

Effizienz von Fischeaufstiegshilfen

Analyse der Auffindbarkeit und Passierbarkeit an Schweizer Wasserkraftwerken



Zürich, 29.05.2024

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Wasser, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer

Institut für Umweltingenieurwissenschaften (IfU), Stocker Lab, ETH Zürich, Laura-Hezner-Weg 7, 8093 Zürich
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Hönggerberggring 26, 8093 Zürich

Autor/Autorin

Tina Dubach (IfU)
Andris Wyss (VAW)
Dr. Ismail Albayrak (VAW)
Dr. Luiz G. M. Silva (IfU)

Begleitung BAFU

Tabea Kropf, Sektion Sanierung Wasserkraft

Hinweis

Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Titelbild

Fischaufstiegshilfe am Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt, Möhlin, Rhein, Kanton Aargau
© IfU, T.Dubach

Zitiervorschlag

Dubach, T., Wyss, A., Albayrak, I., Silva, L. G. M. 2024. Effizienz von Fischaufstiegshilfen: Analyse der Auffindbarkeit und Passierbarkeit an Schweizer Wasserkraftwerken. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, 86 S.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Einführung und Hintergrund	7
2.1	Ausgangslage	7
2.2	Technischer Hintergrund	7
2.3	Ziele und Fragen der Studie	8
3	Methoden	9
3.1	PIT-Tag Monitoring	9
3.1.1	Untersuchungsstandorte	9
3.1.2	Fischaufstiegshilfen (FAH)	10
3.1.3	Antennenaufstellung der jeweiligen FAH	11
3.1.4	PIT-Tag Datensatz	15
3.2	Definitionen und statistische Methoden	18
3.2.1	Definition der Metriken	18
3.2.2	Time-to-Event Analyse	21
3.2.3	Dichtediagramm	22
3.2.4	Modellierungsverfahren Passierbarkeit	22
3.3	Betriebsdaten der Kraftwerke und hydrologische Daten	23
3.3.1	Terminologie	23
3.3.2	Datenbeschreibung	24
3.4	Hydraulische Messungen	25
3.4.1	Untersuchungsstandorte	25
3.4.2	Durchführung	26
3.4.3	Messmethoden	27
4	Ergebnisse und Diskussion	30
4.1	Auffindbarkeit	30
4.1.1	Auffindbarkeit pro Kraftwerk	30
4.1.2	Auffindbarkeit pro FAH-Typ	31
4.1.3	Auffindbarkeit verschiedener Fischarten	32
4.1.4	Auffindbarkeit verschiedener Fischarten und FAH-Typen	33
4.2	Anteil Lockwassermenge am konkurrierenden Abfluss	34
4.3	Hydraulische Messungen im Unterwasser der Kraftwerke	36
4.4	Passierbarkeit	39
4.4.1	Passierbarkeit pro Kraftwerk	39
4.4.2	Passierbarkeit pro FAH-Typ	39
4.4.3	Passierbarkeit verschiedener Fischarten	40
4.4.4	Passierbarkeit verschiedener Fischarten und FAH-Typen	43
4.5	Strömungsverhältnisse in den FAH	44
4.5.1	Fliessgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche (PIV-Messungen)	44
4.5.2	Fliessgeschwindigkeiten unter der Wasseroberfläche und turbulente kinetische Energie (ADV-Messungen)	45
4.6	Längenselektivität	46
4.7	Passierbarkeit: die wichtigsten Faktoren	50
4.8	Fischverhalten und Bewegungsmuster	51
5	Herausforderungen, Empfehlungen und zukünftige Perspektiven	54
5.1	Herausforderungen und Empfehlungen zur Standardisierung	54

5.2	Definition der Metriken	55
5.3	Relevanz der hydraulischen Messungen	57
5.4	Relevanz der Passage- und Transitzeit	57
6	Fazit	58
7	Danksagung	60
8	Quellenverzeichnis	61
8.1	Quellen der Tabellen	66
9	Anhang	67

1 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie befasst sich mit der Auffindbarkeit und der Passierbarkeit von zwölf Fischaufstiegshilfen (FAH) an sieben Wasserkraftwerken entlang der Flüsse Limmat, Aare und Rhein. Hierzu wurde ein umfangreicher Datensatz aus früheren Wirkungskontrollen analysiert und die Strömungsfelder an den Fischaufstiegshilfen von drei ausgewählten Wasserkraftwerken gemessen. Die Daten des Fischmonitorings umfassen 24'001 PIT-Tags und 386'167 Antennenerfassungen. Die Ergebnisse zeigen signifikante Unterschiede in der Auffindbarkeit und Passierbarkeit abhängig vom Flusssystem. Das Kraftwerk Schiffmühle an der Limmat wies die höchste Auffindbarkeit mit 66% auf, während das Kraftwerk Säkingen am Rhein die geringste Auffindbarkeit mit 8% aufwies. Des Weiteren konnten Unterschiede in der Auffindbarkeit zwischen verschiedenen Typen von Fischaufstiegshilfen identifiziert werden. Bei mehreren Fischaufstiegshilfen an einem Kraftwerk zeigten der Schlitzpass und der Raugerinne-Beckenpass oftmals eine ähnliche Auffindbarkeit. Hingegen wurde bei einem Fischlift und einem Umgehungsgewässer eine geringe Auffindbarkeit festgestellt (< 5%).

Hydraulische Messungen in Fischaufstiegshilfen und im Unterwasser von Kraftwerken spielen eine entscheidende Rolle zur Beurteilung der Funktionalität einer Fischaufstiegshilfe. Während einer Wirkungskontrolle liefern diese Messungen zusätzliche Informationen und ermöglichen die Überprüfung einer Fischaufstiegshilfe. Zudem können die Messungen dazu beitragen, ein besseres Verständnis zu entwickeln, wie sich Fische unter verschiedenen hydraulischen Bedingungen verhalten. In dieser Studie wurden an drei Kraftwerken (KW Schiffmühle, KW Rüchlig und KW Ryburg-Schwörstadt) hydraulische Messungen im Unterwasser der Kraftwerke, das heisst im Nahbereich der Einstiege, sowie in den Becken der Fischaufstiegshilfen durchgeführt. Die Resultate zeigten, dass die Strömungsfelder generell so ausgebildet sind, dass sich die Fische in Richtung Einstieg orientieren können müssten. Gleichzeitig wurden im Einzelfall Rückströmungen festgestellt, die den Einstieg in die Fischaufstiegshilfe erschweren könnten. Um dies zu überprüfen, sind jedoch örtlich besser aufgelöste Fischdaten erforderlich. Neben den hydraulischen Messungen wurde der Anteil der Lockwassermenge am konkurrierenden Abfluss für verschiedene Kraftwerke respektive Fischaufstiegshilfen ausgewertet. Am Raugerinne-Beckenpass des Kraftwerks Schiffmühle an der Limmat betrug er im Durchschnitt 2.2% und variierte im untersuchten Zeitraum zwischen 0% bis 4%. Am Einstieg des Schlitzpasses (HKW) des Kraftwerks Rüchlig an der Aare sind es im Durchschnitt knapp 1% (Variation zwischen 0.8% bis 1.8%), während es im Rhein bei 6 der 7 untersuchten Fischaufstiegshilfen weniger als 1% sind (Variation zwischen 0.1% bis 3.8%). Anhand der Fischdaten konnte kein klarer Zusammenhang zwischen der Lockwassermenge und der Auffindbarkeit festgestellt werden. Allerdings ist es nicht möglich, anhand der Auffindbarkeitsdaten eine klare Unterscheidung zwischen Attraktion (Anteil ausgesetzter Fische, die den Einstieg auffinden) und Einstieg (Anteil Fische, die den Einstieg auffinden und in die Fischaufstiegshilfe einsteigen) vorzunehmen. Diese Unterscheidung ist wichtig, um zu beurteilen, ob die Lockwassermenge einen Einfluss auf die Attraktion der Fische ausübt.

Die Passierbarkeit lag an allen Kraftwerken im Bereich von 38% bis 78%. Es gab Unterschiede in den Passage- und Transitzeiten zwischen verschiedenen Fischaufstiegshilfen sowie den fünf häufigsten Fischarten (Alet, Barbe, Egli, Rotaugen und Schneider). Diese Unterschiede sind stark standortabhängig. Die Passagezeit (umfasst alle Aufstiegsversuche bis zur ersten erfolgreichen Passage) liefert Hinweise auf potenzielle Verzögerungen der Fischmigration, während die Transitzeit (bezieht sich nur auf die direkte Passage) angibt, wie schnell der tatsächliche Aufstieg durch die Fischaufstiegshilfe erfolgt. Die Analyse der Transitzeit zeigte, dass die Passierbarkeit der Fischaufstiegshilfen innerhalb relativ kurzer Zeit erfolgte. Fischaufstiegshilfen werden primär gebaut, um Wanderhindernisse zu überwinden und somit die Vernetzung zwischen Ober- und Unterwasser wiederherzustellen. Falls ein sekundäres Ziel die Bereitstellung oder Wiederherstellung von Lebensräumen ist, könnte dies durch naturnahe Fischaufstiegshilfen wie Raugerinne-Beckenpass oder Umgehungsgewässer erreicht werden. Die

Lebensraumfunktion wurde in dieser Studie jedoch nicht untersucht. Um die potenziellen Auswirkungen längerer Passage- und Transitzeiten in verschiedenen Fischaufstiegshilfen zu ermitteln, ist es notwendig, klare Ziele für jede Fischaufstiegshilfe festzulegen. Diese Ziele sollten als Teil der Wirkungskontrolle kommuniziert und diskutiert werden.

2 Einführung und Hintergrund

2.1 Ausgangslage

In der Schweiz existieren etwa 2000 Bauwerke, die aufgrund der Nutzung von Wasserkraft die Wanderung von Fischen beeinträchtigen (BAFU, 2022). Rund 700 dieser Hindernisse behindern den Fischaufstieg. Im Jahr 2014 verfügten lediglich 15% dieser Hindernisse über funktionsfähige Fischaufstiegshilfen. Das übergeordnete Ziel ist, bis 2030 sämtliche wasserkraftbedingte Hindernisse hinsichtlich Fischgängigkeit zu sanieren, um die Vernetzung der Lebensräume der Gewässer wiederherzustellen (BAFU, 2022). Damit eine Fischaufstiegshilfe als funktionsfähig eingestuft werden kann, sollten alle wanderwillige Fischarten diese problemlos auffinden, einsteigen und passieren können (Bunt et al., 2012; Silva et al., 2018). Die Definition der Funktionalität sollte auf einer Reihe von Zielen basieren, die für die jeweilige Fischaufstiegshilfe definiert wurden, einschliesslich der Zielarten und der Art der Passage (Wilkes et al. 2018).

Erste Wirkungskontrollen an den drei Flüssen Limmat, Aare und Rhein haben gezeigt, dass die Auffindbarkeit der Fischaufstiegshilfen im Vergleich zur Passierbarkeit gering ist (Breitenstein et al., 2019; Schölzel et al., 2020; Schwevers et al., 2020). Die geringe Auffindbarkeit stellt ein weltweites Problem dar (Hershey, 2021; Ovidio et al., 2017; Silva et al., 2012; Wilkes et al., 2018). Um die Effektivität der Fischaufstiegshilfen zu verbessern, ist eine eingehende Analyse der Gründe für diese geringe Auffindbarkeit erforderlich, gefolgt von Optimierungen.

2.2 Technischer Hintergrund

Um die Wirksamkeit von Fischaufstiegshilfen zu überprüfen, werden nach deren Errichtung Wirkungskontrollen durchgeführt. Eine weit verbreitete Methode hierfür ist das PIT-Tag Monitoring. Bei diesem Verfahren werden Antennen in den Fischaufstiegshilfen installiert, um über einen festgelegten Zeitraum die Wanderung von Fischen zu überwachen, die mit PIT-Tags (Passive Integrated Transponder) versehen sind. Durch diese Überwachung kann festgestellt werden, wie gut die Fischaufstiegshilfen von den Fischen gefunden und passiert werden. Das Hauptziel einer Fischaufstiegshilfe besteht darin, dass Fische sie ohne wesentliche Zeitverzögerung und Verletzungen finden und passieren können (BAFU, 2022; Roscoe & Hinch, 2010).

Um die Effizienz einer Fischaufstiegshilfe genau zu bestimmen, spielen drei verschiedene Metriken eine entscheidende Rolle. Obwohl diese in der Literatur häufig diskutiert werden, sind sie in verschiedenen Studien unterschiedlich definiert und berechnet (Bunt et al., 2012; Castro-Santos et al., 2009; Grimardias et al., 2022; Hershey, 2021; Kemp, 2016; Noonan et al., 2012; Ovidio et al., 2017; Roscoe & Hinch, 2010; Silva et al., 2018; Thiem et al., 2013). Diese Uneinheitlichkeit kann zu Verwirrungen führen und erschwert somit häufig einen effektiven Vergleich der Metriken zwischen verschiedenen Studien. Die erste Metrik ist die *Attraktionseffizienz*. Sie beschreibt den Anteil der ausgesetzten Fische, die den Einstiegsbereich der Fischaufstiegshilfe im Unterwasserbereich findet, ohne in die Fischaufstiegshilfe einzusteigen. Die zweite Metrik ist die *Einstiegseffizienz*. Sie gibt an, wie viele der angelockten Fische tatsächlich in die Fischaufstiegshilfe einsteigen. Die dritte Metrik ist die *Passageeffizienz*. Sie beschreibt, wie viele der eingetretenen Fische den gesamten Weg bis zum Ausgang der Fischaufstiegshilfe im Oberwasser erfolgreich zurücklegen (Castro-Santos, 2012; Castro-Santos et al., 2009). Die genannten Metriken und die jeweiligen Zeitfaktoren für jede Metrik sind entscheidend, um die Effektivität und den Erfolg einer Fischaufstiegshilfe zu bewerten. Anhand der Erkenntnisse können gegebenenfalls Anpassungen vorgenommen werden, um die Funktionalität der Fischaufstiege zu verbessern (Bunt et al., 2012; Castro-Santos, 2012; Castro-Santos et al., 2009).

Damit Fische die Fischaufstiegshilfe finden und erfolgreich passieren können, müssen gewisse Richtwerte eingehalten werden, wie sie in verschiedenen Regelwerken (BAFU, 2022; DWA, 2016; Weichert et al., 2013) beschrieben sind. Die Regelwerke basieren auf den Ergebnissen von Experimenten sowie dem Fachwissen von Experten.

Die beschriebenen Metriken (Attraktions-, Einstiegs- und Passageeffizienz) werden durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Die Attraktion der Fische wird massgeblich durch die Position des Eingangs und der Lockwassermenge respektive der Leitströmung beeinflusst. Fische neigen dazu, der Hauptströmung zu folgen und bevorzugen Bereiche entlang der Ufer, in denen sie am effizientesten gegen die Strömung schwimmen können (BAFU, 2022; Pavlov, 1989). Die Leitströmung, also die am Einstieg der Fischaufstiegshilfe erzeugte Strömung, sollte die Fische zum Eingang der Fischaufstiegshilfe führen (BAFU, 2022; Larinier, 2002). Für den Einstieg spielen folgende Faktoren eine Rolle: der Mündungswinkel, die Fliessgeschwindigkeit, die Sohlbindung, sowie die Geometrie des Einstiegs (z.B. durchgehender Schlitz oder Schlupfloch) (Pavlov, 1989; BAFU, 2022; Weichert et al., 2013). Für die Passierbarkeit sind geometrische und hydraulische Faktoren wie die Dimensionierung der Becken, die Fliessgeschwindigkeit oder die Leistungsdichte entscheidend. Detaillierte Informationen zu all diesen Faktoren sind in den Richtlinien des BAFU zu finden, da sie einen umfassenden Leitfaden für die Gestaltung und Beurteilung der Funktionsfähigkeit von Fischaufstiegshilfen bieten.

2.3 Ziele und Fragen der Studie

Die Ökohydraulik-Gruppe des Stocker Lab der ETH Zürich erhielt im Dezember 2022 vom BAFU den Auftrag, anhand bereits erhobener Daten eine vertiefte Studie zur Analyse potenzieller Faktoren, die die Auffindbarkeit und Passierbarkeit von Fischaufstiegshilfen beeinflussen können, durchzuführen. Ein besonderer Schwerpunkt lag dabei unter anderem auf hydraulischen Messungen im Unterwasserbereich von Fischaufstiegshilfen sowie in den Fischaufstiegshilfen selbst. Diese Messkampagne wurde von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich durchgeführt und ausgewertet. Die in der Studie gewonnenen Erkenntnisse sollen als Grundlage für Empfehlungen für weitere Studien zur Optimierung von Fischaufstiegshilfen dienen. Die Leitfragen, die diesem Projekt zugrunde liegen, lauten wie folgt:

- 1) Wie unterscheiden sich Auffindbarkeit und Passierbarkeit zwischen verschiedenen Fischaufstiegshilfen am gleichen Standort?
- 2) Unterscheidet sich die Auffindbarkeit zwischen Fischarten/Grössenklassen?
- 3) Sind Fischaufstiegshilfen mit höherer Lockwassermenge effizienter in der Attraktion von Fischen und der Bereitstellung des Einstiegs?
- 4) Welche Strömungsbedingungen im Unterwasser von Wasserkraftwerken führen zu einem besseren Einstieg der Fische?
- 5) Unterscheidet sich die Passierbarkeit zwischen Fischarten/Grössenklassen?
- 6) Wie sehen die Strömungsverhältnisse innerhalb der Fischaufstiegshilfen aus, stimmen sie mit den Bestimmungen und Richtwerten überein?
- 7) Welche Hauptfaktoren beeinflussen die Passage an verschiedenen Standorten, die bei der Planung und Gestaltung neuer (grosser und kleiner) Fischaufstiegshilfen berücksichtigt werden müssen?

3 Methoden

3.1 PIT-Tag Monitoring

Das Markieren und Verfolgen von Fischen ermöglicht, den Anteil der Fische abzuschätzen, die durch eine Fischaufstiegshilfe wandern. Dadurch können die drei Metriken zur Effizienz einer Fischaufstiegshilfe berechnet werden. Eine der am häufigsten angewendeten Methode zur Beurteilung der Wirksamkeit von Fischaufstiegshilfen ist die Anwendung von PIT-Tags. Hierbei wird jedem gefangenen Fisch ein PIT-Tag mit einer individuellen Identifikationsnummer in die Bauchhöhle implantiert. In dieser Studie wurden sogenannte HDX (Half-Duplex) PIT-Tags verwendet. Die Grösse des PIT-Tags wird der Länge des Fisches nach gewählt und beinhaltet drei Optionen, 12 mm, 23 mm oder 32 mm (Skov et al., 2005; Vollset et al., 2018). In den verschiedenen FAH-Anlagen sind Antennen installiert, die aktiviert werden, sobald ein Fisch in die Nähe der Antenne schwimmt. Durch eine magnetisch-induktive Kopplung wird der PIT-Tag aktiviert, und die Antenne sendet die Identifikationsnummer an ein Lesegerät. Dieses Lesegerät empfängt und protokolliert die Daten. Anhand dieser Informationen ist es möglich, die Passage einzelner Fische durch spezifische Antennen zu verfolgen.

3.1.1 Untersuchungsstandorte

Die Daten der Wirkungskontrollen stammen aus drei verschiedenen Flusssystemen: Limmat, Aare und Hochrhein. Insgesamt wurden sieben Wasserkraftwerke (Abbildung 1) untersucht, von denen jedes mit 1-3 Fischaufstiegshilfen ausgestattet ist. Dies ergibt insgesamt zwölf untersuchte Fischaufstiegshilfen. Die Daten wurden aus unterschiedlichen Gründen erhoben. In den Kraftwerken Rüchlig, Schiffmühle und Aue erfolgte eine Wirkungskontrolle nach dem Bau der Fischaufstiegshilfen. Bei den Kraftwerken am Rhein findet regelmässig eine koordinierte Fischzählung statt. Diese wurde erstmals auch mit der PIT-Tag Technologie durchgeführt. Die Fischaufstiegshilfen am Rhein wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Rahmen der Konzessionserneuerung neu erstellt (Augst-Wyhlen, Rheinfelden und Ryburg-Schwörstadt). Teilweise galten bei der Erstellung noch nicht die aktuellen Richtlinien. Das Kraftwerk Säkingen verfügt noch nicht über eine moderne Fischaufstiegshilfe, es ist gemäss der strategischen Planung sanierungspflichtig.

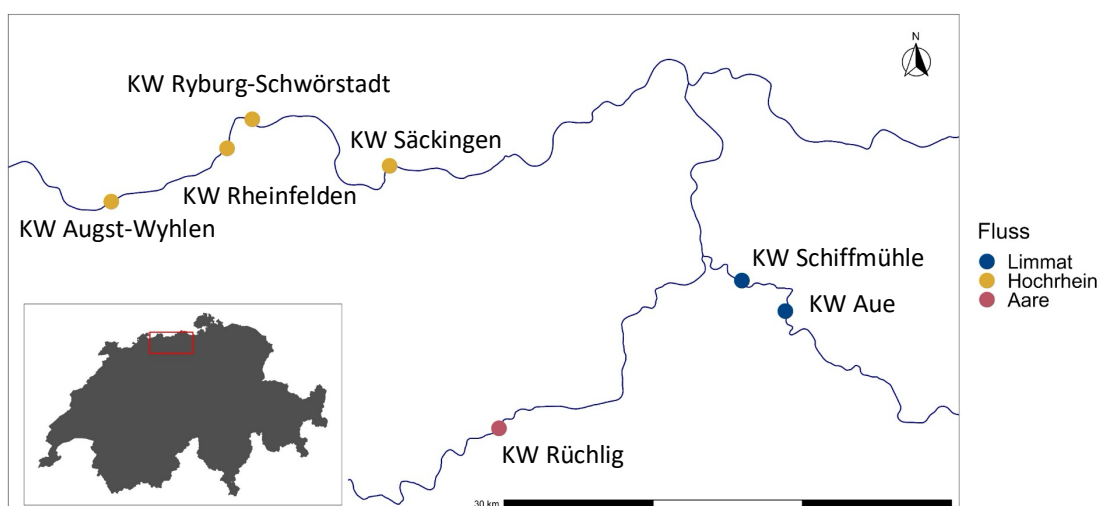


Abbildung 1: Untersuchungsstandorte der Wasserkraftwerke (KW). Die Karte zeigt das obere Rheineinzugsgebiet. Die blauen Punkte repräsentieren Kraftwerke an der Limmat, die gelben Punkte Kraftwerke am Hochrhein und der rote Punkt kennzeichnet das Kraftwerk an der Aare.

3.1.2 Fischaufstiegshilfen (FAH)

Es gibt unterschiedliche FAH-Typen, die in folgendem Abschnitt kurz beschrieben werden (siehe BAFU, 2022 und Seifert, 2016 für mehr Details).

Fischlift (FL)

Der Fischlift ist ein automatischer Aufzug, der die Fische in das Oberwasser transportiert. Die Fische durchschwimmen diese Struktur nicht eigenständig, sondern werden aktiv nach oben befördert und verlassen dann den Fischlift. In der Regel arbeiten diese Fischlifte in regelmässigen Zyklen von einer bis zu mehreren Stunden.

Beckenpass (BP)

Der Beckenpass besteht aus rechteckig aneinandergereihten Betonbecken. Die Zwischenwände der Becken können entweder ein Schlupfloch (Sohldurchlass), einen Kronenausschnitt oder beides besitzen. Die Anordnung der Einschnitte und Öffnungen erfolgt in diagonal versetzter Ausrichtung, um hinter der Trennwand eine ruhige Zone zu schaffen. Dadurch sind Fische nur beim Passieren der Trennwände hohen Strömungsgeschwindigkeiten ausgesetzt. Bei erhöhter Wassermenge können die Trennwände überströmt werden, andernfalls erfolgt der Durchfluss ausschliesslich durch die Aussparungen.

Schlitzpass (SP)

Der Schlitzpass ist eine Form des Beckenpasses. Im Gegensatz zum konventionellen Beckenpass weist der Schlitzpass in der Trennwand einen vertikalen Schlitz auf, der von der Beckensohle bis zur Wasseroberfläche reicht (Abbildung 2A). Diese Schlitze sind in aufeinanderfolgenden Becken in einer Reihe angeordnet. Häufig sind an den Trennwänden Umlenklöcke angebracht, die für eine stabile oder dissipierende Strömungsführung sorgen können.

Raugerinne-Beckenpass (RBP)

Der Raugerinne-Beckenpass, wie in Abbildung 2B dargestellt, setzt sich aus einem Raugerinne und einem Beckenpass zusammen. Im Gegensatz zum Schlitzpass bestehen die Trennwände zwischen den Becken im Raugerinne-Beckenpass aus versetzten Steinen (BAFU, 2022; Seifert, 2016). Die Lücken in den Steinriegeln der aufeinanderfolgenden Becken sind versetzt angeordnet (Seifert, 2016), wodurch die Strömung durch die Zwischenräume der Steine fließen kann und Kurzschlussströmungen verhindert werden. Bei stark schwankenden Wasserspiegeln kann dies jedoch die Leitströmung beeinträchtigen, da das Wasser den Steinriegel überströmt. Insgesamt bietet diese Fischaufstiegshilfe eine natürlichere Struktur im Vergleich zu den technischen Fischaufstiegshilfen und kann von Fischen auch als Lebensraum genutzt werden.

Umgebungsgewässer (UGG)

Das Umgebungsgewässer, wie in Abbildung 2C gezeigt, ist eine naturnah gestaltete Fischaufstiegshilfe, die Hindernisse auf Fischwanderungsrouten umgeht. Diese Form der Fischaufstiegshilfe unterstützt Fische nicht nur beim Überwinden von Hindernissen, sondern dient auch als Habitat. Umgebungsgewässer sind nicht dynamisch. Ihre Umsetzung bringt Herausforderungen mit sich, wie schwache Leitströmungen bei hohen Unterwasserständen oder die Gestaltung von Einstiegen. Im Vergleich zu anderen Fischaufstiegshilfen benötigt sie häufig mehr Platz und wesentlich mehr Wasser.



Abbildung 2: Fischaufstiegshilfen-Typen: A) Schlitzpass am Kraftwerk Schiffmühle an der Limmat; B) Raugerinne-Beckenpass am Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt am Rhein; C) Umgehungsgewässer am Kraftwerk Rheinfelden am Rhein.

3.1.3 Antennenaufstellung der jeweiligen FAH

Die Platzierung der Antennen innerhalb der Fischaufstiegshilfen sollte strategisch gewählt werden, um eine umfassende Erfassung der Fischbewegungen zu ermöglichen. Ihre gezielte Anordnung entlang der Aufstiegswege innerhalb der Fischaufstiegshilfe ermöglicht die Erfassung der Signale der von den Fischen getragenen PIT-Tags. Doppelantennen (d.h. zwei dicht hintereinander angeordnete Antennen) sind oft hilfreich, um die Schwimmrichtung zu erkennen, während Einzelantennen weniger umfassende Informationen über die Fischwanderung liefern. Bei den verschiedenen Wirkungskontrollen wurden aus unterschiedlichen Gründen (z.B. aufgrund technischer Probleme) unterschiedliche Antennenkonfigurationen verwendet. Dadurch kann die Anzahl und Positionierung der Antennen in den Fischaufstiegshilfen stark variieren. Es kann vorkommen, dass die ersten Antennen einer Fischaufstiegshilfe erst einige Becken nach dem eigentlichen Einstieg platziert sind. Im folgenden Abschnitt wird eine Übersicht über die verschiedenen Antennenkonfigurationen der Untersuchungsstandorte gegeben. In den beigefügten Schemata ist eine Übersicht über die jeweiligen Kraftwerke und deren Fischaufstiegshilfen zu finden. Die unterschiedlichen Antennenkonfigurationen sind wesentlich für die Datenanalyse und Interpretation der Ergebnisse. Detaillierte Informationen der Fischaufstiegshilfen können der Tabelle 1 entnommen werden.

Kraftwerk Schiffmühle

Das Kraftwerk Schiffmühle verfügt über eine kombinierte Fischaufstiegshilfe, bestehend aus einem Schlitzpass, der in den Raugerinne-Beckenpass mündet. Insgesamt wurden in dieser kombinierten Fischaufstiegshilfe fünf Antennen installiert (Abbildung 3A). Zwei aufeinanderfolgende Antennen befinden sich jeweils am Eingang des Schlitzpasses (SPu1, SPu2) und am Eingang des Raugerinne-Beckenpasses (RBPu1, RBPu2), während eine weitere Antenne am gemeinsamen Ausgang (RBPo1) positioniert ist. SPu1 markiert die Trennwand zwischen dem 2. und 3. Becken und SPu2 die Trennwand zwischen dem 4. und 5. Becken. RBPu1 befindet sich im Durchgang vom 3. ins 4. Becken, RBPu2 im Durchgang vom 5. ins 6. Becken, und RBPo1 befindet sich am Durchgang vom vorletzten ins letzte Becken. Der Eingang des Schlitzpasses ist direkt am Turbinenaustritt des Dotierkraftwerks, wobei sich der Eingang des Raugerinne-Beckenpasses weiter stromab befindet.

Kraftwerk Aue

Das Kraftwerk Aue befindet sich oberstrom des Kraftwerks Schiffmühle. In diesem Kraftwerk ist ein einzelner Schlitzpass implementiert (Abbildung 3B), dessen Eingang wenige Meter unterhalb des Dotierkraftwerks liegt. Am Eingang des Schlitzpasses sind zwei aufeinanderfolgende Antennen positioniert, wobei SPu1 sich zwischen dem 1. und 2. Becken befindet und SPu2 zwischen dem 4. und 5. Becken. SPo1 liegt am Ausgang des Schlitzpasses zwischen dem vorletzten und letzten Becken.

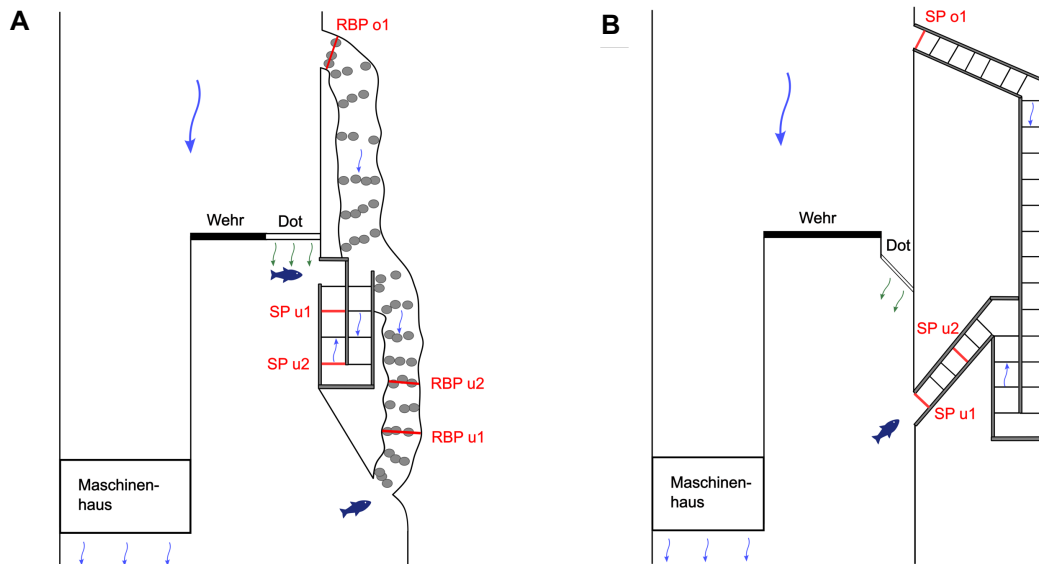


Abbildung 3: Schemata der zwei untersuchten Wasserkraftwerke an der Limmat mit deren Fischaufstiegshilfen und Antennenkonfiguration. A) Kraftwerk Schiffmühle, B) Kraftwerk Aue. Die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die grünen Pfeile markieren die Zusatzdotationen. Die Einstiege der Fischaufstiegshilfen sind mit Fischen symbolisiert. Die Darstellung der Länge und Anzahl der Becken entspricht nicht der Realität, sondern soll lediglich ein Überblick der Fischaufstiegshilfen und Antennenanordnung vermitteln.

Kraftwerk Augst-Wyhlen

Das Kraftwerk Augst-Wyhlen (Abbildung 4A) liegt am weitesten stromabwärts der vier Kraftwerke am Hochrhein. Hier sind die Maschinenhäuser parallel zur Hauptfließrichtung angeordnet. Es gibt drei verschiedene Fischaufstiegshilfen an dieser Anlage. Am orografisch rechten Ufer befindet sich ein Raugerinne-Beckenpass, am linken Ufer ein Schlitzpass und direkt am Wehr ein Fischlift. Die Antennenkonfigurationen variieren in allen drei Fischaufstiegshilfen.

Im Schlitzpass wurden die Antennen SPu1 zwischen dem 8. und 9. Becken und SPu2 zwischen dem 9. und 10. Becken installiert. Am Ausgang folgen zwei weitere Antennen. Die Antenne SPo2 ist zwischen dem viert- und drittletzten Becken und SPo1 zwischen dem dritt- und vorletzten Becken vor dem Ausgang positioniert. Am Einstieg erfolgt eine zusätzliche Dotation durch eine Bypassleitung.

Der Raugerinne-Beckenpass hatte während des Untersuchungszeitraums zwei unterschiedliche Antennenkonfigurationen. Vor Mai 2019 bestand die Antennenkonfiguration aus den rot markierten Antennen (RBPu3 zwischen dem 6. und 7. Becken und RBPu4 zwischen dem 7. und 8. Becken) sowie am Ausgang aus den beiden Antennen RBPo2 zwischen dem vorletzten und letzten Becken und RBPo1 direkt am Ausgang. Im Jahr 2019 wurde aufgrund starker Unterschiede im Wasserspiegel eine Dotierturbine nahe dem Eingang eingebaut, um die Leitströmung zu verstärken. Daher waren die Antennen in einem Zeitraum von zehn Monaten nicht in Betrieb, und zwar vom 31. Juli 2017 bis zum 24. Mai 2018. Ab Mai 2019 wurden vier neue Antennen hinzugefügt. Zwei Antennen wurden sehr nahe am Eingang installiert (RBPu1 zwischen dem 2. und 3. Becken und RBPu2 zwischen dem 3. und 4. Becken). Ein weiteres Antennenpaar zwischen dem 16. und 17. Becken (RBPu5) und zwischen dem 17. und 18. Becken (RBPu6) installiert.

Der Fischlift verfügt über eine Antenne am Eingang (FLu1) und eine in der Nähe des Ausgangs, wenn der Lift im Oberwasserbereich ankommt (FLo1). Der Fischlift war aufgrund des Baus der Dotierturbine im Raugerinne-Beckenpass und aufgrund von Wartungsarbeiten ebenfalls teilweise ausser Betrieb, und zwar vom 16. Juni 2017 bis zum 17. Mai 2018. Der Fischlift besitzt eine Dotationswasserleitung im Einstieg, um die Fische verstärkt anzulocken.

Es ist zu beachten, dass sich auf der orografisch linken Uferseite eine Schleuse befindet, die ebenfalls Fischen die Passage ins Oberwasser ermöglicht, jedoch wurden hier keine Antennen installiert.

Kraftwerk Rheinfelden

Das Kraftwerk Rheinfelden liegt oberstrom des Kraftwerks Augst-Wyhlen und verfügt über drei verschiedene Fischaufstiegshilfen (Abbildung 4B). Orografisch am linken Ufer direkt am Maschinenhaus befindet sich ein Schlitzpass, mittig unterhalb des Wehrs eine Raugerinne-Beckenpass, und am orografisch rechten Ufer ein Umgehungsgewässer.

Die ersten Antennen des Schlitzpasses sind bereits weit in der Fischaufstiegshilfe platziert. Die erste Antenne, SPu1, befindet sich zwischen dem 16. und 17. Becken, während die zweite Antenne SPu2 zwischen dem 17. und 18. Becken installiert ist. Auch im Ausgangsbereich sind die Antennen weit in der Fischaufstiegshilfe positioniert (SPo2 und SPo1) und mehrere Meter entfernt vom Ausgang. Im Ausgangsbereich gibt es keine eigentlichen Becken. Die Fischaufstiegshilfe ist hier ein Kanal mit rechteckigem Querschnitt.

Der Raugerinne-Beckenpass verfügt über zwei Antennen, RBPu1 zwischen dem 4. und 5. Becken und RBPu2 zwischen dem 5. und 6. Becken. Im Ausgangsbereich sind ebenfalls zwei Antennen platziert, eine vom drittletzten zum zweitletzten Becken (RBPo2) und eine weitere vom zweitletzten zum letzten Becken (RBPo1). Diese Antennen befinden sich jedoch nicht direkt am Ausgang. Diese Fischaufstiegshilfe endet unterhalb des kleinen Fischwehrs in das Umgehungsgewässer.

Im Umgehungsgewässer sind die beiden Eingangsantennen am Ende einer der Mündungsrampen installiert (UGGu1 und UGGu2). Im zweiten Einstieg konnte aufgrund technischer Schwierigkeiten keine Antenne installiert werden. Oben sind fünf Antennen positioniert, davon drei entlang des kleinen Fischwehrs (UGGo3) und zwei am Zählbecken (UGGo2 und UGGGo1). Allerdings funktionierten die letzten beiden Antennen nur bis Ende Juni 2017 während der Fischzählung, danach wurde das Fischwehr entfernt und die drei Antennen UGGGo3 genutzt.

Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt

Die Fischaufstiegshilfe am Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt besteht aus einer Kombination von einem Schlitzpass, der in einen Raugerinne-Beckenpass mündet (Abbildung 4C). Im Schlitzpass gibt es zwei Einstiege, einen auf der Seite des Maschinenhauses und einen auf der Wehrseite. Der Raugerinne-Beckenpass verfügt ebenfalls über zwei Einstiege, eine direkt beim Turbinenablass und eine weiter stromabwärts.

Die Antennenkonfiguration im Schlitzpass hat sich im Verlauf der Studienperiode verändert. Zunächst waren nur zwei Antennen nahe der Mündung zum Raugerinne-Beckenpass installiert (SPu4 und SPu5). Nach Juni 2019, als eine Zusatzdotierung am Einstieg des Schlitzpasses hinzugefügt wurde, wurden weitere Antennen aufgestellt. Eine dieser neuen Antennen befindet sich auf der Seite des Maschinenhauses zwischen dem 1. und 2. Becken (SPu1) und eine auf der Wehrseite zwischen dem 1. und 2. Becken (SPu1b), gefolgt von zwei weiteren Antennen nach der Mündung der beiden Einstiege (SPu2 und SPu3).

Am Raugerinne-Beckenpass waren anfangs nur zwei Antennen nach der Mündung der beiden Einstiege platziert (RBPu1 und RBPu2), sowie eine am Ausgang des langen Gerinnes (RBPo1). Nach 2019 wurden auch hier zwei zusätzliche Antennenpaare installiert, eines unterhalb der Mündung des Schlitzpasses (RBPu3 und RBPu4) und eines oberhalb der Mündung (RBPu5 und RBPu6). Im Einstieg direkt am Maschinenhaus wurde eine Dotierturbine installiert, um die Leitströmung zu verstärken.

Kraftwerk Säckingen

Die Fischaufstiegshilfe am Kraftwerk Säckingen ist ein Beckenpass (Abbildung 4D). Der Einstieg des Beckenpasses befindet sich vergleichsweise weit stromabwärts des Maschinenhauses. Die ersten beiden Antennen wurden aufgrund technischer Probleme etwa in der Mitte der Fischaufstiegshilfe installiert (SPu1, SPu2). Die beiden Antennen am Ausgang sind relativ nahe am Ausgang positioniert (SPo2, SPo1).

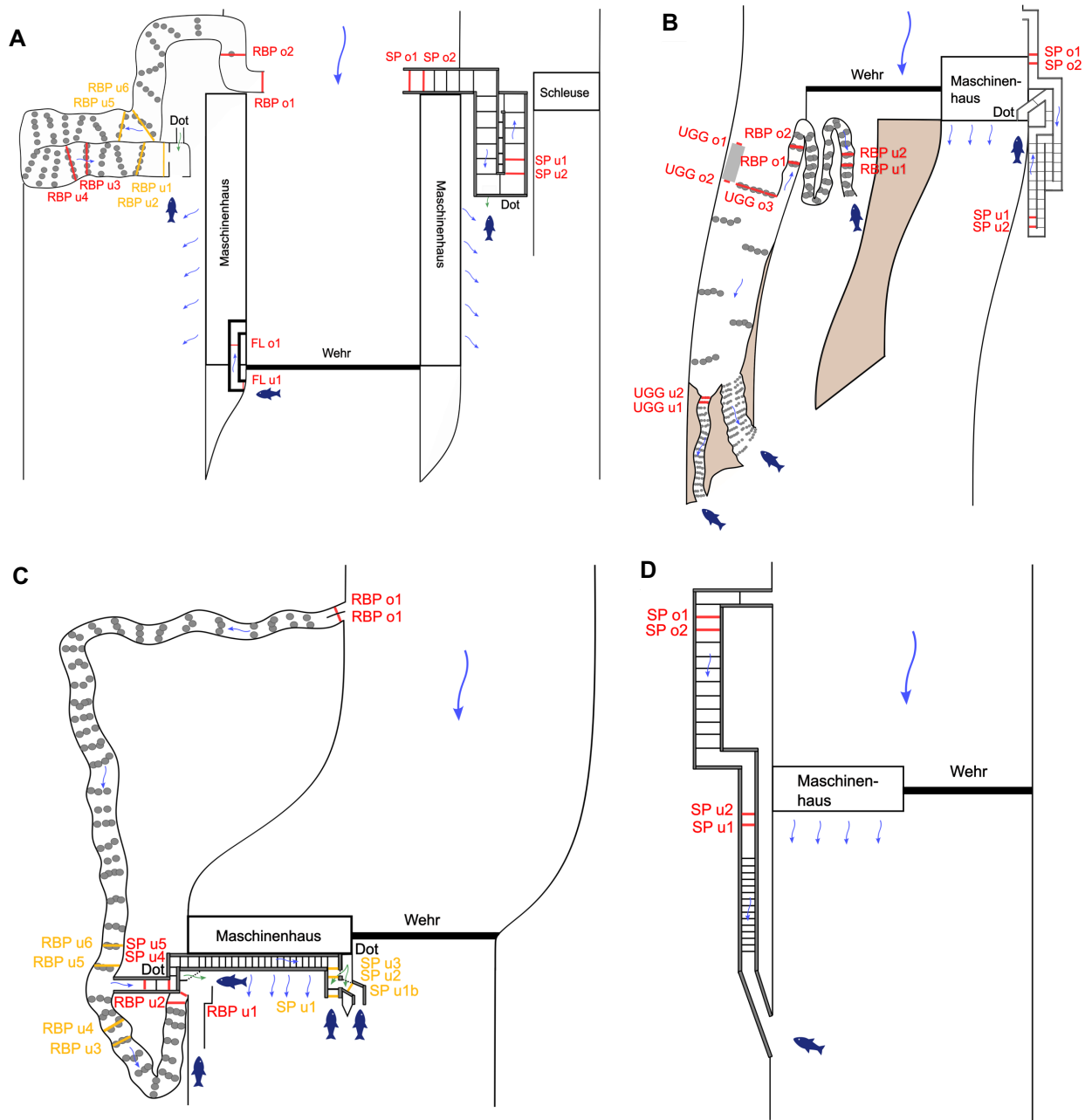


Abbildung 4: Schemata der vier untersuchten Wasserkraftwerke am Rhein mit deren Fischaufstiegshilfen und Antennenkonfigurationen. A) Kraftwerk Augst-Wyhlen, B) Kraftwerk Rheinfelden, C) Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt, D) Kraftwerk Säckingen. Die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die grünen Pfeile markieren die Zusatzdotationen. Die Einstiege der Fischaufstiegshilfen sind mit Fischen symbolisiert. Die Darstellung der Länge und Anzahl der Becken entspricht nicht der Realität, sondern soll lediglich ein Überblick der Fischaufstiegshilfen und Antennenanordnung vermitteln.

Kraftwerk Rüchlig

Das Kraftwerk Rüchlig an der Aare (Abbildung 5) besteht aus einem Hauptkraftwerk im orografisch linken Arm der Aare und ein Dotierkraftwerk im rechten Arm. Der Einlass des Schlitzpasses des Hauptkraftwerks ist mit einer Lockstrompumpe ausgestattet, die die Leitströmung verstärken soll. Die beiden Antennen im Schlitzpass erstrecken sich zwischen dem 2. und 3. Becken (SPu1) und dem 20. und 21. Becken (SPo1) von insgesamt 27 Becken.

Für den Schlitzpass des Dotierkraftwerks wird die Leitströmung durch die Dotierturbine verstärkt. Auch in diesem Schlitzpass befinden sich die erste Antenne zwischen dem 2. und 3. Becken (SPu1) und die Ausgangsantenne zwischen dem 20. und 21. Becken (SPo1) von insgesamt 25 Becken. Mit nur zwei Antennen (d.h. kein Antennenpaar) gestaltet sich die Bestimmung der Schwimmrichtung als herausfordernd und weniger sicher.

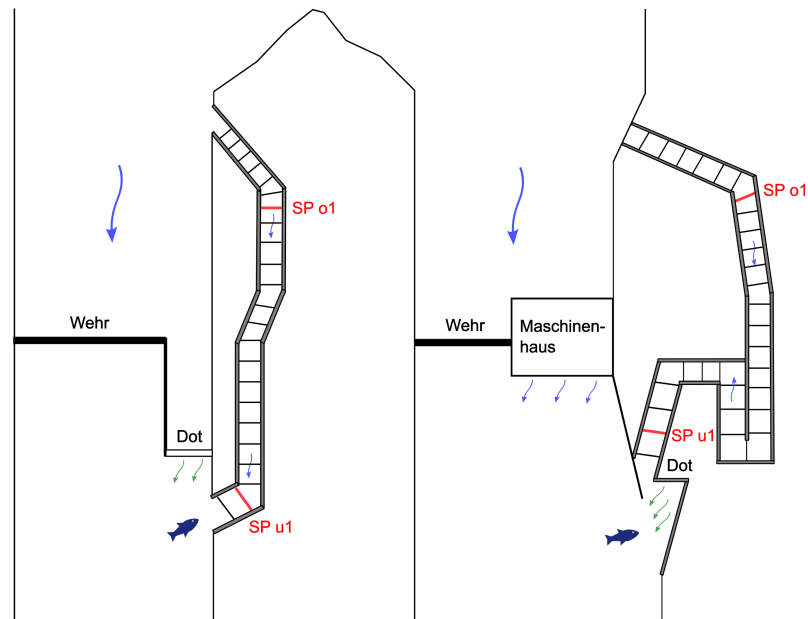


Abbildung 5: Schemata des Wasserkraftwerks Rüchlig an der Aare mit deren Fischaufstiegshilfen und Antennenkonfiguration. Die blauen Pfeile markieren die Fließrichtung. Die grünen Pfeile markieren die Zusatzdotationen. Die Einstiege der Fischaufstiegshilfen sind mit Fischen symbolisiert. Die Darstellung der Länge und Anzahl der Becken entspricht nicht der Realität, sondern soll lediglich ein Überblick der Fischaufstiegshilfen und Antennenanordnung vermitteln.

3.1.4 PIT-Tag Datensatz

Die Datensätze aus den drei verschiedenen Wirkungskontrollen wurden für diese Studie bereits bereinigt verwendet. Die Detektionsdaten wurden auf unterschiedliche Weisen erfasst. Es ist uns nicht bekannt, wie die Daten gefiltert wurden. Aus jeder Wirkungskontrolle wurden zwei Datensätze verwendet: einer enthielt Informationen zu individuell markierten Fischen (Tag-ID, Fangdatum und -zeit, Fangort, Datum und Zeit der Freisetzung, Freisetzungsstelle, Fischlänge), während der zweite Datensatz sämtliche erfasste Detektionen auflistete (Tag-ID, Datum und Zeit der Detektion, Antenne der Detektion). Für das Kraftwerk Rüchlig lagen keine genauen Zeitangaben der Freisetzung der Fische vor, sondern lediglich das Datum. Um die Daten für die Analyse zu verwenden, wurde ein Freisetzungszeitpunkt um 12:50 Uhr angenommen. Dies ist ein Mittelwert von der Uhrzeit der anderen freigelassenen Fische an anderen Standorten.

Datenmanagement und Standardisierung

Um mit allen Daten gemeinsam arbeiten zu können, wurden die beiden Datensätze (Markierungen und Detektionen) für jedes Kraftwerk zusammengeführt. Anschliessend wurden die einzelnen Datensätze bearbeitet, standardisiert und anschliessend die Daten aller Kraftwerke zu einem Datensatz zusammengeführt. Fische, die vor dem Aussetzen detektiert wurden, wurden für weitere Analysen ausgeschlossen. Am Kraftwerk Schiffmühle waren dies zehn Fische und am Kraftwerk Rheinfelden ein Fisch. Weiter wurden Fische, die 2016 im Vorprojekt von Armin Peter markiert wurden, für die Kraftwerke Augst und Rheinfelden ausgeschlossen, weil diese Daten unvollständig sind. Am Kraftwerk Augst wurden ausserdem Schwarzmundgrundeln für weitere Analysen ausgeschlossen.

Da das Ziel dieser Studie der Vergleich verschiedener Kraftwerke ist und nicht die Einzelauswertungen im Vordergrund stehen, werden die Resultate im Folgenden meistens anhand des Beispiels Kraftwerk Schiffmühle präsentiert und anschliessend ein Vergleich zwischen allen anderen Kraftwerken durchgeführt. Die Einzelauswertungen der Kraftwerke können im Anhang gefunden werden.

Alle statistischen Analysen, die in dieser Studie durchgeführt wurden, erfolgten unter Verwendung von R (R Core Team, 2022) innerhalb von R Studio (RStudio Team, 2023). Alle Diagramme und Grafiken für die Datenanalyse wurden mit dem Paket "ggplot2" erstellt.

Tagging und Freisetzung der Fische

In den drei Monitoringstudien wurden Fische an verschiedenen Standorten gefangen, markiert und wieder ausgesetzt. Um eine ausreichende Stichprobengrösse zu gewährleisten, wurden Fische aus den Zählbecken oder Fangreusen der jeweiligen Wasserkraftwerke für die Analyse verwendet. Lediglich am Kraftwerk Rüchlig wurden auch Fische aus dem Unterwasserbereich eingeschlossen, da die Stichprobengrösse aus dem Zählbecken zu klein war. Alle gefangenen Fische wurden unterhalb der Fischaufstiegshilfe ausgesetzt. Es ist bei der Interpretation zu beachten, dass Fische im Zählbecken möglicherweise besonders motiviert sein könnten, aufzusteigen, da sie die Fischaufstiegshilfe bereits zuvor gefunden haben. Unbekannt ist, ob dies das Verhalten der Fische beeinflusst. Sie könnten lernen, entweder nicht mehr einzusteigen, um Gefahren zu vermeiden, oder andererseits die Fischaufstiegshilfe schneller auffinden (Cooke & Hinch, 2013).

In der Studie von FishConsulting (Schölzel et al., 2020) wurde beobachtet, dass Fische, die beispielsweise im Oberwasser gefangen und unterhalb der Fischaufstiegshilfe ausgesetzt wurden, diese häufiger auffanden als Fische, die im Zählbecken gefangen wurden. Vermutlich sind Fische oberhalb des Kraftwerks motivierter zu migrieren und zeigen den "microhoming"-Effekt. Diese Beobachtung konnte jedoch nicht für alle Standorte bestätigt werden. Die Passagedauer zwischen den Standorten konnte nicht verglichen werden. Fische aus dem Unterwasserbereich haben möglicherweise die Fischaufstiegshilfe noch nie zuvor aufgefunden, was zu einer möglichen Verzögerung und geringeren Auffindbarkeit (Hershey, 2021) führen könnte. Dieser Aspekt wurde jedoch noch nicht ausreichend erforscht. Weitere Informationen und Details zu Zählbecken und Reusen sind in Tabelle 1 zu finden.

Fischarten

Um Vergleiche zwischen den verschiedenen Wasserkraftwerken zu ermöglichen, wurden insgesamt fünf Fischarten für die detailliertere Analyse ausgewählt. Alet (*Squalius cephalus*), Barbe (*Barbus barbus*), Egli (*Perca fluviatilis*), Rotaugen (*Rutilus rutilus*) und Schneider (*Alburnoides bipunctatus*). An den Kraftwerken Aue, Augst und Säkingen wurden nur Alet, Barbe und Rotaugen untersucht. In Rüchlig wurden lediglich zwei Fischarten analysiert: Alet und Barbe. Folgende Auswahlkriterien galten für die Fischarten:

- Stichprobengrösse (häufigste Arten)
- Zielarten (Dönni & Spalinger, 2017; Spalinger & Bammatter, 2017)
- Arten unterschiedlicher Gilden
 - Schwimmschwache, eher kleine Fischarten: Egli, Rotaugen, Schneider
 - Schwimmstarke, eher grössere Fischarten: Alet, Barbe

Tabelle 1: Liste der Kraftwerke mit wichtigen technischen Daten

Fluss	Studien- periode	Kraftwerk& Zähl- einrichtung	Breite [m]	Anzahl markierte Fische	FAH	Anzahl Becken	H [m] *	Δh [m] **	P_V [W/m ³] ***
Limmat	September 2017 – Februar 2020	Schiffmühle	26	2880	Kombinierter SP	10 [1]	3	0.15 [1]	≤100
		Zählbecken			Kombinierter RBP	25 [1]	3.15	0.15 [1]	≤100
	Juni 2018 – Februar 2020	Aue Reuse	45	239	SP	34 [1]	4.48	0.14 [1]	≤100
Rhein	April 2017 – Dezember 2019	Augst- Wyhlen Reuse (SP/FL)	290	2447	FL	-	6.75	-	-
					SP	33 [2]	4.6	0.20 [2]	>100 [2]
					RBP	39 [2]	5.61; 6.29 ab 2019	0.17 [2]	>100 [2]
	Zählbecken Zählung bis Juni 2017	Zählbecken (RBP)	340	2774	UGG	75 [2]	3.74	0.15 [2]	≤100 [2]
					SP	61 [2]	6.45 [2]	0.15 [2]	>100 [2]
					RBP	44 [2]	5.85	0.15 [2]	>100 [2]
		Ryburg- Schwörstadt Zählbecken	224	4003	Kombinierter SP	45 [2]	5.31; 10.47 ab 2019	0.12 [2]	≤100 [2]
					Kombinierter RBP	76 [2]	9.62	0.13 [2]	≤100 [2]
		Säckingen Reuse	233	2979	BP	56 [2]	4.16	0.16 [2]	≤100 [2]
Aare	Okttober 2015 – Juni 2018	Rüchlig Zählbecken (DKW& HKW)	90	787	SP Dotierkraftwerk (DKW)	27 [3]	2.66	0.14 [3]	>100 [3]
	Zählbecken Zählung: Januar – Dezember 2017		77		SP Hauptkraftwerk (HKW)	25 [3]	2.52	0.14 [3]	>100 [3]

* H [m] = Fallhöhe zwischen erster und letzter Antenne

** Δh [m] = durchschnittliche Wasserspiegeldifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgende Becken*** P_V [W/m³] = Leistungsdichte

3.2 Definitionen und statistische Methoden

3.2.1 Definition der Metriken

Aufgrund der vorliegenden PIT-Tag Daten ist es nicht möglich, die drei in der Literatur bekannten Metriken für die Effizienz von Fischaufstiegshilfen zu berechnen. Da sich die ersten Antennen teilweise erst einige Becken oberstrom des Einstiegs der Fischaufstiegshilfen anstatt im unmittelbaren Eingangsbereich befinden, werden nur zwei Metriken definiert. Dadurch soll versucht werden, die Ergebnisse der verschiedenen Wirkungskontrollen bestmöglich vergleichbar zu machen. Anstelle einer Unterscheidung zwischen Attraktions- und Einstiegseffizienz, wird in dieser Studie nur ein Wert berechnet (Hershey, 2021), nämlich die Auffindbarkeit (Abbildung 6B). Die Attraktionseffizienz kann mit PIT-Tags nicht korrekt berechnet werden (Schölzel et al., 2020), da nur ein begrenzter Radius von ca. 50 bis 100 cm um die erste Einstiegsantenne abgedeckt werden kann. Damit wird nicht der gesamte Bereich vor dem Einstieg einer Fischaufstiegshilfe abgedeckt, der für eine genaue Berechnung der Attraktionseffizienz notwendig wäre. Die Verwendung einer allgemeinen Auffindbarkeit bei Fischaufstiegshilfen mit Antennen weit stromaufwärts des Eingangsbereichs, könnte dazu führen, dass die prozentuale Anzahl der erfassten Fische geringer ausfällt als die tatsächliche Anzahl derjenigen, die die Fischaufstiegshilfe finden und einsteigen. Zur Ermittlung der Auffindbarkeit und Passierbarkeit der Fischaufstiegshilfen wurden folgende Metriken verwendet (Abbildung 6):

- **Auffindbarkeit (Abbildung 6B):**

Doppelantenne am Eingang der Fischaufstiegshilfe: Die Anzahl Fische, deren erste Detektion an der ersten Eingangsantenne erfolgt (N_{Find}), wird durch die Anzahl der markierten Fische, die im Unterwasser freigelassen werden (N_{Rel}), geteilt. Falls die allererste Detektion nicht an der ersten, sondern an der zweiten Antenne des Doppelsystems stattfindet, wird diese berücksichtigt.

Einzelantenne am Eingang der Fischaufstiegshilfe: Die Anzahl Fische, deren erste Detektion an der Eingangsantenne erfolgt (N_{Find}), wird durch die Anzahl der markierten Fische, die im Unterwasser freigelassen werden (N_{Rel}), geteilt.

$$F = \frac{N_{Find}}{N_{Rel}}$$

- **Passierbarkeit (Abbildung 6B):**

Doppelantenne am Ausgang der Fischaufstiegshilfe: Die Anzahl Fische, deren letzte Detektion an der letzten Ausgangsantenne erfolgt (N_{Pass}), wird durch die Anzahl der Fische, die die Fischaufstiegshilfe aufgefunden haben (N_{Find}), geteilt. Falls die allerletzte Detektion nicht an der letzten, sondern an der zweitletzten Antenne (hier nicht abgebildet) des Doppelsystems stattfindet und keine weitere Detektion folgt, wird diese berücksichtigt.

Einzelantenne am Ausgang der Fischaufstiegshilfe: Die Anzahl Fische, deren letzte Detektion an der Ausgangsantenne erfolgt (N_{Pass}), wird durch die Anzahl der Fische, die die Fischaufstiegshilfe aufgefunden haben (N_{Find}), geteilt.

Für die Passierbarkeit wurde die erste erfolgreiche Passage durch die Fischaufstiegshilfe gezählt. Um Passagen zu unterscheiden, wurden anhand von unterschiedlichen Regeln Events erstellt, welche im Anhang für das Beispiel Kraftwerk Schiffmühle zu finden sind. Durch die Erstellung unterschiedlicher Events, konnten vollständige Passagen identifiziert werden.

$$P = \frac{N_{Pass}}{N_{Find}}$$

- **Gesamte Effizienz der FAH:**

Die Anzahl der Fische, die die gesamte Fischaufstiegshilfe passiert haben, wird durch die Anzahl der Fische geteilt, die im Unterwasser freigesetzt wurden.

$$O = \frac{N_{Pass}}{N_{Rel}}$$

- **Zeit bis zum Einstieg:**

Die Zeit bis zum Einstieg ist die Zeitdifferenz zwischen dem Aussetzen und der allerersten Detektion an der ersten Eingangsantenne. Analog zur Auffindbarkeit wird die erste Detektion an der zweiten Eingangsantenne berücksichtigt, wenn die erste Detektion nicht an der ersten Antenne erfolgte. Es ist zu beachten, dass die Distanz vom Aussetzpunkt bis zum Einstiegspunkt in diese Berechnung nicht einbezogen wird. Da an jedem Kraftwerk die Freisetzung der Fische an unterschiedlichen Orten erfolgte und die Eingangsantennen unterschiedlich weit in den Fischaufstiegshilfen positioniert wurden, konnte dieser Parameter nicht über alle Kraftwerke standardisiert werden. Dies kann die Ergebnisse beeinflussen und die Ergebnisse sollten daher nicht direkt verglichen werden.

- **Passagezeit (Ptime):**

Die Passagezeit gilt als Zeitdifferenz zwischen der allerersten Detektion an der ersten Eingangsantenne bis zur letzten Detektion an der obersten Ausgangsantenne der ersten erfolgreichen Passage (Abbildung 7A) (Keefer et al., 2021). Analog zur Auffindbarkeit wird die erste Detektion an der zweiten Eingangsantenne berücksichtigt, wenn die erste Detektion nicht an der ersten Antenne erfolgte. Und analog zur Passierbarkeit wird die letzte Detektion an der zweitletzten Ausgangsantenne berücksichtigt, wenn die allerletzte Detektion nicht an der letzten Ausgangsantenne erfolgte.

Die Passagezeit spielt eine entscheidende Rolle, da sie Aufschluss darüber gibt, ob das Migrationsverhalten der Fische durch die Fischaufstiegshilfe beeinflusst wird und ob dies zu Verzögerungen ihrer Wanderung führen kann. Wenn die Passagezeit ungewöhnlich lang ist und sich die erste Antenne direkt am Eingang befindet, könnte dies auf ein Problem im Einstieg hinweisen. Dies könnte während der Laichzeit problematisch sein, da die Fische nur eine begrenzte Zeit haben, um zu ihren Laichplätzen zu gelangen.

- **Transitzeit (Ttime):**

Die Transitzeit bezeichnet die Zeitdifferenz zwischen der letzten Detektion der ersten oder zweiten Antenne (nur wenn keine Detektion an der ersten Antenne erfolgt), bis zur letzten Detektion der zweitobersten (nur falls danach keine weitere Detektion folgt) oder obersten Antenne der ersten erfolgreichen Passage der Fischaufstiegshilfe (Abbildung 7B). Diese Definition wurde leicht angepasst, um die letzte Detektion der obersten Antenne zu berücksichtigen (Bravo-Córdoba et al., 2018; Castro-Santos et al., 1996; Sullivan et al., 2023). Dadurch soll sichergestellt werden, dass die Fische ihren Aufstieg abgeschlossen haben und die Differenz zwischen Passage- und Transitzeit hauptsächlich auf die zusätzlich benötigte Auffindbarkeitszeit fokussiert ist. Die Transitzeit kann somit nie länger als die Passagezeit sein. Um die Transitzeit zwischen Fischaufstiegshilfen zu vergleichen, wurden diese zusätzlich pro Höhenmeter berechnet. Somit hat die Transitzeit die Einheit Zeit pro Höhenmeter (Bravo-Córdoba et al., 2021). Der Höhenunterschied (H in Tabelle 1) zwischen den Antennen wurde abgeschätzt, indem die mittlere Wasserspiegeldifferenz pro Becken mit der Anzahl Becken zwischen den Antennen multipliziert wurde.

Die Transitzeit ist von grosser Bedeutung für die Beurteilung der Funktionalität der Durchquerung der Fischaufstiegshilfen. Eine vergleichsweise kurze Transitzeit deutet darauf hin, dass die Passage reibungslos funktioniert und keine Designprobleme innerhalb der Fischaufstiegshilfe bestehen.

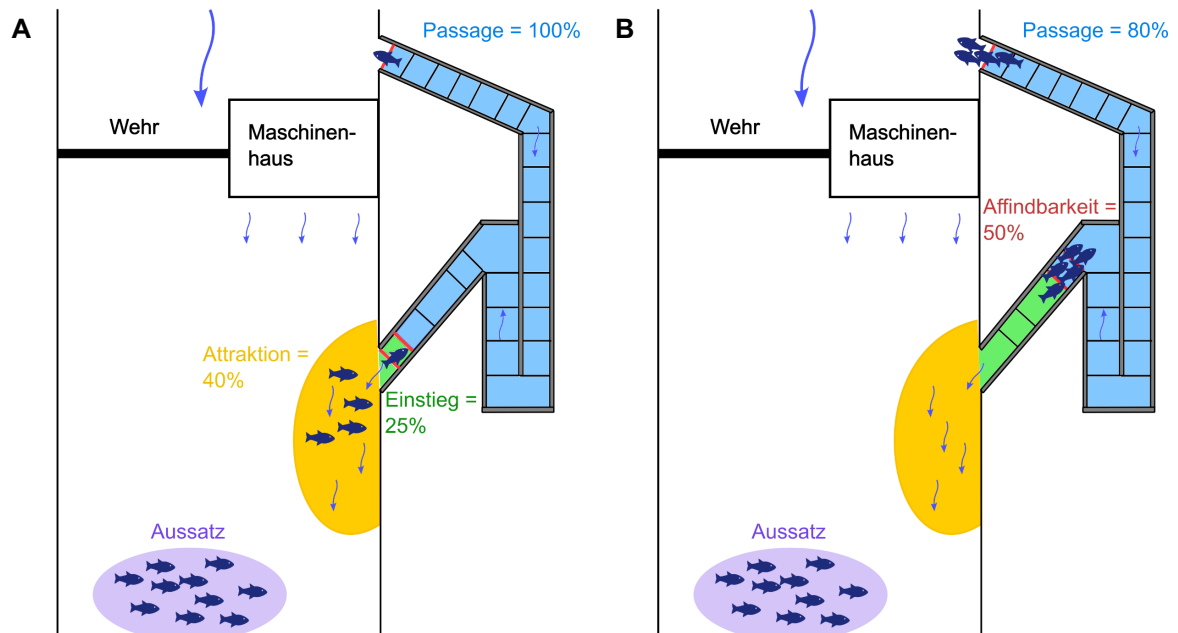


Abbildung 6: Schemata der unterschiedlichen Metriken. Teilbild A) zeigt die drei Metriken der Effizienz von Fischaufstiegshilfen auf, die idealerweise zu berechnen sind (Attraktions-, Einstiegs- und Passageeffizienz). $A = 4/10 = 40\%$; $E = 1/4 = 25\%$; $P = 1/1 = 100\%$; $O = 1/10 = 10\%$ (Gesamte Effizienz); Teilbild B) zeigt auf, welche Metriken anhand der vorliegenden Daten berechnet werden können (Auffindbarkeit und Passageeffizienz). $F = 5/10 = 50\%$; $P = 4/5 = 80\%$; $O = 4/10 = 40\%$ (Gesamte Effizienz). In violett sind die ausgesetzten Fische markiert ($N_{rel} = 10$); Fische, welche die erste oder zweite Antenne (Antennen in rot markiert) in der Fischaufstiegshilfe auffinden ($N_{Find} = 5$) und in blau die Fische, die schlussendlich die ganze Fischaufstiegshilfe passieren ($N_{pass} = 4$). In diesem Fall kann die Attraktions- (gelber Bereich) und Einstiegs- (grüner Bereich) nicht differenziert werden. Zusammengenommen sprechen wir von der Auffindbarkeit, welche hier nur mit den Antennen aufgezeigt wird (rote Antennen).

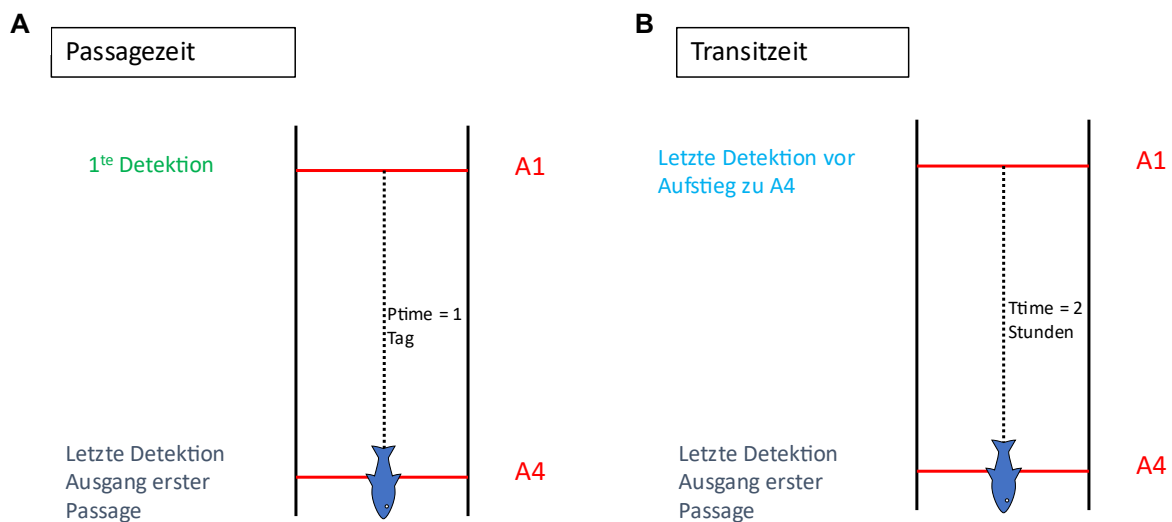


Abbildung 7: Bildliche Erklärung der Passage- und Transitzeit; A1 repräsentiert die erste Antenne im Einstieg und A4 die letzte im Ausstieg; A) Passagezeit (Ptime) = 1 Tag, B) Transitzeit (Ttime) = 2 Stunden

3.2.2 Time-to-Event Analyse

Die "Time-to-Event Analyse" ist eine statistische Methode, die verwendet wird, um die Effizienz von Fischaufstiegshilfen zu bewerten (Castro-Santos & Perry, 2012). Denn neben der Anzahl Fische, die eine Fischaufstiegshilfe auffinden, einsteigen und passieren, spielt der Zeitfaktor für diese unterschiedlichen Schritte ebenfalls eine wichtige Rolle (Nygqvist et al., 2017). Diese Analyse basiert auf der Erfassung der Passage-/Transitzeit von Fischen durch eine bestimmte Struktur, wie beispielsweise eine Fischaufstiegshilfe. Die Analyse kann auf akustische und radiotelemetrische Daten gut angewendet werden.

Die Vorgehensweise umfasst die Aufzeichnung der Zeitintervalle, die jeder Fisch benötigt, um die Anlage zu durchqueren, beginnend beim Einstieg in die Anlage bis zum Ausgang der Passage. Die gesammelten zeitlichen Daten werden analysiert, um Muster oder Einflüsse auf die Effizienz der unterschiedlichen Metriken der Fischpassage zu identifizieren.

Die "Time-to-Event Analyse" ermöglicht es, verschiedene Faktoren zu berücksichtigen, die die Passage-/Transitzeit beeinflussen können. Zu berücksichtigende Faktoren können Umweltbedingungen sein wie Wasserstand, Temperatur oder Strömungsgeschwindigkeit, sowie Merkmale der Fische selbst, wie Grösse oder Art. Ein wesentlicher Vorteil dieser Analyse liegt darin, dass sie sich nicht nur auf den Anteil der Fische bezieht, sondern auch auf zeitliche Einheiten. Dadurch können auch Parameter berücksichtigt werden, die sich im Laufe der Zeit verändern. Die Anwendung dieser Analyse ist sowohl für den Fischaufstieg als auch für den -abstieg relevant. Die Erkenntnisse aus dieser Analyse kann Einblicke in potenzielle Verbesserungen liefern, um Hindernisse für Fische zu verringern und die Überlebensrate während der Migration zu erhöhen. Die "Time-to-Event Analyse" bietet somit eine wichtige quantitative Grundlage zur Bewertung und Optimierung von Fischaufstiegshilfen. Anhand dieser Analyse wurden die Unterschiede der Auffindbarkeit und Passierbarkeit der fünf häufigen Fischarten (Alet, Barbe, Egli, Rotaue und Schneider) untersucht.

Die Funktion "survfit" aus den R-Paketen "survival" (Therneau, 2022) und "survminer" (Kassambara et al., 2021) kann benutzt werden, um die Wahrscheinlichkeit abzuschätzen und zu visualisieren, dass Fische Fischaufstiegshilfen innerhalb einer festgelegten Zeitspanne finden oder passieren können. Das Auffinden oder Passieren einer Fischaufstiegshilfe ist ein Event, welcher in dieser Untersuchung als abhängige Variable verwendet wird. Wenn keine Fischaufstiegshilfe von Fischen gefunden wird, führt dies zu sogenannten "zensierten" Daten, da das Ereignis bis zum Beobachtungsendpunkt nicht eintritt. Folglich werden die Zeitspannen von der Freisetzung der Fische bis zum Studienende verwendet.

Die Kaplan-Meier-Schätzung der Überlebenskurve visualisiert diese Aspekte. Hierbei repräsentiert die "Überlebenszeit" den Zeitraum, den ein Fisch benötigt, um die Fischaufstiegshilfen zu finden oder zu passieren. Diese Methode berücksichtigt, dass einige Fische die Fischaufstiegshilfe gefunden haben, während andere bis zum Studienende dies nicht tun. Dadurch ist es möglich, Veränderungen in der Wahrscheinlichkeit des Auffindens oder Passierens der Fischaufstiegshilfe im Laufe der Zeit zu verfolgen.

Zur Vergleichbarkeit zwischen Fischarten, die den Einstieg oder die Passage erfolgreich bewältigt haben, können zusätzliche Kaplan-Meier-Kurven erstellt werden. In diesem Fall wird von einer absoluten Auffindbarkeit oder Passierbarkeit gesprochen, wobei der Wert für alle Fischarten immer bei 100% liegt. Diese Kurven helfen dabei zu verstehen und zu vergleichen, wie lange es dauert, bis 50% der markierten Fische jeder Art diese "Events" (z.B. auffinden oder passieren) erfolgreich gemeistert haben. Diese Analyse wurde auch für jede Fischart und Fischaufstiegshilfe pro Kraftwerk durchgeführt.

3.2.3 Dichtediagramm

Um herauszufinden, ob die Fischlänge einen Effekt auf die Auffindbarkeit oder Passierbarkeit hat, wurde die Methode der Kerndichteschätzer verwendet. Diese Methode ermöglicht die Schätzung der Wahrscheinlichkeitsdichte einer Variable basierend auf einer Stichprobe. Sie erlaubt den Vergleich zwischen verschiedenen Gruppen, um festzustellen, ob sich die Verteilung der Fischgrößen zwischen den Gruppen unterscheidet. Der Kerndichteschätzer wurde auf jede der fünf untersuchten Fischarten angewendet, um mögliche Unterschiede in der Größenverteilung zwischen den ausgesetzten Fischen, ihrer Auffindbarkeit und ihrer Passage durch die Fischaufstiegshilfen zu ermitteln. Darüber hinaus wurde die Methode genutzt, um die Längenverteilung in Bezug auf verschiedene Nutzungsmuster der FAH-Typen zu betrachten.

Die daraus resultierenden Grafiken ermöglichen es, Unterschiede in den Verteilungen abzulesen. Variationen in den Peaks oder Bereichen mit höherer Dichte könnten darauf hinweisen, dass bestimmte Größen bevorzugt die Fischaufstiegshilfen passieren oder dass die ausgesetzten Fische eine abweichende Größenverteilung aufweisen. Ein breiterer oder höherer Bereich in einer der Dichteschätzungen deutet darauf hin, dass Fische dieser Grösse häufiger vorkommen.

3.2.4 Modellierungsverfahren Passierbarkeit

Einflussfaktoren Passierbarkeit

Um die Einflussfaktoren auf die Passierbarkeit genauer zu untersuchen, wurde eine Analyse mit einem sogenannten gemischten Modell (Generalized Linear Mixed Model - GLMM) durchgeführt (Bates et al., 2015). Dieses Modell kann verschiedene Faktoren berücksichtigen, sowohl Umweltparameter als auch Designmerkmale, die potenziell die Passierbarkeit beeinflussen könnten (siehe Tabelle 1 für Parameter). Solche Analysen, welche hydraulische Parameter mit biologischen Faktoren verbinden, wurden noch nicht häufig realisiert (Bravo-Córdoba et al., 2021; Grimardias et al., 2022).

Die abhängige Variable bezog sich auf die Passierbarkeit: passierte ein Fisch die Fischaufstiegshilfe (binär 1/0). Während der Analyse wurden bestimmte Variablen aufgrund von Autokorrelationen ausgeschlossen, um eine zuverlässige Modellierung sicherzustellen. Dabei wurden die Variablen "Neigung der Fischaufstiegshilfe" und "Fallhöhe" aufgrund ihrer starken Autokorrelationen mit anderen Variablen aus dem Modell entfernt. Die "Wasserspiegeldifferenz (Δh)" wurde wegen zu geringer Variation ausgeschlossen. Das Ziel war es, eine klare Untersuchung der verbleibenden Variablen zu ermöglichen. Folgende unabhängige Variablen wurden in das Modell einbezogen und ihr Einfluss auf die Passierbarkeit getestet:

- Leistungsdichte (P_v)
- FAH-Typ (RBP/SP)
- Gilde (Gruppierung von Arten)
- Fischgrösse (mm)

Diese Variablen wurden sorgfältig ausgewählt, da sie potenziell signifikante Auswirkungen auf die Passierbarkeit haben könnten. Bezüglich der Leistungsdichte wurden zwei Gruppen betrachtet, entweder über oder unter 100 W/m^3 . Wir haben diesen Wert festgelegt, da in den Barbenregionen dies der höchste Wert sein sollte (BAFU, 2022). Bei den FAH-Typen wurden nur Schlitzpässe und Raugerinne-Beckenpässe in die Analyse einbezogen, da bei den anderen FAH-Typen die Stichprobengrösse zu klein ist (z.B. Fischlift gibt es nur ein Beispiel). Hinsichtlich der Fischgilde wurden zwei Levels betrachtet, nämlich schwimmstarke, grössere Arten und schwimmschwache, kleinere Arten. Die unterschiedlichen Kraftwerke ($n=6$) dienten als zufällige Effekte. Dieser Zufallsfaktor wurde berücksichtigt, um mögliche spezifische Effekte oder Variationen zwischen den verschiedenen Kraftwerken zu erfassen, die die Passierbarkeit beeinflussen könnten.

Einflussfaktoren Transitzeit

Das Coxsche Regressionsmodell (Cox proportional hazard regression) wurde verwendet, um das Verhältnis zwischen den gleichen unabhängigen Variablen und der Transitzeit zu analysieren (Bravo-Córdoba et al., 2021; Castro-Santos & Perry, 2012; Nyqvist et al., 2017). Es ermöglicht die Bewertung der relativen Auswirkungen jeder dieser Variablen auf die Geschwindigkeit der Passage pro Höhenabschnitt. Anhand dieses Modells können wir besser verstehen, welche Faktoren einen stärkeren Einfluss auf die Transitzeit haben und wie diese Informationen genutzt werden können, um mögliche Anpassungen im Design zu berücksichtigen, um die Fischaufstiegshilfen zu verbessern. In diesem Modell diente die Transitzeit pro Höhenmeter ($T_{\text{time}}/\text{Meter Höhe}$) als die abhängige Variable.

Auch hier wurden die gleichen Variablen wie im vorherigen Modell wegen Autokorrelation ausgeschlossen. Die unabhängigen Variablen, die in diesem Modell getestet wurden, um die Auswirkungen auf die Transitzeit zu verstehen, sind:

- Leistungsdichte (P_v)
- FAH-Typ (RBP/SP)
- Gilde (Gruppierung von Arten)
- Fischgrösse (mm)

Die Modellauswahl wurde durch schrittweise Eliminierung nicht signifikanter Faktoren mit dem Likelihood-Quotienten-Test (LRT) der Klasse "anova" abgeschlossen (Kuznetsova et al., 2017; Zeileis & Hothorn, 2002).

3.3 Betriebsdaten der Kraftwerke und hydrologische Daten

3.3.1 Terminologie

Zu Klärungs- und Standardisierungszwecken definieren wir im vorliegenden Bericht die Terminologie für einige hydraulische und hydrologische Parameter. Ein Teil dieser Terminologie ist in BAFU (2022) definiert. Diese Definitionen zielen darauf ab, Missverständnisse bezüglich Begriffen zu reduzieren, die in der Literatur häufig austauschbar verwendet werden.

- Der *Dotationsabfluss* [m^3/s resp. L/s] beschreibt den Abfluss in einer Fischaufstiegshilfe. Er ist abhängig von der Konstruktionsweise der Fischaufstiegshilfe sowie den hydraulischen Verhältnissen (Pegelständen) im Ober- und Unterwasser der Fischaufstiegshilfe.
- Die *Lockwassermenge* [m^3/s resp. L/s] wird hier verwendet, um den Abfluss durch den Einstieg der Fischaufstiegshilfe zu beschreiben. Sie umfasst die Summe aus Dotationsabfluss sowie allfällige Zusatzdotationen im unteren Bereich der Fischaufstiegshilfe.
- Die *Leitströmung* beschreibt die am Einstieg der Fischaufstiegshilfe erzeugte Strömung zur Leitung der Fische in den Wanderkorridor.
- Der *konkurrierende Abfluss* [m^3/s] oder die *konkurrierende Strömung* beschreibt den Abfluss respektive die Strömung, die in Konkurrenz zur Leitströmung steht und die Fische fehlleiten kann.

3.3.2 Datenbeschreibung

Für gewisse Auswertungen stützt sich die vorliegende Studie auf Betriebsdaten der untersuchten Kraftwerke. Die zur Verfügung stehenden Zeitreihen sind in Tabelle 2 aufgelistet. Für alle Kraftwerke ausser Aue und Säckingen standen Zeitreihen für den Zeitraum der PIT-Tagging Studien zur Verfügung. Es handelt sich hierbei hauptsächlich um Zeitreihen der am Kraftwerk gemessenen Durchflüsse und Pegelstände. Die Zeitreihen haben variable zeitliche Auflösungen. Diese reichen von 15-min Mittelwerten (Rüchlig), über Stundenmittelwerte (Schiffmühle) bis zu Tagesmittelwerten (Ryburg-Schwörstadt, Rheinfelden, Augst-Wyhlen). Für die Auswertungen in der vorliegenden Studie wurden alle Werte zu Tagesmittelwerten gemittelt.

Zusätzlich zu den Betriebsdaten wurden hydrologische Daten verwendet. Die verwendeten hydrologischen Daten umfassen Tagesmittelwerte von Abfluss und Temperatur an Limmat, Aare und Rhein und stammen von den Messstationen des BAFU (Tabelle 2).

Neben den beschriebenen Zeitreihen wurden weitere Betriebsdaten ausgewertet. Für die Auswertungen zum Anteil der Lockwassermenge am konkurrierenden Abfluss wurde bei den Kraftwerkbetreibern Informationen zu den Dotationsabflüssen und allfälliger Zusatzdotationen eingeholt. Diese Informationen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 2: Liste der verwendeten Zeitreihen von Betriebsdaten der Kraftwerke sowie hydrologische Daten.

Kraftwerk	Betriebsdaten	Hydrologische Daten
Aue	-	BAFU Station 2243 Baden-Limmatpromenade: - Tagesmittel Abfluss 2015 - 2020 - Tagesmittel Temperatur 2015 - 2020 - 5-min Mittel Abfluss 12.-14.06.23
Schiffmühle	Stundenmittel 18.12.17 - 29.02.20: - Durchfluss Dotierturbine - 5 Pegelstandorte - Wassertemperatur	
Rüchlig	15-min Mittel 01.10.15 - 31.08.18: - 4 Durchflüsse (HKW, DKW, HWE, Stauwehr) - 4 Pegelstandorte	BAFU Station 2016 Brugg: - Tagesmittel Abfluss für 2015 - 2020 - Tagesmittel Temperatur für 2015 - 2020
Säckingen	(keine)	BAFU Station 2091 Rheinfelden: - Tagesmittel Abfluss 2015 - 2020 - Tagesmittel Temperatur 2015 - 2020
Ryburg-Schwörstadt	Tagesmittel 01.01.16 - 31.12.17 - 2 Durchflüsse (Rhein, Turbinen)	
Rheinfelden	Tagesmittel 01.04.16 - 31.12.19 - 2 Durchflüsse (Maschinenhaus, Wehr) - 3 Pegelstandorte	
Augst-Wyhlen	Wyhlen: Tagesmittel 01.01.16 - 31.12.19: - 2 Durchflüsse (Maschinenhaus, Wehr) - 2 Pegelstandorte Augst: Tagesmittel 01.01.17 - 31.12.19: - Durchfluss je Turbine - 4 Pegelstandorte	

Tabelle 3: Liste der Zusatzdotationen der untersuchten Kraftwerke und Fischaufstiegshilfen (SP = Schlitzpass, RBP = Raugerinne-Beckenpass, UGG = Umgehungsgewässer, FL = Fischlift, BP = Beckenpass).

Kraftwerk	FAH	Q_{FAH} [m ³ /s]	Zusatzdotation
Aue	SP	-	-
Schiffmühle	RBP	0.25 [4]	Dotierkraftwerk mit folgendem Reglement [5] - Okt bis Mär: 8 m ³ /s - Apr, Mai, Aug, Sep: 10 m ³ /s - Jun, Jul: 14 m ³ /s
	SP	0.25 [4]	
Rüchlig	SP (HKW)	0.3 - 0.9 [6]	Lockstrompumpe mit folgendem, vereinfachten Reglement [6]: - $Q_{Aare} < 170$ m ³ /s: $Q_{Dot} = 1.0$ m ³ /s - $170 < Q_{Aare} < 230$ m ³ /s: $Q_{Dot} = 1.5$ m ³ /s - $230 < Q_{Aare} < 290$ m ³ /s: $Q_{Dot} = 2.0$ m ³ /s - $290 < Q_{Aare} < 340$ m ³ /s: $Q_{Dot} = 2.4$ m ³ /s - $Q_{Aare} > 340$ m ³ /s: $Q_{Dot} = 2.8$ m ³ /s
	SP (DKW)	-	-
Säckingen	BP	-	-
Ryburg-Schwörstadt	RBP	1.0 [7]	5.6 m ³ /s
	SP	0.4 [7]	1.8 m ³ /s
Rheinfelden	SP	0.56 [8]	1.3 - 2.5 m ³ /s für Rheinabflüsse zwischen 310 - 1550 m ³ /s 3 m ³ /s für Rheinabflüsse grösser als 1550 m ³ /s
	UGG	10 - 35 [9]	Dotation gemäss folgendem Reglement [7]: - Mär: 16 m ³ /s - Jan, Feb, Apr: 15 m ³ /s - Mai, Dez: 14 m ³ /s - Nov: 13 m ³ /s - Jun: 12 m ³ /s - Jul, Okt: 11 m ³ /s - Aug, Sep: 10 m ³ /s
	RBP	0.6 [8]	1.1 m ³ /s [8]
Augst-Wyhlen	SP (Augst)	0.42 [10]	0.8 m ³ /s [10]
	RBP (Wyhlen)	0.55	1.96 m ³ /s [7]
	FL (Wyhlen)	-	1.2 m ³ /s [7]

3.4 Hydraulische Messungen

3.4.1 Untersuchungsstandorte

Hydraulische Messungen wurden an drei Kraftwerken durchgeführt: Schiffmühle an der Limmat, Rüchlig an der Aare und Ryburg-Schwörstadt am Rhein. Die Gründe für die Selektion dieser drei Kraftwerke aus allen untersuchten (total 7) Kraftwerken sind folgende:

- Die gewählten Kraftwerke liegen an drei unterschiedlichen Flusssystemen (Limmat, Aare, Rhein). Somit sind alle drei Anlagen unterschiedlich gross dimensioniert und unterliegen einem unterschiedlichen hydrologischen Regime.
- Die Auffindbarkeit der Fischaufstiegshilfen ist an den gewählten Standorten sehr unterschiedlich. Am Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt ist die Auffindbarkeit gering, wie bei allen

anderen Kraftwerken am Rhein. Am Kraftwerk Schiffmühle wurden dagegen die höchsten Werte aller untersuchten Kraftwerke gemessen.

- Alle drei Kraftwerke weisen Bauformen auf, wie sie an vielen anderen Kraftwerken in der Schweiz vorzufinden sind. An den Kraftwerken Ryburg-Schwörstadt und Rüchlig sind Maschinenhaus und Wehr in Blockbauweise angeordnet. Das Kraftwerk Schiffmühle ist ein Ausleitungskraftwerk.
- Die Fischaufstiegshilfen an den Kraftwerken weisen eine moderne Bauweise auf. Es liegen Schlitzpässe (an allen drei Kraftwerken) sowie Raugerinne-Beckenpässe (an Kraftwerken Ryburg-Schwörstadt und Schiffmühle) vor.
- Die Verfügbarkeit von Daten (Betriebsdaten, Baupläne) ist mehrheitlich gegeben.

3.4.2 Durchführung

Die hydraulischen Messungen wurden an drei Terminen im April, Mai und Juni 2023 durchgeführt. An den Messzeitpunkten lagen die Gesamtabflüsse im Bereich von $Q = 65 - 75 \text{ m}^3/\text{s}$ am Kraftwerk Schiffmühle (entspricht ca. $Q_{230} - Q_{270}$ der Limmat), $Q = 300 - 320 \text{ m}^3/\text{s}$ am Kraftwerk Rüchlig (ca. Q_m der Aare) und $Q = 600 - 800 \text{ m}^3/\text{s}$ am Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt (ca. $Q_{240} - Q_{300}$ des Rheins). Weitere Abflusswerte zum Messzeitpunkt können Tabelle 4 entnommen werden.

Abbildung 8 gibt einen Überblick der Messstellen pro Kraftwerk. Das Hauptaugenmerk der Messungen lag bei den ADCP-Messungen im Unterwasser der Kraftwerke. Hier wurden die Strömungsverhältnisse vermessen, um die grossräumige Auffindbarkeit der Fischaufstiegshilfen beurteilen zu können. Weitere Messungen wurden in den Becken der Fischaufstiegshilfen mittels PIV und ADV durchgeführt. Diese dienen dazu, die hydraulischen Verhältnisse in den Fischaufstiegshilfen zu beurteilen.

Tabelle 4: Zusammenfassung der durchgeführten Messungen an den Kraftwerken Schiffmühle, Rüchlig und Ryburg-Schwörstadt (vgl. Abbildung 8); QP = Querprofil, ADCP = Acoustic Doppler Current Profiler, PIV = Particle Image Velocimetry, RBP = Raugerinne-Beckenpass, SP = Schlitzpass

Kraftwerk (Datum)	Abfluss	ADCP	PIV in FAH
Schiffmühle (12./13.6.23)	$Q_{\text{Ges}} = 65 - 75 \text{ m}^3/\text{s}$ (entspricht ca. $Q_{230} - Q_{270}$) $Q_{\text{Dot}} = 14 \text{ m}^3/\text{s}$	10 QP im Unterlauf 1 QP im RBP-Becken Nr. 1 1 QP im RBP-Becken Nr. 2	RBP Becken Nr. 4, 13, 23 SP Becken Nr. 4
Rüchlig (22./23.5.23)	$Q_{\text{Ges}} = 300 - 320 \text{ m}^3/\text{s}$ (entspricht ca. Q_m) $Q_{\text{HKW}} = 4 \times 62 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q_{\text{LSP}} = 0.46 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q_{\text{Lock}} = 2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q_{\text{Dot}} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$	11 QP im Unterlauf HKW 9 QP im Unterlauf DKW	SP HKW Becken Nr. 5, 23 SP DKW Becken Nr. 25
Ryburg- Schwörstadt (11./12.4.23)	$Q_{\text{Ges}} = 600 - 800 \text{ m}^3/\text{s}$ (entspricht ca. $Q_{240} - Q_{300}$) $Q_{\text{Turb}} = 215/150/225/150 \text{ m}^3/\text{s} *$ $Q_{\text{Dot}} = 5.6 / 1.6 \text{ m}^3/\text{s} **$	17 QP im Unterlauf 3 QP im RBP-Becken A*** 4 QP im RBP-Becken B***	SP Becken Nr. 1,4**** RBP Becken Nr. 12*****

* Abfluss je Turbine

** Dotationsabfluss bei RBP (erster Wert) und SP (zweiter Wert)

*** Erstes Becken Unterstrom der Zufahrtsbrücke zum Kraftwerk.

**** Vom Einlauf des Schlitzpasses (Verzweigung Raugerinne-Beckenpass) nummerierter gezählt.

***** Viertes Becken Unterstrom des Ruhebeckens in 180° Kurve.

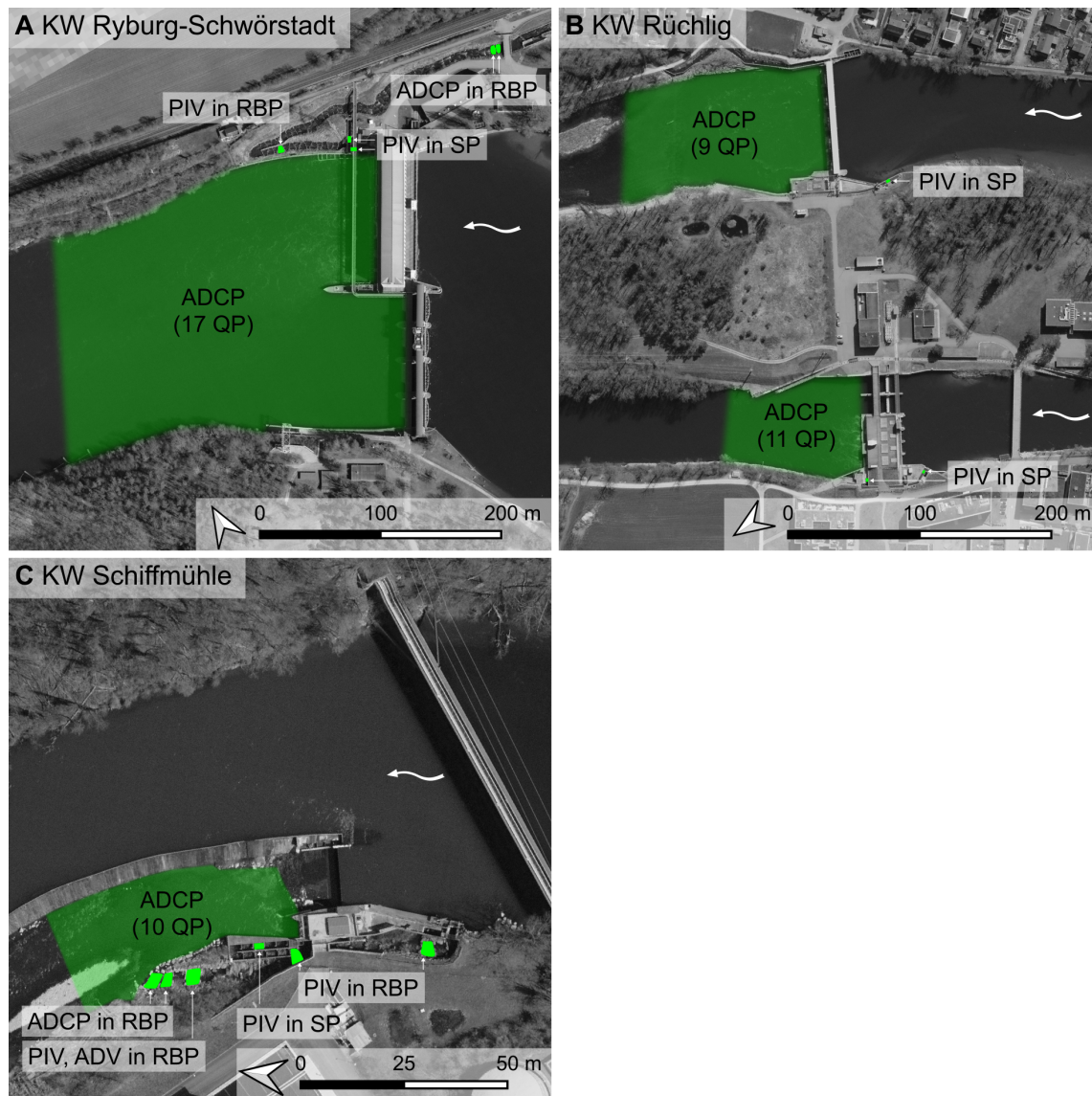


Abbildung 8: Messstellen an den Kraftwerken A) Ryburg-Schwörstadt, B) Rühlig und C) Schiffmühle (vgl. Tabelle 4).
 QP = Querprofil, ADCP = Acoustic Doppler Current Profiler, PIV = Particle Image Velocimetry, ADV = Acoustic Doppler
 Velocimetry, RBP = Raugerinne-Beckenpass, SP = Schlitzpass

3.4.3 Messmethoden

ADCP

Mittels eines ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) Sensors können Profile der Strömungsgeschwindigkeit gemessen und deren dreidimensionale Komponenten bestimmt werden. Die Messfrequenz eines ADCP-Sensors liegt bei 1 bis 2 Hz.

Für die Messungen im Unterwasser der Kraftwerke (Abbildung 8) wurde ein ADCP-Sensor (RiverPro ADCP) auf einem ferngesteuerten Boot (Teledyne marine Q-boat 1800, Abbildung 9A) montiert. Das Boot ist zudem mit einem RTK (Real-Time Kinematic) - GPS-System ausgestattet, womit die Lage des Boots im dreidimensionalen Raum bestimmt werden kann.

Im Unterwasser der Kraftwerke wurden jeweils etwa 10-20 Querprofile vermessen. Pro Querprofil wurden vier bis acht Messfahrten (Transsekten) durchgeführt und die Messwerte der Transsekten anschließend gemittelt. Die Auswertung der Daten erfolgte mittels der Software WinRiver II von Teledyne Marine und Velocity Mapping Toolbox (VMT) (Parsons et al., 2013).

Das Endprodukt der ADCP-Messungen sind georeferenzierte Querprofile der Strömungsgeschwindigkeiten. Die räumliche Auflösung liegt bei etwa 10 cm. In der Nähe der Wasseroberfläche sowie in der Nähe zur Flusssohle fehlen jeweils die Messwerte, weil eine Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten mittels ADCP in diesen Bereichen technisch nicht möglich ist.

PIV

Mittels PIV (Particle Image Velocimetry) lassen sich die zweidimensionalen Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit auf einer Wasseroberfläche messen. Die Messfrequenz liegt bei 25-60 Hz unter Verwendung von handelsüblichen Kameras.

Für die Messungen in den Fischaufstiegshilfen wurden Videos mit einer Spiegelreflexkamera (Canon EOS 5D Mark III, 1920 x 1080 px², 25 fps) respektive einem Smartphone (iPhone 13 Pro Max, 3840 x 2160 px², 60 fps) aufgenommen, die jeweils zentral über dem Becken der Fischaufstiegshilfe oder am Ufer auf einem Stativ befestigt wurden. Als Seeding wurden Maisstärkepartikel (ca. 3 cm Durchmesser) verwendet. Abbildung 9B zeigt eine Fotografie während einer PIV-Messung am Raugerinne-Beckenpass des Kraftwerks Schiffmühle. Von den Videoaufnahmen wurden Ausschnitte von einer Dauer von 1 bis 2 min ausgewertet. Als Vorbearbeitung wurde an den Videoausschnitten eine Objektivkorrektur vorgenommen sowie ihre perspektivische Verzerrung entzerrt. Die anschliessende Auswertung erfolgte mittels BASESURV, einem hauseigenen PIV-Skript der VAW, das auf der MATLAB-basierten Software PIVlab (Thielicke & Stamhuis, 2014) aufbaut. Die final ausgewerteten Videosequenzen hatten eine räumliche Rasterauflösung von 3 - 6 cm (Schlitzpässe) respektive 6 - 10 cm (Raugerinne-Beckenpässe). Dies entspricht einer Fenstergrösse von 32 x 32 px² resp. 64 x 64 px² im originalen Video.

ADV

Mittels ADV (Acoustic Doppler Velocimetry) können die Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit lokal mit einer hohen Frequenz von bis zu 200 Hz gemessen werden. Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung können damit Turbulenzgrössen erfasst werden, welche mittels ADCP und PIV nicht gemessen werden können.

Für die Messungen im Raugerinne-Beckenpass des Kraftwerks Schiffmühle (Abbildung 9C) wurden drei ADV-Sonden (Nortek Vectrino) auf eine Tragekonstruktion montiert. Die Sonden wiesen in der Vertikalen eine Distanz von 20 cm zueinander auf und wurden in einer Höhe von -6 cm/-26 cm/-46 cm unter der Wasseroberfläche befestigt. In der Horizontalen wurden die Messpunkte auf einem regelmässigen Gitter angeordnet, das zwischen den Messpunkten eine Distanz von 0.5 m aufwies. Pro Messpunkt wurde mit allen drei Sonden gleichzeitig während einer Minute bei 200 Hz gemessen.

Für jede Messung liefern die Sonden eine Zeitreihe der Geschwindigkeitskomponenten u , v und w . Auf diese Zeitreihen wurden drei Filter angewendet:

- Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-noise ratio, SNR) Filter: Löscht alle Signale, deren SNR unter 12 liegt.
- Korrelationsfilter: Löscht alle Signale, deren Korrelation unter 45% liegt.
- Despiking: Löscht alle Signale, welche weiter als ± 1 m/s respektive ± 3 -mal die Standardabweichung vom Mittelwert entfernt liegen.

Basierend auf den gefilterten Werten wurden anschliessend gemittelte Grössen sowie turbulente Kenngrössen berechnet.

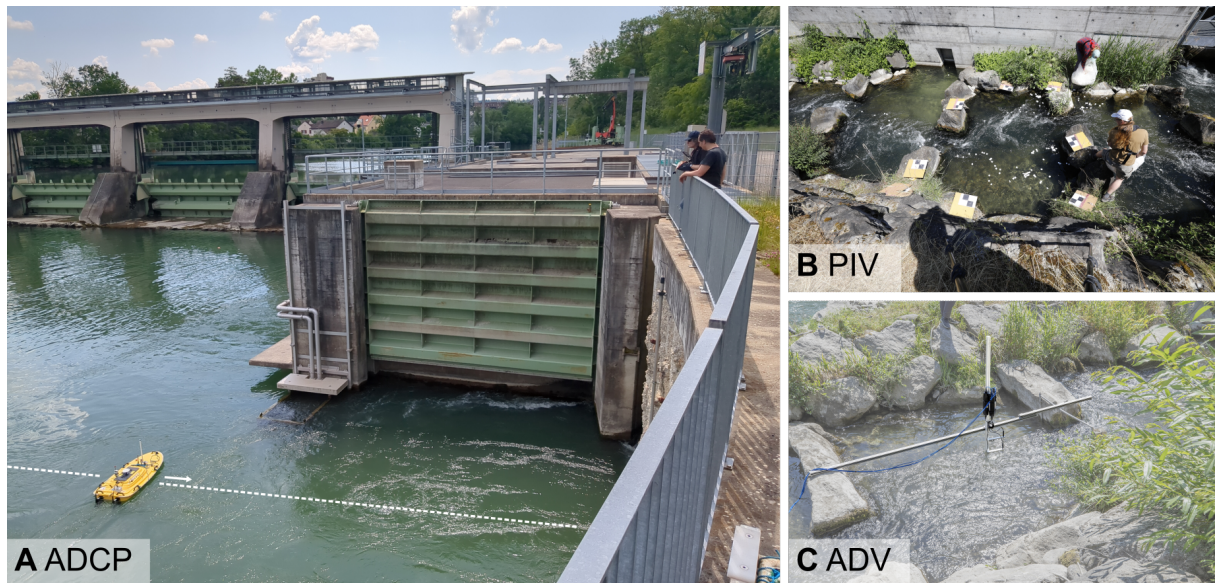


Abbildung 9: Angewandte Messmethoden: A) ADCP vor dem Auslass der Dotierkraftwerks und dem Eingang zum Schlitzpass am Kraftwerk Röchling, B) PIV im Raugerinne-Beckenpass des Kraftwerks Schiffmühle und C) ADV im Raugerinne-Beckenpass des Kraftwerks Schiffmühle.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Auffindbarkeit

4.1.1 Auffindbarkeit pro Kraftwerk

Die Auffindbarkeit variiert je nach Kraftwerk erheblich (Abbildung 10). Die höchste Auffindbarkeitsrate von 66% wurde am Kraftwerk Schiffmühle verzeichnet, während am Kraftwerk Säckingen mit 8% die geringste Auffindbarkeit berechnet wurde. An zweiter Stelle nach dem Kraftwerk Schiffmühle liegt das Kraftwerk Aue mit einer Auffindbarkeit von 61%, gefolgt vom Kraftwerk Augst-Wyhlen mit 30%, Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt mit 26%, Kraftwerk Rheinfelden mit 24% und Kraftwerk Rüchlig mit 10%.

Beim Kraftwerk Augst-Wyhlen ist zu beachten, dass Fische auch durch die Schleuse flussaufwärts gelangen konnten und der Fischlift sowie der Raugerinne-Beckenpass während über einem Jahr nicht funktionierte. Für das Kraftwerk Rheinfelden ist zu erwähnen, dass das Umgehungsgewässer nur über Einstiegsantennen an einem von zwei Eingängen verfügte und somit die Auffindbarkeit höchstwahrscheinlich unterschätzt wird. Schliesslich ist zu berücksichtigen, dass die Fische beim Kraftwerk Rüchlig im Unterwasser und nicht im Zählbecken gefangen wurden. Die Ergebnisse sind daher nicht vergleichbar.

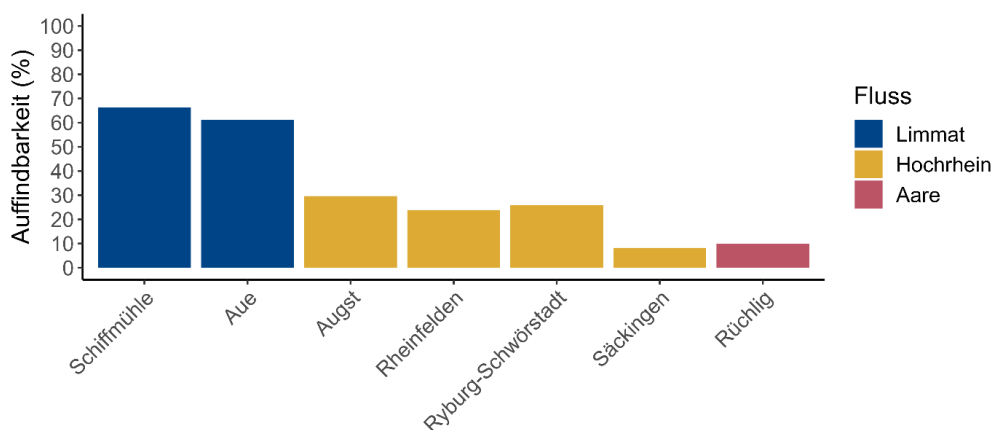


Abbildung 10: Auffindbarkeit der sieben untersuchten Kraftwerke.

Die Auffindbarkeit wurde für jedes Kraftwerk separat analysiert, da anhand der PIT-Tag Daten dieser Studie eine Standardisierung nicht möglich ist. Die Unterschiede in der Antennenkonfiguration und den Freilassungsstandorten sind zu gross. Die Antennen sind zum Teil weit entfernt vom Einstieg installiert, und die Konfiguration variiert je nach Standort sogar über den Untersuchungszeitraum hinweg. Diese variierenden Abstände zu den Kraftwerken sowie die Unterschiede in der Grösse und Tiefe der Gewässer können einen erheblichen Einfluss auf die Auffindbarkeit haben. Dieser Einfluss lässt sich jedoch anhand der vorliegenden Daten nicht ausreichend erklären. Wenn wir die Auffindbarkeit (mit einer Variation von 8% bis 66%) mit anderen Studien vergleichen, zeigen sich für bestimmte Standorte Ähnlichkeiten. In einer Metastudie wurde eine durchschnittliche Attraktionseffizienz von 65% ermittelt (Noonan et al., 2012), wobei die genaue Berechnung nicht identisch ist. Eine weitere Metastudie ergab einen mittleren Attraktionseffizienzwert von 66% (Bunt et al., 2012). Es ist anzumerken, dass viele Studien in diesen Metaanalysen Untersuchungen zu Salmoniden einschliessen, die häufig eine höhere Attraktionseffizienz aufweisen.

4.1.2 Auffindbarkeit pro FAH-Typ

Wenn wir die Auffindbarkeit pro Kraftwerk in Bezug auf die Fischaufstiegshilfen betrachten, fällt auf, dass der Schlitzpass und der Raugerinne-Beckenpass ähnlich gut aufgefunden werden, wobei der Schlitzpass tendenziell etwas besser abschneidet (Abbildung 11). Hingegen scheinen der Fischlift und das Umgehungsgewässer weniger erfolgreich bei der Auffindbarkeit zu sein (wobei dies auch von der Antennenaufstellung abhängen könnte). Es ist möglich, dass die Flussgrösse einen stärkeren Einfluss auf die Auffindbarkeit ausübt als die Anzahl der Einstiege. Dennoch bedarf diese Annahme einer quantitativen Überprüfung mittels einer alternativen Methode wie radio- oder akustischen Telemetrie und einer standardisierten Antennenaufstellung.

Die vorliegenden Daten ermöglichen keine differenzierte Analyse der Attraktions- und Einstiegseffizienz (siehe Abbildung 6B). Obwohl die Auffindbarkeit eine Schätzung für den Einstieg liefert, könnte die tatsächliche Attraktions- und Einstiegseffizienz höher sein. Dies ist darauf zurückzuführen, dass einige Einstiegsantennen weit oberhalb des Einstiegsbeckens in Fischaufstiegshilfen installiert sind. Dadurch werden nicht alle Fische, die tatsächlich die Fischaufstiegshilfe finden und einsteigen, erfasst. Hinsichtlich der Attraktion der Fische erlauben uns die vorliegenden Daten keine Schlussfolgerungen. Wir haben keine Kenntnis darüber, ob die Fische zum Einstieg angelockt werden, aber nicht einsteigen, oder ob sie möglicherweise nicht einmal zum Einstieg gelockt werden. In einer Studie wurde nachgewiesen, dass Fische über mehrere Monate im Unterwasserbereich in der Nähe der Fischaufstiegshilfe verweilten, jedoch Schwierigkeiten hatten, den Einstieg zu finden (Grimardias et al., 2022). Wir können also lediglich feststellen, welche Fische in die Fischaufstiegshilfen eingestiegen sind, aber nicht was im Einstiegsbereich passiert.

Die alleinige Verwendung von Auffindbarkeitsdaten ermöglicht kein robustes Modell, um die Einflussfaktoren auf Attraktion oder Einstieg zu identifizieren. Durch die getrennte Erfassung von Daten zur Attraktion und zum Einstieg (siehe Abbildung 6A) könnten jedoch Modelle entwickelt werden, um festzustellen, welche Umwelt- oder Designparameter die Attraktions- oder Einstiegseffizienz beeinflussen könnten. Dies würde eine präzisere Analyse ermöglichen und potenzielle Schlüsselparameter identifizieren, die für die Effizienz der Fischaufstiegshilfen von Bedeutung sind. Zudem würden diese Modelle aufzeigen, welche Zonen für die Fische mögliche Herausforderungen darstellen könnten, die die Attraktion oder den Einstieg beeinflussen.

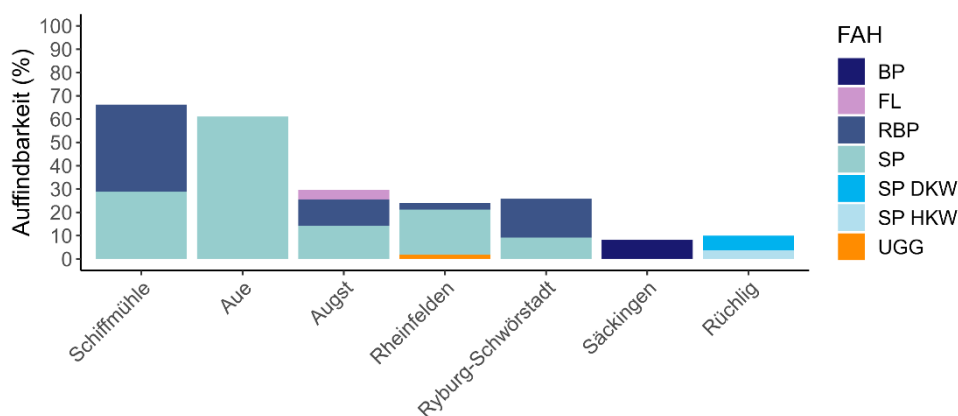


Abbildung 11: Auffindbarkeit in den unterschiedlichen Fischaufstiegshilfen der sieben untersuchten Kraftwerke.

In einer weiteren Studie (Hershey, 2021) schnitten natürlichere Fischaufstiegshilfen wie der Raugerinne-Beckenpass und das Umgehungsgewässer schlechter ab als die technischen Fischaufstiegshilfen, was in unseren Ergebnissen nicht so deutlich ersichtlich ist. Allerdings zeigt der technische Schlitzpass auch eine leicht bessere Leistung. In unserer Studie zeigt sich allgemein oft eine bessere Performance des Raugerinne-Beckenpasses, wenn er in Kombination mit einem Schlitzpass als Teil einer Fischaufstiegs-

hilfe verwendet wird, wie es an den Kraftwerken Schiffmühle oder Ryburg-Schwörstadt der Fall ist. Ähnliche Resultate wurden auch in der Studie von Bunt et al., 2012 beobachtet.

4.1.3 Auffindbarkeit verschiedener Fischarten

Kraftwerk Schiffmühle

Die fünf häufigsten Fischarten zeigen eine Auffindbarkeit im Bereich von 58% bis 81%. Rotaugen stechen dabei mit der höchsten Auffindbarkeit hervor, während Alet die geringste aufzeigt. Interessanterweise können einige Fischarten selbst noch 300 Tage nach der Freisetzung den Weg zu den Fischeufstiegshilfen finden (Abbildung 12A).

In der Regel fanden 50% der Fische den Einstieg in die Fischeufstiegshilfe bereits innerhalb des ersten Tages nach der Freisetzung (Abbildung 12B). Bei Alet und Schneider verzögert sich der Einstieg auf etwa den dritten oder vierten Tag nach der Freisetzung. Rotaugen und Egli dagegen zeigen eine bemerkenswert hohe Auffindbarkeit in sehr kurzer Zeit, da fast 90% von ihnen innerhalb des ersten Tages den Einstieg finden.

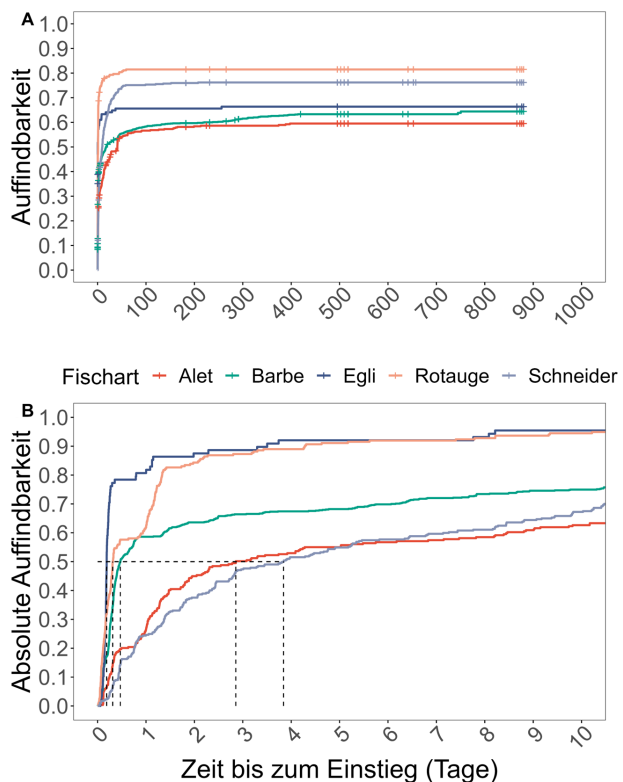


Abbildung 12: Kaplan-Meier Kurven zur Auffindbarkeit der Fischeufstiegshilfe am Kraftwerk Schiffmühle. Die unterschiedlichen Farben zeigen unterschiedliche Fischarten; Alet in rot, Barbe in grün, Egli in blau, Rotaugen in rosa und Schneider in violett. A) Auffindbarkeit, B) Absolute Auffindbarkeit (beinhaltet nur Fische, die die Fischeufstiegshilfe aufgefunden haben).

Vergleich zwischen den Kraftwerken

Die Auffindbarkeit variiert stark nach Standort. Grundsätzlich gibt es keine Fischart, die an allen Standorten am längsten braucht, um den Eingang zu finden. Dennoch zeigen die Kaplan-Meier Kurven (Abbildung A1 im Anhang), dass Alet und Rotaugen im Allgemeinen länger brauchen, um den Eingang zu finden. In den Kraftwerken Augst und Säkingen benötigt etwa die Hälfte der Rotaugenpopulation zwischen 300 und 340 Tagen, um den Eingang zu erreichen, was im Vergleich zu anderen Standorten relativ lang ist. Am Kraftwerk Rüchlig benötigen Alet im Durchschnitt 260 Tage, um den Eingang zu finden. An anderen Standorten benötigen 50% der Fische normalerweise weniger als 40 Tage, um den Eingang zur Fischeufstiegshilfe zu lokalisieren. Besonders kurze Zeiten für das Auffinden des Eingangs wurden in der Limmat beobachtet. Hier benötigen etwa 50% aller Fischarten weniger als 4 Tage, um die Fischeufstiegshilfe zu finden.

Die vorhandene Literatur ist knapp, was die Bewertung der Attraktion oder der Auffindbarkeit für potamodrome Arten betrifft. Dennoch wurde gezeigt, dass Äschen bis zu 540 Stunden benötigten, um den Eingang einer Fischeufstiegshilfe im Fluss Bocq, Belgien, zu finden (Ovidio et al., 2017). In dieser Studie wurde auch festgestellt, dass die Attraktionseffizienz für Barben 41% betrug, ein Ergebnis, das unseren Ergebnissen an gewissen Standorten in diesem Bericht ähnelt. Darüber hinaus wurden ähnliche Attraktions- und Eingangseffizienzen für Barben und Alet beobachtet, die Fischeufstiegshilfen

an den Verbois- und Chancy-Pougny-Dämmen in der Rhone überwinden. Dort wurde die Attraktionseffizienz auf etwa 80% für Barben und 45% für Alet geschätzt (Grimardias et al., 2022).

Beim Vergleich der Einstiegszeit ist jedoch Vorsicht geboten, da die Entfernungen zwischen den verschiedenen Kraftwerken stark variieren. Allgemein sind die Entfernungen der Freisetzungstellen der Fische zu den Eingängen der Fischaufstiegshilfen zwischen dem Rhein und der Aare im Vergleich zu jenen an der Limmat grösser. An der Limmat beträgt die Distanz etwa 100 bis 200 Meter. Im Rhein kann die Entfernung bis zu einem Kilometer betragen, und am Kraftwerk Rüchlig an der Aare wurden die Fische an ganz unterschiedlichen Orten freigesetzt, zum Teil über 400 Meter unterhalb des Kraftwerks. Diese Unterschiede in den Freisetzungsabständen könnten beeinflussen, wie schnell die Fische den Eingang der Fischaufstiegshilfen lokalisieren. Darüber hinaus kann auch der Fangort einen Einfluss haben. Zu beachten ist, dass die Fische von Rüchlig im Unterwasser gefangen wurden, während an allen anderen Standorten die Fische aus dem Zählbecken kommen.

4.1.4 Auffindbarkeit verschiedener Fischarten und FAH-Typen

Beim Vergleich von Kraftwerken mit verschiedenen Typen von Fischaufstiegshilfen, stellt sich die Frage, ob bestimmte Fischarten eine Vorliebe für einen Typ von Fischaufstiegshilfen zeigen, diesen bevorzugt auffinden oder schneller lokalisieren (siehe Tabellen A1). In verschiedenen Untersuchungen (Peter et al., 2016; Schölzel et al., 2020) wurde schon festgestellt, dass beispielsweise Rotaugen an den Kraftwerken Schiffmühle und Rheinfelden eher die Raugerinne-Beckenpässe bevorzugen. Dieses Ergebnis konnte auch in Augst beobachtet werden, wo Rotaugen eher den Raugerinne-Beckenpass aufsuchten.

Ebenso zeigt sich eine Präferenz von Barben für den Schlitzpass, die auch in den Standorten Schiffmühle, Rheinfelden und Augst zu beobachten ist. Dies könnte durch die Position der Eingänge erklärt werden, da verstärkte Strömung an den Eingängen der Schlitzpässe für kräftigere Schwimmer wie die Barbe attraktiv sein könnte. Der Raugerinne-Beckenpass hingegen, bei dem der Eingang weiter entfernt ist und somit weniger Strömung aufweist, wird eher von kleineren, weniger schwimmstarken Fischen wie Rotaugen bevorzugt.

Interessanterweise zeigt sich jedoch kein einheitliches Muster in Bezug auf die Dauer, die benötigt wird, um diese bevorzugten Eingänge zu finden. Generell ist die Zeit, die benötigt wird, um den bevorzugten Eingang zu lokalisieren, sehr standortabhängig und scheint nicht unbedingt mit der Präferenz für bestimmte FAH-Typen übereinzustimmen. Die Literatur zeigt eine grosse Variabilität in der Attraktions- und Eingangseffizienz, wobei bemerkenswerte kontrastierende Ergebnisse die starke Standortspezifität hervorheben, insbesondere wenn potamodrome Fischarten die Zielarten für den Aufstieg sind (Ovidio et al., 2017). Zudem kann die Variabilität in der Attraktions- und Eingangseffizienz mit zunehmender Grösse des Flusses steigen, wie Studien im Columbia River, USA, und in tropischen Systemen gezeigt haben (Kemp, 2016; Silva et al., 2012; Wagner et al., 2012).

In der Literatur existieren nur begrenzte Informationen zur Attraktionseffizienz und zur Zeit bis zum Einstieg verschiedener Fischarten in diverse Fischaufstiegshilfen. Eine durchgeführte Studie am Fluss Bocq in Belgien untersuchte den Schlitzpass und ergab eine vergleichbare Attraktionseffizienz von 41% für Barben (Ovidio et al., 2017). Die Auffindbarkeit von Barben in Schlitzpässen an den Kraftwerken in der Limmat (Schiffmühle und Aue) zeigte ähnliche Werte im Bereich von 39% bis 47%. Die durchschnittliche Zeitspanne zwischen der Aussetzung und der ersten Detektion betrug in der genannten Studie etwa 31 Stunden, wobei die Barben 120 Meter unterhalb der Fischaufstiegshilfe ausgesetzt wurden. Im Vergleich dazu ähnelt unser System der Limmat, wo die Fische 210 Meter unterhalb der Fischaufstiegshilfe in Schiffmühle und 130 Meter unterhalb Aue freigesetzt wurden. Die durchschnittliche Zeit bis zur ersten Detektion beträgt dabei ca. 43 Stunden für Schiffmühle und 31 Stunden für Aue.

4.2 Anteil Lockwassermenge am konkurrierenden Abfluss

Für ausgewählte Fischaufstiegshilfen an Limmat, Aare und Rhein wurde die Lockwassermenge berechnet und deren Anteil am konkurrierenden Abfluss ausgewertet. Diese Auswertungen beruhen auf den Zeitreihen der Betriebsdaten sowie den zu Verfügung stehenden Informationen über die Zusatzdotation (Abschnitt 3.3) und beziehen sich auf die Zeitperioden der PIT-Tagging Studien (Tabelle 1).

Abbildung 13 fasst den Anteil der Lockwassermenge am konkurrierenden Abfluss in Boxplots zusammen. Zwischen den verschiedenen Fischaufstiegshilfen sind Unterschiede zu erkennen, einerseits in den Mittelwerten und andererseits in der Variabilität der Lockwassermenge. Der Raugerinne-Beckenpass des Kraftwerks Schiffmühle zeigt einen Mittelwert von 2.2% sowie die grösste Variabilität mit 0% - 4% aller untersuchten Fischaufstiegshilfen. Der kleinste Anteil Lockwassermenge am konkurrierenden Abfluss wird bei den Fischaufstiegshilfen am Rhein erreicht. So liegen die Mittelwerte der Schlitzpässe an den Kraftwerken Ryburg-Schwörstadt, Rheinfelden und Augst-Wyhlen sowie des Fischlifts am Kraftwerk Augst-Wyhlen unter 0.5%. Die Lockwassermengen der Raugerinne-Beckenpässe am Rhein (Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt und Augst-Wyhlen) liegen im Mittelwert etwas höher als diejenige der Schlitzpässe, nämlich zwischen 0.5% und 1%. Das Umgehungsgewässer am Kraftwerk Rheinfelden weist von allen untersuchten Fischaufstiegshilfen am Rhein den höchsten Anteil Lockwassermenge am konkurrierenden Abfluss auf. Er liegt im Mittel bei 1.5%.

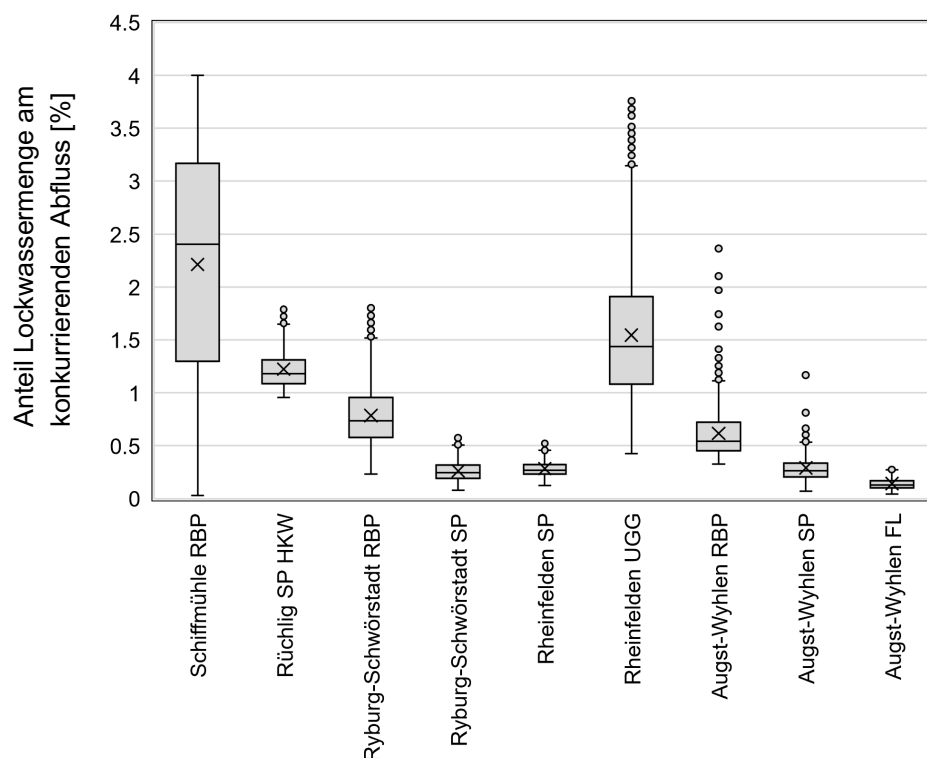


Abbildung 13: Anteil der Lockwassermenge am konkurrierenden Abfluss für ausgewählte Fischaufstiegshilfen. Die Linie innerhalb der Box repräsentiert den Median (50. Perzentil); die Box repräsentiert den Interquartilsabstand (IQR) vom ersten bis zum dritten Quartil; die Whisker zeigen 1.5x den IQR und die Punkte ausserhalb der Whisker sind Ausreisser (Werte ausserhalb des allgemeinen Bereichs der Daten).

In der Literatur gibt es unterschiedliche Vorschläge für den Anteil der Lockwassermenge am konkurrierenden Abfluss. Larinier (2002) schlägt 1 - 5% vor. Armstrong et al. (2010) schlagen minimal 5% vor. Eine Metastudie von Wolter & Schomaker, 2019 fanden, dass der Median bei funktionsfähigen Fischaufstiegshilfen bei etwa 5% liegt. In diesen Studien ist jedoch zu beachten, dass kein direkter Zusammenhang zwischen der Lockwassermenge und der Attraktionseffizienz untersucht wurde. In Bezug auf unsere Daten wurde sich beispielsweise bei der Interkantonalen Aareplanung auf eine Lockwassermenge von 1% geeinigt, verteilt auf die Anzahl Einstiege am Kraftwerk (*Interkantonale Aareplanung: Strategische Planung Sanierung Fischgängigkeit*, 2014). Von den hier untersuchten Fischaufstiegshilfen (Abbildung 13) liegen drei Fischaufstiegshilfen (Schiffmühle RBP, Rüchlig SP HKW, Rheinfelden UGG) im Mittel über 1%. Die restlichen sechs Fischaufstiegshilfen am Rhein liegen im Mittel unter 1%.

Am Kraftwerk Schiffmühle liegt die Auffindbarkeit bei 66% und der durchschnittliche Anteil der Lockwassermenge bei 2.2% des konkurrierenden Abflusses, während für die Fischaufstiegshilfen am Rhein die Auffindbarkeit bei < 30% und der durchschnittliche Anteil der Lockwassermenge bei < 1% (mit Ausnahme von Rheinfelden UGG) liegen. Dies gibt den Eindruck, dass ein höherer Anteil der Lockwassermenge zu einer höheren Auffindbarkeit führen könnte. Abbildung 14 zeigt eine mögliche Analyse, um die Korrelation zwischen dem Anteil der Lockwassermenge und der Auffindbarkeit zu zeigen. Allerdings lassen die vorliegenden Daten der Studie keine Schlüsse darüber zu, wie sich eine Veränderung der Lockwassermenge (zum Beispiel durch eine Erhöhung der Zusatzdotation) tatsächlich auf die Attraktivität der untersuchten Kraftwerke auswirken würde. Für eine verbesserte Analyse wären Fischdaten erforderlich, die die Attraktion und den Einstieg der Fische separat erfassen und nicht nur eine allgemeine Auffindbarkeit berücksichtigen mit Antennen weit entfernt vom Einstieg. Im Weiteren ist zu beachten, dass die Attraktion nicht allein vom Anteil der Lockwassermenge am konkurrierenden Abfluss abhängt, sondern auch von anderen Faktoren beeinflusst wird. Beispiele dafür sind Gewässerbreite, Anzahl Einstiege, Wehr- und Turbinenbetrieb. Für den Einstieg sind beeinflussende Faktoren beispielsweise die Distanz zum Hindernis, Austrittswinkel, Sohlenanbindung und Fließgeschwindigkeiten. Weiter können abiotische Faktoren wie Wassertemperatur und biotische Faktoren wie das Schwimmverhalten der Fische einen Einfluss haben.

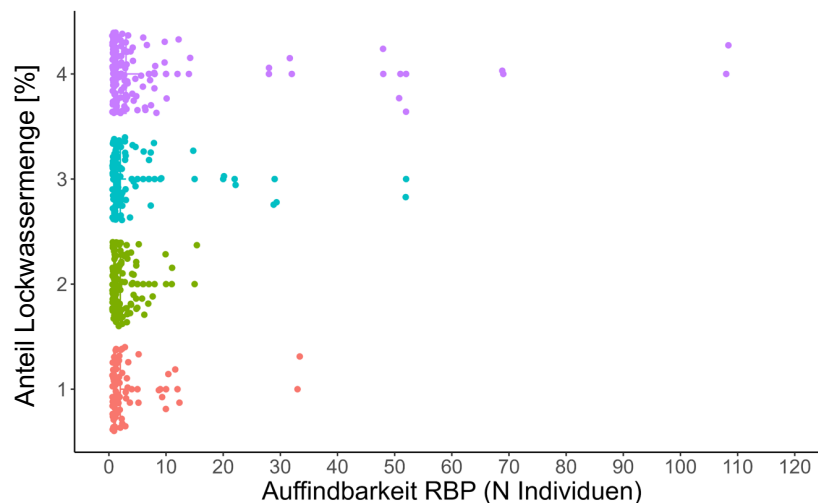


Abbildung 14: Zeigt die tägliche Auffindbarkeit (Anzahl Individuen) in Abhängigkeit der Lockwassermenge am konkurrierenden Abfluss des Raugerinne-Beckenpass (RBP) am Kraftwerk Schiffmühle. Der Anteil der Lockwassermenge wurde jeweils in eine der 4 folgenden Kategorien eingeteilt: 0-1%, über 1-2%, über 2-3%, über 3-4%.

4.3 Hydraulische Messungen im Unterwasser der Kraftwerke

Im Unterwasser der Kraftwerke Ryburg-Schwörstadt, Rüchlig und Schiffmühle wurden ADCP-Messungen durchgeführt, um die Strömungsverhältnisse zu bestimmen. In Abbildung 15 sind die gemessenen, 2D tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten der Flussquerprofile abgebildet.

Am Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt (Abbildung 15A) weist die Hauptströmung direkt zum Maschinenhaus. Die Eingänge der Fischeufstiegshilfe liegen am Rand dieser Hauptströmung, nämlich am orografisch rechten Ufer (Raugerinne-Beckenpass) sowie zwischen Maschinenhaus und Wehranlage (Schlitzpass). Sie sind also im Hinblick auf die generelle Abströmung aus den Turbinen grundsätzlich günstig positioniert. Unterstrom der Wehranlage bildet sich eine Rückströmungszone mit deutlich geringeren Strömungsgeschwindigkeiten. Ein Einstieg in dieser Zone wäre vermutlich eher schwierig zu finden. Die grössten mittleren Strömungsgeschwindigkeiten wurden einerseits direkt am Turbinenauslass bei CS 09 und andererseits weiter unterstrom bei CS 02 und 03 gemessen. Die hohen Strömungsgeschwindigkeiten bei CS 02 und 03 sind mit der seitlichen Verengung des Rheins unterstrom des Kraftwerks zu erklären.

Die vier Turbinen am Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt werden in Abhängigkeit der Strommärkte in Deutschland und der Schweiz betrieben. Am Tag der Messungen wurden zwei Maschinen (M1 und M3) mit 200 - 240 m³/s und zwei Maschinen (M2 und M4) mit 150 m³/s beaufschlagt. Dies erklärt die ungleichförmige Geschwindigkeitsverteilung am Querprofil CS 09 und weiter unterstrom. Die Strömungsverhältnisse am Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt und somit vermutlich auch die Auffindbarkeit der Eingänge der Fischeufstiegshilfen sind also stark vom Betrieb der Turbinen abhängig. Die hier dargestellten Messungen zeigen lediglich eine Momentaufnahme aus einer Vielzahl von möglichen Strömungsverhältnissen.

Der Ausschnitt in Abbildung 15B zeigt die Strömungsverhältnisse in unmittelbarer Nähe der Einstiege zum Raugerinne-Beckenpass am Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt. Vor dem Einstieg nahe beim Maschinenhaus (CS11-CS14) bildet sich eine Rückströmungszone mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten. Aufgrund der Richtung sowie der Stärke der Strömung ist hier keine eindeutige Leitströmung zum Einstieg hinzuerkennen. Es stellt sich deshalb die Frage, inwiefern diese Rückströmungszone das Auffinden des Einstiegs für Fische erschwert. Im Gegensatz dazu zeigt am zweiten Einstieg (unter der Fussgängerbrücke nahe CS09) die Richtung der Strömung direkt zum Einstieg der Fischeufstiegshilfe. Die gemessenen Geschwindigkeiten sind ähnlich gross wie bei den Auslässen der Turbinen oder weiter unterstrom. Eine Rückströmungszone konnte nicht beobachtet werden.

Am Kraftwerk Rüchlig wurde unterstrom des Hauptkraftwerks (HKW, Abbildung 15C) und des Dotierkraftwerks (DKW, Abbildung 15D) ADCP-Messungen durchgeführt. Am HKW wurde ähnliche Strömungsverhältnisse wie am Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt festgestellt, mit einer deutlichen Hauptströmung aus der Richtung des Maschinenhauses sowie einer Rückströmungszone unterstrom der Wehranlage. Der Einstieg der Fischeufstiegshilfe ist am Rande der Hauptströmung am orografisch linken Ufer platziert. Die grössten mittleren Strömungsgeschwindigkeiten am HKW wurden bei den Querprofilen CS 05 - 07 gemessen. Grund dafür ist die Topografie, das heisst die in Fliessrichtung ansteigende Sohlenlage respektive die damit verbundenen, kleinen Abflusstiefen.

Am DKW des Kraftwerks Rüchlig (Abbildung 15D) zeigen sich andere Strömungsverhältnisse als am HKW. Hier sind die Strömungsgeschwindigkeiten vergleichsweise gering. Die grössten Strömungsgeschwindigkeiten wurden am Auslass des Dotierkraftwerks gemessen, wo sich der Einstieg der Fischeufstiegshilfe befindet. Folglich ist eine sehr klare Leitströmung aus der Richtung des Einstiegs zu erkennen. Unterstrom der Wehranlage bildet sich ebenfalls eine Rückströmungszone mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten. Sie erstreckt sich beinahe über die gesamte Gewässerbreite.

Am Kraftwerk Schiffmühle (Abbildung 15E) wurden die ADCP-Messungen vor den Einstiegen der Fischaufstiegshilfe in der Restwasserstrecke durchgeführt. Die Restwasserstrecke wird durch eine Dotierturbine in saisonaler Abhängigkeit mit 8 - 14 m³/s dotiert (vgl. Abschnitt 3.3). Am Messtag im Juni 2023 wurden 14 m³/s dotiert. Dies erzeugte mittlere Strömungsgeschwindigkeiten um 2 m/s in Turbinennähe (CS 02). Mit zunehmender Entfernung von der Dotierturbine nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten ab. Frühere Messungen der VAW bei 8 m³/s im März 2018 (Abbildung 15F) und im November 2018 (Abbildung 15G) zeigen deutlich geringere Strömungsgeschwindigkeiten am Turbinenauslass (ca. 0.5 - 1 m/s). Es stellt sich daher die Frage, ob die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten einen Einfluss auf die Attraktion und den Einstieg des Schlitzpasses haben, der direkt neben dem Turbinenauslass angeordnet ist. Aufgrund der Daten aus der PIT-Tagging Studie am Kraftwerk Schiffmühle lässt sich diese Frage allerdings nicht schlüssig beantworten, denn die Zeitdauer von Abflüssen von 14 m³/s ist gering. Während der gesamten PIT-Tagging Studie (34 Monate) wurde nur während vier Monaten (Juni und Juli der Jahre 2018 und 2019) mit 14 m³/s dotiert. Allerdings musste das Dotierkraftwerk im Sommer 2018 (Ende Juni 2018 bis Ende August 2018) ausser Betrieb genommen werden und im Juni 2019 herrschte während dem gesamten Monat Wehrabfluss. Entsprechend stehen lediglich zwei Monate zur Verfügung, um die Fischbewegungen bei 14 m³/s zu beurteilen.

Der Einstieg des Raugerinne-Beckenpasses weiter unterstrom ist weniger stark vom Dotierabfluss abhängig, weil sich die Strömung zwischen Turbinenauslass und Einstieg über die gesamte Gewässerbreite verteilen kann und die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten entsprechend geringer sind. Trotzdem sind in Abbildung 15G deutlich erhöhte mittlere Strömungsgeschwindigkeiten am Einstieg des Raugerinne-Beckenpasses und weiter unterstrom zu erkennen. Diese hohen Geschwindigkeiten sind auf Veränderungen in der Topografie der Restwasserstrecke zurückzuführen. Zum Zeitpunkt der Messung lagen auf der rechten, nicht durchströmten Seite Kiesbänke, denn vor der Messung wurde im Oberwasserkanal des Kraftwerks Geschiebe gebaggert und entlang des Streichwehrs in der Restwasserstrecke deponiert. Folglich war die Restwasserstrecke zum Messzeitpunkt in ihrer Breite reduziert, was eine Abflusskonzentration und höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf der linken Seite zur Folge hatte. Über welche Zeitdauer diese Kiesbänke die Flusstopografie und damit die Strömungsgeschwindigkeiten beeinflussten, ist nicht bekannt. Es ist jedoch anzunehmen, dass der deponierte Kies bei einem kleinen Hochwasserereignis im Anschluss an die Baggerungen wieder mobilisiert und abtransportiert wurde.

Die Ausführungen in diesem Abschnitt zeigen, dass mit hydraulischen Messungen, wie sie hier durchgeführt wurden, die Strömungsbedingungen im Unterwasser von Kraftwerken bestimmt und potenziell ungünstige Strömungsbedingungen am Eingang der Fischaufstiegshilfen identifiziert werden können. Allerdings können die Strömungsbedingungen aus verschiedenen Gründen nicht abschliessend beurteilt werden: Erstens repräsentieren die Messungen nur eine Momentaufnahme und erfassen nicht die gesamte Variabilität der auftretenden Strömungen. Um dies zu erreichen, müssten mehr Messungen bei verschiedenen Strömungsverhältnissen (abhängig von der Hydrologie und dem Kraftwerksbetrieb) durchgeführt werden. Da aber hydraulische Messungen sehr aufwändig und zeitintensiv werden, insbesondere wenn eine grosse Anzahl von Strömungsverhältnissen abgedeckt werden muss, bieten sich numerische Modelle von Kraftwerken als Alternativen an. Zweitens sollten die hydraulischen Messungen mit den Fischstudien zeitlich synchronisiert werden. Erst dadurch wird ein Vergleich der Strömungsverhältnisse und der Resultate der Fischstudien möglich. Drittens hängt die Interpretation der Strömungsverhältnisse stark von dem zur Verfügung stehenden Wissen über das Verhalten der Fische ab. Hier könnten andere Methoden (Telemetriestudien), welche die Bewegungen von Fischen in der Attraktionszone exakt aufzeichnen, zusätzliche Erkenntnisse liefern, die über die Erkenntnisse von PIT-Tagging Studien hinausgehen.

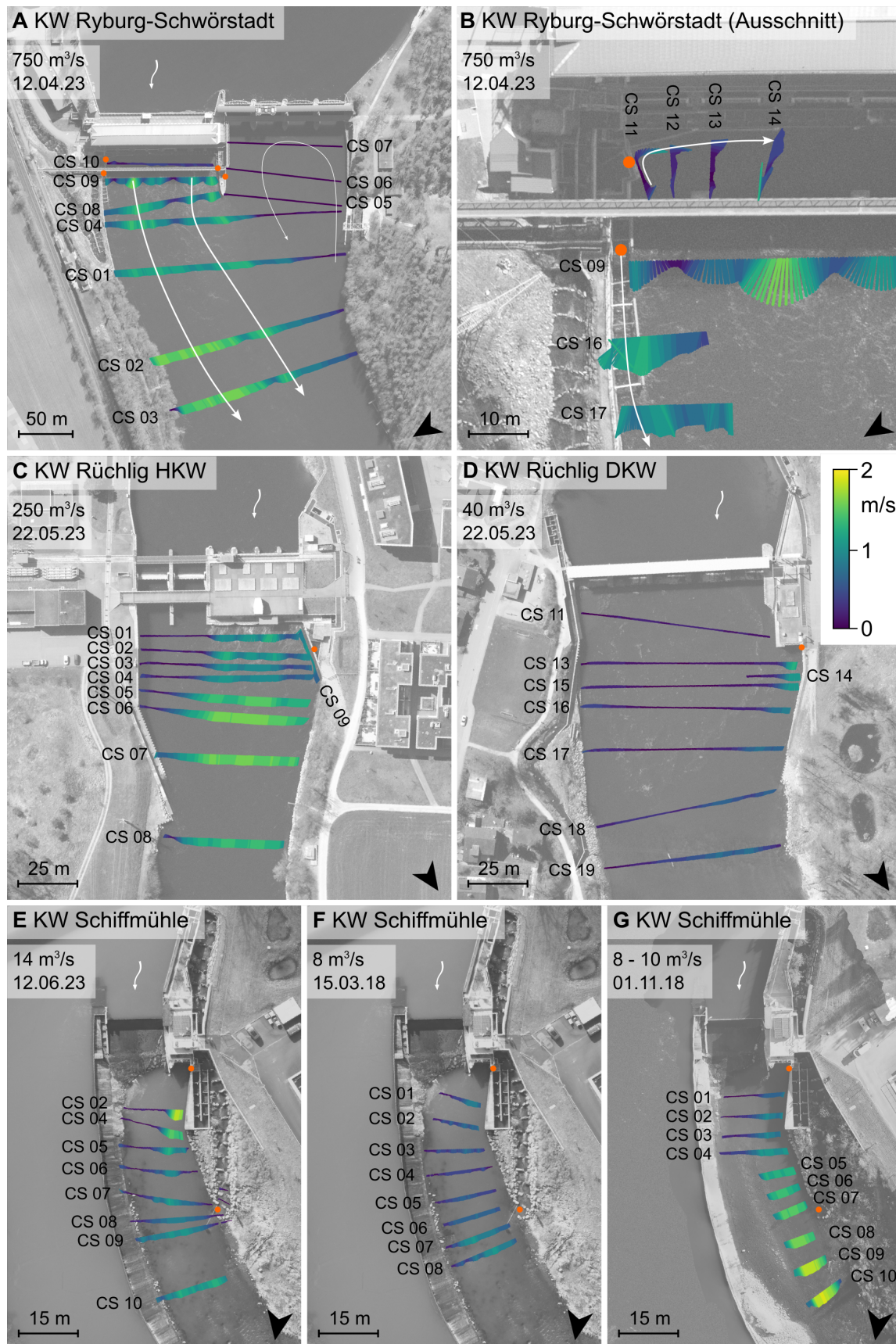


Abbildung 15: Querprofile (CS = QP) der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten an den Kraftwerken A-B) Ryburg-Schwörstadt, C-D) Rüchlig, und E-G) Schiffmühle. Für alle Teilbilder ist am linken, oberen Eck der Abfluss im entsprechenden Flussabschnitt sowie das Datum der ADCP-Messungen angegeben. Die orangen Punkte markieren die Einstiege der Fische aufstiegshilfen.

4.4 Passierbarkeit

4.4.1 Passierbarkeit pro Kraftwerk

Die Passierbarkeit zeigt im Vergleich zur Auffindbarkeit generell eine geringere Variation und scheint unabhängig vom Standort zu sein (Abbildung 16). Die Passierbarkeitsrate liegt zwischen maximal 78% am Kraftwerk Aue und minimal 38% am Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt. Das Kraftwerk Schiffmühle liegt mit einer Passierbarkeit von 75% an zweiter Stelle nach Aue, gefolgt von Rüchlig mit 74%, Säckingen mit 66%, Augst-Wyhlen mit 62% und Rheinfelden mit 58%. Generell ähneln diese Werte der Passageeffizienz, die für andere Fischaufstiegshilfen in Europa geschätzt wurde. Zum Beispiel berechneten Grimardias et al. (2022) eine Gesamtpassageeffizienz von 68% für Forellen, Barben und Alet an zwei Dämmen in der Rhone. In einer Metaanalyse zur Fischaufstiegseffizienz in Spanien schätzten Bravo-Córdoba et al. (2021), dass die Passageeffizienz für verschiedene Fischaufstiegshilfen zwischen 62% und 94% lag.

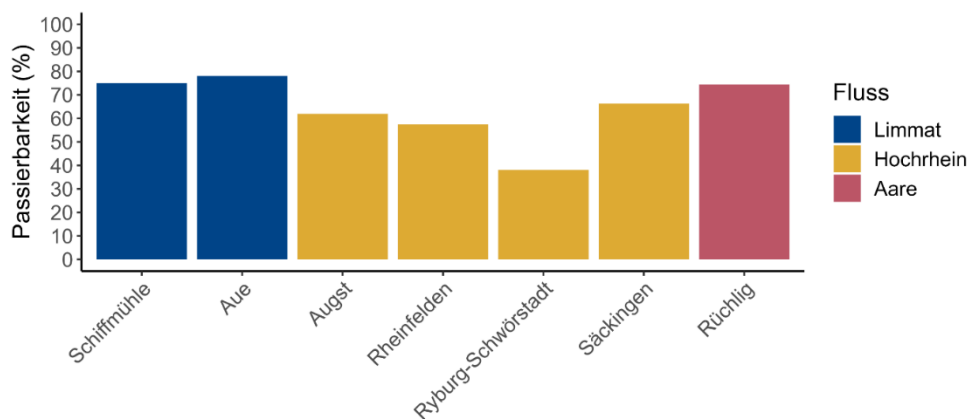


Abbildung 16: Passierbarkeit der sieben untersuchten Kraftwerke.

4.4.2 Passierbarkeit pro FAH-Typ

Beim Vergleich der verschiedenen FAH-Typen lässt sich feststellen, dass innerhalb eines Kraftwerks die Passierbarkeit zwischen Raugerinne-Beckenpass und Schlitzpass ähnlich ist (Abbildung 17). Der Fischlift hingegen weist eine deutlich geringere Passierbarkeit auf. Dies kann möglicherweise auf den intermittierenden Betrieb und längere Funktionsausfälle zurückgeführt werden, die dazu führen können, dass Fische lange warten müssen. Dies wiederum könnte dazu führen, dass sie eher einen alternativen Einstieg in eine alternative Fischaufstiegshilfe suchen. Auch das Umgehungsgewässer zeigt eine geringere Passierbarkeit im Vergleich zum Schlitzpass oder Raugerinne-Beckenpass. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass Fische die Fischaufstiegshilfe durch einen anderen Ausgang verlassen haben, ohne dass dies festgestellt wurde, da an diesem Ausgang keine Antennen installiert waren.

Die Passierbarkeit der in dieser Studie quantifizierten FAH-Typen zeigt ähnliche Muster wie in der Literatur beschrieben. Zum Beispiel variierte die Passierbarkeit von vertikalen Schlitzpässen von etwa 40% in Ryburg-Schwörstadt (Rhein) bis fast 80% in Schiffmühle und Aue (Limmat), während Bravo-Córdoba et al. (2021) eine Spanne von 50% bis 100% für verschiedene Standorte in Spanien aufzeigten. Ähnlich wie in unseren Resultaten wurde für einen Fischlift im Fluss Mucuri, Brasilien, eine sehr geringe Gesamtpassierbarkeit (ca. 7%) festgestellt (Pompeu & Martinez, 2007). Interessanterweise betrug die Passierbarkeit für das Umgehungsgewässer in Rheinfelden etwa 30%. Dieser FAH-Typ ist sehr lang und breit und könnte als Lebensraum für viele Arten dienen, was dazu führt, dass Fische länger brauchen, um hindurchzuschwimmen. Dennoch sollte dieses Ergebnis mit Vorsicht interpretiert werden, da nur wenige Antennen in der Fischaufstiegshilfe aufgestellt waren, um festzustellen, ob sich Fische in bestimmten Bereichen längerfristig aufhielten.

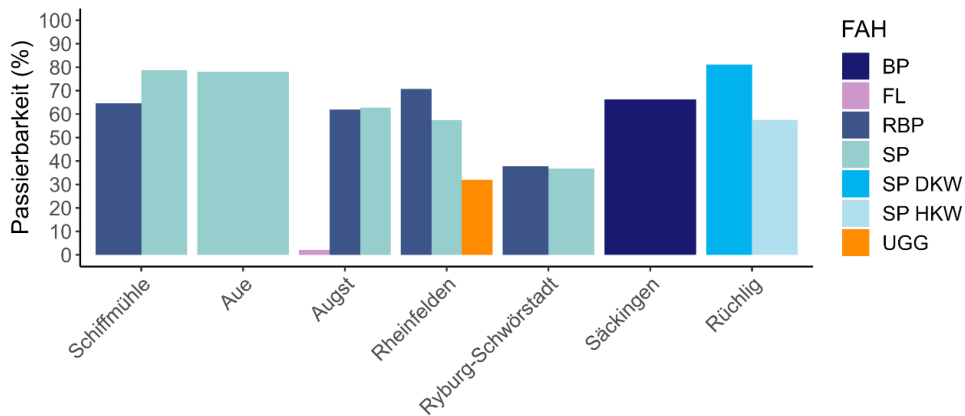


Abbildung 17: Passierbarkeit der jeweiligen Fischaufstiegshilfe der sieben untersuchten Kraftwerke.

4.4.3 Passierbarkeit verschiedener Fischarten

Kraftwerk Schiffmühle

Die fünf Fischarten zeigen Passierbarkeitswerte zwischen 62% und 81%. Barben weisen mit 81% die höchste Passierbarkeit auf, während Egli mit 62% die geringste aufweisen (Abbildung 18A). Im Durchschnitt passierten 50 % der Fische die Fischaufstiegshilfe innerhalb von zwei Stunden (Abbildung 18B). Beim Schneider verzögert sich die Passage um 14 Stunden nach der ersten Detektion. Beim Vergleich dieses Werts mit der Transitzeit wird deutlich, dass für die meisten Fischarten kein grosser Unterschied zur Passagezeit besteht. Jedoch ist beim Schneider die Transitzeit im Vergleich zur Passagezeit nur etwa halb so lang, nämlich 6 Stunden (Abbildung 18C). Folglich halten sich Schneider länger in der Fischaufstiegshilfe auf, als sie wirklich für die Passage benötigen. Dies kann auf Verzögerungen in ihrem Migrationsverhalten hindeuten, sofern das Ziel der Fischaufstiegshilfe ist, dass alle Fische unverzüglich aufsteigen.

In Abbildung 18D wurde die Transitzeit mit Höhenmeter standardisiert. Dadurch lassen sich die Daten mit anderen Kraftwerken vergleichen. Diese Standardisierung ist ein Versuch, Vergleiche zwischen Fischaufstiegshilfen an mehreren Standorten umfassender zu gestalten, da jeder Standort unterschiedliche Faktoren wie zum Beispiel die Länge der Fischaufstiegshilfe oder Abfluss aufweisen. In einem ähnlichen Versuch schätzten Bravo-Córdoba et al. (2021), dass der Erfolg des Aufstiegs durch technische Fischaufstiegshilfen (z.B. Schlitzpass) signifikant durch die Neigung und den Höhenunterschied zwischen den Becken beeinflusst wurde. Die Autoren quantifizierten die Transitzeit im Bereich von 1 bis 32 min/m Höhe im Schlitzpass. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Transitzeit für die meisten Arten zwischen 5 und 60 min/m Höhe für alle untersuchten Fischaufstiegshilfen lag. Im Allgemeinen haben Studien gezeigt, dass die Passagezeit kurz ist und im Bereich von Stunden bis zu einigen Tagen liegt (Kelley et al., 2023; Ovidio et al., 2017).

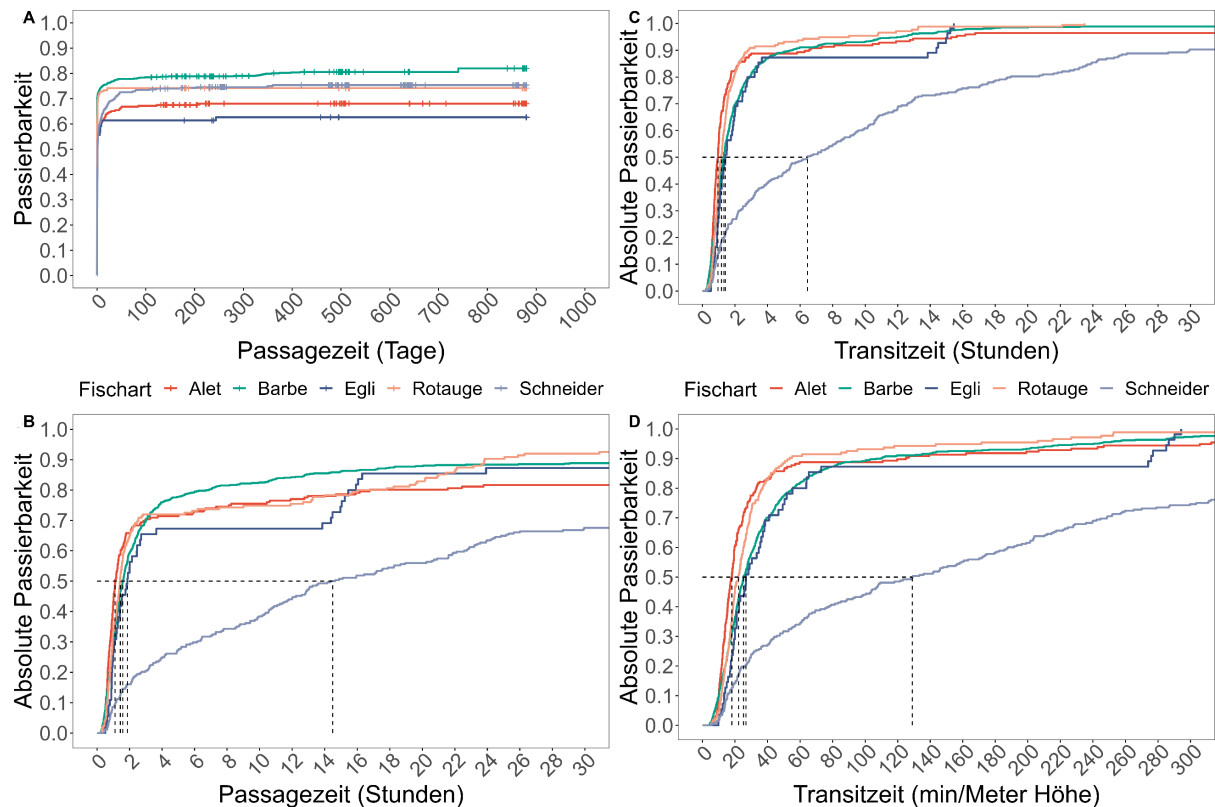


Abbildung 18: Passierbarkeit am Kraftwerk Schiffmühle. A) Passierbarkeit der unterschiedlichen Arten über die Zeitdifferenz von der ersten Detektion bis zur Passage. Die vertikalen Striche widerspiegeln «zensierte» Fische, die die Fischaufstiegshilfe nie passierten. B) Absolute Passierbarkeit, welche nur die Fische repräsentiert, die die Fischaufstiegshilfe passierten über die Zeitdifferenz von der ersten Detektion bis zur letzten Detektion der letzten Antenne der ersten erfolgreichen Passage. C) Absolute Passierbarkeit, welche nur die Fische repräsentiert, die die Fischaufstiegshilfe passierten über die Zeitdifferenz von der letzten Detektion der ersten Antenne bis zur letzten Detektion der letzten Antenne der ersten erfolgreichen Passage. D) Transitzeit pro Höhenmeter. Die gestrichelte schwarze Linie zeigt, ab welchem Zeitpunkt 50% einer Art die Fischaufstiegshilfe passierten. Dies hilft die Werte zwischen Arten zu vergleichen.

Vergleich zwischen den Kraftwerken

In den meisten Fischaufstiegshilfen ist die Passagezeit nicht wesentlich länger als die Transitzeit (Abbildung A2). Bei der Barbe jedoch weicht die Passagezeit häufiger von der Transitzeit ab. Es kommt vermehrt vor, dass die Transitzeit viel kürzer ist als die Passagezeit. Am Kraftwerk Aue zum Beispiel betrug der Unterschied sechs Stunden (Ttime = 1h, Ptime = 7h). In Augst-Wyhlen 16 Stunden (Ttime = 1h, Ptime = 17h) und in Ryburg-Schwörstadt auch sechs Stunden (Ttime = 11, Ptime = 17). In Säkingen ist Alet die Fischart, bei der sich die Transitzeit von der Passagezeit stärker unterscheidet (Ttime = 1h, Ptime = 4h).

Unterschiedliche Passage- und Transitzeiten können zwischen Fischarten auftreten und können durch Verhaltensreaktionen oder betriebliche Aspekte in einer Fischaufstiegshilfe beeinflusst werden. Zum Beispiel zeigte der Buckelkopfsauger (*Xyrauchen texanus*) unterschiedliche Verzögerungen in Bezug auf Passage- und Transitzeiten (in der Studie als Aufstiegs- und Ausgangsphasen bezeichnet), wahrscheinlich aufgrund der Ablehnung der "unnatürlichen" Bedingungen am Ausgang (Kelley et al., 2023). Ähnliche Unterschiede in Passage- und Transitzeiten wurden für die Bachforelle (*Salmo trutta*) und die Barbe im Fluss Bocq in Belgien beschrieben, höchstwahrscheinlich aufgrund von Einschränkungen im Zusammenhang mit dem hohen Gefälle und den Strömungsgeschwindigkeiten in der oberen Hälfte des Fischaufstiegs (Ovidio et al., 2017). Die Motivation der Cypriniden durch Fischaufstiegshilfen zu wandern, könnte die Passageeffizienz positiv beeinflussen (Sanz-Ronda et al., 2016), was die Unterschiede zwischen Passage- und Transitzeiten in unserer Analyse erklären könnte. Jedoch ist es sehr schwierig zu bestimmen, wie gross die Motivation der Fische hinsichtlich Migration ist (Cooke & Hinch, 2013). Die Untersuchung der Zeitverzögerung ist insbesondere im Eingangs- wie

auch im Ausgangsbereich sehr wichtig. In unserer Studie wurde der Ausgangsbereich jedoch nicht ausführlich untersucht, da nicht überall Doppelantennen installiert waren.

Das Phänomen einer längeren Transitzeit beim Schneider, wie im Fall von Schiffmühle beschrieben, zeigte sich auch in Ryburg-Schwörstadt, jedoch nicht in Rheinfelden. Dies könnte darauf hindeuten, dass kombinierte Fischaufstiegshilfen für Schneider eine Ablenkung oder ein Problem sind. Durch die Platzierung zusätzlicher Antennen innerhalb einer Fischaufstiegshilfe oder an kritischen Stellen, wie beispielsweise im Verteilbecken, wo die beiden Einstiegsstränge der kombinierten Fischaufstiegshilfe zusammentreffen, kann eine genauere Erfassung dieser Verhaltensmuster und Problemzonen ermöglicht werden. Ein besseres Verständnis solcher Verhaltensmuster bei den Zielarten kann zur Verbesserung des Designs von Fischaufstiegshilfen beitragen. Weitere Informationen zu diesem Thema finden sich in Kapitel 4.8.

Um die Transitzeiten zwischen Kraftwerken zu vergleichen, wurde die Transitzeit pro Höhenmeter berechnet (Abbildung 19). Es fällt auf, dass sich die Transitzeit für Alet bei den meisten Kraftwerken zwischen 5 und 30 Minuten pro Höhenmeter bewegt, jedoch für Rheinfelden bei 40 Minuten pro Höhenmeter und für Ryburg-Schwörstadt sogar bis zu 315 Minuten pro Höhenmeter liegt. Auch bei der Barbe zeigt sich, dass Ryburg-Schwörstadt generell das Kraftwerk mit der höchsten Transitzeit ist (Abbildung 19B). Hier jedoch ist die Variabilität der Transitzeiten im Vergleich zu Alet geringer (Abbildung 19A). Ryburg-Schwörstadt und Rheinfelden sind die zwei Kraftwerke, bei denen die Transitzeit pro Höhenmeter bei allen fünf Fischarten am längsten ist. In Rheinfelden könnte dies grösstenteils auf die Länge des Umgehungsgewässers zurückzuführen sein. Jedoch konnte bei der Untersuchung der verschiedenen Transitzeiten pro FAH-Typ kein grosser Unterschied festgestellt werden (siehe Tabellen A1, D&E). Anhand der vorliegenden Daten lässt sich keine klare Aussage über die Problemzone aufgrund der Antennenaufstellung treffen. Das Fehlen von Antennen am orografisch linken Eingang des Umgehungsgewässers könnte ein Grund für die Verlängerung der Transitzeit sein (siehe Abbildung 4B). In Ryburg-Schwörstadt könnte vermutet werden, dass die Fische im Raugerinne-Beckenpass länger brauchen als im Schlitzpass. Jedoch konnte die Transitzeit für den Schlitzpass nicht separat berechnet werden, da die Ausgangsantenne am Ende der kombinierten Fischaufstiegshilfe positioniert ist und am Übergang vom Schlitzpass zum Raugerinne-Beckenpass keine Antenne installiert wurde. Dies führt dazu, dass die Fische grösstenteils auch den Raugerinne-Beckenpass durchqueren müssen, was zu einer längeren Transitzeit führen könnte. Weitere Antennen wären notwendig, um die Gründe für die lange Transitzeit zu ermitteln.

Es ist entscheidend, die Passage- und die Transitzeit getrennt zu berechnen. Die Passagezeit gibt Aufschluss über die Migration und deutet auf mögliche Verzögerungen hin, die die Wanderung beeinträchtigen könnten. Verzögerungen könnten problematisch sein, da Fische typischerweise innerhalb eines kurzen Zeitfensters migrieren müssen, insbesondere während der Laichzeit. Es stellt sich jedoch die Frage, wann eine Verzögerung als relevant betrachtet werden sollte und ab welchem Zeitpunkt sie für Fische problematisch wird. Um dies festzustellen, ist ein Verständnis der Auswirkungen auf den physiologischen Zustand der Fische notwendig. In dieser Studie können wir lediglich die Passagezeiten angeben, jedoch nicht in vollem Umfang interpretieren. Es wäre ein detaillierteres Verständnis der Fischwanderung erforderlich, um zu erkennen, ab welcher Passagezeit diese für die Wanderung kritisch werden könnte.

Die Transitzeit dagegen gibt uns einen Einblick in die Effizienz der Passage der Fischaufstiegshilfen. Kurze Transitzeiten deuten darauf hin, dass die Passierbarkeit in der Regel kein grosses Problem darstellt, abgesehen möglicherweise von den Schneidern, wie im Fall der beiden kombinierten Fischaufstiegshilfen. Hier wäre es ratsam, das Verhalten der Schneider innerhalb der Fischaufstiegshilfe genauer zu untersuchen. Dies könnte durch das Hinzufügen zusätzlicher Antennen innerhalb der Fischaufstiegshilfe erreicht werden, beispielsweise im Verteilbecken. Auf diese Weise könnten vermutlich auch Massnahmen abgeleitet werden, um die Fischgängigkeit zu verbessern.

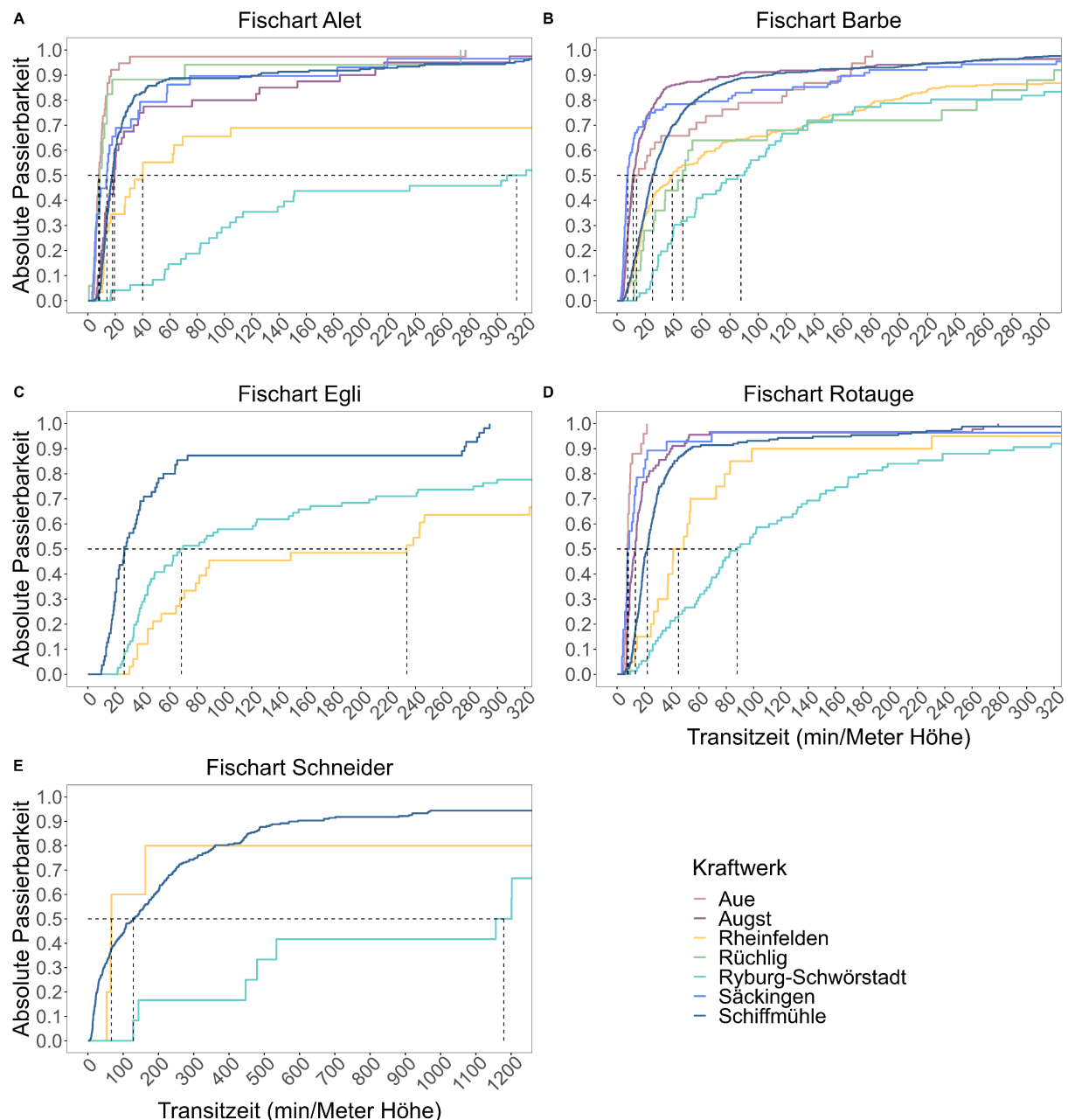


Abbildung 19: Transitzeit pro Höhenmeter pro Fischart und Kraftwerk.

4.4.4 Passierbarkeit verschiedener Fischarten und FAH-Typen

Die Passierbarkeit der verschiedenen Fischarten und Fischaufstiegshilfen ist grösstenteils standortspezifisch. Obwohl die Passage- und Transitzeit für jede Fischart und jede Fischaufstiegshilfe berechnet wurde, müssen die Ergebnisse mit Vorsicht betrachtet werden, da die Antennenkonfigurationen der Kraftwerke stark variieren. Dennoch können diese Informationen je nach Zielsetzung der Fischaufstiegshilfe bedeutend sein. Wenn beispielsweise die Fische sich in der Laichzeit befinden, sollte die Passage- und Transitzeit möglichst kurz sein. Wenn die Fischaufstiegshilfe jedoch für andere Funktionen, z.B. als Lebensraum, gestaltet wurde, spielt die Passage- und Transitzeit eine weniger wichtige Rolle. Für detaillierte Informationen zu den Passage- und Transitzeiten siehe Tabellen A1, A-G.

4.5 Strömungsverhältnisse in den FAH

Als Ergänzung zur Beurteilung der Passierbarkeit im vorangehenden Abschnitt wurden die Strömungsverhältnisse an 14 Becken von sechs Fischaufstiegshilfen an den Kraftwerken Ryburg-Schwörstadt, Rüchlig und Schiffmühle vermessen (Abschnitt 3.4.2). Eine komplette Beurteilung der Strömungsverhältnisse in einer Fischaufstiegshilfe ist grundsätzlich ein herausforderndes Unterfangen. Die Hauptschwierigkeiten liegen insbesondere in der Zugänglichkeit der Becken, die nicht immer gegeben ist, in der Anzahl der Becken sowie in den vorgefundenen Fließgeschwindigkeiten und Abflusstiefen, die eine Messung teilweise erschweren oder verunmöglichen. Von den angewandten Methoden erwiesen sich PIV und ADV als teilweise geeignet für Messungen in den Fischaufstiegshilfen. ADCP-Messungen sind in grösseren Becken auch möglich, in denen ADV nicht angewendet werden kann.

4.5.1 Fließgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche (PIV-Messungen)

Mittels PIV wurden die mittleren Fließgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche gemessen. Abbildung 20 zeigt dies am Beispiel von zwei Becken A) in einem Schlitzpass und B) in einem Raugerinne-Beckenpass. In beiden Becken wurden die höchsten Fließgeschwindigkeiten im Schlitz gemessen ($u = 1.5 \text{ m/s}$ im SP HKW Rüchlig, $u = 1.2 \text{ m/s}$ im RBP Schiffmühle). Für die Fischaufstiegshilfen an den verschiedenen Kraftwerken wurden folgende maximale Fließgeschwindigkeiten gemessen:

- Am Kraftwerk Schiffmühle wurde ein Becken des Schlitzpasses und drei Becken des Raugerinne-Beckenpasses vermessen. Die maximalen Fließgeschwindigkeiten lagen bei $u = 0.5 \text{ m/s}$ (SP) (Abbildung A3, C) und zwischen $u = 0.8 \text{ m/s}$ (Abbildung A3, A) und $u = 1.2 \text{ m/s}$ (RBP). Diese Werte liegen unter dem vorgeschlagenen Maximalwert von 1.7 m/s für die Barbenregion (bei einem Gesamthöhenunterschied der Fischaufstiegshilfe von 3 m bis 6 m) gemäss DWA 2016.
- Am Kraftwerk Rüchlig wurden je ein Becken des Schlitzpasses am HKW und am DKW vermessen. Die maximalen Fließgeschwindigkeiten lagen bei $u = 1.5 \text{ m/s}$ (HKW) und $u = 1.7 \text{ m/s}$ (DKW) (Abbildung A3, G). Diese Werte liegen knapp unter den vorgeschlagenen Maximalwerten von 1.7 m/s für die Barbenregion respektive 1.9 m/s für die Äschenregion (bei einem Gesamthöhenunterschied der Fischaufstiegshilfe von 3 m bis 6 m) gemäss DWA 2016.
- Am Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt wurden zwei Becken des Schlitzpasses und ein Becken des Raugerinne-Beckenpasses vermessen. Die maximalen Fließgeschwindigkeiten lagen bei $u = 0.6 \text{ m/s}$ (RBP) (Abbildung A3, F) und bei $u = 1.1 \text{ m/s}$ (Abbildung A3, D) respektive $u = 1.3 \text{ m/s}$ (SP) (Abbildung A3, E). Diese Werte liegen unter dem vorgeschlagenen Maximalwert von 1.6 m/s für die Barbenregion (bei einem Gesamthöhenunterschied der Fischaufstiegshilfe von 6 m bis 9 m) gemäss DWA 2016.

Die gemessenen Fließgeschwindigkeiten zeigen, dass sie die Maximalwerte gemäss DWA 2016 nicht überschreiten. Wenn wir das Strömungsmuster betrachten, wird die Hauptströmung am Schlitz in Fließrichtung zur linken Wand abgelenkt, was eine Rückströmungszone zwischen dem Zentrum des Beckens und der rechten Wand erzeugt (Tarrade et al., 2008). Die hohe Fließgeschwindigkeit am Schlitz nimmt entlang der Strömungsrichtung ab. Diese Strömungsbedingung wird im Vergleich zu einem kleinen Ablenkungswinkel als vorteilhaft angesehen, bei dem die Hauptströmung nicht zur Wand abgelenkt wird und direkt mit dem neuen Schlitz verbunden ist. Der Raugerinne-Beckenpass ist mit der Strömungstopologie des kleinen Ablenkungswinkels verbunden, was sich vom Schlitzpass unterscheidet. Allerdings kann sich das Strömungsfeld von einem Becken zum anderen im Raugerinne-Beckenpass aufgrund der Konstruktion unterscheiden, wodurch Fische möglicherweise unterschiedliche Strömungsverhältnisse erleben. Daher ist das Strömungsfeld in einem einzelnen Becken nicht

repräsentativ für den Raugerinne-Beckenpass im Gegensatz zu ähnlichen Strömungsfeldern, die in jedem Becken des Schlitzpasses auftreten. Die Messungen weisen darauf hin, dass die Fischaufstiegshilfen richtig dimensioniert wurde, was mit den Ergebnissen der Passierbarkeit übereinstimmt (Abschnitt 4.4).

Das hier eingesetzte Messverfahren PIV hat den Vorteil, dass auch an schwierig zugänglichen Messstellen (z.B. tief liegende Becken) und bei vergleichsweise hohen Fließgeschwindigkeiten und Abflusstiefen Messungen durchgeführt werden können. Zudem dauert die Messung vergleichsweise kurz. Jedoch können nur Fließgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche gemessen werden und es ist nicht möglich dreidimensionale Strömungen zu erfassen. Für breite Gerinne, wo die Abflusstiefen im Verhältnis zur Gerinnebreite klein sind, ist dies jedoch keine grosse Einschränkung. In Raugerinne-Beckenpässe ist dies teilweise der Fall; in Schlitzpässen eher nicht. Zudem können mit PIV auch keine turbulenten Grössen aus den Messdaten extrahiert werden. Im Gegensatz dazu ist dies mit ADV möglich. Folglich wird empfohlen, PIV-Messungen in breiten Gerinnen mit vergleichsweise kleinen Abflusstiefen durchzuführen, wenn keine zeitlich hochaufgelösten Geschwindigkeitsdaten notwendig sind.

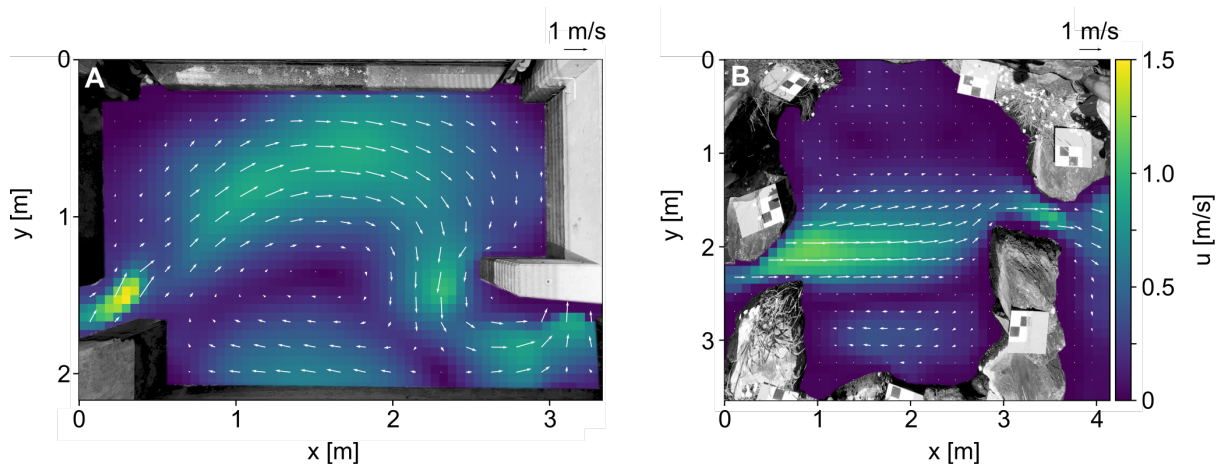


Abbildung 20: Mittlere Fließgeschwindigkeiten u an der Wasseroberfläche im A) Schlitzpass HKW des Kraftwerks Rüchlig (Becken Nr. 23) und im B) Raugerinne-Beckenpass des Kraftwerks Schiffmühle (Becken Nr. 23).

4.5.2 Fließgeschwindigkeiten unter der Wasseroberfläche und turbulente kinetische Energie (ADV-Messungen)

Mittels ADV wurden in einem Becken des Raugerinne-Beckenpasses am Kraftwerk Schiffmühle die Fließgeschwindigkeiten gemessen und die turbulente kinetische Energie (TKE) bestimmt. Abbildung 21 zeigt die Resultate für Messungen auf einer Tiefe von etwa 26 cm unter der Wasseroberfläche. Dies entspricht ungefähr der halben Abflusstiefe. Die Abflusstiefen lagen zwischen 40 und 60 cm.

Die mittleren Fließgeschwindigkeiten in Abbildung 21A zeigen grundsätzlich ein ähnliches Muster wie die Resultate der PIV-Messung in Abbildung 20B. Die höchsten Fließgeschwindigkeiten ($u = 1.2$ m/s bis $u = 1.4$ m/s) sind unterstrom des Schlitzes in der Mitte des Beckens zu finden. Links und rechts von diesem Hauptstrahl liegen Rückströmungszonen mit tiefen Geschwindigkeiten ($u < 0.4$ m/s). Diese Werte liegen unter dem vorgeschlagenen Maximalwert von 1.7 m/s für die Barbenregion (bei einem Gesamthöhenunterschied der Fischaufstiegshilfe von 3 m bis 6 m) gemäss DWA 2016.

Die TKE in Abbildung 21B weist die höchsten Werte ($TKE \approx 0.15 \text{ m}^2/\text{s}^2$) kurz unterstrom des Schlitzes auf. Danach nimmt die TKE auf kurzer Strecke deutlich ab und erreicht Werte von $TKE < 0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ in den meisten Bereichen des Beckens. Diese Werte liegen im Bereich der maximalen (0.14 - 0.4) und

durchschnittlichen (0.04 - 0.08) TKE-Werte, wie sie von zwei weiteren Studien (Kucukali et al., 2023 und Quaranta et al., 2017), für Schlitzpässe angegeben werden. Sie liegen deutlich unter den Werten für den Beckenpass (Guiny et al., 2005). Es ist anzunehmen, dass die TKE-Werte für Raugerinne-Beckenpässe ähnlich den Werten für Schlitzpässe sind (siehe Abschnitt 4.4.2).

Diese Ausführungen zeigen, dass mittels ADV Fließgeschwindigkeiten und TKE in einer Fischaufstiegshilfe gemessen werden können. Allerdings bedingt dieses Messverfahren eine gute Zugänglichkeit, kleine Abflusstiefen (< 1 m) und geringe Fließgeschwindigkeiten (< 1.5 m/s). Bei den in der vorliegenden Studie untersuchten Fischaufstiegshilfen war dies nur im Raugerinne-Beckenpass des Kraftwerks Schiffmühle der Fall. Bei allen anderen Fischaufstiegshilfen war oftmals die Zugänglichkeit erschwert oder hätte eine aufwändige Installation für die Halterung der Messsonde vorausgesetzt. Zudem sind in Schlitzpässen oft hohe Strömungsintensitäten Abflusstiefen von etwa 1.5 m und Fließgeschwindigkeiten von 1.5 m/s vorhanden, die ebenfalls eine aufwändige Befestigung der Sonde voraussetzen. Die lange Messdauer ist ein weiterer Nachteil von ADV-Messungen. Folglich wird empfohlen, ADV nur einzusetzen, wenn mit hoher Frequenz gemessen werden muss (z.B. um turbulente Größen zu bestimmen).

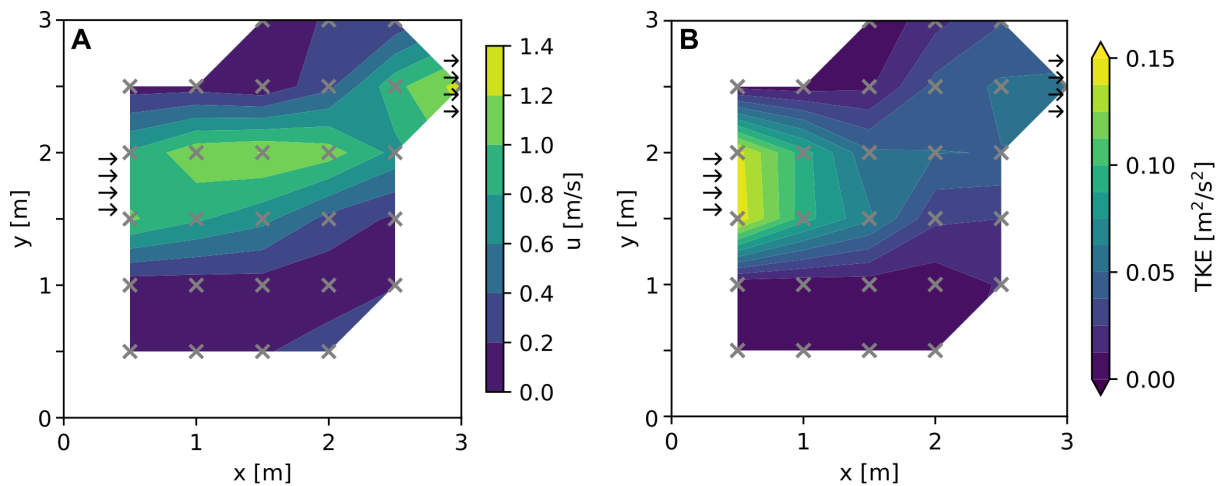


Abbildung 21: Resultate der ADV-Messung in Becken Nr. 23 des Raugerinne-Beckenpasses am Kraftwerk Schiffmühle: A) Betrag der mittleren Fließgeschwindigkeit und B) turbulente kinetische Energie (TKE). Die Messungen wurden an den Messpunkten (graue Kreuze) auf einer Tiefe etwa 26 cm unter der Wasseroberfläche durchgeführt. Zwischen den Messpunkten wurde linear interpoliert. Die schwarzen Pfeile bezeichnen den Einlauf und Auslauf des Beckens.

4.6 Längenselektivität

In Abbildung 22 ist die Auswertung der Dichtediagramme für die Fischart Alet präsentiert. Dieselben Auswertungen für alle weiteren Fischarten sind im Anhang aufgeführt. Dabei werden für jede der fünf Fischarten drei Gruppen verglichen: die ausgesetzten Fische, die Fische, die die Fischaufstiegshilfe auffanden, und die Fische, die die Fischaufstiegshilfe passierten. Jede dieser Gruppen wird durch eine separate Dichtekurve repräsentiert. Jede Grafik stellt ein Kraftwerk dar.

Generell lässt sich eine leichte Tendenz zur vermehrten Auffindbarkeit und Passierbarkeit grösserer Fische in verschiedenen Kraftwerken im Vergleich zu den ausgesetzten Fischen erkennen (Abbildung 22; Abbildung A4 bis A7). Die Auswertung der Dichtediagramme zeigt jedoch auch, dass viele kleinere Fische (50-150 mm) die Fischaufstiegshilfen erfolgreich aufsuchen und durchqueren.

Ähnliche Muster werden auch beim Auffinden und Passieren der unterschiedlichen FAH-Typen deutlich. In Abbildung 23 wird dies am Beispiel des Alet veranschaulicht. Beim Vergleich der verschiedenen FAH-

Typen fällt auf, dass in der Schiffmühle tendenziell kleinere (75-100 mm) und grössere Fische (175-350 mm) vermehrt den Schlitzpass aufsuchen und passieren im Gegensatz zum Raugerinne-Beckenpass, wo häufiger Fische mit einer mittleren Grösse von 100-175 mm diese Fischaufstiegshilfe auffinden und passieren (Abbildung 23A). Siehe im Anhang Abbildung A8 bis A11 für die restlichen Fischarten.

In Ryburg-Schwörstadt zeichnet sich ebenfalls die Tendenz ab, dass eher kleinere und grössere Fische den Schlitzpass verwenden im Vergleich zur durchschnittlichen Fischgrösse (Abbildung 23E und A8 bis A11, E). In Augst zeigt sich ein unterschiedlicher Trend: Hier finden und passieren grössere Fische (Barbe: 350-800 mm; Alet: 250-600 mm; Rotaugen: 200-300 mm) vermehrt den Raugerinne-Beckenpass im Vergleich zum Schlitzpass (Abbildung 23C, A8 bis A11, C).

Diese Analyse zeigt, dass generell keine ausgeprägte Längenselektivität zwischen dem Aussetzen, dem Auffinden und dem Passieren von Fischaufstiegshilfen festgestellt werden kann. Die Analyse der Längenselektivität der unterschiedlichen FAH-Typen zeigt kleine Trends, dass der Schlitzpass vermehrt von kleineren und grösseren Fischen im Vergleich zum Raugerinne-Beckenpass aufgefunden wird, aber nicht bei allen Kraftwerken (z.B. Augst-Wyhlen). Es wird keine einheitliche Tendenz über alle Kraftwerke hinweg deutlich; es scheint sehr standortabhängig zu sein.

In den zwei Wirkungskontrollen aus der Limmat und Aare wurde auch keine Längenselektivität aufgezeigt (Breitenstein et al., 2019; Schölzel et al., 2020). In der Studie des Hochrheins, wurde eine geringfügige Grössenabhängigkeit festgestellt. Die Fische mit einer Grösse von 100 mm und über 600 mm zeigten eine geringere Auffindbarkeit. Beim Vergleich der FAH-Typen wurde für die unterschiedlichen Kraftwerke verschiedene Ergebnisse gefunden, aber es zeigte auch eine leichte Tendenz, dass grössere Fische eher den Schlitzpass als Raugerinne-Beckenpass auffanden und passierten. In einer weiteren Studie wurde gezeigt, dass die Fischgrösse einen Effekt auf die Auffindbarkeit hat (Grimardias et al., 2022). Je grösser die Alet und Barben waren (zwischen 300-700 mm), desto höher war die Auffindbarkeit.

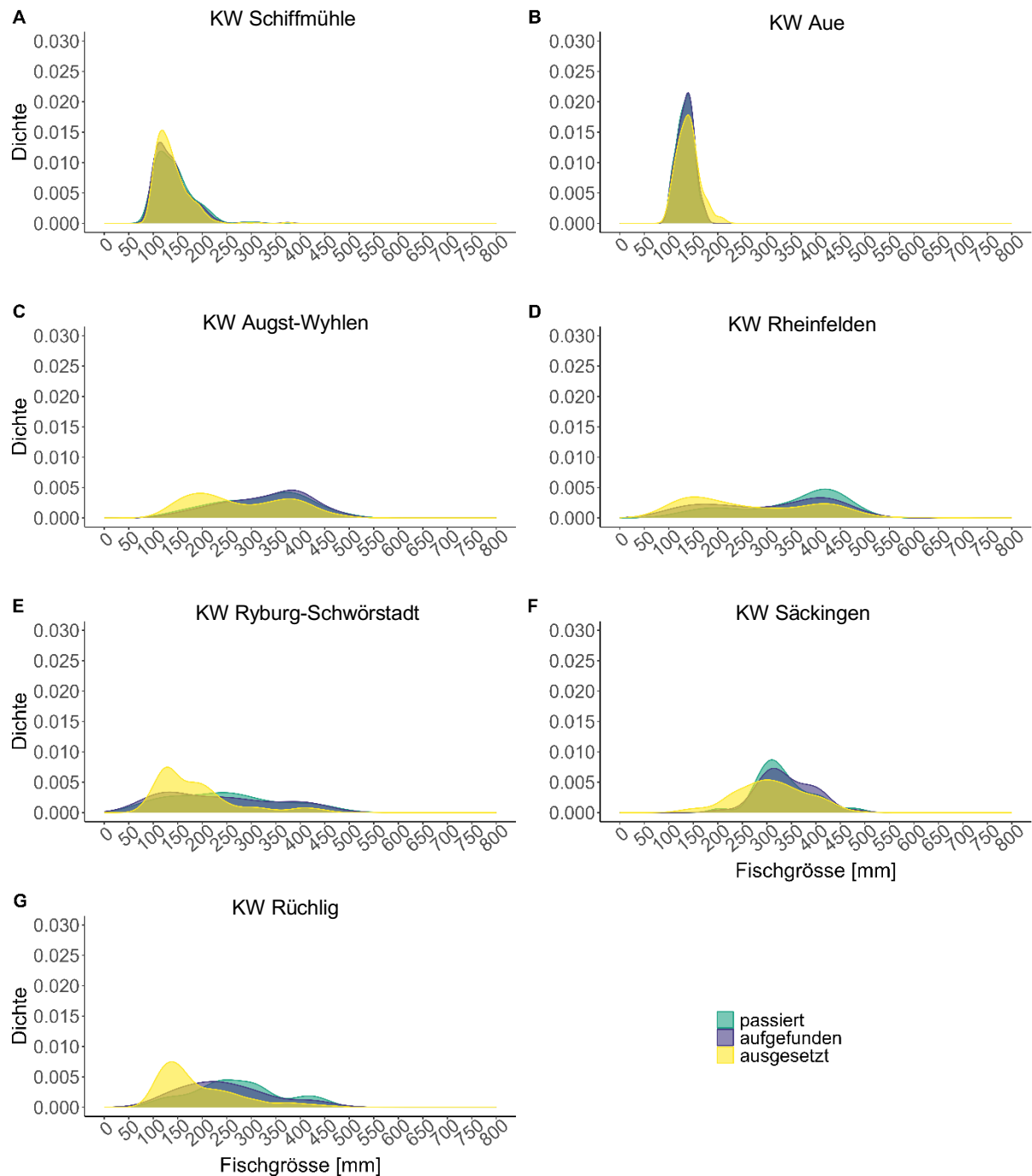


Abbildung 22: Dichtediagramme der Fischart Alet; Die Wahrscheinlichkeitskurven der Fischgrössen der ausgesetzten Fische (gelb), der Fischaufstiegshilfe auffindenden Fische (blau) und passierenden Fische (grün) werden in den Grafiken aufgezeigt. A) Kraftwerk Schiffmühle, B) Kraftwerk Aue, C) Kraftwerk Augst-Wyhlen, D) Kraftwerk Rheinfelden, E) Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt, F) Kraftwerk Säckingen, G) Kraftwerk Rüchlig

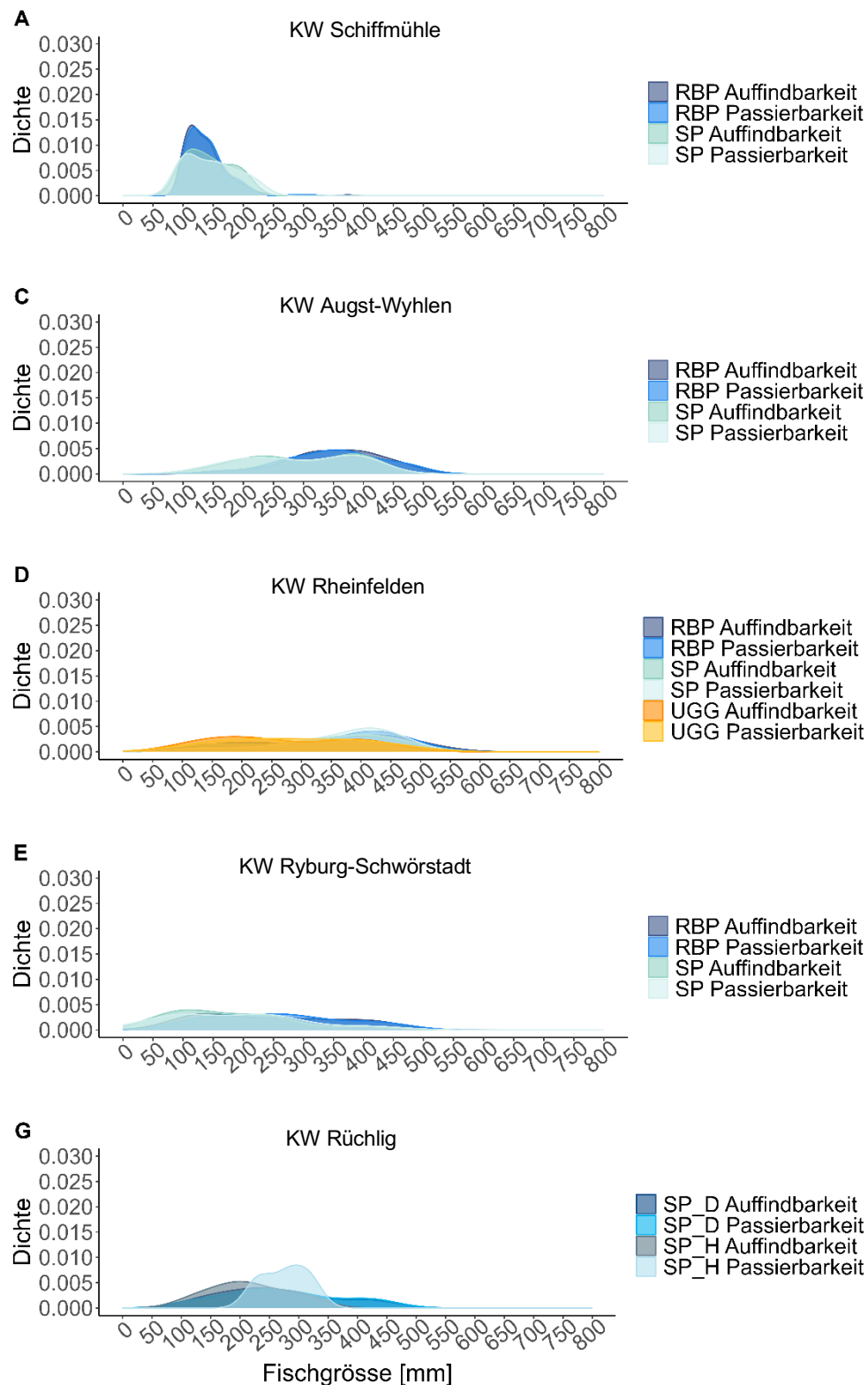


Abbildung 23: Dichtediagramme der Fischart Alet pro Fischaufstiegshilfe; Die Wahrscheinlichkeitskurven der Fischgrössen der Fischaufstiegshilfen auffindenden und passierenden Fische werden in den Grafiken aufgezeigt. RBP = Raugerinne-Bettenpass, SP = Schlitzpass und UGG = Umgehungsgewässer; A) Kraftwerk Schiffmühle, C) Kraftwerk Augst-Wyhlen, D) Kraftwerk Rheinfelden, E) Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt, G) Kraftwerk Rüchlig

4.7 Passierbarkeit: die wichtigsten Faktoren

Einflussfaktoren Passierbarkeit

Es wurde ein gemischtes Modell (Generalized Linear Mixed Model - GLMM) verwendet, um die Faktoren zu untersuchen, die die Passierbarkeit von Fischen beeinflussen könnten. Das optimale Modell, das die Daten am besten erklärt, identifiziert einen signifikanten Faktor.

$$\text{Passage (1/0)} \sim \text{FAH-Typ} + (1|\text{Kraftwerk})$$

Das optimale Modell, welches die Wahrscheinlichkeit der Passage durch die Fischaufstiegshilfe erklärt, ergab, dass der FAH-Typ (95% CI [1.09, 1.48], p-value = 0.002), den grössten Teil der Variation erklärt. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit der Passage durch einen Schlitzpass im Vergleich zu einem Raugerinne-Beckenpass zunimmt. Die unterschiedlichen Kraftwerke erklären auch einen Teil der Variation.

Einflussfaktoren Transitzeit

Es wurde ein Cox'sches Regressionsmodell (Cox proportional hazard regression) verwendet, um die Faktoren zu untersuchen, die die Transitzeit pro Meter Höhe von Fischen beeinflussen könnten. Das optimale Modell, das die Daten am besten erklärt, identifiziert drei signifikante Faktoren:

$$\text{Surv(Ttime/Meter Höhe, Event)} \sim \text{FAH-Typ} + \text{Gilde} + \text{Leistungsdichte}$$

Das optimale Modell, welches die Transitzeit und Wahrscheinlichkeit der Passage durch die Fischaufstiegshilfe erklärt, ergab, dass der FAH-Typ (95% CI [1.06, 1.26], p-value < 0.001), Gilde (95% CI [1.20, 1.43], p-value < 0.001) und Leistungsdichte (95% CI [0.82, 0.98], p-value = 0.02) den grössten Teil der Variation erklären. FAH-Typ und Gilde zeigen einen positiven Effekt auf die Transitzeit, während eine höhere Leistungsdichte einen negativen Effekt hat. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit der Passage durch einen Schlitzpass im Vergleich zu einem Raugerinne-Beckenpass steigt und die Fische weniger Zeit benötigen, um durchzuschwimmen. Fischarten mit einer höheren Schwimmstärke erhöhen die Wahrscheinlichkeit der Passage und benötigen weniger Zeit im Vergleich zu schwimmschwächeren Arten. Eine höhere Leistungsdichte (>100 W/m³) führt zu einer geringeren Wahrscheinlichkeit der Passage und längeren Transitzeit. Die Stärke dieser Effekte nimmt in folgender Reihenfolge ab: Gilde, FAH-Typ und Leistungsdichte.

Es ist anzunehmen, dass Fische Schlitzpässe im Vergleich zum Raugerinne-Beckenpass schneller passieren können. Dies könnte sich unterschiedlich auf verschiedene Fischarten auswirken (z.B. auf die Fitnesskondition der Fische). Allerdings ist unklar, welche Auswirkungen längere Transitzeiten auf die Fische haben könnten.

Bravo-Córdoba et al. (2021) haben auch den Einfluss des FAH-Typs, der Fischart, des Höhenunterschieds zwischen den Becken und des Leistungsverlusts auf die Passageeffizienz und Transitzeit für zwei technische Fischaufstiegshilfen (vertikaler Schlitzpass und Beckenpass mit bodennaher Öffnung) untersucht. Dabei zeigten sie, dass die Transitzeit in vertikalen Schlitzpässen kürzer war und auch für Cypriniden im Vergleich zu Salmoniden wie der Bachforelle kürzer war. Des Weiteren wurde eine höhere Passageeffizienz für Fischaufstiegshilfen mit geringerem Leistungsverlust geschätzt (120–150 W/m³). Obwohl der Einfluss dieser Variablen die Ergebnisse unseres Modells bestätigt, sollte dies mit Vorsicht interpretiert werden. Eine Reihe anderer biologischer (z.B. Herkunft der Fische im Untersuchungsgebiet) und abiotischer Faktoren (z.B. Wassertemperatur) können ebenfalls die Passageeffizienz und Transitzeiten beeinflussen, wurden jedoch in dieser Studie nicht berücksichtigt.

4.8 Fischverhalten und Bewegungsmuster

Ein Ansatz zur Analyse des Fischeinstiegs anhand dieser PIT-Tag Daten besteht darin, die Anzahl der Einstiegsversuche bis zur ersten Passage zu untersuchen, die potenziell zu einer längeren Passagezeit führen könnte oder Einblicke in die Motivation der Fische geben könnte (Roscoe & Hinch, 2010). Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die Anzahl der Einstiegsversuche durch die Position der Antennen beeinflusst werden kann. Fischaufstiegshilfen mit Einstiegsantennen weit stromaufwärts des Einstiegs könnten in der Praxis eine höhere Anzahl von Einstiegsversuchen verzeichnen, die in dieser Studie jedoch nicht detektiert werden können. Um das individuelle Verhalten von Fischen genauer zu erforschen und potenzielle Problemstellen innerhalb einer Fischaufstiegshilfe zu identifizieren, kann es weiter auch sinnvoll sein, die Bewegungsmuster zwischen den Antennen zu analysieren.

Um ein besseres Verständnis für die lange Passage und die Bewegungen der Schneider zu gewinnen, wurde ihr Verhalten genauer untersucht. Ein deutlicher Unterschied zeigt sich, wenn das Verhalten von Barben und Schneidern am Beispiel des Kraftwerks Schiffmühle verglichen wird. In der Regel passieren Barben die Fischaufstiegshilfe zügig (Median $\approx 1h$) und auf direktem Weg (Abbildung 24A). Im Gegensatz dazu zeigen die Bewegungsmuster des Schneiders ein anderes Verhalten (Abbildung 24B). Schneider bewegen sich innerhalb der Fischaufstiegshilfe hin und her, schwimmen zwischen den Eingangs- und Ausgangsantennen auf und ab. Gelegentlich durchqueren sie die Fischaufstiegshilfe, verlassen sie und kehren dann wieder zurück, um erneut einzusteigen. Dieses Verhalten wirft die Frage auf, warum sich die Fische auf diese Weise verhalten. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass der Schneider empfindlich auf die Abflusstrennung (d.h. Bifurkation) im Verteilbecken der Einstiegstränge der kombinierten Fischaufstiegshilfe und auf Turbulenzen reagiert (siehe Abbildung A3, B), wie es aus Live-Fisch-Tests mit Fischlenkungsstrukturen für den Fischabstieg hervorgeht (Beck et al., 2020). Weitere Gründe könnten sein, dass der Schneider die Fischaufstiegshilfe als Habitat nutzen, von einem grösseren Prädator gefressen wurde, der sich auf und ab bewegt, ein Problem am Ausgang besteht, oder dass der Schneider keine Motivation zum Migrieren hat.

In Ryburg-Schwörstadt, wo der Schneider ebenfalls eine lange Passage- und Transitzeit aufzeigt, unterscheidet sich das Bewegungsmuster (Abbildung 25) von dem am Kraftwerk Schiffmühle. Bei genauerer Betrachtung des Bewegungsmusters scheint es, als würde der Schneider direkt durch die Fischaufstiegshilfe schwimmen. Allerdings fehlen auf der langen Strecke der Fischaufstiegshilfe Antennen. Es sind lediglich zwei am Eingang und eine am Ausgang platziert, so dass das Bewegungsmuster während der Passage durch die Fischaufstiegsanlage nicht beobachtet werden kann. Um dieses Verhalten besser zu verstehen, ist es notwendig, mehr Antennen in der Fischaufstiegshilfe zu installieren, um mögliche Zeitverzögerungen und potenzielle Problembereiche zu identifizieren. Der Schneider schwimmt jedoch nicht wie in Schiffmühle die gesamte Fischaufstiegshilfe auf und ab.

In Rheinfelden zeigt der Schneider im Vergleich zu anderen Fischarten sowie im Vergleich zu den Schneidern in Schiffmühle und Ryburg-Schwörstadt nicht die längste Passage- und Transitzeit. Es wäre interessant zu erfahren, ob das Verteilbecken in Schiffmühle und Ryburg-Schwörstadt das Verhalten der Schneider beeinflusst.

Derzeit ist es nicht möglich festzustellen, ob diese Zeitverzögerung im Fall des Schneiders Auswirkungen auf das Migrationsverhalten, hat oder ob sie die Fischaufstiegshilfe möglicherweise als Habitat nutzen und somit die Zeit weniger eine Rolle spielt. Um diese Bewegungsmuster besser zu verstehen, ist es notwendig, mehr Antennen in der Fischaufstiegshilfe zu platzieren, um Problemzonen zu identifizieren.

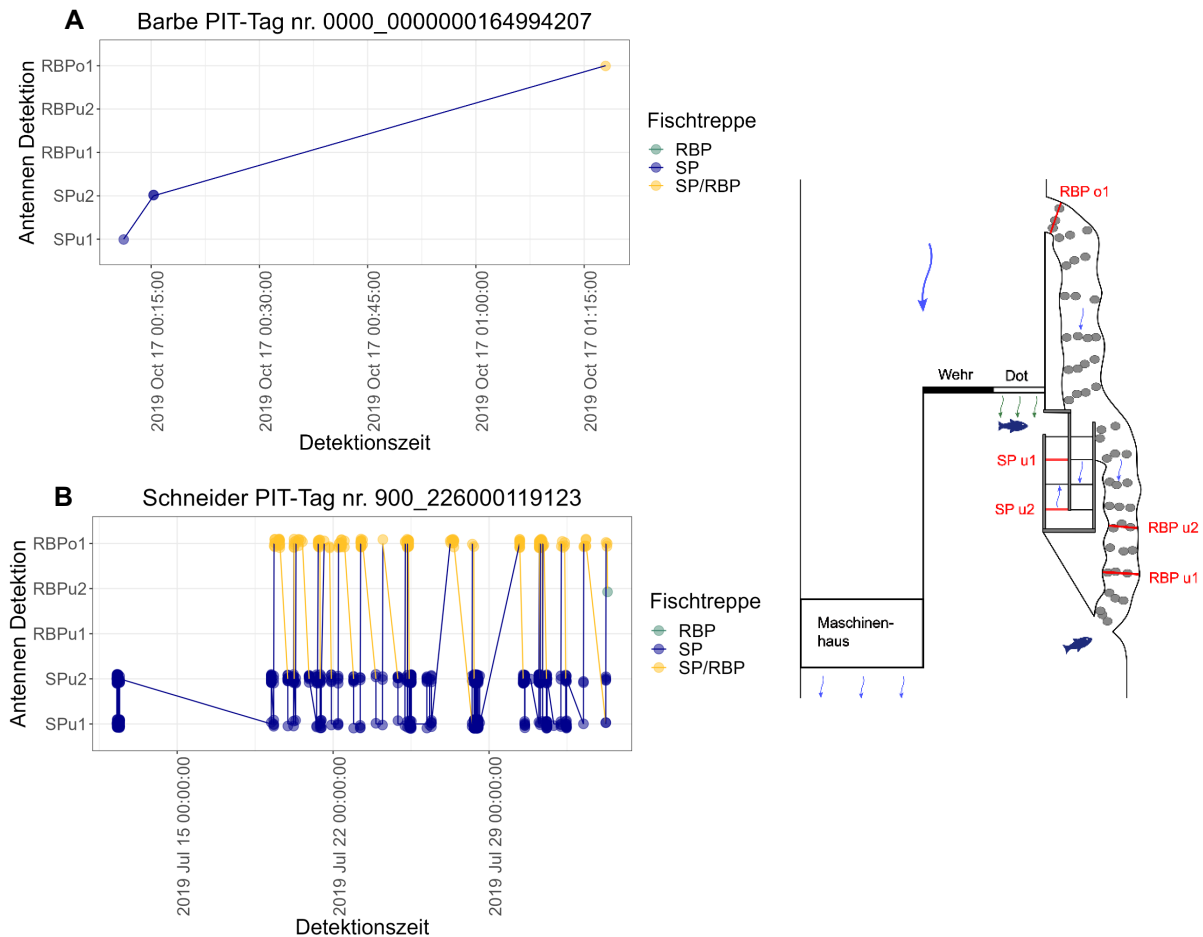


Abbildung 24: Detektionsmuster am Kraftwerk Schiffmühle; A) Typisches Verhalten einer Barbe; B) Typisches Verhalten eines Schneiders. Die Abkürzungen auf der Y-Achse bezeichnen die verschiedenen Antennen. Ihre Lage in der Fischaufstiegshilfe ist im Schema (rechts) abgebildet.

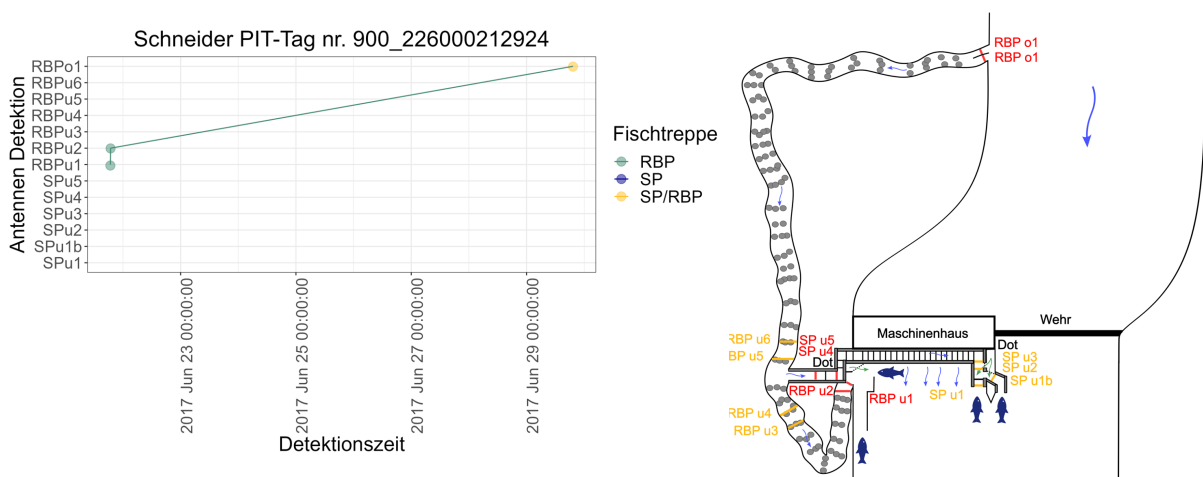


Abbildung 25: Typisches Detektionsmuster am Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt eines Schneiders; Die Abkürzungen auf der Y-Achse bezeichnen die verschiedenen Antennen. Ihre Lage in der Fischaufstiegshilfe ist im Schema (rechts) abgebildet.

Im Anhang ist die Analyse der Anzahl Einstiegsversuche am Beispiel Schiffmühle zu finden (Abbildung A12). Es wurden grundsätzlich Unterschiede zwischen den Fischarten innerhalb und über verschiedene Kraftwerke hinweg festgestellt. Die Anzahl der Einstiegsversuche kann jedoch für jede Fischart an jedem Standort variieren. Im Allgemeinen liegt die durchschnittliche Anzahl der Einstiegsversuche für verschiedene Fischarten zwischen 1 und 2 Versuchen. Es gibt einige Ausreisser mit beispielsweise 30 bis 40 Einstiegsversuchen, jedoch ist die Anzahl der Fische in diesen Fällen gering. Die hier ermittelte Anzahl kann aufgrund der Antennenkonfiguration eine potenzielle Unterschätzung der Anzahl Versuche sein. Um eine bessere Schätzung zu den Einstiegsversuchen zu erhalten, muss zwischen der Attraktions- und Einstiegseffizienz unterschieden werden. Nur so ist festzustellen, ob die Fische nur im Attraktionsbereich hin und her schwimmen oder tatsächlich versuchen in die Fischaufstiegshilfe einzusteigen.

Ein häufig übersehener Aspekt ist die Folge mehrerer Passagen durch eine Fischaufstiegshilfe. Oft liegt der Fokus auf dem Erfolg der ersten erfolgreichen Passage. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass Fische die gleiche Fischaufstiegshilfe mehrmals passieren können. Die Auswirkungen wiederholter Passagen werden häufig vernachlässigt. Studien zu diesem Thema stammen oft ausschliesslich aus Amerika, insbesondere in Bezug auf Salmoniden (Roscoe & Hinch, 2010). Eine Möglichkeit, diese Daten zu betrachten, ist das Bewegungsmuster der Fische und wie häufig sie die Fischaufstiegshilfe erneut passieren. Wiederholte Passagen könnten darauf hinweisen, dass die Funktion der Fischaufstiegshilfe nicht optimal ist, da Fische normalerweise zügig eine Fischaufstiegshilfe passieren sollten, um flussaufwärts zu migrieren. Es könnte auch darauf hinweisen, dass die Fische eine Fischaufstiegshilfe als Lebensraum nutzen und daher häufig von den Antennen erfasst werden. Fischarten mit einer hohen Anzahl von Passagen sollten genauer untersucht werden, um zu verstehen, wie sie die Fischaufstiegshilfen nutzen. Anhand des Beispiels des Kraftwerks Schiffmühle (siehe Abbildung A13) lässt sich erkennen, dass der Schneider die Fischaufstiegshilfe häufig passiert, was auch das Bewegungsmuster in Abbildung 24B unterstützt. Diese Analyse liefert jedoch keine Informationen über die Auswirkungen auf die Fitness der Fische. Daher ist es entscheidend, den Einfluss auf ihr Migrationsverhalten zu verstehen, insbesondere wenn mehrere Kraftwerke durchquert werden müssen.

5 Herausforderungen, Empfehlungen und zukünftige Perspektiven

5.1 Herausforderungen und Empfehlungen zur Standardisierung

Die vorliegende Studie begegnet zahlreichen Herausforderungen, insbesondere im Hinblick auf den Vergleich der verschiedenen Wasserkraftwerke. Das Hauptziel der Untersuchung besteht darin, ein umfassendes Verständnis für die Attraktions- und den Einstiegseffizienz der Fische in Fischaufstiegshilfen zu erlangen. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, dass der Aufbau der Antennen an den verschiedenen Standorten möglichst ähnlich ist, um vergleichbare und zuverlässige Ergebnisse zu erzielen. Einige Antennen wurden jedoch aufgrund technischer Probleme erst mehrere Becken nach dem Einstieg in die Fischaufstiegshilfe installiert, was die Aussagekraft über die Attraktion und den Einstieg der Fische stark beeinträchtigt. Dies führt zu einer erheblichen Einschränkung bei der Bewertung dieser beiden Metriken. Auch die Freisetzung der Fische an unterschiedlichen Positionen flussabwärts erschwert die Vergleichbarkeit, da dies zu variierenden Distanzen zum Einstieg führt. Eine standardisierte Auswertung ist daher nicht für alle Metriken möglich, und es konnten lediglich Schätzungen über die generelle Auffindbarkeit gemacht werden, was eine Unterschätzung der Attraktions- und Einstiegseffizienz sein könnte. Zudem wird angenommen, dass alle ausgesetzten Fische migrieren möchten. Dies entspricht vermutlich nicht der Realität. Für diesen Faktor können wir in unserer Analyse jedoch keine Korrektur vornehmen.

Um Aussagen über die Bewegungsrichtung der Fische zu präzisieren, sollten immer mindestens zwei Doppelantennen aufgestellt werden; eine am Eingang und eine am Ausgang der Fischaufstiegshilfe sowie zusätzliche Antennen im Verteilbecken im Falle einer kombinierten Fischaufstiegshilfe. Auf diese Weise könnte das Verhalten der Fische an dieser Stelle genauer erfasst und potenzielle Problemzonen identifiziert werden. Nur durch die zusätzliche Antenne im Verteilbecken einer kombinierten Fischaufstiegshilfe mit zwei verschiedenen FAH-Typen kann auch Aufschluss über die Transitzeit der jeweiligen FAH-Typen gegeben werden. In dieser Studie musste jeweils das Ende der kombinierten Fischaufstiegshilfe als Ausgang genommen werden. Dies könnte das Resultat beeinflusst haben, da im Falle des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt und des Kraftwerks Schiffmühle nur ein kleiner Teil tatsächlich ein Schlitzpass war, während der andere Teil ein Raugerinne-Beckenpass war und somit in die Berechnung des Schlitzpasses einbezogen wurde.

Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus der Tagging- und Freisetzungsmethode. Die vorliegenden Daten stammen aus den Zählbecken der jeweiligen Stauanlagen (Ausnahme Kraftwerk Röchling), was die Interpretation der Resultate beeinflussen könnte, da diese Fische die Fischaufstiegshilfen bereits aufgefunden und teilweise passiert hatten. Dies könnte dazu führen, dass die Fische mögliche Gefahren in der Anlage meiden oder schneller wieder aufsteigen. Die zeitliche Überlagerung der Zählbecken-Zählmethode und des PIT-Monitorings könnte ebenfalls dazu führen, dass die Fische den Ausstieg nicht erreichen, sondern ins Zählbecken gelangen und somit die eigentliche Passageeffizienz verringern. Zudem können Zählbecken generell Veränderungen der Hydraulik bewirken, was das Verhalten der aufsteigenden Fische beeinflussen könnte. Wegen diesen Gründen empfehlen wir für die Wirkungskontrollen entweder PIT-Monitoring oder Zählbecken-Zählmethode anzuwenden, aber nicht beide gleichzeitig. Um das PIT-Monitoring möglichst zu standardisieren und einheitliche Vorgehens-

weisen zu etablieren, wird an einem Methodenstandard für PIT-Tagging Studien gearbeitet. Dies geschieht im Auftrag der Wasseragenda 21 (WA21) und wird finanziell unterstützt vom Bundesamt für Umwelt (BAFU).

Zusätzlich verwendeten wir für diese Studie bearbeitete Detektionsdaten. Das bedeutet, dass uns die Rohdaten fehlten, welche für eine präzise Analyse von grosser Bedeutung wären. Die Anwendung des R-Pakets "ORFID" (Marques & Putt, 2022) könnte hierbei helfen, die Rohdaten der Detektionen effizient zu bearbeiten und die Fehlerrate einzubeziehen (d.h. Detektionseffizienz), die häufig übersehen oder unterschiedlich behandelt wird (Hershey, 2021). Es ist empfehlenswert, Analysen stets mit den Rohdaten durchzuführen, um eine einheitliche Datenbearbeitung zwischen verschiedenen Studien sicherzustellen.

5.2 Definition der Metriken

Grundsätzlich ist es sehr wichtig, klare Ziele für das Monitoring festzulegen und auf der Grundlage dieser Ziele die zu messenden Metriken zu definieren (Wilkes et al., 2018). Wenn das Hauptinteresse beispielsweise nur darin besteht, die Passageeffizienz zu verstehen, genügt es, diese mithilfe von PIT-Tags zu quantifizieren. Falls jedoch das Ziel darin besteht, die Attraktionseffizienz der Fische zu messen, erfordert dies je nach Fragestellung die Anwendung anderer Methoden (Grimardias et al., 2022; Schölzel et al., 2020).

Um präzise Aussagen über potenzielle Problemzonen oder die Auswirkungen auf die Attraktion oder den Einstieg der Fische treffen zu können, ist es entscheidend, nicht eine allgemeine Auffindbarkeit, sondern die Attraktions- und die Einstiegseffizienz separat zu untersuchen. Es kann nämlich sein, dass Fische die Fischaufstiegshilfe auffinden, aber dann nicht einsteigen (Grimardias et al., 2022; Noonan et al., 2012). Um das Verhalten und Bewegungsmuster der Fische genauer zu verstehen, sollten folgende Überlegungen angestellt werden.

Bei Interesse an der Attraktionseffizienz kann diese in zwei unterschiedliche Metriken aufgeteilt werden. Erstens kann von einer grossräumigen Auffindbarkeit gesprochen werden, die hauptsächlich von der Leitströmung abhängt und die Fische in Richtung Fischaufstiegshilfe lenken soll. Zweitens sollten die Fische beim Annähern der Fischaufstiegshilfe und dem Einstieg die Leitströmung (abhängig von der Lockwassermenge) verstärkt spüren und zum Einstieg geführt werden. In diesem Fall kann von einer kleinräumigen Auffindbarkeit gesprochen werden. Die grossräumige Auffindbarkeit könnte mithilfe einer Telemetriestudie (Radio- oder akustische Telemetrie) untersucht werden. Dabei werden im Attraktionsbereich Antennen zur Erkennung der Fisch-Transmitter aufgestellt (Castro-Santos & Perry, 2012; Grimardias et al., 2022; Nyqvist et al., 2017). Die kleinräumige Auffindbarkeit kann durch die Anbringung einer Antenne direkt am Eingang (1. Becken) untersucht werden. Diese kleinräumige Auffindbarkeit betrachtet jedoch nur einen Radius von ca. 50 - 100 cm um die erste Einstiegsantenne. Zusätzliche Antennen an den Ein- und Ausgängen der Fischaufstiegshilfe könnten verwendet werden, um die Einstiegs- und Passageeffizienz zu bewerten (Grimardias et al., 2022). Für die Berechnung der Einstiegseffizienz wäre die zweite Antenne im zweiten Becken direkt nach der ersten Einstiegsantenne der Fischaufstiegshilfe wichtig (Schölzel et al., 2020). Die Passageeffizienz erfordert die Verwendung der beiden Ausgangsantennen. Wenn also PIT-Tag Monitoring verwendet wird, können die kleinräumige Auffindbarkeit, Einstiegseffizienz und Passageeffizienz analysiert werden, vorausgesetzt, die erste Doppelantenne wird direkt am Eingang ins erste Becken und die zweite am Ausgang des allerletzten Beckens angebracht (siehe Abbildung 26).

Für eine genauere Analyse der grossräumigen Auffindbarkeit, können mittels der genannten Telemetriemethoden die 2D- oder 3D-Schwimmbewegungen der Fische aufgezeichnet werden. Dies ermöglicht ein besseres Verständnis der Attraktion zum Einstiegsbereich (d.h. grossräumige Auffindbarkeit) der Fischaufstiegshilfen. Durch gezielte Manipulation unterschiedlicher Leitströmungen (d.h. Manipulation der Lockwassermenge) über mehrere Saisons hinweg könnte untersucht werden, welchen Einfluss diese auf die Attraktions- (klein- und grossräumige Auffindbarkeit) und Einstiegseffizienz haben könnte. Die Jahreszeit kann je nach Fischart einen Effekt auf die Attraktions- und Einstiegseffizienz haben (Romão et al., 2019). Für einen umfassenderen und präziseren Durchlaufprozess, der Attraktions-, Einstiegs- und Passageeffizienz umfasst, empfiehlt sich die Anwendung einer kombinierten Methode aus entweder Radio- oder akustischen Telemetrie sowie PIT-Tags (Grimardias et al., 2022). Da die Migrationszeit je nach Zielart und Grösse variieren kann, ist es zusätzlich wichtig, die Migrationszeiten für verschiedene Fischarten zu kennen und die Einflüsse verschiedener Faktoren zu berücksichtigen (Benitez et al., 2015). Die Time-to-Event Analyse, wie von Castro-Santos & Perry (2012) beschrieben, wäre ein geeignetes Modell, um direkt die Abhängigkeit der grossräumigen Auffindbarkeit von der Leitströmung und Lockwassermenge über den Faktor Zeit zu untersuchen.

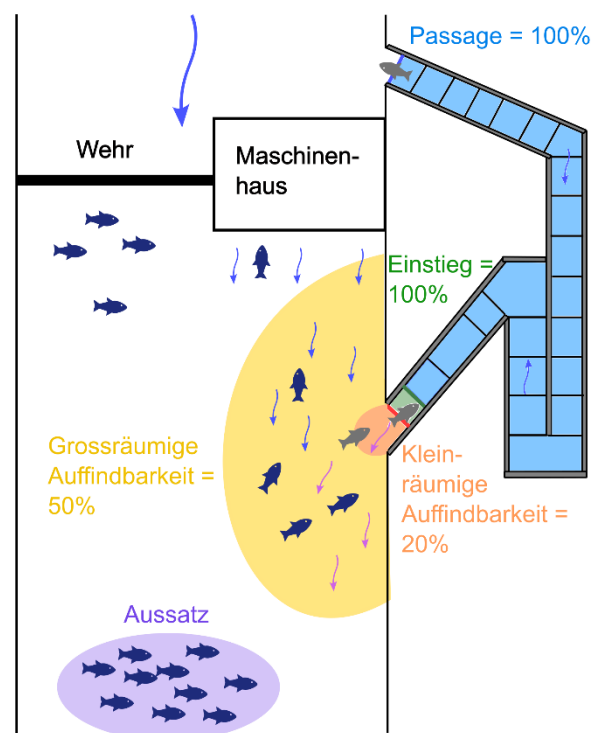


Abbildung 26: Schemata der detaillierten Metriken. Die ausgesetzten Fische ($n=10$) sind innerhalb des violetten Kreises abgebildet. Ziel ist es, die Fische mithilfe der Leitströmung und z.T. Turbinendotation (dargestellt durch alle Pfeile unterhalb des Kraftwerks) in Richtung der Fischaufstiegshilfe zu lenken, um eine **grossräumige Auffindbarkeit** (gelb) sicherzustellen. Von den zehn Fischen werden fünf in diese Richtung gelenkt (50%). Fünf der ausgesetzten Fische gelangen zum Wehr und somit nicht an die gewünschte Position. Diese **grossräumige Auffindbarkeit** kann mit einer radio- oder akustischen Telemetriemethode untersucht werden. Beim Annähern an die Fischaufstiegshilfe sollten die Fische die Leitströmung (siehe pinke Pfeile) spüren, die sie zum Eingang der Fischaufstiegshilfe führen soll. Diese Leitströmung hängt von der Lockwassermenge ab (Abfluss der FAH und Zusatzdotation). Der grau markierte Fisch repräsentiert immer den gleichen Fisch und dient als Referenz, um die Passage durch die Fischaufstiegshilfe zu zeigen. Die **kleinräumige Auffindbarkeit** (orange) (untersucht mit PIT-Tags), im Radius von ca. 50 bis 100 cm um die Eingangsantenne, zeigt, dass nur einer der fünf Fische diesen Bereich erreicht (20%). Dieser eine Fisch (grau) steigt in die Fischaufstiegshilfe ein (Einstiegseffizienz von 100% - grün). Der Fisch durchquert dann die gesamte Fischaufstiegshilfe, was zu einer **Passageeffizienz** (blau) von ebenfalls 100% führt.

5.3 Relevanz der hydraulischen Messungen

Die technische Wirkungskontrolle nach Fertigstellung einer Fischaufstiegshilfe nimmt eine zentrale Rolle ein. Eine umfassende Quantifizierung hydraulischer Messungen sowohl unterhalb als auch innerhalb der Fischaufstiegshilfe ist von entscheidender Bedeutung (Grimardias et al., 2022; Ovidio et al., 2017), um die Funktionsweise der Anlage zu bewerten und festzustellen, ob sie den geltenden Richtlinien entspricht. Ein spezieller Fokus liegt auf der Bedeutung grundlegender Forschungsarbeiten zu den Bewegungsmuster verschiedener Fischarten bei der Annäherung an Hindernisse. Das Fehlen solcher Erkenntnisse erschwert das Verständnis dafür, wie sich unterschiedliche Fischarten verhalten und welche Implikationen dies auf die Entwicklung von Fischaufstiegshilfen haben könnte. Es besteht nach wie vor ein deutlicher Mangel an Wissen, insbesondere bezüglich der Schwimmfähigkeit und des Verhaltens der Fische unter hydrodynamischen Bedingungen. Diese Daten sind von entscheidender Bedeutung, um effektive Fischaufstiegshilfen für eine Vielzahl von Arten weltweit zu konzipieren (Kemp, 2016). Angesichts der herausfordernden und aufwendigen Messungen kann die Modellierung der Strömungsverhältnisse im Unterwasser durch numerische Methoden eine geeignete Alternative darstellen (Mawer et al., 2023; Rutschmann et al., 2022). Durch den Einsatz numerischer Modelle kann ein umfassendes Verständnis der Bedingungen im Unterwasserbereich erreicht werden. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Bewertung und Modellierung der Umweltbedingungen, was wiederum bei der Gestaltung und Optimierung von Fischaufstiegshilfen hilfreich sein kann.

5.4 Relevanz der Passage- und Transitzeit

Um angemessene Zeitrahmen für Passage- und Transitzeiten zu bestimmen, bedarf es einer besseren Kenntnis der Bewegungsmuster von Fischen (Kemp, 2016) und deren Auswirkungen auf ihre Fitness. Eine experimentelle Studie könnte helfen, die Einflüsse der Passagezeiten auf die physiologischen Aspekte der betreffenden Fischarten genauer zu untersuchen. Erst auf Basis dieser grundlegenden Erkenntnisse kann beurteilt werden, welche Passagezeit für einen Fisch als problematisch oder verzögernd für die Migration angesehen werden kann.

Die genaue Funktion einer Fischaufstiegshilfe wirft einige Fragen auf, insbesondere im Hinblick auf die Definition in den Richtlinien (BAFU, 2022). Hier wird eine Fischaufstiegshilfe als Passage ohne Verletzungen und Zeitverzögerungen definiert. Sollte also ein Schlitzpass im Vergleich zu einem Raugerinne-Beckenpass oder Umgehungsgewässer bevorzugt werden, da die Transitzeit tendenziell kürzer ist? Die letzteren beiden FAH-Typen könnten als Lebensraum für Fische dienen und dadurch die Passage- und Transitzeiten verlängern. Diese beiden Optionen können nicht zwangsläufig als die effizientesten oder schnellsten Lösungen für eine reibungslose Passage sein. Wenn das Ziel einer Fischaufstiegshilfe jedoch die Bereitstellung von zusätzlichem Lebensraum für Fische ist und ähnlich wie eine Flussrenaturierung funktionieren soll, müssen in einer Wirkungskontrolle andere Ziele priorisiert werden. In diesem Fall spielt die verlängerte Passage- und Transitzeit eine geringere Rolle, stattdessen sollte die Wirkungskontrolle darauf abzielen, die Habitatnutzung zu quantifizieren und zu prüfen, ob die Anlage als Habitat für verschiedene Fischarten fungiert.

Des Weiteren sollte berücksichtigt werden, dass die Konzentration auf nur eine Fischaufstiegshilfe möglicherweise nicht optimal für alle Fischarten ist. Einige Fischarten können möglicherweise nicht alle Arten von FAH-Typen passieren. Es ist ebenso wichtig zu prüfen, ob alle Fischarten tatsächlich weit genug flussaufwärts wandern, um das Wasserkraftwerk zu erreichen, und ob dies für alle Arten gleichermassen bedeutend ist. Die individuelle Motivation der Fische ist oft unklar, was die Beurteilung der Effizienz der Fischaufstiegshilfe erschwert (Cooke & Hinch, 2013; Grimardias et al., 2022). Es können auch intraspezifische Unterschiede bestehen (Britton & Pegg, 2011), was die gesamte Beurteilung weiter erschwert. Diese Überlegungen sind entscheidend, um die Bedürfnisse verschiedener Fischarten zu berücksichtigen und die Gestaltung von Fischaufstiegshilfen entsprechend anzupassen.

6 Fazit

Die Auswertung der Datenanalyse der Wirkungskontrollen an der Limmat, dem Rhein und der Aare ergab, dass die Auffindbarkeit je nach Flusssystem stark variiert. Die höchste Auffindbarkeit wurde an der Limmat und die niedrigste am Rhein festgestellt. Beim Vergleich der Werte zwischen den verschiedenen Fischaufstiegshilfen zeigte sich, dass es zwischen den verschiedenen FAH-Typen Unterschiede gibt. Sowohl der Schlitzpass als auch der Raugerinne-Beckenpass wiesen eine höhere Auffindbarkeit auf als der Fischlift und das Umgehungsgewässer.

Die Zeit bis zum Einstieg in die Fischaufstiegshilfe variiert zwischen den einbezogenen Fischarten und ist sehr standortspezifisch. Ein wesentlicher Faktor für die Attraktion von Fischen zu den Fischaufstiegshilfen ist die Leitströmung und somit der Anteil der Lockwassermenge am konkurrierenden Abfluss. Der Anteil der Lockwassermenge am konkurrierenden Abfluss beträgt in der Limmat (RBP des KW Schiffmühle) im Durchschnitt 2.2% (Variation zwischen 0 – 4%), in der Aare (SP am HKW des KW Rüchlig) ungefähr 1% (Variation zwischen 0.8 – 1.8%) und im Rhein (6 von 7 untersuchte FAH) weniger als 1% (Variation zwischen 0.1 – 3.8%). Die hydraulischen Messungen (ADCP) am Eingang der Fischaufstiegshilfe Ryburg-Schwörstadt zeigen eine Rückströmung vor dem Eingang des Raugerinne-Beckenpasses, der sich direkt unterhalb der Turbinen befindet. Dies könnte für die Fische nachteilig sein. Jedoch können wir anhand unserer PIT-Tag Daten nicht eindeutig feststellen, ob die geringe Auffindbarkeit aufgrund mangelnder Attraktion oder mangelndem Einstieg erfolgt. Durch die Synchronisation von Monitoringstudien und hydraulischen Messungen könnten solche Muster besser werden. Um genauere Aussagen über die Attraktion und den Einstieg zu treffen, wäre eine radio- oder akustische Telemetriestudie erforderlich, bei der die Lockwassermengen manipuliert werden, um zu sehen, ob eine erhöhte Lockwassermenge zu einer verbesserten Attraktionseffizienz führt. Anhand dieser Daten könnte ein Modell erstellt werden, um Umwelt- und Designparameter zu untersuchen, die sich auf die Attraktions- und Einstiegs-effizienz auswirken.

Die Passierbarkeit ist grundsätzlich an allen Kraftwerken relativ ähnlich. Es gibt auch hier Variationen zwischen den verschiedenen Typen von Fischaufstiegshilfen, wobei die Passierbarkeit des Schlitzpasses am höchsten ist. Die Passierbarkeit und Passagezeiten variieren zwischen den fünf häufigsten, untersuchten Fischarten und sind stark standortabhängig. Sowohl die Passagezeit als auch die Transitzeit sind wichtige Faktoren: Die Passagezeit gibt Aufschluss über die Verzögerung der Migration, während die Transitzeit die Effizienz der Fischaufstiegshilfen beschreibt und deren direkte Passierbarkeit widerspiegelt. In kleineren Flusssystemen wie der Limmat, in denen die Antennen optimal platziert und nicht weit stromaufwärts des Einstiegs angebracht wurden, spielen Passage- und Transitzeit eine bedeutendere Rolle, da sie dort stärker variieren.

Der Schneider zeigt eine erhöhte Passage- und Transitzeit im Vergleich zu anderen Fischarten. Diese Unterschiede könnten durch Einbezug der Verhaltensmuster der Fische genauer untersucht werden. Allerdings gestaltet sich diese Analyse in langen Fischaufstiegshilfen schwierig, wo nur am Eingang und Ausgang Antennen positioniert sind. Es wäre deshalb sinnvoll, mehrere Antennen innerhalb einer Fischaufstiegshilfe und im Verteilbecken der zwei Einstiegsstränge einer kombinierten Fischaufstiegshilfe aufzustellen, um das Verhalten der Fische innerhalb einer Fischaufstiegshilfe besser zu verstehen. Es ist schwierig, eine klare Aussage über Passage- und Transitzeiten zu treffen. Ab welchem Zeitpunkt eine Passage- oder Transitzeit als zu lang betrachtet werden kann und welche Auswirkungen dies auf die Physiologie der Fische hat, könnte Gegenstand einer experimentellen Studie sein. Ziel wäre es, den Einfluss der Passagezeiten auf die Physiologie und Fitness der Fische zu verstehen. Durch den Einsatz neuer Technologien ist es möglich, die physiologischen Konditionen und die Aufenthaltszeit der migrierenden Fische während des Fischaufstiegs zu verfolgen, beispielsweise mit der akustischen Telemetriemethode 'Lab-on-a-Fish' (Yang et al., 2021).

Eine Analyse der wichtigsten Faktoren hat gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit der Passierbarkeit beim Schlitzpass im Vergleich zum Raugerinne-Beckenpass grösser ist und weniger Zeit benötigt wird. Dies wirft die Frage auf nach dem Ziel einer Fischaufstiegshilfe. Soll eine Fischaufstiegshilfe Fischen ermöglichen, eine Barriere möglichst schnell zu überwinden? Oder soll sie auch als Habitat dienen, wie es bei einem Raugerinne-Beckenpass der Fall ist? Wenn letzteres das Ziel ist, wäre es wichtig zu testen, wie gut Fische die Fischaufstiegshilfe als Lebensraum nutzen können, anstatt die Zeit der Passierbarkeit als ausschlaggebend zu betrachten.

Ein bedeutender Aspekt, der in dieser Datenanalyse nicht berücksichtigt wurde, ist die potenzielle Auswirkung der Abfolge mehrerer Barrieren, die sowohl die Auffindbarkeit als auch die Passierbarkeit weiter verringern könnten. Dies hat Konsequenzen für die Physiologie der Fische und sollte daher in zukünftigen Studien genauer analysiert werden.

Der zukünftige Fokus sollte auf dem Einfluss der Leitströmung auf die Attraktion der Fische sowie auf die Strömung beim Einstieg liegen. Die Unterscheidung zwischen Attraktions- und Einstiegseffizienz ist eine herausfordernde Aufgabe und nach wie vor relevant (Hershey, 2021; Silva et al., 2018). Dies trägt nicht nur zur Verbesserung der Dimensionierung der Fischaufstiegshilfe bei, sondern hilft auch bei der Identifizierung potenzieller Probleme bei Fischaufstiegshilfen. Besonders in grossen Flüssen ist dies von entscheidender Bedeutung. Es wird empfohlen, dieses Thema in zukünftigen Forschungsprojekten anzugehen. Monitoringprogramme sind oft zu stark fokussiert und zu kurz, um diese Fragen angemessen zu behandeln. Durch eine Telemetriestudie (Radio- oder akustischer Telemetrie), hydraulische Messungen sowie der Manipulation von Lockwassermengen könnten diese Aspekte genauer untersucht werden. Ein Beispiel für ein Untersuchungsdesign, das Radiotelemetrie und PIT-Tagging kombiniert, um verschiedene Metriken der Passageeffizienz (Attraktion, Einstieg und Passage) zu bewerten, basiert auf Grimardias et al. (2022) in der Rhone. Dort haben die Autoren die Kombination unterschiedlicher Methoden verwendet und damit die Stärke der Methode zur präzisen Abschätzung der drei Metriken demonstriert, die entscheidend für die Quantifizierung der Passageneffizienz sind. Darüber hinaus diskutieren sie die Einschränkungen bei der Bestimmung der Einstiegseffizienz aufgrund der Platzierung der PIT-Tag Antennen. Zudem ist es wichtig, die Auswirkungen langer Passagezeiten auf die Physiologie verschiedener Fischarten zu untersuchen. Das Wissen über das Fischverhalten während des Passierens einer Fischaufstiegshilfe ist entscheidend, um die Auswirkungen von Hydraulik und anderen Parametern auf die Effizienz zu verstehen (Kemp, 2016; Silva et al., 2018; Wilkes et al., 2018). Dieser Aspekt wird in der Forschung oft vernachlässigt, obwohl allgemein bekannt ist, wie wertvoll solche Informationen zur Verbesserung des FAH-Designs sind.

7 Danksagung

An dieser Stelle möchten wir unseren aufrichtigen Dank an verschiedene Ökobüros, Institutionen und das Betriebspersonal der unterschiedlichen Kraftwerke aussprechen. Wir sind äusserst dankbar für die zur Verfügung gestellten Daten und die Unterstützung, die wir von Fishconsulting (Armin Peter, Nils Schölzel und Lisa Wilmsmeier), dem Institut der angewandten Ökologie GmbH (Dr. Ulrich Schwevers und Dr. Beate Adam) und WFN (Martina Breitenstein) erfahren haben. Für den wertvollen Austausch, die Besichtigungen und die Bereitstellung von Kraftwerksbetriebsdaten möchten wir speziell am Standort Rüchlig Axpo (Ueli Rickenbacher, Ricardo Mendez und Thomas Zinsli), am Standort Wyhlen, Rheinfelden und Ryburg-Schwörstadt Naturenergie Hochrhein AG (Dr. Jost Hellwig, Roger Weber und Jochen Ulrich), am Standort Augst Manuel Häfeli und Martin Renz und Standort Schiffmühle sowie Aue Andreas Doessegger danken. Zusätzlich möchten wir Daniel Gubser (VAW), Elias Hodel (VAW), Franziska Eh (VAW), Joel Wittman (IfU), Frederic de Schaetzen (IfU) und Robert Naudascher (IfU) für die tatkräftige Unterstützung bei den hydraulischen Messungen und Diskussionen würdigen. Hugo Marques danken wir für die Hilfe beim R Skript für die "Time-to-event Analyse". Zum Abschluss möchten wir Tabea Kropf (Sektion Sanierung Wasserkraft) für ihre massgebliche Rolle bei der Verwirklichung des Projekts und den wertvollen Austausch herzlich danken.

8 Quellenverzeichnis

- Armstrong, G. S., Aprahamian, M. W., Fewings, A. G., Gough, P. J., Reader, N. A., & Varallo, P. V. (2010). *Environment Agency Fish Pass Manual: Guidance Notes On The Legislation, Selection and Approval Of Fish Passes In England And Wales*. Environment Agency, Bristol.
- BAFU. (2022). *Wiederherstellung der Fischwanderung. Gute Praxisbeispiele für Wasserkraftanlagen in der Schweiz*. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). *Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4* [Computer software]. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Beck, C., Albayrak, I., Meister, J., Peter, A., Selz, O. M., Leuch, C., Vetsch, D. F., & Boes, R. M. (2020). Swimming Behavior of Downstream Moving Fish at Innovative Curved-Bar Rack Bypass Systems for Fish Protection at Water Intakes. *Water*, 12(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/w12113244>
- Benitez, J.-P., Nzau Matondo, B., Dierckx, A., & Ovidio, M. (2015). An overview of potamodromous fish upstream movements in medium-sized rivers, by means of fish passes monitoring. *Aquatic Ecology*, 49(4), 481–497. <https://doi.org/10.1007/s10452-015-9541-4>
- Bravo-Córdoba, F. J., Sanz-Ronda, F. J., Ruiz-Legazpi, J., Valbuena-Castro, J., & Makrakis, S. (2018). Vertical slot versus submerged notch with bottom orifice: Looking for the best technical fishway type for Mediterranean barbels. *Ecological Engineering*, 122, 120–125. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.019>
- Bravo-Córdoba, F. J., Valbuena-Castro, J., García-Vega, A., Fuentes-Pérez, J. F., Ruiz-Legazpi, J., & Sanz-Ronda, F. J. (2021). Fish passage assessment in stepped fishways: Passage success and transit time as standardized metrics. *Ecological Engineering*, 162, 106172. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106172>
- Breitenstein, M., Kirchhofer, A., Hoppler, L., Bruppacher, L., & Flück, M. (2019). *Fischaufstiegshilfen beim Haupt- und Dotierkraftwerk*. Wasser Fisch Natur AG - WFN, Report, 192p.
- Britton, J. R., & Pegg, J. (2011). Ecology of European Barbel *Barbus Barbus*: Implications for River, Fishery, and Conservation Management. *Reviews in Fisheries Science*, 321–330. <https://doi.org/10.1080/10641262.2011.599886>
- Bunt, C. M., Castro-Santos, T., & Haro, A. (2012). Performance of Fish Passage Structures at Upstream Barriers to Migration. *River Research and Applications*, 28(4), 457–478. <https://doi.org/10.1002/rra.1565>
- Castro-Santos, T. (2012). *Adaptive fishway design: a framework and rationale for effective evaluations*. Pp 76–89 in Monitoring, Funktionskontrollen und Qualitätssicherung an Fischaufstiegsanlagen. 2. Kolloquium zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstrassen. Koblenz, Germany.
- Castro-Santos, T., Cotel, A., & Webb, P. W. (2009). Fishway evaluations for better bioengineering—An integrative approach. In *Challenges for Diadromous Fishes in a Dynamic Global Environment* (Vol. 69, pp. 557–575).
- Castro-Santos, T., Haro, A., & Walk, S. (1996). A passive integrated transponder (PIT) tag system for monitoring fishways. *Fisheries Research*, 28(3), 253–261. [https://doi.org/10.1016/0165-7836\(96\)00514-0](https://doi.org/10.1016/0165-7836(96)00514-0)
- Castro-Santos, T., & Perry, R. W. (2012). Time-to-event analysis as a framework for quantifying fish passage performance. In *Telemetry techniques: A user guide for fisheries research* (pp. 427–452).

- Cooke, S. J., & Hinch, S. G. (2013). Improving the reliability of fishway attraction and passage efficiency estimates to inform fishway engineering, science, and practice. *Ecological Engineering*, 58, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.005>
- Dönni, W., & Spalinger, L. (2017). *Erhaltung und Förderung der Wanderfische in der Schweiz – Zielarten, Einzugsgebiete, Aufgaben*. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, 53p.
- DWA, 2016. (2016). *Merkblatt DWA-M 509. Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung*. DWA Deutsche Vereinigung für DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: 334 S.
- Grimardias, D., Chasserieu, C., Beaufile, M., & Cattaneo, F. (2022). Ecological connectivity of the upper Rhône River: Upstream fish passage at two successive large hydroelectric dams for partially migratory species. *Ecological Engineering*, 178, 106545. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106545>
- Guiny, E., Irvine, D. A., & Armstrong, J. D. (2005). Hydraulic and Biological Aspects of Fish Passes for Atlantic Salmon. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(7), 542–553. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:7\(542\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:7(542))
- Guthruf, J., & Dönni, W. (2019). *Fischaufstieg am Hochrhein, Koordinierte Zählung 2016-17*. BAFU, Expertenbericht Aquatica, Fischwerk, 211 Seiten
- Hershey, H. (2021). Updating the consensus on fishway efficiency: A meta-analysis. *Fish and Fisheries*, 22(4), 735–748. <https://doi.org/10.1111/faf.12547>
- Interkantonale Aareplanung: Strategische Planung Sanierung Fischgängigkeit*. (2014).
- Kassambara, A., Kosinski, M., & Biecek, P. (2021). *survminer: Drawing Survival Curves using 'ggplot2'* (R package version 0.4.9) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=survminer>
- Keefer, M. L., Jepson, M. A., Clabough, T. S., & Caudill, C. C. (2021). Technical fishway passage structures provide high passage efficiency and effective passage for adult Pacific salmonids at eight large dams. *PLoS ONE*, 16(9), e0256805. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256805>
- Kelley, K., Gilbert, E., Pennock, C., McKinstry, M., Mackinnon, P., Durst, S., & Franssen, N. (2023). If you build it, will they pass? A systematic evaluation of fish passage efficiency for three large-bodied warm-water fishes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2023-0030>
- Kemp, P. S. (2016). Meta-analyses, Metrics and Motivation: Mixed Messages in the Fish Passage Debate. *River Research and Applications*, 32(10), 2116–2124. <https://doi.org/10.1002/rra.3082>
- Kucukali, S., Alp, A., & Albayrak, I. (2023). Retrofitting Vertical Slot Fish Pass with Brush Blocks: Hydraulics Performance. *Water*, 15(6), 1155. <https://doi.org/10.3390/w15061155>
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82(13), 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>
- Larinier, M. (2002). Location of fishways. *BFPP Bull. Fr. Peche Prot. Milieux Aquat.*, 364. <https://doi.org/10.1051/kmae/2002106>
- Marques, H., & Putt, A. (2022). *ORFID: Manage and Summarize Data from Oregon RFID ORMR and ORSR Antenna Readers (1.0.2)* [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=ORFID>
- Mawer, R., Pauwels, I. S., Bruneel, S. P., Goethals, P. L. M., Kopecki, I., Elings, J., Coeck, J., & Schneider, M. (2023). Individual based models for the simulation of fish movement near barriers: Current work and future directions. *Journal of Environmental Management*, 335, 117538. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117538>

- Noonan, M. J., Grant, J. W. A., & Jackson, C. D. (2012). A quantitative assessment of fish passage efficiency. *Fish and Fisheries*, 13(4), 450–464. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2011.00445.x>
- Nyqvist, D., Greenberg, L. A., Goerig, E., Calles, O., Bergman, E., Ardren, W. R., & Castro-Santos, T. (2017). Migratory delay leads to reduced passage success of Atlantic salmon smolts at a hydroelectric dam. *Ecology of Freshwater Fish*, 26(4), 707–718. <https://doi.org/10.1111/eff.12318>
- Ovidio, M., Sonny, D., Dierckx, A., Watthez, Q., Bourguignon, S., De Le Court, B., Detrait, O., & Benitez, J. P. (2017). The use of behavioural metrics to evaluate fishway efficiency. *River Research and Applications*, 33(9), 1484–1493. <https://doi.org/10.1002/rra.3217>
- Parsons, D. R., Jackson, P. R., Czuba, J. A., Engel, F. L., Rhoads, B. L., Oberg, K. A., Best, J. L., Mueller, D. S., Johnson, K. K., & Riley, J. D. (2013). Velocity Mapping Toolbox (VMT): A processing and visualization suite for moving-vessel ADCP measurements. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(11), 1244–1260. <https://doi.org/10.1002/esp.3367>
- Pavlov, D. S. (1989). *Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR*. <https://www.fao.org/3/T0196EN/t0196en.pdf>
- Peter, A., Mettler, R., & Schölzel, N. (2016). *Vorprojekt „PIT-Tagging Untersuchungen am Hochrhein – Kraftwerk Rheinfelden“*. Studie im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU: 43 Seiten.
- Pompeu, P. dos S., & Martinez, C. B. (2007). Efficiency and selectivity of a trap and truck fish passage system in Brazil. *Neotropical Ichthyology*, 5, 169–176. <https://doi.org/10.1590/S1679-62252007000200011>
- Quaranta, E., Katopodis, C., Revelli, R., & Comoglio, C. (2017). Turbulent flow field comparison and related suitability for fish passage of a standard and a simplified low-gradient vertical slot fishway. *River Research and Applications*, 33(8), 1295–1305. <https://doi.org/10.1002/rra.3193>
- R Core Team. (2022). *R: A Language and Environment for Statistical Computing* (R 4.2.2) [Computer software]. <https://www.R-project.org/>
- Romão, F., Quaresma, A. L., Santos, J. M., Branco, P., & Pinheiro, A. N. (2019). Cyprinid passage performance in an experimental multislot fishway across distinct seasons. *Marine and Freshwater Research*, 70(6), 881–890. <https://doi.org/10.1071/MF18232>
- Roscoe, D. W., & Hinch, S. G. (2010). Effectiveness monitoring of fish passage facilities: Historical trends, geographic patterns and future directions. *Fish and Fisheries*, 11(1), 12–33. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2009.00333.x>
- RStudio Team. (2023). *RStudio: Integrated Development Environment for R* (6.1.524) [Computer software]. <http://www.rstudio.com/>
- Rutschmann, P., Kampa, E., Wolter, C., Albayrak, I., David, L., Stoltz, U., & Schletterer, M. (Eds.). (2022). *Novel Developments for Sustainable Hydropower*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-99138-8>
- Sanz-Ronda, F. J., Bravo-Córdoba, F. J., Fuentes-Pérez, J. F., & Castro-Santos, T. (2016). Ascent ability of brown trout, *Salmo trutta*, and two Iberian cyprinids – Iberian barbel, *Luciobarbus bocagei*, and northern straight-mouth nase, *Pseudochondrostoma duriense* – in a vertical slot fishway. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 417, Article 417. <https://doi.org/10.1051/kmae/2015043>
- Schölzel, N., Wilsmeier, L., & Peter, A. (2020). *Schlussbericht PIT-Tagging am KW Schiffmühle und Aue an der Limmat 2017–2020*. 40S.
- Schwevers, U., Adam, B., & Mögeltönder-Löwenberg, S. (2020). *PIT-Tagging Hochrhein*. Studie im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU: 221 Seiten.
- Seifert, K. (2016). *Fischaufstiegsanlagen in Bayern* (2nd ed.). Praxishandbuch, 158p. Available at: <https://lfv.bayern.de/download/fischaufstiegsanlagen-in-bayern>.

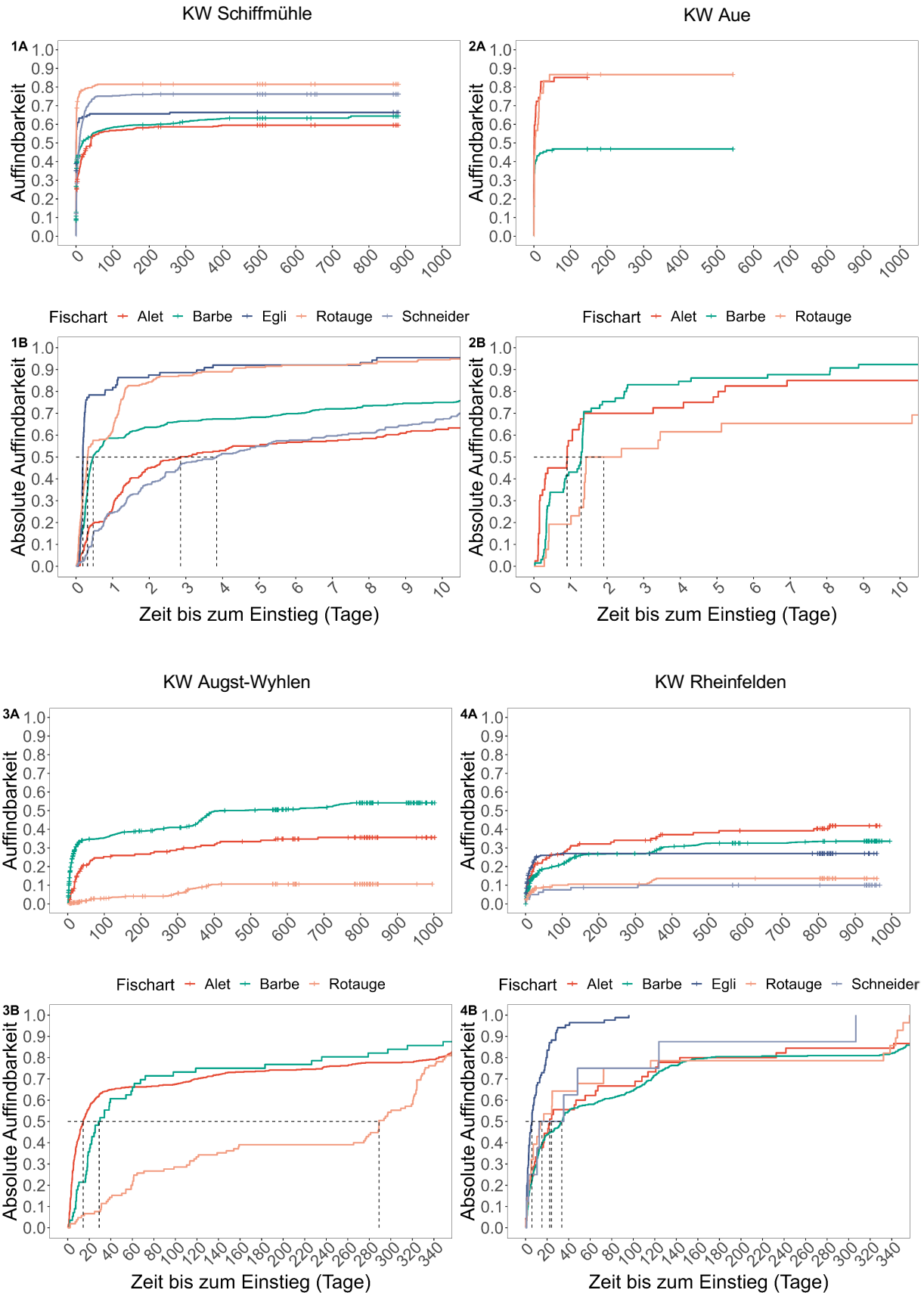
- Silva, A. T., Lucas, M. C., Castro-Santos, T., Katopodis, C., Baumgartner, L. J., Thiem, J. D., Aarestrup, K., Pompeu, P. S., O'Brien, G. C., Braun, D. C., Burnett, N. J., Zhu, D. Z., Fjeldstad, H.-P., Forseth, T., Rajaratnam, N., Williams, J. G., & Cooke, S. J. (2018). The future of fish passage science, engineering, and practice. *Fish and Fisheries*, 19(2), 340–362. <https://doi.org/10.1111/faf.12258>
- Silva, L. G. M. D., Nogueira, L. B., Maia, B. P., & Resende, L. B. D. (2012). Fish passage post-construction issues: Analysis of distribution, attraction and passage efficiency metrics at the Baguari Dam fish ladder to approach the problem. *Neotropical Ichthyology*, 10(4), 751–762. <https://doi.org/10.1590/S1679-62252012000400008>
- Skov, C., Brodersen, J., Brönmark, C., Hansson, L.-A., Hertonsson, P., & Nilsson, A. (2005). Evaluation of PIT-tagging in cyprinids. *Journal of Fish Biology*, 67, 1195–1201. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2005.00814.x>
- Spalinger, L., & Bammatter, L. (2017). *Roadmap Fischwanderung*. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Sullivan, K. M., Bailey, M. M., & Berlinsky, D. L. (2023). Passage Efficiency of Alewife in a Denil Fishway Using Passive Integrated Transponder Tags. *North American Journal of Fisheries Management*, 43(3), 772–785. <https://doi.org/10.1002/nafm.10893>
- Tarrade, L., Texier, A., David, L., & Larinier, M. (2008). Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways. *Hydrobiologia*, 609(1), 177–188. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9416-y>
- Therneau, T. M. (2022). *A Package for Survival Analysis in R* (3.4-0) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=survival>
- Thielicke, W., & Stamhuis, E. J. (2014). *PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB* (1). 2(1), Article 1. <https://doi.org/10.5334/jors.bl>
- Thiem, J. D., Binder, T. R., Dumont, P., Hatin, D., Hatry, C., Katopodis, C., Stamplecoskie, K. M., & Cooke, S. J. (2013). Multispecies Fish Passage Behaviour in a Vertical Slot Fishway on the Richelieu River, Quebec, Canada. *River Research and Applications*, 29(5), 582–592. <https://doi.org/10.1002/rra.2553>
- Vollset K.W., Lennox R.J., Mahlum S., Näslund J., Larsen M.H., Thorstad E.B., Frechette D., Finstad, B. Size dependent effects of passive integrated transponders (PIT-tags) on early life stages of salmon: a preliminary literature review Uni Research Miljø LFI rapport 324. Uni Research Bergen. ISSN-1892-8889
- Wagner, R. L., Makrakis, S., Castro-Santos, T., Makrakis, M. C., Dias, J. H. P., & Belmont, R. F. (2012). Passage performance of long-distance upstream migrants at a large dam on the Paraná River and the compounding effects of entry and ascent. *Neotropical Ichthyology*, 10, 785–795. <https://doi.org/10.1590/S1679-62252012000400011>
- Weichert, R., Kampke, W., Deutsch, L., & Scholten, M. (2013). Zur Frage der Dotationswassermenge von Fischaufstiegsanlagen an großen Fließgewässern. *WASSERWIRTSCHAFT*, 103(1–2), 33–38. <https://doi.org/10.1365/s35147-013-0420-4>
- Wilkes, M. A., Webb, J. A., Pompeu, P. S., Silva, L. G. M., Vowles, A. S., Baker, C. F., Franklin, P., Link, O., Habit, E., & Kemp, P. S. (2018). Not just a migration problem: Metapopulations, habitat shifts, and gene flow are also important for fishway science and management. *River Research and Applications*, 35(10), 1688–1696. <https://doi.org/10.1002/rra.3320>
- Wilkes, M., Baumgartner, L., Boys, C., Silva, L. G. M., O'Connor, J., Jones, M., Stuart, I., Habit, E., Link, O., & Webb, J. A. (2018). Fish-Net: Probabilistic models for fishway planning, design and monitoring to support environmentally sustainable hydropower. *Fish and Fisheries*, 19(4), 677–697. <https://doi.org/10.1111/faf.12282>
- Wolter, C., & Schomaker, C. (2019). Fish passes design discharge requirements for successful operation. *River Research and Applications*, 35(10), 1697–1701. <https://doi.org/10.1002/rra.3399>

- Yang, Y., Lu, J., Pflugrath, B., Li, H., Martinez, J., Regmi, S., Wu, B., Xiao, J., & Deng, Z. (2021). Lab-on-a-Fish: Wireless, Miniaturized, Fully Integrated, Implantable Biotelemetric Tag for Real-Time In Vivo Monitoring of Aquatic Animals. *IEEE Internet of Things Journal*, PP, 1–1. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3126614>
- Zeileis, A., & Hothorn, T. (2002). *Diagnostic Checking in Regression Relationships*. *R News*, 2(3), 7–10.

8.1 Quellen der Tabellen

- [1] Schölzel, N., Wilsmeier, L., & Peter, A. (2020). Schlussbericht PIT-Tagging am KW Schiffmühle und Aue an der Limmat 2017 - 2020.
- [2] Guthruf, J., & Dönni, W. (2019). Fischeaufstieg am Hochrhein, Koordinierte Zählung 2016-17.
- [3] Breitensteiner, M., Kirchhofer, A., Hoppler, L., Bruppacher, L., & Flück, M. (2019). FAH beim Haupt- und Dotierkraftwerk. WFN.
- [4] Kraftwerk Schiffmühle, Ausführungsplan Neues Dotierkraftwerk, Dispositionsplan, Plan Nr. 11.1901.53.02.01-007, Limmatkraftwerke Baden AG, März 2014
- [5] Infotafel am Kraftwerk Schiffmühle, Fotografie vom 6.3.23
- [6] Infotafel am Kraftwerk Rüchlig, Fotografie vom 6.3.23
- [7] Mail von Jost Hellwig, naturenergie hochrhein AG, 6.10.23
- [8] BAFU (Hrsg.) 2022: Wiederherstellung der Fischwanderung. Gute Praxisbeispiele für Wasserkraftanlagen in der Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Br. 2205: 109 S.
- [9] Energiedienst 2012: Neubau KW Rheinfelden, Naturnahes Fliessgewässer, Übersichtsplan. Plannummer 101, 05.04.2012.
- [10] Kraftwerk Augst AG 2003: Erneuerung des Fischpasses KW Augst, Situation, Plan Nr NOK 135 621. 14.03.2003

9 Anhang



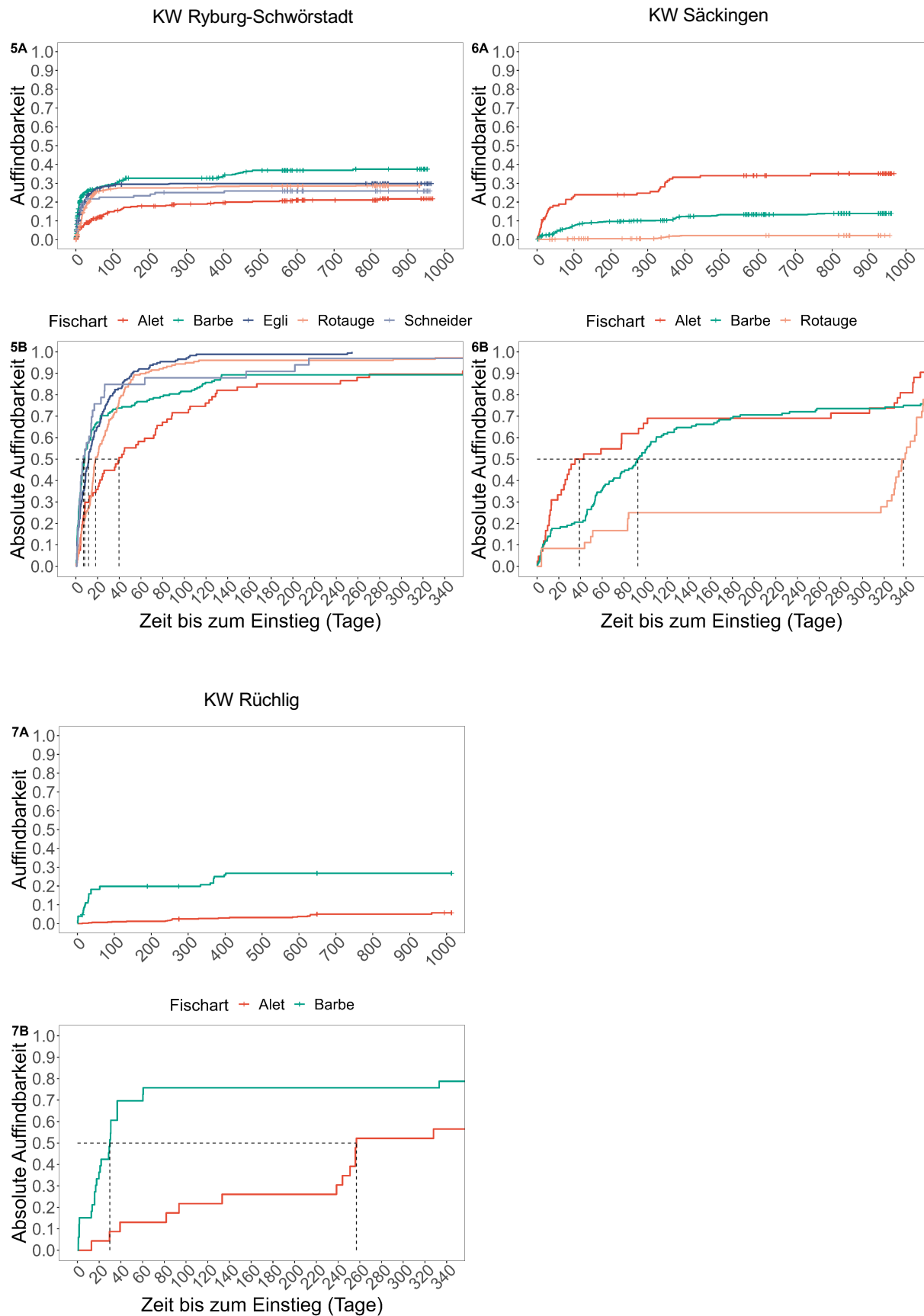
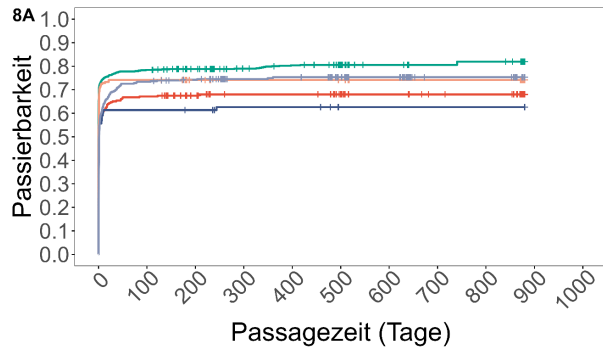
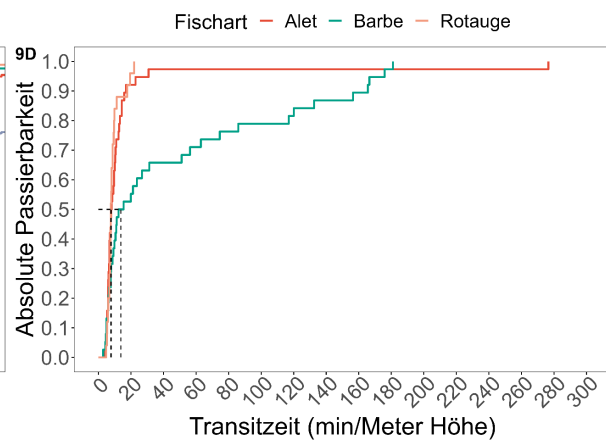
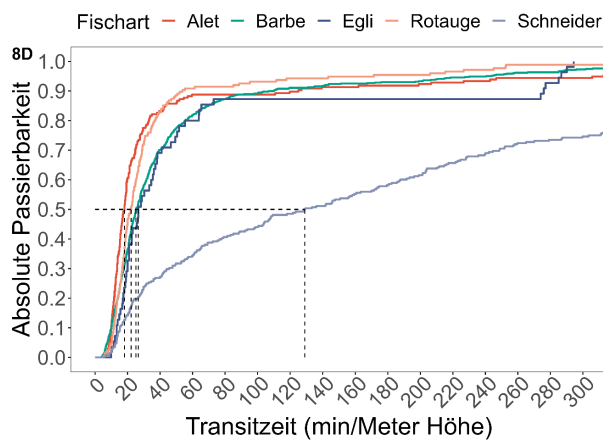
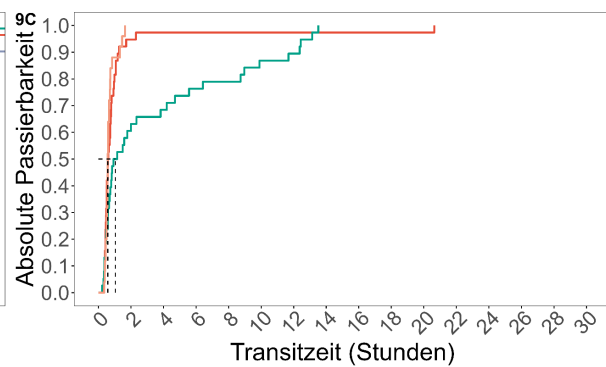
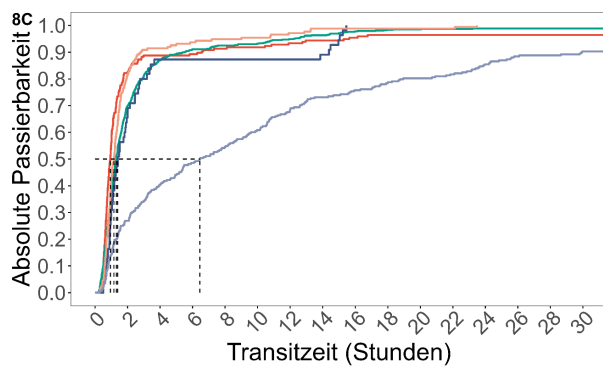
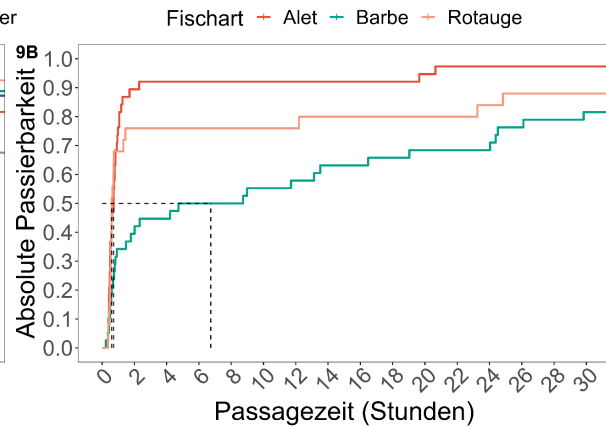
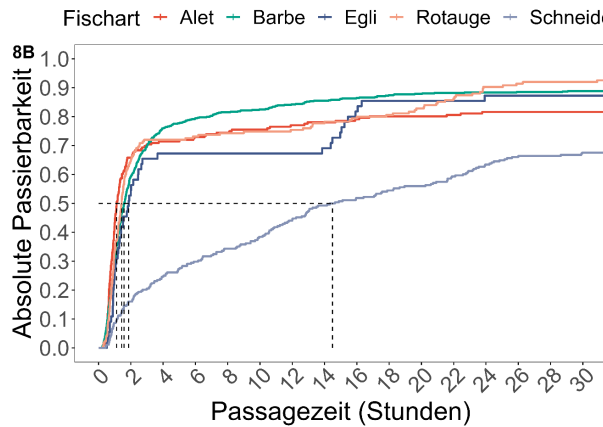
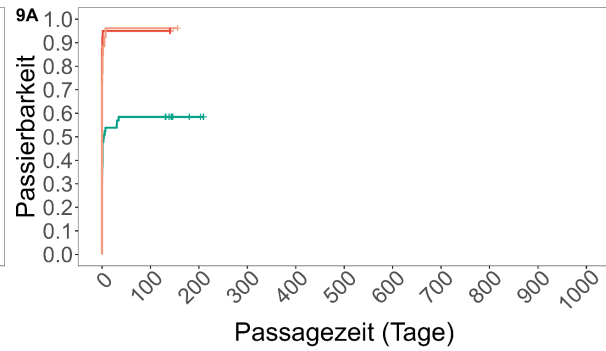


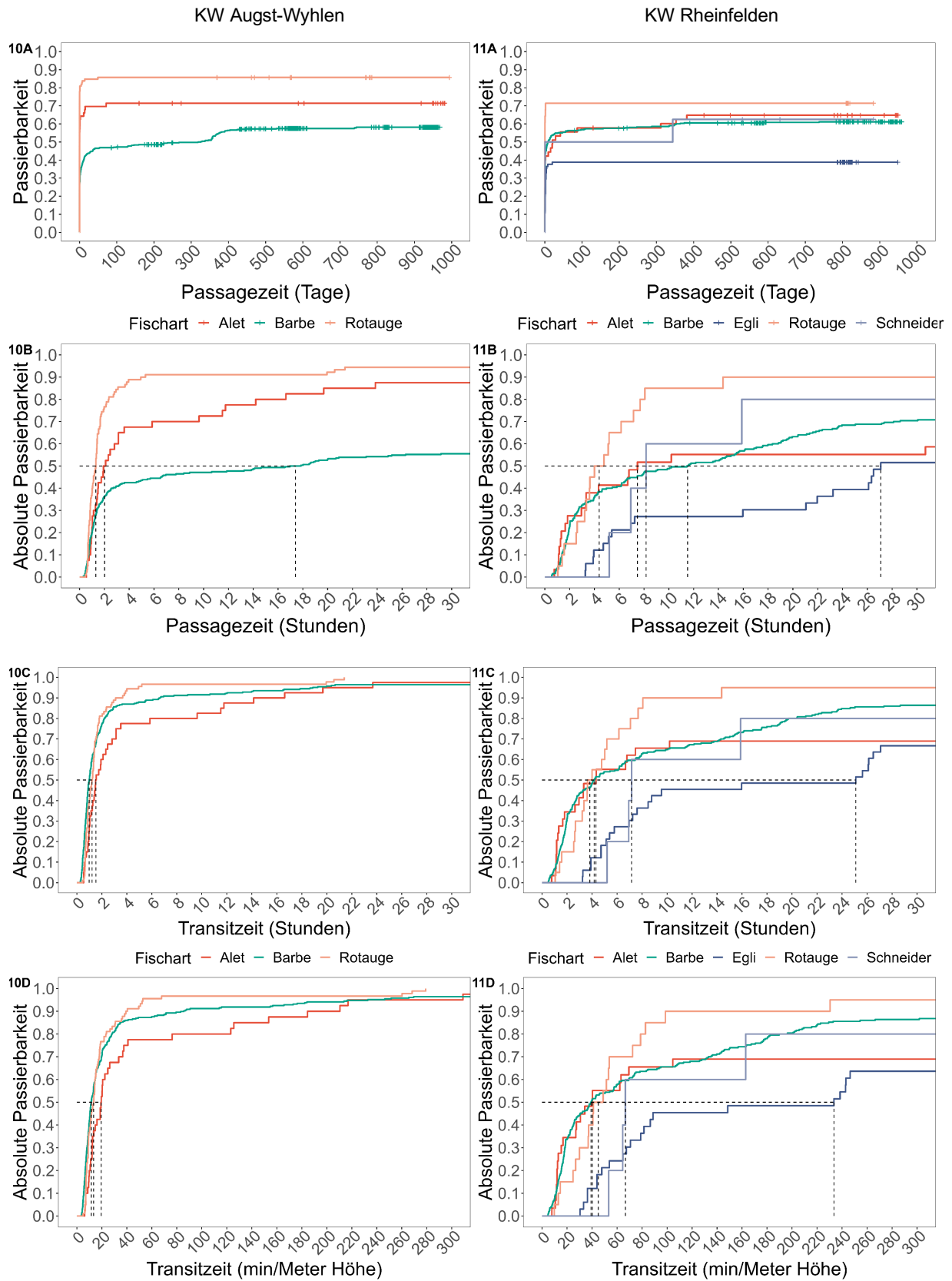
Abbildung A1: Kaplan-Meier Kurven für die Auffindbarkeit aller Kraftwerke. A) Zeigt die Auffindbarkeit der unterschiedlichen Arten über die Zeitdifferenz von Freisetzung bis zur Auffindbarkeit. Die vertikalen Striche widerspiegeln «zensierte» Fische, die den Eingang nie auffinden konnten. B) Zeigt die absolute Auffindbarkeit, welche nur die Fische repräsentiert, die die Fischaufstiegshilfe auffanden. Die gestrichelte schwarze Linie zeigt, ab welchem Zeitpunkt 50% einer Art die Fischaufstiegshilfe auffanden. Dies hilft die Werte zwischen Fischarten zu vergleichen. 1) Kraftwerk Schiffmühle, 2) Kraftwerk Aue, 3) Kraftwerk Augst-Wyhlen, 4) Kraftwerk Rheinfelden, 5) Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt, 6) Kraftwerk Säckingen, 7) Kraftwerk Rühligh

KW Schiffmühle

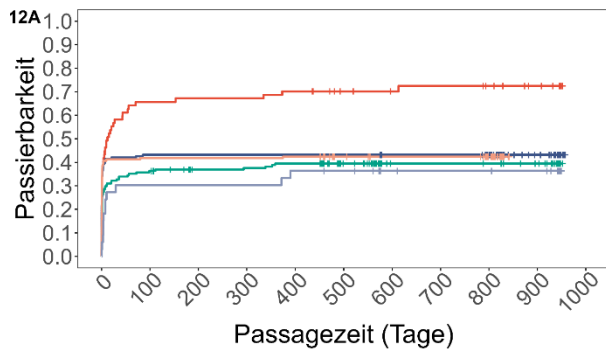


KW Aue

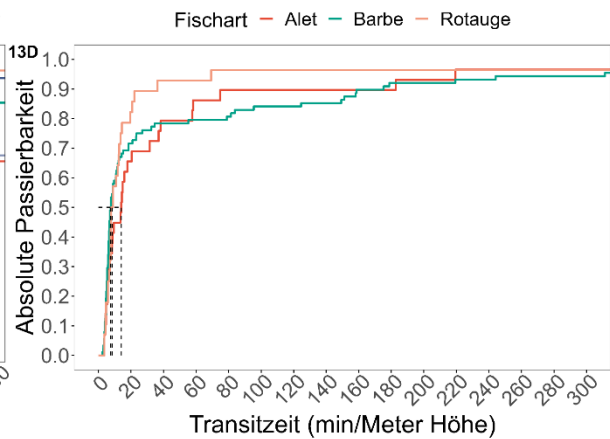
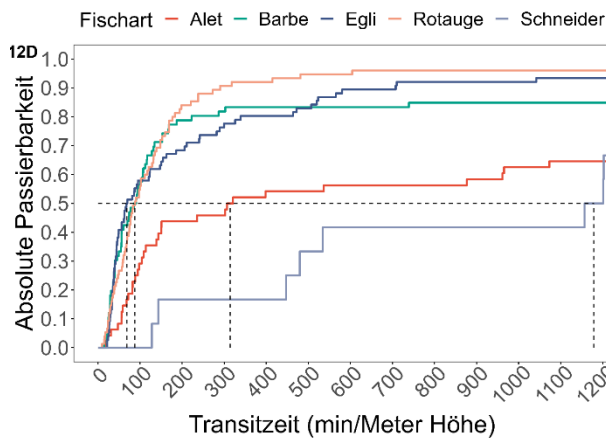
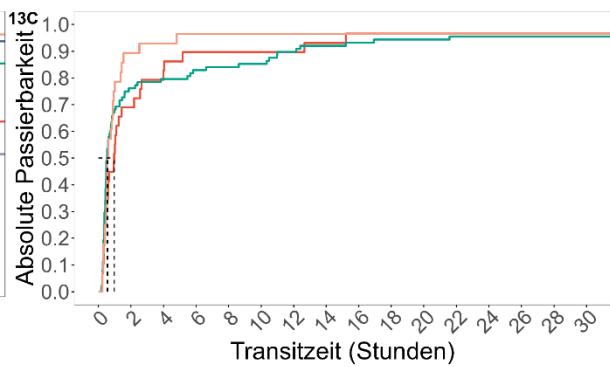
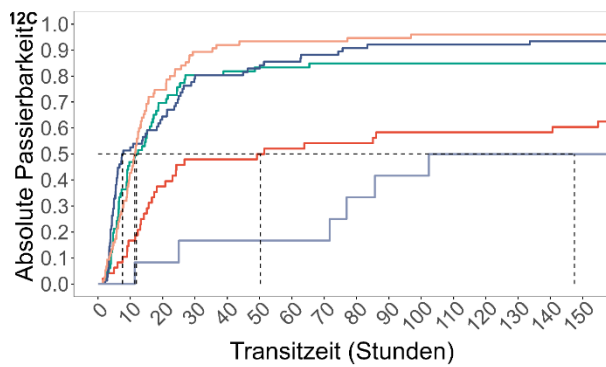
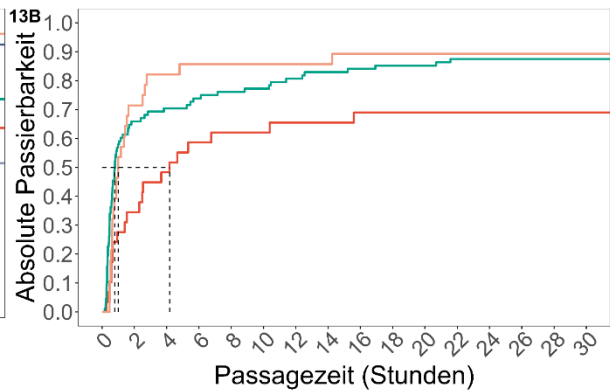
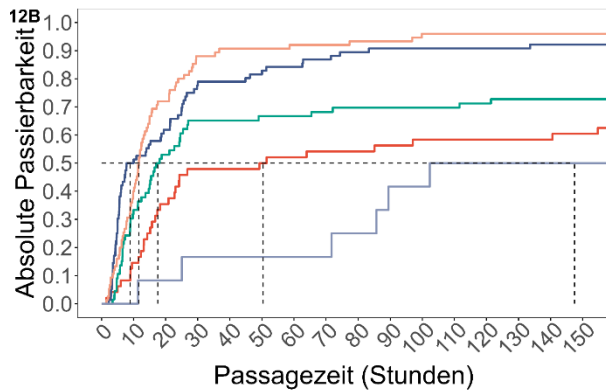
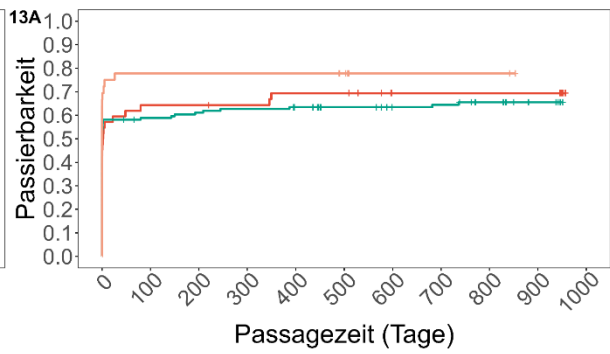




KW Ryburg-Schwörstadt



KW Säckingen



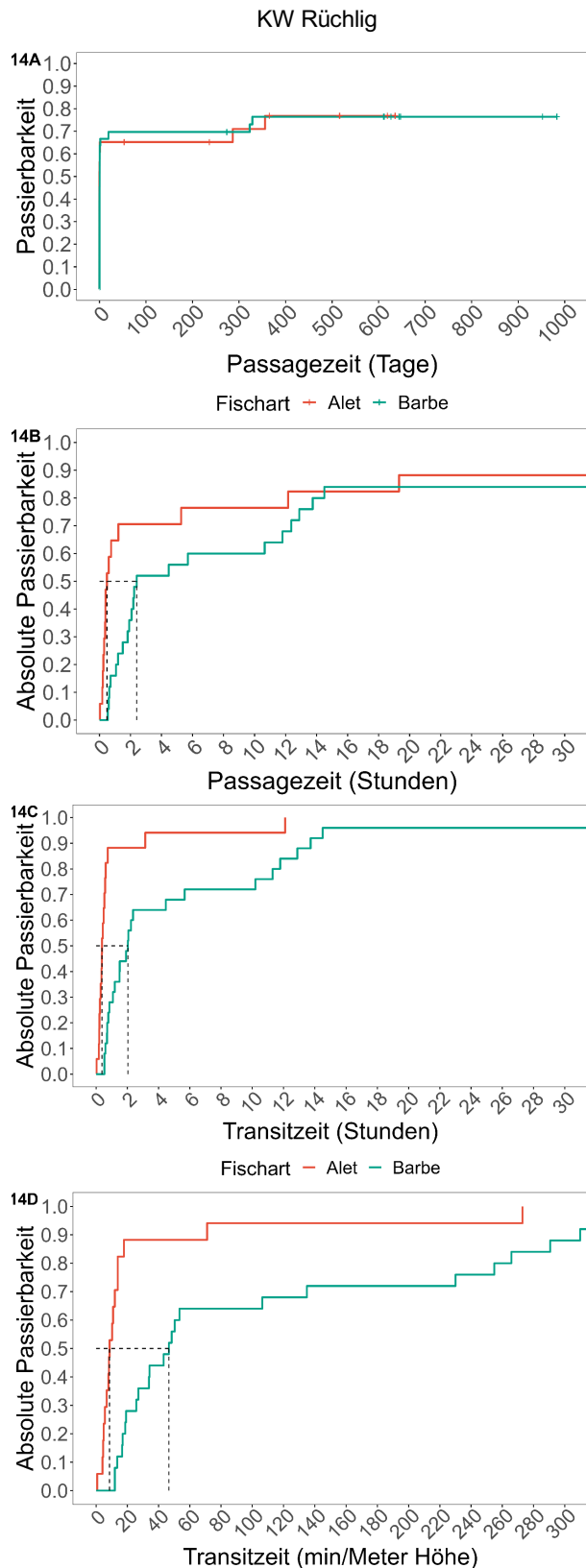


Abbildung A2: Kaplan-Meier Kurven für die Passierbarkeit aller Kraftwerke. A) Zeigt die Passierbarkeit der unterschiedlichen Arten über die Zeitdifferenz von erster Detektion bis zur Passage. Die vertikalen Striche widerspiegeln «zensierte» Fische, die die Fischaufstiegshilfe nie passierten. B) Zeigt die absolute Passierbarkeit, welche nur die Fische repräsentiert, die die Fischaufstiegshilfe passierten über die Zeitdifferenz von der 1. Detektion bis zur letzten Detektion der letzten Antenne der ersten Passage. C) Zeigt die absolute Passierbarkeit, welche nur die Fische repräsentiert, die die Fischaufstiegshilfe passierten über die Zeitdifferenz von der letzten Detektion der ersten Antenne bis zur letzten Detektion der letzten Antenne der ersten Passage. D) Zeigt die Transitzeit pro Höhenmeter, um die HPPs besser zu vergleichen. Die gestrichelte schwarze Linie zeigt, ab welchem Zeitpunkt 50% einer Art die Fischaufstiegshilfe auffanden. Dies hilft die Werte zwischen Fischarten zu vergleichen. 8) Kraftwerk Schiffmühle, 9) Kraftwerk Augst-Aue, 10) Kraftwerk Augst-Wyhlen, 11) Kraftwerk Rheinfelden, 12) Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt, 13) Kraftwerk Säckingen, 14) Kraftwerk Rüchlig

A														Transitzeit pro Höhe und	
Fischart	Fischtrappe	N Fische ausgesetzt	1. Detektion	N	1. Passage	N	Gesamte					Transitzeit pro		Fischart	Höhe [min/m Höhe]
							Auffindbarkeit	N	Passierbarkeit	Effizienz	Auffindbarkeitszeit	Auffindbarkeitszeit	Passagezeit		
							[%]	[%]	[%]	[d]	[h]	[h]	[h]		
Alet	SP	496	38	56	56	46	7.7	82.1	9.3	1.8	2.9	1.1	0.8	1	15.3
Alet	RBP	496	251	251	251	150	50.6	59.8	30.2	3.9			1.0		18.4
Barbe	SP	1268	496	525	525	431	39.1	82.1	34.0	1.8	0.5	1.6	1.1	1.3	22.3
Barbe	RBP	1268	287	292	292	197	22.6	67.5	15.5	0.2			1.7		32.4
Egli	SP	134	27	30	30	17	20.1	56.7	12.7	0.8	0.2	1.9	1.1	1.4	21.0
Egli	RBP	134	61	65	65	38	45.5	58.5	28.4	0.2			1.6		31.1
Rotaue	SP	291	38	40	40	23	13.1	57.5	7.9	0.8	0.3	1.4	0.7	1.2	14.0
Rotaue	RBP	291	198	201	201	152	68.0	75.6	52.2	0.3			1.2		23.2
Schneider	SP	472	189	217	217	170	40.0	78.3	36.0	2.8	3.8	14.5	4.9	6.5	98.2
Schneider	RBP	472	168	177	177	98	35.6	55.4	20.8	5.3			11.2		213.3

B													
Fischart	Fischtrappe	N Fische ausgesetzt	N		Gesamte					Transitzeit pro Höhe			
			Auffindbarkeit	N	Auffindbarkeit	Passierbarkeit	Effizienz	Auffindbarkeitszeit	Passagezeit	Transitzeit	[min/m Höhe]		
				Passierbarkeit	[%]		[%]		[d]	[h]	[h]		
Alet	SP	47	40	38	85.1	95.0	51.4	0.9	0.7	0.6		7.9	
Barbe	SP	139	65	38	46.8	58.5	27.3	1.3	6.7	1.0		13.8	
Rotaue	SP	30	26	25	86.7	96.2	83.3	1.9	0.6	0.6		7.6	

C															Transitzeit pro Höhe und Fischart		
Gesamte															Transitzeit pro Höhe und Fischart		
Fischart	N Fische ausgesetzt	N 1. Detektion	N 1. Passage	N Auffindbarkeit	N Passierbarkeit	Auffindbarkeit [%]	Passierbarkeit [%]	Effizienz [%]	Auffindbarkeitszeit [d]	Passagezeit [h]	Transitzeit [h]	Fischart	Transitzeit pro Höhe [min/m]	Fischart	Transitzeit pro Höhe [min/m]	Fischart	Transitzeit pro Höhe [min/m]
Alet	SP	172	23	24	20	13.4	83.3	11.6	61.9	2	1.5	1.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5
Alet	RBP	172	33	33	20	19.2	60.6	11.6	25.5		1.8		19.5		19.5		19.5
Alet	FL	172	0	0	0	0.0	0.0	0.0	-		-		-		-		-
Barbe	SP	1056	285	321	192	27.0	59.8	18.2	17.9	17.4	1.1	1	13.9	1	13.9	11.5	11.5
Barbe	RBP	1056	166	211	113	15.7	53.6	10.7	11.3		0.9		9.5		9.5		9.5
Barbe	FL	1056	91	91	2	8.6	2.2	0.2	14.1		12.1		107.5		107.5		107.5
Rotaugen	SP	1030	33	35	26	3.2	74.3	2.5	58.9	1.3	2.3	1.2	29.3	1.2	29.3	13.5	13.5
Rotaugen	RBP	1030	66	69	64	6.4	92.8	6.2	321.6		1		10.2		10.2		10.2
Rotaugen	FL	1030	6	0	0	0.6	0.0	0.0	329.6		-		-		-		-
D															Transitzeit pro Höhe und Fischart		
Gesamte															Transitzeit pro Höhe und Fischart		
Fischart	N Fische ausgesetzt	N 1. Detektion	N 1. Passage	N Auffindbarkeit	N Passierbarkeit	Auffindbarkeit [%]	Passierbarkeit [%]	Effizienz [%]	Auffindbarkeitszeit [d]	Passagezeit [h]	Transitzeit [h]	Fischart	Transitzeit pro Höhe [min/m]	Fischart	Transitzeit pro Höhe [min/m]	Fischart	Transitzeit pro Höhe [min/m]
Alet	SP	117	19	19	14	16.2	73.7	12.0	25.80	7.5	4.3	4.3	40	40	40	40.2	40.2
Alet	RBP	117	9	11	11	7.7	100.0	9.4	17.40		1.3		12		12		12
Alet	UGG	117	17	17	4	14.5	23.5	3.4	24.30		1292.3		20732		20732		20732
Barbe	SP	1270	396	396	243	31.2	61.4	19.1	32.50	11.5	4.1	4.2	37.7	4.1	37.7	39.1	39.1
Barbe	RBP	1270	11	13	6	0.9	46.2	0.5	80.70		18.6		191.1		191.1		191.1
Barbe	UGG	1270	3	4	1	0.2	25.0	0.1	21.40		243.1		3900.5		3900.5		3900.5
Egli	SP	322	77	77	30	23.9	39.0	9.3	6.02	27.1	25.4	25.1	236	25.4	236	233.5	233.5
Egli	RBP	322	4	4	1	1.2	25.0	0.3	6.32		3.2		33.2	3.2	33.2		33.2
Egli	UGG	322	4	4	2	1.2	50.0	0.6	2.18		16.2		260.6	16.2	260.6		260.6
Rotaugen	SP	216	6	6	5	2.8	83.3	2.3	344.40	4.4	1.6	3.8	14.6	1.6	14.6	45	45
Rotaugen	RBP	216	15	15	10	6.9	66.7	4.6	5.40		4.9		50.2	4.9	50.2		50.2
Rotaugen	UGG	216	7	7	5	3.2	71.4	2.3	12.40		6.2		98.7	6.2	98.7		98.7
Schneider	SP	80	3	3	3	3.8	100.0	3.8	12.70	8.2	7.2	7.2	66.7	7.2	66.7	66.7	66.7
Schneider	RBP	80	4	4	2	5.0	50.0	2.5	23.10		10.5		108.1	10.5	108.1		108.1
Schneider	UGG	80	1	0	0	1.3	0.0	0.0	306.40		-		-	-	-		-

E	Gesamte														Transitzeit pro Höhe und Fischart			
	N				N				Effizienz		Auffindbarkeitszeit		Transitzeit pro Höhe		Transitzeit pro Höhe			
	Auffindbarkeit		Auffindbarkeit		Passierbarkeit		Passierbarkeit		Auffindbarkeitszeit		Auffindbarkeitszeit		Fischart		Fischart			
	N Fische	N	N	N	N	N	N	N	1. Passage	1. Detektion	1. Passage	1. Detektion	Passagezeit	Passagezeit	Transitzeit	Transitzeit		
Fischart	Fischartreppenausgesetzte	1. Detektion	1. Passage	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N		
Alet	SP	346	12	13	9	3.5	69.2	2.6	30.5	39.8	50.3	26.8	50.3	303.0	314			
Alet	RBP	346	55	55	39	15.9	70.9	11.3	42.0			51.5		321.0				
Barbe	SP	484	37	41	11	7.6	26.8	2.3	6.0	8.2	17.6	9.3	11.9	105.3	87.8			
Barbe	RBP	484	131	135	55	27.1	40.7	11.4	8.0			13.7		85.2				
Egli	SP	604	93	93	40	15.4	43.0	6.6	11.0	11.8	8.9	6.1	7.6	68.5	68.5			
Egli	RBP	604	83	84	36	13.7	42.9	6.0	12.0			11.8		73.9				
Rotaue	SP	638	63	64	28	9.9	43.8	4.4	15.0	18.1	11.6	11.5	11.4	130.0	87.9			
Rotaue	RBP	638	114	114	47	17.9	41.2	7.4	25.0			11.1		69.3				
Schneider	SP	133	13	14	5	9.8	35.7	3.8	4.0	7.1	147.5	102.0	147.5	1156.0	1178.8			
Schneider	RBP	133	20	20	7	15.0	35.0	5.3	8.5			193.0		1201.0				

F														Transitzeit pro Höhe	
Gesamte														Transitzeit [min/m Höhe]	
Fischart	Fischtrappe ausgesetzt	N Fische	N Auffindbarkeit	N Passierbarkeit	N Auffindbarkeit	N Passierbarkeit	Effizienz [%]	Auffindbarkeitszeit [d]	Passagezeit [h]	Transitzeit [h]					
Alet	BP	122	42	29	34.4	69.0	23.8	39.0	4.2	1.0			13.9		
Barbe	BP	1000	136	88	13.6	64.7	8.8	92.9	0.8	0.5			7.6		
Rotaue	BP	1645	36	28	2.2	77.8	1.7	337.7	1.0	0.6			8.3		

G															
Fischart	Fischstrecke	N Fische ausgesetzt	N		N Passierbarkeit	Gesamte					Transitzeit pro Höhe und Fischart		Transitzeit pro Höhe und Fischart [min/m Höhe]		
			Auffindbarkeit 1. Detektion	Auffindbarkeit 1. Passage		Auffindbarkeit [%]	Passierbarkeit [%]	Effizienz [%]	Auffindbarkeitszeit pro Fischart [d]	Passagezeit [h]	Transitzeit pro Höhe [h]	Transitzeit pro Höhe [min/m Höhe]			
Alet	SP HKW	499	7	7	3	1.4	42.9	0.6	326.0	256.9	0.5	0.6	0.4	13.9	8.65
Alet	SP DKW	499	16	17	14	3.2	82.4	2.8	256.0			0.4		8.1	
Barbe	SP HKW	133	13	14	9	9.8	64.3	6.8	36.7	29.9	2.4	2.0	2	48.4	46.6
Barbe	SP DKW	133	20	20	16	15.0	80.0	12.0	29.0			2.0		44.9	

Tabelle A1: Übersicht der Auffindbarkeit, Passierbarkeit, Aufenthaltszeit und Transitzeit pro Fischart und FAH; Die Zeiten repräsentieren die 50% einer Fischart; A) Kraftwerk Schiffmühle, B) Kraftwerk Augst-Wyhlen, C) Kraftwerk Rheinfelden, D) Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt, E) Kraftwerk Ryburg-Säckingen, G) Kraftwerk Rühlig

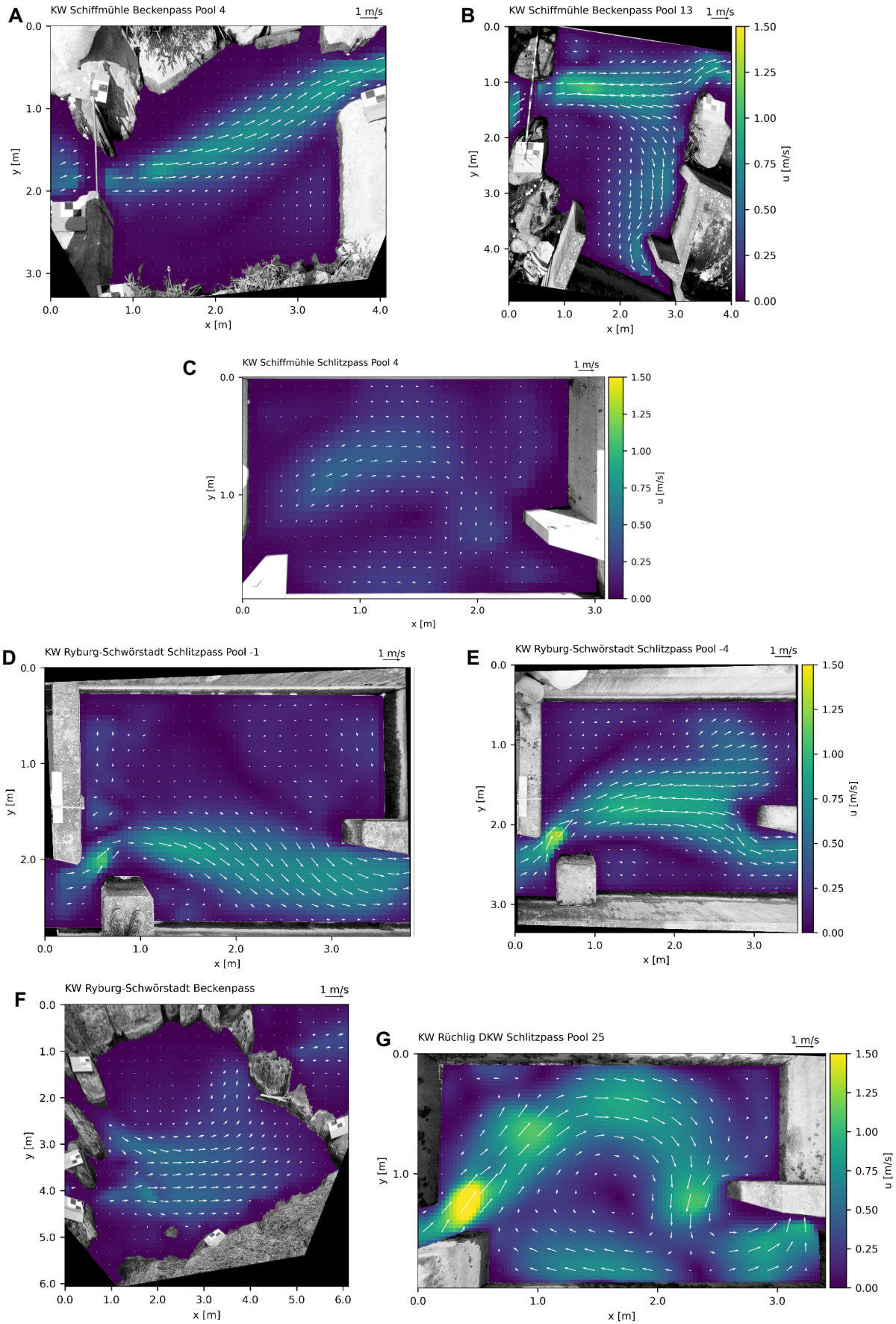


Abbildung A3: Mittlere Fließgeschwindigkeiten u an der Wasseroberfläche im A) Raugerinne-Beckenpass des Kraftwerks Schiffmühle (Becken Nr. 4), B) Raugerinne-Beckenpass des Kraftwerks Schiffmühle (Becken Nr. 13), C) Schlitzpass des Kraftwerks Schiffmühle (Becken Nr. 4), D) Schlitzpass des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt (Becken Nr. 1*), E) Schlitzpass des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt (Becken Nr. 4**), F) Raugerinne-Beckenpass des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt (Becken Nr. 12), G) Schlitzpass (DKW) der Kraftwerks Röchlig (Becken Nr. 25); *Vom Einlauf des Schlitzpasses (Verzweigung Raugerinne-Beckenpass) nummerierter gezählt.** Viertes Becken Unterstrom des Ruhebeckens in 180° Kurve.

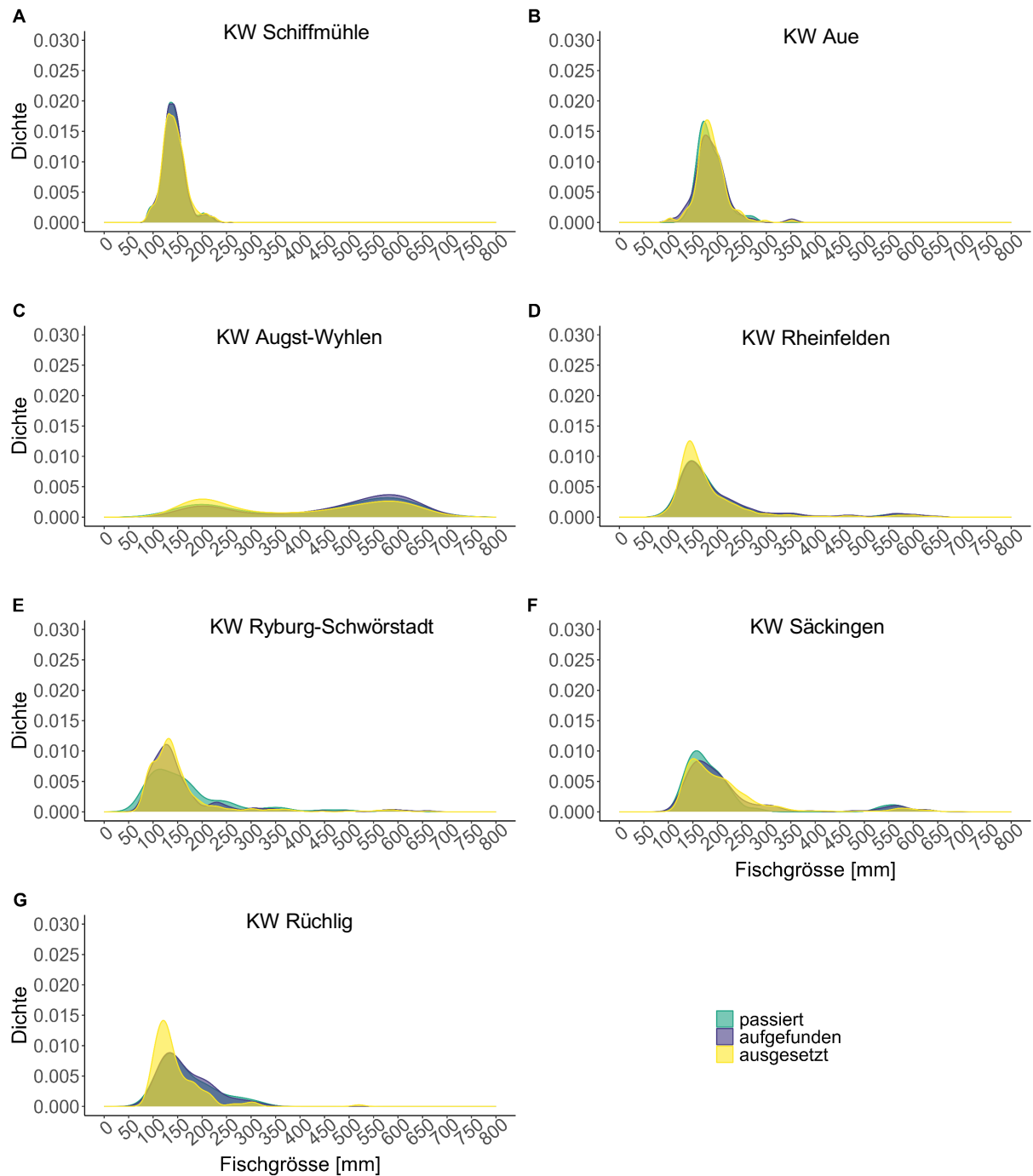


Abbildung A4: Dichtediagramm der Fischart Barbe; Die Wahrscheinlichkeitskurven der Fischgrössen der ausgesetzten Fische (gelb), der Fischaufstiegshilfe auffindenden Fische (blau) und passierenden Fische (grün) werden in den Grafiken aufgezeigt. A) Kraftwerk Schiffmühle, B) Kraftwerk Aue, C) Kraftwerk Augst-Wyhlen, D) Kraftwerk Rheinfelden, E) Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt, F) Kraftwerk Säckingen, G) Kraftwerk Rüchlig

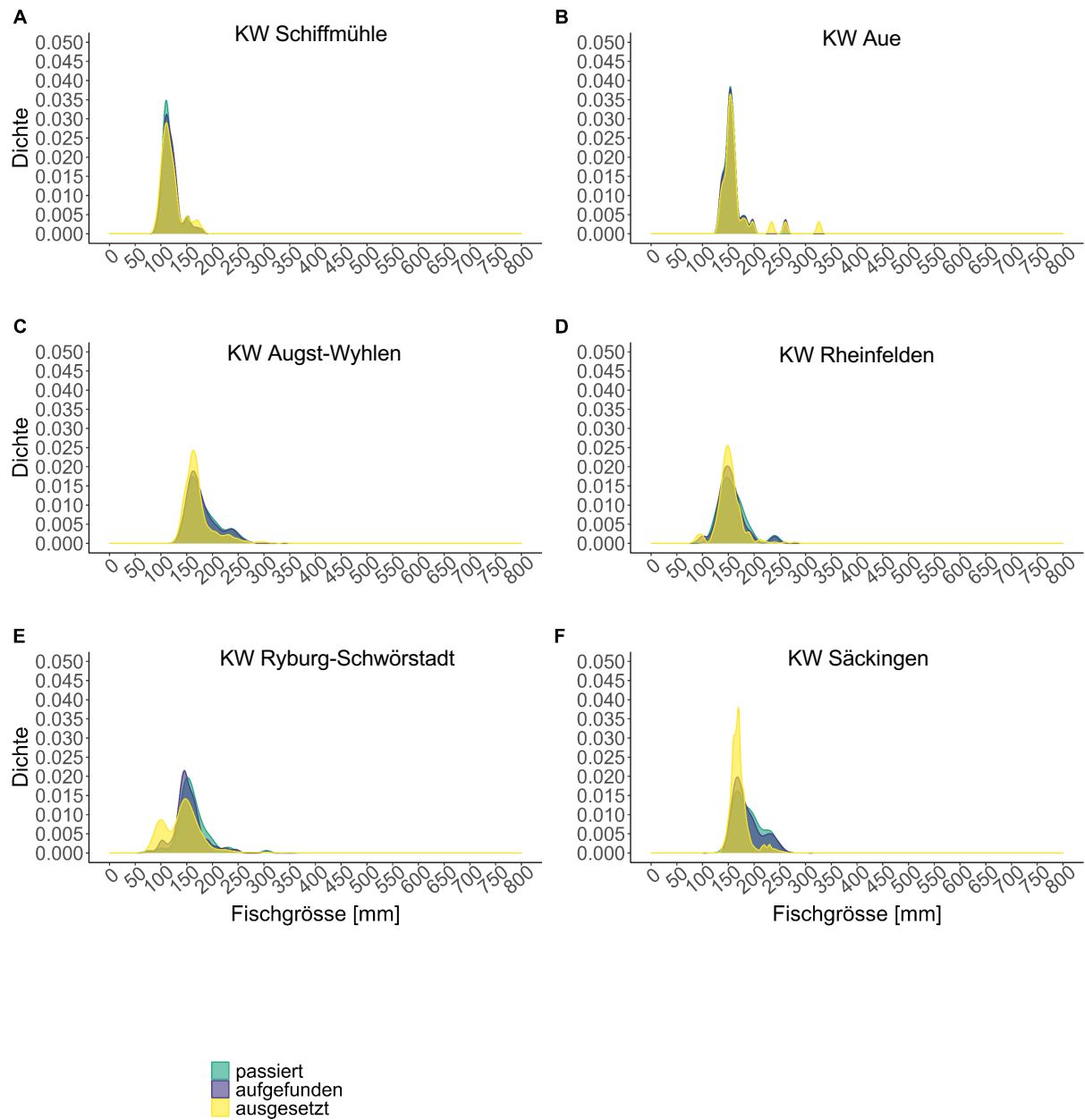


Abbildung A5: Dichtediagramm der Fischart Rotauga; Die Wahrscheinlichkeitskurven der Fischgrößen der ausgesetzten Fische (gelb), der Fische aufstiegshilfe auffindenden Fische (blau) und passierenden Fische (grün) werden in den Grafiken aufgezeigt. A) Kraftwerk Schiffmühle, B) Kraftwerk Aue, C) Kraftwerk Augst-Wyhlen, D) Kraftwerk Rheinfelden, E) Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt, F) Kraftwerk Säckingen

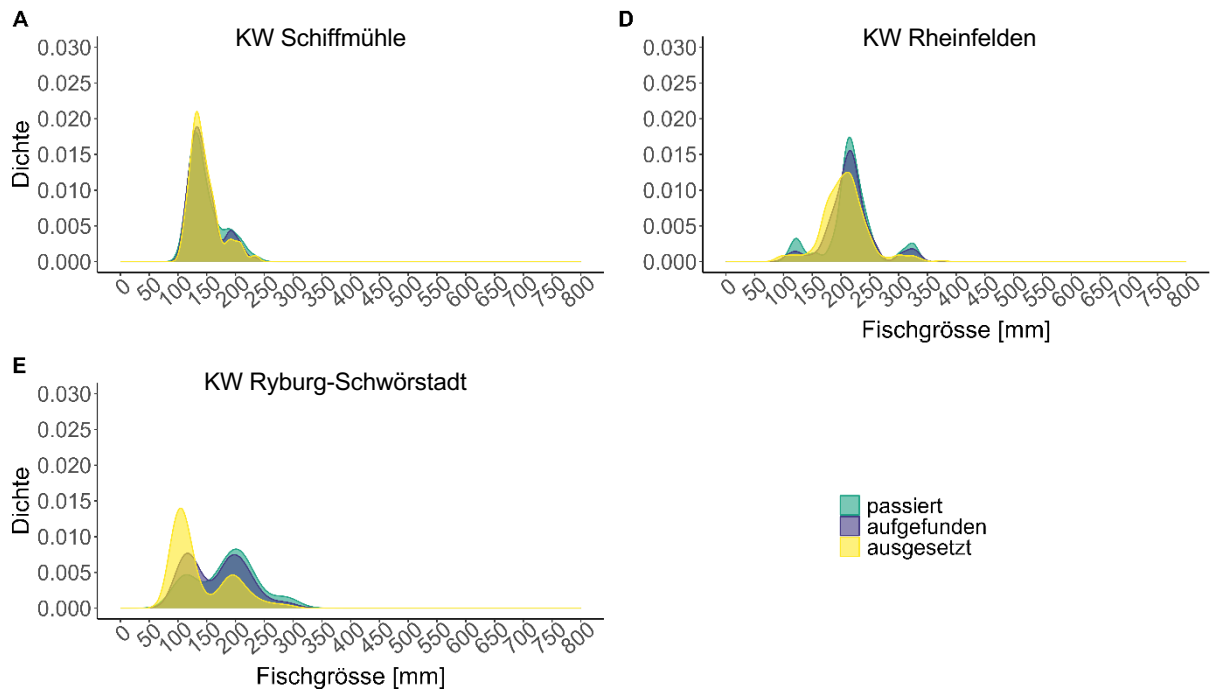


Abbildung A6: Dichtediagramm der Fischart Egli; Die Wahrscheinlichkeitskurven der Fischgrößen der ausgesetzten Fische (gelb), der Fischaufstiegshilfe auffindenden Fische (blau) und passierenden Fische (grün) werden in den Grafiken aufgezeigt. A) Kraftwerk Schiffmühle, D) Kraftwerk Rheinfelden, E) Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt

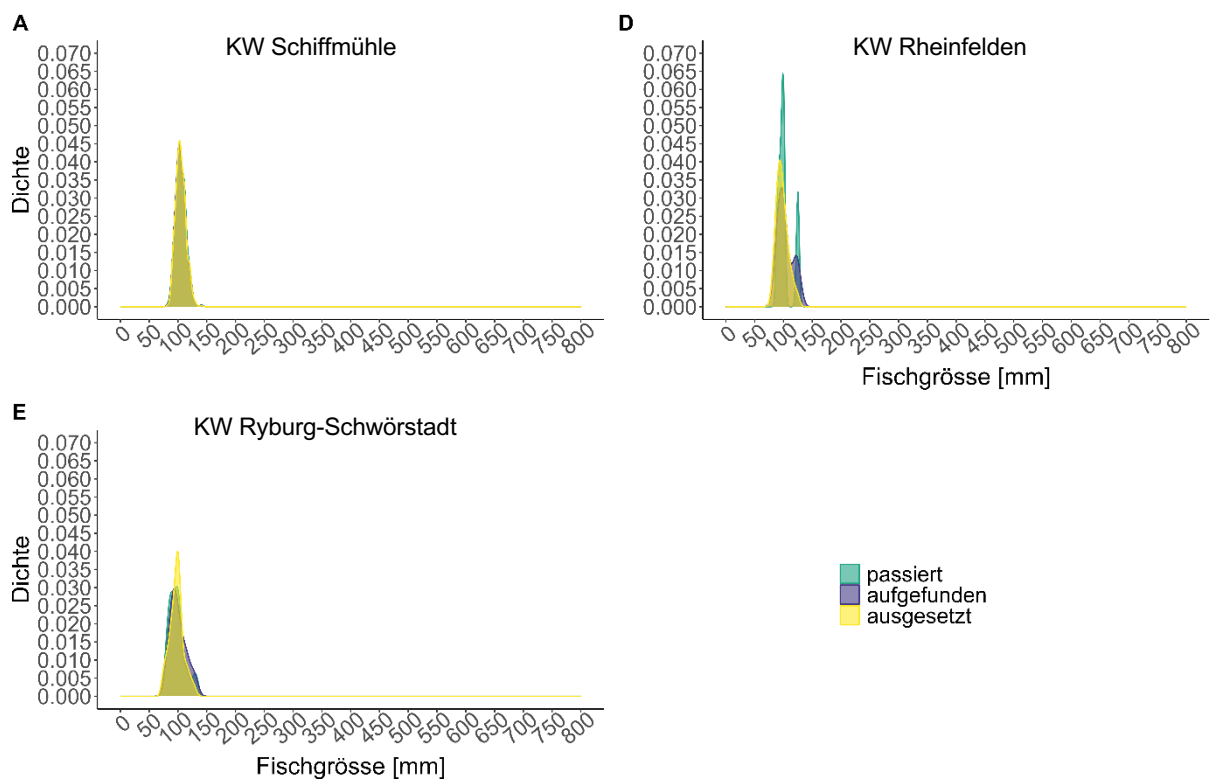


Abbildung A7: Dichtediagramm der Fischart Schneider; Die Wahrscheinlichkeitskurven der Fischgrößen der ausgesetzten Fische (gelb), der Fischaufstiegshilfe auffindenden Fische (blau) und passierenden Fische (grün) werden in den Grafiken aufgezeigt. A) Kraftwerk Schiffmühle, D) Kraftwerk Rheinfelden, E) Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt

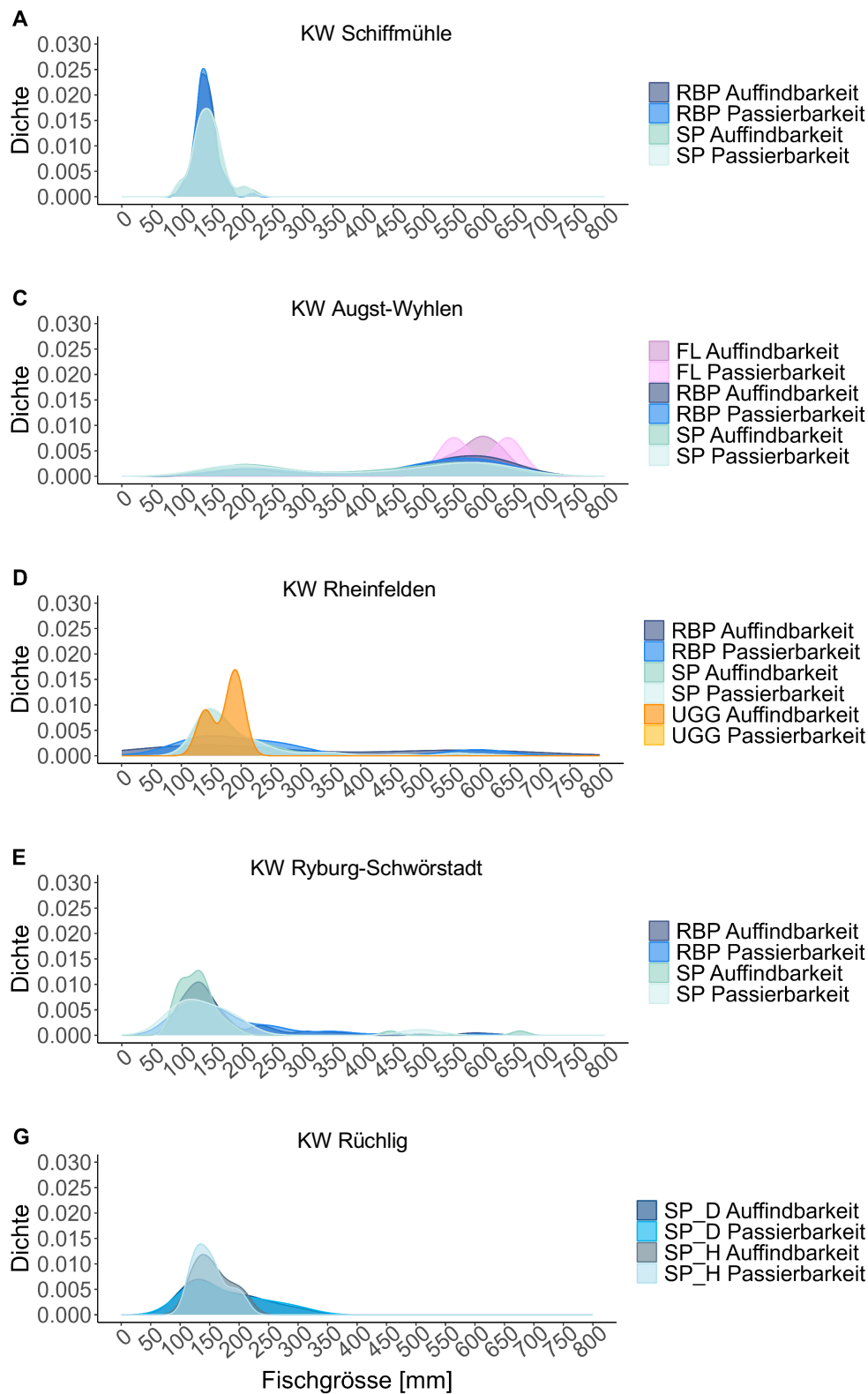


Abbildung A8: Dichtediagramm der Fischart Barbe pro Fischaufstiegshilfe; Die Wahrscheinlichkeitskurven der Fischgrößen der Fischaufstiegshilfen auffindenden und passierenden Fische werden in den Grafiken aufgezeigt. RBP = Raugerinne-Beckenpass, SP = Schlitzpass und UGG = Umgehungsgewässer; A) Kraftwerk Schiffmühle, C) Kraftwerk Augst-Wyhlen, D) Kraftwerk Rheinfelden, E) Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt, G) Kraftwerk Rüchlig

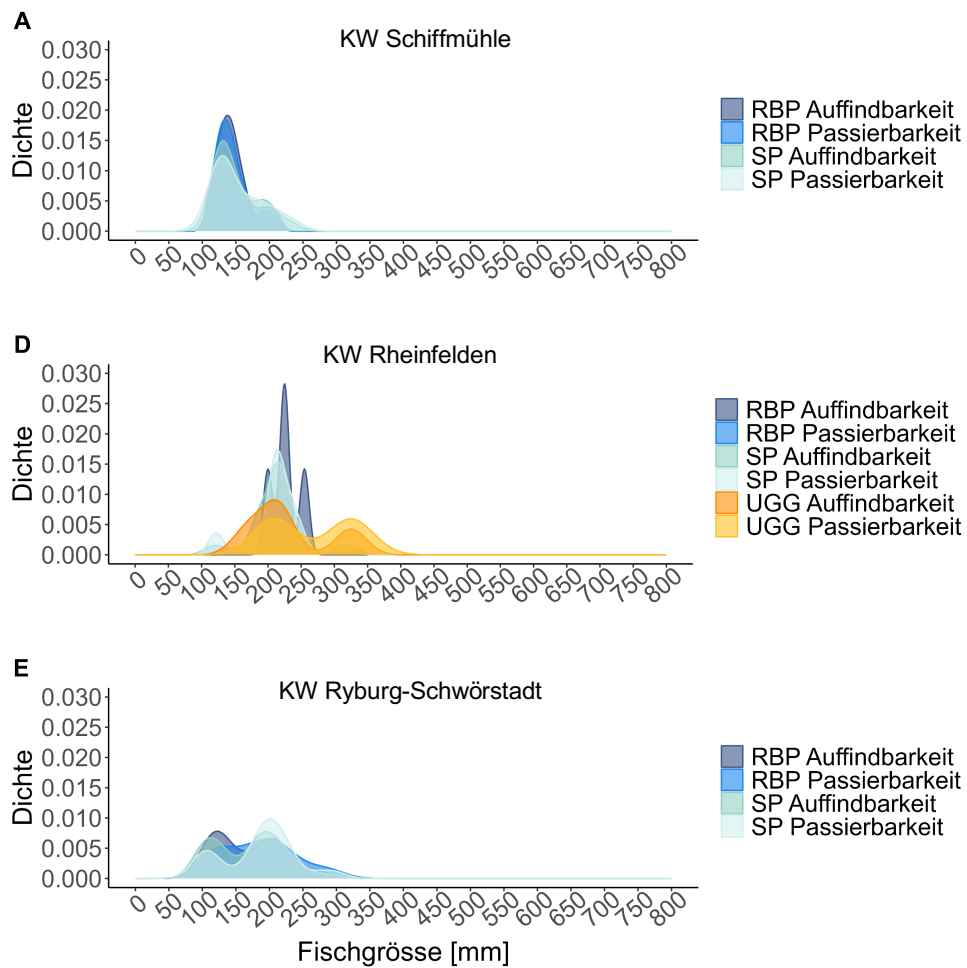


Abbildung A9: Dichtediagramm der Fischart Egli pro Fischaufstiegshilfe; Die Wahrscheinlichkeitskurven der Fischgrössen der Fischaufstiegshilfen auffindenden und passierenden Fische werden in den Grafiken aufgezeigt. RBP = Raugerinne-Beckenpass, SP = Schlitzpass und UGG = Umgehungsgewässer; A) Kraftwerk Schiffmühle, D) Kraftwerk Rheinfelden, E) Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt

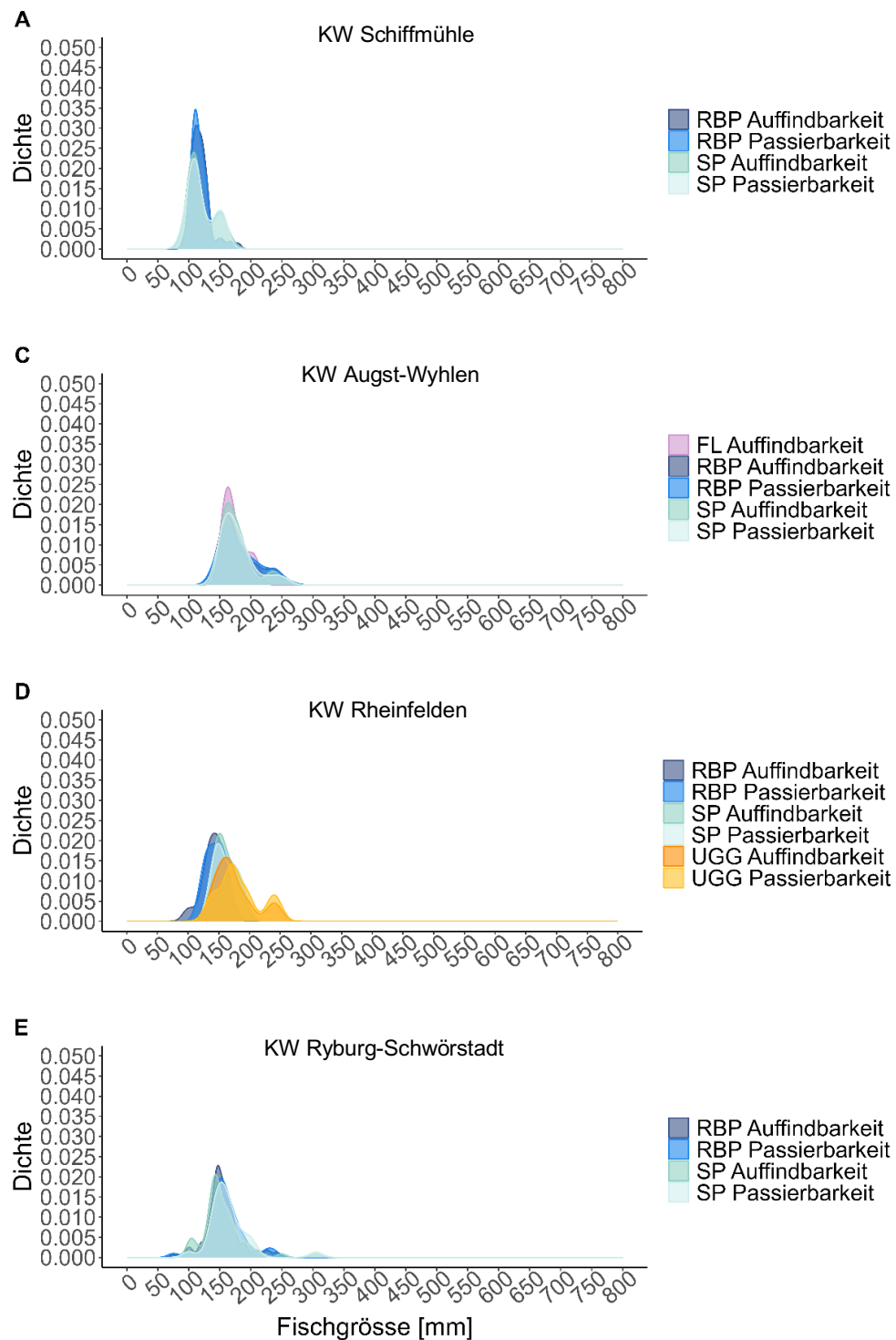


Abbildung A10: Dichtediagramm der Fischart Rotaugen pro Fischaufstiegshilfe; Die Wahrscheinlichkeitskurven der Fischgrößen der Fischaufstiegshilfen auffindenden und passierenden Fische werden in den Grafiken aufgezeigt. FL = Fischlift, RBP = Raugerinne-Beckenpass, SP = Schlitzpass und UGG = Umgehungsgewässer; A) Kraftwerk Schiffmühle, C) Kraftwerk Augst-Wyhlen, D) Kraftwerk Rheinfelden, E) Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt

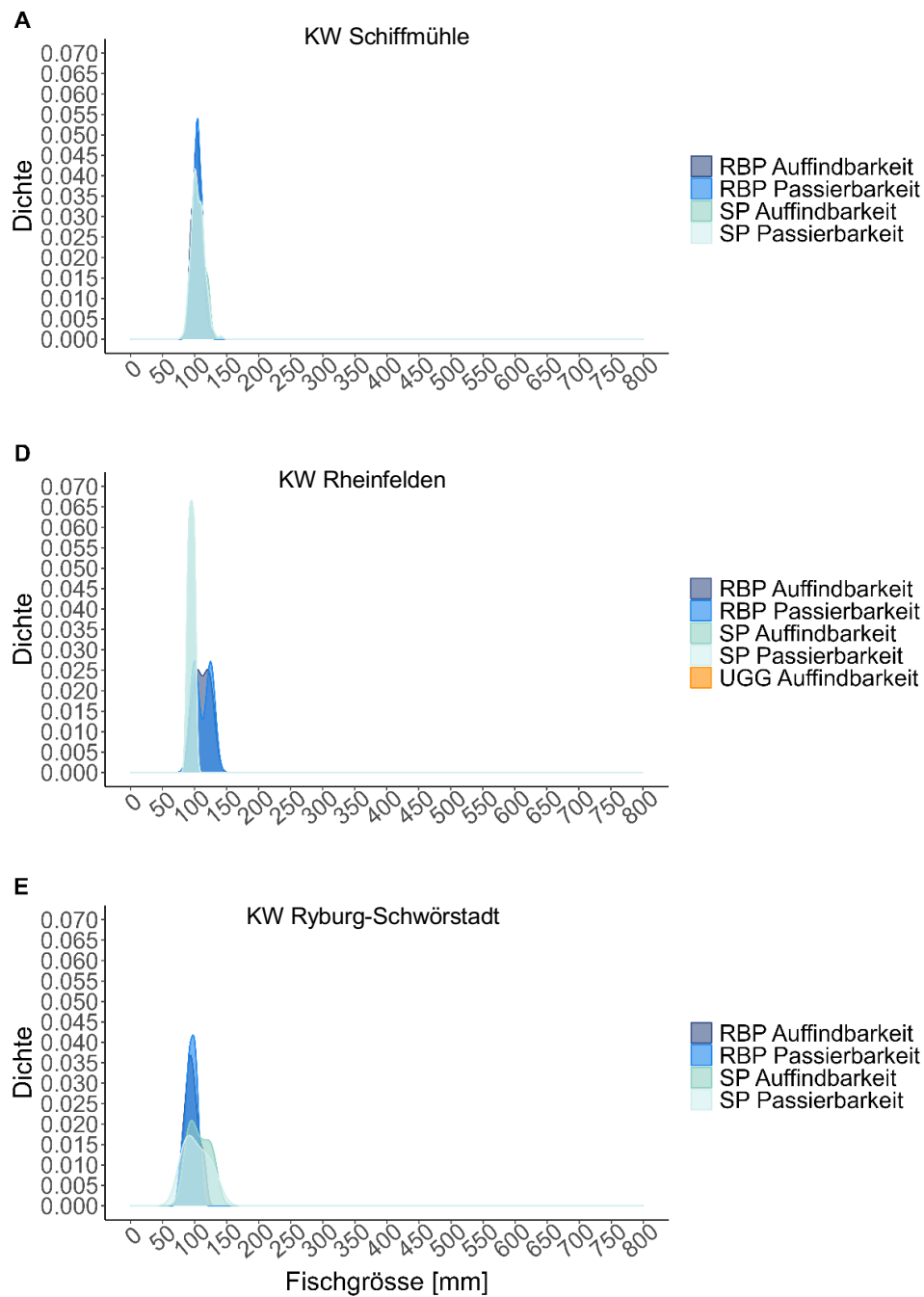


Abbildung A11: Dichtediagramm der Fischart Scheider pro Fischaufstiegshilfe; Die Wahrscheinlichkeitskurven der Fischgrößen der Fischaufstiegshilfen auffindenden und passierenden Fische werden in den Grafiken aufgezeigt. RBP = Raugerinne-Beckenpass, SP = Schlitzpass und UGG = Umgehungsgewässer; A) Kraftwerk Schiffmühle, D) Kraftwerk Rheinfelden, E) Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt

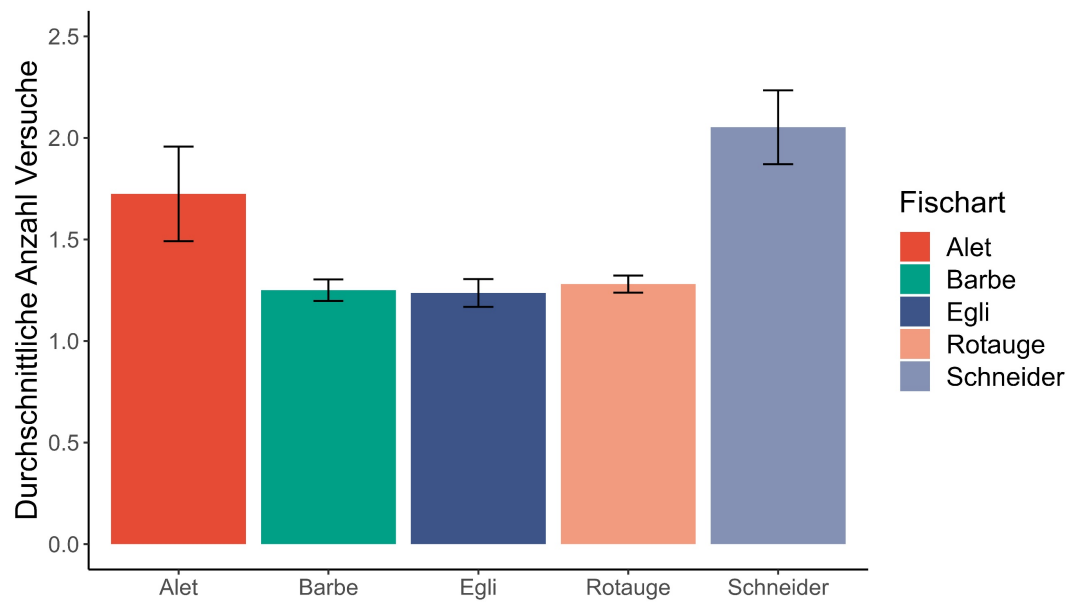


Abbildung A12: Durchschnittliche Anzahl Einstiegsversuche pro Fischart am Kraftwerk Schiffmühle.

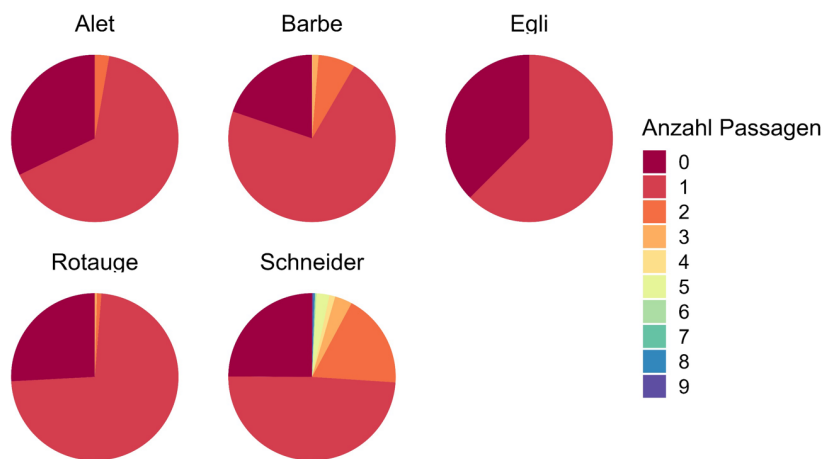


Abbildung A13: Anzahl Passagen pro Fischart am Kraftwerk Schiffmühle.

Events Regeln Kraftwerk Schiffmühle

Für das neue Event, wie für das Beispiel das Kraftwerk Schiffmühle, gelten folgende Regeln:

- Sobald ein neuer PIT-Tag erfasst wird, beginnt die Eventzählung für den folgenden PIT-Tag bei 1
- Falls bei der nachfolgenden Detektion derselbe PIT-Tag erfasst wird:
 - Wenn nach der RBPo1 innerhalb von 3h SPu1 oder RBPu1 folgt, wird dasselbe Event beibehalten (da möglicherweise die mittlere Antenne übersprungen wurde) → Nach einer Zeitspanne von über 3 Stunden wird ein neues Event gestartet.
 - Wenn die Detektion nach RBPo1 RBPu2 oder SPu2 ist, bleibt es das gleiche Event
 - Gleiches gilt, wenn die Detektion nach SPu1 SPu2 oder nach RBPu1 RBPu2 ist
 - Sollte nach SPu1 oder RBPu1 RBPo1 innerhalb von weniger als 3 Stunden eine Detektion erfolgen, bleibt es dasselbe Event (eventuell wurde die zweite Antenne verpasst).
 - Ein neues Event beginnt, wenn nach RBPu2 mehr als 3 Stunden später SPu1 erfasst wird.
 - Ebenso startet ein neues Event, wenn nach SPu2 mehr als 3 Stunden später RBPu1 erfasst wird.
 - Ein neues Event wird gestartet, wenn nach RBPu2 mehr als 3 Stunden später RBPu1 erfasst wird.
 - Ebenso beginnt ein neues Event, wenn nach SPu2 mehr als 3 Stunden später SPu1 erfasst wird.
 - Ein neues Event wird gestartet, wenn zwischen zwei aufeinanderfolgenden RBPo1-Erfassungen über 3 Stunden vergehen.
 - Ebenso beginnt ein neues Event, wenn zwischen zwei aufeinanderfolgenden RBPu1-Erfassungen über 3 Stunden vergehen.
 - Ebenso beginnt ein neues Event, wenn zwischen zwei aufeinanderfolgenden SPu1-Erfassungen über 3 Stunden vergehen.