchen)			
		Herbst				12.09.–15.09. (Aal, Rotaugen)				
	Natürlicher Fischabstieg					25.09.–29.09. (Flussbarsch)				
						04.10.–05.10. (Barbe)				
		Frühjahr					16.03.–13.04.			
		Herbst				12.09.–29.09., 04.10.–05.10.				
	Sensorfisch							25.09.		15.06.
Höllthal (Alz)	Standardisierte Fischzugaben	Frühjahr						26.03.– 29.03. (Äsche)		
								02.04.– 05.04. (Bachforelle, Huchen)		
		Herbst					18.09.–21.09. (Aal, Flussbarsch)			
							25.09.–28.09. (Nase, Barbe)			
							01.10.–02.10. (Rotaugen)			
	Natürlicher Fischabstieg	Frühjahr						30.03.– 16.04.		
		Herbst					12.09.–06.10. 26.09.–27.09.			
	ARIS (ohne Auswertung)									
	Sensorfisch							26.09.		

Standort			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Großweil (Loisach)	Standardisierte Fischzugaben	Frühjahr								09.03.–12.03. (Nase, Rotaugen) 16.03.–19.03. (Äsche, Bachforelle) 23.03.–26.03. (Huchen)
		Herbst							15.09.–18.09. (Flussbarsch) 22.09.–25.09. (Aal) 29.09.–02.10. (Barbe)	
	Natürlicher Fischabstieg	Frühjahr								09.03.–31.03.
		Herbst							15.09.– 25.09., 28.09.–06.10.	
	ARIS	Frühjahr								17.03.–19.03., 23.03.–26.03.
		Herbst							22.09.– 25.09., 29.09.–02.10.	
	Sensorfisch	Frühjahr								09.03.–11.03., 16.03.–18.03., 23.03.–25.03.
		Herbst							17.09., 22.09.– 24.10., 29.09.– 01.10., 06.10.	

7. Methoden im Projektteil B

Um die durch die Kraftwerksanlagen verursachte Unterbrechung des Fließgewässerkontinuums (serielle Diskontinuität) bzw. die Veränderungen vor und nach dem Umbau objektiv charakterisieren und quantifizieren zu können, wurden die Abschnitte im unmittelbaren Ober- und Unterwasser mittels eines systematischen Probenahmedesigns (Abbildung 41) in Anlehnung an Mueller et al. (2011) untersucht. Dabei wurde das Ober- und Unterwasser in drei bis vier Längsspuren eingeteilt, in denen fünf Transekte á 30 m Länge auf eine Strecke der 15-fachen Gewässerbreite verteilt wurden. In diesen Transekten wurden die Proben zu den verschiedenen biotischen und abiotischen Habitatkomponenten genommen. Je nach Gewässerbreite, Strukturausstattung und Fragestellung wurden drei Längsspuren (orografisch rechts, Mitte, links, z.B. Roth, Alz) oder bei größeren Gewässern vier Längsspuren (orthografisch rechts, Mitte rechts, Mitte links, links, z.B. Iller) eingeteilt. Daraus ergeben sich pro Gewässer 30–40 Messwerte bzw. Proben für jede der untersuchten abiotischen und biotischen Habitatkomponenten (Abbildung 42). An jedem Standort wurden vor Beginn der Probenahme die durchschnittlichen Gewässerbreiten anhand von Luftbildern ermittelt und im Feld mit einem Laserentfernungsmessgerät die einzelnen Transekte voneinander abgegrenzt und markiert. Mit einem GPS-Gerät (Garmin GPS Map 76 CSx) wurden die exakten Koordinaten jedes Transekts abgespeichert, um diese im Nachgang in Luftbildern verorten und digitalisieren zu können.

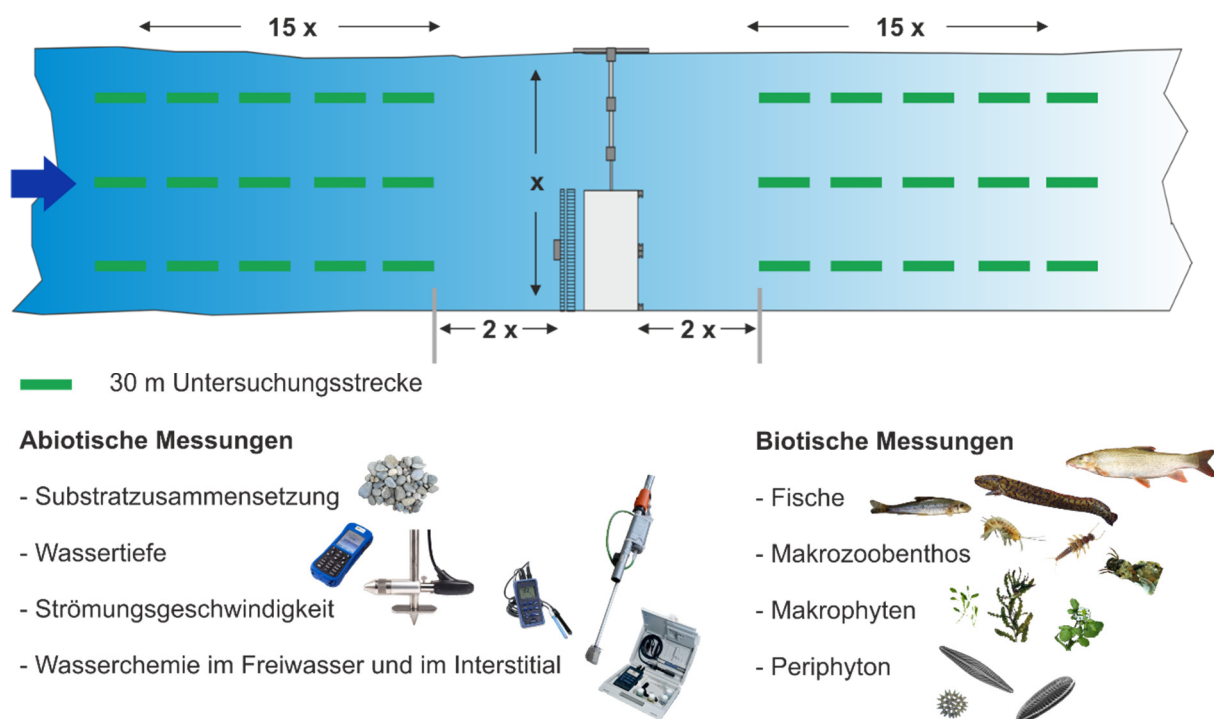


Abbildung 41 Untersuchungsdesign zu den Habitatuntersuchungen im Projektteil B.

Ein relativer Vergleich der Ergebnisse vor und nach Kraftwerksbau kann Aufschlüsse darüber geben, ob und in welchem Umfang ökologische Verbesserungen oder Verschlechterungen vorliegen (Abbildung 42). Zu einer aussagekräftigen Charakterisierung der einzelnen Untersuchungstransecte an den Standorten ist es wichtig, möglichst viele Ebenen biologischer Organisation einzubeziehen und mit bedeutenden Umweltparametern in Bezug zu setzen (Geist 2011, Mueller et al. 2011, Pander & Geist 2013). Als biotische Parameter wurden dazu die taxonomischen Gruppen der Fische, des Makrozoobenthos, der Makrophyten und des Periphytons untersucht, da diese zum einen die wichtigsten trophischen Ebenen in Fließgewässern repräsentieren und zum anderen im Verdacht stehen, in unterschiedlicher Weise auf querverbaubedingte Habitatveränderungen zu reagieren (Mueller et al. 2011, Anderson et al. 2015, Wyzga et al. 2014, Mbaka & Wanjiru Mwaniki 2015, Benejam et al. 2016). Die zu erfassenden abiotischen Habitatvariablen schließen Gewässermorphologie (Tiefen- und Breitenvarianz), Abflussgeschehen (Abfluss und Strömungsgeschwindigkeiten), Wasserchemismus in der freien Welle und im Interstitialraum (gelöster Sauerstoff, Temperatur, pH, Leitfähigkeit), Sedimentqualität (Korngrößenanalyse) und das Redoxpotenzial ein, wobei die Intensität der Trennungseffekte zwischen Freiwasser und Interstitial als wichtige biologische Größe ebenfalls integriert wird. Die gesamte Untersuchungsdauer des Forschungsmoduls B „Ökologische Auswirkungen“ findet begleitend zum Forschungsmodul A statt. Die Untersuchungen sollen nach Möglichkeit jeweils saisonal (Frühjahr und Herbst) vor und nach dem Kraftwerksbau stattfinden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass jeweils zwei Beprobungen vor- und nach Kraftwerksbau zwar Hinweise auf Veränderungen der Habitatqualität liefern können, aber aufgrund der natürlichen jährlichen Schwankungen nicht mit absoluter Sicherheit auf das Kraftwerk zurückgeführt werden können. An den konventionell nachgerüsteten Anlagen wurde eine saisonale Beprobung durchgeführt, um auch dort die serielle Diskontinuität in die ökologische Gesamtbewertung des Standorts einbeziehen zu können. Die Untersuchungsmethoden werden im Folgenden genauer erläutert.

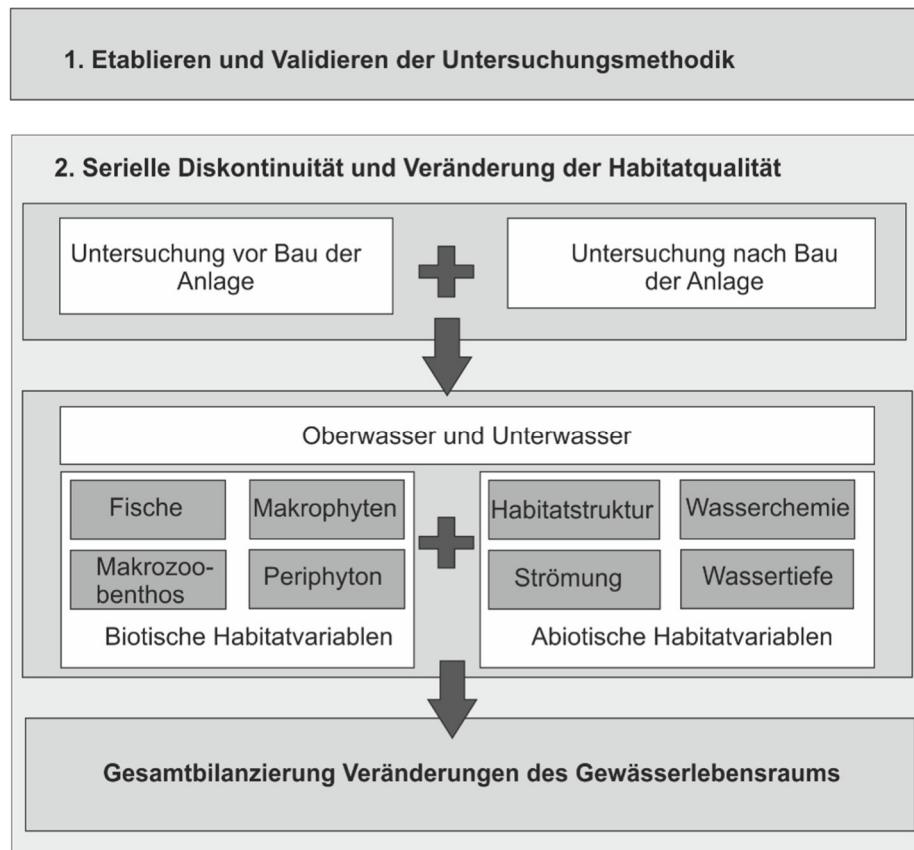


Abbildung 42 Schematische Darstellung der Untersuchungen in Projektteil B.

7.1. Habitatkartierung mittels Side-imaging Sonar

Da die Wasserkraftnutzung einen starken Einfluss auf die Gewässermorphologie (z.B. Tiefen- und Breitenvariabilität, Uferbewuchs und -ausgestaltung) und den Stofftransport in Fließgewässern (z.B. Unterbrechung von Geschiebetransport und des Transports von Totholz) haben kann, ist die flächige Verteilung der Habitate im Ober- und Unterwasser von Querbauwerken ein potenziell geeigneter Indikator für die Stärke dieser Effekte und kann zur Erklärung eventuell beobachteter biologischer Effekte beitragen. Für eine flächendeckende Kartierung der Fließgewässerhabitate wurde ein Side Sonargerät verwendet (199ci HD SI Combo, Humminbird, USA). Damit ist es möglich, ein 180°-Sichtfeld unter Wasser abzudecken und eine genaue Abbildung des Gewässergrundes zu erhalten. Die Reichweite des Sonars wurde je nach Gewässerbreite zwischen 5 m und 25 m links und rechts vom Boot gewählt. In Gewässern mit mehr als 50 m Breite wurden die Sonardaten in mehreren Spuren aufgenommen. Für die Aufnahmen wurden mittels der Echtzeitfunktion Video-Dateien angelegt, die Bildinformationen, GPS-Position und Wassertiefen in einer Spur unter der Bootsmitte enthalten. Als Frequenzen des Sonars stehen sowohl 455 kHz als auch 800 kHz zur Verfügung (Abbildung 43), wobei sich herausgestellt hat, dass für die Nachbearbeitung der Videodateien die kontrastreichere 455 kHz Frequenz besser geeignet war. Das Befahren der zu kartierenden Gewässerabschnitte erfolgte mit einem motorisierten Boot in Fließrichtung. Die Geschwindigkeit über Grund sollte dabei 8 km/h nicht übersteigen. Der Vorteil der Echtzeitfunktion besteht darin, dass mit einer einzigen Datei gearbeitet wird statt mit einer Vielzahl an einzelnen Bildern. Die Metadaten zum Sonar-Bild (Gewässertiefe, GPS-Koordinaten etc.) sind in dieser Datei eingebunden. Um die Videodateien zu betrachten und eine Vorauswahl zu treffen, wurde die frei verfügbare Software HumViewer verwendet (Abbildung 44). Die Videodateien können mit einer speziellen Software (SonarTRX-SI) automatisch georeferenziert werden (Abbildung 45), wohingegen bei der Snapshotfunktion jedes Einzelbild in ArcGIS (ESRI, 2014, ArcMap 10.2) manuell georeferenziert werden muss. Ausgehend von den georeferenzierten Sonarbildern wurden in ArcGIS die verschiedenen Habitattypen abgegrenzt und die jeweiligen Flächenanteile berechnet (Abbildung 46).

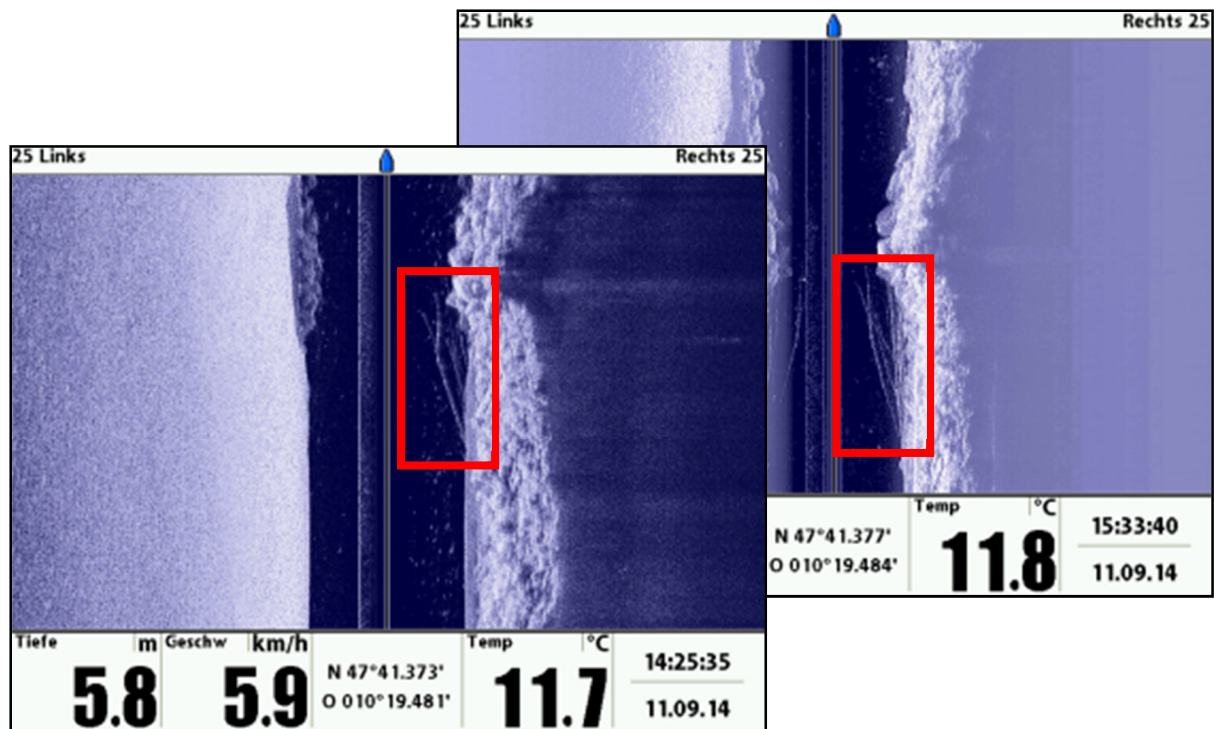


Abbildung 43 Side Sonaraufnahmen mit Totholz (rot umrandet) im Unterwasser der Iller am Kraftwerksstandort Au, aufgenommen mit 455 kHz (links) und mit 800 kHz (rechts).

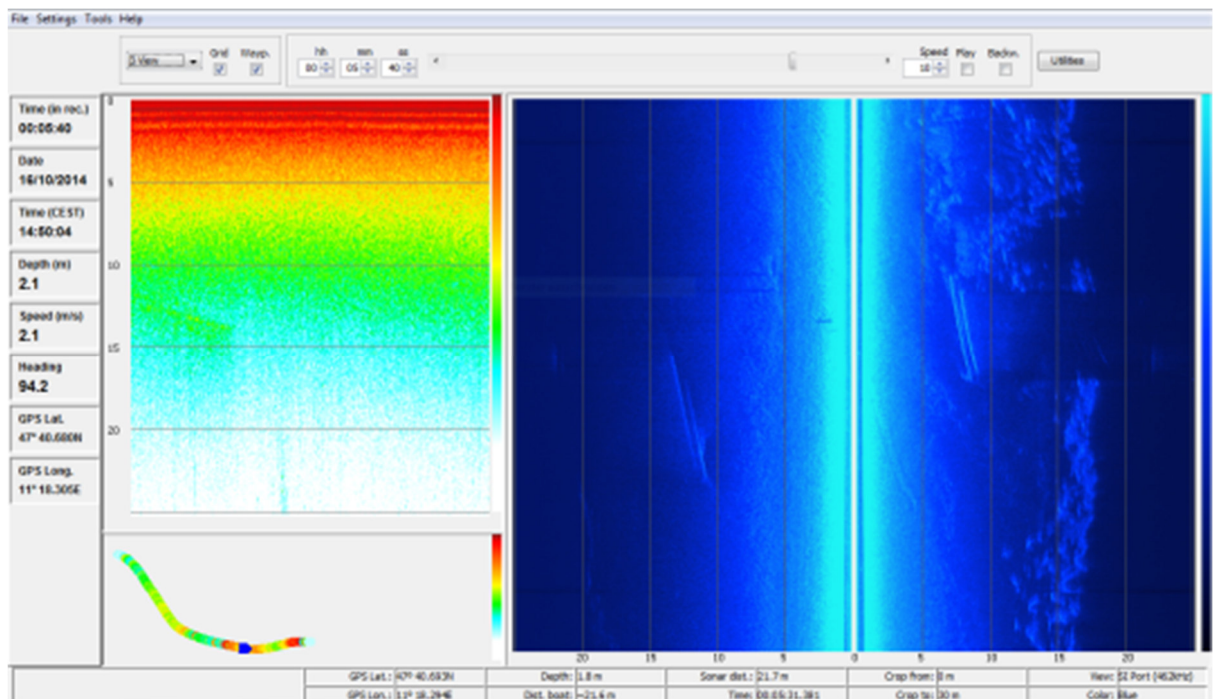


Abbildung 44 Brückenpfeiler im Unterwasser der Loisach, aufgenommen mit 455 kHz.

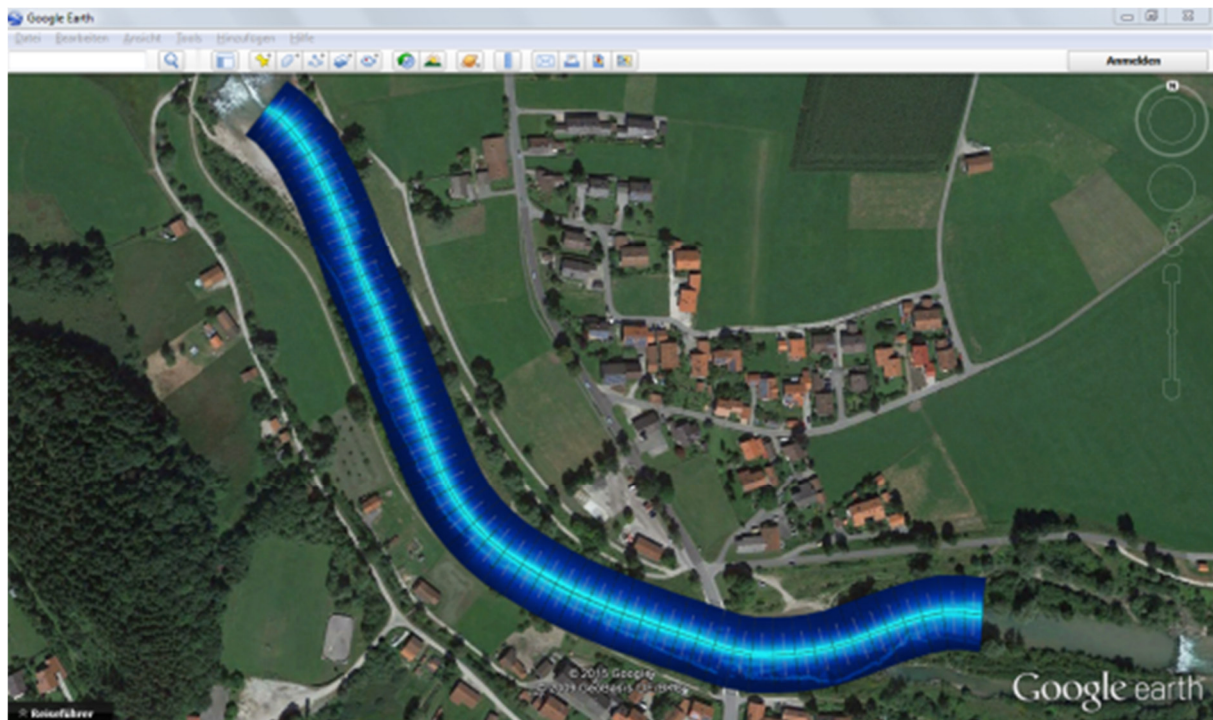


Abbildung 45 Sonaraufnahme des Unterwassers der Loisach, eingebettet in ein Google Earth Luftbild.

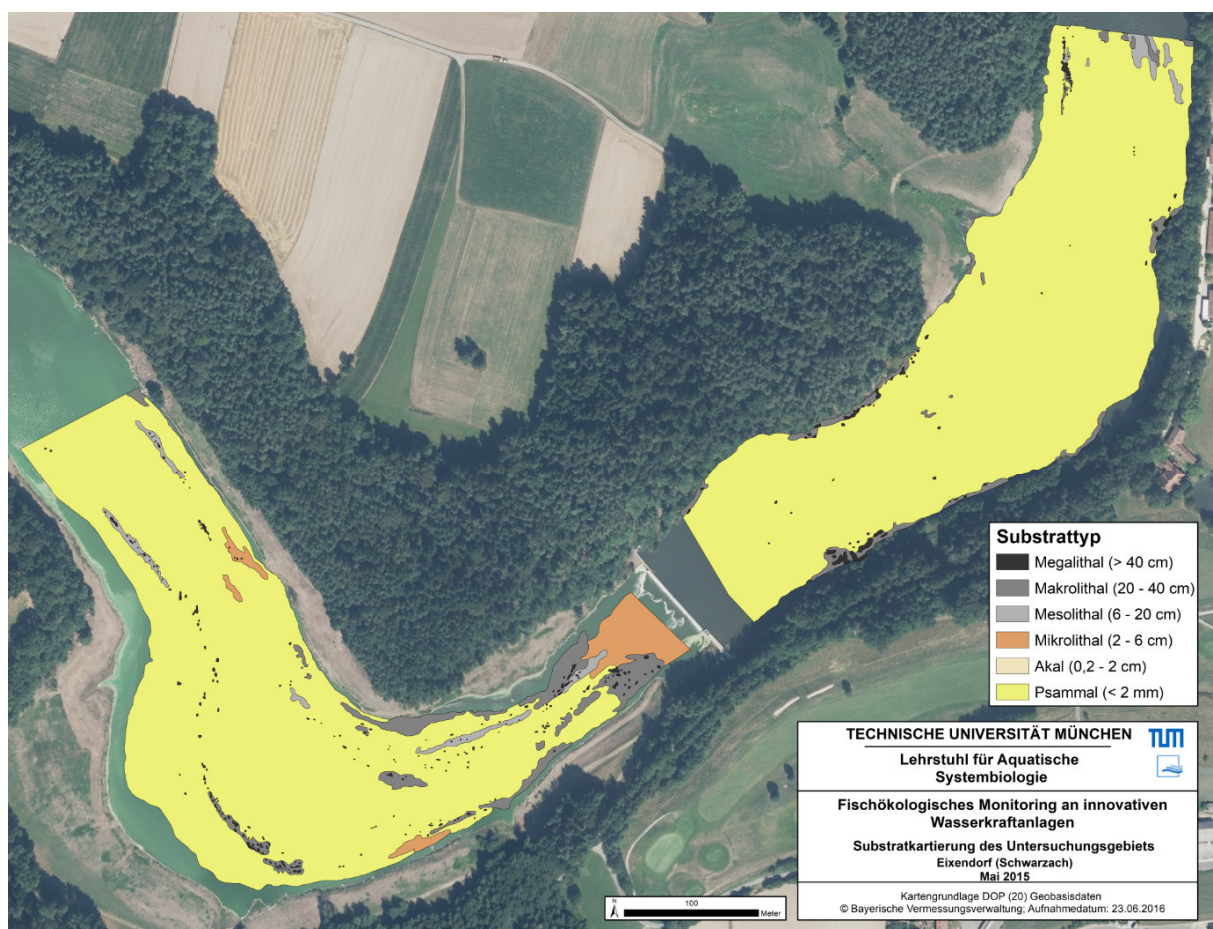


Abbildung 46 Übersicht der verschiedenen, anhand der Sonaruntersuchung generierten Habitattypen am Standort Eixendorf. Die Abgrenzung erfolgte in ArcGIS 10.2 georeferenziert.

7.2. Physikalische und chemische Habitateigenschaften

Durch den Einbau von Querbauwerken werden wichtige physikalische und chemische Habitateigenschaften des Fließgewässers, insbesondere im Oberwasser des Querbauwerks, verändert. Durch den Aufstau wird i.d.R. die Strömungsgeschwindigkeit verlangsamt und die Wassertiefe erhöht, es kommt zu einer verstärkten Sedimentdeposition und der Flussabwärtstransport sowie die Umlagerung von grobem Geschiebe wird unterbunden oder stark eingeschränkt. Aber auch der Einbau von Turbinen in bereits bestehende Querbauwerke kann die Strömungsverhältnisse und damit die abiotischen Habitateigenschaften verändern. In diesem Zusammenhang verändert sich potenziell auch der Wasseraustausch zwischen dem Freiwasser des Flusses und dem Kieslückensystem (Interstitial). Dieser ist für viele Fließgewässerarten wie z.B. kieslaichende Fische essentiell, um geeignete chemische Bedingungen im Kieslückensystem für deren Entwicklung aufrecht zu erhalten. Daher wurden im Projekt verschiedene physikalische und chemische Habitateigenschaften bestimmt. Aus den Messungen der wasserchemischen Parameter im Interstitial und im Freiwasser wurden als wichtige Qualitätskenngröße des Kieslückensystems die hyporheischen Austauschraten ermittelt. Dazu wurden in jedem Transekt die wasserchemischen Eigenschaften des Interstitials und der freien Welle (gelöster Sauerstoff, Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert mittels WTW Multi 3420, Redoxpotenzial mittels WTW pH 3110 und Silberchlorid-Referenzelektrode) bestimmt und für jeden Parameter und jede Messstelle die Differenz der Werte zwischen Freiwasser und Interstitial berechnet. Das Interstitialwasser wurde mit Hilfe einer perforierten Metallspitze mit angeschlossenem Silikonschlauch und 100 mL Plastikspritze aus 10 cm Substrattiefe entnommen. Das Redoxpotential wurde zuvor durch Addieren von 217 mV auf den Bezug zur Standard-Wasserstoffelektrode korrigiert. Außerdem wurde in jedem Transekt die Strömungsgeschwindigkeit 10 cm über Grund und 10 cm unter der Wasseroberfläche sowie die Wassertiefe gemessen (magnetisch-induktiver Strömungssensor MFpro, OTT Hydromet, Kempten, Deutschland).

Zusätzlich wurde die Korngrößenverteilung des Substrats bestimmt (Substratprobe mit Sedimentbohrer bzw. Kiesschlitten und anschließender Nasssiebung). Es wurden Siebe der Maschenweite 0,85 mm, 2,0 mm, 6,3 mm und 20 mm verwendet. Für jede Korngrößenfraktion wird die Trockenmasse bestimmt und der prozentuale Anteil am Gesamtgewicht der Probe berechnet.

7.3. Aquatische Lebensgemeinschaft

Periphyton

Aufwuchsalgen am Gewässergrund (Periphyton) sind in ihrem Vorkommen und Wachstum lichtabhängig und werden daher in ihrer Artenzusammensetzung potenziell durch Unterschiede in der Wassertiefe beeinflusst. Auch die vorherrschenden Strömungsgeschwindigkeiten und die Substratbeschaffenheit können einen starken Einfluss auf das Periphyton haben. Es ist daher davon auszugehen, dass das Periphyton durch Querbauwerke in Fließgewässern und den Einbau von Turbinen in bestehende Querbauwerke beeinflusst wird und ein guter Indikator für die damit im Zusammenhang stehenden biologischen Effekte ist. In jedem Transekt wurden daher von fünf Hartsubstraten (Steine oder Totholz) jeweils 4 cm² Periphyton (insgesamt 20 cm²) mit Hilfe eines Küchenmessers und einer biegsamen Plastikschaablone gewonnen und mit 200 mL Wasser in Probeflaschen mit vorgelegter Fixierlösung (20 mL Lösung bestehend aus 80% Lugol'scher Lösung, 10% Eisessig und 10% Methanol) zu einer Sammelprobe gewaschen. Im Labor wurden die Algen nach der Sedimentationsmethode von Utermöhl (1931) mindestens 24 h abgesetzt und danach mit dem Umkehrmikroskop bei 400-facher Vergrößerung die Zellzahl und soweit möglich die Art, Gattung oder Familie nach Cox (1996), Ettl et al. (1978–1999) und John et al. (2002) bestimmt. Je nach Probeninhalt wurde ein unterschiedliches Probenvolumen zwischen 0,5 mL bis 10 mL ausgewertet. Das verwendete Zählfeld hat eine Größe von 100 µm², es werden 25 Felder pro Probe gezählt (DIN EN 15204 2006).

Makrophyten

Das artspezifische Auftreten von Wasserpflanzen (Makrophyten) ist neben der Verfügbarkeit von Nährstoffen stark an Strömungsverhältnisse und Substratbeschaffenheit gebunden. In strömungsberuhigten und feinsedimenthaltigen Staubereichen kann es daher beispielsweise zu einem verstärkten Auftreten von bestimmten Makrophytenarten kommen, während diese im Unterwasser fehlen und die Lebensgemeinschaften dort durch strömungsangepasste Makrophyten oder überwiegend durch Aufwuchsalgen geprägt sind. Weiterhin wirken Makrophyten als Strukturgeber für Fische und Makrozoobenthos und stellen damit eine wichtige Lebensraumkomponente dar. Daher wurde in jedem Transekt auf einer Gewässerstrecke von 30 m die Gesamtdeckung der Makrophyten in 5% Schritten geschätzt. Bei Anteilen unter 5% wurde in 1% Schritten geschätzt. Anschließend wurden die Deckungsgrade der einzelnen Makrophytenarten in gleicher Weise erhoben. Die Bestimmung

der Arten erfolgte soweit möglich im Feld, schwer zu bestimmende Arten wurden im Labor nach Casper & Krausch (1980), Rothmaler (2002) und Van De Weyer & Schmidt (2007) nachbestimmt.

Makrozoobenthos

Makrozoobenthosgemeinschaften reagieren insbesondere auf strukturelle Degradation, die oft im Zusammenhang mit Querverbau und Wasserkraftnutzung beobachtet wird. Weiterhin spielt das Makrozoobenthos zum einen als Hauptnahrungsquelle für viele Fischarten und zum anderen als Hauptkonsument der pflanzlichen Biomasse (insbesondere Periphyton) eine bedeutende Rolle im Nahrungsnetz der Fließgewässer. Daher wurde das Makrozoobenthos im vorliegenden Projekt zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen der Wasserkraftanlagen herangezogen. Das Makrozoobenthos wurde in jedem Transekt mittels Surber Sampling (Maschenweite 500 µm; Surber 1930) beprobt. Es wurden jeweils fünf Surber-Sampler-Flächen (Gesamtfläche: 0,48 m²) als Sammelprobe in einer 1 L Weithalsflasche mit 50-prozentigem Ethanol konserviert. Vor der Einlagerung am Lehrstuhl sowie in regelmäßigen Zeitabständen während der Lagerung erfolgte eine Nachfixierung der Proben. Alle Proben wurden im Labor gewaschen, auf Ordnungsniveau vorsortiert und bis zur Bestimmung in 50-prozentigem Ethanol aufbewahrt. Anschließend erfolgte die Bestimmung mittels Binokular und Mikroskop soweit möglich auf Artniveau. Es wurden folgende Bestimmungsschlüssel verwendet: Nagel (1989), Schmedtje & Kohmann (1992), Bellmann (1993), Waringer & Graf (1997), Bauernfeind & Humpesch (2001), Eggers & Martens (2001), Heidemann & Seidenbusch (2002), Glöer & Meier-Brook (2003), Sundermann & Lohse (2004), Zwick (2004), Lechthaler (2005), Lechthaler & Car (2005), Lechthaler & Stockinger (2005), Lechthaler (2007), Lechthaler (2009), Eiseler (2010), Eiseler & Hess (2013), Bauernfeind & Lechthaler (2014).

Fische

Fischartengemeinschaften sind in besonderem Maße durch den Einbau von Querbauwerken und die Wasserkraftnutzung betroffen. Nicht nur die longitudinale und laterale Konnektivität und damit die Erreichbarkeit verschiedener Teilhabitats im Lebenszyklus der Fische (z.B. Laichplätze im Oberlauf oder in Nebengewässern oder Juvenilhabitate in der Aue) wird durch Querbauwerke beeinflusst, sondern auch die Verfügbarkeit und Qualität dieser Habitats. Weiterhin befinden sich Fische in den höchsten trophischen Ebenen des Fließgewässers und integrieren daher potenziell auch die Effekte auf die darunterliegenden Ebenen in der Nahrungskette. Die Erhebung der Fischartenzusammensetzung im Ober- und Unterwasser

der Kraftwerke stellt daher eine wichtige Komponente bei der Bewertung der ökologischen Auswirkungen dar. Daher wurde in jedem Transekt eine Gewässerstrecke von jeweils 30 m Länge befischt. Daraus ergeben sich pro Gewässer jeweils 15–20 Transekte im Ober- und Unterwasser (vgl. Abbildung 42). Eine hohe Anzahl an Befischungstransekten dieser Länge hat sich in anderen Untersuchungen ebenfalls als geeignet erwiesen, um die Effekte von anthropogenen Veränderungen oder von Renaturierungsmaßnahmen statistisch zu prüfen (Pander & Geist 2010, Mueller et al. 2014a & b, Pander et al. 2015). Jedes Transekt wurde vom Boot aus mit einem mobilen Elektrofischfanggerät (Firma Grassl bzw. EFKO, 11 kW), einer Anode und einem Kescher befischt. Bei sehr geringer Wassertiefe wurde die Befischung watend durchgeführt. Die gefangenen Fische wurden gemessen (0,5 cm genau) und auf Artniveau bestimmt. An Standorten mit Stillwassercharakter (Eixendorfer See) wurden drei Multi-Maschen Kiemennetze (DIN EN 1457; 30 m Länge mit Maschenweiten zwischen 5 mm und 55 mm) im Ober- und Unterwasser gestellt, da sich diese als sehr effektiv bei der Bestandserhebung von Fischen in Seen erwiesen haben (Jurvelius et al. 2011) und durch diese das bereits erfasste Fischarteninventar ergänzt wird. Zur Bestimmung von Korpulenzfaktoren und Berechnung von Biomassen wurde eine repräsentative Anzahl an Fischen jeder Art gewogen. Nach der Untersuchung wurden alle Fische wieder schonend ins Gewässer zurückgesetzt.

7.4. Datenanalyse und Statistik Projektteil B

Die gewonnenen Daten zu den abiotischen Habitateigenschaften, zum Makrozoobenthos, zu den Fischen, den Makrophyten und zum Periphyton wurden in Microsoft® Access Datenbanken eingepflegt. Die Datenbanken sind so aufgebaut, dass die Datensätze über die Identifikationsnummer der Transekte mit den GIS-Projekten zur Habitatkartierung mittels Side Sonar verknüpft werden können. Über entsprechende Datenbankabfragen wurden die Daten für die statistische Auswertung aufbereitet. Es wurden verschiedene univariate und multivariate Verfahren angewandt, die im Folgenden erläutert werden. Univariate statistische Berechnungen wurden mit dem Programm R durchgeführt (R Core Team 2017). Multivariate Verfahren wurden mit dem Statistikprogramm PRIMER v7 durchgeführt (Plymouth Marine Laboratory, United Kingdom). Die Testergebnisse wurden bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit (p-Wert) von $P \leq 0,05$ als signifikant eingestuft.

Für jede Substratprobe wurde dazu basierend auf den Gewichtsanteilen der verschiedenen Korngrößenfraktionen der „Mediane Korndurchmesser“ (dg) nach Sinowski & Auerswald (1999) gemäß der folgenden Formel bestimmt:

$$dg = \exp(a)$$

$$a = \sum_{i=1}^n f_i \ln(M_i)$$

n = Zahl der Korngrößenfraktionen
 f_i = Massenanteil der i -ten Fraktion
 M_i = Modale Größe der i -ten Fraktion

Für die biotischen Komponenten wurden unter Einbeziehung aller taxonomischen Gruppen (Fische, Makrozoobenthos, Makrophyten und Periphyton) für jedes Transekt einzeln die Artenzahlen, die Individuenzahlen und der Shannon-Index (Shannon & Weaver 1949) als Diversitätsmaß sowie die Evenness (Pielou 1966) als Maß der Gleichverteilung mit der Funktion DIVERSE im Programm Primer v7 berechnet. Für die Fische wurde zusätzlich basierend auf dem artspezifischen Korpulenzfaktor (KF) und der Fischlänge die Biomasse nach folgender Formel berechnet:

$$\frac{\text{Fischlänge [cm]}^3 * KF}{100}$$

Die Artenzusammensetzung von Fischen, Makrozoobenthos, Makrophyten und Periphyton wurde mittels multivariater Methoden zwischen „vor Kraftwerksbau“ und „nach Kraftwerksbau“ sowie zwischen Ober- und Unterwasser verglichen. Bei zwei saisonalen Beprobungen vor bzw. nach dem Kraftwerksbau sind die Daten beider Beprobungszeitpunkte in jede Gruppe mit eingegangen. Im Vergleich zu herkömmlichen multimetrischen Indices bieten multivariate Verfahren unabhängig von der untersuchten Organismengruppe ein sensibleres Werkzeug, um Veränderungen in Artengemeinschaften zu detektieren (Norris 1995, Reynoldson et al. 1997, Caroni et al. 2013, Dahm et al. 2013, Mueller et al. 2014b). Dazu wurden aus den Abundanztabellen der verschiedenen Transekte (vorkommende Arten mit ihren jeweiligen Individuenzahlen) Bray-Curtis Koeffizienten (Bray & Curtis 1957) als Maß für die räumliche β -Diversität berechnet und mittels nicht-metrischen mehrdimensionalen Skalierungen (NMDS) und Ähnlichkeitsanalysen (ANOSIM) ausgewertet (vgl. Kapitel 6.12.4). Außerdem wurden SIMPER Analysen durchgeführt, um herauszufinden, welche Arten hauptsächlich zu Unterschieden zwischen Ober- und Unterwasser bzw. zwischen „vor Kraftwerksbau“ und „nach Kraftwerksbau“ beitrugen (vgl. Kapitel 6.12.4).

Die multivariaten Auswertungen der Artenzusammensetzung in den untersuchten taxonomischen Gruppen folgen einem integrativen Ansatz, der es erlaubt, die durch das untersuchte Kraftwerk/Querbauwerk verursachten Veränderungen auf ökosystemarer Ebene zu bewerten (Mueller et al. 2014b, Mueller & Geist 2016). Für die integrative Auswertung müssen die Daten in einem ersten Schritt entsprechend der in Mueller et al. (2014b) beschriebenen Methode normalisiert werden (Abbildung 47). Dabei wurde für jede Organismengruppe zunächst eine eigene Tabelle erstellt, in der jeder Wert durch die Gesamtsumme aller Werte geteilt und mit 1.000 multipliziert wurde (Mueller et al. 2014b). Auf diese Weise geht jede taxonomische Gruppe trotz unterschiedlicher Erhebungsmethoden und verschiedener Arten- und Individuenzahlen mit gleichem numerischem Gewicht in die Gesamtauswertung ein. Innerhalb einer Organismengruppe bleiben die numerischen Verhältnisse zwischen den Bereichen, Entfernungsklassen und Zeitpunkten erhalten. Die normalisierten Tabellen wurden anschließend zu einer Gesamttabelle zusammengefasst. Die multivariaten Analysen dieser Gesamttabelle erfolgten analog zu der für die einzelnen Organismengruppen beschriebenen Methodik.

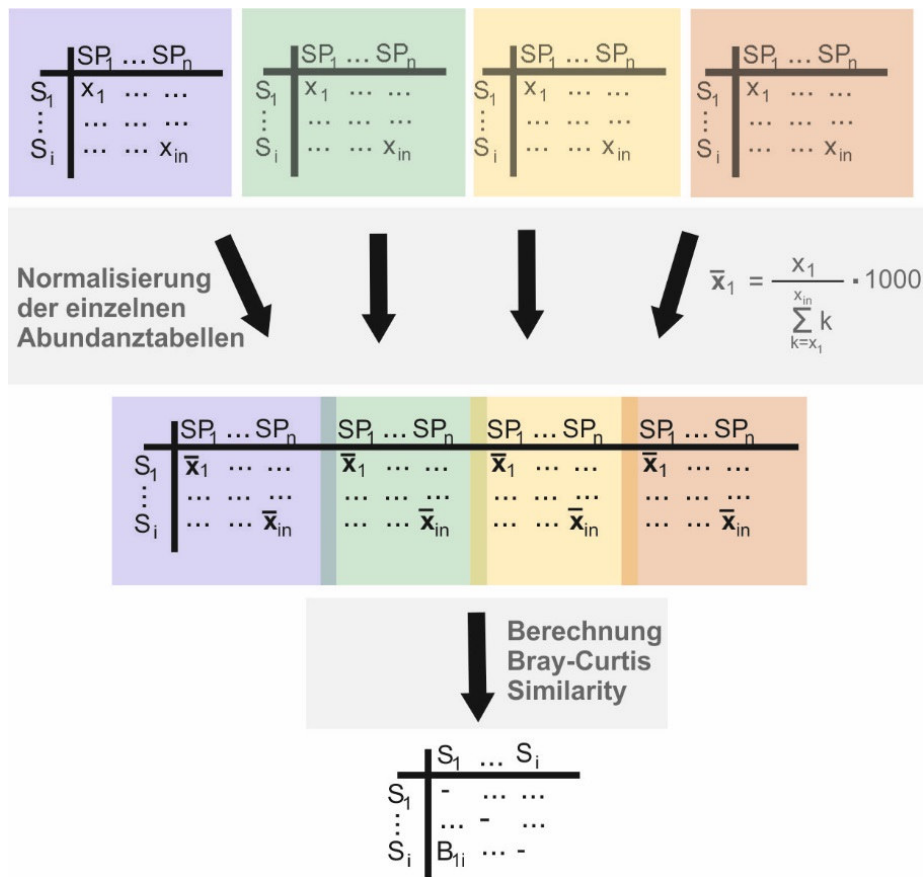


Abbildung 47 Schematische Darstellung der Normalisierungsmethode zur integrativen Gesamtauswertung aller biotischen Daten nach Mueller et al. (2014b).

Um die Populationsstruktur verschiedener Fischarten zu untersuchen, wurde die Längenhäufigkeitsverteilung (Individuenzahlen und Totallänge nach Größenklassen) der häufigsten Fischarten für jedes Gewässer in einem Excel-Diagramm aufgetragen. Daraus können Rückschlüsse auf den Reproduktionserfolg und die Habitatnutzung der unterschiedlichen Lebensstadien gezogen werden. Dazu wurden die Fische, gemäß des fischbasierten Bewertungssystems fiBS (Dußling et al. 2014), in folgende Größenklassen unterteilt: ≤ 2 cm, $> 2 \leq 5$ cm, $> 5 \leq 10$ cm, $> 10 \leq 15$ cm, $> 15 \leq 20$ cm, $> 20 \leq 25$ cm, $> 25 \leq 30$ cm, $> 30 \leq 40$ cm, $> 40 \leq 50$ cm, $> 50 \leq 60$ cm und > 60 cm.

7.5. Durchgeführte Untersuchungen Projektteil B

In der nachfolgenden Tabelle sind die Zeiträume der durchgeführten Untersuchungen für den Projektteil B Ökologische Auswirkungen an den konventionellen und den geplanten bzw. bereits umgesetzten innovativen Wasserkraftanlagen für die Projektjahre 2014–2022 aufgelistet (Tabelle 9).

Tabelle 9 Zeitplan der durchgeführten Untersuchungen für den Projektteil B Ökologische Auswirkungen aufgeteilt nach den verschiedenen Standorten.

Standort		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Lindesmühle (Fränk. Saale)	Vor Bau des Kraftwerks								
	Nach Bau des Kraftwerks	Mai		09.05.–					
		August		10.05.					
				03.08.–					
Baierndorf- Wellerstadt (Regnitz)	Vor Bau des Kraftwerks								
	Nach Bau des Kraftwerks	Mai		02.05.–					
		August		04.05.					
				01.08.–					
Heckerwehr (Roth)	Vor Bau des Kraftwerks	März/April		30.03.–					
				01.04.					
		Juli/August	30.07.–						
			01.08.						
	Nach Bau des Kraftwerks	April		04.04.–					
		Juli		08.04.					
Au (Iller)	Vor Bau des Kraftwerks	September/ Oktober	08.09.–						
			11.09.						
			07.10.						
	Nach Bau des Kraftwerks	August/ September		16.08.–					
				18.08.					
				01.09.–					
Eixendorf (Schwarzach)	Vor Bau des Kraftwerks	Mai		18.05.–					
		August		20.05.					
				05.08.–					
				06.08.					
	Nach Bau des Kraftwerks	Mai			02.05.–				
		August			05.05.				
Baierbrunn (Isar)	Vor Bau des Kraftwerks	April		07.04.–					
		Juli		10.04.					
				13.07.–					
				15.07.					
	Nach Bau des Kraftwerks	April				03.04.–			
		August				06.04.			
Volkmanns- dorf (Amper/Isar)	Vor Bau des Kraftwerks	April		22.04.–					
				24.04.					
		August		17.08.–					
				20.08.					
	Nach Bau des Kraftwerks								
Großweil (Loisach)	Vor Bau des Kraftwerks	Juni/Juli		01.06.					
				16.07.–					
				17.07.					
				21.07.					
		Oktober	13.10.–						
			15.10.						
Höllthal (Alz)	Vor Bau des Kraftwerks								
	Nach Bau des Kraftwerks	Juli					15.07.–		
							18.07.		
		September				05.09.–			
						07.09.			
						10.09.–			

8. Zusammenschau Ergebnisse Projektteil A und B

Für den Vergleich konventioneller und innovativer Anlagen sollen die direkten Effekte der Wasserkraftanlagen auf die Fische (Mortalität aus Projektteil A) und die Habitatauswirkungen (Projektteil B) integrativ betrachtet und verglichen werden. Eine Verrechnung der Ergebnisse aus Projektteil A und B wurde hierbei bewusst nicht durchgeführt, sondern der Weg einer grafischen Verschneidung der Ergebnisse beider Projektteile gewählt. Hierbei dient als Messgröße für die direkten Auswirkungen auf die Fische die über alle getesteten Fischarten ermittelte Mortalität (sofortig und verzögert). Als Messgröße für die ökologischen Auswirkungen auf Habitat und Lebensgemeinschaften dient der Unterschied zwischen Ober- und Unterwasser bezüglich der verschiedenen erhobenen Qualitätskomponenten (Periphyton, Makrozoobenthos, Makrophyten und Fische; integriert nach Mueller et al. 2014b), welcher die Stärke der Unterbrechung des Fließgewässerkontinuums charakterisiert (Mueller et al. 2011). Dieser Unterschied wurde anhand des Bray-Curtis Koeffizienten, in diesem Fall zwischen Ober- und Unterwasser an jedem Standort, quantifiziert und mithilfe des Ordinationsverfahrens NMDS grafisch dargestellt. In der NMDS erfolgte eine grafische Verschneidung mit den Mortalitätsraten aus Projektteil A mithilfe von sogenannten „Bubble plots“ (siehe Statistikglossar). Dadurch wird auf einen Blick sichtbar, wie stark die Unterbrechung des Fließgewässerkontinuums und wie stark die direkten Auswirkungen auf die absteigenden Fische an den jeweiligen Untersuchungsstandorten im Vergleich sind.

9. Grenzen des Projekts

Im Vergleich zu den bisher durchgeführten Studien sowohl auf nationaler (z.B. Ebel 2013) als auch internationaler Ebene handelt es sich bei dem hier vorliegenden Projekt wahrscheinlich um die bisher umfangreichsten Untersuchungen zur fischökologischen Verträglichkeit von innovativen und konventionellen Wasserkraftstechnologien. Dennoch hat auch dieses Projekt seine Grenzen bzw. verschiedene Einschränkungen, deren Kenntnis wichtig für die Interpretation der Ergebnisse ist und die daher im Folgenden erläutert werden sollen.

9.1. Übertragbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse

Bei den Ergebnissen aus dem vorliegenden Projekt ist grundsätzlich zu beachten, dass standortspezifische Faktoren wie z.B. die Durchflussmenge oder Fallhöhe und bauliche Details zu stark unterschiedlichen Effekten auf Fische bei gleicher Kraftwerkstechnologie führen können. Nicht für alle Anlagentypen war es möglich, im Rahmen dieses Projekts mehrere Standorte zu untersuchen (z.B. Schachtkraftwerk, bewegliches Kraftwerk) und es ist derzeit auch nicht klar, inwieweit die Ergebnisse von zwei im Rahmen des Projekts untersuchten Standorten (z.B. VLH-Turbine) bayernweit oder gar bundesweit übertragbar sind. Nur in wenigen Fällen ist es möglich, zusätzlich auf in anderen Regionen durchgeführte Studien zurückzugreifen (z.B. VLH-Technik und Wasserkraftschnecke) und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist aufgrund methodischer Unterschiede meist nicht oder nur bedingt gegeben (z.B. untersuchte Fischarten, Berücksichtigung verzögerter und fangbedingter Effekte, Methodik zur Berechnung der Mortalität). Bei den beiden konventionellen nachgerüsteten Kraftwerksanlagen Baiersdorf-Wellerstadt und Lindesmühle sowie am Standort Höllthal konnte jeweils kein Vorherzustand bezogen auf das Modul B erhoben werden. Eine Bewertung einer Verbesserung der Fischverträglichkeit durch den Umbau der Anlagen bezogen auf Modul B kann nur auf Basis von Literaturvergleichen im Bezug auf die vorher verbaute Technik erfolgen. Weiterhin können die beobachteten Unterschiede bei einer einmaligen saisonalen Beprobung nicht mit absoluter Sicherheit auf das Kraftwerk zurückgeführt werden. Dazu wären mehrjährige Untersuchungen vor- und nach Bau der Anlagen notwendig, um die natürlichen Schwankungen zwischen verschiedenen Jahren mit zu erfassen und in Relation zu den kraftwerksbedingten Veränderungen stellen zu können. Die Untersuchungen im Rahmen von Projektteil A sind jeweils nur bis zu einem bestimmten Maximalabfluss möglich, Hochwasserszenarien können i.d.R. aufgrund der technischen Grenzen der Hamenbefischung nicht oder nur bei schwachen Hochwasserereignissen untersucht werden. Weiterhin können in manchen Fällen aufgrund

standortspezifischer Gegebenheiten oder unvorhergesehenen Ereignissen im Vergleich zur Turbinenschädigung relativ hohe fangbedingte Effekte nicht vollständig vermieden werden. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn aufgrund baulicher Gegebenheiten im Unterwasser der Hamen nicht in ausreichender Länge konstruiert werden kann, um den Steert in einen möglichst strömungsberuhigten Bereich $< 0,5 \text{ m/s}$ (Pander et al. 2018) zu positionieren. An Standorten mit Wasserkraftschnecken entsteht trotz ausreichend geringer Strömungsgeschwindigkeiten eine Drehbewegung des Wassers im Hamen und Steert, die ebenfalls zu erhöhter fangbedingter Mortalität führen kann. Die Wahrscheinlichkeit für ein erhöhtes Aufkommen von Treibgut oder Fischbiomasse im Steert kann zwar durch kurze Leerungsintervalle von 1-2 h minimiert werden, Extremereignisse können jedoch trotzdem nie ausgeschlossen werden. Starke fangbedingte Effekte verursachen vor allem dann Probleme bei der Auswertung und Interpretation der Daten, wenn die Effektstärke der untersuchten Turbinen vergleichsweise gering ist. Dann kann es sehr leicht durch zufallsbedingte Effekte wie einzelne Leerungen mit besonders hohen fangbedingten Effekten zu höheren Mortalitätsraten in der Versuchsgruppe Hamen (= Kontrolle) und damit zu negativen Werten nach der Korrektur um die fangbedingten Effekte kommen (siehe Kapitel 6.12.2). Auch Prädation im Hamen und Steert kann die Ergebnisse beeinflussen. Dieser Effekt kann zwar durch eine entsprechende Wahl der Reihenfolge der Fischarten bei den Fischzugaben (Versuche mit Raubfischarten als letztes durchführen) reduziert werden, aber aufgrund des natürlichen Fischabstiegs nie vollständig vermieden werden. Die betroffenen Fische können zwar teilweise identifiziert und aus dem Datensatz ausgeschlossen werden, allerdings sind die Verletzungsmuster nicht immer eindeutig von den durch die Turbinen verursachten abgrenzbar. Allerdings betrifft die Prädation die Fische aus allen Versuchsgruppen mit gleicher Wahrscheinlichkeit. Bezüglich der Fischarten wurde hier ein relativ umfangreiches Spektrum von acht für bayerische Gewässer typischen Fischarten abgedeckt. Dennoch ist das getestete Größenspektrum aufgrund der Verfügbarkeit aus Fischzuchten teilweise eingeschränkt und die Ergebnisse sind nicht zwingend auf andere Untersuchungen zur selben Fischart in anderen Größen übertragbar.

9.2. Untersuchungszeitpunkte und Verfügbarkeit der Fische

Die Durchführung der standardisierten Fischzugaben ist stark von der Verfügbarkeit der Versuchsfische abhängig. Die Verfügbarkeit ist für die unterschiedlichen Fischarten jahreszeitlich stark eingeschränkt und teilweise nur schwierig mit den weiteren Restriktionen (Fertigstellung der Anlagen, Abflussdynamik des Untersuchungsgewässers, Laubfall im Herbst, Schneeschmelze im Frühjahr, Tageslänge etc.) für die Durchführung der

Hamenbefischungen in Einklang zu bringen. Einige der Fischarten (z.B. Rotaugen und Flussbarsch) sind aus der Teichwirtschaft regulär erst im Oktober mit Eintreten niedrigerer Wassertemperaturen verfügbar. Aufgrund des starken Laubfalls und des Hochwasserrisikos sind ab Anfang Oktober allerdings keine Hamenbefischungen mehr möglich. Daher muss hier auf andere Quellen wie z.B. Kreislaufanlagen ausgewichen werden, aus denen nur ein sehr einheitliches Größenspektrum verfügbar ist, um die Versuche im September durchführen zu können. Andere Fischarten, insbesondere alle Salmoniden (Huchen, Äsche, Bachforelle), können aufgrund ihres hohen Sauerstoffbedarfs nur im zeitigen Frühjahr bei niedrigeren Wassertemperaturen in den Versuchen verwendet werden. Weiterhin ist die Verfügbarkeit und Qualität der Fische aus den Fischzuchten bedingt durch unvorhersehbare Faktoren wie Haltung, Witterung und Auftreten von Krankheiten auch zwischen den Jahren starken, nicht kalkulierbaren Schwankungen unterlegen. Daher muss auch ein kurzfristiges Backup für die verschiedenen Fischlieferungen im Vorfeld organisiert werden, bzw. wenn dies nicht möglich ist, im schlechtesten Fall eine Versuchsreihe ausfallen.

Um größenspezifische Effekte bei allen Fischarten besser untersuchen zu können, wäre es wünschenswert, ein größeres Spektrum an Größenklassen der Versuchsfische zu berücksichtigen als dies bisher im Projekt möglich war. Die praktische Umsetzung gestaltet sich jedoch bei einigen Arten aufgrund der limitierten Verfügbarkeit vor allem größerer Individuen (z.B. Flussbarsch, Rotaugen, Nase und Barbe) bzw. des hohen finanziellen und logistischen Aufwands beim Umgang mit den größeren Fischen (Salmoniden, insbesondere Huchen, Fischtransport und Hälterungskapazitäten) meist schwierig. Einige der schwer erhältlichen Fischarten werden seit dem Jahr 2015 speziell für das Projekt am Landesamt für Umwelt in Wielenbach vermehrt (z.B. Nase und Barbe), größere Fische dieser Arten standen daher erst mit zunehmender Projektdauer zur Verfügung.

9.3. Wiederfang und Berechnung von Mortalitätsraten

Zu Beginn des Projekts und damit auch bei Fallzahlplanung gab es nur sehr eingeschränkte Erfahrungen darüber, wie hoch der Wiederfang der in den Experimenten standardisiert zugegebenen Zuchtfische ausfallen kann. Die einzigen verfügbaren Orientierungswerte stammten aus Untersuchungen, bei denen Fische direkt mithilfe von Rohren auf die Turbinen zugegeben wurden und nur eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit einer Flucht ins Oberwasser bestand (Wiederfang durchschnittlich 77%). Im vorliegenden Projekt wurde bewusst auf eine Dotation der Fische mithilfe von Rohren verzichtet, um ein möglichst naturnahes Schwimmverhalten zu erreichen. Bei der hier durchgeführten Zugabe der Fische oberhalb und

unterhalb des Kraftwerksrechens musste allerdings in Kauf genommen werden, dass die Fische die Möglichkeit haben, ins Oberwasser zu fliehen. Der Anteil an Fischen, die nicht über die Kraftwerksanlage absteigen, variierte entsprechend der bisherigen Erfahrungen sehr stark zwischen Fischarten und Gewässern und kann selbst für eine Fischart in verschiedenen Gewässern kaum abgeschätzt werden. Daraus ergaben sich an den verschiedenen Standorten und für die verschiedenen Fischarten stark unterschiedliche Wiederfangraten. Diese Unterschiede müssen beim Vergleich und der Interpretation der Mortalitätsraten berücksichtigt werden, da über den Verbleib der nicht wiedergefangenen Fische keine gesicherten Aussagen gemacht werden können. Diese können ins Oberwasser geflohen sein und das Kraftwerk nie passiert haben, sie können je nach Größe aber auch im Unterwasser sowohl lebend als auch tot (insbesondere durchtrennte Tiere) durch die Maschen des Hamens entkommen bzw. verloren gegangen sein oder lebend vor dem Turbinenauslauf verweilen und nicht in den Steert absteigen. Die Mortalität kann daher nur bezogen auf die tatsächlich wiedergefangenen Individuen berechnet werden. Die Verlässlichkeit der ermittelten Mortalitätsraten ist aber umso höher, je kleiner die Anzahl der nicht wiedergefangenen Fische mit ungewissem Verbleib ist. Bei sehr niedrigen Wiederfangraten besteht generell eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass diese entweder unter- (z.B. hoher Anteil an toten Fischen im Hamen verloren) oder überschätzt sind (z.B. hoher Anteil an überlebenden Fischen im Turbinenauslauf, der innerhalb des Versuchszeitraums nicht in den Steert absteigt). Da es derzeit keinerlei akzeptierte Richtwerte gibt, ab welcher Wiederfangrate bzw. Stichprobenzahl Mortalitätsraten als gesichert angenommen werden können, kann die Absicherung in diesem Projekt nur über statistische Tests und eine gemeinsame Betrachtung mit den Ergebnissen zum Wiederfang erfolgen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Auswirkungen der Wasserkraftanlagen auf die Fischpopulationen im Sinne des Populationsschutzes nach §35 WHG in diesem Projekt nicht untersucht wurden.

9.4. Limitierungen bei der Bewertung des natürlichen Fischabstiegs

Bei der Bewertung des natürlichen Fischabstiegs gibt es verschiedene Einschränkungen, die aufgrund der technischen Grenzen nur schwer eliminiert werden können. Dies betrifft zum einen die Mortalitäts- und Verletzungsraten, die aufgrund der unbekannten Vorgeschichte der Fische (Passage weiterer Kraftwerksanlagen, Verletzungen durch Prädation, Parasitenbefall, aus sonstigen Gründen geschwächte Kondition, Antreiben toter Individuen, die auch nicht bei der Elektrofischerei erfasst werden) nur eingeschränkt interpretierbar sind. Da nicht alle Fischarten in den standardisierten Versuchen verwendet werden können (Projektumfang,

Verfügbarkeit, geschützte Arten), liefert die Untersuchung der Mortalität beim natürlichen Fischabstieg aber für die übrigen Arten wenigstens einen Anhaltspunkt. Hier ist allerdings zu berücksichtigen, dass manche Arten eventuell nicht zu den hier festgelegten Befischungszeiträumen im Frühjahr und Herbst wandern, sondern im Sommer oder Winter. Eine ganzjährige Befischung würde den Rahmen des Projekts allerdings bei weitem sprengen.

Eine weitere Schwierigkeit ist, dass je nach standortspezifischen Strömungsverhältnissen am Turbinenauslauf an manchen Standorten ein Einschwimmen von einzelnen Fischen oder Fischschwärmen aus dem Unterwasser durch die großen Maschen am Hameneingang möglich ist. Dies wurde vor allem am Standort Eixendorf beobachtet und führt zu einer deutlichen Überschätzung des Anteils an vitalen Fischen. Leider gibt es keine Möglichkeit, diese Fische quantitativ von den durch die Turbine abgestiegenen Fischen zu differenzieren. Dies führt nicht nur bei der Bewertung der Mortalität zu Problemen, sondern derartige Beobachtungen müssen auch bei der Bewertung der Nutzung der verschiedenen Abstiegskorridore berücksichtigt werden. Weiterhin können bestimmte standörtliche Gegebenheiten (z.B. starke Dominanz einer Fischart im natürlichen Fischabstieg und großer Höhenunterschied von 1,6–2,2 m zwischen Gewässersohle und Rechenebene am Standort Großweil) dafür ausschlaggebend sein, dass die Korridornutzung des natürlichen Fischabstiegs nur bedingt aussagekräftig ist. Für die Beurteilung der Korridornutzung wurden daher an den Standorten Eixendorf und Großweil die Ergebnisse der standardisierten Fischzugaben verwendet.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Bewertung des natürlichen Fischabstiegs ist, dass die Anzahl der tatsächlich abwanderwilligen Fische im Oberwasser der Anlagen immer unbekannt ist. Auch die Verhaltensuntersuchungen mit dem ARIS können hier nur teilweise weiterhelfen, da die Anwendbarkeit des Systems bei größeren Gewässern auf einen Ausschnitt des Gewässerquerschnitts beschränkt ist und die Beobachtungen nur für bestimmte Fischgrößen und Arten zuverlässig funktionieren (siehe Band 2b).

Literaturverzeichnis

- 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. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, PNNL-13470.
- Abernethy C. S., Amidan B. G. & Cada G. (2002) Simulated passage through a modified Kaplan turbine pressure regime: "A supplement to laboratory studies of the effects of pressure and dissolved gas supersaturation on turbine-passed fish". Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, PNNL-13470-A.
- Abernethy C. S., Amidan B. G. & Cada G. F. (2003) Fish passage through a simulated horizontal bulb turbine pressure regime: A supplement to "Laboratory studies of the effects of pressure and dissolved gas supersaturation on turbine-passed fish". Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, PNNL-13470-B.
- Adam B., Schewers U. & Dumont U. (1999) Beiträge zum Schutz abwandernder Fische – Verhaltensbeobachtungen in einem Modellgerinne. Bibliothek Natur und Wissenschaft 16, 63 S.
- Adam B. & Brujis M. (2006) Allgemeine Anforderungen an Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen/Untersuchungen im Maas-System. DWA-Themen: Durchgängigkeit von Gewässern für die aquatische Fauna. Internationales DWA-Symposium zur Wasserwirtschaft 3.–7. April 2006. Deutsche Gesellschaft für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- Adam B., Schürmann M. & Schwevers U. (2013) Zum Umgang mit aquatischen Organismen – Versuchstierkundliche Grundlagen. Springer Spektrum, Wiesbaden.
- Amaral S. V., Coleman B. S., Rackovan J. L., Withers K. & Mater B. (2018) Survival of fish passing downstream at a small hydropower facility. Marine and Freshwater Research 69(12), 1870-1881.
- Ammar I. B., Cornet V., Houndji A., Baekelandt S., Antipine S., Sonny D., Mandiki S. N. M. & Kestemont P. (2021) Impact of downstream passage through hydropower plants on the physiological and health status of a critically endangered species: The European eel *Anguilla anguilla*. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology 254, 110876.

- Anderson M. J., Gorley R. N. & Clarke K. R. (2008) PERMANOVA+ for PRIMER: A guide to software and statistical methods. Primer-e, Plymouth, UK.
- Anderson D., Moggridge H., Warren P. & Shucksmith J. (2015) The impacts of 'run-of-river' hydropower on the physical and ecological condition of rivers. *Water and Environment Journal* 29(2), 268-276.
- Bauernfeind E. & Humpesch U. H. (2001) Die Eintagsfliegen Zentraleuropas (Insecta: Ephemeroptera): Bestimmung und Ökologie. Verlag des Naturhistorischen Museums Wien.
- Bauernfeind E. & Lechthaler W. (2014) Eutaxa: Ephemeroptera 14 – Key to Larvae from Central Europe (DVD).
- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2021) Rote Liste und Gesamtartenliste Bayern – Fische und Rundmäuler. Bearbeitung: Effenberger M., Oehm J., Schubert M., Schliewen U. & Mayr C. – Juni 2021, Augsburg: 50 S.
- Becker J. M., Abernethy C. S. & Dauble D. D. (2003) Identifying the effects on fish of changes in water pressure during turbine passage. *Hydro Review* 22(5), 32-42.
- Bell C. E. & Kynard B. (1985) Mortality of adult American shad passing through a 17-megawatt Kaplan turbine at a low-head hydroelectric dam. *North American Journal of Fisheries Management* 5(1), 33-38.
- Bellmann H. (1993) Libellen beobachten, bestimmen. Naturbuch-Verlag, Augsburg.
- Benejam L., Saura-Mas S., Bardina M., Sola C., Munnè A. & García-Berthou E. (2016) Ecological impacts of small hydropower plants on headwater stream fish: from individual to community effects. *Ecology of Freshwater Fish* 25(2), 295-306.
- Berg R. (1987) Fischereischäden durch Turbinen. *Arbeiten des Deutschen Fischereiverbands*, 41-47.
- Bernhardt E. S., Palmer M. A., Allan J. D., Alexander G., Barnas K., Brooks S., Carr J., Clayton S., Dahm C., Follstad-Shah J., Galat D., Gloss S., Goodwin P., Hart D., Hasset B., Jenkinson R., Katz S., Kondolf G. M., Lake P. S., Lave R., Meyer J. L., O'Donnell T. K., Pagano L., Powell B. & Sudduth E. (2005) Synthesizing U.S. River Restoration Efforts. *Science* 308, 636-637.

- Bestgen K. R., Bundy J. M., Zelasko K. A. & Wahl T. L. (2004) Effectiveness of high-velocity inclined profile-bar fish screens measured by exclusion and survival of early life stages of fathead minnow. *North American Journal of Fisheries Management* 24(4), 1228-1239.
- Blasel K. (2011) Demonstration Plant in the Kinzing River: Moveable Hydroelectric Power Plant for Ecological River Improvements and Fish Migration Reestablishment – Fischereibiologisches Monitoring nach dem Umbau der Querbauwerke in Gegenbach und Offenburg. Büro für Fischereibiologie & Ökologie, Endbericht 2011.
- Blomberg S. P. (2014) Power Analysis Using R. (<http://www.evolutionarystatistics.org/document.pdf>)
- Boubée J. A. T. & Haro A. (2003) Downstream migration and passage technologies for diadromous fishes in the United States and New Zealand: tales from two hemisphere. Downstream movement of fish in the Murray-Darling Basin, Canberra, 24-32.
- Boubée J. A. T. & Williams E. K. (2006) Downstream passage of silver eels at a small hydroelectric facility. *Fisheries Management and Ecology* 13(3), 165-176.
- Boys C. A., Pflugrath B. D., Mueller M., Pander J., Deng Z. D. & Geist J. (2018) Physical and hydraulic forces experienced by fish passing through three different low-head hydropower turbines. *Marine and Freshwater Research* 69(12), 1934-1944.
- Bracken F. S. A. & Lucas M. C. (2013) Potential impacts of small-scale hydroelectric power generation on downstream moving lampreys. *River Research and Applications* 29(9), 1073-1081.
- Bratrich C., Truffer B., Jorde K., Markard J., Meier W., Peter A., Schneider M. & Wehrli B. (2004) Green hydropower: a new assessment procedure for river management. *River Research and Applications* 20, 865-882.
- Bray J. R. & Curtis J. T. (1957) An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological Monographs* 27, 325-349.
- Breukelaar A. W., Ingendahl D., Vriese F. T., De Laak G., Staas S. & Klein Breteler J. G. P. (2009) Route choices, migration speeds and daily migration activity of European silver eels *Anguilla anguilla* in the River Rhine, north-west Europe. *Journal of Fish Biology* 74(9), 2139-2157.
- Brinkmeier B., Aufleger M., Böttcher H., Unfer G. & Zeiringer B. (2017) Der Elektro-Seilrechen als Fischschutzeinrichtung an Kleinwasserkraftanlagen. Universität Innsbruck &

- Brockes J. P. & Kumar A. (2008) Comparative aspects of animal regeneration. *Annual Review of Cell and Developmental Biology* 24, 525-549.
- Brown R. S., Carlson T. J., Welch A. E., Stephenson J. R., Abernethy C. S., Ebberts B. D., Langeslay M. J., Ahmann M. L., Feil D. H., Skalski J. R. & Townsend R. L. (2009) Assessment of barotrauma from rapid decompression of depth-acclimated juvenile Chinook salmon bearing radiotelemetry transmitters. *Transactions of the American Fisheries Society* 138(6), 1285-1301.
- Brown R. S., Pflugrath B. D., Colotelo A. H., Brauner C. J., Carlson T. J., Deng Z. D. & Seaburg A. G. (2012a) Pathways of barotrauma in juvenile salmonids exposed to simulated hydroturbine passage: Boyle's law vs. Henry's law. *Fisheries Research* 121, 43-50.
- Brown R. S., Carlson T. J., Gingerich A. J., Stephenson J. R., Pflugrath B. D., Welch A. E., Langeslay M. J., Ahmann M. L., Johnson R. L., Skalski J. R., Seaburg A. G. & Townsend R. L. (2012b) Quantifying mortal injury of juvenile Chinook salmon exposed to simulated hydro-turbine passage. *Transactions of the American Fisheries Society* 141(1), 147-157.
- 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.
- Bundesministerium der Justiz (2010) Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG). *Bundesgesetzblatt* 2009a Teil 1, 2585 S.
- Bundesverband Deutscher Wasserkraftwerke (2010) Das bewegliche Wasserkraftwerk. *Wassertriebwerk* 7/2010.
- Bunge T. (2001) Wasserkraftanlagen als erneuerbare Energiequelle: rechtliche und ökologische Aspekte. *Texte des Umweltbundesamtes*, Texte Januar 2001.
- Buysse D., Mouton A. M., Baeyens R. & Coeck J. (2015) Evaluation of downstream migration mitigation actions for eel at an Archimedes screw pump pumping station. *Fisheries Management and Ecology* 22, 286-294.

- Čada G. F. (1990) A review of studies relating to the effects of propeller-type turbine passage on fish early life stages. *North American Journal of Fisheries Management* 10(4), 418-426.
- Čada G. F. (2001) The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival. *Fisheries* 26(9), 14-23.
- Čada G. F., Loar J., Garrison L., Fisher R. & Neitzel D. (2006) Efforts to reduce mortality to hydroelectric turbine-passed fish: locating and quantifying damaging shear stresses. *Environmental Management* 37(6), 898-906.
- Čada G. F., Garrison L. A. & Fisher R. K. (2007) Determining the effect of shear stress on fish mortality during turbine passage. *Hydro Review* 26(7), 52.
- Calles O. & Greenberg L. (2009) Connectivity is a two-way street - the need for a holistic approach to fish passage problems in regulated rivers. *River Research and Applications* 25(10), 1268-1286.
- Calles O., Olsson I. C., Comoglio C., Kemp P. S., Blunden L., Schmitz M. & Greenberg L. A. (2010) Size-dependent mortality of migratory silver eels at a hydropower plant, and implications for escapement to the sea. *Freshwater Biology* 55(10), 2167-2180.
- Calles O., Karlsson S., Hebrand M. & Comoglio C. (2012) Evaluating technical improvements for downstream migrating diadromous fish at a hydroelectric plant. *Ecological Engineering* 48, 30-37.
- Calles O., Karlsson S., Vezza P., Comoglio C. & Tielman J. (2013) Success of a low-sloping rack for improving downstream passage of silver eels at a hydroelectric plant. *Freshwater Biology* 58(10), 2168-2179.
- Caroni R., van de Bund W., Clarke R. T. & Johnson R. K. (2013) Combination of multiple biological quality elements into waterbody assessment of surface waters. *Hydrobiologia* 704(1), 437-451.
- Carr J. W. & Whoriskey F. G. (2008) Migration of silver American eels past a hydroelectric dam and through a coastal zone. *Fisheries Management and Ecology* 15(5-6), 393-400.
- Casper S. J. & Krausch H.-D. (1980) Süßwasserflora von Mitteleuropa: Pteridophyta und Anthophyta, 1. und 2. Teil. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Champely, S. (2006) Basic functions for power analysis. Package 'pwr'. <https://cran.r-project.org/web/packages/pwr/pwr.pdf>

- Chatellier L., Wang R. W., David L., Courret D. & Larinier M. (2011) Experimental characterization of the flow across fish-friendly angled trashrack models. In Proceedings of the 34th World Congress of the International Association for Hydro-Environment Research and Engineering: 33rd Hydrology and Water Resources Symposium and 10th Conference on Hydraulics in Water Engineering. Engineers Australia, p. 2776.
- Colotelo A. H., Pflugrath B. D., Brown R. S., Brauner C. J., Mueller R. P., Carlson T. J., Deng Z. D., Ahmann M. L. & Trumbo B. A. (2012) The effect of rapid and sustained decompression on barotrauma in juvenile brook lamprey and Pacific lamprey: Implications for passage at hydroelectric facilities. *Fisheries Research* 129, 17-20.
- Cooke S. J., Hatry C., Hasler C. T. & Smokorowski K. E. (2011) Literature Review, Synthesis and Proposed Guidelines Related to the Biological Evaluation of "Fish Friendly" Very Low Head Turbine Technology in Canada. Department of Fisheries and Oceans, Sault Ste. Marie, ON (Canada). Great Lakes Lab.
- Coutant C. C. & Whitney R. R. (2000) Fish behavior in relation to passage through hydropower turbines: a review. *Transactions of the American Fisheries Society* 129(2), 351-380.
- Cox E. (1996) Identification of Freshwater Diatoms from Live Material, 1st edn. Chapman & Hall, London, UK.
- Cramer F. K. & Oligher R. C. (1964) Passing fish through hydraulic turbines. *Transactions of the American Fisheries Society* 93(3), 243-259.
- Cuchet M., Mühlbauer M., Ratschan C., Hartlieb A. & Brinkmeier B. (2011) Behavioural experiments on the design of downstream fish passage facilities for potamodromous species. *Engineers Australia* (34. IAHR World Congress, 26.06.-01.07.2011, Brisbane) 2792-2798.
- Dahm V., Hering D., Nemitz D., Graf W., Schmidt-Kloiber A., Leitner P., Melcher A. & Feld C. K. (2013) Effects of physicochemistry, land use and hydromorphology on three riverine organism groups: a comparative analysis with monitoring data from Germany and Austria. *Hydrobiologia* 704(1), 389-415.
- Davies J. K. (1988) A review of information relating to fish passage through turbines: implications to tidal power schemes. *Journal of Fish Biology* 33, 111-126.

- Deng Z., Guensch G. R., McKinstry 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. (2007a) Six-degree-of-freedom sensor fish design and instrumentation. *Sensors* 7(12), 3399-3415.
- Deng Z., Serkowski J. A., Fu T., Carlson T. J. & Richmond M. C. (2007b) Synthesis of Sensor Fish Data for Assessment of Fish Passage Conditions at Turbines, Spillways, and Bypass Facilities–Phase 1: The Dalles Dam Spillway Case Study. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA.
- Deng Z., Carlson T. J., Ploskey G. R., Richmond M. C. & Dauble D. D. (2007c) Evaluation of blade-strike models for estimating the biological performance of Kaplan turbines. *Ecological Modelling* 208(2), 165-176.
- Deng Z., Carlson T. J., Duncan J. P., Richmond M. C. & Dauble D. D. (2010) Use of an autonomous sensor to evaluate the biological performance of the advanced turbine at Wanapum Dam. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2(5), 053104.
- Deng Z. D., Lu J., Myjak M. J., Martinez J. J., Tian C., Morris S. J., Carlson T. J., Zhou D. & Hou H. (2014) Design and implementation of a new autonomous sensor fish to support advanced hydropower development. *Review of Scientific Instruments* 85(11), 115001.
- DIN EN 15204 (2006) Wasserbeschaffenheit – Anleitung für die Zählung von Phytoplankton mittels der Umkehrmikroskopie (Utermöhl-Technik). Beuth Verlag, Deutschland.
- Dubois R. B. & Gloss S. P. (1993) Mortality of juvenile American shad and striped bass passed through Ossberger crossflow turbines at a small-scale hydroelectric site. *North American Journal of Fisheries Management* 13(1), 178-185.
- 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.
- Dußling U., Berg R., Klinger H. & Wolter C. (2014) Assessing the Ecological Status of River Systems Using Fish Assemblages. *Handbuch Angewandte Limnologie: Grundlagen-Gewässerbelastung-Restaurierung-Aquatische Ökotoxikologie-Bewertung-Gewässerschutz*, 1-84.

- DWA (2005) Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen: Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. DWA Themen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- DWA (2006) Durchgängigkeit von Gewässern für die aquatische Fauna. DWA-Themen, Internationales DWA-Symposium zur Wasserwirtschaft 3.–7. April 2006, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- Ebel G. (2013) Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurblogische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, 1. Auflage, Halle (Saale).
- Ebel G., Gluch A. & Kehl M. (2015) Einsatz eines Leitrechen-Bypass-Systems nach Ebel, Gluch & Kehl an Wasserkraftanlagen – Grundlagen, Erfahrungen und Perspektiven. Wasserwirtschaft 7-8, 45-50.
- Edler C., Diestelhorst O. & Kock M. (2011) Untersuchungen zur Abwanderung und Schädigung von Fischen an der Wasserkraftschnecke Rhede-Krechting, Bocholter Aa (Kreis Borken). Abschlussbericht im Auftrag des Landesfischereiverbandes Westfalen und Lippe e.V., Planungsgemeinschaft terra aqua, Bochum.
- Egg L. (2015) An assessment of the functionality of a semi-natural bypass channel as habitat for rheophilic specialists. Master's Thesis. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.
- 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.
- Eggers T. O. & Martens A. (2001) Bestimmungsschlüssel der Süßwasser-Amphipoda (Crustacea) Deutschlands. Lauterbornia 42, 1-68.
- Eicher G. J., Bell M. C., Campbell C. J., Craven R. E. & Wert M. A. (1987) Turbine-Related Fish Mortality: Review and Evaluation of Studies. Electric Power Research Institute, EPRI AP-5480, Palo Alto, Canada.

- Eiseler B. (2010) Taxonomie für die Praxis. Bestimmungshilfen – Makrozoobenthos (1). LANUV-Arbeitsblatt 14. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW.
- Eiseler B. & Hess M. (2013) Taxonomie für die Praxis. Bestimmungshilfen – Makrozoobenthos (2). LANUV- Arbeitsblatt 20. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW.
- Eppard M. B., Hockersmith E. E., Axel G. A. & Sandford B. P. (2002) Spillway survival for hatchery yearling and subyearling chinook salmon passing Ice Harbor Dam, 2000. Fish Ecology Division, Northwest Fisheries Science Center, National Marine Fisheries Service.
- Ettl H., Gärtner G., Gerloff J., Heynig H. & Mollenauer D. (1978-1999) Süßwasserflora von Mitteleuropa. Volumes 1-17 & 19. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Germany.
- Ferguson J. W., Absolon R. F., Carlson T. J. & Sandford B. P. (2006) Evidence of delayed mortality on juvenile Pacific salmon passing through turbines at Columbia River dams. Transactions of the American Fisheries Society 135(1), 139-150.
- Ferguson J. W., Ploskey G. R., Leonardsson K., Zabel R. W. & Lundqvist H. (2008) Combining turbine blade-strike and life cycle models to assess mitigation strategies for fish passing dams. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 65(8), 1568-1585.
- Fishtek Consulting (2007) Fish monitoring and live fish trials. Ritz Atro Archimedes Screw Turbine, River Dart. Phase 1 Report: live fish trials, smolts, leading edge assessment, disorientation study, outflow monitoring.
- Floyd E. Y., Churchwell R. & Cech Jr J. J. (2007) Effects of water velocity and trash rack architecture on juvenile fish passage and interactions: a simulation. Transactions of the American Fisheries Society 136(5), 1177-1186.
- Fraser R., Deschênes C., O'Neil C. & Leclerc M. (2007) VLH: Development of a new turbine for Very Low Head sites. Waterpower XV, Chattanooga, TN, USA.
- Gale S. B., Zale A. V. & Clancy C. G. (2008) Effectiveness of fish screens to prevent entrainment of westslope cutthroat trout into irrigation canals. North American Journal of Fisheries Management 28(5), 1541-1553.
- Geiger F., Schäfer S. & Rutschmann P. (2016) Monitoring of downstream passage of small fish at the TUM-Hydro Shaft Power Plant Prototype. Institute of Hydraulic and Water Resources Engineering, test report no. 429, Technical University of Munich, Germany, pp. 49.

- Geist J. (2011) Integrative freshwater ecology and biodiversity conservation. *Ecological Indicators* 11, 1507-1516.
- Gjerde B. & Refstie T. (1988) The effect of fin-clipping on growth rate, survival and sexual maturity of rainbow trout. *Aquaculture* 73(1), 383-389.
- Glöer P. & Meier-Brook C. (2003) Süßwassermollusken: Ein Bestimmungsschlüssel für die Bundesrepublik Deutschland. 13. neubearbeitete Auflage, Deutscher Jugendbund für Naturbeobachtung, Hamburg.
- Gloss S. P. & Wahl J. R. (1983) Mortality of juvenile salmonids passing through Ossberger crossflow turbines at small-scale hydroelectric sites. *Transactions of the American Fisheries Society* 112(2A), 194-200.
- Gosset C., Travade F., Durif C., Rives J. & Elie P. (2005) Tests of two types of bypass for downstream migration of eels at a small hydroelectric power plant. *River Research and Applications* 21(10), 1095-1105.
- Gregory W. K. (1933) Fish skulls, a study of the evolution of natural mechanisms. *Transaction of the American Philosophical Society* 23(2).
- Grote A. B., Bailey M. M., Zydlewski J. D. & Hightower J. E. (2014) Multibeam sonar (DIDSON) assessment of American shad (*Alosa sapidissima*) approaching a hydroelectric dam. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 71(4), 545-558.
- Haghighi M. S., Mirghavami S. M., Chini S. F. & Riasi A. (2019) Developing a method to design and simulation of a very low head axial turbine with adjustable rotor blades. *Renewable Energy* 135, 266-276.
- Halsband E. (1975) Elektrofischscheuchanlage für Kanada. *Inf. Fischw.* 22(1), 21-22.
- Hartmann G. & Seifert K. (2010) Fischfreundliche Wasserkraftnutzung mit VLH-Turbinen? Tagungsband 20. SVK-Fischereitagung. 30.03.-31.03.2010, Fulda, 23 S.
- Hassinger R. & Hübner D. (2009) Entwicklung eines neuartigen Aal-Abstiegssystems mit Hilfe von Laborversuchen. *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 2(5), 276-281.
- Havn T. B., Sæther S. A., Thorstad E. B., Teichert M. A. K., Heermann L., Diserud O. H., Borchert J., Tambets M. & Økland F. (2017) Downstream migration of Atlantic salmon smolts past a low head hydropower station equipped with Archimedes screw and Francis turbines. *Ecological Engineering* 105, 262-275.

- Heidemann, H. & Seidenbusch R. (2002) Die Libellenlarven Deutschlands – Die Tierwelt Deutschlands. 72. Teil. Verlag Goecke & Evers, Keltern.
- Heiss M. (2015) Evaluation of innovative rehabilitation measures targeting downstream migrating Atlantic salmon smolt (*Salmo salar*) at a hydroelectric power plant in southern Sweden. Master's Thesis. Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.
- Hoffmann A., Schmidt M. & Langkau M. (2011) Fischereiliche Untersuchung des beweglichen Krafthauses in der Kinzig in Gengenbach. Teilbeitrag zum Monitoring: „Demonstration Plant in the Kinzig River: Moveable Hydroelectric Power Plant for Ecological River Improvements and Fish Migration Reestablishment“. Büro für Umweltplanung, Gewässermanagement und Fischerei, LFV Hydroakkustik, Wirtschaftlicher Geschäftsbetrieb des Landesfischereiverbands Westfalen und Lippe e.V.
- Hogan T. W., Cada G. F. & Amaral S. V. (2013) The Status of Environmentally Enhanced Hydropower Turbines. *Fisheries* 39(4), 164-172.
- Holzner M. (1999) Untersuchungen zur Vermeidung von Schäden im Kraftwerksbereich, dargestellt am Kraftwerk Dettelbach am Main/Unterfranken. Schriftenreihe LFV Bayern 1, 224 S.
- Holzner M. (2000) Untersuchungen über die Schädigung von Fischen bei der Passage des Mainkraftwerks Dettelbach (Doctoral dissertation, Technische Universität München, Universitätsbibliothek).
- John D. C., Witton B. A. & Brook A. J. (2002) The Freshwater Algal Flora of the British Isles: An Identification Guide to Freshwater and Terrestrial Algae. University Press, Cambridge, 878 S.
- Johnson G. E., Adams N. S., Johnson R. L., Rondorf D. W., Dauble D. D. & Barila T. Y. (2000) Evaluation of the prototype surface bypass for salmonid smolts in spring 1996 and 1997 at Lower Granite Dam on the Snake River, Washington. *Transactions of the American Fisheries Society* 129(2), 381-397.
- Johnson E. L., Clabough T. S., Keefer M. L., Caudill C. C., Johnson P. N., Nagy W. T. & Jepson M. A. (2012) Evaluation of Dual Frequency Identification Sonar (DIDSON) for Monitoring Pacific Lamprey Passage Behavior at Fishways of Bonneville Dam, 2011 (No. TR-2012-5). Corps of engineers Portland or north Pacific div.

- Johnsen B. O. & Ugedal O. (1988) Effects of different kinds of fin-clipping on over-winter survival and growth of fingerling brown trout, *Salmo trutta* L., stocked in small streams in Norway. *Aquaculture Research* 19(3), 305-311.
- Juhrig L. (2013) Die Very-Low-Head-Turbine – Technik und Anwendung. In Heimerl S. (Ed), *Wasserkraftprojekte*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, pp. 327-333.
- Jungwirth M., Haidvogel G., Moog O., Muhar S. & Schmutz S. (2003) *Angewandte Fischökologie an Fließgewässern*, 1. Auflage, UBT, Stuttgart.
- Jurvelius J., Kolari I. & Leskelä A. (2011) Quality and status of fish stocks in lakes: gillnetting, seining, trawling and hydroacoustics as sampling methods. *Hydrobiologia* 660(1), 29-36.
- Keefer M. L., Taylor G. A., Garletts D. F., Helms C. K., Gauthier G. A., Pierce T. M. & Caudill C. C. (2013) High-head dams affect downstream fish passage timing and survival in the Middle Fork Willamette River. *River Research and Applications* 29(4), 483-492.
- Killgore K. J., Maynard S. T., Chan M. D. & Morgan R. P. (2001) Evaluation of propeller-induced mortality on early life stages of selected fish species. *North American Journal of Fisheries Management* 21(4), 947-955.
- Klopries E. M. & Schüttrumpf H. (2020) Mortality assessment for adult European eels (*Anguilla anguilla*) during turbine passage using CFD modelling. *Renewable Energy* 147, 1481-1490.
- Knopf F., Hammond C., Chekuru A., Kurth T., Hans S., Weber C. W., Mahatma G., Fisher S., Brand M., Schulte-Merker S. & Weidinger G. (2011) Bone regenerates via dedifferentiation of osteoblasts in the zebrafish fin. *Developmental Cell* 20(5), 713-724.
- Knott J. (2012) Charakterisierung von Juvenilhabitaten für Fische im Umgebungsgewässer der Staustufe Bergheim. Projektarbeit am Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Freising, 45 S.
- 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(1), 74-88.
- Kondolf G. M., Anderson S., Lave R., Pagano L., Merenlender A. & Bernhardt E. S. (2007) Two decades of river restoration in California: what can we learn? *Restoration Ecology* 15, 516-523.

- Kosmidis I (2021) brglm: Bias Reduction in Binary-Response Generalized Linear Models. R package version 0.7.2, <https://cran.r-project.org/package=brglm>.
- Kottelat M. & Freyhof J. (2007) Handbook of European freshwater fishes (Vol. 13). Cornol: Publications Kottelat.
- Kraus G., Harrer D. & Wedekind H. (2013) Praktische und rechtliche Aspekte beim Fischtransport. LfL Information, 1. Auflage. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Fischerei, Freising.
- Krcma R. F., Long C. W. & Thompson C. S. (1978) Research and development of a fingerling protection system for low head dams 1977. NMFS/NOAA Northwest Fisheries Science Center. Report to Corps of Engineers, Seattle, Washington.
- Kynard B. & Horgan M. (2001) Guidance of yearling shortnose and pallid sturgeon using vertical bar rack and louver arrays. North American Journal of Fisheries Management 21(3), 561-570.
- Lagarrigue T., Voegtli B. & Lascaux J. M. (2008) Tests for evaluating the injuries suffered by downstream migrating salmonid juveniles and silver eels in their transiting through the VLH turbogenerator unit installed on the Tarn River in Millau. Prepared by ECOGEA for Forces Motrices de Farebout Company, France.
- Lagarrigue T. & Frey A. (2010) Test for evaluating the injuries suffered by downstream-migrating eels in their transiting through the new spherical discharge ring VLH turbogenerator unit installed on the Moselle River in Frouard. Report E. CO. GEA for MJ2 Technologies.
- Lagarrigue T. (2013) Tests for evaluating damage to fish species migrating downstream during their transit through the VLH hydraulic turbine installed on the Tarn River in Millau – report on tests run in May and June 2013. Report Etudes et Conseils en Gestion de l'Environnement Aquatique (E. CO. GEA), Pins-Justaret, France.
- Larinier M. & Travade F. (2002) Downstream migration: problems and facilities. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, 364, 181-207.
- Larinier M. (2008) Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France. Hydrobiologia 609(1), 97-108.
- Lashofer D. A. & Kaltenberger D. F. (2013) Wie gut bewährt sich die Wasserkraftschnecke in der Praxis? In Heimerl S. (Ed), Wasserkraftprojekte. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 310-318.

- Leclerc M. (2012) The very low head turbine enters into industrial phase and confirms its extremely low environmental impact. *Houille Blanche* 1, 32-37.
- Lechthaler W. (2005) Eutaxa: Culicidae 05 – Key to Larvae, Pupae and Males from Central and Western Europe (CD).
- Lechthaler W. & Car M. (2005) Eutaxa: Simuliidae 05 – Key to Larvae and Pupae from Central and Western Europe (CD).
- Lechthaler W. & Stockinger W. (2005) Eutaxa: Trichoptera 05 – Key to Larvae from Central Europe (DVD).
- Lechthaler W. (2007) Eutaxa: Trichoptera Families 07 – Key to Larvae from Central Europe (CD).
- Lechthaler W. (2009) Eutaxa: Macrozoobenthos 09 – Key to Families of Macroinvertebrates in European Freshwaters (DVD).
- LfStat (2019) https://www.energieatlas.bayern.de/thema_wasser/daten.html.
- Lubitz W. D., Lyons M. & Simmons S. (2014) Performance Model of Archimedes Screw Hydro Turbines with Variable Fill Level. *Journal of Hydraulic Engineering* 140(10).
- Lucchetti E., Barbier J. & Araneo R. (2013) Assessment of the technical usable potential of the TUM Shaft Hydro Power plant on the Aurino River, Italy. *Renewable Energy* 60, 648-654.
- March P. A. & Fisher R. K. (1999) It's not easy being green: Environmental technologies enhance conventional hydropower's role in sustainable development. *Annual Review of Energy and the Environment* 24(1), 173-188.
- Mathur D., Heisey P. G., Euston E. T., Skalski J. R. & Hays S. (1996) Turbine passage survival estimation for chinook salmon smolts (*Oncorhynchus tshawytscha*) at a large dam on the Columbia River. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53(3), 542-549.
- Mbaka J. G. & Wanjiru Mwaniki M. (2015) A global review of the downstream effects of small impoundments on stream habitat conditions and macroinvertebrates. *Environmental Reviews* 23(3), 257-262.
- Mela C. F. & Kopalle P. K. (2002) The impact of collinearity on regression analysis: the asymmetric effect of negative and positive correlations. *Applied Economics* 34(6), 667-677.

- McDougall C. A., Anderson W. G. & Peake S. J. (2014) Downstream Passage of Lake Sturgeon through a Hydroelectric Generating Station: Route Determination, Survival, and Fine-Scale Movements. *North American Journal of Fisheries Management* 34(3), 546-558.
- Menges J. (1999) Filmaufbau, Filmverarbeitung, Konstanzprüfung. (<http://www.dr-menges.de/fk1803.html#Entwicklungsvorgang>)
- Merkx J. C. A. & Vriese F. T. (2007) Monitoring vijzel en vispassage Hooi-donske molen. Report prepared for Waterschap De Dommel (Nr. VA2006_41), Utrecht (Visadvies).
- Miracle A., Denslow N. D., Kroll K. J., Liu M. C. & Wang K. K. W. (2009) Spillway-Induced Salmon Head Injury Triggers the Generation of Brain α -Spectrin Breakdown Product Biomarkers Similar to Mammalian Traumatic Brain Injury. *PLoS ONE* 4, e4491.
- Moser M. L., Pennington H. T. & Roos J. M. (2008) Grating size needed to protect adult Pacific lampreys in the Columbia River basin. *North American Journal of Fisheries Management* 28(2), 557-562.
- Moyle P. B. & Israel J. A. (2005) Untested assumptions: effectiveness of screening diversions for conservation of fish populations. *Fisheries* 30(5), 20-28.
- Møller A. & Jennions M. D. (2002) How much variance can be explained by ecologists and evolutionary biologists?. *Oecologia* 132(4), 492-500.
- 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. (2014a) The ecological value of stream restoration measures: an evaluation on ecosystem and target species scale. *Ecological Engineering* 62, 129-139.
- Mueller M., Pander J. & Geist J. (2014b) A new tool for assessment and monitoring of community and ecosystem change based on multivariate abundance data integration from different taxonomic groups. *Environmental Systems Research* 3, 12.
- Mueller M. & Geist J. (2016) Conceptual guidelines for the implementation of the ecosystem approach in biodiversity monitoring. *Ecosphere* 7(5): e01305.
- 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., 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.
- Muir W. D., Smith S. G., Williams J. G. & Sanford B. P. (2001) Survival of juvenile salmonids passing through bypass systems, turbines, and spillways with and without flow deflectors at Snake River dams. *North American Journal of Fisheries Management* 21(1), 135-146.
- Nagel P. (1989) *Bildbestimmungsschlüssel der Saprobien*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Naumann S., Wagner F. & Keuneke R. (2019) *Ergebnispapier 8. Workshop Forum Fischschutz und Fischabstieg. Fischschutzziele, Monitoring, Funktionskontrolle*. Augsburg. Erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Navarro J. E., McCauley D. J. & Blystra A. R. (1996) Turbine passage at four low-head hydroelectric facilities in northeast Michigan. *North American Journal of Fisheries Management* 16(1), 182-191.
- Neitzel D. A., Richmond M. C., Dauble D. D., Mueller R. P., Moursund R. A., Abernethy C. S., Guensch G. R. & Cada G. F. (2000) Laboratory studies on the effects of shear on fish. Report to the US Dept. of Energy Idaho Operations Office, Idaho Falls, ID.
- Nettles D. C. & Gloss S. P. (1987) Migration of landlocked Atlantic salmon smolts and effectiveness of a fish bypass structure at a small-scale hydroelectric facility. *North American Journal of Fisheries Management* 7(4), 562-568.
- Nichtawitz A. & Grafenberger P. (2006) *Fischschonende Turbinentechnik*. DWA-Themen: Durchgängigkeit von Gewässern für die aquatische Fauna. Internationales DWA-Symposium zur Wasserwirtschaft 3.-7. April 2006. Deutsche Gesellschaft für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- Nicola S. J. & Cordone A. J. (1973) Effects of fin removal on survival and growth of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) in a natural environment. *Transactions of the American Fisheries Society* 102(4), 753-758.
- Norris R. H. (1995) Biological monitoring: The dilemma of data analysis. *Journal of the North American Benthological Society* 14(3), 440-450.
- Nuernbergk D. M. & Rorres C. (2012) Analytical Model for Water Inflow of an Archimedes Screw Used in Hydropower Generation. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(2), 213-220.

- Oberdalloff H., Vieten H. & Karcher H. (1959) Klinische Röntgendiagnostik chirurgischer Erkrankungen. In zwei Bänden. Teil 1. Springer, A Röntgendurchleuchtung, B Röntgenaufnahme, S. 1-10.
- Odgaard A. J., Elder R. A. & Weitkamp D. (1990) Turbine-intake fish-diversion system. *Journal of Hydraulic Engineering* 116(11), 1301-1316.
- Økland F., Teichert M. A. K., Havn T. B., Thorstadt E. B., Heermann L., Sæther S. A., Tembets M. & Borchert J. (2017) Downstream migration of European eel at three German hydropower stations. NINA Report 1355, University of Cologne, Norwegian Institute for Nature Research, Wildlife Estonia; www.nina.no.
- Ovaskainen O., Tikhonov G., Norberg A., Guillaume Blanchet F., Duan L., Dunson D., Roslin T. & Abrego N. (2017) How to make more out of community data? A conceptual framework and its implementation as models and software. *Ecology Letters* 20, 561-576.
- Ovaskainen O. & Abrego N. (2020) Joint species distribution modelling: With applications in R, Ecology, Biodiversity and Conservation, Cambridge University Press, Cambridge.
- Pander J. & Geist J. (2010) Seasonal and spatial bank habitat use by fish in highly altered rivers – a comparison of four different restoration measures. *Ecology of Freshwater Fish* 19, 127-138.
- 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 reophilic 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. & 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.
- 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

- Pedersen M. I., Jepsen N., Aarestrup K., Koed A., Pedersen S. & Økland F. (2012) Loss of European silver eel passing a hydropower station. *Journal of Applied Ichthyology* 28(2), 189-193.
- Pielou E. C. (1966) The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology* 13, 131-144.
- Pimakhin A. & Zák J. (2014) Effect of body size on swim bladder inflation in intensively cultured Eurasian perch larvae from different locations. *World Aquaculture*, 45(3), 37-41.
- Piper A. T., Wright R. M., Walker A. M. & Kemp P. S. (2013) Escapement, route choice, barrier passage and entrainment of seaward migrating European eel, *Anguilla anguilla*, within a highly regulated lowland river. *Ecological Engineering* 57, 88-96.
- Poletto J. B., Cocherell D. E., Ho N., Cech Jr J. J., Klimley A. P. & Fanguie N. A. (2014) Juvenile green sturgeon (*Acipenser medirostris*) and white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) behavior near water-diversion fish screens: experiments in a laboratory swimming flume. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 71(7), 1030-1038.
- R Core Team (2017) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Ransom B. H., Steig T. W. & Nealson P. A. (1996) Comparison of hydroacoustic and net catch estimates of Pacific salmon smolt (*Oncorhynchus spp.*) passage at hydropower dams in the Columbia River Basin, USA. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil* 53(2), 477-481.
- Raynal S., Chatellier L., Courret D., Larinier M. & David L. (2014) Streamwise bars in fish-friendly angled trashracks. *Journal of Hydraulic Research* 52(3), 426-431.
- Raynal S., Courret D., Chatellier L., Larinier M. & David L. (2013) An experimental study on fish-friendly trashracks – Part 1. Inclined trashracks. *Journal of Hydraulic Research* 51(1), 56-66.
- Redeker M. (2014) Fish protection in Germany: first steps on a long and rocky road. *International Fish Screening Techniques*, 201131.
- Renöfält B. M., Jansson R. & Nilsson C. (2009) Effects of hydropower generation and opportunities for environmental flow management in Swedish riverine ecosystems. *Freshwater Biology* 55, 49-67.

- Reynoldson T. B., Norris R. H., Resh V. H., Day K. E. & Rosenberg D. M. (1997) The reference condition: a comparison of multimetric and multivariate approaches to assess water-quality impairment using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society* 16(4), 833-852.
- Richmond M. C., Serkowski J. A., Ebner L. L., Sick M., Brown R. S. & Carlson T. J. (2014) Quantifying barotrauma risk to juvenile fish during hydro-turbine passage. *Fisheries Research* 154, 152-164
- Rieger R. (2014) Spezielle Zoologie. Teil 2: Wirbel- oder Schädeltiere. Eds. Westheide W. & Rieger G., Springer-Verlag.
- Ripley B., Venables B., Bates D. M., Hornik K., Gebhardt A., Firth D. & Ripley M. B. (2013) Package 'MASS'. <http://cran.r-project.org/web/packages/MASS/MASS.pdf>.
- Roberts R. J. (2012) Fish pathology. 4th ed., John Wiley & Sons.
- Rothmaler W. (2002) Exkursionsflora von Deutschland, Gefäßpflanzen: Grundband. 18. bearb. Auflage, hrsg. von Jäger E.J. & Werner K., Spektrum Akademischer Verlag, Berlin.
- Russon I. J., Kemp P. S. & Calles O. (2010) Response of downstream migrating adult European eels (*Anguilla anguilla*) to bar racks under experimental conditions. *Ecology of Freshwater Fish* 19(2), 197-205.
- Rutschmann P., Sepp A., Geiger F. & Barbier J. (2011) Das Schachtkraftwerk – ein Wasserkraftkonzept in vollständiger Unterwasseranordnung. *WasserWirtschaft* 8/2011.
- Sandford B. P., Zabel R. W., Gilbreath L. G. & Smith S. G. (2012) Exploring Latent Mortality of Juvenile Salmonids Related to Migration through the Columbia River Hydropower System. *Transactions of the American Fisheries Society* 141(2), 343-352.
- Santamaria J. A. & Becerra J. (1991) Tail fin regeneration in teleosts: cell-extracellular matrix interaction in blastemal differentiation. *Journal of Anatomy* 176, 9.
- Schilt C. R. (2007) Developing fish passage and protection at hydropower dams. *Applied Animal Behaviour Science* 104(3), 295-325.
- 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.

- Schmalz W., Wagner F. & Sonny D. (2015) Arbeitshilfe zur standörtlichen Evaluierung des Fischschutzes und Fischabstieges. Abschlussbericht. Forum „Fischschutz & Fischabstieg“, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Umweltbundesamt; Ecologic Institute, März 2015, 215 Seiten.
- Schmedtje U. & Kohmann F. (1992) Bestimmungsschlüssel für die Saprobier-DIN-Arten (Makroorganismen). Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, 2, 88.
- Schneider J., Hübner D. & Korte E. (2012) Funktionskontrolle der Fischaufstiegs- und Fischabstiegshilfen sowie Erfassung der Mortalität bei Turbinendurchgang an der Wasserkraftanlage Kostheim am Main. Endbericht 2012. Bürogemeinschaft für Fisch- & Gewässerökologische Studien, Frankfurt am Main.
- Schoeneman D. E., Pressey R. T. & Junge C. O. (1961) Mortalities of downstream migrant salmon at McNary Dam. Transactions of the American Fisheries Society 90(1), 58-72.
- Schreckenbach K. (2012) Aufbau und Funktion des Fischkörpers, Fischweg am Bielersee (<http://www.fischweg.ch/lernen/infos-zu-den-themen/die-koerperform-der-fische/>).
- Sepp A. & Rutschmann P. (2014) Ecological Hydroelectric concept “shaft power plant”. In Proceedings of the International Seminar on Hydro Power Plants, Vienna, Austria, 6-9.
- Sepp A., Geiger F. & Rutschmann P. (2016) Schachtkraftwerk – Konzept und Funktionskontrollen. In Wasserbau – mehr als Bauen im Wasser. Beiträge zum 18. Gemeinschafts-Symposium der Wasserbau-Institute TU München, TU Graz und ETH Zürich, 886-895.
- Shannon C. E. & Weaver W. (1949) The mathematical theory of communication, Urbana: University of Illinois Press 1, 117-119.
- Silva A. T., Katopodis C., Tachie M. F., Santos J. M. & Ferreira M. T. (2013) Movement behavior of the European eel (*Anguilla anguilla*) and Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*) during downstream passage over a spillway. 21st Canadian Hydrotechnical Conference, Banff, Alberta, May 14-17, 2013.
- Sinowski W. & Auerswald K. (1999) Using relief parameters in a discriminant analysis to stratify geological areas with different spatial variability of soil properties. Geoderma 89 (1-2), 113-128.

- Skalski J. R., Johnson G. E., Sullivan C. M., Kudera E. & Erho M. W. (1996) Statistical evaluation of turbine bypass efficiency at Wells Dam on the Columbia River, Washington. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53(10), 2188-2198.
- Skalski J. R., Townsend R., Lady J., Giorgi A. E., Stevenson J. R. & McDonald R. D. (2002a) Estimating route-specific passage and survival probabilities at a hydroelectric project from smolt radiotelemetry studies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 59(8), 1385-1393.
- Skalski J. R., Mathur D. & Heisey P. G. (2002b) Effects of turbine operating efficiency on smolt passage survival. *North American Journal of Fisheries Management* 22(4), 1193-1200.
- Sorenson K. M., Fisher W. L. & Zale A. V. (1998) Turbine passage of juvenile and adult fish at a warmwater hydroelectric facility in northeastern Oklahoma: monitoring associated with relicensing. *North American Journal of Fisheries Management* 18(1), 124-136.
- Späh H. (2001) Fischereibiologisches Gutachten zur Fischverträglichkeit der Patent geschützten Wasserkraftschnecke der Ritz-Atro Pumpwerksbau GmbH. Gutachten im Auftrag der Ritz-Atro Pumpwerksbau GmbH, Bielefeld, 16 S.
- Stephenson J. R., Gingerich A. J., Brown R. S., Pflugrath B. D., Deng Z., Carlson T. J., Langeslay M. J., Ahmann M. L., Johnson R. L. & Seaburg A. G. (2010) Assessing barotrauma in neutrally and negatively buoyant juvenile salmonids exposed to simulated hydro-turbine passage using a mobile aquatic barotrauma laboratory. *Fisheries Research* 106(3), 271-278.
- Stich D. S., Bailey M. M. & Zydlewski J. D. (2014) Survival of Atlantic salmon *Salmo salar* smolts through a hydropower complex. *Journal of Fish Biology* 85(4), 1074-1096.
- StMUV (2012) Bayerische Strategie zur Wasserkraft. 10-Punkte-Fahrplan für eine ökologische und naturverträgliche Wasserkraftnutzung. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, 3 S.
- StMWi (2019) Bayerisches Energieprogramm. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie. https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/Publikationen/2019/2019-11-27_AktionsprogrammEnergie.pdf.
- Stokesbury K. D. & Dadswell M. J. (1991) Mortality of juvenile clupeids during passage through a tidal, low-head hydroelectric turbine at Annapolis Royal, Nova Scotia. *North American Journal of Fisheries Management* 11(2), 149-154.

- Storch V. & Welsch U. (2009) Kükenthal – Zoologisches Praktikum. Springer-Verlag.
- Summerfelt R. C. (2013) Gas bladder inflation in larval fish aquaculture. In Qin J. G. (Ed), Larval fish aquaculture. Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY, 125-142.
- Sundermann A. & Lohse S. (2004) Bestimmungsschlüssel für die aquatischen Zweiflügler (Diptera) in Anlehnung an die Operationelle Taxaliste für Fließgewässer in Deutschland. Forschungsinstitut Senckenberg.
- Surber E. W. (1930) A quantitative method of studying the food of small fishes. Transactions of the American Fisheries Society 60, 158-163.
- Taylor R. E. & Kynard B. (1985) Mortality of juvenile American shad and blueback herring passed through a low-head Kaplan hydroelectric turbine. Transactions of the American Fisheries Society 114(3), 430-435.
- Thorstad E. B., Havn T. B., Sæther S. A., Heermann L., Teichert M. A. K., Diserud O. H., Tambets M., Borcharding J. & Økland F. (2017) Survival and behaviour of Atlantic salmon smolts passing a run-of-river hydropower facility with a movable bulb turbine. Fisheries Management and Ecology 24(3), 199-207.
- Tombek B. & Holzner M. (2009) Untersuchungen zur Effektivität alternativer Triebwerkstechniken und Schutzkonzepte für abwandernde Fische beim Betrieb von Kleinwasserkraftanlagen. Studie im Auftrag des Landesfischereiverbands Bayern, Prosselsheim, Freising (Geise & Partner, Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie), 84 S.
- Travade F., Gosset C., Larinier M., Subra S., Durif C., Rives J. & Elie P. (2006) Evaluation of surface and bottom bypasses to protect eel migrating downstream at small hydroelectric facilities in France. Symposium on Hydropower, Flood control and Water Abstraction: Implications for Fish and Fisheries, 14–21 June 2006, Mondsee, Austria. Rome, Italy: FAO.
- Travade F., Larinier M., Subra S., Gomes P. & De-Oliveira E. (2010) Behaviour and passage of European silver eels (*Anguilla anguilla*) at a small hydropower plant during their downstream migration. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems 398, 01.
- Trumbo B. A., Ahmann M. L., Renholds J. F., Brown R. S., Colotelo A. H. & Deng Z. D. (2014) Improving hydroturbine pressures to enhance salmon passage survival and recovery. Reviews in Fish Biology and Fisheries 24, 955-965.

- Tsikata J. M., Tachie M. F. & Katopodis C. (2014) Open-channel turbulent flow through bar racks. *Journal of Hydraulic Research* 52(5), 630-643.
- Tuononen E. I., Cooke S. J., Timusk E. R. & Smokorowski K. E. (2022) Extent of injury and mortality arising from entrainment of fish through a Very Low Head hydropower turbine in central Ontario, Canada. *Hydrobiologia* 849, 407-420
- Turbak S. C., Reichle D. R. & Shriner C. R. (1981) Analysis of environmental issues related to small-scale hydroelectric development IV: fish mortality resulting from turbine passage (No. ORNL/TM-7521). Oak Ridge National Lab., TN (USA).
- Utermöhl H. (1931) Neue Wege in der quantitativen Erfassung des Planktons (mit besonderer Berücksichtigung des Ultraplanktons). *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie* 5, 567-596.
- Van de Weyer K. & Schmidt C. (2007) Bestimmungsschlüssel für die aquatischen Makrophyten (Gefäßpflanzen, Armleuchteralgen und Moose) in Deutschland. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg, Potsdam.
- Vatcheva K. P., Lee M., McCormick J. B. & Rahbar M. H. (2016) Multicollinearity in regression analyses conducted in epidemiologic studies. *Epidemiology* (Sunnyvale, Calif.), 6(2), 227.
- Vikström L., Leonardsson K., Leander J., Shry S., Calles O. & Hellström, G. (2020) Validation of Francis–Kaplan Turbine Blade Strike Models for Adult and Juvenile Atlantic Salmon (*Salmo salar*, L.) and Anadromous Brown Trout (*Salmo trutta*, L.) Passing High Head Turbines. *Sustainability* 12, 6384.
- Vowles A. S., Karlsson S. P., Uzunova E. P. & Kemp P. S. (2014) The importance of behaviour in predicting the impact of a novel small-scale hydropower device on the survival of downstream moving fish. *Ecological Engineering* 69, 151-159.
- Waringer J. & Graf W. (1997) Atlas der österreichischen Köcherfliegenlarven: unter Einschluss der angrenzenden Gebiete. Facultas-Universitäts-Verlag, Wien.
- Watene E. M. & Boubée J. A. T. (2005) Selective opening of hydroelectric dam spillway gates for downstream migrant eels in New Zealand. *Fisheries Management and Ecology* 12(1), 69-75.

- Wertheimer R. H. & Evans A. F. (2005) Downstream passage of steelhead kelts through hydroelectric dams on the lower Snake and Columbia rivers. *Transactions of the American Fisheries Society* 134(4), 853-865.
- Wertheimer R. H. (2007) Evaluation of a surface flow bypass system for steelhead kelt passage at Bonneville Dam, Washington. *North American Journal of Fisheries Management* 27(1), 21-29.
- Wiegmann D., Kubitschek J., Tinsdale-Hein R. & Johnson P. (2005) Roadmap for pier research on fish passage at California hydropower facilities. Staff Report CEC-500-2005-137, State of California Energy Commission, Arnold Schwarzenegger, Governor.
- Williams J. G., Smith S. G. & Muir W. D. (2001) Survival estimates for downstream migrant yearling juvenile salmonids through the Snake and Columbia rivers hydropower system, 1966–1980 and 1993–1999. *North American Journal of Fisheries Management* 21(2), 310-317.
- Winchell F. C. & Sullivan C. W. (1991) Evaluation of an Eicher fish diversion screen at Elwha Dam. In *Waterpower '91*.
- Winter H. V., Jansen H. M. & Bruijs M. C. M. (2006) Assessing the impact of hydropower and fisheries on downstream migrating silver eel, *Anguilla anguilla*, by telemetry in the River Meuse. *Ecology of Freshwater Fish* 15(2), 221-228.
- Wright M. K. & Rival D. E. (2013) An experimental investigation of the approach flow conditions for a non-rotating, very low head water-turbine model. *Experimental Thermal and Fluid Science* 46, 105-113.
- Wyżga B., Amirowicz A., Oglęcki P., Hajdukiewicz H., Radecki-Pawlik A., Zawiejska J. & Mikuś P. (2014) Response of fish and benthic invertebrate communities to constrained channel conditions in a mountain river: Case study of the Biała, Polish Carpathians. *Limnologica*, 46, 58-69.
- Zarfl C., Lumsdon A. E., Berlekamp J., Tydecks L. & Tockner K. (2015) A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences* 77(1), 161-170.
- Zwick P. (2004) A key to the West Palaearctic genera of stoneflies (Plecoptera) in the larval stage. *Limnologica* 34 (4), 315-348.

Anhang

Tabelle 10 „Score Sheet“ mit den Kriterien zur Einteilung der Intensität der äußeren Einzelverletzungen im Fischschadigungsprotokoll.

Körper-region	Körperteil	Intensität	Schuppen-verlust	Amputation	Einrisse	Einblutungen	Quetschungen	Hautverletzungen	Verletzung Wirbelsäule	Pigmentveränderung	Gasblasen
Schädel		0		Keine Amputation 0%		Keine Einblutungen 0%	Keine Quetschungen 0%	Keine Hautverletzungen 0%		Keine Pigmentveränderungen 0%	
		1		Kopf teilweise abgetrennt < 50%		Einzelne rote Punkte < 5% der Kopffläche	Einzelne Druckstelle 5% des Kopfes	Einzelne Schürfwunden mit < 5% der Hautoberfläche		Einzelne dünne Verfärbungen < 5% der Kopffläche, hell oder dunkel	
		3		Großteil des Kopfes abgetrennt 50%-75%		Blutiges Maul/Nase mit 5%-15% der Kopffläche	Mehrere Druckstellen, 5%-20% der Kopffläche	Großflächige Hautverletzungen 5-20% der Hautoberfläche oder einzelne tiefere Fleischwunde bis auf den Schädelknochen		Viele helle oder dunkle Verfärbungen auf 5%-15% der Kopffläche	
		5		Kopf (fast) vollständig abgetrennt > 75%		Ganzer Kopf blutig > 15%	> 20% des Kopfes deformiert	> 20% der Haut vollständig abgeschürft oder mehrere tiefe Fleischwunden		Flächen > 15% hell oder dunkel verfärbt	
Kopf	Augen	0		Auge unversehrt und zu 100% in der Augenhöhle		Keine Einblutungen 0%	Keine Quetschungen 0%				Keine Gasblasen 0%
		1		Auge steht aus der Augenhöhle > 50% heraus		Einzelner roter Punkt im Auge <5%	< 5% des Auges leicht nach innen oder außen gedrückt				Einzelne kleine Gasblasen < 5%
		3		Nur noch < 50% des Auges in der Augenhöhle bzw. Auge hängt nur noch am Sehnerv fest		Mehrere rote Punkte im Auge oder Teile des Auges blutig 5%-25%	5%-20% des Auges nach innen oder außen gedrückt				Mehrere kleine oder einzelne größere Gasblasen die bis zu 20% des Auges einnehmen
		5		Auge fehlt, 0% in der Augenhöhle.		Auge zu > 25% blutig	> 20% des Auges nach innen oder außen gedrückt				Große Gasblasen oder mehrere mittlere Gasblasen > 20% des Auges
Kiemendeckel		0		Keine Amputation 0%		Keine Einblutungen 0%	Keine Quetschungen 0%	Keine Hautverletzung 0%		Keine Pigmentveränderung 0%	
		1		< 50% des Kiemendeckels fehlend		Einzelne rote Punkte <5% der Kiemendeckeloberfläche	Einzelne Druckstellen auf < 5% der Kiemendeckeloberfläche	Kleine Abschürfungen von < 5% der Kiemendeckeloberfläche		Einzelne dünne Verfärbungen < 5% der Kiemendeckeloberfläche, hell oder dunkel	
		3		> 50% des Kiemendeckels fehlend		Mehrere rote Punkte mit 5%-25% der Kiemendeckeloberfläche	Mehrere Druckstellen auf 5%-20% der Kiemendeckeloberfläche	Einzelne großflächige Abschürfung von 5-20% oder einzelne tiefe, auf den Knochen reichende, Fleischwunde		Viele helle oder dunkle Verfärbungen auf 5%-25% der Kiemendeckelfläche	
		5		Kiemendeckel fehlt vollständig		Mehr als > 25% des Kiemendeckels blutig	> 20% der Kiemendeckeloberfläche deformiert	Haut auf > 20% vollständig abgeschürft oder mehrere tiefe Fleischwunden		Flächen > 25% hell oder dunkel verfärbt	

Körper-region	Körperteil	Intensität	Schuppen-verlust	Amputation	Einrisse	Einblutungen	Quetschungen	Hautverletzungen	Verletzung Wirbelsäule	Pigmentveränderung	Gasblasen
Linke, rechte, vordere und hintere Körperhälfte		0	Alle Schuppen vorhanden 0%	Leibeshöhle geschlossen und alle Körperteile vorhanden 0%		Keine Einblutungen 0%	Keine Quetschungen oder Druckstellen 0%	Keine Hautverletzung 0%		Keine Pigmentveränderung 0%	
		1	> 30% der normalerweise beschuppten Körperfläche ohne Schuppen	Körper zu < 25% durchtrennt, Muskelgewebe dabei vollständig durchtrennt und Leibeshöhle geöffnet, Wirbelsäule nicht sichtbar		Einzelne rote Punkte < 5% der Körperfläche	Leichte Druckstellen auf < 5% der Körperfläche	Kleine Abschürfungen von < 5% der Körperfläche		Einzelne Verfärbungen < 5% der Körperoberfläche, hell oder dunkel	
		3	30%-70% der normalerweise beschuppten Körperfläche ohne Schuppen	Körper zu 25%-50% durchtrennt, Wirbelsäule sichtbar und intakt		Mehrere rote Punkte 5-20% der Körperfläche	5-20% der Körperfläche mit Druckstellen/Quetschungen	Größere Abschürfungen von 5-20% der Körperfläche oder einzelne ins Muskelgewebe reichende Wunden		Viele helle oder dunkle Verfärbungen auf 5%-25% der Körperfläche	
		5	> 70% der normalerweise beschuppten Körperfläche ohne Schuppen	> 50% des Körpers durchtrennt, Wirbelsäule durchtrennt (Keine zusätzliche Dokumentation von Verletzungen der Wirbelsäule!)		Größere blutige Bereiche > 20% der Körperfläche	> 20% der Körperfläche deformiert	Haut auf > 20% vollständig abgeschürft oder mehrere ins Muskelgewebe reichende Wunden		Flächen > 25% hell oder dunkel verfärbt	
Körper		0							Keine Verformung der Wirbelsäule		
		1									
	Dorsal	3							Einzelne Biegung in der Wirbelsäule S-Förmige Verkrümmung der Wirbelsäule		
		5							Wirbelsäule im sonst intakten Fisch gebrochen		
Ventral		0				Keine Einblutungen 0%		Keine Hautverletzung 0%		Keine Pigmentveränderung 0%	
		1				Einzelne kleine rote Punkte auf < 5% der Bauchfläche		Kleine Abschürfungen von < 5% der Bauchfläche		Einzelne Verfärbungen < 5% der Bauchfläche, hell oder dunkel	
		3				Mehrere rote Punkte die 5-20% der Bauchfläche bedecken		Größere Abschürfungen von 5-20% der Bauchfläche oder einzelne ins Muskelgewebe reichende Wunden		Viele helle oder dunkle Verfärbungen auf 5%-20% der Bauchfläche	
		5				Bereiche > 20% der Bauchfläche blutig		Haut auf > 20% vollständig abgeschürft oder mehrere ins Muskelgewebe reichende Wunden		Flächen > 20% hell oder dunkel verfärbt	

Körper-region	Körperteil	Intensität	Schuppen-verlust	Amputation	Einrisse	Einblutungen	Quetschungen	Hautverletzungen	Verletzung Wirbelsäule	Pigmentveränderung	Gasblasen
Flossen	Brust-, Bauch-, After-, Rücken- und Schwanz-flosse	0		Keine Amputation 0%	Keine Einrisse 0%	Keine Einblutungen 0%				Keine Pigmentveränderungen 0%	Keine Gasblasen 0%
		1		< 30% der Flossenstrahlen fehlen	< 5 kurze Einrisse	Einzelne kleine rote Punkte auf < 5% der Flossenfläche				Einzelne Verfärbungen < 5% der Flossenfläche hell oder dunkel	Einzelne kleine Gasblasen < 5%
		3		30%-70% der Flossenstrahlen fehlen	> 5 kurze Einrisse oder einzelne sehr tiefe Einrisse	Mehrere rote Punkte die 5-25% der Flossenfläche bedecken				Viele helle oder dunkle Verfärbungen auf 5%-25% der Flossenfläche	Mehrere kleine oder einzelne größere Gasblasen die bis zu 20% der Flosse einnehmen
		5		> 70% der Flossenstrahlen fehlen (keine Dokumentation von Einrissen mehr!)	Flosse vollständig zerfetzt	Bereiche > 25% der Flossenfläche blutig				Flächen > 25% hell oder dunkel verfärbt	Große Gasblasen oder mehrere mittlere Gasblasen > 20% der Flosse

Tabelle 11 Erläuterungen zur Einstufung der allgemeinen Kriterien des Fischschädigungen-Protokollblatts.

Kriterium	Stufen	Definition	Belastung	Maßnahmen
Vitalität	4	Fisch vollständig vital, normal ausgeprägtes Schwimm- und Fluchtverhalten	Keine	Keine Maßnahmen notwendig
	3	Leicht reduziertes Schwimmvermögen (verzögerte Flucht aber noch kein Taumeln)	Gering	Keine Maßnahmen notwendig
	2	Mäßig reduziertes Schwimmvermögen (leichtes, vorübergehendes Taumeln bei Berührung, Fisch schwimmt danach aber wieder gerade), leichte Pilzinfektion (punktuell, weniger als 1% der Körperoberfläche)	Mittel	Versuchsleiter informieren
	1	Stark reduziertes Schwimmvermögen (permanentes Taumeln), stark reduzierte Atmung, ggf. Abspreizen der Kiemendeckel, ggf. starke Pilzinfektion (Verpilzungen an mehreren Stellen)	Stark	Versuchsleiter informieren, Versuchsabbruch für das Tier durch schmerzfreie Euthanasie mittels 10-facher Überdosis MS 222
	0	Fisch ist tot	Stark	Versuchsleiter informieren, Konservierung bei -20°C.
Atemfrequenz	4	Normale Atemfrequenz beim vitalen Fisch mit normal ausgeprägtem Schwimmverhalten	Keine	Keine Maßnahmen notwendig
	3	Übermäßige Bewegung von Maul und Kiemendeckel, Luftschnappen an der Oberfläche, Anzeichen für Stress	gering	Sauerstoffversorgung durch Begasung mit Luft verbessern.
	2	Leicht reduzierte Atemtätigkeit, oft in Verbindung mit Taumeln bei Störung	Mittel	Versuchsleiter informieren.
	1	Stark verringerte bis fast gar keine Bewegung der Kiemendeckel bei Fischen mit geringer Vitalität, diese Fische taumeln meist an der Wasseroberfläche	Stark	Versuchsleiter informieren, Versuchsabbruch für das Tier durch schmerzfreie Euthanasie mittels 10-facher Überdosis MS 222
	0	Fisch atmet nicht mehr und ist tot	Stark	Versuchsleiter informieren, Konservierung bei -20°C.
Ernährungs- zustand	4	Fisch mit der Art und Größe entsprechend normaler Kondition	Keine	Keine Maßnahmen notwendig
	3	Fisch etwas unterernährt, leicht eingefallene Flanken	gering	Keine Maßnahmen möglich, da diese das Versuchsergebnis beeinflussen würden
	2	Fisch stark unterernährt, Fisch mit deutlich eingefallenen Flanken, ggf. Anzeichen für Stress	Mittel	Keine Maßnahmen möglich, da diese das Versuchsergebnis beeinflussen würden
Verpilzung	0	Keine Verpilzung	Keine	Keine Maßnahmen notwendig
	1	Schwache Pilzinfektion mit weißen Punkten auf < 1% der Körperfläche	gering	Keine Maßnahmen notwendig
	2	Moderate Pilzinfektion auf bis zu 30% der Körperfläche	Mittel	Versuchsleiter informieren
	3	Starke Pilzinfektion auf > 30% bis < 70% der Körperfläche	Stark	Versuchsleiter informieren, Versuchsabbruch für das Tier durch schmerzfreie Euthanasie mittels 10-facher Überdosis MS 222
	4	Starke Pilzinfektion auf > 70% der Körperfläche	Stark	Versuchsleiter informieren, Versuchsabbruch für das Tier durch schmerzfreie Euthanasie mittels 10-facher Überdosis MS 222
Parasiten	0	Kein Befall mit Parasiten		Keine Maßnahmen notwendig
	1	Schwacher Parasitenbefall mit weniger als 1% der Körperfläche betroffen		Keine Maßnahmen notwendig
	2	Moderater Parasitenbefall mit bis zu 30% der Körperfläche betroffen		Versuchsleiter informieren
	3	Starker Parasitenbefall mit > 30% bis < 70% der Körperfläche betroffen		Versuchsleiter informieren, Versuchsabbruch für das Tier durch schmerzfreie Euthanasie mittels 10-facher Überdosis MS 222
	4	Starker Parasitenbefall mit > 70% der Körperfläche betroffen		Versuchsleiter informieren, Versuchsabbruch für das Tier durch schmerzfreie Euthanasie mittels 10-facher Überdosis MS 222

Tabelle 12 „Score Sheet“ mit den Kriterien zur Einteilung der Intensität der inneren Einzelverletzungen im Fischschädigungsprotokoll.

Körperteil	Intensität	Fraktur	Verformung	Stauchung	Füllung Schwimmblase	Gasblasen	Flüssigkeits-ansammlung	Röntgendichtes Material
Kopf Skelett	0	keine Fraktur	keine Verformung					
	1	einzelne Knochen teilweise gebrochen	einzelne Knochen verformt					
	3	mehrere Knochen teilweise oder einzelne Knochen komplett gebrochen	mehrere leicht verformte oder einzelne stark verformte Knochen					
	5	großer Teil der Knochen teilweise oder mehrere Knochen komplett gebrochen	große Teile der Knochen stark verformt					
Kopf Bindegewebe	0					keine Gasblasen	keine Flüssigkeits-ansammlung	kein röntgen-dichtes Material
	1					einzelne kleine Gasblasen < 5% des Kopfbereichs	Flüssigkeits-ansammlung < 5% des Kopfbereichs	einzelne kleine röntgendichte Strukturen < 3% des Kopfbereichs
	3					einige kleine oder mehrere mittlere Gasblasen > 5% < 20%	Flüssigkeits-ansammlung > 5% < 25%	mehrere kleine oder einzelne mittlere röntgendichte Strukturen > 3% < 10%
	5					mehrere mittlere oder große Gasblasen > 20%	Flüssigkeits-ansammlung > 25%	mehrere mittlere oder große röntgendichte Strukturen > 10%
Auge	0					keine Gasblasen	keine Flüssigkeits-ansammlung	
	1					einzelne kleine Gasblasen < 5% des Auges	Flüssigkeits-ansammlung < 5% des Auges	
	3					einige kleine oder mehrere mittlere Gasblasen > 5% < 20%	Flüssigkeits-ansammlung > 5% < 25%	
	5					mehrere mittlere oder große Gasblasen > 20%	Flüssigkeits-ansammlung > 25%	
Halswirbel-säule	0	keine Fraktur	keine Verformung	keine Stauchung				
	1	ein Wirbel teilweise gebrochen, aber Wirbelsäule noch eine durchgehende Linie	Wirbelsäule leicht verformt in Bezug auf natürliche Form	ein Wirbel komprimiert				
	3	bis zu drei Wirbel teilweise gebrochen oder Bruch mit der durchgehenden Linie der Wirbelsäule	Wirbelsäule stark verformt in Bezug auf natürliche Form	bis zu drei Wirbel komprimiert				
	5	mehr als drei Wirbel teilweise gebrochen oder Durchtrennung der Wirbelsäule, durchgehende Linie der Wirbelsäule deutlich unterbrochen	Wirbelsäule erheblich verformt z.B. aufgrund von starker Fraktur oder doppelt verformter S-Kurve	mehr als drei Wirbel komprimiert				
Dornfortsatz Halswirbelsäule	0	keine Fraktur	keine Verformung					
	1	ein Dornfortsatz gebrochen	ein Dornfortsatz verformt					
	3	bis zu fünf Dornfortsätze gebrochen	bis zu fünf Dornfortsätze verformt					
	5	mehr als fünf Dornfortsätze gebrochen	mehr als fünf Dornfortsätze verformt					

Körperteil	Intensität	Fraktur	Verformung	Stauchung	Füllung Schwimmblase	Gasblasen	Flüssigkeits-ansammlung	Röntgendichtes Material
Rumpf-wirbelsäule	0	keine Fraktur	keine Verformung	keine Stauchung				
	1	ein Wirbel teilweise gebrochen, aber Wirbelsäule noch eine urchgehende Linie	Wirbelsäule leicht verformt in Bezug auf natürliche Form	ein Wirbel komprimiert				
	3	bis zu drei Wirbel teilweise gebrochen oder Bruch mit der durchgehenden Linie der Wirbelsäule	Wirbelsäule stark verformt in Bezug auf natürliche Form	bis zu drei Wirbel komprimiert				
	5	mehr als drei Wirbel teilweise gebrochen oder Durchtrennung der Wirbelsäule, durchgehende Linie der Wirbelsäule deutlich unterbrochen	Wirbelsäule erheblich verformt z.B. aufgrund von starker Fraktur oder doppelt verformter S-Kurve	mehr als drei Wirbel komprimiert				
Dornfortsatz Rumpf-wirbelsäule	0	keine Fraktur	keine Verformung					
	1	ein Dornfortsatz gebrochen	ein Dornfortsatz verformt					
	3	bis zu fünf Dornfortsätze gebrochen	bis zu fünf Dornfortsätze verformt					
	5	mehr als fünf Dornfortsätze gebrochen	mehr als fünf Dornfortsätze verformt					
Rippen	0	keine Fraktur	keine Verformung					
	1	eine Rippe teilweise oder ganz gebrochen	eine Rippe verformt					
	3	bis zu fünf Rippen gebrochen	bis zu fünf Rippen verformt					
	5	mehr als fünf Rippen gebrochen	mehr als fünf Rippen verformt					
Flossenstrahl-träger	0	keine Fraktur	keine Verformung					
	1	ein Flossenstrahl-träger teilweise oder ganz gebrochen	ein Flossenstrahl-träger teilweise oder ganz verformt					
	3	bis zu fünf Flossenstrahl-träger gebrochen	bis zu fünf Flossenstrahl-träger verformt					
	5	mehr als fünf Flossenstrahl-träger gebrochen	mehr als fünf Flossenstrahl-träger verformt					
Rumpf Leibeshöhle	0					keine Gasblasen	keine Flüssigkeits-ansammlung	kein röntgen-dichtes Material
	1					einzelne kleine Gasblasen < 5% der Leibeshöhle	Flüssigkeits-ansammlung < 5% der Leibeshöhle	einzelne kleine röntgendichte Strukturen < 3% der Leibeshöhle
	3					einige kleine oder mehrere mittlere Gasblasen > 5% < 20%	Flüssigkeits-ansammlung > 5% < 25%	mehrere kleine oder einzelne mittlere röntgendichte Strukturen > 3% < 10%
	5					mehrere mittlere oder große Gasblasen > 20%	Flüssigkeits-ansammlung > 25%	mehrere mittlere oder große röntgendichte Strukturen > 10%

Körperteil	Intensität	Fraktur	Verformung	Stauchung	Füllung Schwimmblase	Gasblasen	Flüssigkeits-ansammlung	Röntgendichtes Material
Rumpf Bindegewebe	0					keine Gasblasen	keine Flüssigkeits-ansammlung	kein röntgen-dichtes Material
	1					einzelne kleine Gasblasen < 5% des Rumpf Bindegewebes	Flüssigkeits-ansammlung < 5% des Rumpf Bindegewebes	einzelne kleine röntgendichte Strukturen < 3% des Rumpf Bindegewebes
	3					einige kleine oder mehrere mittlere Gasblasen > 5% < 20%	Flüssigkeits-ansammlung > 5% < 25%	mehrere kleine oder einzelne mittlere röntgendichte Strukturen > 3% < 10%
	5					mehrere mittlere oder große Gasblasen > 20%	Flüssigkeits-ansammlung > 25%	mehrere mittlere oder große röntgendichte Strukturen > 10%
Schwimmblase	0				normale Füllung			
	1				starke Kompression der Schwimm-blase, aber Umrisse noch sichtbar			
	3				Expansion			
	5				keine Schwimmblase und keine Umrisse sichtbar, wahrscheinlich durch Ruptur			
Schwanz-wirbelsäule	0	keine Fraktur	keine Verformung	keine Stauchung				
	1	ein Wirbel teilweise gebrochen, aber Wirbelsäule noch eine durchgehende Linie	Wirbelsäule leicht verformt in Bezug auf natürliche Form	ein Wirbel komprimiert				
	3	bis zu drei Wirbel teilweise gebrochen oder Bruch mit der durchgehenden Linie der Wirbelsäule	Wirbelsäule stark verformt in Bezug auf natürliche Form	bis zu drei Wirbel komprimiert				
	5	mehr als drei Wirbel teilweise gebrochen oder Durchtrennung der Wirbelsäule, durchgehende Linie der Wirbelsäule deutlich unterbrochen	Wirbelsäule erheblich verformt z.B. aufgrund von starker Fraktur oder doppelt verformter S-Kurve	mehr als drei Wirbel komprimiert				
Dornfortsatz Schwanz-wirbelsäule	0	keine Fraktur	keine Verformung					
	1	ein Dornfortsatz gebrochen	ein Dornfortsatz verformt					
	3	bis zu fünf Dornfortsätze gebrochen	bis zu fünf Dornfortsätze verformt					
	5	mehr als fünf Dornfortsätze gebrochen	mehr als fünf Dornfortsätze verformt					
Schwanzbereich Bindegewebe	0					keine Gasblasen	keine Flüssigkeits-ansammlung	kein röntgen-dichtes Material
	1					einzelne kleine Gasblasen < 5% des Schwanzbereichs	Flüssigkeits-ansammlung < 5% des Schwanzbereichs	einzelne kleine röntgendichte Strukturen < 3% des Schwanzbereichs
	3					einige kleine oder mehrere mittlere Gasblasen > 5% < 20%	Flüssigkeits-ansammlung > 5% < 25%	mehrere kleine oder einzelne mittlere röntgendichte Strukturen > 3% < 10%
	5					mehrere mittlere oder große Gasblasen > 20%	Flüssigkeits-ansammlung > 25%	mehrere mittlere oder große röntgendichte Strukturen > 10%

Tabelle 13 Exemplarischer Ausschnitt aus einem Dienstplan für die standardisierten Fischzugaben in Baiersdorf-Wellerstadt.

				Team ARIS	Team Fischzugabe		Team Hälterung		Team Auswertung		
Tag	Treatment	Durchgang	Zeit	Person A	Person B	Person C	Person D	Person E	Person F	Person G	Person H
Mittwoch 15.09.2015	oberhalb Rechen (Rechen + Spülrinne + Fischpass je 103 Aale)	1	06:00-06:30	Frühstück	Frühstück	Frühstück	Frühstück	Frühstück	Frühstück	Frühstück	Frühstück
			6:30-6:45	ARIS Aufbauen	Abzählen 103 und 206 Aale, schließen Steertreusen 1-6 (jeweils Hälfte groß und klein)		Team Fischzugabe helfen		Freie Mithilfe wos brennt, Fotos	Freie Mithilfe wos brennt, Fotos	Freie Mithilfe wos brennt, Fotos
			6:45 - 6:50	ARIS Beobachtung Versuchsfische vor Rechen/PAUSE	Zugabe Aale: 103 vor Fischpass, 206 vor Rechen und Spülrinne		Messung Wasserchemie am Schwimmponton (Multi + Trübung)				
			6:50-7:00		Betätigung Rechenreiniger	PAUSE					
			7:00-7:45	Team Hälterung helfen, Leerung Reuse 6	Beleuchtung, Regenschutz, Belüftung, Fischwannen, Sortiertisch		Protokolle, Klemmbretter, Stifte, Eimer transp., Hälterungsboxen, MS 222 Bad, Zipptertütchen mit Folienstreifen, Etiketten, Styroporboxen, Crushed Ice, Verbringen Aale Vorschädigung in Kontrollbox, getrennt nach "große Aale" und "kleine Aale"		Vorschädigung 10 Aale (5 kleine, 5 große)	Vorschädigung 10 Aale (5 kleine, 5 große)	Ausfüllen Protokolle für Joachim
			7:45 - 8:15		Leerung Reusen 1-5, in Reihenfolge der Zugabe		Leerung Reuse 6				
			08:15-09:15	Team Hälterung helfen, Fotos und einfrieren Aale, Beifang dokumentieren	Messung Strömung groß (Rechen, Hamen, Steertreuse)		Aale für Auswerter mit Eis betäuben, Ausgewertete Aale antemperieren und in Hälterungsboxen (feine Lochung, große Aale große Boxen, kleine Aale kleine Boxen) verbringen (getrennt nach Turbine, Fischpass, Spülrinne), Tote verwalten (Fotos, Gefriertruhe)		Auswertung Aale	Auswertung Aale	Ausfüllen Protokolle für Joachim
			09:15-10:15		PAUSE/Notauswerteteam + Spülen						
			10:15-11:15								
	Turbine + Fangeinrichtung Spülrinne	1	11:15-11:30	Team Fischzugabe helfen	Abzählen 104 Aale für beide Turbinen zusammen, Schließen Steertreusen 1-4	Abzählen 30 Aale für Spülklappennetz, Schließen Steertreuse 6			PAUSE/Zubereitung Mittagessen + Spülen	PAUSE/Zubereitung Mittagessen + Spülen	
			11:30-11:35	ARIS Beobachtung natürlicher Fischabstieg (=Beifang)/PAUSE	Zugabe Aale: 52 pro Turbinenschacht, 26 in Spülrinne kurz vor Netz						
			11:35-12:30		PAUSE/Zubereitung Mittagessen + Spülen		Messung Wasserchemie am Schwimmponton (Multi + Trübung)/PAUSE				
			12:30-12:45	Laura und Giulia helfen, Leerung Reuse 6	Leerung Reusen 1-4, in Reihenfolge der Zugabe, getrennt nach Reusen in Wannen mit Schwimmdelstück beschriftet		Leerung Reuse 6		Auswertung Aale	Auswertung	Ausfüllen Protokolle für Joachim
			12:45-13:45	Team Hälterung helfen, Fotos und einfrieren Aale, Beifang dokumentieren	Messung Strömung klein (Rechen, Steertreuse, Hameneingang)		Fische mit Frischwasser versorgen, in Hälterungsboxen verbringen (getrennt nach Turbine, Fangeinrichtung Spülklappe), Tote verwalten (Fotos, Gefriertruhe)				
			13:45-14:45		PAUSE/Catering						

Tabelle 14 Exemplarischer Ausschnitt aus einem Dienstplan für die Beprobung des natürlichen Fischbestandes in Baiersdorf-Wellerstadt.

Block	Tag	Intervall	Zeit	Person A	Person B	Person C	Person D	Zeit
I.- 01.05.	Montag 27.04	-	24:00-01:00					24:00-01:00
			01:00-02:00					01:00-02:00
			02:00-03:00					02:00-03:00
			03:00-04:00					03:00-04:00
			04:00-05:00					04:00-05:00
			05:00-06:00					05:00-06:00
			06:00-07:00					06:00-07:00
			07:00-08:00					07:00-08:00
			08:00-09:00		Ankunft der Studenten und Hameneinsetzen			08:00-09:00
			09:00-10:00					09:00-10:00
			10:00-11:00					10:00-11:00
			11:00-12:00					11:00-12:00
			12:00-13:00					12:00-13:00
			13:00-14:00					13:00-14:00
			14:00-15:00					14:00-15:00
			15:00-16:00					15:00-16:00
			16:00-17:00					16:00-17:00
			17:00-18:00					17:00-18:00
	Dienstag 28.04	6h	18:00-19:00	Hamenschließen & Fließgeschw.	Hamenschließen & Fließgeschw.			18:00-19:00
			19:00-20:00					19:00-20:00
			20:00-21:00	-	-	-	-	20:00-21:00
			21:00-22:00					21:00-22:00
			22:00-23:00					22:00-23:00
			23:00-24:00					23:00-24:00
		6h	24:00-01:00	Hamenleerung & Fließgeschw.	Hamenleerung & Fließgeschw.	Fischversorgung	Fischversorgung	24:00-01:00
			01:00-02:00					01:00-02:00
			02:00-03:00	-	-	-	-	02:00-03:00
			03:00-04:00					03:00-04:00
			04:00-05:00					04:00-05:00
			05:00-06:00					05:00-06:00
		6h	06:00-07:00	Hamenleerung & Fließgeschw.	Hamenleerung & Fließgeschw.	Fischversorgung	Fischversorgung	06:00-07:00
			07:00-08:00	-	-			07:00-08:00
			08:00-09:00					08:00-09:00
			09:00-10:00	Abiotik	Abiotik	-	-	09:00-10:00
			10:00-11:00	-	-			10:00-11:00
			11:00-12:00					11:00-12:00
		6h	12:00-13:00	Fischversorgung	Fischversorgung	Hamenleerung & Fließgeschw.	Hamenleerung & Fließgeschw.	12:00-13:00
			13:00-14:00					13:00-14:00
			14:00-15:00	-	-	-	-	14:00-15:00
			15:00-16:00					15:00-16:00
			16:00-17:00					16:00-17:00
			17:00-18:00					17:00-18:00
	04.	12h	18:00-19:00	Fischversorgung	Fischversorgung	Hamenleerung & Fließgeschw.	Hamenleerung & Fließgeschw.	18:00-19:00
			19:00-20:00					19:00-20:00
			20:00-21:00			-	-	20:00-21:00
			21:00-22:00					21:00-22:00
			22:00-23:00			Fließgeschw.	Fließgeschw.	22:00-23:00
			23:00-24:00	-	-			23:00-24:00
		6h	24:00-01:00					24:00-01:00
			01:00-02:00					01:00-02:00
			02:00-03:00					02:00-03:00
			03:00-04:00					03:00-04:00
			04:00-05:00					04:00-05:00
			05:00-06:00	24h Kontrolle Nacht	24h Kontrolle Nacht			05:00-06:00
	04.		06:00-07:00	Hamenleerung & Fließgeschw.	Hamenleerung & Fließgeschw.	Fischversorgung	Fischversorgung	06:00-07:00
			07:00-08:00			-	-	07:00-08:00
			08:00-09:00	-	-			08:00-09:00
			09:00-10:00			Abiotik	Abiotik	09:00-10:00

Tabelle 15 Liste der in die multivariaten Modelle zur Analyse der Zusammenhänge zwischen Verletzungsmustern und abiotischen Parametern eingegangen erklärenden Variablen.

Kategorie	Erklärende Variable [Einheit]	Erläuterungen
Physikalische Bedingungen Turbinen-passage	Kollisionsstärke g Turbineneinlauf	Bei den Sensorfisch-Untersuchungen gemessene Kollisionstärke (als Faktor der Erdbeschleunigung g) im Bereich des Turbineneinlaufs
	Kollisionsstärke g Turbine	Bei den Sensorfisch-Untersuchungen gemessene Kollisionstärke (als Faktor der Erdbeschleunigung g) im Bereich der Turbineneinheit
	Kollisionsstärke g Turbinenauslauf	Bei den Sensorfisch-Untersuchungen gemessene Kollisionstärke (als Faktor der Erdbeschleunigung g) im Bereich des Turbinenauslaufs
	Kollisionshäufigkeit Turbineneinlauf [%]	Bei den Sensorfisch-Untersuchungen ermittelter Anteil von Durchgängen mit einer Kollisionsstärke $> 10\ g$ im Bereich des Turbineneinlaufs
	Kollisionshäufigkeit Turbine [%]	Bei den Sensorfisch-Untersuchungen ermittelter Anteil von Durchgängen mit einer Kollisionsstärke $> 10\ g$ im unmittelbaren Bereich der Turbineneinheit
	Kollisionshäufigkeit Turbinenauslauf [%]	Bei den Sensorfisch-Untersuchungen ermittelter Anteil von Durchgängen mit einer Kollisionsstärke $> 10\ g$ im Bereich des Turbinenauslaufs
	Kollisionshäufigkeit $> 10\ g$ [%]	Bei den Sensorfisch-Untersuchungen ermittelter Anteil von Durchgängen mit einer Kollisionsstärke $> 10\ g$ bei der Turbinenpassage
	Kollisionshäufigkeit $> 95\ g$ [%]	Bei den Sensorfisch-Untersuchungen ermittelter Anteil von Durchgängen mit schweren Kollisionsereignissen $> 95\ g$ bei der Turbinenpassage
	Anzahl Kollisionen $> 95\ g$	Bei den Sensorfisch-Untersuchungen ermittelte maximale Anzahl an schweren Kollisionsereignissen $> 95\ g$ bei der Turbinenpassage
	Tiefstdruck Turbine [kPa]	Bei den Sensorfisch-Untersuchungen gemessener Tiefstdruck während der Turbinenpassage
Turbinen-parameter	Druckveränderungsrate (oberflächenadaptierte Fische)	Bei den Sensorfisch-Untersuchungen gemessenes Verhältnis des Tiefstdrucks während der Turbinenpassage zum Ausgangsdruck unmittelbar vor der Turbinenpassage, der an der Wasseroberfläche vorherrscht
	Maximale Druckveränderungsrate (tiefenadaptierte Fische)	Bei den Sensorfisch-Untersuchungen gemessenes Verhältnis des Tiefstdrucks während der Turbinenpassage zum Ausgangsdruck unmittelbar vor der Turbinenpassage, der an der tiefsten Stelle des Turbineneinlaufs vorherrscht
	Dekompressionsrate [kPa/s]	Bei den Sensorfisch-Untersuchungen gemessene Dekompressionsrate (= Druckabfall pro Zeiteinheit) während der Turbinenpassage
	Lauftraddurchmesser [m]	Durchmesser der im Kraftwerk eingebauten Turbine
	Anzahl Schaufeln	Anzahl der Schaufelblätter der im Kraftwerk eingebauten Turbine
	Drehzahl [U/min]	Umdrehungen pro Minute der im Kraftwerk eingebauten Turbine zum Zeitpunkt der Leerung
	Umfangsgeschwindigkeit [m/s]	Geschwindigkeit der äußeren Kreislinie der Turbine zum Zeitpunkt der Leerung
	Fallhöhe [m]	Zum Zeitpunkt der Leerung vorherrschende Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser der Wasserkraftanlage
	Leistung [kW]	Vom Kraftwerk zum Zeitpunkt der Leerung produzierte Leistung
	Durchfluss [m ³ /s]	Durchflussmenge der Turbine zum Zeitpunkt der Leerung

Kategorie	Erklärende Variable [Einheit]	Erläuterungen
Rechen- geometrie	Rechenabstand [mm]	Lichte Weite zwischen den Stäben des an der Wasserkraftanlage verbauten Rechens
Strömungs- geschwin- digkeiten	Rechen MW [m/s]	Zeitnah zur Leerung am Rechen gemessene Strömungsgeschwindigkeit, Mittelwert aus 12 Messwerten, basierend auf dreimal täglicher Messung
	Rechen MIN [m/s]	Zeitnah zur Leerung am Rechen gemessene Strömungsgeschwindigkeit, Minimum aus 12 Messwerten, basierend auf dreimal täglicher Messung
	Rechen MAX [m/s]	Zeitnah zur Leerung am Rechen gemessene Strömungsgeschwindigkeit, Maximum aus 12 Messwerten, basierend auf dreimal täglicher Messung
	Eingang MW [m/s]	Zeitnah zur Leerung am Hameneingang gemessene Strömungsgeschwindigkeit, Mittelwert aus drei Messwerten, basierend auf dreimal täglicher Messung
	Eingang MIN [m/s]	Zeitnah zur Leerung am Hameneingang gemessene Strömungsgeschwindigkeit, Minimum aus drei Messwerten, basierend auf dreimal täglicher Messung
	Eingang MAX [m/s]	Zeitnah zur Leerung am Hameneingang gemessene Strömungsgeschwindigkeit, Maximum aus drei Messwerten, basierend auf dreimal täglicher Messung
	Steert MW [m/s]	Zeitnah zur Leerung am Steert gemessene Strömungsgeschwindigkeit, Mittelwert aus drei Messwerten, basierend auf dreimal täglicher Messung
	Steert MIN [m/s]	Zeitnah zur Leerung am Steert gemessene Strömungsgeschwindigkeit, Minimum aus drei Messwerten, basierend auf dreimal täglicher Messung
	Steert MAX [m/s]	Zeitnah zur Leerung am Steert gemessene Strömungsgeschwindigkeit, Maximum aus drei Messwerten, basierend auf dreimal täglicher Messung
Charak- teristika der Hamen- befischung	Abfluss [m ³ /s]	Zum Zeitpunkt der Leerung vorherrschender Abfluss des Untersuchungsgewässers, basierend auf dreimal täglicher Messung
	Leerungsintervall [h] Treibgut [L]	Zeitdauer, über welche die Steertreuse geschlossen war Treibgutmenge, die sich mit den Fischen in der jeweiligen Leerung befand
	Biomasse Leerung [kg]	Gesamtbiomasse der Fische, die sich in der jeweiligen Leerung befand
Physikalisch- chemische Parameter	Temperatur [°C]	Im Unterwasser zeitnah zur Leerung gemessene Wassertemperatur, Mittelwert aus drei Messwerten, basierend auf dreimal täglicher Messung
	Sauerstoff [mg/l]	Im Unterwasser zeitnah zur Leerung gemessene Sauerstoffkonzentration, Mittelwert aus drei Messwerten, basierend auf dreimal täglicher Messung
Eigen- schaften der Fische	Länge [cm]	Mittlere Totallänge der in einer Leerung gefangenen Fische einer Art
	Gewicht [g]	Mittlere Biomasse der in einer Leerung gefangenen Fische einer Art
	Vitalität Vorschädigung 96h	Mittlere Vitalität der aus der Versuchsgruppe Vorschädigung (= Kontrolle) gehälterten Fische nach 96 h, Fische aus der gleichen Charge wie die bei den standardisierten Fischzugaben eingesetzten Fische, Indikator für die Ausgangskondition

Tabelle 16 Terminübersicht Wasserkraftprojekt.

Datum	Thema	Ort	Beteiligte Personen TUM
05.05.2014	Besichtigung Standorte	Eixendorf, Pielmühle, Volkmannsdorf	Pander J., Müller M., Knott J., Winkler J.
08.05.2014	Besichtigung Standorte	Heckerwehr, Baiersdorf, Lindesmühle	Pander J., Müller M., Winkler J.
24.05.2014	Infoveranstaltung Legau	Legau	Winkler J.
27.05.2014	Wasserkraft Jour Fixe, TUM intern	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Winkler J.
06.06.2014	Auftakttermin	Augsburg	Pander J., Müller M., Knott J., Winkler J., Geist J.
10.06.2014	Wasserkraft Jour Fixe, TUM intern	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Winkler J.
17.06.2014	Abholung Leasingfahrzeug	München	Pander J., Müller M.
17.06.2014	Besprechung Tierschutz	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Geist J., Kisling S.
24.06.2014	Vermessen Maße Fangeinrichtungen	Baiersdorf, Lindesmühle	Pander J., Müller M., Knott J., Winkler J.
30.06.2014	Besichtigung Standorte	Au bei Kempten	Pander J., Müller M., Knott J., Winkler J.
01.07.2014	Wasserkraft Jour Fixe, TUM und LfU	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Winkler J.
02.07.2014	Workshop Schachtkraftwerk	Obernach	Knott J., Winkler J.
24.07.2014	Wasserkraft Jour Fixe, TUM und LfU	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Winkler J.
25.08.2014	Wasserkraft Jour Fixe, TUM intern	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Winkler J., Geist J.
03.09.2014	Besprechung Pumpen/Hälterung mit Betriebsfeuerwehr	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Winkler J.
04.09.2014	Wasserkraft Jour Fixe, TUM und LfU	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Winkler J.
04.09.2014	Besichtigung Standorte	Baierbrunn	Pander J., Müller M., Knott J., Winkler J.
08.09.2014	Infoveranstaltung lokale Fischerei	Au bei Kempten	Müller M.
09.09.2014	Besichtigung Standorte	Großweil	Pander J.
12.09.2014	Infoveranstaltung lokale Fischerei	Großweil	Pander J., Müller M.
17.09.2014	Einweisung Netze Anschlag und Knüpfen durch Herrn Feick	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Winkler J., Sacher M., Egg L., Reebs F.
18.09.2014	Infoveranstaltung lokale Fischerei	Eixendorf	Pander J.
18.09.2014	Besprechung Tierschutz mit Rechtsanwalt Prof. Steike	Freising	Müller M., Knott J., Winkler J., Geist J., Kisling S.
29.09.- 02.10.2014	Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Limnologie	Magdeburg	Pander J., Müller M., Winkler J., Sacher M., Beggel S., Geist J.
08.10.2014	Auftakttermin Fischerei	Augsburg	Pander J., Geist J., Müller M.
12.10.2014	Abstimmungstermin lokale Fischerei	Lindesmühle	Müller M., Winkler J., Reebs F.
21.10.2014	Besprechung Hebeeinrichtung Fangeinrichtung Spülrinne	Baiersdorf	Pander J., Egg L.
27.10.2014	Pressetermin	Baiersdorf	Pander J., Müller M., Knott J., Winkler J., Sacher M., Böker C., Egg L., Reebs F.

Datum	Thema	Ort	Beteiligte Personen TUM
28.10.2014	Abstimmungstermin lokale Fischerei	Lindesmühle	Pander J.
19.11.2014	Erörterungstermin Wasserkraftbetreiber Baierbrunn	Unterschleißheim	Pander J., Knott J.
27.11.2014	Konferenz Fischschutz und Fischabstieg	Bonn	Pander J.
02.12.2014	Wasserkraft Jour Fixe, TUM intern	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Egg L.
09.12.2014	Besprechung Tierschutz	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Geist J., Kisling S., Kliem, H.
10.12.2014	Erörterungstermin Wasserkraftbetreiber Heckerwehr	Ehingen	Pander J., Müller M., Knott J.
11.12.2014	Wasserkraft Jour Fixe, TUM und LfU	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Egg L.
18.12.2014	Besprechung Hr. Rest, Stadtwerke Bad Kissingen	Lindesmühle	Pander J., Müller M.
19.01.2015	Wasserkraft Jour Fixe, TUM Intern	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Egg L.
26.01.2015	Wasserkraft Jour Fixe, TUM Intern	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Egg L.
10.02.2015	Besprechung Zwischenbericht 2015, StMUV, StMWI, LfU, TUM	Augsburg	Geist J., Pander J., Müller M.
16.02.2015	Wasserkraft Jour Fixe, TUM Intern	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Egg L.
24.02.2015	Symposium Technischer Fischabstieg	Rheinfelden	Pander J., Müller M.
02.03.2015	SVK Tagung	Fulda	Pander J., Müller M.
05.03.2015	Wasserkraft Jour Fixe, TUM intern	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Egg L.
11.03.2015	Infotermin Volkmannsdorf	Volkmannsdorf	Pander J., Müller M.
18.03.2015	Kommissionssitzung Tierversuchsantrag	München	Müller M.
02.04.2015	Hälterungsgenehmigung Besprechung	Freising	Müller M., Knott J., Egg L.
08.04.2015	Besprechung Firma Rehart, Heckerwehr	Ehingen	Pander J.
13.04.2015	Expertengremium Baierbrunn	Unterschleißheim	Knott J., Pander J.
20.04.2015	Eichungstermin Fischschäden	Freising	Müller M., Pander J., Knott J., Egg L., Roschmann P., Bierschenk B.
19.05.2015	Workshop Echoview	Nantes	Egg L.
20.05.2015	Kommissionssitzung Tierversuchsantrag	München	Geist J., Müller M.
18.06.2015	Dienstbesprechung Wasserwirtschaft	Nürnberg	Müller M., Pander J.
22.06.2015	Fish Passage Konferenz	Groningen	Knott J., Egg L.
30.06.2015	Wasserkraft Jour Fixe, TUM und LfU	Freising	Müller M., Knott J., Egg L., Bierschenk B., Roschmann P.
05.07.2015	SEFS Konferenz	Genf	Müller M., Pander J.
27.07.2015	Vorort Termin LfU StMuV	Freising	Müller M., Pander J., Knott J., Egg L., Bierschenk B.
29.07.2015	Wasserkraft Jour Fixe	Freising	Müller M., Pander J., Knott J., Egg L., Bierschenk B., Roschmann P.
20.08.2015	Termin Netzleitstelle Besichtigung Baustelle	Au Iller	Pander J.

Datum	Thema	Ort	Beteiligte Personen TUM
29.08.2015	Wasserkraft Jour Fixe	Freising	Müller M., Pander J. Knott J., Egg L., Bierschenk B., Roschmann P., Gräfe F.
19.10.2015	Ausmessen Revisionsverschlüsse Heckerwehr	Heckerwehr	Pander J., Müller M.
30.10.2015	Einheben VLH-Turbine	Au Iller	Pander J., Müller M.
05.11.2015	Besprechung Verbände, LfU, TUM, LFV, LBV, BUND Naturschutz	Augsburg	Geist J., Pander J., Müller M.
25.11.2015	Ausmessen Revisionsverschlüsse, Barro Bootsbau	Au Iller	Pander J., Knott J., Müller M.
26.11.2015	Fachgespräch SPD Landtagsfraktion	München	Pander J., Müller M.
01.12.2015	Besprechung Isar Baierbrunn	Unterschleißheim	Pander J., Müller M., Knott J.
03.12.2015	Wasserkraft Jour Fixe, TUM und LfU	Freising	Geist J., Pander J., Knott J., Egg L., Müller M.
04.12.2015	Wasserkraft Jour Fixe, TUM intern	Freising	Müller M., Pander J. Knott J., Egg L., Bierschenk B., Roschmann P., Gräfe F.
08.12.2015	Wasserkraft Jour Fixe, TUM intern	Freising	Müller M., Pander J. Knott J., Egg L., Bierschenk B., Roschmann P., Gräfe F.
11.12.2015	Wasserkraft Jour Fixe, TUM intern	Freising	Müller M., Pander J. Knott J., Egg L., Bierschenk B., Roschmann P., Gräfe F.
02.02.2016	Besprechung Hamen	Baierbrunn	Pander J.
05.02.2016	Ecohydraulics Conference	Melbourne	Geist J., Pander J., Müller M.
17.02.2016	Besprechung Zwischenbericht	Augsburg	Pander J., Müller M.
07.03.2016	SVK Tagung	Fulda	Egg L.
13.04.2016	Symposium zum technischen Monitoring von Fischen	Zams/Tirol	Egg L.
15.04.2016	Besichtigung Heckerwehr WWA Ansbach	Heckerwehr	Müller M.
18.04.2016	Besprechungstermin	Pielmühle	Pander J.
20.04.2016	BR Interview für Zündfunk	Heckerwehr	Müller M., Egg L.
22.04.2016	Vor Ort Termin Verbände	Heckerwehr	Pander J., Müller M., Knott J.
28.04.2016	Besichtigung Heckerwehr FFB Oberpfalz	Freising	Müller M.
18.05.2016	Wasserkraft Jour Fixe TUM und LfU	Freising	Müller M., Knott J., Egg L., Bierschenk B., Roschmann P.
19.05.2016	Besprechung Bauausführung Eixendorf	Eixendorf	Pander J., Müller M.
03.06.2016	WK Jour Fixe, TUM intern	Freising	Müller M., Knott J., Egg L., Bierschenk B., Roschmann P., Gräfe F., Pander J.
13.06.2016	Besprechung Prof. Milz innere Fischschäden	München	Müller M., Pander J.
22.06.2016	Besprechung Wolf Fischeaufstieg	Freising	Pander J., Müller M., Knott J.
11.07.2016	Vorbesprechung Dreh BR Faszination Wissen	Freising	Geist J., Pander J., Müller M.
20.07.2016	Besprechung Wiegand & Kainz	Freising	Pander J., Müller M.
21.07.2016	WK Jour Fixe, TUM intern	Freising	Müller M., Knott J., Egg L., Bierschenk B., Roschmann P., Gräfe F., Pander J.
21.07.2016	WK Jour Fixe, TUM und LfU	Freising	Müller M., Pander J.

Datum	Thema	Ort	Beteiligte Personen TUM
22.08.2016	Besprechung Monitoring Heckerwehr mit Betreiber, Aufstellung Container	Heckerwehr	Müller M.
26.08.2016	Eichungstermin Fischschnädel	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Egg L., Bierschenk B., Pander J., Müller M.
01.09.2016	Besprechung Fischmonitoring Teil II mit AÜW	Au Iller	
05.09.2016	Drehtermin BR Faszination Wissen - Hochwasser	Au Iller	Geist J., Pander J., Müller M., Knott J., Egg L., Scholz B., Villa G., Höß R.
06.09.2016	Drehtermin BR Faszination Wissen - Hameneinheben	Au Iller	Geist J., Pander J., Müller M., Knott J., Egg L., Scholz B., Villa G., Höß R., Mayr J.
04.10.2016	Drehtermin BR Faszination Wissen - Auswertung	Au Iller	Geist J., Müller M., Knott J., Pander J., Scholz B., Mayr J., Höß R.
28.11.2016	Wasserkraft Jour Fixe TUM und LfU	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Geist J.
22.12.2016	Besprechung Bauausführung Unterwasser Baierbrunn	Baierbrunn Kraftwerk	Pander J., Müller M., Knott J.
25.01.2017	Turbineneinhub bewegliches Kraftwerk	Eixendorf	Knott J., Egg L.
31.01.2017	Infotermin Fischerei	Augsburg	Geist J., Müller M., Egg L., Pander J., Knott J.
10.02.2017	Besichtigung Kieslaichplatz	Eixendorf	Knott J.
02.03.2017	WK Jour Fixe, TUM intern	Freising	Pander J., Müller M., Knott J., Egg L., Bierschenk B., Palt M., Roschmann P., Gräfe F., Steinhilber J.
06.03.2017	Besprechung Monitoring bewegliches Kraftwerk WWA	Eixendorf	Pander J., Müller M., Knott J., Egg L., Roschmann P., Gräfe F.
10.03.2017	Besprechung Zwischenbericht	Augsburg	Geist J., Pander J., Müller M.
20.03.2017	Plausibilisierungsgespräch Baierbrunn	Erlangen	Geist J., Pander J., Müller M., Egg L.
21.03.2017	WK Jour Fixe TUM und LfU	Freising	Pander J., Müller M., Palt M.
23.03.2017	Plausibilisierungsgespräch Lindesmühle	Bad Kissingen	Geist J., Pander J., Müller M., Egg L.
24.03.2017	Vorstellung Monitoringprogramm Fischereiverein Kempten e.V.	Kempten	Müller M.
30.03.2017	Besichtigung Betrieb bewegliches Kraftwerk	Eixendorf	Pander J., Müller M., Knott J.
19.04.2017	Eichung und Einführung Fischmonitoring	Freising	Müller M., Knott J., Egg L., Roschmann P., Gräfe F., Bierschenk B., Mayr J., alle sonstigen Projektmitarbeiter*innen
20.04.2017	Besprechung Versuchsablauf bewegliches Kraftwerk mit WWA	Eixendorf	Müller M., Knott J.
02.05.2017	Besprechung Ministerium elektrischer Seilrechen	München	Geist J., Pander J., Müller M.
31.05.2017	Ausmessen Isar Baierbrunn	Baierbrunn	Pander J., Müller M., Knott J.
19.06.2017	Abholung neues Leasingfahrzeug	München	Pander J., Müller M., Knott J.
20.06.2017	Besprechung Zwischenbericht mit Herrn Schaipp	Freising	Pander J., Müller M., Knott J.

Datum	Thema	Ort	Beteiligte Personen TUM
26.06.2017	Besprechung Datenbanken mit Prof. Kühn	Freising	Müller M., Knott J.
27.06.2017	HiWi Jour Fixe	Freising	Müller M., Bierschenk B., aktuelle HiWis
29.06.2017	Besprechung Kanuverband und WWA Monitoring Baierbrunn	Baierbrunn	Pander J., Müller M., Knott J.
12.07.2017	Einweihung VLH-Kraftwerk Baierbrunn	Baierbrunn	Geist J., Pander J., Knott J.
18.07.2017	WK Jour Fixe TUM und LfU	Freising	Geist J., Pander J., Knott J., Müller M.
26.07.2017	WK Jour Fixe TUM intern	Freising	Müller M., Roschmann P., Steinhilber J., Bierschenk B., Parsche F.
08.08.2017	Besprechung Ausführungsplanung Loisach	Großweil	Pander J., Müller M.
11.08.2017	Detaillklärung Ablauf Monitoring Baierbrunn mit Uniper/Bayernwerk	Baierbrunn	Müller M.
30.08.2017	Eichung und Einführung Fischmonitoring	Freising	Müller M., Knott J., Egg L., Roschmann P., Bierschenk B., Mayr J., Studer I., Parsche F., alle sonstigen Projektmitarbeiter*innen
07.09.2017	Kranprobefahrt	Baierbrunn	Pander J., Müller M., Knott J.
25.09.2017	WK Jour Fixe TUM und LfU	Freising	Geist J., Pander J., Knott J., Böhler C., Kienle L.
10.11.2017	Spatenstich Schachtkraftwerk	Großweil	Geist J., Pander J., Müller M.
13.11.2017	Besichtigung Baiersdorf zur Ausarbeitung Managementvorschläge	Baiersdorf	Pander J., Kunz S.
16.11.2017	HiWi Jour Fixe	Freising	Müller M., Knott J., Bierschenk B., Steinhilber J., aktuelle HiWis
30.11.2017	WK Jour Fixe TUM intern	Freising	Müller M., Knott J., Belle C., Zimsek T., Kiraly R.
14.12.2017	WK Jour Fixe TUM intern	Freising	Müller M., Knott J., Zimsek T., Kiraly R.
19.12.2017	WK Jour Fixe TUM intern	Freising	Müller M., Mayr J., Werner R.
22.01.2018	Besichtigung Kraftwerk Höllthal	Höllthal a. d. Alz	Müller M., Pander J., Knott J.
05.02.2018	WK Jour Fixe TUM intern	Freising	Müller M., Knott J., Bierschenk B., Steinhilber J., Roschmann P., Geveke N., Köbel J., Seidel C., aktuelle HiWis
02.03.2018	Eichung und Einführung Fischmonitoring	Freising	Müller M., Knott J., Bierschenk B., Steinhilber J., Roschmann P., Egg L., Geveke N., Köbel J., Seidel C., Beggel S., aktuelle HiWis
26.03.2018	WK Jour Fixe TUM und LfU	Baierbrunn	Müller M.
26.04.2018	Besprechung Zwischenbericht	Augsburg	Geist J., Müller M., Pander J., Knott J.
03.05.2018	Plausibilisierungsgespräch Au Iller	Kempton	Geist J., Müller M., Pander J., Knott J.
17.05.2018	Plausibilisierungsgespräch Heckerwehr	Nürnberg	Geist J., Müller M., Pander J., Knott J.

Datum	Thema	Ort	Beteiligte Personen TUM
28.05.2018	Ablaufbesprechung Versuche Höllthal	Höllthal a. d. Alz	Müller M.
29.06.2018	Ausmessen Höllthal	Höllthal a. d. Alz	Müller M., Knott J., Egg L., Roschmann P., Geveke N., Köbel J.
04.07.2018	WK Jour Fixe intern	Freising	Müller M., Knott J., Roschmann P., Geveke N., Steinhilber J., Köbel J., Seidel C.
05.07.2018	Besprechung Fischmonitoring Baierbrunn mit Liepold T., Zehender J. und Knapp R.	Freising	Müller M., Pander J.
18.07.2018	Heckerwehr Besprechung Aufstiegsschnecke	Heckerwehr	Pander J.
19.07.2018	WK Jour Fixe mit LfU	Freising	Müller M., Pander J., Knott J.
24.07.2018	WK Jour Fixe intern	Freising	Müller M., Knott J., Bierschenk B., Egg L., Steinhilber J., Roschmann P., Geveke N., Köbel J., aktuelle HiWis
28.08.2018	Eichung und Einführung Fischmonitoring	Freising	Müller M., Knott J., Bierschenk B., Steinhilber J., Roschmann P., Egg L., Geveke N., Köbel J., Seidel C., Beggel S., aktuelle HiWis
12.11.2018	WK Jour Fixe intern	Freising	Müller M., Knott J., Bierschenk B., Roschmann P., Geveke N., Köbel J., Beggel S., aktuelle HiWis
22.11.2018	WK Jour Fixe mit LfU	Freising	Müller M., Pander J.
10.12.2018- 14.12.2018	Fish Passage Konferenz mit Vorträgen aus dem Projekt	Albury, Australien	Geist J., Müller M., Knott J., Egg L.
22.01.2019	WK Jour Fixe mit LfU	Freising	Müller M., Knott J., Bierschenk B., Roschmann P., Geveke N., aktuelle HiWis
31.01.2019	Besprechung Format Zusammenfassungen Bericht	Augsburg	Müller M., Genius D.
13.02.2019	WK Jour Fixe intern	Freising	Müller M., Knott J., , Geveke N., Smialek N.
07.03.2019	WK Jour Fixe intern	Freising	Müller M., Knott J., Bierschenk B., Roschmann P., Geveke N., aktuelle HiWis
14.03.2019	Eichung und Einführung Fischmonitoring	Freising	Müller M., Knott J., Bierschenk B., Smialek N., Steinhilber J., Roschmann P., Geveke N., Seidel C., Beggel S., aktuelle HiWis
21.03.2019	WK Jour Fixe mit LfU	Freising	Geist J., Müller M., Pander J.
09.05.2019	Besprechung Zwischenbericht	Augsburg	Geist J., Müller M., Knott J., Pander J.
10.05.2019	Plausibilisierungsgespräch Eixendorf	Neunburg vorm Wald	Geist J., Müller M., Knott J., Pander J.
03.06.2019	Nachbesprechung Zwischenbericht	Augsburg	Müller M., Knott J.
01.07.2019	WK Jour Fixe intern	Freising	Müller M., Knott J., Bierschenk B., Wild R., Nagel C., Hildebrand J., Argawal A.

Datum	Thema	Ort	Beteiligte Personen TUM
01.08.2019	Besichtigung Baustelle Schachtkraftwerk	Großweil	Müller M., Knott J., Pander J.
08.08.2019	Einweihung Erlebnispfad Wasserkraft Brombachsee	Brombachsee	Müller M.
11.09.2019	WK Jour Fixe intern	Freising	Müller M., Knott J., Bierschenk B., Roschmann P., Geveke N., aktuelle HiWis
16.09.2019	Sensorfish Webinar mit Brett Pflugrath/USA	Freising	Müller M., Knott J.
28.11.2019	WK Jour Fixe mit LfU	Freising	Geist J., Müller M., Pander J.
03.12.2019- 04.12.2019	Forum Fischschutz 2019	Augsburg	Geist J., Müller M., Knott J., Pander J., Smialek N.
06.02.2020	Webinar Natel Energy & Landeskraftwerke	Freising	Geist J., Müller M., Knott J., Pander J.
10.03.2020	Besprechung Fischhebeschnecke Heckerwehr mit Landesfischereiverband e.V.	Freising	Geist J., Müller M., Pander J.
15.05.2020	Ausmessen Schachtkraftwerk	Großweil	Knott J., Müller M., Geveke N.
25.06.2020	Besprechung Abschlussbericht 2020 mit LfU & StMUV	Augsburg	Geist J., Müller M., Knott J., Pander J.
17.07.2020	Plausibilisierungsgespräche Baierbrunn und Höllthal	WWA München	Geist J., Pander J., Knott J., Müller M.
01.09.2020	Eichung und Einführung Fischmonitoring	Freising	Knott J., Bierschenk B., Suttor C., Smialek N., Geveke N., Zoltner D., Wirthensohn E., Zimmermann J., aktuelle HiWis
19.11.2020	Sensorfish Webinar mit Daniel Deng, PNNL/USA	Online Konferenz	Knott J., Müller M.
02.12.2020	Besprechung Fischmonitoring Schachtkraftwerk mit Betreibern, Hydroshaft GmbH & LS Wasserbau	Großweil	Geist J., Pander J., Knott J.
08.12.2020	WK Jour Fixe mit LfU	Online Konferenz	Geist J., Pander J., Knott J.
21.01.2021	WK Jour Fixe intern	Online Konferenz	Knott J., Bierschenk B., Suttor C., Geveke N., Zoltner D., Wirthensohn E., Zimmermann J., aktuelle HiWis
11.02.2021	Besprechung Fischmonitoring Schachtkraftwerk mit Betreibern	Großweil	Knott J., Geveke N.
25.02.2021	Eichung und Einführung Fischmonitoring	Freising	Knott J., Bierschenk B., Suttor C., Wild R., Nagel C., Geveke N., Zoltner D., Wirthensohn E., aktuelle HiWis
02.03.2021	Besprechung Fischmonitoring Schachtkraftwerk mit Betreibern, Hydroshaft GmbH & LS Wasserbau	Großweil	Geist J., Pander J., Knott J.
15.03.2021	Besprechung Fischmonitoring Schachtkraftwerk mit Betreibern & Hydroshaft GmbH	Großweil	Knott J.
22.03.2021	Besprechung Fischmonitoring Schachtkraftwerk mit Betreibern & Hydroshaft GmbH	Großweil	Knott J.
06.05.2021	Besprechung Zwischenbericht 2021 mit LfU & StMUV	Online Konferenz	Geist J., Pander J., Knott J.
01.06.2021	Nachbesprechung Zwischenbericht 2021 mit LfU	Online Konferenz	Knott J.

Datum	Thema	Ort	Beteiligte Personen TUM
23.07.2021	WK Jour Fixe intern	Online Konferenz	Knott J., Suttor C., aktuelle HiWis
04.08.2021	Sensorfish Workshop mit PNNL/USA	Online Konferenz	Knott J., Müller M.
06.08.2021	Sensorfish Workshop mit PNNL/USA	Online Konferenz	Knott J., Müller M.
10.11.2021	WK Jour Fixe mit LfU	Online Konferenz	Geist J., Pander J., Knott J.
30.11.2021	Besprechung mit LfU	Online Konferenz	Geist J., Pander J., Knott J.
02.02.2022	Besprechung mit LfU	Online Konferenz	Geist J., Pander J., Knott J.
15.02.2022	Vorbesprechung Zwischenbericht 2022 mit LfU	Online Konferenz	Knott J.
05.04.2022	Plausibilisierungsgespräch Großweil	Online Konferenz	Geist J., Pander J., Knott J.
07.04.2022	WK Jour Fixe mit LfU	Online Konferenz	Geist J., Pander J., Knott J.
18.05.2022	Besprechung mit LfU	Online Konferenz	Knott J.
20.05.2022	Nachbesprechung Plausibilisierungsgespräch Großweil mit Betreibern, Hydroshaft GmbH, LS Wasserbau, Fischereiverband, Fischereiberechtigten, Wasserwirtschaftsamt	Großweil	Geist J., Pander J., Knott J.
24.05.2022	Nachbesprechung Zwischenbericht 2022 mit LfU	Online Konferenz	Knott J.
30.06.2022	WK Jour Fixe mit LfU	Online Konferenz	Geist J., Pander J., Knott J.
06.07.2022	Vorbesprechung Abschlussveranstaltung Wasserkraftprojekt mit LfU	Online Konferenz	Geist J., Pander J., Knott J.
07.07.2022	Abschlussveranstaltung Wasserkraftprojekt	Augsburg	Geist J., Pander J., Knott J.