

LEHRSTUHL FÜR AQUATISCHE SYSTEMBIOLOGIE

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

WISSENSCHAFTSZENTRUM WEIHENSTEPHAN

Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen

Abschlussbericht 2020

Band 2a: Freising/Moosach

Versuche zur fangbedingten Schädigung



Dr. Joachim Pander, Dr. Melanie Mueller, M.Sc. Josef Knott,
Prof. Dr. Jürgen Geist

30. JUNI 2020

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
1. Versuchsstandort Moosach.....	1
2. Methodenversuch zur fangbedingten Schädigung	2
2.1. Hintergrund	2
2.2. Methoden.....	5
2.2.1. Fangeinrichtungen	7
2.2.2. Treibgutmischungen	10
2.2.3. Hälterungssystem	10
2.2.4. Datenanalyse und Statistik.....	11
2.3. Ergebnisse & Diskussion.....	12
2.3.1. Fangeffektivität.....	13
2.3.2. Sofortige Mortalität	17
2.3.3. Verzögerte Mortalität.....	19
2.3.4. Subletale Verletzungen durch den Fang.....	20
2.3.5. Einfluss von Treibgut, Biomasse und Strömungsgeschwindigkeit auf die Mortalität.....	29
2.3.6. Fazit und Ausblick.....	31
Literaturverzeichnis	34
Anhang.....	IV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Blick auf das Unterwasser der Moosach an der ehemaligen Mühle	2
Abbildung 2 Schematische Darstellung des Versuchsdesigns beim Methodenversuch	4
Abbildung 3 Links: Sortieren der Versuchsfische nach Arten; Rechts: Auswertung und Dokumentation der Fischverletzungen	7
Abbildung 4 Schematische Darstellung eines am Turbinenauslauf angebrachten Fanghamens mit abnehmender Maschenweite, Steertreue und Fangkasten.....	8
Abbildung 5 Stahlrahmen mit angeschlagenem Hamennetz; 50% Hamen, 30% Hamen und 100% Hamen am Standort Moosach/Freising	8
Abbildung 6 Leerung des sich im Wasser befindlichen Fangkastens mit Keschern	9
Abbildung 7 Box-Whisker Plot der Wiederfangrate pro 1 h Leerungsintervall unterteilt nach den verschiedenen Fangeinrichtungen.....	13
Abbildung 8 NMDS der Verletzungsmuster unterteilt nach den verschiedenen Versuchsgruppen	24
Abbildung 9 Aufsummierte Differenz der mittleren Verletzungsintensitäten für die häufigsten Verletzungskategorien zur Unähnlichkeit zwischen den verschiedenen Versuchsgruppen zusammengefasst für alle untersuchten Fischarten.....	26
Abbildung 10 NMDS der Verletzungsmuster der verschiedenen Versuchsgruppen unterteilt nach den sieben Versuchsfischarten.....	27
Abbildung 11 Aufsummierte Differenz der mittleren Verletzungsintensitäten für die häufigsten Verletzungskategorien zur Unähnlichkeit zwischen den verschiedenen Versuchsgruppen für jede untersuchte Fischart	28
Abbildung 12 Lineare Regressionen von Mortalitätsraten mit der Strömungsgeschwindigkeit, der akkumulierten Treibgutmenge, der akkumulierten Fischbiomasse und der Wassertemperatur bei einstündigem Leerungsintervall	30
Abbildung 13 NMDS der Verletzungsmuster für die einzelnen Fischarten unterteilt nach den verschiedenen Versuchsgruppen	V

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Ablauf der Fischzugaben für die Versuche zur Fangeffektivität am Standort Moosach/Freising im Projektjahr 2015 unterteilt nach den verschiedenen Versuchsgruppen und den einzelnen Versuchswochen	6
Tabelle 2 Technische Daten der verwendeten Fangeinrichtungen.....	10
Tabelle 3 Mittlere Wiederfangraten für alle Versuchsfischarten	14
Tabelle 4 Mittlere sofortige Mortalitätsrate für alle Versuchsfischarten.....	18
Tabelle 5 Mittlere verzögerte Mortalitätsrate für alle Versuchsfischarten basierend auf der Anzahl wiedergefangener Fische.....	19
Tabelle 6 Durchschnittliche Anzahl und Intensität der aufgetretenen Verletzungen.....	25
Tabelle 7 Fischreferenzzönose (prozentuale Anteile der potenziell vorkommenden Fischarten) der Moosach am Standort Moosach/Freising	IV
Tabelle 8 Anzahl der in den verschiedenen Versuchsgruppen wiedergefangenen und ausgewerteten Individuen der sieben Versuchsfischarten	IV
Tabelle 9 Signifikante Zusammenhänge zwischen der Mortalität und den gemessenen unabhängigen Variablen im linearen Modell.....	VI

1. Versuchsstandort Moosach

Die methodischen Vorversuche zur fangbedingten Fischschädigung und zur sonarbasierten Erfassung des Fischabstiegs (siehe Band 2b) fanden am Standort Moosach/Freising statt. Die Versuchsanlage am Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie (Abbildung 1, WGS 84: 48°23'39" N, 11°43'24" O, 446 m NN) an der Moosach befindet sich im oberbayerischen Landkreis Freising. Naturräumlich zählt dieses Gebiet zum Donau-Isar-Hügelland im Großraum Alpenvorland. Die Moosach gehört zur Flussgebietseinheit Donau (LfU 2014, Kartendienst Gewässerbewirtschaftung Bayern) und wird nach Pottgießer & Sommerhäuser (2004) im Bereich des Standorts dem Fließgewässertyp 2.2: Kleine Flüsse des Alpenvorlandes zugerechnet. Von den 20 potenziell vorkommenden Referenzarten sind die rheophilen Arten Äsche, Bachforelle, Barbe und Nase laut Referenzzönose (Schubert 2007) am stärksten vertreten (Anteil > 10%; Tabelle 7). Die Jahresniederschlagssummen schwanken zwischen 750 mm und 850 mm, die Jahresmitteltemperatur liegt bei 8°C bis 9°C (LfU 2014, Bodeninformationssystem Bayern). Die Moosach hat eine Gesamtlänge von 38,27 km und ein Einzugsgebiet von 188,87 km² (LfU 2014, Grundlagendaten Fließgewässer Bayern). Der mittlere Abfluss (MQ) am Pegel Freising beträgt 2,64 m³/s (<http://www.hnd.bayern.de>). Der tatsächliche Abfluss der Moosach am Standort des Lehrstuhls lag während der Versuchsphase bei durchschnittlich 1,5 m³/s (erfasst am Wehrpegel der Anlage in Freising 48°23'39" N; 11°43'25" O). An der Moosach ist derzeit keine Wasserkraftanlage installiert. Die Wehranlage, die bereits im 17. Jahrhundert zum Betreiben eines Mühlrades errichtet wurde, besitzt eine Fallhöhe von ca. 1,3 m und deckt die gesamte Gewässerbreite ab. Neben dem Abstiegskorridor am Wehrüberfall kann der Fischab- bzw. Fischaufstieg über ein naturnahes Umgehungsgewässer erfolgen.



Abbildung 1 Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie, Blick auf das Unterwasser der Moosach an der ehemaligen Mühle.

2. Methodenversuch zur fangbedingten Schädigung

2.1. Hintergrund

Der repräsentative Fang von Fischen an wasserbaulichen Anlagen in Gewässern mit einem Abfluss $> 1 \text{ m}^3/\text{s}$ stellt derzeit noch eine große technische Herausforderung dar (DWA 2005). In der gewässerökologischen Praxis werden derzeit unterschiedliche Varianten an Fangmethoden, wie z.B. komplett angeschlagene Hamen, teilangeschlagene Hamennetze, Steertreusen oder Fangkörbe auf unterschiedliche Art und Weise (z.B. unterschiedliche Leerungsintervalle) angewandt. Wissenschaftlich begründete Standards zur Auswahl der passenden Fangmethodik gibt es jedoch nicht. Unterschiede in der Fangeffektivität, der fangbedingten Mortalität und fangbedingten Verletzungen zwischen den verschiedenen Techniken sind bislang unbekannt oder nicht wissenschaftlich belegt. In der internationalen Literatur gibt es bisher keine vergleichenden Untersuchungen zu netzbasierten Monitoringmethoden. Es fanden sich nur sehr wenige Publikationen, die sich auf quantitative Befischungen mit netzbasierten Methoden oder Telemetrie stützten (z.B. Dubois & Gloss 1993). Um in Zukunft die Anforderungen an das Monitoring von Wasserkraftanlagen nach wissenschaftlichen Standards besser erfüllen zu können, waren daher vergleichende Versuche zur Fangmethodik im Projekt vorgesehen. Diese Versuche wurden auf dem

Gelände des LS Aquatische Systembiologie in der Moosach durchgeführt (Pander et al. 2018). Die Gewässergröße der Moosach (Abfluss MQ 2,64 m³/s www.hnd.de, Auslassbreite ca. 2 m und Tiefe ca. 1 m) erlaubt auch bei der Beprobung des vollen Gewässerquerschnitts noch wissenschaftlich auswertbare Ergebnisse. Es wird davon ausgegangen, dass die Ergebnisse eines relativen Vergleichs von Fangeffektivität und netz- bzw. steertbedingten Schädigungsraten auch auf größere Gewässersysteme übertragbar sind. Die Übertragbarkeit wird zudem durch die Erhebung der Hamenschädigung an den einzelnen Kraftwerksstandorten des Projektes „Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen“ überprüft (siehe Bände 3–11).

Die Beschaffenheit der Fangeinrichtung am Ende des Hamens hat vermutlich einen großen Einfluss auf die Verletzungen der Fische (klassische Steertreue vs. Fangkasten). Darüber hinaus werden Fische im Steert vermutlich umso stärker geschädigt, je länger das Leerungsintervall bzw. ihre Verweildauer darin und je größer die Menge an Treibgut (Laub, Totholz, Pflanzenteile etc.) bzw. die Fischbiomasse (berechnet aus Länge und Korpulenzfaktor) ist. Die Menge an Treibgut steigt vor allem bei Hochwasser und im Herbst stark an. Auch kann sich die Zusammensetzung des Treibguts im Jahresverlauf erheblich verändern, insbesondere die Anteile von Totholz, Makrophyten und Laub. Gerade in diesen Zeiträumen kann auch eine erhöhte Wandertätigkeit von Fischen stattfinden (Pander et al. 2013). An Fischen, die Verletzungen wie z.B. großflächigen Schuppenverlust oder starke Flosseneinrisse durch die Fangeinrichtung erlitten haben, können zuvor entstandene anlagenbedingte Verletzungen eventuell nicht mehr zuverlässig differenziert werden. Um die tatsächlich durch die wasserbaulichen Anlagen entstandenen Verletzungen möglichst genau quantifizieren zu können, ist es daher wichtig, Verletzungen durch die Fangeinrichtung möglichst gering zu halten. Im Rahmen des Methodenvergleichs fanden daher verschiedene Versuchsdurchläufe statt, in denen die Schädigung (Mortalität und subletale Verletzungen) durch einen Hamen mit Steertreue bzw. mit Metallfangkasten bei verschiedenen Leerungsintervallen (1 h und 12 h), mit standardisierten Treibgutzugaben (standardisierte Mischung aus Laub, Reisig und Makrophyten) und Hamen mit unterschiedlich großer prozentualer Abdeckung des Gewässerquerschnitts (30% bzw. 50% Teilhamen und 100% Hamen) vergleichend analysiert wurde. Die Versuche wurden dazu in drei Versuchsblöcke eingeteilt (Abbildung 2). Der erste Versuchsblock beinhaltete den Vergleich der Schädigungsraten bei den verschiedenen Leerungsintervallen (1 h, 12 h), jeweils mit einer herkömmlichen Steertreue und einem Fangkasten. Der Versuchsblock 2 beschäftigte sich mit den Auswirkungen von unterschiedlichen Treibgutfrachten (ohne Treibgut, Treibgut, das einen Feinrechen bzw. einen Grobrechen passieren könnte) auf die fangbedingte

Schädigung. Der dritte Versuchsblock erfasste die Schädigung und die Fangeffektivität bei unterschiedlichen Hamengrößen (30%, 50% und 100% Abdeckung des Gewässerquerschnitts).

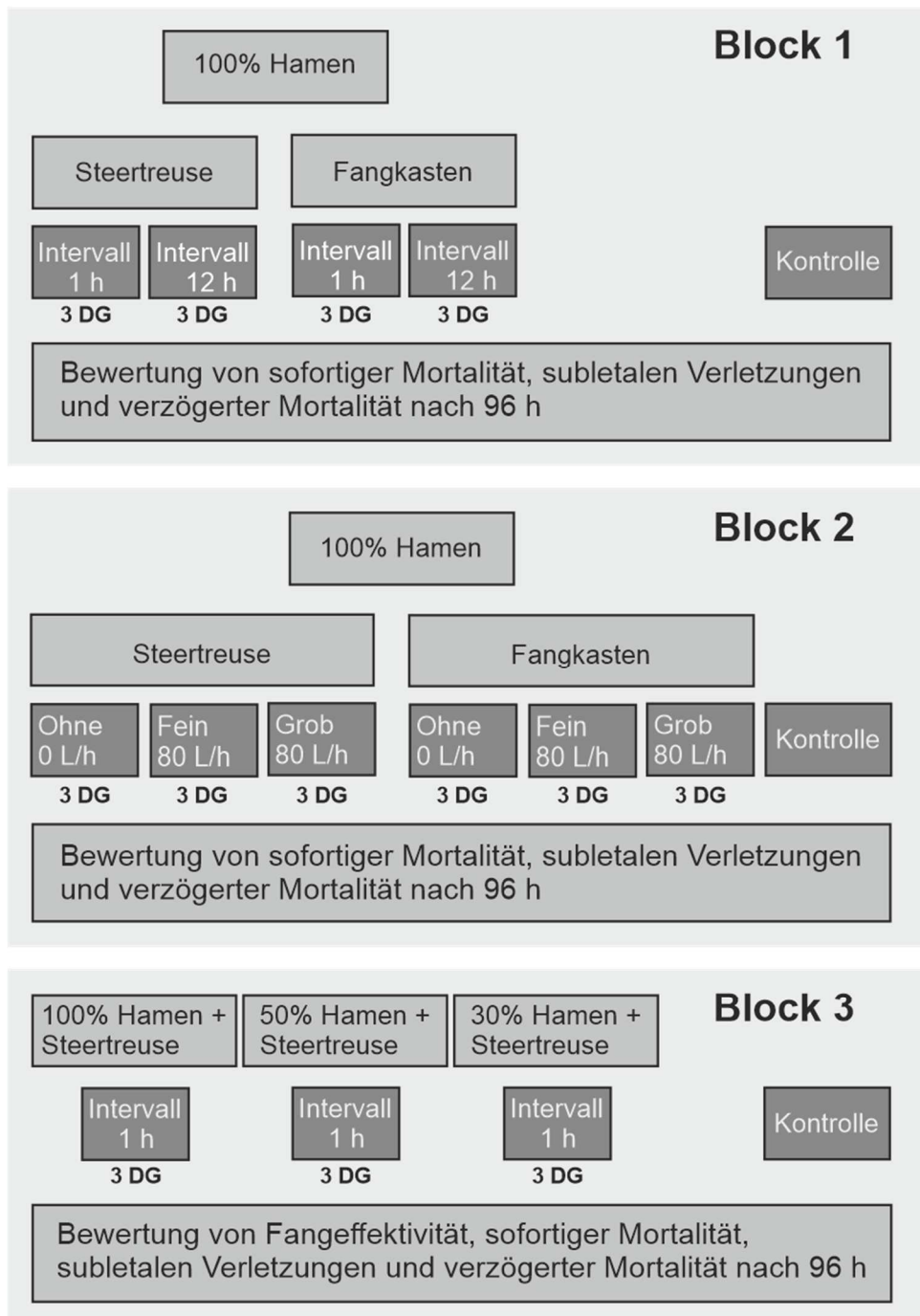


Abbildung 2 Schematische Darstellung des Versuchsdesigns beim Methodenversuch; 3 DG = jeweils 3 Durchgänge/Wiederholungen; Leerungsintervall in Block 2 und 3 = jeweils 1 Stunde. Abgeändert nach Pander et al. (2018).

2.2. Methoden

Für die standardisierten Versuche, die im Rahmen eines genehmigten Tierversuchs (ROB-55.2-2532.Vet_02-15-24) stattfanden, wurden die Fischarten Bachforelle, Huchen, Äsche, Barbe, Nase, Rotaugen und Flussbarsch ausgewählt. Die Auswahl der Versuchsfische wurde mit dem LfU Referat 54 abgestimmt und basierte auf der Referenzfischartenliste der Untersuchungsgewässer des Projekts, Unterschieden in der Anatomie der Fische (z.B. Körperform, Schuppen, Flossen), der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gebiete und der jeweiligen Verfügbarkeit der Arten zum Versuchszeitpunkt (siehe auch Band 1). Es ist davon auszugehen, dass sich die verschiedenen Fischarten untereinander in ihrer Anfälligkeit für fangbedingte Verletzungen unterscheiden. Aus Gründen der Logistik und des Verletzungsrisikos der Rundschupper durch Kammschupper (Flussbarsch) wurde die Fischart Flussbarsch immer getrennt von den anderen Arten beprobt. Insgesamt wurden maximal 309 Fische (103 Individuen x maximal 3 Fischarten) gleichzeitig zugegeben. Zur Kontrolle und zur Beobachtung der Fische wurde ein stationäres ARIS-Sonargerät am Wehreinlass angebracht. Grundsätzlich wurden die Versuchsfische in den jeweiligen Versuchsblöcken in das Oberwasser der Moosach eingebracht und im Unterwasser mit den unterschiedlichen Fangeinrichtungen wieder gefangen. Die Auswertung der Verletzungen erfolgte durch geschulte Mitarbeiter und die Verletzungen wurden in einem extra dafür entworfenen Protokollblatt dokumentiert (siehe Mueller et al. 2017 bzw. Band 1, Kapitel 6.2, Erfassen äußerlich sichtbarer Verletzungen; Abbildung 3). Anschließend wurden die Fische für 96 h gehältert, um eine eventuelle auftretende verzögerte Mortalität zu ermitteln. Als Referenz wurden Kontrollfische, die nicht in den Versuchen eingesetzt wurden, zu Versuchsbeginn sowie nach 96 h Hälterung mittels des Fischschädenprotokolls auf Vorschäden überprüft (Versuchsgruppe Vorschädigung). Die Versuche wurden in zwei Zeiträumen (21.05.2015–15.08.2015 und 07.10.2015–01.11.2015) durchgeführt. Tabelle 1 zeigt den detaillierten Ablauf über die zwei Zeiträume.

Tabelle 1 Ablauf der Fischzugaben für die Versuche zur Fangeffektivität am Standort Moosach/Freising im Projektjahr 2015 unterteilt nach den verschiedenen Versuchsgruppen und den einzelnen Versuchswochen.

Versuchsgruppe	Fangkasten		Steertreue		Teilhamen	Treibgutzugaben Fangkasten		Treibgutzugaben Steertreue	
	1 h	12 h	1 h	12 h		Feinrechen	Grobrechen	Feinrechen	Grobrechen
KW 21	Äsche, Huchen, Bachforelle (DG 1-3)		Äsche, Huchen, Bachforelle (DG 1-3)						
KW 25	Nase, Rotauge (DG 1-3)		Nase, Rotauge (DG 1-3)						
KW 26					Äsche, Huchen, Bachforelle (DG 1-3)				
					Nase, Rotauge (DG 1-3)				
KW 28				Äsche, Huchen, Bachforelle (DG 1-3)					
KW 30		Äsche, Huchen, Bachforelle (DG 1-3)							
KW 31							Äsche, Huchen, Bachforelle (DG 1-3)		Äsche, Huchen, Bachforelle (DG 1-3)
KW 33						Äsche, Huchen, Bachforelle (DG 1-3)		Äsche, Huchen, Bachforelle (DG 1-3)	
KW 41	Barbe (DG 1-3)		Barbe (DG 1-3)						
	Fluss- barsch (DG 1-3)	Fluss- barsch (DG 1)	Fluss- barsch (DG 1-3)	Fluss- barsch (DG 1)					
KW 42		Barbe, Nase, Rotauge (DG 1-2)		Barbe, Nase, Rotauge (DG 1-2)		Barbe, Nase, Rotauge (DG 1-3)	Nase, Rotauge (DG 1-3)	Barbe, Nase, Rotauge (DG 1-3)	Nase, Rotauge (DG 1-3)
		Fluss- barsch (DG 2)		Fluss- barsch (DG 2)		Barbe (DG 1-3)	Barbe (DG 1-3)	Barbe (DG 1-3)	Barbe (DG 1-3)
		Barbe, Nase, Rotauge (DG 3)		Fluss- barsch (DG 3)		Fluss- barsch (DG 1-3)	Fluss- barsch (DG 1-3)	Fluss- barsch (DG 1-3)	Fluss- barsch (DG 1-3)
KW43		Fluss- barsch (DG 3)							
KW 44				Barbe, Nase, Rotauge (DG 3)	Barbe (DG 1-3)				Fluss- barsch (DG 1-3)



Abbildung 3 Links: Sortieren der Versuchsfische nach Arten; Rechts: Auswertung und Dokumentation der Fischverletzungen.

2.2.1. Fangeinrichtungen

Die Hamenbefischung mittels Steertreue und Fangkasten basiert auf einem trichterförmigen Multimaschennetzsystem (Maschenweiten: 30 mm, 20 mm, 15 mm, 10 mm), welches an einem Metallrahmen (220 cm x 120 cm) befestigt ist (Abbildung 4, Tabelle 2). Der Rahmen des Hamennetzes wurde mittels Hebezug direkt hinter dem Wehrauslass in eine U-förmige Stahlschiene eingelassen. In Versuchsblock 3 wurde die Fangeffektivität des Hamens bei einer geringeren Gewässerabdeckung untersucht. Hierfür wurde ein Hamen, welcher nur die Hälfte (50%) bzw. ein Drittel (30%) des Abstiegskorridors abdeckt, an die jeweiligen Rahmen angeschlagen (Abbildung 5). Ein 50%-Hamen (120 cm x 97 cm) und ein 30%-Hamen (120 cm x 77 cm) wurden eigens für diesen Versuch konstruiert. Das knotenlose Netz der Teilhamen und der Reuse war, abgesehen von der Öffnungsweite, baugleich mit dem des 100%-Hamens.

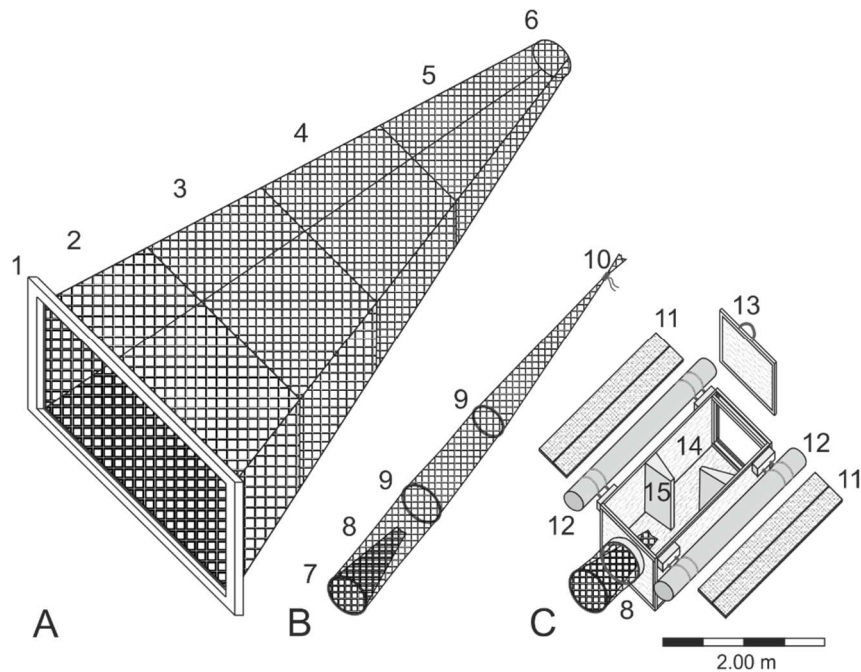


Abbildung 4 Schematische Darstellung eines am Turbinenauslauf angebrachten Fanghamens mit abnehmender Maschenweite, Steertreuse und Fangkasten. A: Fanghamen mit 1 = rechteckig gestricktes Netz befestigt an einem Metallrahmen. Jede Masche des Fanghamens wurde an den Metallrahmen angestrickt; 2 = Netzfeld mit einer Maschenweite von 30 mm; 3 = Netzfeld mit einer Maschenweite von 20 mm; 4 = Netzfeld mit einer Maschenweite von 15 mm; 5 = Netzfeld mit einer Maschenweite von 10 mm; 6 = Edelstahlring an welchem die Steertreuse oder der Fangkasten angestrickt wird. B: Steertreuse (Maschenweite 8 mm) mit 7 = Edelstahlring welcher an den passenden Ring am Fanghamen angebracht wird; 8 = trichterförmige Netzkehle; 9 = Edelstahlringe; 10 = Schnur zum Schließen der Steertreuse. C: Fangkasten mit 11 = aufklappbare Abdeckung; 12 = Schwimmkörper; 13 = hinterer Verschluss; 14 = Stahlblechkörper der Box; 15 = Strömunglenker. Abgeändert nach Pander et al. (2018).



Abbildung 5 Stahlrahmen mit angeschlagenem Hamennetz; 50% Hamen (links stehend), 30% Hamen (rechts stehend) und 100% Hamen am Standort Moosach/Freising.

Zusätzlich zur herkömmlichen Fangmethodik mittels Steertreuse wurde ein Fangkasten genutzt, dessen potenzielle Vor- bzw. Nachteile in Bezug auf die fangbedingten Schädigungsraten der Fische ermittelt werden sollten. Erstmals wurde diese Fangeinrichtung von Lagarrigue et al. (2008) konzipiert und im Monitoring von Lachs-Smolts an Wasserkraftanlagen erprobt. Der Fangkasten besteht aus einem quaderförmigen Gestell aus Aluminium, welches mit Lochblechen (Langloch 5 mm x 20 mm, Jaera GmbH & Co. KG, Laatzen, Deutschland) verkleidet wurde. Nach oben ist der Fangkasten offen und kann durch eine faltbare Holzkonstruktion mit Schattiermatten geschlossen werden. Für Verhaltensbeobachtungen ist auf der Innenseite der Abdeckungen eine Vorrichtung zur Aufnahme von zwei GoPro Kameras (GoPro Hero Version 3 und 4) angebracht. In dem Fangkasten wurden zwei dreieckige Strömungsbrecher eingebaut, um strömungsberuhigte Bereiche zu erzeugen. Damit sich der faltbare Deckel des Fangkastens über der Wasseroberfläche befindet, wurden an den langen Seiten jeweils ein abgedichtetes KG-Rohr (\varnothing 21 cm) als Auftriebskörper befestigt. In den Eingang des Fangkastens (\varnothing 60 cm) wurde eine Netzkehle eingearbeitet, welche die Fische im Fangkasten daran hindern soll, wieder aus diesem zu entkommen. Diese Netzkehle ist baugleich mit der Kehle der Steertreuse. Der Fangkasten wurde am Endring des Hamennetzes mit Kabelbindern fixiert und mithilfe von Keschern von einem Boot (Honda T38-IE2 3,8 m, Honda Deutschland, Frankfurt) aus geleert (Abbildung 6).



Abbildung 6 Leerung des sich im Wasser befindlichen Fangkastens mit Keschern.

Tabelle 2 Technische Daten der verwendeten Fangeinrichtungen.

Abstiegskorridor	Fangeinrichtung	Abmessungen/Materialeigenschaften
Wehrüberfall	100% Hamen	Metallrahmenkonstruktion Rahmen: L x H: 2,20 m x 1,20 m, Vierkantrohr: 40/80/5 mm, umlaufende Relling: Ø 12 mm, Fanghamen: Länge 8 m, Endring: Ø 60 cm, Maschenweiten: 30 mm, 20 mm, 15 mm, 10 mm, Steertreuse: Länge 5,50 m, Maschenweite 8 mm, 3 Niro Ringe Ø 60-50 cm
Wehrüberfall	50% Hamen	Metallrahmenkonstruktion Rahmen: L x H: 1,08 m x 1,20 m, Vierkantrohr: 40/80/5 mm, umlaufende Relling: Ø 12 mm, Fanghamen: Länge 8 m, Endring: Ø 60 cm, Maschenweiten: 30 mm, 20 mm, 15 mm, 10 mm, Steertreuse: Länge 5,50 m, Maschenweite 8 mm, 3 Niro Ringe Ø 60-50 cm
Wehrüberfall	30% Hamen	Metallrahmenkonstruktion Rahmen: L x H: 0,77 m x 1,20 m, Vierkantrohr: 40/80/5 mm, umlaufende Relling: Ø 12 mm, Fanghamen: Länge 8 m, Endring: Ø 60 cm, Maschenweiten: 30 mm, 20 mm, 15 mm, 10 mm, Steertreuse: Länge 5,50 m, Maschenweite 8 mm, 3 Niro Ringe Ø 60-50 cm

2.2.2. Treibgutmischungen

Um die Effekte von Treibgut auf die Fischschädigung quantifizieren zu können, wurden standardisierte Treibgutmischungen während der Versuchsblöcke zugegeben. Da an den Wasserkraftanlagen der Projektstandorte sowohl Feinrechen als auch Grobrechen installiert sind, wurden zwei Treibgutmischungen unterschiedlich grober Zusammensetzung verwendet. Für Feinrechen wurde eine Mischung aus gehäckseltem Laub, Makrophyten und schmalen Ästen erstellt. Bei der gröberen Mischung wurden zusätzlich verschiedene stärkere Äste zugesetzt. Es wurden jeweils 80 L der entsprechenden Treibgutmenge gleichmäßig über das Leerungsintervall von 1 h zugegeben. Natürlicherweise betrug das Treibgutaufkommen 5–10 L. Die Versuchsdurchgänge ohne Treibgutzugabe aus Versuchsblock 1 dienten dabei als Vergleichsgruppe.

2.2.3. Hälterungssystem

Zur Bestimmung einer potenziellen, durch den Fang der Fische bedingten, verzögerten Mortalität wurden insgesamt 20 Langstromrinnen (siehe Band 1) aufgebaut. Zusätzlich wurden vier Rundbecken vom LfU, Dienststelle Wielenbach zur Verfügung gestellt, die zum Vorhalten der Versuchsfische genutzt wurden. Das Hälterungssystem befand sich auf der orografisch rechten Seite der Moosach auf dem Innenhof des Lehrstuhls für Aquatische Systembiologie. Das Wasser wurde mithilfe einer auf Dauerlast ausgelegten Tauchmotorpumpe (siehe Band 1) gefördert. Die Tiere wurden bereits einige Tage vor dem Versuchsbeginn angeliefert, wodurch eine Akklimatisierung an den Wasserchemismus der Moosach sichergestellt war. Zusätzlich wurden Schutzmaßnahmen gegen erhöhte

Lichteinstrahlung, Schmutzeintrag und mögliche Fressfeinde ergriffen, indem die Rinnen mit einer mit Schattiermatten bespannten Holzkonstruktion abgedeckt wurden.

2.2.4. Datenanalyse und Statistik

Um die Mindestanzahl an einzusetzenden Versuchsfischen ermitteln zu können, wurde eine Poweranalyse, welche auf einem Verhältnistest (Proportion-Test) basiert, im Statistikprogramm R (R Core Team 2015) durchgeführt. Für die Ermittlung der fangbedingten Mortalität wurde eine geringe Effektstärke nach Cohen (1992) angenommen. Das Signifikanzniveau wurde auf 5% und die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler 2. Art auf 20% festgelegt. Zusätzlich wurde mit einem Sicherheitsfaktor von 5% kalkuliert und es wurde eine Wiederfangrate von 77% angenommen. Diese Werte wurden anhand der bisherigen Studien von Schneider et al. (2012) und Lagarrigue & Frey (2010) geschätzt. Die Poweranalyse ergab eine Anzahl von 309 einzusetzenden Fischen pro Art und Versuchsgruppe (siehe Band 1, Kapitel 6.13). Damit sich nicht zu viele Fische gleichzeitig in der Fangeinrichtung befinden, wurden die 309 Fische in drei Durchgängen mit jeweils 103 Fischen je Art und Versuchsgruppe beprobt. Die daraus resultierende größere Anzahl an Wiederholungen ermöglicht eine statistisch fundierte Auswertung der Ergebnisse. Insgesamt wurden von Mai bis November 2015 19.920 Fische (einschließlich 1.752 Kontrollfische) der sieben Versuchsfischarten für den Methodenversuch an der Moosach eingesetzt. Die Wiederfangraten und die Mortalitätsraten wurden mittels Proportion-Test auf signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen geprüft. Die Unterschiede in Anzahl und Intensität der Fischverletzungen wurden mit einem paarweisen Mann-Whitney-U-Test mit Bonferroni Korrektur auf Signifikanz geprüft. Eine multivariate Auswertung der Verletzungsmuster erfolgte mittels ANOSIM und SIMPER Analysen. Zur Bestimmung der für die fangbedingte Mortalität maßgeblich verantwortlichen Einflussfaktoren wurde ein lineares Modell (Funktion „lm“ in R, R Core Team 2015) herangezogen, welches die drei Faktoren Fischart, Fangeinrichtung und Leerungsintervall mit allen gemessenen Variablen (Fischkondition (mittlere Vitalität der Kontrollfische nach 96 h Hälterung), Fischbiomasse in der Fangeinrichtung, Treibgutmenge in der Fangeinrichtung, Wassertemperatur, Strömungsgeschwindigkeit am Hameneingang, Strömungsgeschwindigkeit entlang des Hamens, Strömungsgeschwindigkeit in der Fangeinrichtung, Strömungsgeschwindigkeit im Oberwasser und Abfluss) in Bezug setzt. Dieses Modell wurde sowohl für die Daten aller Fischarten gemeinsam als auch für jede einzelne Fischart separat angewandt. Um das Modell zu bestimmen, welches die fangbedingte Mortalität am besten erklärt, wurde das

Modell mit einer schrittweisen Modellselektion (Funktion „StepAIC“ im R-Paket MASS; Ripley et al. 2013) vereinfacht.

2.3. Ergebnisse & Diskussion

Im Zusammenhang mit der weltweiten Ausweitung der Wasserkraftnutzung gewinnt das Monitoring von kraftwerksbedingten Fischverletzungen zunehmend an Bedeutung. In dieser Studie konnten erstmals systematisch verschiedene Fangeinrichtungen und die daraus resultierenden methodisch bedingten Verletzungen von Fischen untersucht werden. Die fangbedingte Mortalitätsrate und die aufgetretenen Fischverletzungen weisen auf einen eindeutigen und teilweise sehr großen Einfluss der Fangmethodik hin. Da dieser Einfluss bei den meisten bisherigen Monitoringstudien an Wasserkraftanlagen nicht berücksichtigt wurde, sollen die vorliegenden Ergebnisse dieser Untersuchung zu einer breit geführten Diskussion über die gängige Vorgehensweise beim fangbasierten Fischmonitoring in der Praxis anregen. Für empfindliche Arten wie z.B. die Äsche wurden in dieser Studie fangbedingte Mortalitätsraten von mehr als 80% beobachtet, die durch verschiedene Faktoren beeinflusst wurden. So spielten unter anderem das sich über die Expositionsdauer in der Fangeinrichtung ansammelnde Treibgut sowie die Biomasse der Fische in der Fangeinrichtung und hohe Strömungsgeschwindigkeiten während der Versuche eine wichtige Rolle. Bei einer derart hohen fangbedingten Mortalität ist eine Unterscheidung zwischen fangbedingter und turbinenbedingter Mortalität und eine exakte Quantifizierung letzterer stark erschwert. Folglich stellen die Ergebnisse dieses Versuchs die Erkenntnisse bisheriger Arbeiten in Frage, die auf netzbasierten Fangmethoden ohne Kontrollgruppe basieren und überdurchschnittlich hohe Mortalitätsraten für bestimmte Wasserkraftturbinen angeben.

Zusätzlich zu den fangbedingten Verletzungen ist es unerlässlich, auch die Vorschädigung der Fische in die Bewertung von Wasserkraftanlagen und deren fischschädigendem Einfluss mit einzubeziehen. Da fangbedingte und anlagenbedingte Fischverletzungen den Vorschädigungen (z.B. Schuppenverluste, Flosseneinrisse, Quetschungen sowie verschiedene Arten von Amputationen), welche bei der Fischeaufzucht und dem anschließenden Transport entstehen können, sehr ähnlich sind, müssen Vorschädigungen in einem Wasserkraftmonitoring genau quantifiziert werden. Studien, bei denen keine Daten zur Vorschädigung und zur fangbedingten Schädigung erhoben wurden, überschätzen vermutlich die anlagenbedingte Mortalität bislang (Dubois & Gloss 1993, Scruton et al. 2008, Calles & Greenberg 2009, Calles et al. 2010, Matk 2012, Stich et al. 2014, Schmalz et al. 2015).

2.3.1. Fangeffektivität

Die Fangeffektivität der verschiedenen Fangeinrichtungen ist eine wichtige Eingangsvoraussetzung, um wissenschaftlich fundierte Studien zum Fischabstieg und den Einflüssen der Wasserkraft auf Fischpopulationen durchzuführen. Insgesamt wurden 12.152 von 18.168 eingesetzten Fischen wiedergefangen und auf ihre Verletzungen hin untersucht. Daraus ergab sich über alle Fischarten eine allgemeine mittlere Wiederfangrate von 67%. Bei den Versuchen mit einem den Gewässerquerschnitt vollständig abdeckenden Hamen (100% Hamen) betrug die mittlere Wiederfangrate 71%. Für den 50% Teilhamen lag die mittlere Wiederfangrate bei 48% und für den 30% Teilhamen bei 32% (Abbildung 7).

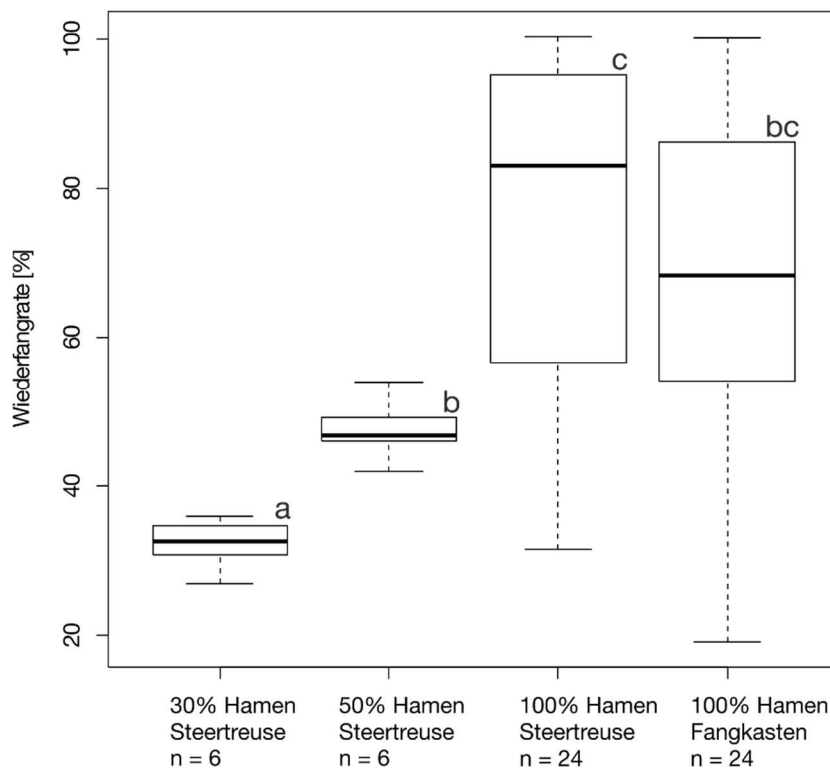


Abbildung 7 Box-Whisker Plot der Wiederfangrate pro 1 h Leerungsintervall unterteilt nach den verschiedenen Fangeinrichtungen. Box: 25% Quantil, Median, 75% Quantil; Whisker: Minima und Maxima; verschiedene Kleinbuchstaben oberhalb der Box zeigen signifikante Unterschiede (paarweiser Mann-Whitney-U-Test); n = Anzahl der Versuchsdurchgänge. Abgeändert nach Pander et al. (2018).

Mithilfe statistischer Testverfahren (hier: Chi²-Test) kann überprüft werden, ob die beobachteten Wiederfangraten von den aufgrund der Hamengröße bei einer passiven Verteilung der Fische ohne aktive Schwimmbewegungen zu erwartenden Wiederfangrate (Erwartungswert) abweichen. Der Erwartungswert entspricht hier der prozentualen Abdeckung des Gewässerquerschnitts der jeweiligen Fangeinrichtung. Die Wiederfangraten der beiden Teilhamen wiesen keine signifikante Abweichung von den Erwartungswerten (30% und 50%) auf (Chi²-Test: d.f. = 5, $P > 0,05$). Die Wiederfangraten der Fische bei einem 100% Hamen und einem Leerungsintervall von einer Stunde unterschied sich jedoch höchst

signifikant vom Erwartungswert von 100% (Chi²-Test: d.f. = 23, $P < 0,001$), unabhängig davon ob die Steertreue oder der Fangkasten verwendet wurde.

Tabelle 3 Mittlere Wiederfangraten für alle Versuchsfischarten; SR 30% = Steertreue mit 30% Hamen; SR 50% = Steertreue mit 50% Hamen; SR = Steertreue mit 100% Hamen; FK = Fangkasten mit 100% Hamen; *, **, *** = Signifikanzniveau des Chi²-Tests: * = $P < 0,05$, ** = $P < 0,01$, *** = $P < 0,001$; unterschiedliche Kleinbuchstaben (a, b, c, d) symbolisieren signifikante Unterschiede zwischen den Fangeinrichtungen und unterschiedliche Großbuchstaben (A, B) symbolisieren signifikante Unterschiede zwischen dem 1 h und 12 h Leerungsintervall (Proportion-Test bzw. paarweiser Proportion-Test); Betrachtungsweise jeweils innerhalb einer Fischart bzw. über alle Arten. Anzahl der wiedergefangenen Individuen und der Versuchsdurchgänge je Versuchsgruppe siehe Tabelle 8 (im Anhang). Abgeändert nach Pander et al. (2018).

		Wiederfangrate in %			
		SR 30%	SR 50%	FK	SR
Barbe	1 h	26,0 ^a	44,7 ^b	47,4 ^{bA***}	43,5 ^{bA***}
	12 h			73,1 ^{aB}	57,8 ^{bB***}
Nase	1 h	30,0 ^{a***}	49,3 ^b	60,3 ^{bA***}	85,4 ^{cA***}
	12 h			95,8 ^{aB}	43,0 ^{bB***}
Huchen	1 h	33,3 ^a	40,7 ^a	86,0 ^{bA**}	84,9 ^{bA**}
	12 h			92,9 ^{aB}	58,6 ^{bB*}
Flussbarsch	1 h	38,7 ^a	50,0 ^a	67,5 ^{bA***}	94,2 ^{cA}
	12 h			88,3 ^{B***}	90,3 ^B
Rotaugen	1 h	32,7 ^a	58,0 ^b	91,4 ^c	91,8 ^{cA***}
	12 h			92,9 ^a	84,8 ^{bB***}
Bachforelle	1 h	35,3 ^a	42,0 ^{ab}	51,3 ^{bc***}	55,2 ^{cA***}
	12 h			50,5 ^{a***}	26,2 ^{bB**}
Äsche	1 h	30,0 ^a	48,0 ^b	60,8 ^{c***}	53,3 ^{dA***}
	12 h			66,3 ^a	93,5 ^{bB}
Alle Arten	1 h	32,3 ^a	47,5 ^b	67,3 ^{cA***}	73,0 ^{dA***}
	12 h			80,0 ^{aB***}	65,2 ^{bB***}

Bei einem Leerungsintervall von einer Stunde wurden über alle Arten hinweg in der Steertreue signifikant mehr Fische gefangen als im Fangkasten (Proportion-Test: $X^2 = 45,1$; d.f. = 1; $P < 0,001$; Tabelle 3). Bei einem Leerungsintervall von 12 h wurden dagegen über alle Arten im Fangkasten signifikant mehr Fische gefangen als in der Steertreue (Proportion-Test: $X^2 = 115,0$; d.f. = 1; $P < 0,001$, Tabelle 3).

Betrachtet man die Wiederfangraten auf Artebene, lassen sich große Unterschiede zwischen den Arten und innerhalb der Arten jeweils zwischen den Fangeinrichtungen und den Leerungsintervallen erkennen (Tabelle 3). Während Fische der Arten Flussbarsch und Rotaugen am häufigsten wiedergefangen wurden, wurden für Barben und Bachforellen

deutlich geringere Wiederfangraten ermittelt. Bei den Fischarten Huchen, Bachforelle und Nase war die Wiederfangrate in der Steertreue beim 12 h Leerungsintervall wesentlich geringer als beim 1 h Leerungsintervall. Betrachtet man allerdings die Wiederfangraten dieser drei Arten im Fangkasten, wurden beim 12 h Leerungsintervall in etwa gleich viele oder teilweise sogar mehr Fische wiedergefangen als beim 1 h Leerungsintervall (Tabelle 3). Ähnlich verhielt es sich für Barben und Rotaugen, allerdings mit einer geringeren Differenz zwischen den Wiederfangraten im Fangkasten und in der Steertreue. Im Gegensatz dazu wurden Äschen in der Steertreue bei einem Leerungsintervall von 12 Stunden in einer wesentlich höheren Anzahl wiedergefangen als im Fangkasten (Tabelle 3).

Artspezifisch betrachtet unterschieden sich die Wiederfangraten der Teilhamen nur für die Nasen signifikant von den Erwartungswerten. Für den 30% Hamen wich die Wiederfangrate aufgrund der Variabilität zwischen den drei Wiederholungsdurchgängen signifikant vom Erwartungswert ab (Chi²-Test: $X^2 = 9,87$, d.f. = 2, $P < 0,01$), obwohl sich im Mittel über die drei Durchgänge exakt 30% ergeben (Tabelle 3, Wiederfangraten aus den Wiederholungsdurchgängen: 44%, 22% und 24%).

In den Ergebnissen zeigte sich, dass die tatsächliche Fangeffektivität bei einem den Gewässerquerschnitt zu 100% abdeckenden Hamen unter Einbeziehung aller Fischarten, gegenüber der zu erwartenden Fangeffektivität signifikant reduziert war. Dies lässt darauf schließen, dass nicht alle eingesetzten Fische auch tatsächlich abgestiegen sind oder einige auch nach dem Abstieg wieder aus der Fangeinrichtung entkommen konnten. Dieser Effekt ist stark von der jeweiligen Fischart abhängig. So wurden Fischarten, welche an eine starke Strömung angepasst sind, wie Äsche, Bachforelle und Barbe, in einer wesentlich geringeren Anzahl wiedergefangen, als weniger strömungsliebende Arten wie Rotauge und Flussbarsch. Da die Fische mit der geringsten Körpergröße im Versuch (Rotauge und Flussbarsch) in vergleichsweise hoher Anzahl wiedergefangen wurden, ist der Effekt des Entkommens durch die größeren Maschen am Beginn des Hamens zumindest für diese Arten von untergeordneter Bedeutung. Die Unterschiede in der Fangeffektivität zwischen dem 100% Hamen und den Teilhamen, welche proportional zur Hamengröße mehr Fische gefangen haben, könnten theoretisch auch daher rühren, dass die Versuche mit den Teilhamen zeitlich sehr nah nach den Versuchen mit dem 100% Hamen durchgeführt wurden und sich bis zur Durchführung der Teilhamenversuche bereits sehr viele Fische im Oberwasser gesammelt hatten, die während der Versuche mit dem 100% Hamen nicht sofort abgestiegen waren. Diese zeitliche Abfolge trifft aber nicht für Nase und Rotauge zu (siehe Tabelle 1), bei denen trotzdem für die Teilhamen eine wesentlich höhere Übereinstimmung mit dem Erwartungswert beobachtet wurde als für den 100% Hamen (Tabelle 3). Da bekannt ist, dass Fische grundsätzlich die Hauptströmung im Gewässer als

Schwimmkorridor nutzen (Pavlov et al. 2002, Enders et al. 2009, Ebel 2013), können die proportional höheren Wiederfangraten der Teilhamen wahrscheinlich auf deren Platzierung in der Mitte des Wehrauslasses mit der höchsten Strömungsgeschwindigkeit zurückgeführt werden. Teilhamen können alternativ genutzt werden, wenn nicht alle wandernden Fische gefangen werden müssen, sondern es ausreichend ist, das Artenspektrum des natürlichen Fischabstiegs zu detektieren. Vor allem in großen Flüssen mit einem Abfluss von mehr als $100 \text{ m}^3/\text{s}$, bei denen der Einsatz von 100% Hamen technisch annähernd unmöglich ist (Naumann et al. 2016), können die Teilhamen eine alternative Möglichkeit zur Beprobung darstellen (Hadderingh & Bakker 1998, Ebel 2013, Schmalz et al. 2015).

Abgesehen von der Größe des Hamens und der Fischart hatten die Art der Fangeinrichtung und das Leerungsintervall den größten Einfluss auf die Fangeffektivität. Bei einem Leerungsintervall von 12 Stunden traten sowohl sehr niedrige als auch sehr hohe Wiederfangraten auf. Ein stark reduzierter Wiederfang bei der Steertreue im Vergleich zum Fangkasten könnte unter anderem auf ein Entkommen schwimmstärkerer Fische (Huchen, Bachforelle und Nase) zurückgeführt werden. Zeitweise wurde die Reusenkehle des Fangkastens mittels Videobeobachtung überwacht und es konnten aktiv ausschwimmende Fische vor allem der schwimmstarken Fischarten nachgewiesen werden. Aber auch höhere Wiederfangraten bei den Versuchen mit einem Leerungsintervall von 12 Stunden, wie bei der empfindlichen Art Äsche beobachtet, können durch fangbedingte letale Verletzungen, welche das aktive Flüchten verhindern, hervorgerufen werden. Dieser Effekt kann allerdings auch durch einen zeitlich verzögerten Abstieg der Versuchsfische innerhalb des 12 Stunden Leerungsintervalls überlagert werden, was zu einer höheren Fangeffektivität nach 12 Stunden im Vergleich zum einstündigen Leerungsintervall führte. Dieser Effekt konnte insbesondere für die Barbe beobachtet werden. Die Fangeffektivität ist demzufolge stark von der Fischart und der jeweiligen Kondition der gefangenen Fische abhängig. Auch bei Versuchen an Wasserkraftwerken wird erwartet, dass das Spektrum an gefangenen Fischarten sehr variabel ist und die einzelnen Individuen unterschiedliche Konditionen aufweisen. Hieraus ergeben sich folglich Effekte auf die Fangeffektivität der Hamen und es kann davon ausgegangen werden, dass das Verhältnis vitaler Fische und stark geschädigter Fische im Fang bei längeren Leerungsintervallen nicht mehr repräsentativ ist.

2.3.2. Sofortige Mortalität

Durch den Fang mit den getesteten Fangeinrichtungen und Leerungsintervallen kam es sowohl zu letalen als auch zu subletalen Verletzungen der Versuchsfische. Über alle Fischarten, Fangmethoden und Leerungsintervalle gemittelt ergab sich eine sofortige Mortalitätsrate von 10%.

Die sofortige Mortalität war stark von der Fischart, der Fangeinrichtung und dem Leerungsintervall abhängig. Über alle Fischarten hinweg wurde für den Fang mit der Steertreue eine höhere Mortalitätsrate gegenüber dem Fang mittels Fangkasten ermittelt (1 Stunde: 1,8-fach höher, 12 Stunden: 2,9-fach höher, Tabelle 4). Bei einzelner Betrachtung der Fischarten war die Mortalität der Fischart Huchen allerdings im Fangkasten mehr als doppelt so hoch wie in der Steertreue. In den Teilhamen wurde nur bei der Fischart Äsche eine Mortalität beobachtet. Für die Arten Rotauge und Nase konnten die Versuchsfische aus den Teilhamen nicht für eine Bewertung der Fischschädigung verwendet werden, da hohe Biomassen im Steert aufgrund der zeitgleich zugegebenen größeren Salmoniden zu einer erhöhten Mortalität geführt haben. Die weiteren vier Versuchsfischarten wurden daher separat zugegeben und wiesen keine sofortige Mortalität nach den Versuchen auf. Über alle Fischarten hinweg ergab sich für Fische, die in der Steertreue gefangen wurden, eine signifikant geringere Mortalitätsrate bei einem Leerungsintervall von einer Stunde als bei einem Leerungsintervall von 12 Stunden (Proportion-Test: $X^2 = 1295,9$; d.f. = 1; $P < 0,001$). Die Mortalität war bei 12-stündigem Leerungsintervall im Vergleich zum einstündigen Leerungsintervall bis zu 150-fach erhöht (siehe Flussbarsch, Tabelle 4). Die höchste Mortalität ergab sich für Äschen, die bei einem Leerungsintervall von 12 Stunden in der Steertreue gefangen wurden (84% Mortalitätsrate, Tabelle 4). Bei im Fangkasten gefangenen Barben, Flussbarschen und Bachforellen war die Mortalität beim 12-stündigen Leerungsintervall im Vergleich zum einstündigen Leerungsintervall ebenfalls erhöht, allerdings war kein statistisch signifikanter Unterschied nachweisbar. Die höchste Mortalitätsrate im Fangkasten wurde beim Huchen beim 12-stündigen Leerungsintervall festgestellt (Tabelle 4).

Tabelle 4 Mittlere sofortige Mortalitätsrate für alle Versuchsfischarten; SR 30% = Steertreue mit 30% Hamen; SR 50% = Steertreue mit 50% Hamen; SR = Steertreue mit 100% Hamen; FK = Fangkasten mit 100% Hamen; unterschiedliche Kleinbuchstaben (a, b, c) symbolisieren signifikante Unterschiede zwischen den Fangeinrichtungen und unterschiedliche Großbuchstaben (A, B) symbolisieren signifikante Unterschiede zwischen dem 1 h und 12 h Leerungsintervall (Proportion-Test bzw. paarweiser Proportion-Test); Betrachtungsweise jeweils innerhalb einer Fischart bzw. über alle Arten. Anzahl der ausgewerteten Individuen und der Versuchsdurchgänge je Versuchsgruppe siehe Tabelle 8 (im Anhang). Abgeändert nach Pander et al. (2018).

		Sofortige Mortalitätsrate in %			
		SR 30%	SR 50%	FK	SR
Barbe	1 h	0,0	0,0	1,4	0,0 ^A
	12 h			3,1 ^a	35,3 ^{bB}
Nase	1 h	-	-	7,3 ^{aA}	1,0 ^{bA}
	12 h			14,9 ^{aB}	54,9 ^{bB}
Huchen	1 h	0,0	0,0	1,1 ^A	4,1 ^A
	12 h			44,9 ^{aB}	18,8 ^{bB}
Flussbarsch	1 h	0,0	0,0	1,0	0,2 ^A
	12 h			3,3 ^a	30,1 ^{bB}
Rotauge	1 h	-	-	1,2 ^A	2,6 ^A
	12 h			16,7 ^{aB}	28,2 ^{bB}
Bachforelle	1 h	0,0	0,0	1,1	2,1 ^A
	12 h			1,9 ^a	34,6 ^{bB}
Äsche	1 h	0,0 ^a	1,4 ^a	4,3 ^{aA}	23,3 ^{bA}
	12 h			8,8 ^{aB}	84,4 ^{bB}
Alle Arten	1 h	0,0 ^a	0,2 ^a	2,5 ^{bA}	4,4 ^{cA}
	12 h			14,9 ^{aB}	43,1 ^{bB}

Das Leerungsintervall wurde folglich als der entscheidende Faktor bei der fangbedingten Mortalität und den subletalen Verletzungen für Fische identifiziert. Dieses Ergebnis war zu erwarten, wenn man in Betracht zieht, dass Fische mehr und schwerere Verletzungen aufweisen, je länger sie einem Stressfaktor ausgeliefert sind. Werden Fische in der Fangeinrichtung beispielsweise länger einer hohen Strömungsgeschwindigkeit ausgesetzt, wie in der Steertreue beobachtet, können sie auf die Dauer ermüden und werden deshalb leichter gegen das Fangnetz gedrückt (Taeubert & Geist 2013). Des Weiteren sammelt sich über einen längeren Zeitraum in der Fangeinrichtung auch vermehrt Treibgut und Fischbiomasse an, was wiederum zu zusätzlichen und stärkeren Verletzungen und somit einer höheren Mortalität führen kann. Es ist deshalb von zentraler Bedeutung, das Leerungsintervall so kurz wie möglich zu halten, da im Versuch lange Leerungsintervalle zu einer stark erhöhten Mortalität und intensiveren Verletzungen führten.

2.3.3. Verzögerte Mortalität

Nach 96 Stunden Hälterung wiesen die Versuchsfische insgesamt (d.h. gemittelt über alle Fischarten, Fangmethoden und Leerungsintervalle) eine verzögerte Mortalitätsrate von 11,8% auf, wobei die verzögerte Mortalität der unter gleichen Bedingungen gehälterten Kontrollfische (Gruppe Vorschädigung) mit 8,1% in einem ähnlichen Größenbereich lag. Ebenso wie die sofortige Mortalität war die verzögerte Mortalität stark von der jeweiligen Fischart, Fangeinrichtung und vom Leerungsintervall abhängig. Die verzögerte Mortalität der drei getesteten Salmoniden aus den 12 Stunden Leerungsintervallen beider Fangeinrichtungen war teilweise sehr hoch (Äsche im Fangkasten 79%; Huchen in der Steertreuse 61%; Bachforelle im Fangkasten 45%). Allerdings war bei den drei Salmonidenarten auch die verzögerte Mortalität der jeweiligen Kontrollfische sehr hoch. So starben beispielsweise auch 43,5% der Kontroll-Huchen während der 96 h Hälterung (Tabelle 5).

Tabelle 5 Mittlere verzögerte Mortalitätsrate für alle Versuchsfischarten basierend auf der Anzahl wiedergefangener Fische; SR 30% = Steertreuse mit 30% Hamen; SR 50% = Steertreuse mit 50% Hamen; SR = Steertreuse mit 100% Hamen; FK = Fangkasten mit 100% Hamen; unterschiedliche Kleinbuchstaben (a, b, c) symbolisieren signifikante Unterschiede zwischen den Fangeinrichtungen und unterschiedliche Großbuchstaben (A, B) symbolisieren signifikante Unterschiede zwischen dem 1 h und 12 h Leerungsintervall (Proportion-Test bzw. paarweiser Proportion-Test); Betrachtungsweise jeweils innerhalb einer Fischart bzw. über alle Arten. Anzahl der ausgewerteten Individuen und der Versuchsdurchgänge je Versuchsgruppe siehe Tabelle 8 (im Anhang).

		Verzögerte Mortalitätsrate in % nach 96 Stunden				
		SR 30%	SR 50%	FK	SR	Kontrollfische
Barbe	1 h	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0
	12 h			0,4	1,7	0,0
Nase	1 h	-	-	2,5	1,3	1,1
	12 h			3,0	0,0	0,0
Huchen	1 h	0,0	0,0 a	22,0 ^{bA}	25,8 ^{bA}	9,3 ^A
	12 h			50,1 ^{aB}	60,8 ^{bB}	43,5 ^B
Flussbarsch	1 h	0,0	0,0	0,5	0,0 ^A	0,0
	12 h			0,4 ^a	4,3 ^{bB}	0,0
Rotauge	1 h	-	-	4,4 ^a	16,0 ^{bA}	0,9
	12 h			1,7	0,4 ^B	0,0
Bachforelle	1 h	0,0	1,6	11,6 ^A	7,2	6,3 ^A
	12 h			45,5 ^{aB}	12,3 ^b	16,2 ^B
Äsche	1 h	0,0 ^a	2,8 ^a	9,4 ^{aA}	21,3 ^{bA}	4,7 ^A
	12 h			79,5 ^{aB}	14,2 ^{bB}	27,2 ^B
Alle Arten	1 h	0,0 ^a	0,9 ^a	8,5 ^{bA}	11,5 ^c	3,2 ^A
	12 h			22,8 ^{aB}	13,1 ^b	12,4 ^B

Die jeweilige Kondition der Fische sowie äußere Einflüsse, wie die Wassertemperatur oder Stress während des Handlings, wirken sich auch auf die verzögerte Mortalität nach 96-stündiger Hälterung aus. So waren beispielsweise die Salmoniden in den 12-stündigen Versuchen im Juli einer sehr hohen Wassertemperatur ausgesetzt. Für kaltwasserliebende Arten wie Huchen und Bachforellen erwiesen sich Temperaturen von über 19 Grad Celsius als sehr belastend. Zusätzlich erlitten viele Huchen während dieser Versuchswochen die Weißpünktchenkrankheit (Ichthyophthiriose), wodurch sie weiter geschwächt wurden. Bei den Methodenversuchen konnte aus diversen Gründen keine Rücksicht auf die Jahreszeit genommen werden (Verzögerung im Tierversuchsgenehmigungsverfahren, Vorbestellung der Versuchsfische mit langen Lieferzeiten, gesamt Projektfortschritt). Um bessere Bedingungen für die Versuchsfische gewährleisten zu können, sollten folgende Fischversuche mit Salmoniden aber nur noch in der kühleren Jahreszeit durchgeführt werden. Ähnlich wie bei der Fischart Huchen lassen sich auch die Daten zur verzögerten Mortalität der Äschen in der Hälterung erklären. Viele Äschen erlitten im 12-stündigen Leerungsintervall letale und subletale Verletzungen dadurch, dass sie sich zusammen mit den größeren Huchen und Bachforellen in der Fangeinrichtung befanden. Für die Äschen aus den 12 Stunden Versuchen in der Steertreue ergab sich daraus eine sehr hohe sofortige Mortalität. Die Fische aus dem Fangkasten überlebten den Versuch während den 12-stündigen Leerungsintervallen zuerst scheinbar besser, verstarben allerdings vermehrt in der Hälterung.

Zusammenfassend sind die Daten zur verzögerten Mortalität nur sehr eingeschränkt interpretierbar, da es auch innerhalb der Kontrollgruppe zu teilweise hohen Mortalitäten während der Hälterung kam. Somit war die verzögerte Mortalität keine alleinige Folge der fangbedingten subletalen Verletzungen, sondern muss jeweils im Zusammenhang mit anderen möglichen Einflussfaktoren betrachtet werden.

2.3.4. Subletale Verletzungen durch den Fang

Die univariate Auswertung ergab, dass Versuchsfische im Vergleich zu Kontrollfischen vor allem eine höhere Verletzungsintensität aufwiesen, wohingegen die Verletzungsanzahl bei Versuchs- und Kontrollfischen teilweise (z.B. bei Bachforellen) sehr ähnlich war (Tabelle 6). Es gab insgesamt deutliche artspezifische Unterschiede in der Anzahl und Intensität subleterer Verletzungen, wobei Huchen und Bachforellen die höchste Verletzungsanzahl und -intensität aufwiesen (Tabelle 6).

Das Leerungsintervall hatte ähnlich wie bei der Mortalität einen großen Einfluss auf die Anzahl und Intensität subleterer Verletzungen. Dabei waren die Verletzungsanzahl

und -intensität bei den meisten Fischarten und über alle Arten hinweg bei einem Leerungsintervall von 12 Stunden deutlich höher als bei einem Leerungsintervall von einer Stunde (Tabelle 6). Lediglich bei Flussbarschen und Barben, die im Fangkasten gefangen wurden, unterschieden sich weder die Verletzungsanzahl noch die Verletzungsintensität zwischen den beiden Leerungsintervallen (Tabelle 6).

Der Vergleich der Fangeinrichtungen ergab für einige Arten (z.B. Nase, Äsche) und über alle Arten hinweg eine höhere Verletzungsanzahl und -intensität in der Steertreue als im Fangkasten. Dieser Unterschied trat insbesondere bei einem Leerungsintervall von 12 Stunden auf bzw. war im Vergleich zum einstündigen Leerungsintervall besonders stark ausgeprägt. Über alle Fischarten hinweg waren die Verletzungsanzahl und -intensität im 50% Teilhamen am geringsten und dabei sogar geringer als bei den Kontrollfischen.

Die multivariate Auswertung ergab, dass sich die Verletzungsmuster über alle Fischarten hinweg statistisch signifikant zwischen den Versuchsgruppen unterschieden (ANOSIM: R-Wert = 0,09; $P < 0,001$; Abbildung 8, Abbildung 9). Die relativ niedrige Güte der Trennung (R-Wert) lässt aber auf einen gering ausgeprägten Unterschied zwischen den Versuchsgruppen bzw. auf eine hohe Variabilität innerhalb der Versuchsgruppen schließen. Insgesamt waren artspezifische Unterschiede der Verletzungsmuster deutlich stärker ausgeprägt als Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen (ANOSIM: R-Wert = 0,73; $P < 0,001$; Abbildung 10). Dabei unterschieden sich auch die Verletzungsmuster der Kontrollfische (Gruppe Vorschädigung) teilweise deutlich zwischen den Fischarten (Abbildung 10, Abbildung 13 im Anhang). So wurden bei den Bachforellen in allen Versuchsgruppen inklusive der Kontrollfische verstärkt fehlende oder nur teilweise vorhandene Brustflossen festgestellt, welche in der Auswertung als Amputation gewertet wurden und auf die Herkunft aus der Fischzucht zurückzuführen sind. Des Weiteren wurden für die Salmoniden eine erhöhte Intensität von Pigmentveränderungen nach dem Fang, insbesondere bei einem 12-stündigen Leerungsintervall, festgestellt (Abbildung 11). Bei den Fischarten Rotauge und Barbe wurden bei den 12 h Leerungsintervallen zusätzlich Einblutungen in den Augen festgestellt, bei den Flussbarschen Einblutungen am Körper und am Kopf (Abbildung 11).

Die stetigsten Verletzungen waren in allen Versuchsgruppen Schuppenverluste, Einrisse/Schnitte in den Flossen und Pigmentveränderungen (Abbildung 9). Die kumulative Verletzungsintensität war dabei bei den Versuchsfischen generell höher als bei den Kontrollfischen (Abbildung 9).

Am deutlichsten unterschieden sich die Verletzungsmuster zwischen Kontrollfischen (Vorschädigung) und Versuchsfischen, die mit der Steertreue und mit einem Leerungsintervall von 12 Stunden gefangen wurden (Abbildung 8, Abbildung 9). Zu diesem

Unterschied trug vor allem eine höhere Verletzungsintensität von Pigmentveränderungen bei den Versuchsfischen bei (Abbildung 9). Bei einem Leerungsintervall von einer Stunde waren die Unterschiede der Verletzungsmuster deutlich geringer ausgeprägt; wobei nur zwischen Kontrollfischen und Versuchsfischen, die im Fangkasten gefangen wurden, ein statistisch signifikanter Unterschied der Verletzungsmuster nachweisbar war (Abbildung 9).

Der Vergleich der Fangeinrichtungen ergab für das 12 Stunden Leerungsintervall einen signifikanten Unterschied der Verletzungsmuster zwischen Fischen, die im Fangkasten und in der Steertreuse gefangen wurden, wobei die Güte der Trennung aber relativ niedrig war (ANOSIM: R-Wert = 0,09; $P < 0,001$). Zu diesem Unterschied trugen hauptsächlich höhere Intensitäten von Schuppenverlusten (SIMPER: Mittlere Intensität Steertreuse 1,7; Fangkasten 1,5) und eine geringere Vitalität (SIMPER: Mittlere Vitalität Steertreuse 2,1; Fangkasten 3,3) in der Steertreuse im Vergleich zum Fangkasten bei.

Beim Vergleich der Hamengrößen wurde ein statistisch signifikanter, aber gering ausgeprägter Unterschied zwischen den Verletzungsmustern der Fische im 100% und im 30% Hamen festgestellt (ANOSIM: R-Wert = 0,07, $P < 0,001$). Für diesen Unterschied war vor allem eine etwas höhere Intensität von Schuppenverlusten im 30% Hamen im Vergleich zum 100% Hamen verantwortlich (SIMPER: Mittlere Intensität 30% Hamen 0,8; 100% Hamen 1,4).

Die Unterschiede zwischen den aufgetretenen subletalen Verletzungen bzw. der Mortalität in den beiden Fangeinrichtungen (z.B. höhere Intensität von Schuppenverlusten in der Steertreuse) und zwischen den Leerungsintervallen zeigen auf, dass die Konstruktion der Fangeinrichtung und das Leerungsintervall einen großen Einfluss auf die Gesundheit der Fische haben kann. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die jeweils unterschiedliche Handhabung der Fische beim Leerungsprozess in den beiden Fangeinrichtungen zu differenzierten Verletzungsmustern führt. Beim Leeren der Steertreuse wird diese zwar nur kurzzeitig angehoben und deren Inhalt wird zügig in eine Fischwanne gegeben. Hierbei ist aber ein intensiver Kontakt der Fische mit dem Fangnetz möglich, wodurch Verletzungen wie Schuppenverluste und Pigmentveränderungen am Körper entstehen können. Der Leerungsvorgang des Fangkastens dagegen basiert auf einem aktiven Auskeschern des Kastens, der mit ca. 15 Minuten deutlich länger dauert als die Leerung der Steertreuse. Dabei können die Fische die Metallwand des Kastens oder den Kescherrahmen berühren bzw. dagegen gedrückt werden.

In diesem Versuch erwies sich der Fangkasten für manche Fischarten als fischschonendere Fangeinrichtung, da Einflüsse wie Fischbiomasse und Strömungsgeschwindigkeit durch die stabile Form der Aluminium-Lochbleche, die eingebauten Strömungsbrecher sowie das höhere Wasservolumen reduziert werden konnten. Eine pauschale Empfehlung zur

Verwendung einer der Fangeinrichtungen ist jedoch nicht möglich, da für mehrere der getesteten Arten (insbesondere Flussbarsch) die Steertreuse bei einem Leerungsintervall von einer Stunde die schonendere Alternative war. Besonders für bodenorientierte Fischarten wie die Nase kann die Leerung aus einem Fangkasten mittels Kescher zu vermehrten Verletzungen führen. So versuchen diese Tiere vor dem Kescher zu fliehen und sich in den Ecken des Kastens zu verstecken, wodurch sie leichter verletzt werden als Fische, die sich gerne in der Mitte des Kastens im Freiwasser versammeln (z.B. Rotauge). Die Steertreuse kann fischschonender gestaltet werden, wenn sie mit einem Hamen, welcher den Gewässerquerschnitt zu 50% abdeckt, kombiniert wird. In den Versuchen ergaben sich für diese Hamengröße die geringsten Verletzungsintensitäten. Es scheint, dass die Fische bei einem Fang im 50% Teilhamen aufgrund des reduzierten Wasserdurchflusses im Vergleich zum 100% Hamen sowie der geringeren Menge an Biomasse und Treibgut einem geringeren Verletzungsrisiko ausgesetzt sind. Die Wahl der Fangeinrichtung sollte jeweils abhängig von der gewählten Fischart gemacht werden, da die Fangeinrichtungen einen sehr unterschiedlichen Einfluss auf verschiedene Fischarten haben. Es zeigte sich beispielsweise auch, dass der Flussbarsch als einziger Vertreter der Kammschupper und im Gegensatz zu den getesteten Rundschuppen sowohl in der Steertreuse als auch im Fangkasten keine Schuppenverluste erlitt. Die getesteten Barben erlitten nur nach 12 Stunden in der Steertreuse vermehrt Schuppenverluste und überlebten den Fang sonst annähernd unbeschadet. Daraus lässt sich schließen, dass jede Fischart individuell betrachtet werden muss und Ergebnisse einzelner Arten nicht im Analogieschluss auf andere Arten übertragen werden können. Es ist daher auch zu vermuten, dass die verschiedenen Fischarten sehr unterschiedlich auf die Turbinenpassage an Wasserkraftanlagen reagieren. Für die Bewertung der Fischschädigung an Wasserkraftanlagen empfiehlt es sich daher, verschiedene für den Standort relevante Fischarten zu testen.

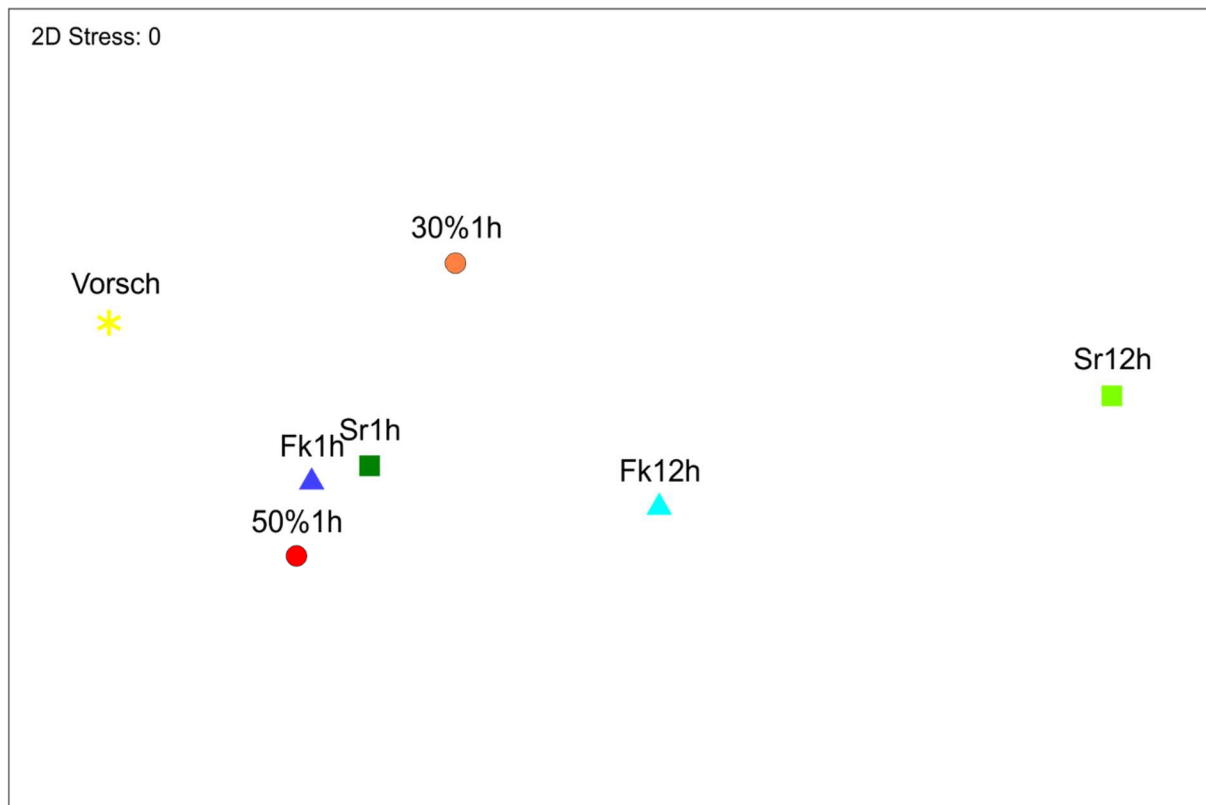


Abbildung 8 Nicht-metrische multidimensionale Skalierung (NMDS) der Verletzungsmuster unterteilt nach den verschiedenen Versuchsgruppen; Sr1h = 100% Hamen mit Steertreuse und Leerungsintervall 1 Stunde, Sr12h = 100% Hamen mit Steertreuse und Leerungsintervall 12 Stunden, Fk1h = 100% Hamen mit Fangkasten und Leerungsintervall 1 Stunde, Fk12h = 100% Hamen mit Fangkasten und Leerungsintervall 12 Stunden, 50%1h = 50% Hamen mit Steertreuse und Leerungsintervall 1 Stunde, 30%1h = 30% Hamen mit Steertreuse und Leerungsintervall 1 Stunde, Vorsch = Vorschäden/Kontrollfische. Der Abstand der Versuchsgruppen im Diagramm entspricht der Ähnlichkeit der Verletzungsmuster (geringer Abstand = große Ähnlichkeit). Abgeändert nach Pander et al. (2018).

Tabelle 6 Durchschnittliche Anzahl (Summe von 86 möglichen Verletzungen) und Intensität (Summe der Intensitätsstufen 0–5) der aufgetretenen Verletzungen; SR 30% = Steertreue mit 30% Hamen; SR 50% = Steertreue mit 50% Hamen; SR = Steertreue mit 100% Hamen; FK = Fangkasten mit 100% Hamen; unterschiedliche Kleinbuchstaben (a, b, c, d) symbolisieren signifikante Unterschiede zwischen den Fangeinrichtungen und unterschiedliche Großbuchstaben (A, B) symbolisieren signifikante Unterschiede zwischen dem 1 h und 12 h Leerungsintervall (paarweiser Mann-Whitney-U-Test); Betrachtungsweise jeweils innerhalb einer Fischart bzw. über alle Arten. Anzahl der ausgewerteten Individuen und der Versuchsdurchgänge je Versuchsgruppe siehe Tabelle 8 (im Anhang). Abgeändert nach Pander et al. (2018).

		Anzahl aller Verletzungen					Intensität aller Verletzungen gemittelt				
		SR 30%	SR 50%	FK	SR	Kontrollfische	SR 30%	SR 50%	FK	SR	Kontrollfische
Barbe	1 h	1,9 ^a	1,9 ^a	2,2 ^a	2,2 ^{aA}	1,0 ^b	2,4 ^a	2,2 ^a	3,7 ^a	3,0 ^{aA}	1,2 ^b
	12 h			2,2 ^a	5,6 ^{bB}	1,0 ^c			3,7 ^a	12,5 ^{bB}	1,2 ^c
Nase	1 h			6,2 ^{aA}	7,0 ^{bA}	3,6 ^c			10,3 ^{aA}	10,6 ^{bA}	4,3 ^c
	12 h			6,9 ^{aB}	13,4 ^{bB}	3,6 ^c			14,0 ^{aB}	37,7 ^{bB}	4,3 ^c
Huchen	1 h	9,8 ^a	8,7 ^a	12,2 ^{bA}	14,0 ^{cA}	13,5 ^b	13,4 ^a	10,5 ^a	16,9 ^{bA}	20,6 ^{cA}	18,5 ^b
	12 h			21,3 ^{aB}	20,9 ^{aB}	13,5 ^b			36,9 ^{aB}	42,1 ^{bB}	18,5 ^c
Flussbarsch	1 h	3,8 ^a	4,4 ^a	3,9 ^a	2,8 ^{bA}	2,6 ^b	6,9 ^a	6,9 ^a	6,6 ^a	4,3 ^{bA}	3,9 ^b
	12 h			4,0 ^a	6,5 ^{bB}	2,6 ^c			7,1 ^a	11,1 ^{bB}	3,9 ^c
Rotauge	1 h			5,2 ^{aA}	6,1 ^{bA}	4,3 ^c			11,1 ^{aA}	13,3 ^{bA}	7,3 ^c
	12 h			6,9 ^{aB}	7,4 ^{aB}	4,3 ^b			16,9 ^{aB}	20,2 ^{aB}	7,3 ^b
Bachforelle	1 h	15,7 ^a	13,3 ^b	14,7 ^{cA}	15,4 ^{aA}	13,5 ^b	37,3 ^{ac}	28,7 ^b	36,5 ^a	39,3 ^{cA}	30,2 ^b
	12 h			15,9 ^{aB}	14,4 ^{bB}	13,5 ^b			37,3 ^a	41,3 ^{aB}	30,2 ^b
Äsche	1 h	9,8 ^{ab}	8,3 ^{ac}	9,5 ^{aA}	10,4 ^{bA}	7,8 ^c	13,9 ^{ab}	11,5 ^{bc}	15,3 ^{abA}	16,1 ^{aA}	11,4 ^c
	12 h			14,6 ^{aB}	18,3 ^{bB}	7,8 ^c			30,5 ^{aB}	40,0 ^{bB}	11,4 ^c
Alle Arten	1 h	8,4 ^{abcd}	7,2 ^c	8,1 ^{aA}	8,6 ^{bA}	9,4 ^d	15,4 ^{abc}	11,7 ^c	14,8 ^{aA}	15,7 ^{bA}	15,8 ^{ab}
	12 h			10,0 ^{aB}	12,2 ^{bB}	9,4 ^a			19,9 ^{aB}	27,9 ^{bB}	15,8 ^c

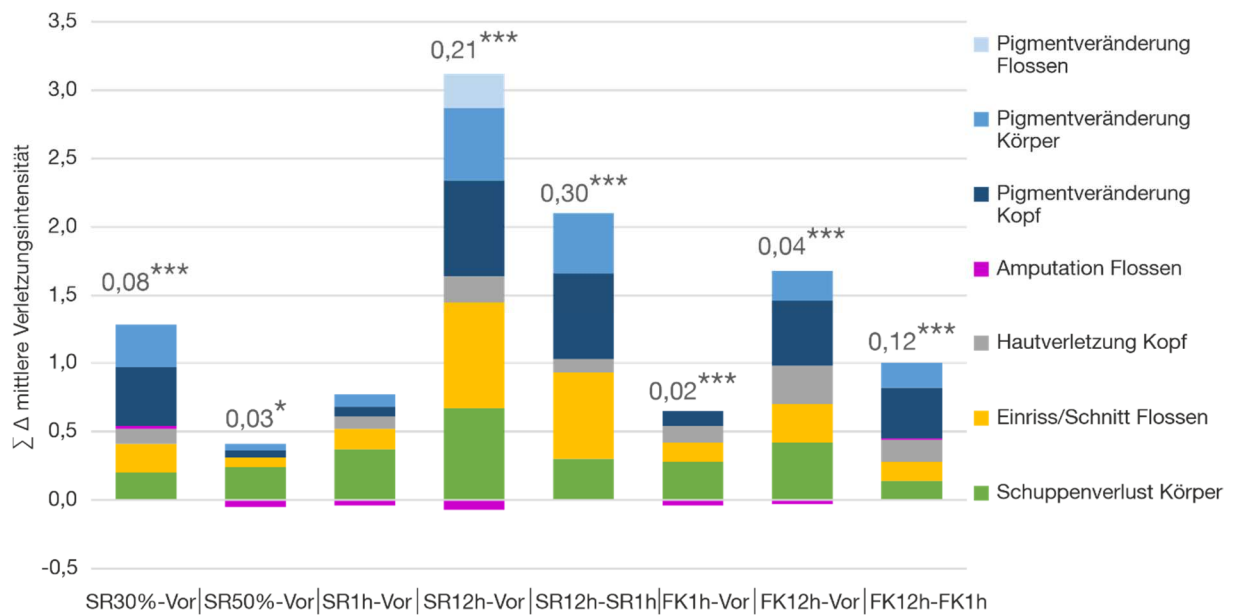


Abbildung 9 Aufsummierte Differenz ($\sum \Delta$) der mittleren Verletzungsintensitäten für die häufigsten Verletzungskategorien (Beitrag zur Unähnlichkeit $\geq 5\%$) aus der SIMPER Analyse zur Unähnlichkeit zwischen den verschiedenen Versuchsgruppen (x-Achse) zusammengefasst für alle untersuchten Fischarten. Vor = Vorschäden/Kontrollfische; SR1h = 100% Hamen mit Steertreue bei einstündigem Leerungsintervall; FK1h = 100% Hamen mit Fangkasten bei einstündigem Leerungsintervall, SR12h = 100% Hamen mit Steertreue bei 12-stündigem Leerungsintervall; FK12h = 100% Hamen mit Fangkasten bei 12-stündigem Leerungsintervall. Unterscheiden sich die Verletzungsmuster der paarweisen Vergleiche der Versuchsgruppen nach ANOSIM signifikant voneinander, ist der R-Wert und das Signifikanzniveau angegeben: * = $P < 0,05$, ** = $P < 0,01$, *** = $P < 0,001$. Anzahl der ausgewerteten Individuen je Versuchsgruppe siehe Tabelle 8 (im Anhang).

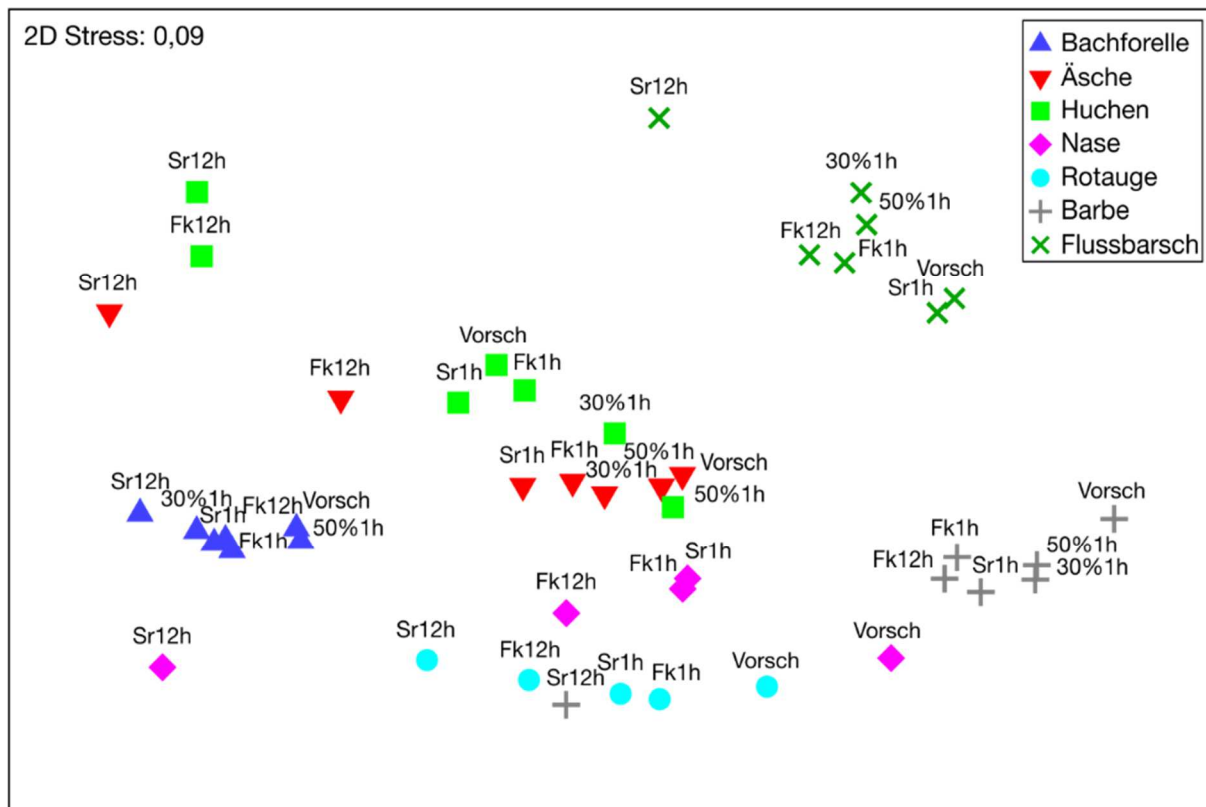


Abbildung 10 Nicht-metrische multidimensionale Skalierung (NMDS) der Verletzungsmuster der verschiedenen Versuchsgruppen unterteilt nach den sieben Versuchsfischarten. Sr1h = 100% Hamen mit Steertreue und Leerungsintervall 1 Stunde, Sr12h = 100% Hamen mit Steertreue und Leerungsintervall 12 Stunden, Fk1h = 100% Hamen mit Fangkasten und Leerungsintervall 1 Stunde, Fk12h = 100% Hamen mit Fangkasten und Leerungsintervall 12 Stunden, 50%1h = 50% Hamen mit Steertreue und Leerungsintervall 1 Stunde, 30%1h = 30% Hamen mit Steertreue und Leerungsintervall 1 Stunde, Vorsch = Vorschäden/Kontrollfische. Der Abstand der Versuchsgruppen im Diagramm entspricht der Ähnlichkeit der Verletzungsmuster (geringer Abstand = große Ähnlichkeit). Abgeändert nach Pander et al. (2018).

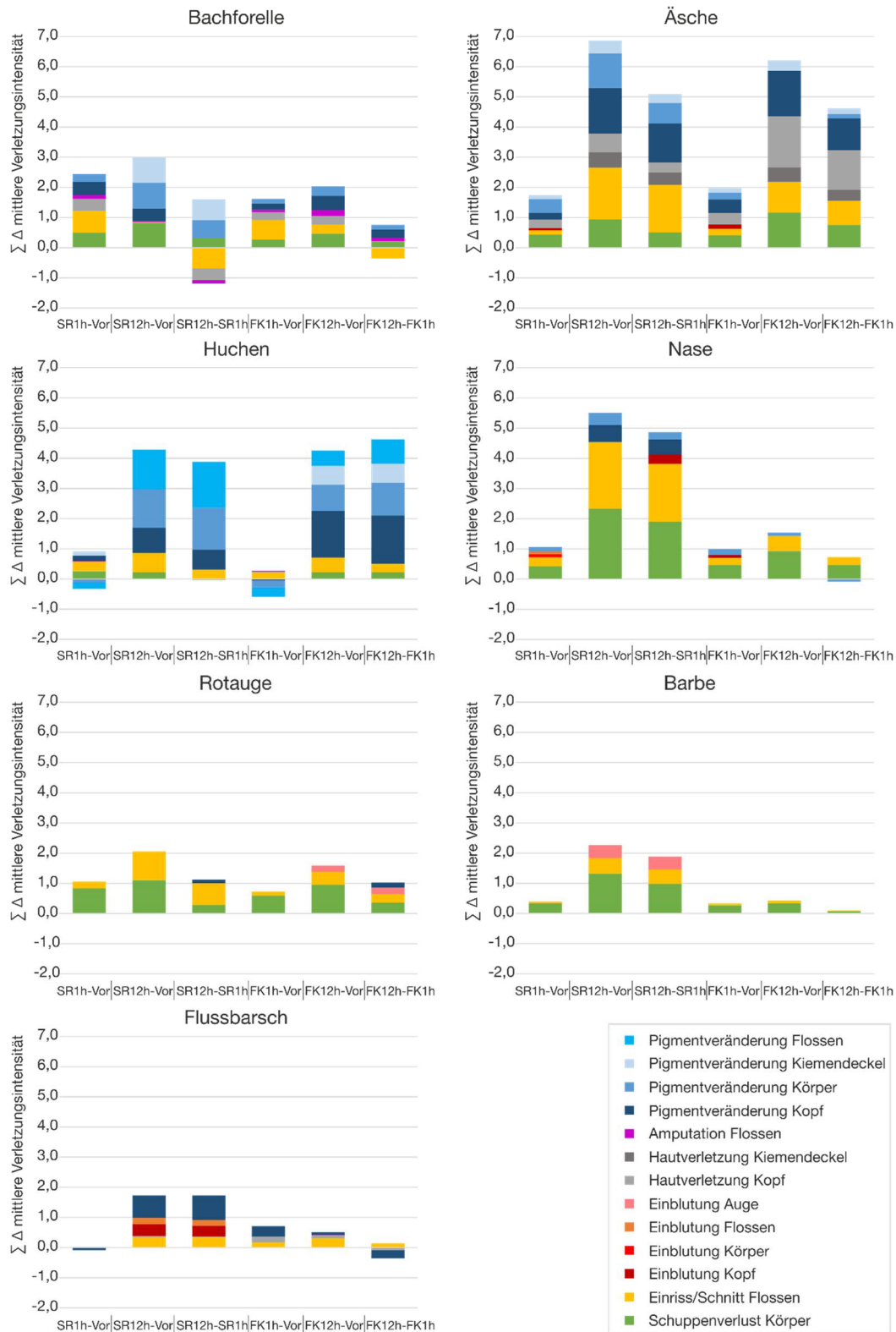


Abbildung 11 Aufsummierte Differenz ($\sum \Delta$) der mittleren Verletzungsintensitäten für die häufigsten Verletzungskategorien (Beitrag zur Unähnlichkeit $\geq 5\%$) aus der SIMPER Analyse zur Unähnlichkeit zwischen den verschiedenen Versuchsgruppen (x-Achse) für jede untersuchte Fischart. Vor = Vorschäden/Kontrollfische; SR1h = 100% Hamen mit Steertreue bei einstündigem Leerungsintervall; FK1h = 100% Hamen mit Fangkasten bei einstündigem Leerungsintervall, SR12h = 100% Hamen mit Steertreue bei 12-stündigem Leerungsintervall; FK12h = 100% Hamen mit Fangkasten bei 12-stündigem Leerungsintervall. Anzahl der ausgewerteten Individuen je Fischart und Versuchsgruppe siehe Tabelle 8 (im Anhang).

2.3.5. Einfluss von Treibgut, Biomasse und Strömungsgeschwindigkeit auf die Mortalität

Durch ein lineares Modell konnte bei Einbeziehung aller gemessenen Variablen die Varianz der fangbedingten Mortalität zu 98% erklärt werden ($r^2 = 0,98$; $P < 0,001$). Über den Gesamtdatensatz ergab das Modell statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen der Mortalität und der Fangeinrichtung, der Mortalität und allen abflussbedingten Variablen (Strömungsgeschwindigkeit innerhalb und außerhalb der Fangeinrichtung, Trübung, Wassertemperatur, Leitfähigkeit, Sauerstoffkonzentration) sowie zwischen der Mortalität und den Variablen Fischkondition und Treibgutmenge. Beispielsweise stieg die Mortalität signifikant mit steigender Strömungsgeschwindigkeit und Treibgutmenge in der Fangeinrichtung an (Tabelle 9 im Anhang).

Bei separater Analyse für die Steertreue und den Fangkasten waren die Zusammenhänge zwischen der Mortalität und den gemessenen Variablen zum Teil sehr unterschiedlich (Abbildung 12). In der Steertreue hatten die akkumulierte Fischbiomasse und die Strömungsgeschwindigkeit den stärksten Einfluss auf die Mortalität. Dabei stieg die Mortalität mit steigender Fischbiomasse und mit steigender Strömungsgeschwindigkeit in der Steertreue an. Auffällig ist, dass Mortalitätsraten von 0% in der Steertreue ab einer Fischbiomasse von etwa 3,5 kg bzw. ab einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s gar nicht mehr auftraten (Abbildung 12). Im Gegensatz zur Steertreue wurde für den Fangkasten kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Mortalität und der Fischbiomasse bzw. der Strömungsgeschwindigkeit festgestellt (Abbildung 12). Des Weiteren wurde bei separater Analyse für Steertreue und Fangkasten, anders als über den Gesamtdatensatz, kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Mortalität und der Treibgutmenge in der Fangeinrichtung nachgewiesen, auch wenn zumindest ein schwacher Trend zu steigender Mortalität bei zunehmender Treibgutmenge beobachtet wurde (Abbildung 12). Die unterschiedlichen Treibgutzusammensetzungen (fein und grob) hatten keinen signifikanten Einfluss auf die fangbedingte Mortalität.

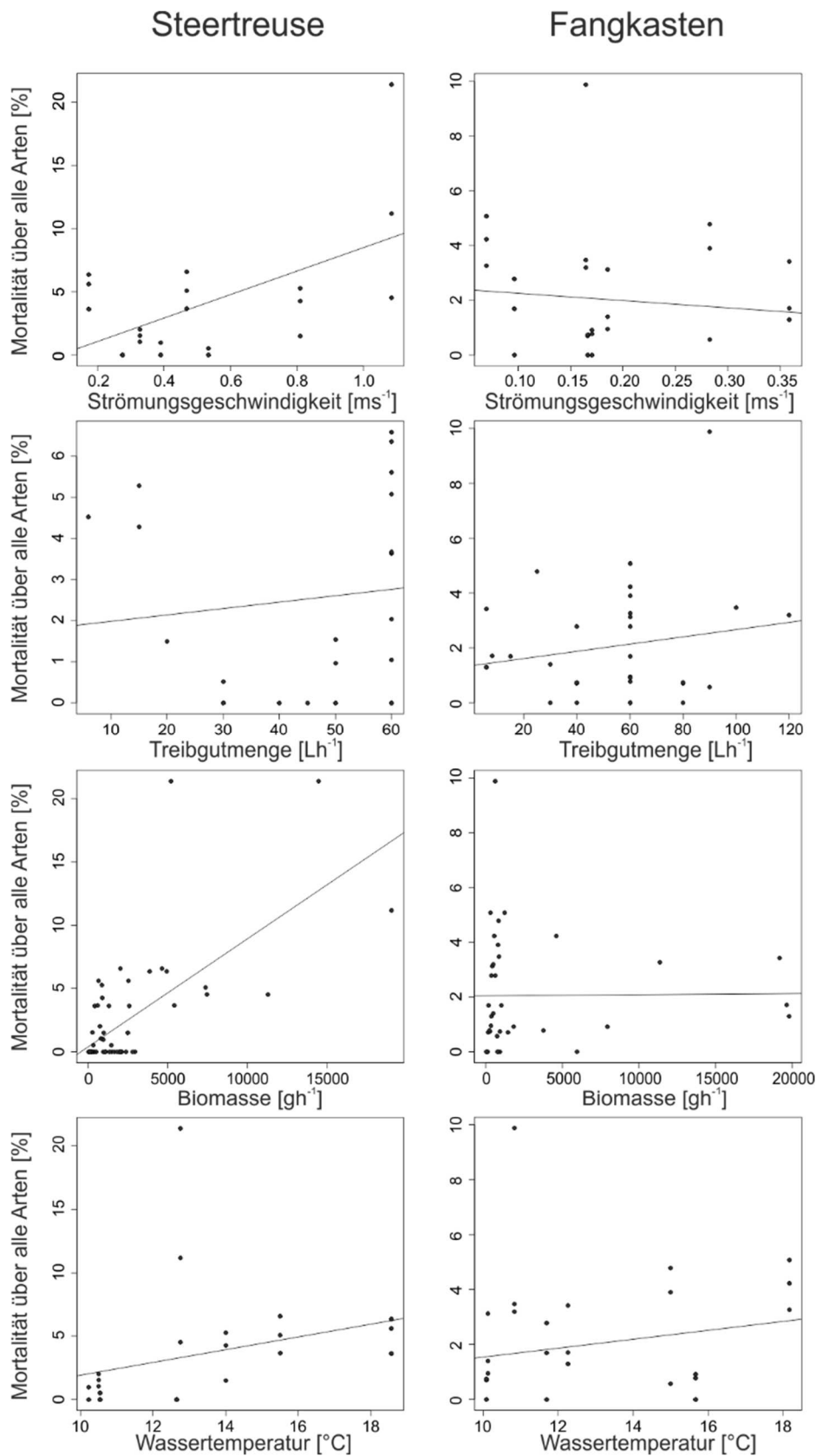


Abbildung 12 Lineare Regressionen von Mortalitätsraten (gepoolt über alle Fischarten) mit der Strömungsgeschwindigkeit, der akkumulierten Treibgutmenge, der akkumulierten Fischbiomasse und der Wassertemperatur (jeweils gemessen in der Steertreuse und im Fangkasten) bei einstündigem Leerungsintervall. Es wurde ein 100% Hamen verwendet. Abgeändert nach Pander et al. (2018).

2.3.6. Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen klar auf, dass fangbedingte Effekte immens sein können und unter Umständen sogar eine ähnliche Mortalität wie Turbinen hervorrufen können. Dies kann insbesondere bei innovativen Wasserkraftanlagen mit einer erwarteten Mortalität von unter 10% zu Schwierigkeiten bei der Differenzierung fangbedingter und turbinenbedingter Effekte führen. Bei Untersuchungen an Wasserkraftanlagen müssen daher fangbedingte Effekte unbedingt berücksichtigt werden und es sollten Maßnahmen ergriffen werden, um diese Effekte zu minimieren. Andernfalls können fangbedingte und anlagenbedingte Effekte nicht klar voneinander abgegrenzt werden.

Die Versuche haben gezeigt, dass lange Leerungsintervalle zu einer stark erhöhten fangbedingten Mortalität und intensiveren Verletzungen führen. Um fangbedingte Effekte zu minimieren, muss das Leerungsintervall daher so kurz wie möglich gehalten werden. Außerdem ist aus den Ergebnissen dieser Studie ersichtlich, dass die Fischbiomasse in der Steertreuse 3,5 kg nicht übersteigen sollte, da bei höheren akkumulierten Fischbiomassen immer eine mehr oder weniger hohe Mortalität auftrat, während bei niedrigeren Fischbiomassen auch Mortalitätsraten von 0% vorkamen. Um eine zu hohe Fischbiomasse im Steert zu vermeiden, empfiehlt es sich daher, die Versuchsfische auf mehrere Durchgänge zu verteilen, wenn für Versuche mit der Steertreuse eine hohe Anzahl an Versuchsfischen mit einem hohen erwarteten Wiederfang eingesetzt werden müssen. Auch der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Mortalität sollte bei Versuchen mit der Steertreuse so gering wie möglich gehalten werden. Hierzu sollte die Strömungsgeschwindigkeit im Steert 0,5 m/s nicht überschreiten. Um eine geringere Strömungsgeschwindigkeit zu erzielen, kann bei der Konstruktion der Fangeinrichtung deren Länge und Durchmesser sowie die Maschenweite je nach Standort angepasst werden. Wenn längere Leerungsintervalle aus Monitoringgründen notwendig sind, ist es empfehlenswert, eine Fangeinrichtung wie z.B. den hier getesteten Fangkasten zu verwenden, welcher den Fischen Schutz vor starker Strömung und Sonneneinstrahlung sowie ausreichend Wasservolumen (falls sich vermehrt Treibgut bzw. Biomasse ansammelt) bietet.

Der in den Versuchen getestete Fangkasten stellte sich zwar für einzelne Fischarten als schonender heraus, bei der Entscheidung der einzusetzenden Fangeinrichtung spielen aber auch der Kostenfaktor sowie die praktische Anwendbarkeit eine Rolle. Im Vergleich zur Steertreuse (ca. 700 €) ist der Fangkasten (ca. 6.000 €) in der Anschaffung wesentlich teurer. Vor allem an größeren Gewässern, in denen mehrere Fangeinrichtungen und größere Modelle des Fangkastens eingesetzt werden müssten, kann der finanzielle Aufwand ein

entscheidendes Kriterium für die Machbarkeit des Monitorings sein. Darüber hinaus hat sich während der Versuche an der Moosach gezeigt, dass das Verbringen des Fangkastens ins Gewässer im Vergleich zur Steertreuse mit einem wesentlich höheren personellen und technischen Aufwand verbunden ist. Auch das Leeren des Fangkastens ist insbesondere bei Hochwasser und dadurch erhöhtem Treibgutaufkommen wesentlich schwieriger und zeitaufwendiger als bei der Steertreuse. Aus dem Netz der Steertreuse kann das Treibgut einfach heraus geschüttelt werden, während es sich im Fangkasten an den Strömungsbrechern verkleist und nur unter hohem Zeit- und Personalaufwand wieder entfernt werden kann. Insgesamt liegt der zeitliche Aufwand für die Leerung der unterschiedlichen Fangeinrichtungen bei ca. 2 Minuten für die Leerung der Steertreuse und bei ca. 15 Minuten für die des Fangkastens. Somit ist der Zeitaufwand zum Leeren der Steertreuse erheblich geringer. Zudem entsteht bei Hochwasser durch den Fangkasten am Ende des Hamens eine wesentlich höhere hydromechanische Belastung für das Hamennetz als bei der flexiblen und stromlinienförmigen Steertreuse.

Als weitere Einflussfaktoren auf die Intensität der Fischverletzungen wurden die Wassertemperatur sowie die individuelle Kondition der Fische ermittelt. Fischarten aus der voralpinen Fließgewässerregion sind besonders gut an kaltes sauerstoffreiches Wasser angepasst. Folglich können der fangbedingte Stress der Fische und damit auch das Mortalitätsrisiko mit einer steigenden Wassertemperatur ansteigen. Auch Fische mit einer niedrigeren individuellen Kondition waren gegenüber dem auftretenden Stress während des Versuchs weniger resistent und wiesen eine höhere fangbedingte Mortalitätsrate auf. Die jeweilige Qualität der einzelnen Fischarten lässt sich an der Anzahl der Vorschädigungen der Kontrollfische abschätzen und variiert stark zwischen den Arten. Geschwächte Fische stellten sich als anfälliger gegenüber fangbedingten Verletzungen heraus. Auch beim natürlichen Fischabstieg an Wasserkraftanlagen können einzelne Fische durch vorherige Turbinenpassagen, Prädatoren oder Krankheiten geschwächt sein. In diesem Zusammenhang ist besonders wichtig, bei Untersuchungen mit zu erwartenden geringen Effektstärken Versuchsfische in hervorragender Qualität zu verwenden, da sich sonst geringfügige Verletzungen nicht detektieren lassen. In der Praxis kann es bei einzelnen Fischarten problematisch sein, die entsprechende hohe Qualität immer zum Versuchszeitpunkt geliefert zu bekommen.

Für die Untersuchungen der einzelnen Standorte im Projekt wurde auf Basis der neuen Erkenntnisse zur Fangmethodik folgende Vorgehensweise festgelegt: es wurden ausschließlich konventionelle Steertreusen mit knotenlosem Netzmaterial verwendet. Fangbedingte Verletzungen wurden minimiert, indem die Leerungsintervalle kurz sowie die

Strömungsgeschwindigkeiten und Biomasse gering gehalten wurden. In der Regel wurden dabei einstündige Leerungsintervalle angewandt; wobei die Länge des Leerungsintervalls bei sehr geringen Wiederfangraten bedarfsmäßig angepasst wurde. Dadurch wurde auch das Treibgutaufkommen auf ein Minimum reduziert. Um die Fischbiomasse gering zu halten, mussten die Fischzugaben an jedem Standort anfangs vorsichtig dosiert werden und entsprechend dem standortspezifischen Wiederfang angepasst werden. Versuche mit großen Fischen und Räubern fanden soweit logistisch möglich getrennt von Versuchen mit kleinen Fischen statt, z.B. in der darauffolgenden Versuchswoche. Um die Strömungsgeschwindigkeiten gering zu halten, musste der Hamen lang genug konstruiert werden, so dass der Steert unterhalb der Turbulenzen am Turbinenauslauf zum Liegen kam. Für eine bessere Zuordnung der Effekte wurden abiotische Parameter wie Treibgutmenge und Strömungsgeschwindigkeit während der Versuche kontinuierlich dokumentiert.

Literaturverzeichnis

- 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.
- Cohen J. (1992). Statistical power analysis. *Current directions in psychological science* 1(3), 98-101.
- 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.
- DWA (2005) Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen: Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. DWA Themen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- Ebel G. (2013) Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, 1. Auflage, Halle (Saale).
- Enders E., Gessel M. H. & Williams J. G. (2009) Development of successful fish passage structures for downstream migrants requires knowledge of their behavioural response to accelerating flow. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 66(12), 2109-2117.
- Hadderingh R. H. & Bakker H. D. (1998) Fish mortality due to passage through hydroelectric power stations on the Meuse and Vecht Rivers. In: *Fish migration and fish bypasses* (Hrsg. Jungwirth, M. et al.): 315-328, Oxford (Fishing News Books).
- Lagarrigue T., Voegtle 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.
- LfU Bodeninformationssystem Bayern, <http://www.bis.bayern.de/bis/initParams.do>, [abgerufen am 22.12.2014].
- LfU Grundlagendaten Fließgewässer Bayern, <http://www.bis.bayern.de/bis/initParams.do>, [abgerufen am 22.12.2014].
- LfU Kartendienst Gewässerbewirtschaftung Bayern, <http://www.bis.bayern.de/bis/initParams.do>, [abgerufen am 22.12.2014].
- Matk M. (2012) Untersuchung zu Schädigungen abwandernder Smolts des Atlantischen Lachses (*Salmo salar*) nach Passage der Francis-Turbine einer kleinen Wasserkraftanlage am Beispiel der WKA Prossen (Lachsbach). Masterarbeit an der Humboldt-Universität zu Berlin. In: Schädigung von Fischen in Turbinenanlagen. Heft 12/2012. (Hrsg. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie).
- 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.
- Naumann S., Stein U., Neukirchen B., Scholten M., Uphoff H., Schrenk G., Saenger N., Ingendahl D., Linnenweber C., Schnell J., Hartmann F., Heimerl S., Keuneke R., Kemmler G. & Reckendorfer W. (2016) Erfolgsfaktoren – Anlagenmanagement – Strukturverbesserung. Ergebnispapier. Forum Fischschutz und Fischabstieg, 6. Workshop, Darmstadt September 2016.
- 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., 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.
- Pavlov D., Lupandin A. & Kostin V. (2002) Downstream Migration of Fish Through Dams of Hydroelectric Power Plants, Oak Ridge National Laboratory.

- Pottgießer T. & Sommerhäuser M. (2004) Fließgewässertypologie Deutschlands: Die Gewässertypen und ihre Steckbriefe als Beitrag zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie. *Handbuch der Limnologie* 19(7), 04.
- R Core Team (2015) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- 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>.
- Schmalz W., Wagner F. & Sonny D. (2015) Arbeitshilfe zur standörtlichen Evaluierung des Fischschutzes und Fischabstieges. Forum "Fischschutz und Fischabstieg".
- 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.
- Schubert M. (2007) Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) aus fischereilicher Sicht – Fischereibezogenes Monitoring nach Maßgabe der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie. VDSF Schriftenreihe 9/2007.
- Scruton D. A., Pennell C. J., Bourgeois C. E., Goosney R. F., King L., Booth R. K., Eddy W., Porter T. R., Ollerhead L. M. N. & Clarke K. D. (2008) Hydroelectricity and fish: a synopsis of comprehensive studies of upstream and downstream passage of anadromous wild Atlantic salmon, *Salmo salar*, on the Exploits River, Canada. *Hydrobiologia* 609, 225–239.
- 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.
- Taeubert J. E. & Geist J. (2013) Critical swimming speed of brown trout (*Salmo trutta*) infested with freshwater pearl mussel (*Margaritifera margaritifera*) glochidia and implications for artificial breeding of an endangered mussel species. *Parasitology Research* (Hrsg. Springer – Verlag Berlin): 1607-1613, Heidelberg.

Anhang

Tabelle 7 Fischreferenzzönose (prozentuale Anteile der potenziell vorkommenden Fischarten) der Moosach am Standort Moosach/Feising.

Gewässer	Moosach				
Teileinzugsgebiet	Isar				
Einzugsgebiet	Isar				
Stromgebiet	Donau				
Obere Grenze	Einmündung Giggenhausener Bach oberhalb Pulling				
Untere Grenze	Mündung in die Isar				
Gewässertyp	Kleine Flüsse des Alpenvorlandes				
Gefälle (%)	1,42				
Fischregion	Cypriniden dominiertes Rhithral				
Fischregionsindex	5,25				
Referenzarten	20				
Anzahl Leitarten	9				
Typspezifische Arten	12				
Begleitarten	8				
Aitel	10,0	Gründling	4,0	Quappe	0,5
Äsche	17,0	Hasel	8,5	Rotaugen	0,4
Bachforelle	15,0	Hecht	0,7	Rußnase	0,2
Bachschmerle	8,0	Huchen	1,0	Schlammpeitzger	0,1
Barbe	10,0	Laube	0,3	Schleie	0,1
Elritze	4,0	Mühlkoppe	5,0	Schneider	5,0
Flussbarsch	0,2	Nase	10,0		

Tabelle 8 Anzahl der in den verschiedenen Versuchgruppen wiedergefangenen und ausgewerteten Individuen der sieben Versuchsfischarten. SR 30% = Steertreue mit 30% Hamen; SR 50% = Steertreue mit 50% Hamen; SR = Steertreue mit 100% Hamen; FK = Fangkasten mit 100% Hamen; 1 h bzw. 12 h = Leerungsintervall; n = Anzahl der Versuchsdurchgänge.

	SR 30% 1 h (n = 6)	SR 50% 1 h (n = 6)	SR 1 h (n = 24)	SR 12 h (n = 9)	FK 1 h (n = 24)	FK 12 h (n = 9)	Kontroll- fische
Barbe	39	67	269	119	293	226	90
Nase	45	74	792	133	559	296	145
Huchen	50	61	787	181	797	287	496
Flussbarsch	58	75	582	279	417	273	91
Rotaugen	49	87	851	262	847	287	175
Bachforelle	53	63	512	81	476	156	404
Äsche	45	72	494	289	564	205	351
Gesamtsumme	339	499	4.287	1.344	3.953	1.730	1.752

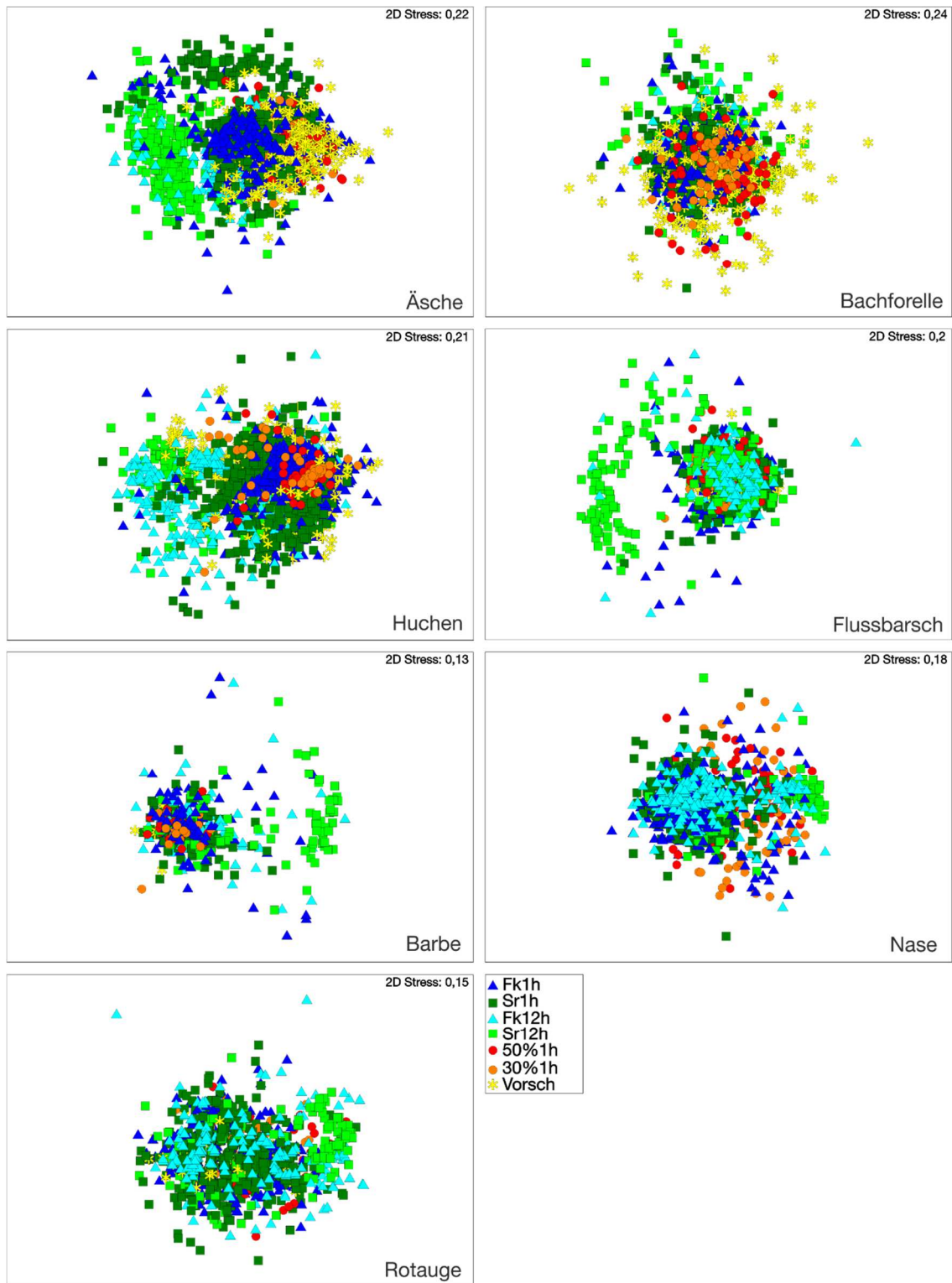


Abbildung 13 Nicht-metrische multidimensionale Skalierung (NMDS) der Verletzungsmuster für die einzelnen Fischarten unterteilt nach den verschiedenen Versuchsgruppen; Sr1h = 100% Hamen mit Steertreue und Leerungsintervall 1 Stunde, Sr12h = 100% Hamen mit Steertreue und Leerungsintervall 12 Stunden, Fk1h = 100% Hamen mit Fangkisten und Leerungsintervall 1 Stunde, Fk12h = 100% Hamen mit Fangkisten und Leerungsintervall 12 Stunden, 50%1h = 50% Hamen mit Steertreue und Leerungsintervall 1 Stunde, 30%1h = 30% Hamen mit Steertreue und Leerungsintervall 1 Stunde, Vorsch = Vorschäden/Kontrollfische. Der Abstand der Versuchsgruppen im Diagramm entspricht der Ähnlichkeit der Verletzungsmuster (geringer Abstand = große Ähnlichkeit).

Tabelle 9 Signifikante Zusammenhänge (Einzelparameter und Interaktionen zwischen mehreren Parametern) zwischen der Mortalität und den gemessenen (unabhängigen) Variablen im linearen Modell (Einbeziehung aller gemessenen Variablen; $r^2 = 0,98$; $P < 0,001$; F-Statistik = 86,56 bei 55 und 64 d.f., restlicher Standardfehler = 2,062 bei 64 d.f.). SR = Steertreue. Gewicht = mittleres individuelles Fischgewicht in der Fangeinrichtung, Biomasse in Fangeinrichtung = akkumulierte Fischbiomasse in der Fangeinrichtung, Kondition = mittlere Vitalität der Kontrollfische nach 96 h Hälterung.

Unabhängige Variablen und Variablenkombinationen	Schätzwert	Std. Fehler	t-Wert	P
Fangeinrichtung SR 100%	3205000	422000	7595	< 0,001
Kondition	-618600	72440	-8539	< 0,001
Treibgut	1981	283	7001	< 0,001
Temperatur	-232600	21230	-10956	< 0,001
Strömung außerhalb des Hamens	-974900	68350	-14263	< 0,001
Strömung innerhalb des Hamens	3279000	388900	8430	< 0,001
Strömung im Oberwasser	-576800	65740	-8775	< 0,001
Strömung an Hameneingang	-199700	53500	-3733	< 0,001
Abfluss	-2484000	285900	-8687	< 0,001
Trübung	125100	12140	10302	< 0,001
Sauerstoffkonzentration	333000	31870	10446	< 0,001
Leitfähigkeit	6549	2273	2881	< 0,01
Fangeinrichtung SR 100% : Intervall 1 h	-3139000	418700	-7497	< 0,001
Fangeinrichtung SR 100% : Kondition	158700	31880	4979	< 0,001
Intervall 1 h : Kondition	618500	72420	8540	< 0,001
Fangeinrichtung SR 100% : Gewicht	25280	3491	7241	< 0,001
Fangeinrichtung SR 100% : Treibgut	770	105	7301	< 0,001
Intervall 1 h : Treibgut	-1993	284	-7022	< 0,001
Fangeinrichtung SR 100% : Temperatur	-322800	43920	-7349	< 0,001
Intervall 1 h : Temperatur	233200	21260	10968	< 0,001
Intervall 1 h : Strömung außerhalb des Hamens	981900	68300	14376	< 0,001
Intervall 1 h : Strömung innerhalb des Hamens	-3320000	386900	-8583	< 0,001
Intervall 1 h : Strömung im Oberwasser	598500	65810	9094	< 0,001
Intervall 1 h : Strömung am Hameneingang	196000	53960	3632	< 0,001
Intervall 1 h : Abfluss	2484000	285700	8693	< 0,001
Fangeinrichtung SR 100% : Biomasse in Fangeinrichtung	1	0	2463	< 0,05
Intervall 1 h : Trübung	-125000	12160	-10274	< 0,001
Intervall 1 h : Sauerstoffkonzentration	-332400	31880	-10427	< 0,001
Intervall 1 h : Leitfähigkeit	-6564	2274	-2887	< 0,01
Fangeinrichtung SR 100% : Intervall 1 h : Kondition	-160900	32140	-5007	< 0,001
Fangeinrichtung SR 100% : Intervall 1 h : Gewicht	-25240	3489	-7233	< 0,001
Fangeinrichtung SR 100% : Intervall 1 h : Treibgut	-756	109	-6924	< 0,001
Fangeinrichtung SR 100% : Intervall 1 h : Temperatur	319200	43740	7298	< 0,001