

Radiotelemetrische Untersuchungen zum Fischabstieg am Kraftwerk Bannwil

Pilotprojekte des VAR zum Fischabstieg in grossen Wasserkraftanlagen

30.08.2023



Auftrag: BKW Energie AG

Autoren: Armin Peter, Dr. sc. nat., Nils Schölzel, Biologe M.Sc. & Lisa Wilmsmeier, Biologin M.Sc.

Auftraggeber

BKW Energie AG
Viktoriaplatz 3
3013 Bern

Kontaktpersonen

Paul Kauz
paul.kauz@bkw.ch
Sandra Krähenbühl
sandra.kraehenbuehl@bkw.ch

Auftragnehmer

FishConsulting GmbH
Hagmattstr. 7
4600 Olten
Tel. 079 964 06 44
apeter@fishconsulting.ch

Projektleitung

Dr. Armin Peter, FishConsulting GmbH, Olten

Zitierungsvorschlag

Peter, A., N. Schölzel & L. Wilmsmeier 2023. Radiotelemetrische Untersuchungen zum Fischabstieg am Kraftwerk Bannwil. Studie im Auftrag der BKW Energie AG. 111 Seiten.

Hinweis

Diese Studie wurde im Auftrag der BKW Energie AG verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Fotos auf dem Titelblatt:

Blick auf das Kraftwerk Bannwil an der Aare
Barbe / 6-Element-YAGI Antenne



Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund und Auftrag	4
2	Einleitung und Fragestellungen	5
2.1	Motivation für Wanderungen	5
2.2	Turbinenpassage und Schädigungen	6
3	Aarekraftwerk Bannwil	8
3.1	Charakterisierung der Aare.....	8
3.2	Wasserkraftwerk Bannwil.....	9
4	Methoden	12
4.1	Untersuchungsperimeter.....	12
4.2	Untersuchungszeitraum.....	13
4.3	Telemetriesystem	13
4.3.1	<i>Radiosender und PIT-Tags</i>	13
4.3.2	<i>Empfangsgeräte und Datenlogger</i>	14
4.4	Zielarten	16
4.4.1	<i>Ökologie der Barbe</i>	17
4.5	Fang und Markierung der Fische	19
4.5.1	<i>Fang der Fische</i>	19
4.5.2	<i>Markierung der Fische</i>	20
4.5.3	<i>Aussatz der Fische</i>	21
4.5.4	<i>Beurteilung der Auswirkung der Markierung</i>	21
4.6	Stationäres Tracking.....	21
4.6.1	<i>Untersuchungsdesign am WKW Bannwil</i>	21
4.6.2	<i>Weitere Stationen entlang der Aare</i>	23
4.6.3	<i>Kalibrierung der Anlage und Datenerhebung</i>	25
4.6.4	<i>Unterhalt der Stationen</i>	25
4.6.5	<i>Datenvalidierung</i>	25
4.6.6	<i>Datenanalyse</i>	26
4.7	Mobiles Tracking.....	28
4.7.1	<i>Datenerhebung</i>	28
4.7.2	<i>Datenvalidierung</i>	29
4.7.3	<i>Datenanalyse</i>	29
4.8	Prädation.....	31
4.9	Berechnung der Abflüsse über die Korridore am WKW Bannwil	32
5	Resultate	33
5.1	Markierte Fische	33
5.1.1	<i>Auswirkung der Markierung</i>	34
5.2	Annäherung an das Kraftwerk	36
5.2.1	<i>Anzahl Annäherungen</i>	36
5.2.2	<i>Dauer der Annäherungen</i>	38
5.2.3	<i>Tageszeitliche Aspekte bei der Annäherung an das Kraftwerk</i>	39
5.2.4	<i>Auswirkung von Abfluss und Temperatur auf die Annäherungen</i>	41
5.3	Abwanderungskorridore und Zeitpunkt der Abwanderung	42



5.3.1	<i>Zeitpunkt der Abwanderung</i>	42
5.3.2	<i>Abwanderungskorridore</i>	45
5.3.3	<i>Schwimmtiefen</i>	52
5.4	Überlebensraten der abgewanderten Fische	55
5.5	Prädation.....	56
5.6	Mobiles Tracking und Erfassen langer Wanderdistanzen.....	58
5.6.1	<i>Beschrieb verschiedener Wanderrouten</i>	58
5.6.2	<i>Wanderdistanzen</i>	60
5.6.3	<i>Saisonale Wanderungen</i>	61
6	Diskussion	66
6.1	System der Radiotelemetrie und ihre Eignung zur Dokumentation der Abwanderungskorridore	66
6.2	Zielart und Fang der Fische	67
6.3	Markierte Fische	67
6.4	Annäherung an das Kraftwerk	68
6.5	Abwanderungskorridore und Zeitpunkt der Abwanderung	68
6.6	Schwimmtiefen der über die Turbine abgewanderten Fische.....	70
6.7	Überlebensraten der abgewanderten Fische	70
6.8	Prädation.....	71
6.9	Mobiles Tracking.....	71
6.9.1	<i>Wanderdistanzen</i>	71
6.9.2	<i>Saisonale Wanderungen</i>	73
6.10	Auswirkung der Markierung auf die Fische	74
7	Fazit und Zusammenfassung	76
8	Dank	80
9	Literatur	81
10	Anhang	84
10.1	Anhang Aarekraftwerk Bannwil	84
10.2	Anhang Methoden	85
10.3	Anhang Resultate.....	86
10.3.1	<i>Abstiegswege</i>	86
10.3.2	<i>Schwimmtiefen</i>	89
10.3.3	<i>Dauer der Annäherungen</i>	102
10.3.4	<i>Wanderrouten</i>	103



1 Hintergrund und Auftrag

Im Rahmen des gesetzlichen Auftrages (Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer) müssen die sanierungspflichtigen Wasserkraftanlagen in schweizerischen Fliessgewässern aufgewertet werden. Ein wichtiger Teil ist dabei die Durchgängigkeit für Fische. Die freie Fischwanderung soll wieder ermöglicht werden, flussaufwärts wie flussabwärts. Dabei gilt es zu verhindern, dass Fische durch bauliche Anlagen oder durch Maschinen verletzt oder getötet werden. Um die Fischgängigkeit an grossen Wasserkraftwerken (WKW) vertieft zu untersuchen, hat das Bundesamt für Umwelt (BAFU) Pilotstudien an zwei Wasserkraftwerken ermöglicht. Dabei handelt es sich um das WKW Wildegg-Brugg und das WKW Bannwil an der Aare. An diesen Standorten soll geprüft werden, ob die technische Umsetzung von Leitrechensystemen möglich ist und welche Kosten sie verursacht. Das Projekt wurde vom Verband Aare-Rheinwerke (VAR) initiiert und koordiniert. Der VAR initiierte und teilfinanzierte bereits das vorangegangene Forschungsprojekt zur Untersuchung der Leitwirkung von Leitrechensystemen bei typischen Schweizer Fischarten.

An beiden Anlagen soll ein technisches Vorprojekt für ein Fischleitsystem mittels Bar Rack und Bypass ins Unterwasser durchgeführt werden. Zusätzlich soll je eine verhaltensbiologische Studie den Abstieg von Fischen an den Kraftwerken im Ist-Zustand dokumentieren. Dies soll erlauben, allfällige Alternativmassnahmen zum Bar Rack zu erkennen. Für Bannwil wurde gemeinsam von der FishConsulting GmbH und der BKW Energie AG (BKW) vorgeschlagen, eine Studie zum Abstiegsverhalten von Cypriniden durchzuführen. Es sollte mit Hilfe der Radiotelemetrie dokumentiert werden, welche Abstiegswege die Fische am Kraftwerk benutzen. Die BKW als Auftraggeberin erteilte der FishConsulting GmbH am 01.04.2019 den Auftrag, die fischökologische Studie zum Abstiegsverhalten der Fische am WKW Bannwil durchzuführen, basierend auf der Offerte vom 19.12.2017. Am WKW Bannwil fanden auch im Rahmen des europäischen Projekts FITHydro Untersuchungen statt. So ergab sich die Möglichkeit, Synergien zwischen diesen beiden Projekten zu nutzen und die Untersuchungen mit einer gemeinsamen Infrastruktur durchzuführen. Die Studien für das Projekt FITHydro wurden im Oktober 2020 abgeschlossen und publiziert (www.FITHydro.eu). Das Vorgehen und die Resultate dieser Studie zu den abwandernden Fischen werden in diesem Bericht integriert.



2 Einleitung und Fragestellungen

Am Pilotstandort WKW Bannwil in der Aare soll das Abwanderungsverhalten von Fischarten (Barbe, Alet und falls möglich weiteren Arten) dokumentiert werden, welche typische Bewohner für diesen Flussabschnitt sind. Das grösste Interesse gilt den Wanderkorridoren, die für den Abstieg benützt werden. Für die Dokumentation soll die Methode der Radiotelemetrie und des Biologging eingesetzt werden. Dies soll erlauben, räumliche und zeitliche Komponenten der Abwanderung zu identifizieren. Für die Untersuchungen sollen verschiedene Grössenklassen der Zielarten verwendet werden.

Die beiden Untersuchungsschwerpunkte der Studie sind die Identifikation des Abwanderungskorridors (Fischpass, Turbine, Wehr), aber auch die Frage, ob Fische vor dem Kraftwerk umkehren und wieder aufwärts wandern. Zudem ist aufzuzeigen, wann die Fische abwandern und wie sie sich dem Kraftwerk annähern. Im Weiteren ist die Zeitspanne zu erfassen, in der sich die Fische vor dem Kraftwerk aufhalten.

Tageszeitliche und saisonale Aspekte sind bei den Auswertungen zu berücksichtigen, ebenso die Rolle des Abflusses und der Wassertemperatur. Auf die Frage, ob die Fische bevorzugt bei Wehrüberfall wandern und dabei die Wehrpassage nutzen, soll speziell eingegangen werden. Von grossem Interesse ist auch die Überlebensrate bei der Passage des Kraftwerks. Die Bewegungen der Fische nach der Passage des Kraftwerkes sollen ebenfalls möglichst ausführlich dokumentiert werden. Die wichtigsten Fragen sind hier kurz zusammengefasst:

- Wie und wie oft nähern sich die Fische dem Kraftwerk an?
- Welche Abwanderungskorridore benutzen die Fische?
- Wann wandern sie ab (saisonale und tageszeitliche Aspekte) und welche Faktoren lösen Wanderungen aus?
- Wie verhalten sich die Fische nach der Passage des Kraftwerkes?
- Wie weit wandern die Fische in der Aare?

2.1 Motivation für Wanderungen

Im Gegensatz zu den diadromen Fischarten existieren für potamodrome Arten keine systematischen Analysen zu Wanderungen. Ausgenommen von der larvalen Drift verläuft die potamodrome Wanderung unkoordiniert und ist nicht fokussiert auf eine exakte Zeit oder ein spezielles Vorkommen (Schwevers & Adam 2020). Während für diadrome Fische eindeutige Trigger für die Abwanderung bekannt sind (z. B. Abfluss), existieren für potamodrome Arten keine bekannten, derartige deutliche Trigger. Es sind bestimmte Bereiche von Faktoren, in denen Wanderungen ausgelöst werden. Die Bedeutung der Temperatur ist eher unklar, aber ein bestimmtes Temperaturniveau muss für das Einsetzen einer Wanderung meist erreicht werden. Weitere Faktoren könnten Trübung, Tageslänge oder die Mondphase sein. Dazu ist aber im Gegensatz zum katadromen Aal für potamodrome Fische kaum etwas bekannt.

Bewegungen innerhalb der Home Range (Aktionsraum: Areal, das ein Fisch innerhalb einer bestimmten Zeit für seine Aktivitäten nutzt) sind oft eine Reaktion auf lokale Bedingungen. Wanderungen basieren hingegen eher auf grösseren zeitlichen und örtlichen Skalen (Thurow 2016) und zeichnen sich durch einen Wechsel von einem Habitat in ein anderes aus, unabhängig von vorhanden Ressourcen wie Futterangebot oder Unterstände (Dingle 1996). Für potamodrome Fische lassen sich folgende Migrationstypen unterscheiden:



- Nahrungswanderungen
- Wanderungen zum Aufsuchen von Refugien (z. B. saisonale Habitate)
- Reproduktionswanderungen
- Postreproduktionswanderungen nach Hochwasser
- Kompensationswanderungen
- Kolonisation: Rekolonisation oder Neubesiedlungen

Die im Süßwasser wandernden Fische führen im Vergleich zu diadromen Arten nur beschränkte Wanderungen aus: Grundsätzlich werden Wanderungen durch externe oder interne Faktoren ausgelöst (Lucas & Baras 2001). Externe Faktoren sind: Verfügbarkeit von Futter, Vermeidung von Prädatoren, Verdriftung durch Hochwasser, klimatische Bedingungen (Licht, Hydrologie, Temperatur, Wasserqualität). Interne Faktoren sind: ontogenetische Veränderungen, Hunger, Angst, Homing-Verhalten (Rückkehr an einen bestimmten Ort zur gleichen Jahreszeit).

Wie bereits erwähnt, gibt es für diese Wanderungen bei potamodromen Fischarten keine speziellen Trigger, sondern eher Bereiche für verschiedene Parameter. Baras & Cherry (1990) fanden im Fluss Ourthe in Belgien keinen Zusammenhang zwischen Abfluss und der Wanderaktivität der Barben, ausser bei Verdriftungen durch Hochwasser. Bei diesen oft kilometerlangen Verdriftungen reagierten die Barben nach Abklingen des Hochwassers im Sommer rasch mit einer aufwärtsgerichteten Kompensationswanderung (Lucas & Batley 1996). Im Herbst war diese Kompensation jedoch nur noch von untergeordneter Bedeutung.

Bei all diesen Standortveränderungen kann es zu Passagen an Wasserkraftwerken kommen. Da viele Fische im Winter ihre Aktivität massiv reduzieren, sind Fischbewegungen in einem Fluss vor allem zwischen März und Dezember von Bedeutung. Ausnahmen sind z. B. Forellen, die sich vermehrt auch im Winter bewegen, da dies ihre Reproduktionszeit ist. Zwischen Frühling und beginnendem Winter finden Fischbewegungen in Flüssen statt, ohne dass eindeutige Trigger für das Auslösen der Wanderung verantwortlich sind. Ein exaktes Wandermuster mit entsprechenden auslösenden Faktoren der Wanderung ist für potamodrome Fischarten daher nicht zu erkennen. Wanderungen können ohne Zweifel durch bestimmte Stimuli ausgelöst werden, jedoch sind diese für die potamodromen Fische nicht systematisch dokumentiert.

2.2 Turbinenpassage und Schädigungen

Wenn Fische im Frühling in einem Fluss ihre Wanderaktivität wieder aufnehmen, müssen sie oft Wasserkraftwerke passieren. Dabei sollen Auf- und Abwärtspassagen möglich sein. Es ist zu verhindern, dass Fische über die Turbinen abwandern müssen, da diese Passagen oft mit Verletzungen und Mortalität verbunden sind (Cada 2001). Fische sollen möglichst vor einer Turbinenpassage geschützt werden. Neben dem Schutz ist jedoch auch ein alternativer Passagekorridor zur Verfügung zu stellen. Ob und welche Massnahmen verhältnismässig sind und umgesetzt werden sollen, liegt in der Entscheidungskompetenz des BAFU und sind somit nicht Teil dieses Berichtes.

Turbinenpassagen sind mit einer starken Veränderung des Druckes (massiver Druckabfall am Ende der Passage) verbunden, was bei den Fischen zu Verletzungen (Barotrauma) führen kann (Brown et al. 2014). Zusätzlich sind weitere Verletzungen durch Zermahlen, Schläge oder Schnitte, Scherspannung, Kavitation und Turbulenzen möglich (Cada 2001, Pracheil et al. 2016). Viele dieser Verletzungen bleiben unentdeckt. Mueller et al. (2020) zeigten am Fluss Regnitz bei einem Kraftwerk (mittl. Abfluss während der Untersuchungsphase von 25.1 – 29.8 m³/s, Kaplan turbine), dass interne Verletzungen der Fische bei einer äusseren Begutachtung meist unsichtbar sind. So wiesen z. B. 29 % der Fische mit einem Wirbelsäulenbruch (sichtbar in Röntgenaufnahmen) keine äusseren Anzeichen von Verletzungen auf. Diese Verletzungsrate kann nicht auf grosse Flusskraftwerke an der Aare übertragen werden.



Hingegen gilt mit Sicherheit auch an grossen Anlagen, dass interne Verletzungen äusserlich oft nicht sichtbar sind. Ist ein Fisch auf eine grosse Tiefe adaptiert, weist seine Schwimmblase nur ein geringes Volumen auf, im Gegensatz zu einem Fisch, der nur wenig tief schwimmt und dessen Schwimmblase relativ voluminös ist. Bei der Passage der Turbine herrscht am Schluss ein sehr niedriger Druck, ein Unterdruck. Bei Unterdruck vergrössert sich die Schwimmblase und es besteht die Gefahr einer Ruptur. Richmond et al. (2014) führten Experimente mit Chinook Salmon (Königslachsen) durch, in welchen drei Gruppen von Individuen auf verschiedene Tiefen akklimatisierte wurden (0, 5 und 10 m). Fische mit der grössten Akklimatisationstiefe wiesen bei hohen Druckunterschieden die höchsten Mortalitätsraten auf. Individuen, die vor der Turbinenpassage an die Bedingungen der Wasseroberfläche akklimatisiert sind, haben bei der Turbinenpassage demzufolge eine höhere Überlebensrate als Individuen, die vor dem Abstieg auf grosse Tiefen akklimatisiert sind.



3 Aarekraftwerk Bannwil

3.1 Charakterisierung der Aare

Bannwil ist die dritte von zwölf Kraftwerkstufen an der Aare zwischen dem Bielersee und der Mündung in den Rhein (Abbildung 1). Der mittlere Abfluss (Jahresmittel 2011-2020) der Aare beträgt $272 \text{ m}^3/\text{s}$ (Pegelmessstelle Murgenthal). Mit einem mittleren Gefälle von 0.9 ‰ zwischen dem Bielersee und der Mündung in den Rhein bei Koblenz gehört die Aare zur Barbenregion (Epipotamal). Auch das kleinräumig betrachtete Gefälle zwischen Flumenthal und Wynau fällt mit 1 ‰ in diese Grössenordnung. Die 126.3 km lange Flieisstrecke der Aare zwischen dem Bielersee und Rheinmündung ist mit den 12 Kraftwerken durch Stauhaltungen geprägt. Nur noch drei kurze frei fließende Aareabschnitte sind in diesem Abschnitt vorhanden. Insgesamt sind das 13 ‰ der gesamten Flieisstrecke (Guthruf 2006). Das Fischartenspektrum der Aare umfasst 44 Arten, drei davon sind ausgestorben (Flussneunauge, Meerforelle, Lachs), acht Arten sind zoogeographische Neulinge (Guthruf 2006). In der Aare leben diverse lithophile Fischarten, welche ihre Eier oberflächlich auf kiesigen Grund ablegen (z. B. Barbe, Nase, Alet). Aber auch pflanzliches Material (phytophile Fische, z. B. Hecht, Rotfeder, Schleie) oder Sand (psammophile Fische wie z. B. Schmerle, Gründling) werden für die Eiablage verwendet. Ebenfalls kommen ostracophile Fische (Muschellaicher, Bitterling) und ariadnophile Arten (Eiablage in aus Pflanzen gebauten Nester, z. B. Stichling) vor.

Der Lebensraum der Aare ist anthropogen stark beeinträchtigt. Die ersten grossen Korrekturen an der Aare wurden in der Mitte des 19. Jahrhundert durchgeführt. Dabei wurde der Fluss vielerorts stark begradigt und die Uferzonen reduziert und verbaut. Die Durchgängigkeit der Aare wurde erstmals durch den Bau des WKW Röchlig bei Aarau im Jahre 1882 beeinträchtigt. In kurzer Zeit wurden daraufhin weitere Kraftwerke gebaut. 1896 gingen die Kraftwerke Wynau und Ruppoldingen in Betrieb.

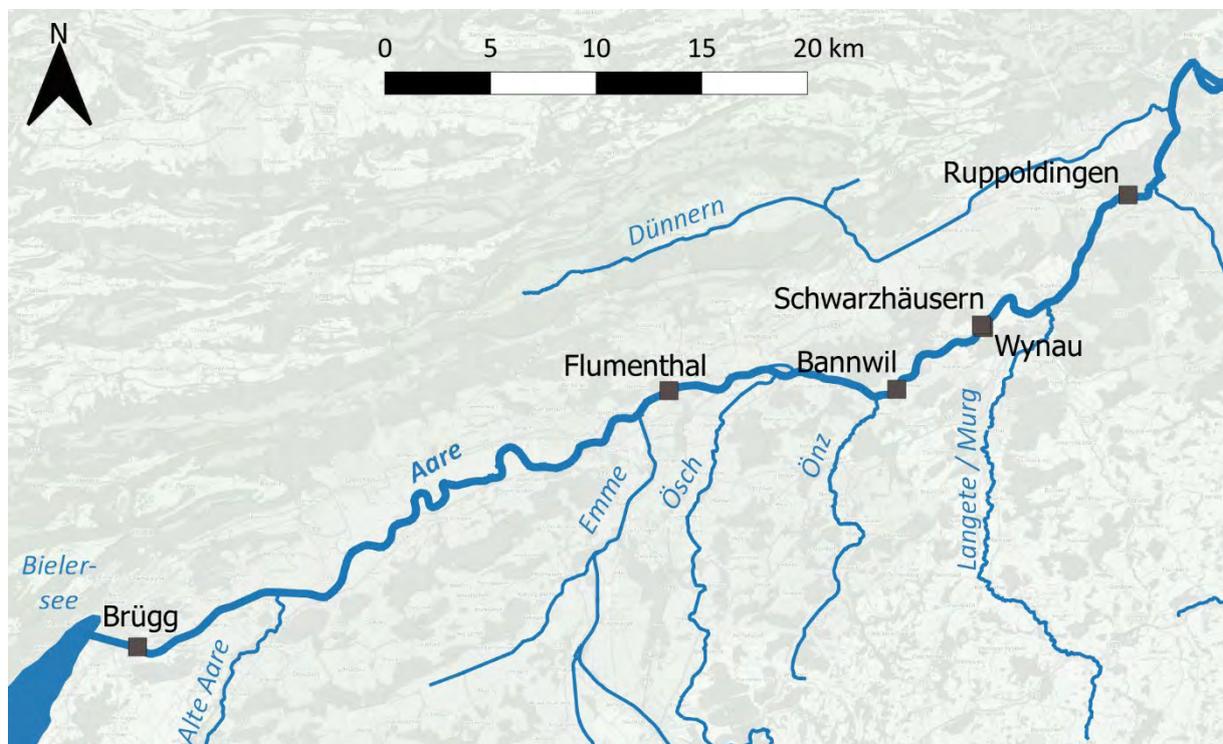


Abbildung 1: Die Flieisstrecke der Aare mit den WKW, vom Ausfluss des Bielersees bis Olten. Das WKW Bannwil befindet sich 11.6 km unterhalb des WKW Flumenthals und 5.5 km oberhalb der WKW Wynau/Schwarzhäusern.



3.2 Wasserkraftwerk Bannwil

1904 nahm erstmals das WKW in Bannwil seinen Betrieb auf. Seit 1916 wird es von der BKW Energie AG (BKW) betrieben. Das ursprüngliche Ausleitungskraftwerk mit Kanal wurde im Jahre 1970 durch eine neue Anlage ersetzt. Das neue Kraftwerk ist ein Blockkraftwerk mit drei frontal angeströmten Kaplan-Rohrturbinen. Die installierte Leistung entspricht 28.5 MW. Das nutzbare Gefälle beträgt je nach Wasserstand der Aare 5.5 – 9 m, die Ausbauwassermenge 450 m³/s (drei Turbinen à 150 m³/s). Der Rechen vor den Turbinen weist eine lichte Weite von 82 mm auf. Bei einem Abfluss von > 450 m³/s wird die Wehranlage geöffnet. Das Wehr besteht aus drei Wehrfeldern, welche unter- oder überströmt werden können. Sie sind ca. 40 Tage pro Jahr geöffnet. Während der Untersuchungsperiode gab es an 128 Tagen einen Abfluss über das Wehr, jedoch mit unterschiedlichem Volumen und von unterschiedlicher Dauer. Ein Tag zählt also als Wehrüberfall, wenn eine Klappe an dem Tag mal geöffnet wurde, ohne die Dauer zu berücksichtigen. Details zur Häufigkeit der Wehröffnungen und zum Abfluss über die einzelnen Segmente und Klappen, sowie zum Abfluss über die Turbinen, sind Tabelle 2 zu entnehmen. Im Anhang sind die Dauerkurven für die Aare Murgenthal für die Jahre 1982-2021 dargestellt (Abbildung 52). Das Hauptuntersuchungsjahr 2020 gehörte eher zu den Jahren mit einem geringeren Abfluss. Das gilt vor allem für die 150 abflussstarken Tage des Jahres.

Tabelle 1: Technische Daten zum Wasserkraftwerk Bannwil (Angaben BKW)

Technische Daten Wehranlage	
Abflussmenge pro Klappe (Normalstau)	50 m ³ /s
Abflussmenge pro Wehrsegment (Normalstau)	500 m ³ /s
Abflussmenge gesamt (Normalstau)	1500 m ³ /s
Technische Daten Maschine	
Kaplan-Rohrturbinen (Andritz Hydro)	3 Stück
Max. Nutzwassermenge (3 x 40-150 m ³ /s)	450 m ³ /s
Fallhöhe	5.5 – 9.0 m
Turbinenlaufrad Durchmesser	4350 mm
Drehzahl	107/min
Nennleistung	9.5 MVA
Spannung	4.25 kV
Stator Durchmesser	4290 mm

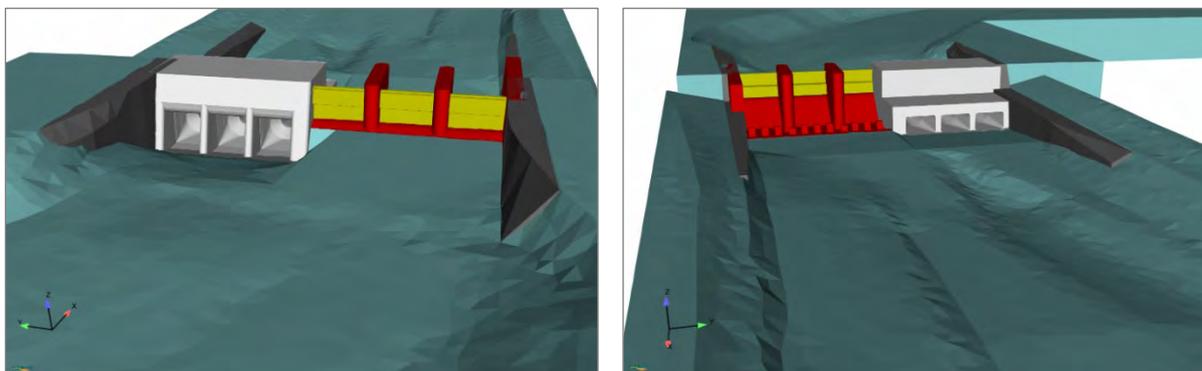


Abbildung 2: Dreidimensionale Ansicht des Kraftwerkes Bannwil. Links: Sicht vom Oberwasser, rechts: Sicht vom Unterwasser (Abbildungen aus FITHydro; www.fithydro.eu).



Bei einem Einstaupegel von 417.3 m (Stauziel) liegt die Oberkante des Einlaufs in die Turbine in einer Tiefe von - 8.05 m, der Einlauf an der Unterkante bei der Turbine in einer Tiefe von - 17.55 m. Die Turbinenachse liegt bei - 12.8 m. Die Oberkante des Rechens liegt in einer Tiefe von - 4.71 m, die Unterkante in einer Tiefe von - 16.3 m (Angaben aus Plänen der BKW, vgl. Abbildung 38). Bei Hochwasser wird der Staupegel am Kraftwerk abgesenkt.

Tabelle 2: Abflüsse über die verschiedenen Korridore am WKW Bannwil (Aufteilung Wehrfelder in grau). Es sind zwei verschiedene Zeiträume aufgeführt, oben die Jahre 2018-2022, unten die Untersuchungsperiode (01.12.19 bis 31.03.21). Die Berechnung der Abflüsse ist im Kapitel 4.9 beschrieben. Die Anteilsangaben in Prozent beziehen sich jeweils auf die Mittelwerte der Abflüsse in der entsprechenden Periode.

Zeitraum	Mittlerer Abfluss Aare (m ³ /s)	Abfluss Fischpass (m ³ /s)	Berechneter mittlerer Abfluss der Turbinen (m ³ /s)	Anteil Abfluss Turbinen (%)	Anteil Abfluss Fischpass (%)	Anzahl Tage mit beliebiger Wehröffnung	Wehrfelder			
							Mittlerer Abfluss pro Tag (m ³ /s)	Anteil Abfluss Wehr (%)	Anzahl Tage mit Abfluss/Öffnung	
2018-2022	258	0.1	228	88	0.04	124	Klappe 1	2.5	1.0	60
							Klappe 2	1.5	0.6	57
							Klappe 3	0.6	0.2	37
							Segment 1	6.2	2.4	73
							Segment 2	10.1	3.9	56
							Segment 3	7.5	2.9	34
							Mittelwert/Summe	4.75	11.0	-
Untersuchungsperiode	262.46	0.1	238.15	90.74	0.04	128	Klappe 1	3.88	1.48	105.00
							Klappe 2	2.08	0.79	92.00
							Klappe 3	0.78	0.30	68.00
							Segment 1	3.12	1.19	62.00
							Segment 2	6.26	2.38	50.00
							Segment 3	8.10	3.08	43.00
							Mittelwert/Summe	4.04	9.22	-

Der Fischaufstieg am WKW Bannwil besteht aus einem konventionellen Beckenpass. Die Durchlässe der Trennwende sind mit einem Schlupfloch am Boden sowie einem Kronenausschnitt an der Oberfläche ausgerüstet. Die Sohle ist eine glatte Betonfläche (Abbildung 3). Der Eingang in die Fischtreppe befindet sich linksufrig, ca. 15 m unterhalb der Turbinen. Das Gefälle des Fischpasses beträgt ca. 6 %. Der gesamte Fischpass wird unterirdisch geführt, dort wo kein Lichtschacht besteht, sind künstliche Beleuchtungen montiert. Kurz nach dem Einstieg verläuft der Pass in Form einer Wendeltreppe steil nach oben und fließt im zweiten Teil dann deutlich flacher. Der Ausstieg in die Aare befindet sich ca. 100 m oberhalb der Turbinen. Der Abfluss im Fischpass beträgt ca. 100 l/s. Bei zunehmendem Hochwasser kann der Fischpass durch das notwendige Absenken der Aare trockenfallen. Im Rahmen der Sanierung der Fischgängigkeit wird dieser Fischpass durch eine neue Aufstiegsanlage ersetzt werden.





Abbildung 3: Blick auf die Fischtreppe im Lichtschacht: links im Betriebszustand, rechts mit fehlendem Abfluss infolge einer Reinigung der Fischtreppe. Hier sind die Schlupflöcher am Boden und die Kronenausschnitte an der Oberfläche erkennbar.



4 Methoden

4.1 Untersuchungsperimeter

Die Untersuchungen konzentrierten sich auf das WKW Bannwil an der Aare. Alle stationären Telemetrieantennen waren hier direkt am Kraftwerk installiert. Dazu kamen weitere, temporäre stationäre Antennen (WKW Ruppoldingen, Wehr Winznau, Niedergösgen) stromabwärts von Bannwil, welche die Fische erfassen konnten (s. Kapitel 4.6). Das mobile Tracking erstreckte sich vom Bielersee bis nach Brugg (s. Kapitel 4.7).

Im Rahmen des Projekts FiThydro wurden um das WKW Bannwil herum umfangreiche Analysen zur Bathymetrie (Vermessung der Flussgestalt) durch die ETHZ/VAW durchgeführt. Dabei wurden mehrere Querprofile im Ober- und Unterwasser aufgenommen. Direkt vor dem Kraftwerk beträgt die Tiefe vor den Turbinen rund 14 m. Im Unterwasser konnte das erste Querprofil erst in einer Distanz von ca. 45 m unterhalb des Turbinenauslasses gemessen werden. Dort beträgt die Wassertiefe ca. 4 m, wobei es einige Stellen mit einer Tiefe bis zu 6 m gibt (Abbildung 4). Die Messungen der VAW wurden am 28.04.2018 durchgeführt (Tagesmittelwert Abfluss in Murgenthal: 405 m³/s).

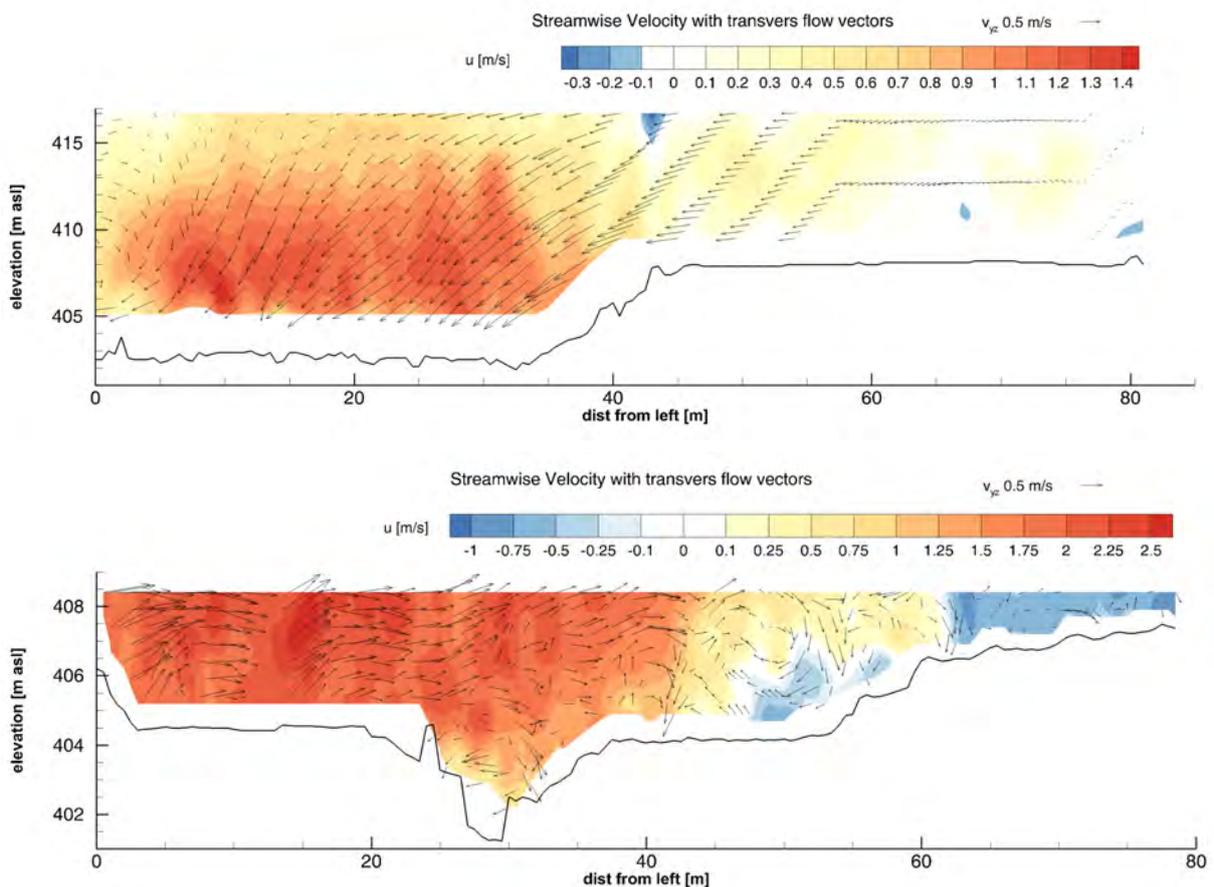


Abbildung 4: Querprofile am WKW Bannwil inkl. Fließgeschwindigkeiten (u). Oben: Oberwasser, ca. 15 m vor den Turbinen (Koord. links 622221.95/230954.82). Unten: Unterwasser, ca. 45 m unterhalb des Kraftwerkes (Koord. links 622248.68/231039.11). Graphiken VAW, S. Kammerer



4.2 Untersuchungszeitraum

Voruntersuchungen im Rahmen des FiThydro-Projekts fanden ab dem 02.04.2019 statt (Markierung von 10 Fischen für die Identifikation der Reichweiten und Lesbarkeit der Radiosender). Die erste Markierung der Fische, mit der vollständig installierten Telemetrieanlage am WKW Bannwil, erfolgte ebenfalls im Rahmen des FiThydro-Projekts am 17./18.12.2019. Ab 25.03.2020 erfolgte eine erste Tranche von Markierungen für den Projektteil BKW (152 Fische). Die zweite Tranche von Markierungen folgte im Dezember 2020 (83 Fische). Barben wandern das ganze Jahr mit Ausnahme der Wintermonate. Die Herbstmarkierungen fielen somit mit dem Ende der Wanderperiode zusammen. Die Frühlingsmarkierungen hingegen fanden kurz vor der Wiederaufnahme der Wanderungsaktivität statt.

Die Bewegungen der Fische am WKW Bannwil wurden bis am 31.03.2021 verfolgt. Anschliessend wurden im Rahmen eines Zusatzprojektes bis am 07.12.2021 weitere manuelle Trackings durchgeführt. Auch einige stationäre Antennen blieben in Betrieb. Abgesehen von der Berechnung der Home Range der Fische, wurden diese Daten nur noch zur Verifizierung oder Ergänzung bei der Beurteilung des Überlebens genutzt. Der Hauptuntersuchungszeitraum in Bannwil lag somit zwischen dem vom 01.12.2019 (inkl. FiThydro) bzw. 25.03.2020 (ohne FiThydro) bis zum 31.03.2021 mit ergänzenden Daten bis am 07.12.2021. Das entspricht einer Dauer von 486 resp. 371 Tagen für den Betrieb der stationären Antennen am WKW Bannwil. Abbildung 5 gibt einen Überblick über den Untersuchungszeitraum.

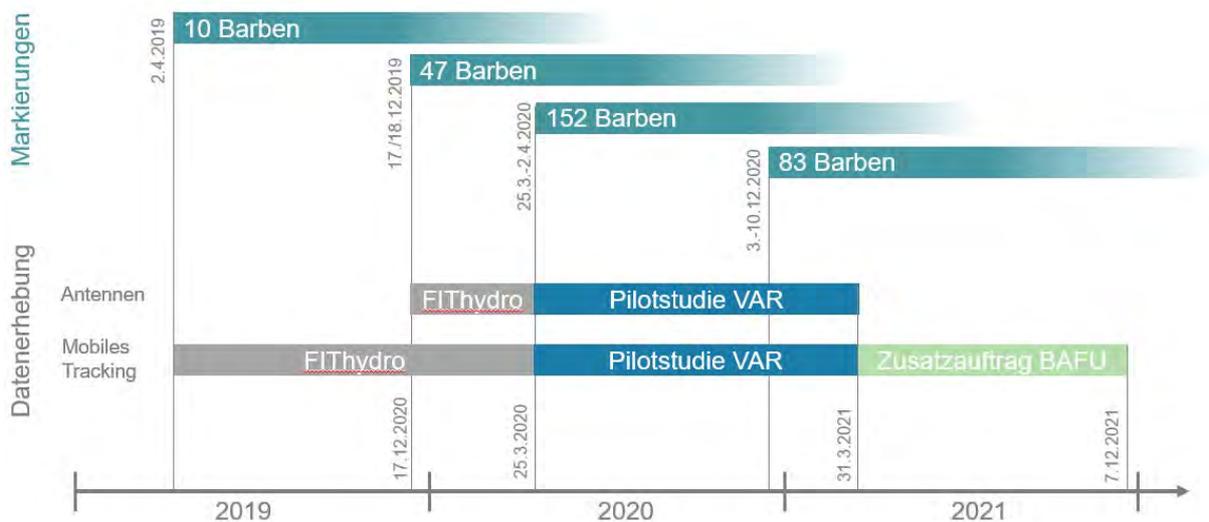


Abbildung 5: Überblick über den zeitlichen Ablauf der Datenerhebungen und Markierungen der Fische (Graphik BKW)

4.3 Telemetriesystem

4.3.1 Radiosender und PIT-Tags

Sämtliche Fische wurden mit einem PIT-Tag (23 x 3.65 mm, 0.6 g, ISO 11784/11785, Oregon RFID, USA) sowie mit einem Radiosender (LOTEK Wireless Inc., Canada) versehen. An jeder Radiomarkierung ist eine 22 – 30 cm lange Antenne befestigt, bestehend aus einem feinen Metalldraht, welcher aus der Bauchhöhle des Fisches nach aussen gezogen wird. Diese ist für einen guten Output des Sendersignals unerlässlich. Es wurden drei unterschiedliche Grössen von Radiosendern verwendet (s. Abbildung 6): Nanotags (NTF-6-2, 25 x 9 mm, 4 g), mittelgrosse Marken (MCFT2-3BM, 11 x 43 mm, 8 g), und grosse Marken (MCFT3-EM_TP-L, 11 x 60 mm, 12 g). Die letztgenannte Marke war mit wenigen Ausnahmen mit Temperatur- und Tiefensensor ausgerüstet. Auf einem internen Speicher wurden die Daten für die Temperatur und die Tiefe in regelmässigen Abständen gespeichert. Alle verwendeten Marken



sendeten auf einem Frequenzband von 148 KHz und hatten einen individuellen Code. Der Code der Marke wurde als ID des Fisches bezeichnet (z. B. ID 48). Auf einer einzigen Frequenz können bis zu 1'000 verschiedene Codes verwendet werden. Die Burstrate (zeitliche Abstand zwischen den Signalen des Senders) betrug je nach Grösse der Tags 2 – 5 Sekunden. Die Lebensdauer der Marken hängt sowohl von deren Grösse, als auch von der gewählten Burstrate ab. Sie betrug für die Nanotags 287 Tage, 246-360 Tage für die mittleren Marken und 378 Tage für die grossen Marken.

Beim Gewicht der Radiosender wurde darauf geachtet, dass diese 2 % des Körpergewichtes des zu markierenden Fisches nicht überschritten. Diese 2 %-Faustregel wurde in den vergangenen Jahren von vielen Wissenschaftlern praktiziert, um den Effekt von Telemetriesendern auf Fische möglichst gering zu halten. Jepsen et al. (2005) vertreten jedoch die Auffassung, dass es für das Gewicht eines Senders keine generell anwendbare Faustregel gebe. Stattdessen seien die Markiermethode sowie die Fischart und das Lebensstadium entscheidende Faktoren für die Auswahl eines Telemetriesenders.

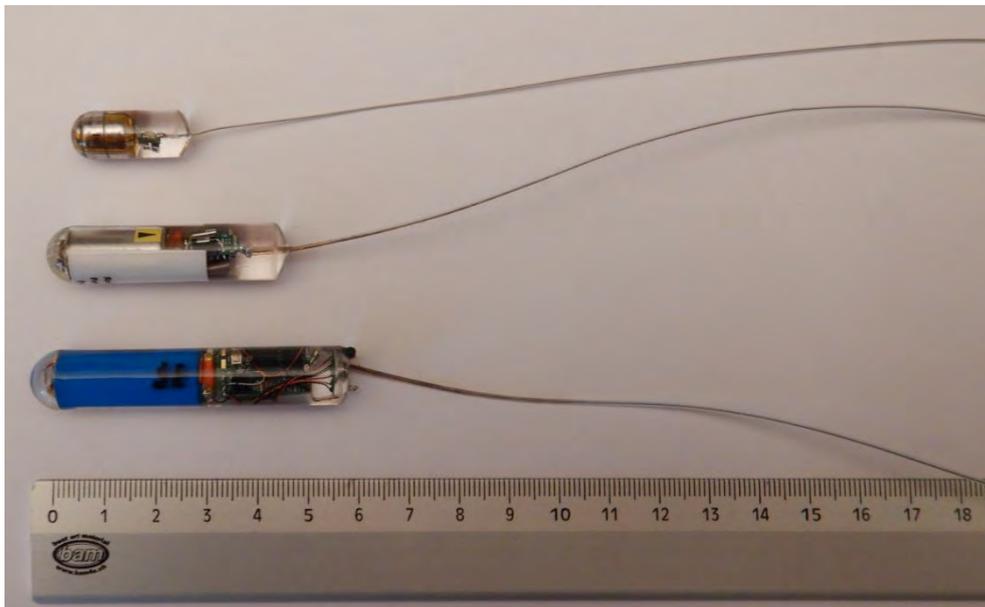


Abbildung 6: Die verwendeten Radiosender. Oben: Nanotag (4 g); Mitte: mittelgrosse Marke (8 g); Unten: grosse Marke mit Sensoren für Tiefe und Temperatur (12 g). Alle drei Radiosender haben eine Antenne, welche aus der Körperhöhle des Fisches herausgezogen wird.

4.3.2 Empfangsgeräte und Datenlogger

Für die Erhebungen am Kraftwerk wurden fix installierte Empfangsgeräte eingesetzt. Daneben wurden für das mobile Tracking Empfangsgeräte verwendet, welche auf einem Display die Detektionen direkt anzeigen, also die ID eines Fisches sowie die Signalstärke sofort erkennen liessen. Das Signal wurde im Speicher des Empfangsgerätes gespeichert, neben der exakten Zeit und der GPS-Position.

Datenlogger

Am Kraftwerk wurden acht Empfangsgeräte (SRX 800D, Lotek Wireless Inc., Canada) eingesetzt. Jeder Empfänger konnte bis zu vier Antennen bedienen und lief automatisiert. Er wurde entsprechend den Anforderungen an diese Studie speziell programmiert. Jede angeschlossene Antenne wurde in der vorprogrammierten Reihenfolge gescannt. Es konnte also nur jeweils das Signal einer Antenne aufgenommen werden. Sämtliche Empfangsgeräte waren mit einem GPS verbunden. So wurde sichergestellt, dass die Zeit stets exakt erfasst wurde. Die Empfänger befanden sich in einem wetterfesten Schaltschrank, der in der Nähe der Antennen montiert war. Wichtig war die Einstellung des Gains (relative Messung der Signalstärke). Eine zu hohe Empfindlichkeit führt dazu, dass viele Störungen in der



Umgebung (Noise) detektiert werden. Eine zu geringe Empfindlichkeit kann jedoch vorhandene Radiosignale verpassen. Aus diesem Grunde wurde für jede Antenne ein dem Standort angepasster Gain eingestellt.

An einem Kraftwerk treten erfahrungsgemäss mehr Störungen bei der Detektion auf, als an anderen Fließstrecken. Diese können dazu führen, dass die vorhandenen Radiosignale nicht detektiert werden. Hochspannungsleitungen sowie der Betrieb der Turbinen können eine Erklärung für Störungen sein. Alle Datenlogger wurden mit eigens angefertigten Speisegeräten betrieben, um möglichst wenig Störungen aus dem Stromnetz aufzunehmen. Die Empfänger wurden alle 10 – 14 Tage auf ihre Funktion überprüft und die gespeicherten Daten heruntergeladen. Die Logger funktionierten während der ganzen Untersuchungszeit sehr gut. Einzig in der Phase von FITHydro gab es an der Antenne YD1 (Antennenbenennung s. Kap. 4.6.1) einen Ausfall vom 26.01.2020 18:13 bis 31.01.2020 09:26. Der Grund war ein voller Speicher. Die Unterwasserantennen (UW1) waren davon aber nicht betroffen, so dass es keine Lücken bei der Erfassung absteigender Fische gab.



Abbildung 7: Schaltschrank mit zwei Empfängern, welche mit insgesamt vier Antennen im Unterwasser verbunden waren.

Antennen

Die Funktion einer Empfangsantenne ist es, die Radiowellen der Sender zu empfangen und sie in eine Spannungszahl für die Detektion durch den Empfänger umzusetzen (Kuechle & Kuechle 2012). Bei den in Bannwil verwendeten Antennen handelte es sich um 3-, 4- oder 5-Element-YAGI-Antennen (Abbildung 8). YAGI-Antennen sind relativ kostengünstig und haben gute Richtungscharakteristiken und Empfangsstärken. Die Grösse und Anzahl der Elemente der Antenne wird der verwendeten Frequenz angepasst. Antenne und Empfänger werden mit speziellen Coaxialkabeln (50 Ohm) verbunden. Um den Signalverlust im Kabel möglichst gering zu halten, sollten die Kabel nicht zu lang sein.

Zusätzlich wurden sogenannte Unterwasserantennen eingesetzt. Dabei handelte es sich um Eigenkonstruktionen, die durch Entfernen des äusseren Schutzschirms eines Coaxialkabels hergestellt werden. Diese Unterwasserantennen besitzen nur eine sehr beschränkte Empfindlichkeit und können dadurch die Position eines Senders nur in einem eng begrenzten Areal wahrnehmen. Dies war z. B. beim Turbinenaustritt erwünscht.





Abbildung 8: 4-Element YAGI-Antenne, welche die Signale der Fische im Oberwasser vor den Turbinen empfängt. Der Empfänger wurde in einem Schaltschrank (am Geländer befestigt) wasserfest und mit Strom versorgt untergebracht.

4.4 Zielarten

Eine Zielart ist eine Schlüssel- oder Indikatorart in einem Ökosystem oder aber eine Art, die in einer Studie speziell im Fokus steht. Für Monitoringstudien wird eine bestimmte Fischart oft als Zielart ausgewählt, weil sie eine typische Vertreterin des entsprechenden Lebensraumes ist und somit allgemeine Aussagen ermöglicht. Als Zielarten wurden ursprünglich Barbe, Alet und Nase in Betracht gezogen. Als potamodrome rheophile Fischarten zeichnen sich diese drei Arten durch eine deutliche Wanderungsaktivität aus.

Aus fangtechnischen Gründen wurde schliesslich alleine die Barbe (*Barbus barbus* L.) als Zielart ausgewählt. Es zeigte sich nämlich, dass die Barbe die einzige Fischart war, welche im Winter in den Fischpass einstieg und somit relativ einfach zu fangen war. Bemühungen im Fischpass Wynau zusätzliche Fischarten für die Markierung zu fangen, scheiterten am immensen Arbeitsaufwand und am Geschwemmproblem im Zählbecken. Der Fang weiterer Fischarten in der Aare wäre nur mit einem sehr grossen Aufwand möglich gewesen. Die Barbe ist die namensgebende Art der Barbenregion (Huet 1949), zu der auch die Aare zwischen Bielersee und Rhein gehört. Neben Rotaugen, Flussbarsch (Egli), Alet, Hasel und Schneider gehört die Barbe zu den dominanten Arten in diesem Flussabschnitt (Guthruf 2006). Die Barbe gehört in Bezug auf die Strömung zur Gilde der rheophilen Arten. Für die Reproduktion ist sie auf Strömung angewiesen (rheopar). Bezüglich Anforderung an die Struktur eines Gewässers gehört sie zu den Arten mit einem geringem Strukturbezug (Jungwirth et al. 2003). Aus der ökologischen Perspektive ist die Gildenbetrachtung sinnvoll, da Arten einer Gilde die Ressourcen in einem Gewässer in ähnlicher Weise nutzen und ähnliche Lebensformen aufweisen (Trophie, Reproduktion, Migration). Die Barbe kann somit als Stellvertreterin für andere Arten dieser Gilden dienen.



4.4.1 Ökologie der Barbe

Barbenpopulationen wurden in den vergangenen Jahren europaweit oft untersucht und ihre ökologischen Ansprüche sind gut beschrieben. Bezüglich ihrem Wanderungsverhalten liegen unterschiedliche Befunde vor. Es gibt relativ standorttreue Populationen und Barben mit einem deutlichen Migrationsverhalten. Im Folgenden werden für die Barbe die Informationen zur Reproduktion und zu den Habitatsanforderungen etwas ausführlicher zusammengefasst.

Die Barbe (*Barbus barbus* L.) kann Längen bis zu einem Meter und ein Alter bis zu 35 Jahren erreichen (Lucas & Baras 2001). Sie kommt in Zentral- und Westeuropa in der mittleren Region von grossen Flüssen häufig vor, in der sogenannten Barbenregion (Huet 1949). Typische Wassertemperaturen im Sommer liegen in dieser Region um 20° C. Maximale Wassertemperaturen für Barben werden mit 26 – 28 °C (Ebel 2002), bzw. bis 30 °C (Kraiem & Pattee 1980) angegeben. Barben sind mobile Fische und legen deutliche Wanderungen zu ihren Reproduktionsorten zurück, wobei die Weibchen in der Regel längere Distanzen zurücklegen (Britton & Pegg 2011). Die grössten Strecken legen Barben kurz vor oder während ihrer Reproduktionszeit zurück. Lucas & Frear (1997) beobachteten im Nidd (GB) mit Radiotelemetrie Laichwanderungen von 9 – 16 km (im Mittel 12.5 km), Britton & Pegg (2011) erwähnen Reproduktionswanderungen mit Distanzen von über 20 km. Nach der Reproduktion kehren Barben an ihre Standplätze zurück (Post-reproduktives Homing, Baras 1992). Es gibt aber auch Populationen, welche dieselben Habitate für die Reproduktion und den Sommer benützen, und erst im Winter unterschiedliche Refugien aufsuchen (Lucas & Baras 2001). Im Sommer nimmt die Aktivität tendenziell ab, da die Barben standorttreu werden, jedoch beobachteten Baras & Nindaba (1999) auch im Spätsommer und Herbst Ausbreitungsbewegungen. Im Winter wird die Wanderaktivität fast gänzlich eingestellt. Dieselben Autoren beschreiben ein zyklisches Wandermuster im Verlaufe des Jahres: tendenziell wandern die Barben im Frühling und frühen Sommer flussaufwärts und im Herbst flussabwärts. Die flussaufwärts gerichtete Bewegung wird vor allem durch wärmere Temperaturen ausgelöst, die Wasserführung scheint weniger wichtig zu sein. Die Barben wandern in Schwärmen aus geschlechtsreifen und noch nicht geschlechtsreifen Individuen (Steinmann et al. 1937). Ausserhalb ihrer Laichzeit sind Barben nachtaktiv, d. h. sie bewegen sich vor allem während der Morgen- und Abenddämmerung sowie nachts. Fischaufstiegshilfen werden in der Regel nachts durchschwommen (Lucas & Frear 1997). Rekordwanderungen von Barben sind aus den Arbeiten von Steinmann et al. (1937) bekannt. So betrug die maximale Wanderdistanz von in der Donau markierten Barben (Markierung mittels Gummimarke in der Rückenflosse oder im Kiemendeckel) 318 km (flussaufwärts). Flussabwärts wurde die längste Wanderung über 301 km beobachtet. Anhand der Beobachtungen mit 216 markierten Barben wurden 48 % der Fische als Standfische (Wanderung von < 5 km vom Aussatzort), ca. ein Viertel als Kurzstreckenwanderer und ein Viertel als Langstreckenwanderer (> 50 km Wanderdistanz) klassifiziert. Derartig weiträumige Wanderungen sind heute in den hydroelektrisch intensiv genutzten Gewässern kaum mehr möglich, doch zeigen diese Untersuchungen aus der Donau, dass die Barbe die wanderfreudigste potamodrome Fischart ist. Dank dieser Wanderungsaktivitäten sind Barben gut geeignet, um Wanderungen durch Kraftwerke und zwischen Staustufen zu dokumentieren. In der Aare beobachteten Steinmann et al. (1937) deutlich kürzere Wanderdistanzen. Dies wurde mit den zahlreicheren und dichter hintereinander liegenden Stauhaltungen begründet.

Barben sind iteropar (mehrmaliges Abbläuen im Verlaufe des Lebenszyklus) und laichen einmal pro Jahr, wobei innert weniger Tage mehrmals abgelaicht wird. Die Laichzeit beginnt bei Wassertemperaturen im Bereich von 14 – 20° C (Ebel 2002), in der Regel in den Monaten Mai – Juni. Die Reproduktion wird durch einen Schwellenwert der Temperatur ausgelöst, wenn das Tagesminimum der Wassertemperatur 13.5 °C nicht mehr unterschreitet (Baras 1992). Das Abbläuen erfolgt ausschliesslich in den Tagesstunden (Baras 1994). Gruppen von laichenden Barben bestehen in der Regel aus einem Weibchen und zwei bis sechs Männchen. Die Eier werden vom Weibchen ins Kiesbett hineingepresst. Laichhabitate zeichnen sich durch Korngrössen von 1 – 3 cm und einen geringen Anteil von Feinsedimenten



aus (Ebel 2002). 90 % der Ablachvorgänge im Fluss Ourthe erfolgen in Wassertiefen von 0.11 – 0.33 m, bei Fliessgeschwindigkeiten (gemessen 10 cm über dem Substrat) von 0.21 – 0.6 m/s (Baras 1992). In den eingestauten Aareabschnitten zwischen dem WKW Flumenthal und dem WKW Wynau sind derartige Laichhabitats kaum vorhanden (Ausnahme: frei fliessende Strecke bei Wolfwil unterhalb des WKW Wynau) und Barben nutzen hier andere Habitatsbedingungen. Die Entwicklung vom Ei bis zum Schlupf verläuft im Kieslückensystem. Die Entwicklungsdauer beträgt ca. 128 Tagesgrade, bei 16° C Wassertemperatur 7 – 9 Tage (Penaz 1977). Nach dem Schlüpfen verbleiben die Dottersackbrütlinge im Kiesbett, welches sie erst nach dem Aufzehren des Dottersackes verlassen (nach weiteren 8 – 19 Tagen), bei einer Körperlänge von 12 – 13 mm (Ebel 2002). Nach dem Durchlauf des Larvenstadiums – bei der abgeschlossenen Aussendifferenzierung der Flossen – beträgt die Körperlänge ca. 19 mm. Jungbarben weisen eine grosse Toleranz bezüglich des Substrates auf. Sie benützen kiesige, sandige und schlammige Gewässerböden.

Juvenile Barben halten sich in Arealen mit markanter Strömung auf. Sie bevorzugen Tiefen von 15 – 60 cm und Fliessgeschwindigkeiten von 0.12 – 0.42 m/s (Baras 1992). Ab einer Länge von 50 mm beginnen die Barben langsam fliessende Areale zu meiden (Bischoff & Freyhof 1999). Junge Barben (0+) halten sich vor allem in wenig tiefen, kaum fliessenden Uferarealen eines Flusses auf, grössere Individuen hingegen bevorzugen tiefere, schneller fliessende Areale im Fluss (Watkins et al. 1997). Mit zunehmender Länge nutzen Barben deckungsreiche Gewässerzonen mit grösseren Tiefen und geringer Fliessgeschwindigkeit. In der Nähe des Unterstandes müssen jedoch mässige Strömungen vorhanden sein, wo sie benthische Nahrung zu sich nehmen. Die Distanzen zwischen Ruhe- und Nahrungshabitats betragen zwischen 20 – 500 m (Baras 1992). Die Distanzen sind im Winter grösser als im Sommer. Bei hohen Temperaturen verändern die Barben das Muster ihrer Tagesaktivitäten, verkürzen die Aktivitätsphasen und suchen die Einmündungen von kühlen Nebengewässern auf (Baras 1992). Die täglichen und saisonalen Wanderungen der Barbe hängen auch von der Flussmorphologie ab. In einer homogenen aquatischen Umgebung wandern Fische generell über weitere Distanzen als in Lebensräumen mit einer grossen Heterogenität (Lucas & Baras 2001).

Barben ernähren sich sowohl im Larvenstadium als auch als ältere Fische benthisch (Insektenlarven, Mollusken, Flohkrebse). Ihr Wachstum ist stark von den Raumverhältnissen in einem Fluss, vom Nahrungsangebot sowie von der Fischdichte abhängig. Maximal erreichbare Körperlängen werden von Penaz (1977), je nach Fluss, mit 63 – 91 cm, angegeben (Standardlänge; entspricht einer Totallänge von ca. 77 – 109 cm). Die maximalen Körpergewichte liegen bei 4 – 6 kg, in Ausnahmefällen jedoch deutlich höher. Männchen werden im 2. – 4. Lebensjahr (Körperlänge > 13 cm), Weibchen hingegen erst im 5. – 8. Lebensjahr (Körperlängen > 30 cm) geschlechtsreif (Ebel 2002).

In der Schweiz hat die Barbe den Gefährdungsstatus 4 (potenziell gefährdet), in Deutschland und europaweit gehört die Barbe zu den bedrohten Fischarten (Ebel 2002). Ihre Bestände sind fast überall in Europa regressiv. In der Aare kommt die Barbe noch häufig vor, wenn auch nicht mehr in so grossen Beständen wie sie vor Jahrzehnten noch vorhanden waren.



Abbildung 9: Barbe mit der ID 144, markiert am 03.12.2020. Totallänge 540 mm, Gewicht 1150 g



4.5 Fang und Markierung der Fische

4.5.1 Fang der Fische

In einem so grossen Fluss wie in der Aare ist es nicht einfach, eine ausreichende Anzahl Individuen für eine Studie zu fangen. Ursprünglich war es die Idee, die Fische im Zählbecken am WKW Wynau (s. Abbildung 1) zu fangen. Der Betrieb des Zählbeckens mit einer speziell modifizierten Netzkehle erwies sich jedoch als schwierig, da die Kehle durch Geschwemmsel stark verstopft wurde. Aus diesem Grund wurden alle Fische aus der Fischtreppe des WKW Bannwil gefangen. Jährlich schwimmen die Barben ab ca. Oktober in die Fischtreppe ein, um dort zu überwintern. In der Regel bleiben sie bis im frühen Mai dort. So kommt es zu riesigen Ansammlungen von mehreren tausend Individuen. Diese halten sich vor allem in den Wendebecken der Fischtreppe auf, wo die Strömung deutlich gemässiger ist als in den übrigen Becken. Das Aufsuchen der Fischtreppe als Wintereinstand mag auch daran liegen, dass die Fischtreppe überdeckt ist und so Schutz vor räuberischen Vögeln bietet. Die Fische wurden jeweils zu Beginn und am Ende des Winters gefangen und markiert, also kurz nach dem Aufsuchen oder kurz vor dem Verlassen des Überwinterungshabitates.

Für den Fang der Barben wurden die Becken mit Drahtgittern abgesperrt, um ein Entweichen der Fische zu verhindern. Sie wurden mittels Kescher aus der Fischtreppe gefangen und in Kesseln möglichst rasch zum nahe gelegenen Markierort gebracht. Die Entnahme aus dem Winterhabitat wirkte sich mit Sicherheit kurzfristig auf das Wanderverhalten der Fische aus. Entweder wandern sie in ihr angestammtes Winterquartier zurück oder sie suchen sich im Oberwasser ein neues Winterhabitat. Eine längerfristige Auswirkung auf das Wanderverhalten der Fische ist jedoch ziemlich unwahrscheinlich.



Abbildung 10: Fang von Barben in der Fischtreppe des WKW Bannwil. Die Fische benutzen den Fischpass ab Oktober als Überwinterungsort. Hier wurden sie mit einem Kescher aus den Becken herausgefangen.



4.5.2 Markierung der Fische

Nach dem Fang wurden die Barben rasch zur Markierstation hinter dem Kraftwerk gebracht. Dort wurden sie in gut belüfteten Becken bis zur Markierung gehältert. Für die Erhebung der Biometrie und die Markierung wurden die Barben im Narkosebecken mit 2-Phenoxyethanol (0.28 mg/l) betäubt. Es wurde 4 – 5 Minuten abgewartet, bis die Anästhesiestufe 5 erreicht wurde (Verlust der Reflexreaktionsfähigkeit nach Summerfelt & Smith 1990). Die Totallänge und das Gewicht des Fisches wurde erhoben und jeder Fisch beidseitig fotografiert. Dann wurde der Fisch mit dem Rücken nach unten auf den U-förmigen Operationstisch gelegt. Während der Operationsdauer wurden die Kiemen über einen Schlauch durch den Mund mit Frischwasser versorgt. Ein ca. 15 – 25 mm langer Schnitt (je nach Grösse des Radiosenders) mit dem Skalpell auf der medioventralen Linie zwischen den Brust- und Bauchflossen öffnete die Bauchhöhle. Anschliessend wurde mit einer Kanüle die Haut durchstochen. Über diese Kanüle wurde die Antenne des Radiosenders eingezogen und anschliessend der Radiosender und der PIT-Tag in der Bauchhöhle des Fisches platziert. Der Schnitt wurde mit 2 – 3 Stichen und einem sterilen Seidenfaden (braided silk sutures, Ethicon) geschlossen (Abbildung 12). Die Operation dauerte ca. 2 – 3 Minuten. Währenddessen wurden die Fische regelmässig mit Wasser besprüht. Danach wurden die Barben sofort in einen Tank mit Frischwasser und Luftzufuhr gesetzt. Die Aufwachdauer betrug rund 4 – 5 Minuten. Die Fische wurden postoperativ überwacht und bis zum Aussatz ungestört belassen. In der Regel konnten sich die Fische bis zum Aussatz etwa 2 – 3 Stunden erholen. Für diese Studie war eine Tierversuchsbewilligung nötig, welche unter der Nr. BE29/18 vom Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern, Veterinärdienst, am 04.06.2018 erteilt wurde.



Abbildung 11: Markierstation mit Hälterungsbecken, Mess- und Markiertisch



Abbildung 12: Frisch markierte Barbe mit zwei Wundstichen und der Antenne des Radiosenders, erkennbar als feiner Draht



4.5.3 Aussatz der Fische

Nach der Erholungszeit wurden die Fische schonend in belüftete Tanks umgesetzt und zur Aussatzstelle flussaufwärts des WKW Bannwil geführt. Die Hauptaussatzstelle lag 2.19 km oberhalb des WKW Bannwil, linksufrig unterhalb Brücke (Koordinaten: 2'620'381/1'231'182, s. Abbildung 16). Die 74 Fische, die am 17./18.12.2019 markiert wurden, wurden oberhalb der Önz mündung, 1.22 km oberhalb des WKW rechtsufrig ausgesetzt (2'621'186/1'230'561). Eine Angleichung an die Wassertemperatur der Aare war nicht nötig, da die Fische ausschliesslich in Aarewasser gehältert wurden.

4.5.4 Beurteilung der Auswirkung der Markierung

Beim Fang der Fische im Fischpass kam es vor, dass bereits markierte Fische wiedergefangen wurden. Es erfolgte eine Dokumentation dieser Fische zur Beurteilung der Auswirkung der Markierung (Biometrie, Foto). Insbesondere wurde das Verwachsen des Schnittes zur Markierung sowie die Austrittsstelle der Antenne aus der Körperhöhle beurteilt. Dafür wurden folgende Beurteilungskriterien verwendet: 1 = keine wesentliche Beeinträchtigung, 2 = geringe/mittlere Beeinträchtigung, 3 = starke Beeinträchtigung. Zudem wurde der individuelle Zuwachs des Fisches zwischen der Markierung und dem Wiederfang verglichen.

4.6 Stationäres Tracking

4.6.1 Untersuchungsdesign am WKW Bannwil

Am WKW Bannwil wurde ein Telemetriedesign erarbeitet, welches darauf ausgerichtet war, die Abwanderungskorridore möglichst exakt zu erfassen. Insgesamt wurden 13 Radiotelemetrie- sowie zwei PIT-Tag-Antennen installiert. Dazu wurden acht Telemetrieempfangsgeräte und zwei PIT-Tag-Lesegeräte benötigt. Lage und Bezeichnung der Antennen sind in Tabelle 4 und Abbildung 12 aufgeführt.

Die drei Unterwasserantennen vor den Turbinen waren an einem einzigen Antenneneingang des Empfängers angeschlossen. Dies erlaubte eine sehr rasche Detektion (kein Wechsel zwischen den Antennen) und es konnten zusätzliche Empfangsgeräte eingespart werden. Das Radiosignal konnte so jedoch keiner bestimmten Antenne zugeordnet werden. Dieses Vorgehen schien sinnvoll, da eine Zuordnung eines Signals selbst im Falle von einzeln angeschlossenen Antennen, nicht mit absoluter Sicherheit einem bestimmten Turbinenausgang hätte zugeordnet werden können. Im Nachhinein ist festzustellen, dass bevorzugt eine Zuordnung des Abstiegs zu einer bestimmten Turbine vorteilhaft gewesen wäre, da es sich erwies, dass kaum Abstiege über die Wehre erfolgten. Allerdings ist dies technisch sehr schwierig realisierbar. Ein Abstieg über das Wehr konnte dagegen einem bestimmten Wehrfeld zugeordnet werden.

Die PIT-Tag Anlage sollte zusätzlich zu den erfassten Radiosignalen sicherstellen, dass Wanderungen über die Fischaufstiegsanlage am Kraftwerk Bannwil erfasst werden. Damit auch die Schwimmrichtung der Fische erkennbar waren, wurden zwei Antennen montiert.



Tabelle 3: Übersicht über die Antennen und Empfänger der fest installierten Anlagenteile (Lageplan s. Abbildung 13)

Ort	Antennen	Bezeichnung in Abbildung 13	Bezeichnung in Abbildung 33 ff.	Verbundener Empfänger
Oberwasser	4-Element YAGI-Antenne, seitlich ausgerichtet	YUp2	Intake YAGI	Empfänger 1
	Unterwasserantenne vor Turbine	UW2	Intake UW	Empfänger 1
	6-Element YAGI-Antenne, flussaufwärts gerichtet	YUp1	UP YAGI	Empfänger 2
Wehrfeld 1	3-Element YAGI-Antenne	YW1	Spillway one	Empfänger 3
Wehrfeld 2	3-Element YAGI-Antenne	YW2	Spillway two	Empfänger 4
Wehrfeld 3	3-Element YAGI-Antenne	YW3	Spillway three	Empfänger 5
Unterwasser	5-Element YAGI-Antenne, flussabwärts ausgerichtet	YD1	Down YAGI	Empfänger 2
	3 Unterwasserantennen, je eine vor jedem Turbinenausgang	UW1	Tailrace UW	Empfänger 6
	4-Element YAGI-Antenne, ausgerichtet auf Turbinenausgang	YD2	Tailrace YAGI	Empfänger 7
Fischpass	2 Unterwasserantennen in den unteren Becken	UW3 und UW4		Empfänger 8
	2 PIT-Tag Antennen in den oberen Becken der Wendelung	PIT 1+2		2 PIT-Tag-Reader



Abbildung 13: Übersicht der Anordnung der Antennen. UW3, UW4 und PIT1+2 befinden sich in der Fischaufstiegsanlage. Linksufrig: Maschinenhaus. Rechtsufrig: Wehranlagen



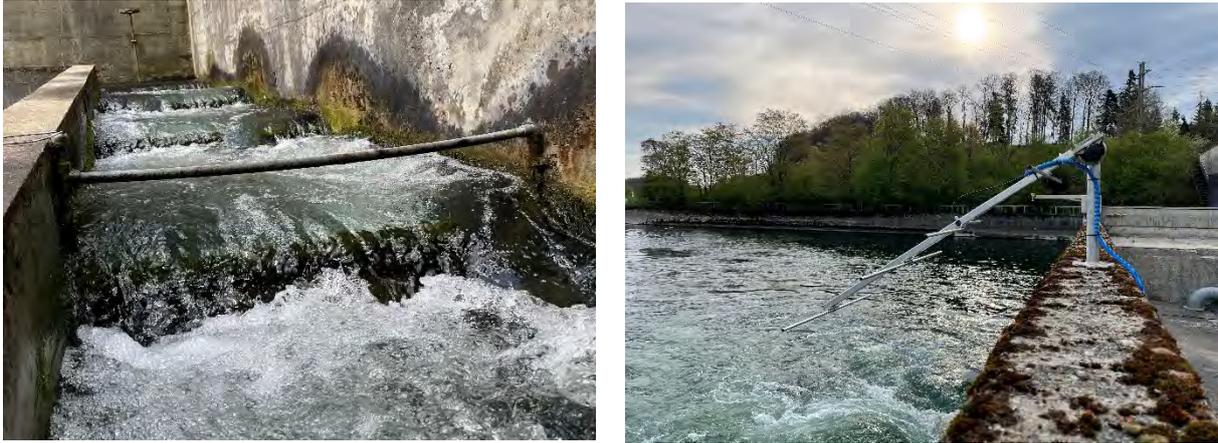


Abbildung 14: Links: PIT-Tag-Antenne im Fischpass; Rechts: YAGI-Antenne YD2 über den Turbinenausgängen

4.6.2 Weitere Stationen entlang der Aare

Eine weitere Detektionsstation (Antenne mit Empfänger) wurde am WKW Wynau aufgestellt, 5.6 km unterhalb des WKW Bannwil (Abbildung 15). Somit war es möglich, bis nach Wynau abgewanderte Fische automatisch zu erfassen und deren Zeitpunkt der Passage am Kraftwerk zu bestimmen. Eine zusätzlich flussabwärts aufgestellte Antenne wurde am WKW Ruppoldingen installiert (16.8 km unterhalb WKW Bannwil). Eine Übersicht über das Untersuchungsgebiet mit den Standorten der stationären Antennen ist in Abbildung 16 abgebildet. Für das FishConsulting-Projekt Flussforelle waren weitere Radioantennen am Wehr Winznau und in Niedergösgen in Betrieb. Hier wurden Synergien genutzt und nach allenfalls passierenden Barben gesucht. Die Betriebsdauer der verschiedenen Antennen wird in Tabelle 4 angegeben. Ursprünglich war ebenfalls die Installation einer Antenne am WKW Flumenthal geplant. Da jedoch das mobile Tracking bis Solothurn (Abbildung 16) mit einer deutlich höheren Frequenz als ursprünglich geplant durchgeführt wurde, war diese Installation nicht mehr so wichtig.

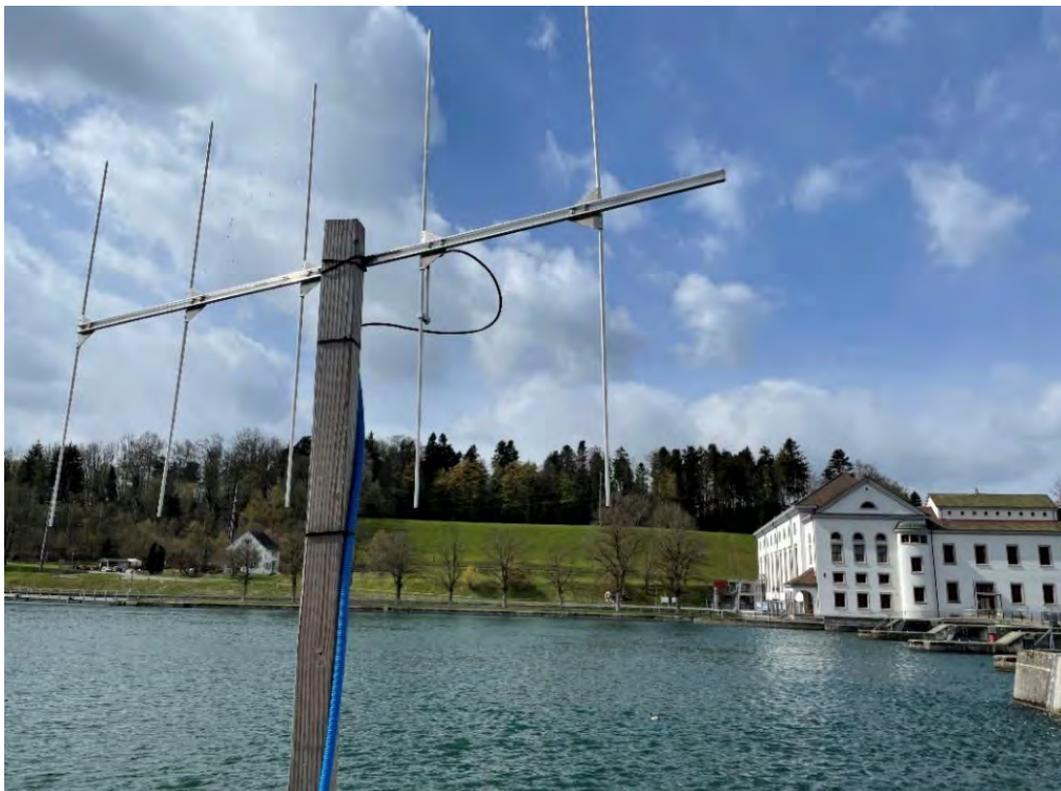


Abbildung 15: 5-Element YAGI-Antenne am WKW Wynau, mit Blick auf das gegenüberliegende WKW Schwarzhäusern.



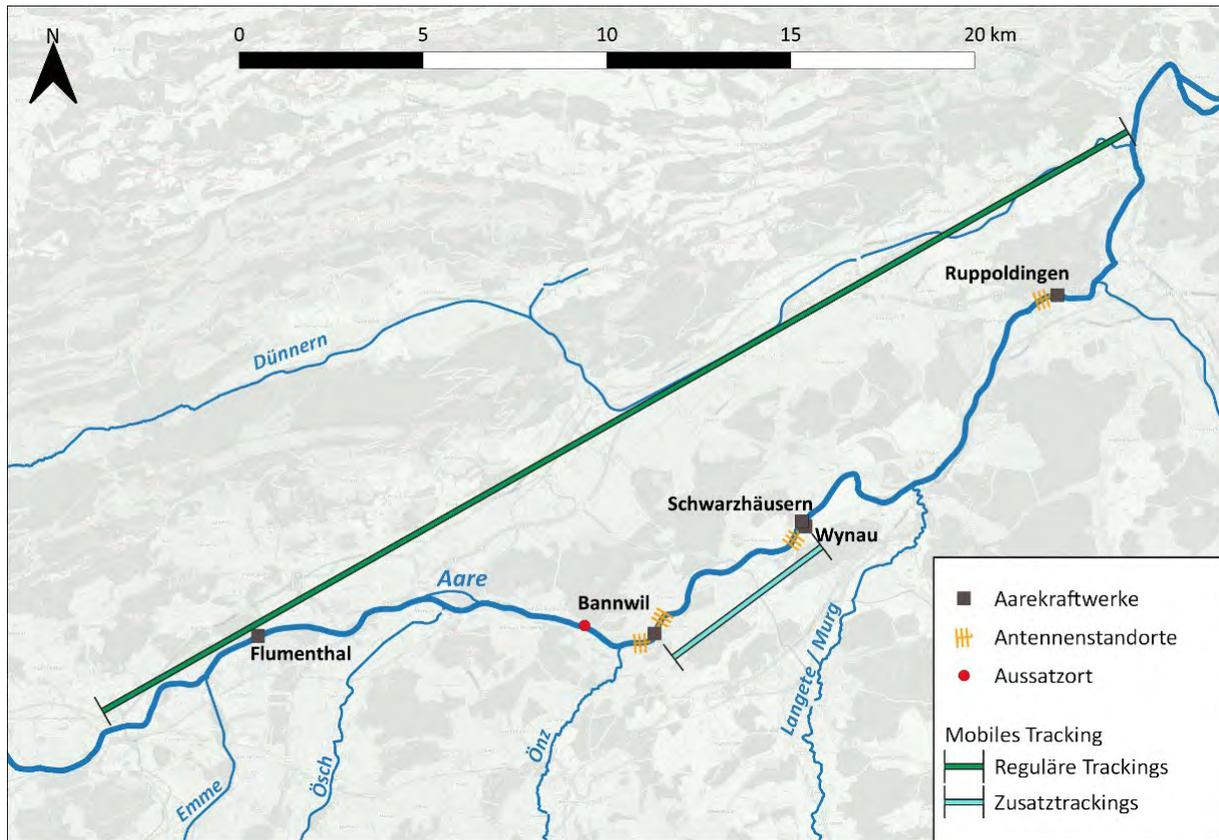


Abbildung 16: Übersicht über das Untersuchungsgebiet inkl. Aussatztort der markierten Fische, Standorte der stationären Antennen und Strecken des mobilen Trackings (vgl. Tabelle 16 im Anhang). Fangort der Fische war die FAH am WKW Bannwil. Eine detaillierte Übersicht der Antennen am WKW Bannwil ist in Abbildung 13 ersichtlich. Die stationären Antennen in Winznau und Niedergösgen liegen ausserhalb des Kartenausschnitts.

Tabelle 4: Betriebszeiten (für die Frequenz der Barbenmarken) und Koordinaten der stationären Antennen an der Aare unterhalb von Bannwil.

Standort Antenne	Betrieb von	Betrieb bis	Dauer Unterbruch in Tagen
Winznau (2'636'571.0, 1'246'137.6)	04.08.2020	10.03.2021	153 35
	10.08.2021	17.12.2021	
	21.01.2022	11.11.2022	
Wynau (2'626'295.4, 1'233'905.9)	22.04.2020	14.09.2022	15
	29.09.2022	01.12.2022	
Ruppoldingen (2'633'116.0, 1'240'268.4)	05.08.2020	07.11.2020	31 21 24 12 121 62 85
	08.12.2020	23.04.2021	
	14.05.2021	27.05.2021	
	20.06.2021	06.07.2021	
	18.07.2021	31.10.2021	
	01.03.2022	07.04.2022	
	08.06.2022	23.06.2022	
16.09.2022	03.11.2022		
Niedergösgen (2'642'091.6, 1'246'828.3)	06.07.2021	09.09.2021	104
	22.12.2021	13.09.2022	



4.6.3 Kalibrierung der Anlage und Datenerhebung

Die Telemetrieanlagen am WKW Bannwil wurden im November 2019 in Betrieb genommen. Danach folgten Messungen von Signalstärken mit Sendern mit bekannter Lage in der Aare. Beschwerte Sender wurden an Angelruten an bestimmten Orten und in unterschiedlichen Tiefen unterhalb oder oberhalb des Kraftwerkes platziert. So liess sich feststellen, welche Antenne die Signale der Sender empfängt und wie stark diese Signale sind. Anhand von diesen Messungen wurde dann entschieden, wie der Gain (relative Messung der Signalstärke) eingestellt werden musste. Sender an tiefen Stellen können nur mit einer hohen Einstellung des Gains erfasst werden. Andererseits wird der Empfang durch eine hohe Einstellung des Gains durch Umgebungslärm (Noise) gestört und empfangene Signale können unlesbar sein. Aus diesem Grunde sind diese Einstellungen relativ heikel und müssen für jedes einzelne Gerät an einem bestimmten Standort möglichst genau ermittelt werden. Sind die optimierten Gaineinstellungen einmal gefunden, sollten sie nicht mehr verändert werden. Von Anfang der Installation bis zum Ende der Datenerhebung (31.03.2021) wurden die gewählten Einstellungen an den Readern nicht mehr verändert, lediglich der Gain wurde am 03.03.2020 bei einigen Readern etwas reduziert, um den Einfluss von Störsignalen herabzusetzen. Die erfassten Radiosignale waren sehr zahlreich. Am Reader im Oberwasser, an welchem eine YAGI- und eine Unterwasserantenne angeschlossen waren, wurden innerhalb von zehn Tagen manchmal bis zu 900'000 Detektionen registriert. Diese galt es später zu analysieren und falsche Daten auszufiltern (s. Kapitel 4.6.6).

4.6.4 Unterhalt der Stationen

Die Telemetriestationen wurden regelmässig unterhalten. Da das mobile Telefonnetzwerk am WKW Bannwil nicht zuverlässig funktionierte, war keine mobile Datenübertragung möglich. Die Daten wurden alle 10 – 14 Tage vor Ort mit dem Computer heruntergeladen. Bei dieser Gelegenheit wurden sämtliche Geräte, Antennen und Kabelverbindungen auf ihre Funktion überprüft. Es gab bei der Datenaufnahme (mit der Ausnahme des Empfängers YD1, der für zwei Tage keine Signale mehr empfangen konnte) keine Ausfälle und kleinere Probleme konnten in der Regel sofort behoben werden. Dasselbe gilt für die PIT-Tag-Anlage. Diese war jedoch infolge einer unbekannten Störung nur bis im Januar 2021 in Betrieb. Durch die Störung wurden der Stromwandler sowie einer der Reader beschädigt. Die Anlagen an den WKW Wynau und Ruppoldingen wurden ebenfalls in regelmässigen Abständen besucht, überprüft und die Daten gesichert.

4.6.5 Datenvalidierung

Die Auswertung der Daten erfolgte mit dem Statistikpaket R (Version 3.1.2) und RStudio (Version 0.98.1102; R Core Team 2020). Für die Visualisierungen wurde das Paket ggplot2 (Version 2.1.0) verwendet. Die mittels der stationären Radioantennen erfassten Daten wurden in mehreren Schritten gefiltert und so auf möglichst plausible Einträge reduziert. Dieser Filterprozess umfasste zunächst ein Entfernen der Fehlercodes und der nicht vergebenen Radiocodes. Anschliessend wurden Einträge von Radiocodes mit Temperatur- oder Drucksensordaten entfernt, bei denen eigentlich gar kein Sensor vorhanden war. Die verbleibenden Radiocodes wurden dann auf den zeitlichen Abstand der Einträge hin überprüft. Da alle Radiosender in einem festgelegten Intervall ein Signal senden, können nur solche Einträge ein valides Signal darstellen, welche im exakten Abstand (eines Vielfachen) dieses Intervalls registriert werden. Dazu wurden alle Einträge eines Radiocodes auf den zeitlichen Abstand zum vorherigen und nachfolgenden Eintrag hin überprüft. Als maximaler Abstand zwischen zwei Signalen wurden 10 min gewählt. Wurden mindestens 3 konsekutive Einträge mit identischem Sendeintervall registriert, so wurden diese Einträge als valide eingestuft. Prinzipiell wäre es möglich, dass zwischen jeder echten Detektion, eine falsche registriert wurde was zum Ausschluss sämtlicher Daten führen würde. Die Wahrscheinlichkeit dafür wird bei Sendeintervallen von 2 – 5 Sekunden aber als gering erachtet.



4.6.6 Datenanalyse

Annäherung an das Kraftwerk Bannwil

Es wurde ermittelt, wie häufig und wie lange sich ein Fisch jeweils vor dem WKW Bannwil aufhielt. Dazu wurden sowohl solche Fische betrachtet, die abgestiegen sind, als auch diejenigen, die nicht abgestiegen sind. Bei den abgestiegenen Fischen wurde nur der Zeitraum bis zum ersten Abstieg analysiert, bei den nicht abgestiegenen die komplette Untersuchungsperiode. Dabei wurden alle Detektionen eines Radiocodes am WKW Bannwil als eine Annäherung an das Kraftwerk gewertet, die aus einer konsekutiven Anzahl von mindestens 10 bzw. 50 Detektionen bestanden. Es wurden zwei unterschiedliche Anzahlen an konsekutiven Einträgen als Kriterium verwendet, um eine Beeinflussung durch das Festlegen dieses Parameters ggf. sichtbar zu machen, da Erfahrungswerte fehlen. Als Mindestabstand zwischen zwei Annäherungen wurden 2 Std. gewählt. Alle Detektionen eines Fisches mit einem geringeren Abstand als 2 Std. wurden daher als eine zusammenhängende Annäherung gewertet. Für die letzte Annäherung vor einem Abstieg wurden alle Detektionen gewertet, die vor dem Abstieg lagen, auch wenn diese das Kriterium für die Anzahl an erforderlichen konsekutiven Einträgen nicht erreichten. Dies geschah aus dem Grund, dass die Detektionen im Oberwasser teils nur sporadisch waren, weil z. B. die Wassertiefe die Signalstärke der Radiosender stark verringerte. Als Detektionen für eine Annäherung wurden nur Einträge der Radioantennen im Oberwasser (YUp1, YUp2, UW2), sowie der drei Antennen an den Wehrfeldern (YW1-3) gewertet (s. Abbildung 13). Letztere detektierten, bedingt durch ihre Einstellung mit einem hohen Gain, auch im Oberwasser liegende Radiosender.

Mittels einer Rangkorrelation nach Spearman wurde geprüft, ob die Anzahl Annäherungen in einem Zusammenhang mit dem Abfluss oder der Wassertemperatur der Aare steht. Dabei wurde der Zeitpunkt vom 17.12.2019 bis 31.03.2020 berücksichtigt. Da die Anzahl Annäherungen stark vom Aussatzeitpunkt abhängt (vgl. Abbildung 29), wurden die Zeiträume, die innerhalb einer Woche nach einem Markiertag liegen, aus der Analyse ausgeschlossen. So verblieben noch 433 Tage für die Analyse. Zudem hängt die Anzahl Annäherungen an einem bestimmten Tag auch davon ab, wie viele markierte Fische (noch) im Oberwasser vorhanden sind. Die Anzahl der Fische, die eine Annäherung durchführten, wurde deshalb mit der Anzahl Fische, die sich noch lebend im Oberwasser befanden (kein Abstieg, keine nachgewiesene Prädation, kein Ausschluss gem. mobilen Funden (vgl. Kap 4.7.3), Laufzeit des Senders noch nicht abgelaufen) in Relation gesetzt. Schliesslich wurde der Anteil der Fische aus dem Oberwasser, die sich an einem bestimmten Tag an das WKW Bannwil annäherte, mit dem jeweiligen Tagesmittel des Abflusses bzw. der Wassertemperatur verglichen.

Bestimmung des Abstiegszeitpunkts und -wegs

Um den Abstiegszeitpunkt und den Abstiegsweg eines Fisches zu identifizieren, wurde die Signalstärke der stationären Antennen am WKW Bannwil über verschiedene Zeitintervalle graphisch dargestellt. Dazu wurden Übersichts- und Detailplots erstellt. Die Übersichtsplots erstreckten sich über den Zeitraum von einem Monat, die Detailplots über einen Tag. Somit konnten durch Sichtung der Übersichtsplots schnell diejenigen Zeiträume identifiziert werden, in denen durch einen bestimmten Radiocode Aktivität am WKW Bannwil verzeichnet wurde. In den Detailplots konnte durch die Wechsel der Signalstärken der unterschiedlichen Antennen die Position des Fisches mit einem spezifischen Radiocode abgeschätzt werden. Grob liessen sich folgende Positionen unterscheiden:

1. Vor dem Turbineneinlauf
2. Im Bereich der Wehrfelder (Oberwasser und Unterwasser)
3. Im Fischpass
4. Im Unterwasser am Turbinenauslass
5. Im Unterwasser



Die Unterscheidung der Position eines Fisches war nicht trivial und beruhte auf Abschätzungen. Sie unterliegt daher, mit Ausnahme der Unterwasserantennen, einer gewissen Ungenauigkeit und ist nicht vergleichbar mit einem exakten 2D- oder 3D-Tracking. Durch die Detektionen an spezifischen Antennen, zum Beispiel an der Unterwasserantenne im Oberwasser (Detektionsradius ca. 10 m) vor der Turbine, oder der YAGI-Antenne vor der Turbine, im Zusammenhang mit einer dominanten Signalstärke, lag die Position des Fisches zu diesem Zeitpunkt sehr wahrscheinlich am Turbineneinlauf. Folgte kurz darauf Detektionen mit hohen Signalstärken im Unterwasser zusammen mit einer Abnahme der Detektionen im Oberwasser des WKW Bannwil, so kann davon ausgegangen werden, dass ein Abstieg stattfand. Die Abstiegswege wurden grob nach folgenden Kriterien festgelegt:

Abstieg über die Turbine: Das plötzliche Erscheinen von Detektionen auf den Lesegeräten der Unterwasserantennen am Turbinenauslauf deutet mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einen Abstieg durch die Turbinen hin. Ein geschlossenes Wehr und keine Detektionen im Fischpass unterstützten in solchen Fällen die Interpretation eines Turbinenabstiegs.

Abstieg über den Fischpass: Der Aufenthalt im Fischpass war eindeutig, da der Fisch hier auf der RFID-Anlage und den Radio-Unterwasserantennen registriert wurde.

Abstieg über das Wehr: Der Abstieg von Fischen über das Wehr war allein anhand der Signalverteilung der Radioantennen nicht eindeutig, denn häufig folgten Detektionen im Unterwasser, ähnlich wie bei einem Turbinenabstieg. Wehrüberfall zum fraglichen Zeitpunkt lieferte ein wichtiges Indiz für die Interpretation des Abstiegswegs.

Konnte einem Abstieg keiner der Korridore mit hoher Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden, so wurde der Abstiegskorridor als «unklar» kategorisiert. **Unklare Abstiege** konnten zum Beispiel auftreten, wenn sich ein Fisch beim mobilen Tracking im Unterwasser wiederfinden liess, die Detektionen am WKW Bannwil zuvor aber nur sporadisch waren und keine Interpretation zuließen.

Insgesamt wurde der Abstiegskorridor somit in sechs Kategorien eingeteilt:

1. Turbine
2. Wehr 1
3. Wehr 2
4. Wehr 3
5. Fischpass
6. Unklar

Der Abstiegszeitpunkt wurde entweder aus den Plots ausgelesen oder in den Rohdaten gesucht. Bei einem Turbinenabstieg wurde, sofern vorhanden, die erste Detektion auf den Unterwasserantennen am Turbinenauslass als Abstiegszeitpunkt gewählt. Voraussetzung war, dass diese Detektion zu einem plausiblen Zeitpunkt stattfand¹.

Ergebnisse zum Abstiegskorridor und Abstiegszeitpunkt wurden in einem weiteren Schritt mit den Ergebnissen des mobilen Trackings verschnitten bzw. validiert.

¹ Manchmal blieb eine Detektion auf den Unterwasserantennen am Turbinenauslass beim Abstieg aus, während die Yagi-Antenne im Unterwasser jedoch deutlich einen Abstieg anzeigte. Wenn sich ein Fisch daraufhin wieder den Unterwasserantennen am Turbinenauslauf näherte, so führte dies zu Detektionen, welche nicht mit dem Abstiegszeitpunkt übereinstimmten.



Schwimmtiefe vor dem Abstieg

Das Erfassen der Schwimmtiefen vor dem Abstieg durch die Turbinen ist von grossem Interesse. Dies ist jedoch nur für Fische mit einem Radiosender mit Tiefensensor möglich. Wenn sich Fische in grossen Tiefen aufhalten, ist die Signalstärke der Sender reduziert und wird oft nicht oder nur lückenhaft registriert. Daher ist die Benutzung der Tiefen nicht repräsentativ und es lassen sich keine Präferenzen für Tiefen berechnen. Dies wird entsprechend berücksichtigt. Es kann jedoch die Spannweite der genutzten Tiefe erkannt werden. Die Wahrscheinlichkeit einer Detektion eines Fisches in den ersten 5 m der Wassersäule ist also höher als die Detektion eines Fisches in einer Tiefe von mehr als 5 m.

Detektion an weiteren Stationen entlang der Aare

Die Interpretation der Daten an den anderen Standorten entlang der Aare erfolgte ebenfalls über die grafische Darstellung der Signalstärke in Plots. Hier wurden nur solche Einträge gewertet, die innerhalb eines kurzen Zeitraumes häufig auftraten, oder wenn die Einträge im Zusammenhang mit den mobilen Trackingergebnissen sinnvoll erschienen.

4.7 Mobiles Tracking

4.7.1 Datenerhebung

Der Verbleib der markierten Fische in der Aare wurde regelmässig durch ein mobiles Tracking überprüft. Dafür wurde eine 3-Element-YAGI-Antenne und ein spezielles Empfangsgerät verwendet (Abbildung 17). Die Signale der Sender wurden mit der exakten Zeit und der GPS-Position im Empfangsgerät gespeichert. In der Regel wurde die Strecke von Olten bis Solothurn mit einer auf einem Fahrrad montierten Antenne abgesucht. Fünf Mal wurden die Trackings weiter flussaufwärts fortgesetzt. Während der Hauptstudie (BKW) wurden die Trackings etwa alle drei Wochen durchgeführt. Während der Laichzeit der Barben 2020 (April – Mai) wurde die Strecke zwischen den WKW Bannwil und Wynau/Schwarzhäusern zusätzlich ca. einmal wöchentlich zu Fuss begangen. Eine Zusatzfinanzierung durch das BAFU ermöglichte sechs weitere Trackings nach dem eigentlichen Projektabschluss, die im Abstand von rund einem Monat jeweils von Olten bis oberhalb von Solothurn durchgeführt wurden. Die Strecke von Olten bis Brugg wurde für das FishConsulting-Projekt Flussforellen befahren, wobei in unregelmässigen Abständen auch nach den markierten Barben gesucht wurde. Eine Übersicht aller Trackings wird in Tabelle 16 im Anhang gegeben, die Strecken sind in Abbildung 16 gekennzeichnet.



Abbildung 17: Mobiles Tracking mit dem Fahrrad oder zu Fuss



4.7.2 Datenvalidierung

Alle aufgezeichneten Signale wurden validiert. Bei den folgenden Signalen handelte es sich um Falscheinträge, die durch Störungen verursacht wurden:

- Signale nicht verwendeter IDs
- Signale von Sensortag-IDs ohne Sensordaten
- Signale von IDs normaler Tags mit Sensordaten
- Signale mit falschem Sendeintervall

Diese wurden gelöscht. Bei allen verbleibenden Einträgen wurde die Anzahl der Signale und, wenn vorhanden, die Sensordaten überprüft. Zusätzlich wurde die Echtheit der Signale anhand der Einträge auf den stationären Antennen verifiziert.

Als Standort eines Fisches wurden die Koordinaten verwendet, die beim Eintrag mit der höchsten Signalstärke aufgezeichnet wurden. Diese Koordinaten wurden ins GIS (QGIS, Vers. 3.4.7; QGIS.org 2021) übertragen, wo der zugehörige Aarekilometer (Distanz zur Mündung in den Rhein) ermittelt wurde. Die weiteren Analysen (s. u.) und Graphiken wurden in R (R Core Team 2020) durchgeführt.

4.7.3 Datenanalyse

Allgemein

Anhand der Fundorte wurde für jeden Fisch eine Graphik mit seinen Aufenthaltsorten im Laufe der Studienzeit erstellt. Diese dienten der allgemeinen Übersicht (wie viele Fische bewegen sich in welchen Bereichen) und der Unterstützung der Auswertung der stationären Antennen (Eingrenzung des Abstiegszeitraums bei abgestiegenen Fischen). Für die Betrachtung verschiedener Wanderrouten wurden schliesslich auch die an stationären Antennen empfangenen Signale in die Graphiken aufgenommen.

Überlebensraten

Bei allen abgestiegenen Fischen wurde überprüft, ob sie im Laufe der Studie wieder flussaufwärts gerichtete Wanderungen durchführten. Ab einer Bewegung von über 250 m gegen die Fliessrichtung wurde angenommen, dass ein Fisch den Abstieg über das WKW Bannwil überlebt hat. Im Gegensatz dazu konnte bei Fischen, die über eine lange Zeit an einem Ort blieben, oder sich nur flussabwärts bewegten, nicht abschliessend beurteilt werden, ob ein Fisch noch lebte. Solche Muster können sowohl bei toten Fischen auftreten als auch dem natürlichen Verhalten entsprechen (es wurden mehrere Fische beobachtet, die über einen langen Zeitraum an einem Ort blieben und sich dann doch noch stromaufwärts bewegten). Deshalb konnte für das aktuelle Projekt nur eine Mindest-Überlebensrate, keine konkrete Mortalitätsrate ausgewiesen werden. Dafür wurden die Informationen des mobilen Trackings und der stationären Antennen kombiniert.

Für die Analyse der Wanderdistanzen wurde versucht, den Einfluss toter Fische auf die Resultate zu vermindern. Werden Signale toter Fische (nach einer Kraftwerkspassage oder durch Prädation) oder verlorener Tags in die Berechnung der Home Range einbezogen, kann dies einerseits zu einer Unterschätzung der Fischwanderung führen, da sich ein Teil der markierten Fische nicht bewegt. Andererseits kann es zu einer Überschätzung der Wanderdistanzen kommen, wenn Tags gefressener Fische von Prädatoren (z. B. Kormoranen) über weite Strecken bewegt werden oder die Tags bei Hochwassern flussabwärts verdriftet werden (Havn et al. 2017). Die Unterscheidung von lebenden und toten Fischen war jedoch vielerorts nicht leicht, da sich die Fische auch natürlicherweise über längere Zeit am selben Ort aufhalten. Zudem wurden einige Tags nur über kurze Zeit gefunden, was zufällig oder als Folge einer mechanischen Zerstörung oder einem Transport der Tags aus dem Untersuchungsgebiet hinaus geschehen konnte. Der weitere Verbleib dieser Fische konnte somit nicht eruiert werden.



Fundorte, bei denen es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht um lebende Fische handelte, wurden während der Auswertung entsprechend gekennzeichnet. Dies betraf je nach Situation die gesamte Datenreihe einer ID oder nur einen Teil davon (z. B. ab einer Kraftwerkspassage oder einem verifizierten Prädationsereignis). Es wurde ein reduzierter Datensatz erstellt, in dem diese Fundorte nicht enthalten sind. Da bezüglich des Status dieser Funde (lebender Fisch oder nur Sender) eine gewisse Unsicherheit besteht, werden für die Home Range und maximalen Wanderdistanzen sowohl die Resultate des reduzierten als auch des gesamten Datensets angegeben. Für die Betrachtung der saisonalen Wanderungen wurde hingegen nur das reduzierte Datenset verwendet.

Wanderdistanzen

Anhand der Fundorte wurden verschiedene Wanderdistanzen bestimmt. Für jeden Fisch wurde die maximale Distanz zum Aussatzort flussauf- und -abwärts, sowie eine vereinfachte Home Range berechnet. Die Home Range beschreibt das Areal, das ein Individuum für seine Aktivitäten nutzt. Sie kann für verschiedene Zeitintervalle betrachtet werden und somit je nach Zeitraum z. B. auch Laichwanderungen umfassen. Für diese Studie wurde die Home Range als die gesamte durchwanderte Strecke über alle Trackingfunde eines Individuums definiert. Der Aussatzort sowie Registrierungen an stationären Antennen wurden dabei als Fundorte der Fische mitberücksichtigt. Die drei Größen wurden wie folgt berechnet:

- Home Range = $Aarekm_{\text{oberster Fundort}} - Aarekm_{\text{unterster Fundort}}$
- Max. Distanz flussaufwärts = $Aarekm_{\text{oberster Fundort}} - Aarekm_{\text{Aussatzort}}$
- Max. Distanz flussabwärts = $Aarekm_{\text{Aussatzort}} - Aarekm_{\text{unterster Fundort}}$

Bewegte sich ein Fisch nur in eine Richtung, wurde er für die Analyse der maximalen Distanz in der anderen Richtung nicht berücksichtigt. Die zurückgelegte Nettodistanz (Summe aller Distanzen zwischen zwei Fundorten) wurde für diese Studie nicht berechnet. Dieses Mass für die Aktivität der Fische weist im Vergleich zur Home Range eine deutlich höhere Fehlerquote auf, wenn die Trackings nicht in sehr kurzem zeitlichen Abstand durchgeführt werden (Baras 1998).

Da die nachgewiesenen Wanderdistanzen abhängig von der Fischlänge, aber auch von der Anzahl Funde und der Studiendauer sein können (Radinger & Wolter 2014a), wurden diese Zusammenhänge mit einer Rangkorrelation nach Spearman (Daten nicht normalverteilt) überprüft. Zudem wurden die beiden Wanderrichtungen (flussauf- und -abwärts) und Markiergruppen (Frühling und Winter) mit einem Mann-Whitney-U-Test verglichen.

Saisonale Wanderungen

Die Benützung der FAH Bannwil als Wintereinstand kann dank der stationären Antennen am WKW und in der FAH zeitlich relativ genau angegeben werden. Als Ein- bzw. Austritt in den Wintereinstand wurden die ersten bzw. letzten Signale an den stationären Antennen beim WKW Bannwil gewertet. Diese wurden mit den Funden des mobilen Tracking ergänzt und verglichen. Aufgrund der Aussatzdaten und Laufzeit der Antennen können die folgenden Vorgänge abgebildet werden:

- Frühjahr 2020: Verlassen des Wintereinstands
- Herbst 2020: Ankunft im Wintereinstand
- Frühjahr 2021: Verlassen des Wintereinstands
- Dauer Überwinterung 2020/2021
- Herbst 2021: ungefähre Ankunft im Wintereinstand (begrenzt, da stationäre Antennen erst ab 28.10. wieder in Betrieb)



Anhand der Aufenthaltsorte der Fische zur Laichzeit konnten mit hoher Wahrscheinlichkeit zwei verschiedene Laichgebiete ausgewiesen werden. Es wird beschrieben, woher die Fische auf diese Laichplätze wandern und die Distanz der Wanderungen wird berechnet. Bei den Fischen, die zu zwei Laichperioden anwesend waren, wurde zudem untersucht, ob ein Homing stattfand und wie gross die Distanzen zwischen den Aufenthaltsorten zur Laichzeit zwischen den beiden Jahren war.

4.8 Prädation

Die Beurteilung, ob eine Fisch gefressen wurde, erfolgte anhand diverser Informationen, die für jeden Fisch einzeln zusammengetragen und interpretiert wurden. Dabei wurde die Wahrscheinlichkeit der Prädation in vier Stufen eingeteilt: «ja», «wahrscheinlich», «möglich», «nein». Als verifizierte Prädation gewertet wurden nur die Kategorien «ja» und «wahrscheinlich». Folgende Indizien liessen darauf schliessen, dass es sich bei validen Signalen nicht um lebende Fische handelte:

- Im Fall von durch die Sensortags übermittelten klaren Temperaturanstiegen, weit über die Wassertemperatur hinaus und über 35 °C, konnte sicher von Prädation ausgegangen werden.
- Eine Temperatur des Sensortags, die von der Wassertemperatur deutlich abwich, war ebenfalls ein Zeichen für Prädation. Meist wurde die Lufttemperatur angezeigt.
- Eine übermittelte Tiefe im Bereich von konstant 0-1 m, sprach dafür, dass sich der Sender nicht mehr unter Wasser befand, sondern entweder an Land, oder in einem Prädator.
- Auch die Positionsveränderung der Sender im mobilen Tracking wurde als Kriterium für die Vitalität eines Fisches genutzt. Bewegte sich ein Fisch über einen längeren Zeitraum nicht, war es wahrscheinlich, dass er gefressen und der Sender ausgeschieden wurde. Die abschliessende Beurteilung erfolgte jedoch, wenn sich der Fisch über einen Sommer und einen Winter am gleichen Ort befand. Denn aus den Ergebnissen dieser Studie zeichnete sich ab, dass Barben im Herbst Wintereinstände aufsuchen. Konnte bei den Sendern also kein Ortswechsel zwischen den Jahreszeiten beobachtet werden, so wurde dies als ein sehr unwahrscheinliches Verhalten eingestuft und der Fisch mit dem entsprechenden Sender für tot erklärt. Als Prädationszeitpunkt wurde in diesem Fall das Datum gewählt, an dem er erstmals auf der konstanten Position detektiert wurde.
- Auch die Nähe der Position des Senders zu bekannten Kormoranbäumen oder -sammelplätzen wurde bei der Beurteilung der Prädation berücksichtigt. So kamen zum Beispiel viele Sender bei der Vogelraupfi oberhalb des WKW Bannwil zu liegen.
- Die Geschwindigkeit zwischen den Detektionen an den stationären Antennen konnte als Hinweis auf Prädation genutzt werden. Falls eine Barbe von einem Vogel gefressen wurde, so konnte es sein, dass es innerhalb einer unrealistischen Schwimmzeit (Minuten), zu Detektionen an unterschiedlichen Kraftwerken/Standorten kam.
- Aufstiege über das WKW Bannwil, ohne Detektionen auf den Antennen (RFID und Radiotelemetrie) im Fischpass, waren ein klarer Hinweis auf Prädation.



4.9 Berechnung der Abflüsse über die Korridore am WKW Bannwil

Für die Berechnung der in Tabelle 2 dargestellten Abflüsse wurde der Aarepegel der Messstation 2063 Murgenthal genutzt. Die Daten wurden uns durch das BAFU als 5-Minuten-Mittel zur Verfügung gestellt. Der Abfluss des Fischpasses in Bannwil wurde durch die BKW auf ca. 100 l/s geschätzt. Der genaue Abfluss ist nicht bekannt, sollte aber in dieser Grössenordnung liegen und kann sich in Abhängigkeit vom Oberwasserpegel am WKW Bannwil leicht ändern. Die BKW hat für diese Studie Daten zum Abfluss über die Klappen und Segmente der drei Wehre bereitgestellt. Die Auflösung der Daten war auf 1 Sekunde genau. Um die Bearbeitung zu erleichtern, wurden nur Einträge zur vollen und halben Minute behalten, also die Auflösung auf 30 Sekunden verringert.

Für den Abfluss jeder Klappe und jedes Segmentes wurden zunächst Tagesmittel gebildet, da die Daten zur Wehröffnung teilweise unvollständig sind. Aus diesen Tagesmitteln wurden die Werte für die Periode 2018-2022 berechnet, sowie ein Mittel für die Dauer der Untersuchung (01.12.2019 - 31.03.2021). Beim Aareabfluss wurde analog vorgegangen. Zunächst wurden Tagesmittel berechnet und anschliessend das Mittel daraus für das Jahr 2020 bzw. die Untersuchungsperiode. Die Tagesmittel des Aareabflusses wurden genutzt, um den mittleren Abfluss über die Turbinen pro Tag zu schätzen. Dazu wurde der Abfluss des Fischpasses und der mittlere Tagesabfluss über alle Wehröffnungen vom Tagesmittel des Aareabflusses abgezogen. Somit ergaben sich Tagesmittel für den Abfluss über die Turbinen am WKW Bannwil. Aus diesen Tagesmitteln wurde der mittlere Abfluss über die Turbinen für die Jahre 2018-2022 bzw. die Untersuchungsperiode berechnet. Diese Zahlen sind als generelle Charakterisierung der abfliessenden Wassermengen am WKW Bannwil und als grobe Aufteilung auf die Abstiegskorridore zu verstehen.



5 Resultate

5.1 Markierte Fische

Insgesamt wurden in dieser Studie 292 Barben mit Radiosendern (und PIT-Tags) markiert. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Anzahl markierter Barben an den neun Markiertagen.

Tabelle 5: Markierdaten und die Anzahl der mit Radiosendern markierten Barben. Alle Fische wurden aus dem Fischpass des WKW Bannwil gefangen.

Markierdatum	Anzahl markierte Barben
02.04.2019	10
17./18.12.2019	47
25./26.03.2020	100
02./03.04.2020	52
03./09./10.12.2020	83
Total	292

Die folgenden Abbildungen zeigen das Längenfrequenzhistogramm (Abbildung 18) der markierten Barben sowie die Längen-Gewichtsbeziehung (Abbildung 19). Die Totallänge der markierten Fische lag zwischen 285 und 592 mm (Median 412 mm). Fische mit einer Körperlänge unter 280 mm wurden nicht markiert, da der Sender sonst 2 % des Körpergewichtes der Fische überschritten hätte. Der Konditionsindex² aller markierten Barben betrug im Durchschnitt 0.76. Der Konditionsindex der im Frühling markierten Fische war mit durchschnittlich 0.75 (Bereich 0.64 - 0.92) nur minim tiefer als der im Winter markierten Barben mit 0.77 (Bereich 0.53 - 0.92).

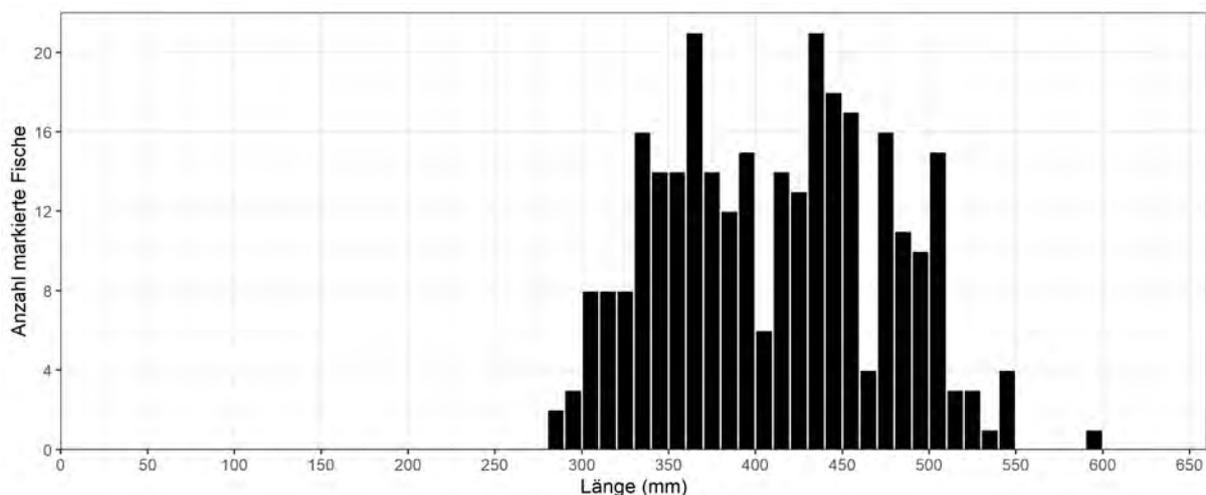


Abbildung 18: Längenfrequenz-Histogramm der markierten Barben

² Der Konditionsindex K nach Fulton gibt Auskunft über den Ernährungszustand eines Fisches und ist die Beziehung zwischen Totallänge (TL, in cm) und Gewicht in g ($K = 100 \times \text{Gewicht} / \text{TL}^3$).



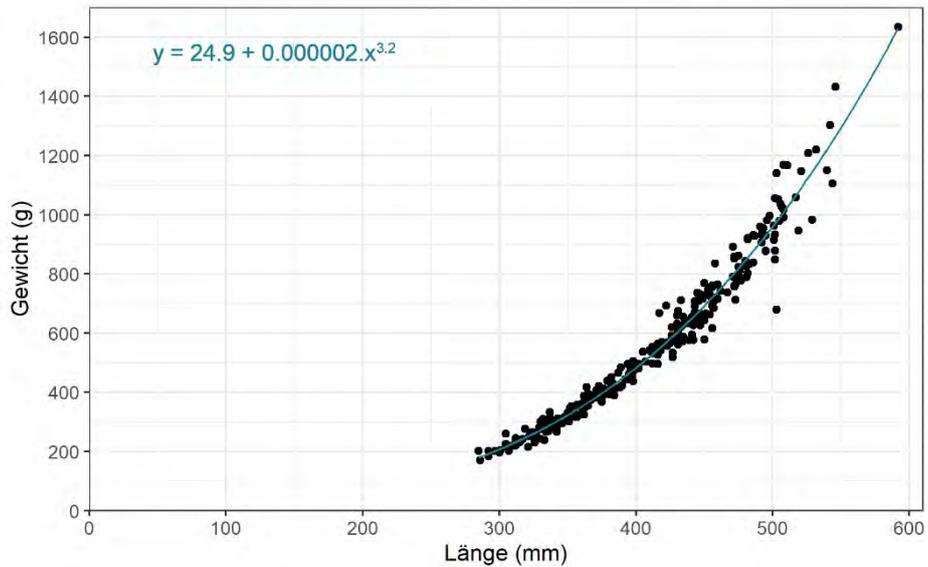


Abbildung 19: Längen-Gewichtsbeziehung der markierten Barben (Formel in blau)

5.1.1 Auswirkung der Markierung

Die Auswirkung der Markierung auf die Individuen kann anhand der wiedergefangenen Fische beurteilt werden. Es wurden insgesamt 12 Barben wiedergefangen. Alle Wiederfänge wurden in der Fischtreppe getötigt, während nach markierfähigen Fischen gesucht wurde. Bei sämtlichen Fischen war die Naht sehr schön verheilt und der Schnitt war nur noch schwach erkennbar, es kam aber zu Rötungen (Entzündungen) an der Antennenaustrittsstellen (Abbildung 20). Von den 12 Wiederfängen wiesen acht Fische keine wesentliche Beeinträchtigung auf. Zwei Fische waren gering/mittel beeinträchtigt, ein Fisch stark. Eine Barbe (ID 260) hatte den Radiosender verloren. Der Fisch konnte anhand seines PIT-Tags identifiziert werden. Neun der wiedergefangenen Barben sind über die Turbinen abgestiegen, für drei Barben ist der Abstiegsweg nicht bekannt. Keiner dieser 12 Fische wies sichtbare Verletzungen auf, die durch eine Turbine verursacht wurden.

Aus Tabelle 6 ist der Zuwachs für die Parameter Länge und Gewicht ersichtlich. Zwei Fische (ID 105 und ID 59) sind nach der Markierung nicht mehr gewachsen. Bei beiden Fischen handelt es sich um relativ grosse Fische, welche mit einem Logger-Tag markiert wurden. Alle anderen Individuen wiesen eine deutliche Zunahme von Länge und Gewicht auf. Dies trifft besonders auf die Individuen zu, welche mit einer Länge von ca. 301-362 mm mit Nanotags markiert wurden.



Tabelle 6: Biometrische Daten der 12 wiedergefangenen Barben. Das Gewicht des Wiederranges entspricht dem Gewicht ohne Radiosender. *: Fisch mit Loggertag, welcher entnommen wurde. Der Fisch mit ID 260 hatte den Radiosender verloren. Beeinträchtigung: 1 = keine Beeinträchtigungen, 2 = geringe-mittlere Beeinträchtigung, 3 = starke Beeinträchtigung

Fisch ID	Daten bei der Markierung				Daten beim Wiederrang				
	Markierdatum	Totallänge (mm)	Gewicht (g)	Konditionsfaktor	Wiederrang-Datum	Totallänge (mm)	Gewicht (g)	Konditionsfaktor	Beeinträchtigung (anhand Foto)
105*	26.03.20	442	626	0.72	03.12.20	442	600	0.69	2
96	02.04.19	326	238	0.69	09.12.20	421	556	0.75	1
279	25.03.20	362	345	0.73	09.12.20	401	465	0.72	1
59	25.03.20	425	566	0.74	09.12.20	426	499	0.65	3
26*	18.12.19	457	706	0.74	09.12.20	487	868	0.75	2
223	16.03.20	412	497	0.71	09.12.20	432	569	0.71	2
260	02.04.20	301	203	0.74	09.12.20	361	354	0.75	1
291	26.03.20	348	317	0.75	09.12.20	410	488	0.71	1
263	02.04.20	351	302	0.70	09.12.20	402	420	0.65	1
245	02.04.20	340	292	0.74	10.12.20	373	416	0.80	1
296	26.03.20	361	329	0.70	10.12.20	418	513	0.70	1
272	02.04.20	324	264	0.78	10.12.20	347	310	0.74	1



Abbildung 20: Oben: Barbe ohne wesentliche Beeinträchtigung durch die aus dem Körper herausragende Antenne; Unten: Barbe mit einer geringen/mittleren Beeinträchtigung



5.2 Annäherung an das Kraftwerk

5.2.1 Anzahl Annäherungen

Grundsätzlich gab es drei Möglichkeiten, wie sich eine Barbe verhalten konnte, nachdem sie im Oberwasser ausgesetzt wurde. Die erste Möglichkeit war, dass sich ein Fisch dem WKW im Oberwasser annäherte, aber nicht abstieg. Die zweite Möglichkeit war, dass der Fisch abstieg, nachdem er sich angenähert hatte. Hier gab es auch Sonderfälle, bei denen die Detektionen im Oberwasser nicht ausreichten, um die Annäherung deutlich zu erkennen (z. B. aufgrund von Kollisionen der Signale zwischen verschiedenen Sendern, oder aufgrund der reduzierten Sendeleistung in den tieferen Bereichen unmittelbar vor dem Kraftwerk). Die dritte Möglichkeit war, dass sich ein Fisch dem WKW Bannwil während der Laufzeit der Sender nie näherte. Diese Fische haben demnach weder eine Annäherung, noch einen Abstieg vollzogen.

Die Auswertung der Annäherungen an das WKW Bannwil im Oberwasser erfolgte automatisiert. Da die Definition der Mindestanzahl an konsekutiven Detektionen willkürlich erfolgte (10 und 50 Detektionen), wurden die weiteren Auswertungen mit beiden Datengrundlagen durchgeführt. Es zeigt sich, dass der Einfluss der gewählten Mindestdetektionen nicht sehr gross ist, da die Ergebnisse sich kaum unterscheiden (Tabelle 7). Es ist jedoch feststellbar, dass die Gesamtanzahl an erfassten Annäherungen bei einem eher konservativeren Kriterium von 50 konsekutiven Detektionen tiefer ist und es mehr Fische ohne eine Annäherung gibt (Abbildung 21).

Der Grossteil der abgestiegenen Fische am WKW Bannwil tat dies innerhalb der ersten zwei bis drei Annäherungen (vgl. 75% Quantil in Tabelle 7). Knapp die Hälfte aller abgestiegenen Fische sogar im Zuge der ersten oder zweiten Annäherung (Median 2 bzw. 1 Annäherungen, für 10 bzw. 50 konsekutive Detektionen). Die maximale Anzahl an Annäherungen bis zu einem Abstieg wurde von der Barbe mit der ID 310 erreicht und betrug 49 (für 10 konsekutive Detektionen) bzw. 35 (für 50 konsekutive Detektionen). Auch von den nicht abgestiegenen Fischen führten die meisten nur ein bis zwei Annäherungen durch. Tendenziell gab es hier etwas mehr Annäherungen je Individuum. So lagen der Mittelwert und das 75 % Perzentil bei etwa doppelt so vielen Annäherungen, wie bei den abgestiegenen Fischen. Die maximale Anzahl an Annäherungen wurde von der Barbe mit der ID 316 erreicht. Sie lag bei 47 (10 konsekutiven Detektionen) bzw. 36 (50 konsekutive Detektionen) und war damit sehr ähnlich zu den abgestiegenen Fischen. Abbildung 21 veranschaulicht die Verteilung der maximalen Anzahl an Annäherungen je Individuum. Auch hier ist zu erkennen, dass der Grossteil der Fische unter 10 Annäherungen vollzieht.

Aus Tabelle 8 ist ersichtlich, dass 47 % und 52.5 % (10 resp. 50 konsekutive Detektionen) aller Fische abgestiegen sind, die sich dem Kraftwerk annäherten, also rund die Hälfte, unabhängig von der Auswertungsmethode. Für 58 Individuen konnte keine Annäherung festgestellt werden, 19 Individuen konnten das Kriterium von 10 konsekutiven Detektionen nicht erfüllen und wurden daher nicht gewertet. Von diesen 19 Individuen stiegen zwei ab. Die Detektionen im Oberwasser des WKW Bannwil lagen jedoch mehr als 2 Stunden vor dem Abstiegszeitpunkt und wurden daher nicht als Annäherung gewertet.



Tabelle 7: Anzahl der Annäherungen von Barben im Oberwasser des WKW Bannwil. Aufgeteilt nach abgestiegenen und nicht abgestiegenen Fischen, sowie solche, bei denen es unklar ist, ob sie abgestiegen sind. Zudem wurden zwei Auswertungsmethoden benutzt, indem eine Annäherung entweder ab 10 (10k) oder ab 50 konsekutive Detektionen berücksichtigt wurde

Angewandte Auswertungsmethode	Abstieg?	Anzahl Individuen (N)	Minimale Anzahl Annäherungen pro Individuum	25%-Perzentil der Anzahl Annäherungen pro Individuum	Median der Anzahl Annäherungen pro Individuum	Mittelwert der Anzahl Annäherungen pro Individuum	75%-Perzentil der Anzahl Annäherungen pro Individuum	Maximale Anzahl Annäherungen pro Individuum
10k	Abstieg	101	1	1	2	3.2	3	49
50k		93	1	1	1	2.7	2	35
10k	kein Abstieg	107	1	1	2	5.6	5	47
50k		77	1	1	2	4.8	4	36
10k	unklar	7	2	3.5	6	8.3	12.5	18
50k		7	1	1	3	5.6	9	15

Tabelle 8: Anzahl und Anteils abgestiegener vs. nicht abgestiegener Individuen je Auswertungsmethode für die Annäherungen.

Annäherung	Individuen	davon abgestiegen		davon nicht abgestiegen		unklar ob abgestiegen	
	N	N	%	N	%	N	%
keine Annäherung	58	6	10.3	49	84.5	3	5.2
Annäherungen < 10k (nicht gewertet)	19	2	10.5	17	89.5	0	0
Annäherung ≥ 10k (inkl. letzter vor Abstieg)	215	101	47	107	49.8	7	3.3
Annäherung ≥ 50 (inkl. letzter vor Abstieg)	177	93	52.5	77	43.5	7	4



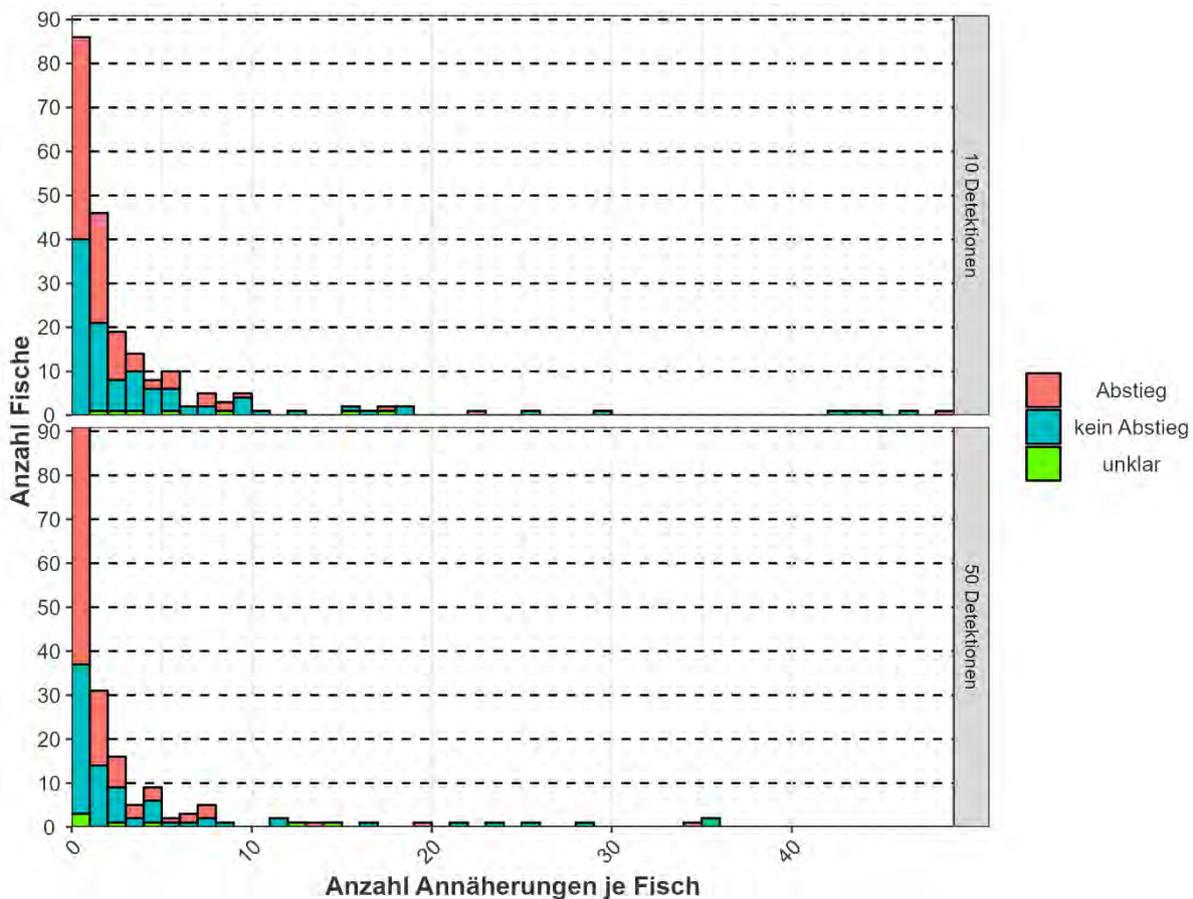


Abbildung 21: Maximale Anzahl Annäherungen je Individuum, aufgeteilt danach, ob das Individuum jemals abgestiegen ist. Dargestellt sind die zwei Auswertungsmethoden (10 resp. 50 konsekutive Detektionen als Kriterium für eine Annäherung).

5.2.2 Dauer der Annäherungen

Eine Annäherung an das WKW Bannwil aus dem Oberwasser dauerte durchschnittlich 281 (10 konsekutive Detektionen) bzw. 388 (50 konsekutive Detektionen) min. Die Werte werden durch Tags, die sehr lange auf den Oberwasserantennen registriert wurden verzerrt (die längste Annäherung dauerte 7540 min bzw. fünf Tage). Dabei kann es sich auch um stationäre Fische in der Nähe des Kraftwerks oder inaktive Tags (z. B. nach Prädation und Ausscheidung in der Vogelraupfi) handeln. Die Resultate sind deshalb mit Vorsicht zu behandeln und die Medianwerte sind den Mittelwerten vorzuziehen, da sie robuster gegen solche Ausreisser sind. Die mediane Dauer der Annäherung betrug 104 bzw. 176 min (10 bzw. 50 konsekutive Detektionen) und liegt damit deutlich unter den durchschnittlichen Werten. Innerhalb der ersten fünf Annäherungen ist eine Tendenz für die Aufenthaltsdauer im Oberwasser des WKW zu erkennen: Mit jeder zusätzlichen Annäherung wird die Aufenthaltsdauer im Allgemeinen länger. Dieser Trend ist über verschiedene Parameter in Tabelle 18 zu erkennen. Der Effekt ist statistisch sowohl für die im Laufe der Untersuchungen absteigenden ($p < 0.01$), als auch für die nicht absteigenden Barben ($p < 0.05$) signifikant (sowohl bei 10 als auch bei 50 konsekutiven Detektionen; *mixed linear regression* mit Individuum als *random effect*). Berücksichtigt wurden die ersten fünf Annäherungen jedes Fisches; Abbildung 22). Die Aufenthaltsdauer nimmt mit jeder Annäherung im Mittel um 43 ± 13 min (10 konsekutive Detektionen) bzw. 69 ± 18 min (50 konsekutive Detektionen) zu.



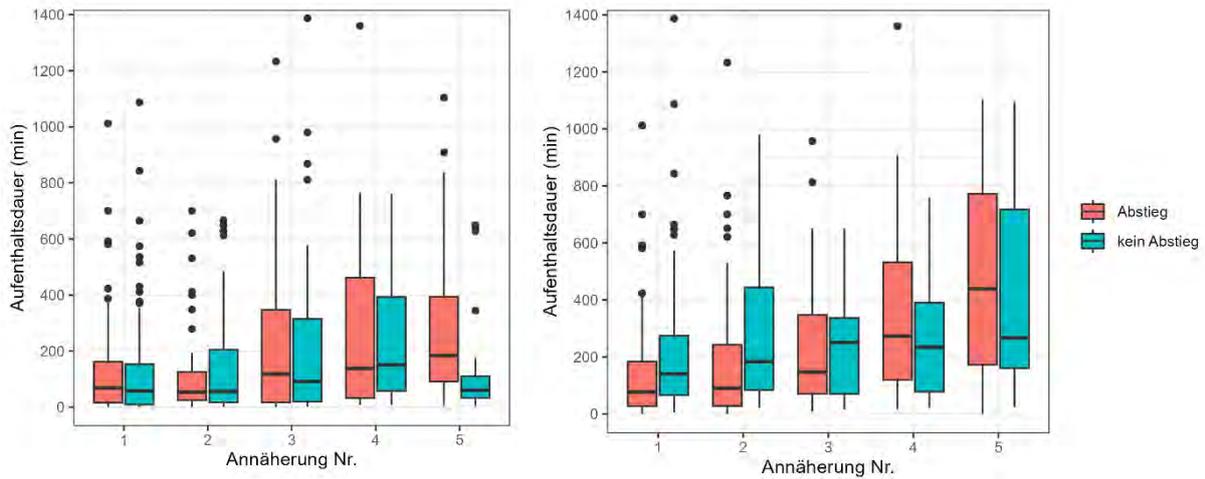


Abbildung 22: Aufenthaltsdauer vor dem Kraftwerk bei den ersten fünf Annäherungen für alle abgestiegenen und nicht abgestiegenen Fische. Annäherungen mit einer Dauer von über 1440 min (24 h) werden nicht angezeigt. Links: 10 konsekutive, rechts: 50 konsekutive Detektionen

Für die abgestiegenen Fische lässt sich die Aufenthaltsdauer für Annäherungen, die mit oder ohne einen Abstieg enden, vergleichen. Annäherungen ohne Abstieg dauerten durchschnittlich länger als Annäherungen des gleichen Individuums, die mit einem Abstieg enden. Dieser Effekt ist jedoch nur bei der Auswertungsmethode mit 50 konsekutiven Detektionen signifikant (*mixed linear regression* mit Individuum als *random effect*, $p < 0.05$; die Dauer von Annäherungen ohne Abstieg war im Mittel 132 ± 62 min länger als von solchen mit Abstieg (Abbildung 23).

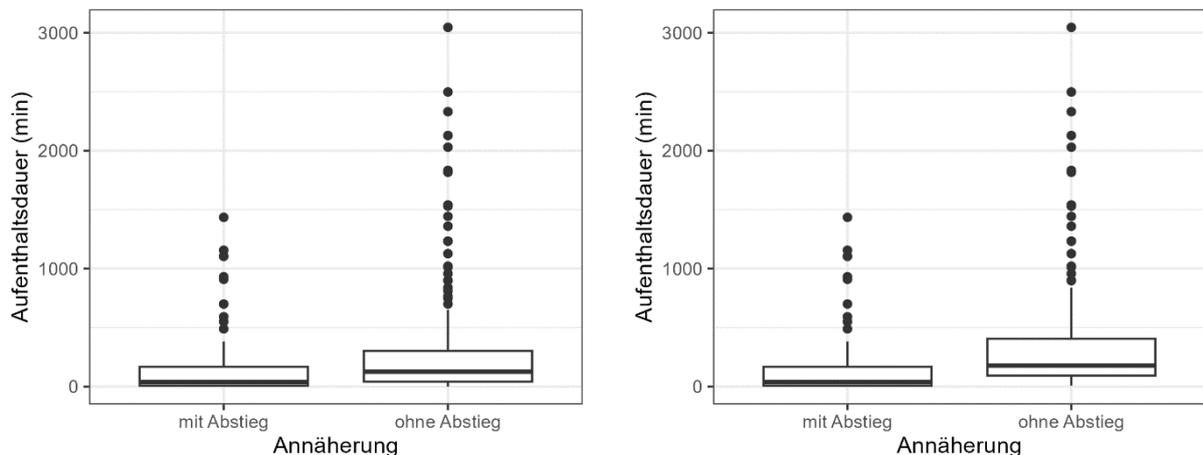


Abbildung 23: Aufenthaltsdauer der im Untersuchungszeitraum abgestiegenen Barben vor dem WKW Bannwil, bei Annäherungen mit und ohne Abstieg. Links: 10 konsekutive Detektionen, nicht signifikant unterschiedlich; Rechts: 50 konsekutive Detektionen, signifikant unterschiedlich

5.2.3 Tageszeitliche Aspekte bei der Annäherung an das Kraftwerk

Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen die Tageszeit einer Annäherung im Verlauf der Untersuchungsperiode. Dabei wurde jeweils die erste Detektion einer Annäherung gewertet. Bei abgestiegenen Fischen wurden nur die Annäherungen bis zum ersten Abstieg einbezogen. Die Annäherung der Fische erfolgte im Tagesverlauf betrachtet verstärkt in der Nacht und den Morgen- bzw. Abendstunden. Insgesamt erfolgten rund 70 % der Annäherungen in der Nacht, rund 80 % in der Nacht und den frühen Morgen und späten Abendstunden (vgl. Tabelle 9). Saisonale Unterschiede waren aufgrund der zeitnahen Abwanderungen nach den Markierungen nicht klar zu identifizieren.



Tabelle 9: Anteile der Annäherungen und der Abstiege bei Nacht. Zudem wurden die Dämmerungszeiten miteinbezogen, indem noch je 30 bzw. 60 min nach Sonnenaufgang und vor Sonnenuntergang abgezogen wurden.

	Annäherungen		Abstiege
	k10	k50	
Nacht (Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang)	68 %	70.3 %	90.9 %
Nacht plus 30 min nach Sonnenaufgang und vor Sonnenuntergang	73.1 %	74.5 %	94.9 %
Nacht plus 60 min nach Sonnenaufgang und vor Sonnenuntergang	78.2 %	79.1 %	97 %

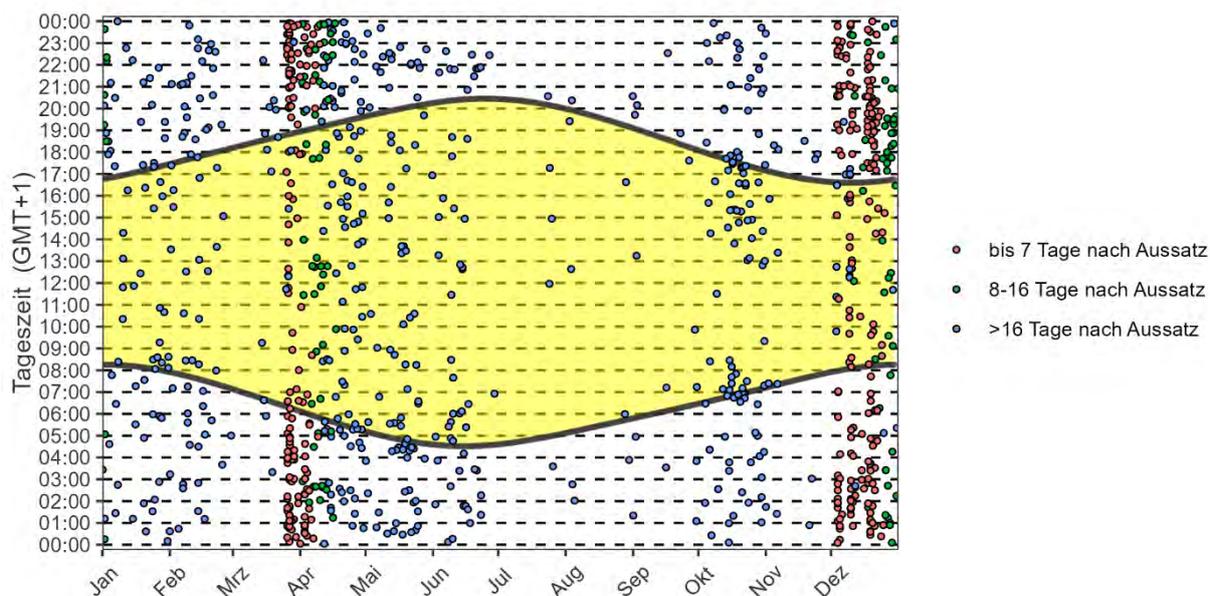


Abbildung 24: Annäherungen (Punkte) an das WKW Bannwil im Oberwasser im Tages- und Jahresverlauf, mit dem Kriterium 10 konsekutiver Detektionen. Gelb: Tag zwischen Sonnenauf- und Untergang. Dargestellt sind die Zeitpunkte der ersten Detektionen aller Annäherungen jedes Fisches.

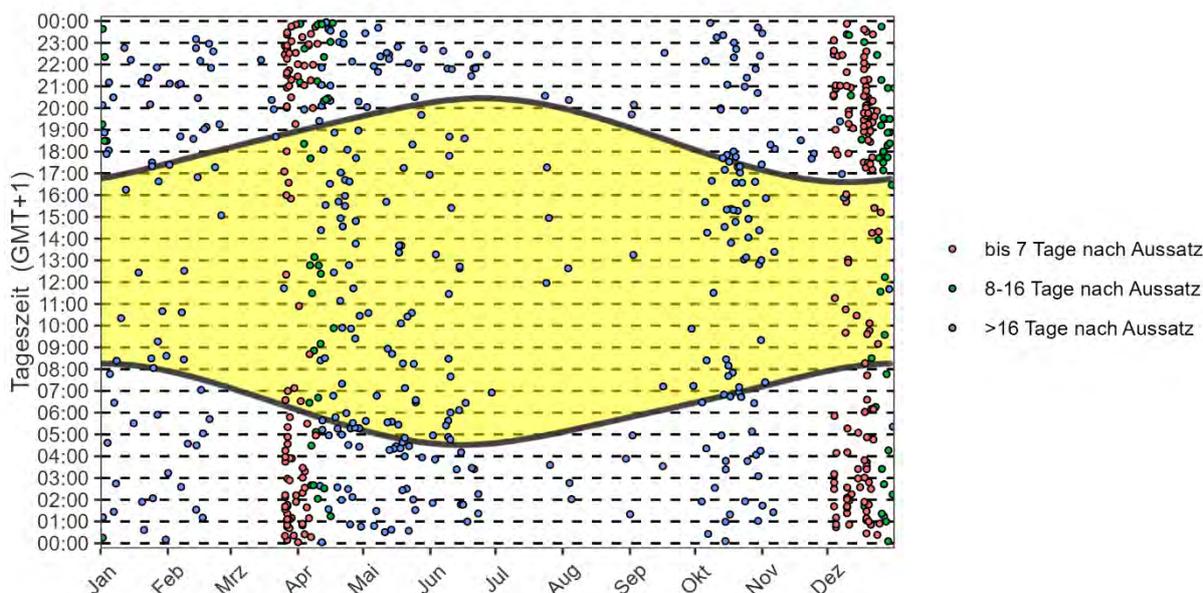


Abbildung 25: Annäherungen (Punkte) an das WKW Bannwil im Oberwasser im Tages- und Jahresverlauf, mit dem Kriterium 50 konsekutiver Detektionen. Gelb: Tag zwischen Sonnenauf- und Untergang. Dargestellt sind die Zeitpunkte der ersten Detektionen aller Annäherungen jedes Fisches.



5.2.4 Auswirkung von Abfluss und Temperatur auf die Annäherungen

Die Variation in der Anzahl Annäherungen im Studienverlauf ist in Abbildung 29 ersichtlich. Kurz nach dem Aussatz der Fische fanden die meisten Annäherungen statt, da sich die Fische nach der Relokation vermehrt bewegten. Die erste Woche nach einem Aussatz wurde für die Vergleiche der Annäherungen mit dem Abfluss und der Wassertemperatur daher nicht verwendet. Ansonsten wurde der Zeitraum 17.12.19 – 31.03.20 berücksichtigt (s. Kap. 4.6.6). Der Anteil der Fische aus dem Oberwasser, die eine Annäherung an das WKW Bannwil durchführt, korreliert leicht positiv mit dem Abfluss der Aare (Spearman's Rangkorrelation, $p < 0.001$, $\rho = 0.2$). Dies gilt sowohl für die Auswertungsmethode der Annäherung mit 10, als auch mit 50 konsekutiven Detektionen. Beim Faktor der Temperatur besteht nur bei der Methode mit 10 konsekutiven Detektionen ein signifikanter, leicht negativer Zusammenhang ($p = 0.02$, $\rho = -0.1$; Abbildung 26). Zwischen den beiden Faktoren Abfluss und Temperatur bestand im untersuchten Zeitraum ein leicht negativer Zusammenhang ($p = 0.03$, $\rho = -0.11$).

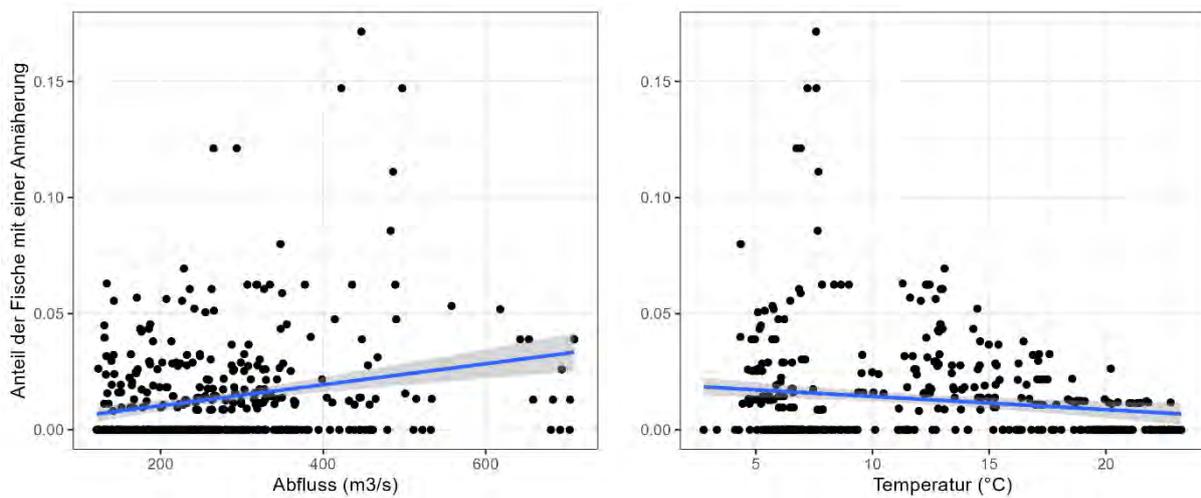


Abbildung 26: Anteil der Fische aus dem Oberwasser, die eine Annäherung (10 konsekutive Detektionen) an das WKW Bannwil durchführt, im Vergleich zum mittleren Abfluss (links) bzw. der mittleren Wassertemperatur (rechts) an diesem Tag. Annäherungen, die innerhalb einer Woche nach dem Aussatz liegen, wurden ausgeschlossen um den Einfluss des Aussatzzeitpunktes zu minimieren. Blau: Regressionslinien mit Konfidenzintervall (grauer Bereich).



5.3 Abwanderungskorridore und Zeitpunkt der Abwanderung

Von den 292 markierten Barben sind 109 Individuen durch das Kraftwerk abgewandert (alle Wanderkorridore). Dies entspricht 37.3 % aller markierten Fische. 173 Barben (59.2 %) sind im Untersuchungszeitraum nicht abgewandert. Bei 10 Barben (3.4 %) ist unklar, ob ein Abstieg stattgefunden hat oder nicht. In den nächsten drei Kapiteln werden die Details zum Zeitpunkt, Korridor und Schwimmtiefe bei den Abwanderungen beschrieben.

5.3.1 Zeitpunkt der Abwanderung

Abbildung 29 auf der nächsten Seite zeigt die Abstiege inkl. Abstiegskorridor sowie die Annäherung der Fische an das WKW Bannwil im Zeitverlauf der Untersuchung. Zudem sind der Abfluss der Aare bei Murgenthal und die Öffnung der Wehre am WKW Bannwil ersichtlich. Vom 01.12.2019 – 31.03.2021 gab es 128 Tage mit Wehrüberfall.

Für 99 der 109 abgewanderten Barben konnte die genaue Abstiegszeit eruiert werden. Damit ist auch die Dauer vom Aussatz bis zum Abstieg bekannt. 35 Fische (35.4 %) sind innerhalb der ersten 24 Stunden abgestiegen, 53 Fische (53.5 %) innerhalb der ersten 48 Stunden. 75 Fische (75.8 %) sind in der ersten Woche abgestiegen, 84 Fische (84.8 %) im ersten Monat (Tabelle 17). Abbildung 27 zeigt zeitliche Verteilung der Abstiege in Wochen für alle abgestiegenen Fische, in Abbildung 28 sind die Abstiege in der ersten Woche nach dem Aussatz weiter aufgeteilt auf die ersten sieben Tage.

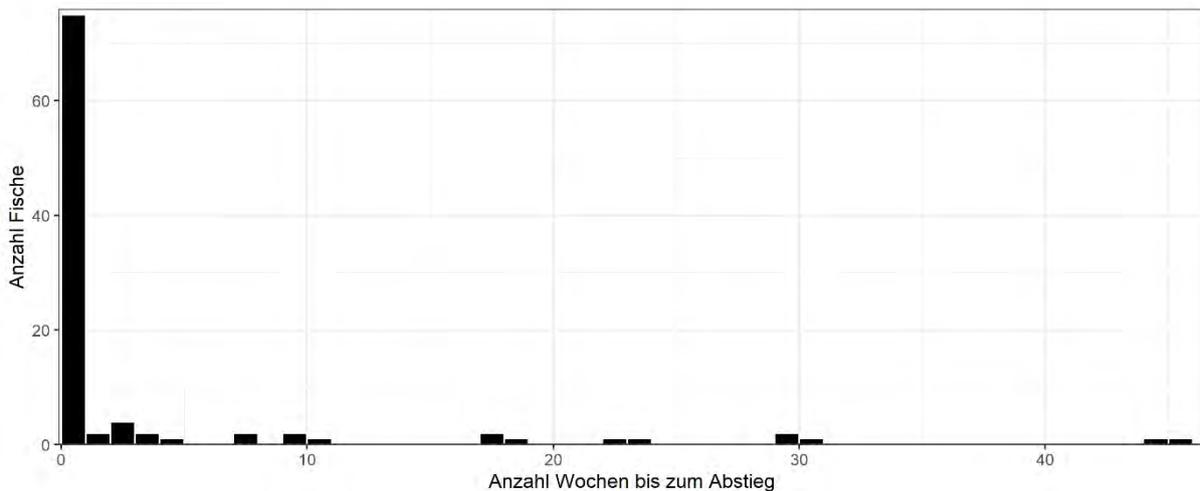


Abbildung 27: Zeit bis zum Abstieg in Wochen. Die erste Woche wird in der folgenden Abbildung in einzelne Tage aufgeteilt.

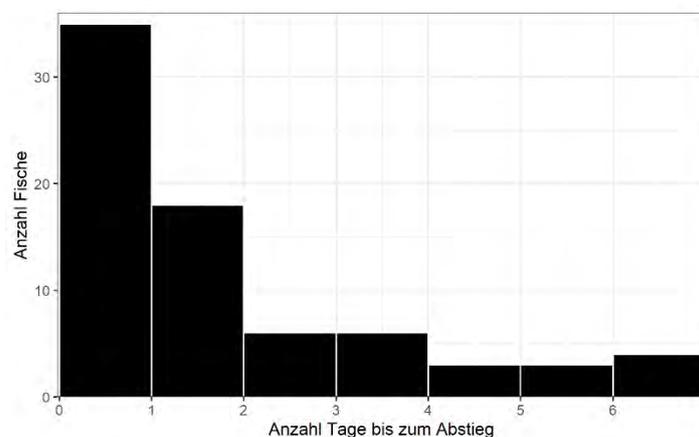


Abbildung 28: Anzahl der abgestiegenen Barben pro Tag in der ersten Woche nach dem Aussetzen



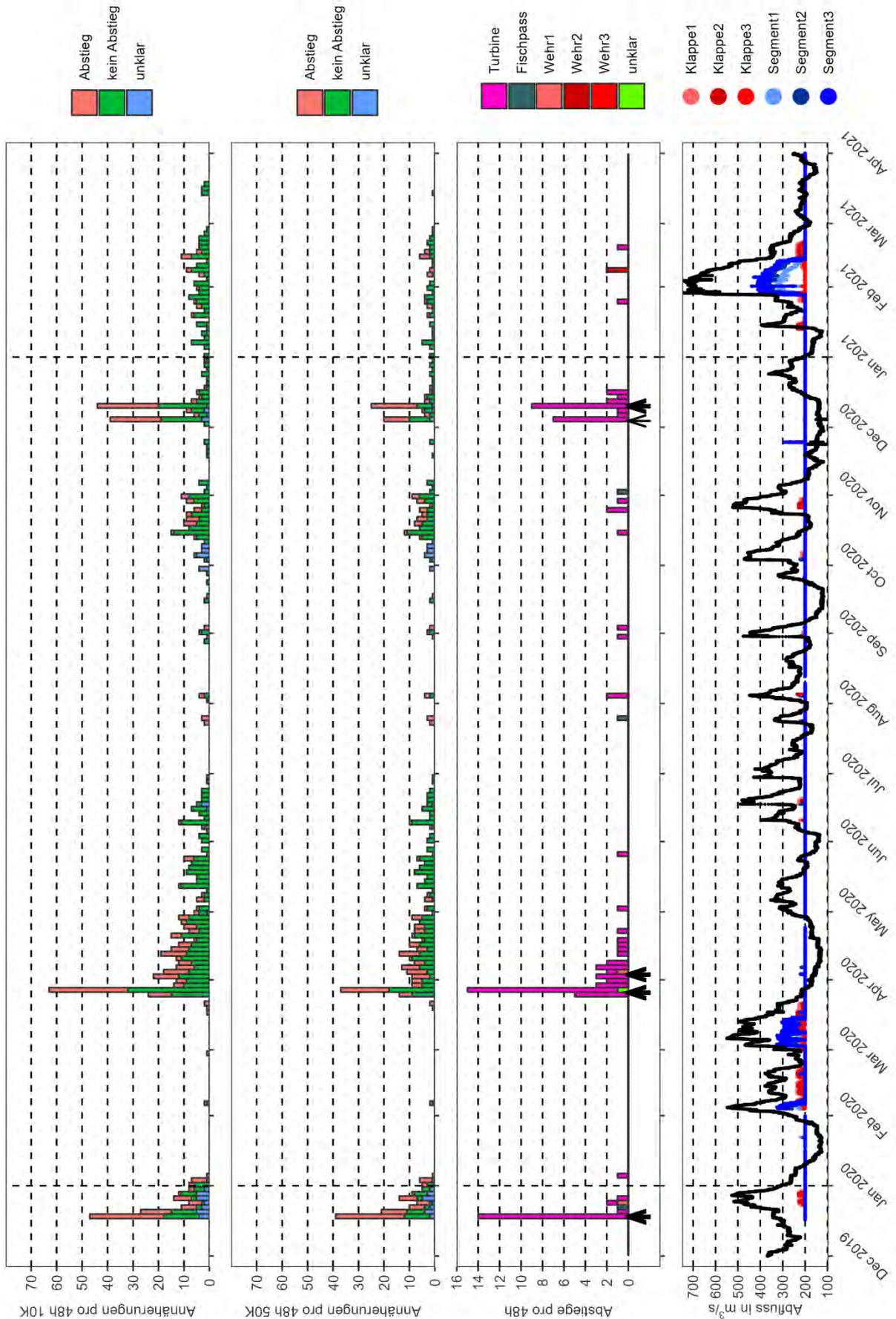


Abbildung 29: Oben: Anzahl Annäherungen der Fische an das WKW Bannwil pro 48 h (10 Konsecutive Einträge (10k) und 50 konsekutive Einträge (50k) als Kriterium für eine valide Annäherung). Mitte: Anzahl abgestiegener Fische pro 48 h mit Angabe des Abstiegskorridors. Die Pfeile bezeichnen den Zeitpunkt des Aussatzes der Fische. Unten: Abfluss der Aare bei der Messtation Murgenthal (schwarz) sowie die Öffnung der Wehre. Diese wurden aus Gründen der besseren Lesbarkeit beim Abfluss 200 m³/s eingezeichnet.



Die Abstiege im Tages- und Jahresverlauf sind in Abbildung 30 ersichtlich. Die höchste Abstiegsaktivität begann abends ab 18 Uhr und dauerte bis in die frühen Morgenstunden um 7 Uhr. Im Verlaufe des Tages erfolgten nur vereinzelte Abstiege. Die saisonalen Aspekte spielten für das diurnale Verhalten wohl eher eine untergeordnete Rolle. Barben sind unabhängig von der Saison nachtaktive Fische. 90.9 % der Barben stiegen in der Nacht ab, sogar 97 % innerhalb der Nacht inklusive der Dämmerungszeiten, das heisst der ersten Morgen- bzw. letzten Abendstunde (Tabelle 9).

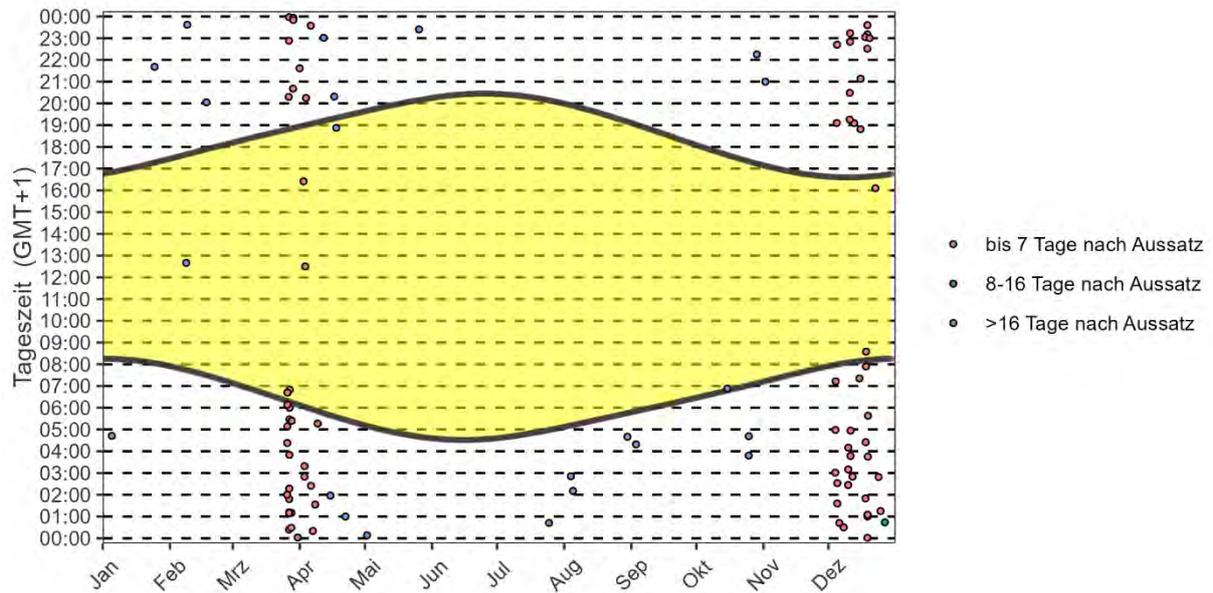


Abbildung 30: Abstiege (Punkte) über den Jahresverlauf und die Tageszeit. Gelb: Tag zwischen Sonnenauf- und Untergang.



5.3.2 Abwanderungskorridore

Ein Überblick der Benutzung der Abwanderungskorridore findet sich in Tabelle 10. Dazu wird angegeben, ob der Fisch überlebte oder mit grosser Sicherheit nicht überlebte (tot). Von den 109 abgestiegenen Fischen stiegen 91 (83.5 % aller abgestiegenen Fische) über die Turbinen ab, die mit über 90.7 % den bei weitem grössten Anteil des Abflusses während der Untersuchungsperiode aufwiesen (Tabelle 2). Der Abstiegsweg über die Wehre stand im Laufe der Untersuchung an 128 Tagen zur Verfügung, an denen die Wehre über eine bestimmte Zeitdauer geöffnet waren und wies einen Abflussanteil von rund 9.2 % auf. Er wurde insgesamt von vier Fischen (3.7 %) genutzt. Zwei Barben stiegen über das Wehr 1, je eine über die Wehre 2 und 3 ab. Drei Fische (2.8 %) benutzten den Fischpass mit einem vergleichsweise vernachlässigbaren Abfluss von 100 l/s (0.04 % des Gesamtabflusses in der Untersuchungsperiode) als Abstiegskorridor und für elf Individuen (10.1 %) konnte der Abstiegszeitpunkt nicht eindeutig identifiziert werden. Die Benutzung der verschiedenen Korridore ist in Abbildung 31 (gelb) graphisch dargestellt. In Tabelle 17 im Anhang sind alle Abstiege und die zugehörigen Abfluss- und Temperaturdaten zum Abstiegszeitpunkt aufgeführt (inkl. Wehrüberfall und dessen Aufteilung auf die verschiedenen Wehrklappen und -segmente).

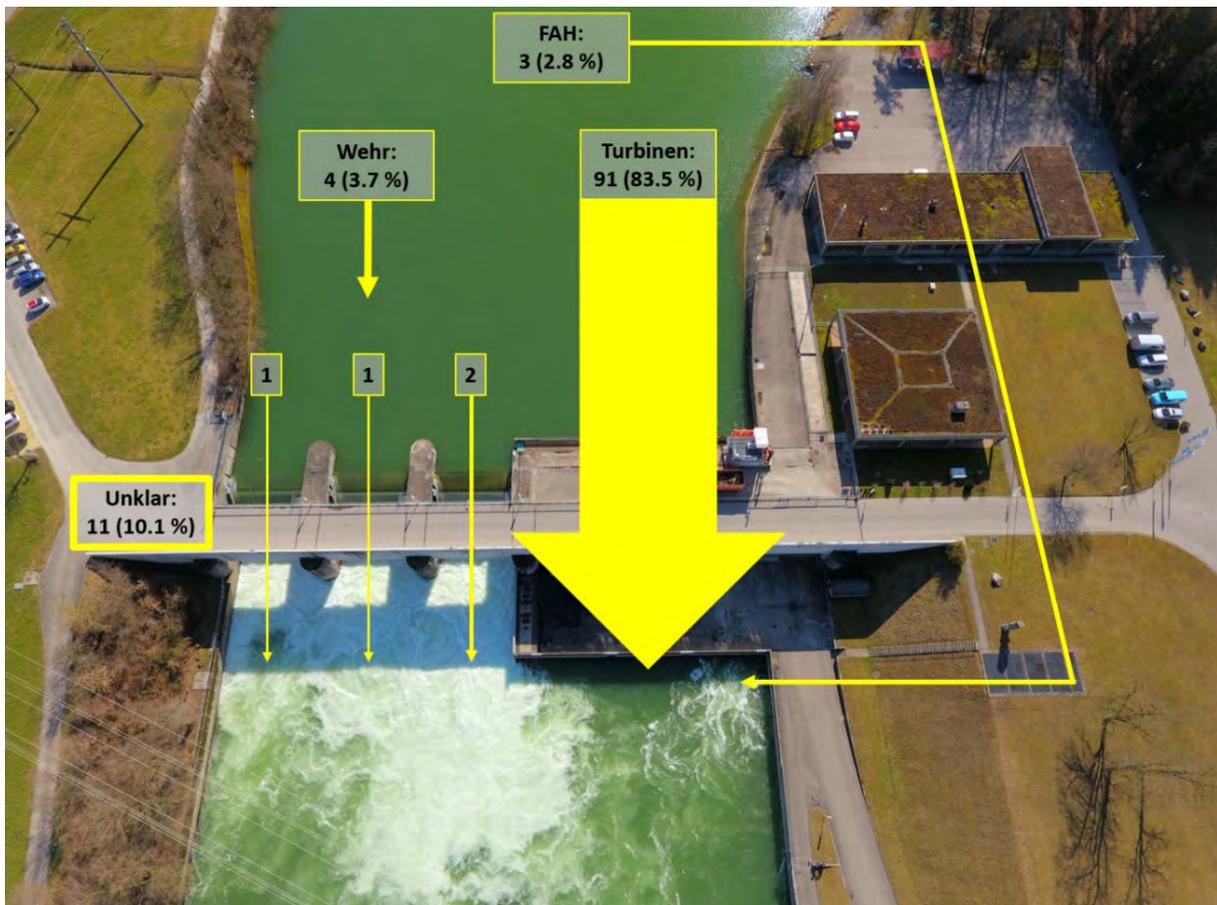


Abbildung 31: Abwanderungskorridore am WKW Bannwil. Die Zahl bezeichnet die Anzahl der über diesen Korridor abgestiegenen Fische (N = 109; FAH = Fischaufstiegshilfe). Die Aufteilung des Abflusses auf die verschiedenen Korridore ist in Tabelle 2 ersichtlich.



Resultate

Tabelle 10: Aufteilung der ausgesetzten Fische hinsichtlich ihres Verhaltens am WKW Bannwil in Bezug auf Tag/Nacht Aktivität und den Betriebszustand (Wehröffnung) des WKW. Für die abgestiegenen Fische ist die Beurteilung des Überlebens angegeben. «Tot» bedeutet hier, dass ein Fisch den Abstieg mit grosser Sicherheit nicht überlebte. Für alle Fische ist zusätzlich aufgelistet, wie viele aus einer Kategorie jeweils mit hoher Wahrscheinlichkeit von einem Prädator erbeutet wurden. Nach einem Prädationsereignis wurden die Fische von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Anzahl Individuen	Tag/Nacht	Wehröffnung	Abstiegskorridor																Gesamt	Prädation								
			Turbine				FAH				Wehr1				Wehr2						Wehr3				unklar			
			überlebt	tot	unklar	gesamt	überlebt	tot	unklar	gesamt	überlebt	tot	unklar	gesamt	überlebt	tot	unklar	gesamt			überlebt	tot	unklar	gesamt	überlebt	tot	unklar	gesamt
Abgestiegen	Tag	Ja	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2	1
		nein	3	0	3	6	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0
	Nacht	ja	6	2	1	9	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	11	1
		nein	54	2	20	76	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	79	15
	unklar	unklar																					4	0	6	10	10	0
Gesamt abgestiegen			63	4	24	91	3	0	0	3	2	0	0	2	0	0	1	1	0	0	1	1	5	0	6	11	109	17
Nicht Abgestiegen trotz Annäherung**	nur Tag	Ja*																									0	0
		nein																									10	6
	nur Nacht	Ja*																									3	1
		nein																									34	17
Tag & Nacht	Ja*																									8	0	
	nein																									52	25	
Nicht abgestiegen ohne Annäherung**	-	-																									66	24
Gesamt nicht abgestiegen																											173	73
Unklar ob abgestiegen trotz Annäherung**	nur Tag	Ja*																									0	0
		nein																									0	0
	nur Nacht	Ja*																									0	0
		nein																									1	0
Tag & Nacht	Ja*																									1	0	
	nein																									5	1	
Unklar ob abgestiegen ohne Annäherung**	-	-																									3	0
Gesamt unklar, ob abgestiegen																											10	1
												Gesamt				292	91											

*bei mindestens einer Annäherung des Fisches war das Wehr geöffnet

** Annäherung mit mindestens 10 konsekutiven Einträgen



Viele Fische stiegen als Reaktion auf die Relokation direkt nach dem Aussatz ab. Welche Bedingungen sie am WKW Bannwil antrafen (z. B. Position der Wehre), wurde daher vom Aussatzzeitpunkt beeinflusst. Werden die Abstiege ausgeschlossen, die kurze Zeit nach dem Aussatz erfolgten, kann dieser Effekt verringert werden. Von den 99 Fischen, deren genauer Abstiegszeitpunkt ermittelt werden konnte, stiegen 77 innerhalb der ersten zehn Tage ab. Zwischen zehn und 16 Tagen nach dem Aussatz fanden keine Abstiege statt. Diese Lücke wurde als Grenze verwendet. Die verbleibenden 22 Abstiege, die mehr als 16 Tage nach dem Aussatz erfolgten, teilten sich folgendermassen auf die Abstiegskorridore auf: 18 (81.8 %) über die Turbinen, zwei (9.1 %) über die Wehre und zwei (9.1 %) via Fischpass (Abbildung 32, orange). Wann genau diese Fische abstiegen und welche Bedingungen zu diesem Zeitpunkt herrschten ist in Tabelle 11 aufgeführt. Es handelt sich dabei um einen Auszug aus Tabelle 17 (Anhang 10.3.1), in der alle Abstiege aufgeführt sind. Sieben dieser 22 Fische stiegen zu einem Zeitpunkt ab, an dem Wehrüberfall herrschte. Davon benützten fünf Barben trotz Wehrüberfall den Weg durch die Turbinen (Anteil Wehrabfluss 0.1 – 21.3 %). Zwei Barben stiegen via Wehr ab, beide bei einem Wehrabfluss-Anteil von > 50 %, wovon > 98 % durch die Segmente, also unter den Wehrfeldern hindurch, flossen.

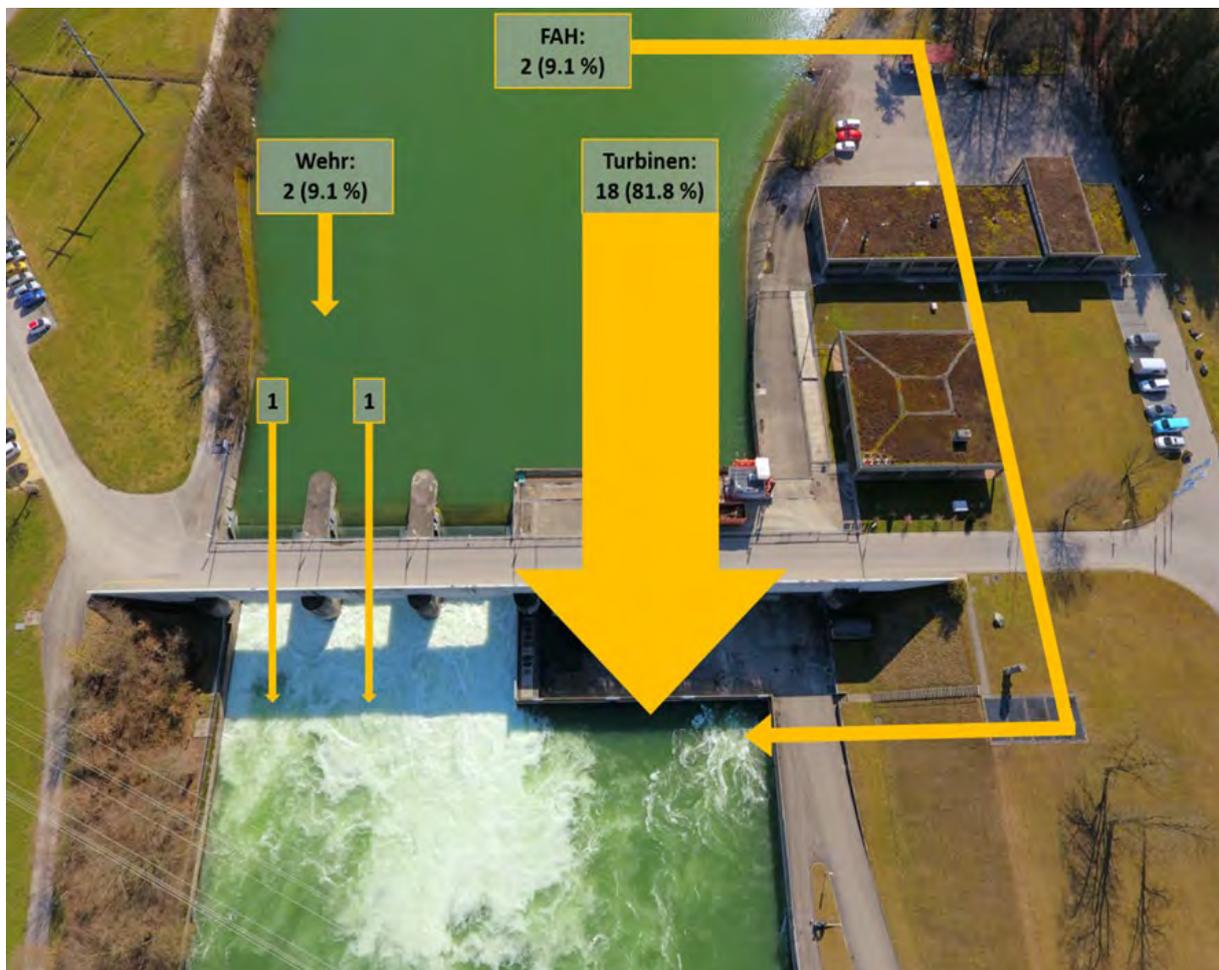


Abbildung 32: Abwanderungskorridore am WKW Bannwil mindestens 16 Tage nach Aussatz. Die Zahl bezeichnet die Anzahl der über diesen Korridor abgestiegenen Fische (N = 24; FAH = Fischaufstiegshilfe). Die Aufteilung des Abflusses auf die verschiedenen Korridore ist in Tabelle 2 ersichtlich.



Tabelle 11: Abstiegswege und Zeitpunkte für alle mehr als 16 Tage nach dem Aussatz abgestiegenen Fische mit deren Abstiegskorridor und Zeitpunkt. Zudem sind das Überleben («tot» = hat mit hoher Sicherheit nicht überlebt), der Wehrabfluss im Gesamten, sowie für die sechs Wehrteile (in grau) zum Abstiegszeitpunkt, der Gesamtabfluss als 2h-Mittel, Abfluss und Temperatur der Aare sowie der Wehranteil des Abflusses zum Abstiegszeitpunkt angegeben. Abkürzung Abstiegswege: T = Turbine, W1-W3 = Wehrfelder 1-3, FAH = Fischaufstiegshilfe

Tag ID	Tage bis zum Abstieg	TL in mm	Abstiegsweg	Abstiegszeitpunkt	Überlebt?	Abfluss Klappe 1 in m ³ /s	Abfluss Klappe 2 in m ³ /s	Abfluss Klappe 3 in m ³ /s	Abfluss Segment 1 in m ³ /s	Abfluss Segment 2 in m ³ /s	Abfluss Segment 3 in m ³ /s	Gesamtabfluss_Wehr in m ³ /s	Gesamtabfluss Wehr 2h (Mittelw. in m ³ /s)	Wassertemperatur in °C	Abfluss Aare in m ³ /s	% Wehrabfluss
26	315	457	T	28.10.20 22:15	ja	17.7	6.6	0	0	0	0	24.3	3.7	12.4	465.2	5.2
44	312	507	T	25.10.20 04:42	ja	0	0	0	0	0	0.4	0.4	0.1	12.8	336.9	0.1
58	122	383	FAH	25.07.20 00:42	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	20.3	327.8	0
60	18	419	T	05.01.20 04:43	tot	0	0	0	0	0	0	0	0	7.1	262.6	0
85	67	430	W2	08.02.21 23:37	unklar	5.9	0	0	67.6	118.4	150.7	342.6	57	5.7	592.1	57.9
98.5	52	476	T	24.01.21 21:41	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	5.2	261.2	0
112	205	427	T	25.10.20 03:48	ja	0	0	0	0	0	0.4	0.4	0.1	12.8	338.1	0.1
135	67	450	W3	08.02.21 12:40	unklar	2.3	0	0	80.5	132.9	153.8	369.5	62.7	5.8	618.6	59.7
178	70	472	T	17.02.21 20:03	unklar	35.7	28.8	10.5	0	0	0	75	12.6	5.4	352.1	21.3
183	204	309	T	15.10.20 06:53	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	13.2	231.4	0
219	131	350	T	05.08.20 02:11	tot	27.3	8.5	0	0	0	0	35.8	0.6	20.6	379.6	9.4
223	16	412	T	11.04.20 23:01	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	11.8	130.4	0
234	161	412	T	03.09.20 04:19	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	18.8	340.4	0
235	22	378	T	16.04.20 20:19	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	9.6	141.2	0
237	158	381	T	30.08.20 04:40	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	19.8	194.1	0
247	29	367	T	02.05.20 00:08	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	13.7	296.3	0
268	19	352	T	22.04.20 01:00	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	9.9	170.1	0
283	124	315	T	04.08.20 02:51	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	20.7	391.2	0
295	22	361	T	17.04.20 18:52	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	9.9	144.7	0
302	19	317	T	15.04.20 01:58	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	12.1	135.6	0
310	213	397	FAH	01.11.20 21:00	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	12.2	292.2	0
314	53	371	T	25.05.20 23:24	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	16.8	205.2	0



Die folgenden vier Abbildungen zeigen exemplarisch die Radiosignale von vier absteigenden Fischen jeweils zwei Stunden vor und nach dem Abstieg. Auf jeder Grafik sind die Signale der Antennen dargestellt, welche den Fisch erfassten (Antennenbezeichnungen vgl. Tabelle 3). Damit sollen nicht möglichst natürliche Abstiegsmuster gezeigt werden, sondern Beispiele, wie sich ein Abstieg aus den Radiosignalen interpretieren liess. Die Interpretation des Abstiegsweges erfolgte stets über die grafische Analyse sowie über die Originaleinträge der Empfangsgeräte.

Der Abstieg der Barbe mit ID 105 kann zusätzlich anhand der gespeicherten Daten der Sensoren dokumentiert werden (Abbildung 37), da ihr Tag im Rahmen des Wiederfangs entfernt werden konnte. Der Fisch wurde am 26.03.2020 mit einem Loggertag markiert. Dieser speichert in einem Intervall von 25 Sekunden die Temperatur sowie die Tiefe des Fisches. Am selben Tag stieg er kurz vor Mitternacht über die Turbine ab und überlebte. Anschliessend schwamm er wiederum in den Fischpass ein. Vom 15.05. – 10.09.2020 wurde er auf halber Strecke zwischen Bannwil und Wynau durch das mobile Tracking mehrmals detektiert. Danach schwamm er wieder in den Fischpass ein, wo er am 03.12.2020 erneut gefangen und ihm der Loggertag entnommen wurde. Der Fisch wies keine Verletzungen auf, welche von einer Turbinenpassage herrühren könnten. Abbildung 37 zeigt den Turbinendurchgang des Fisches am 26.03.2020 um 23:58 Uhr. Vor dem Abstieg tauchte der Fisch aus 6.4 m auf eine Tiefe von 10.7 m ab. 25 Sekunden später – nach der Turbinenpassage – betrug die Tiefe noch 1.8 m.

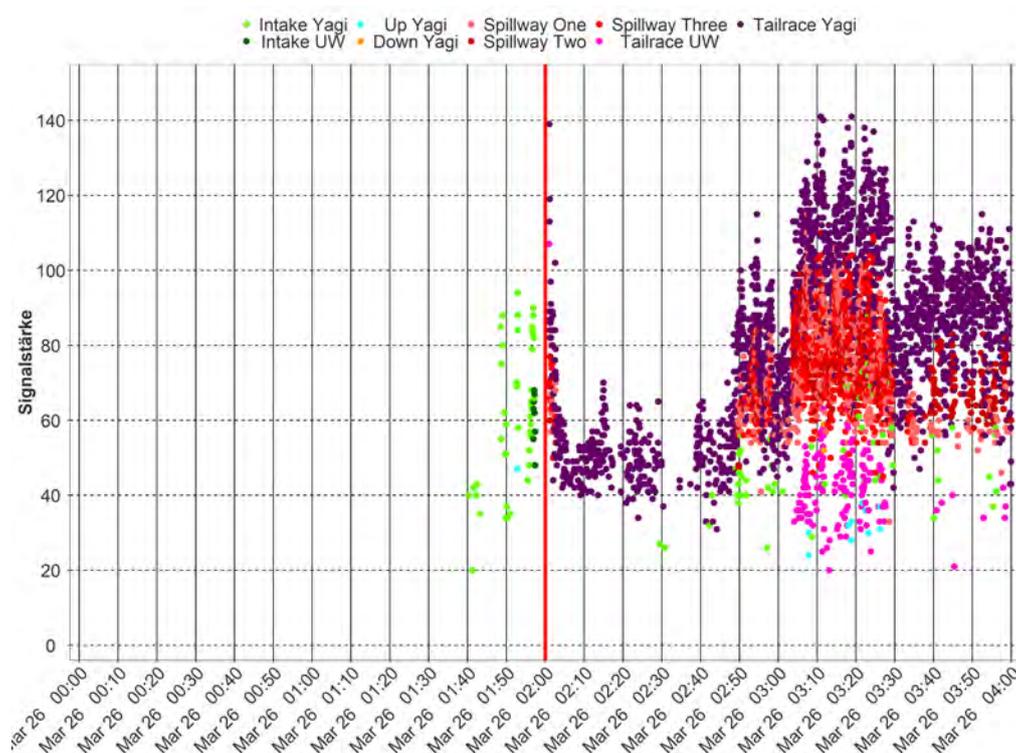


Abbildung 33: Barbe mit ID 59 (Markierung 25.03.20, Aussatzzeit 12:30). Dieser Fisch wurde am 26.03.20 20 Minuten vor dem Abstieg auf den Antennen im Oberwasser (YAGI und Unterwasserantenne, grün) erfasst. Um 02:03 Uhr stieg er über die Turbine ab und wurde sofort auf der Unterwasserantenne sowie auf der YAGI-Antenne im Unterwasser registriert. Der Fisch überlebte den Abstieg und wurde am 09.12.2020 wiederum im Fischpass gefangen.



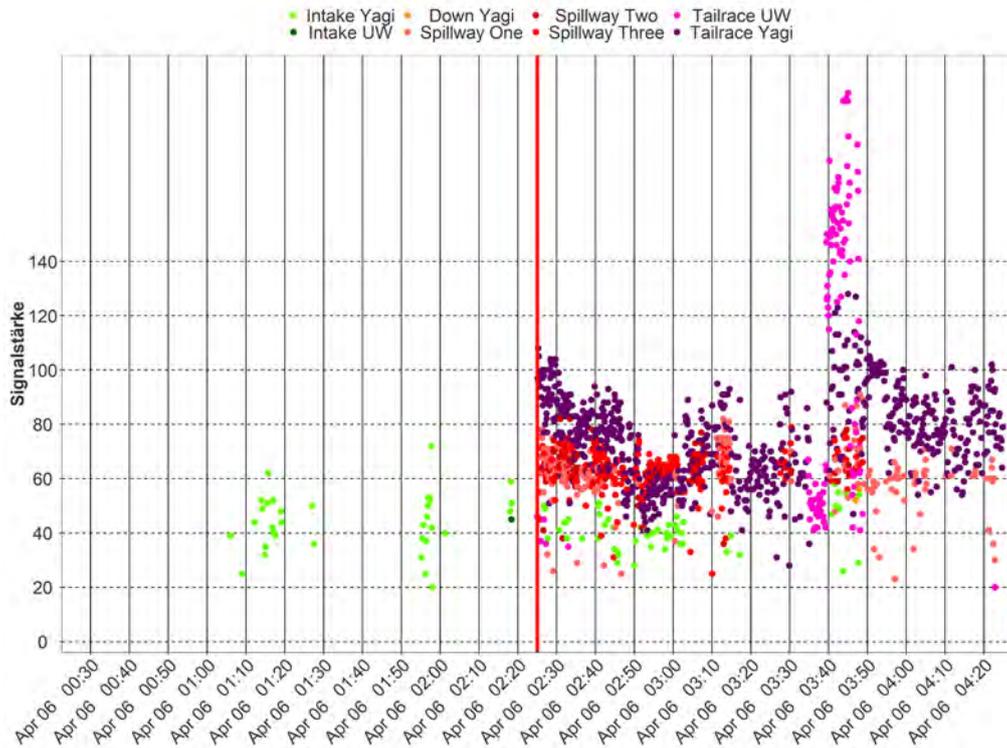


Abbildung 34: Barbe mit ID 113 (Markierung 02.04.20, Aussatzeit 17:15 Uhr). Diese Barbe wurde am 06.04.20 ca. 80 Minuten vor dem Abstieg im Oberwasser detektiert. Um 02:25 Uhr stieg sie über die Turbine ab und wurde zuerst von den Antennen im Unterwasser (YAGI und Unterwasserantenne) erfasst. Anhand der späteren Detektionen konnte nicht eindeutig entschieden werden, ob der Fisch die Turbinenpassage überlebte.

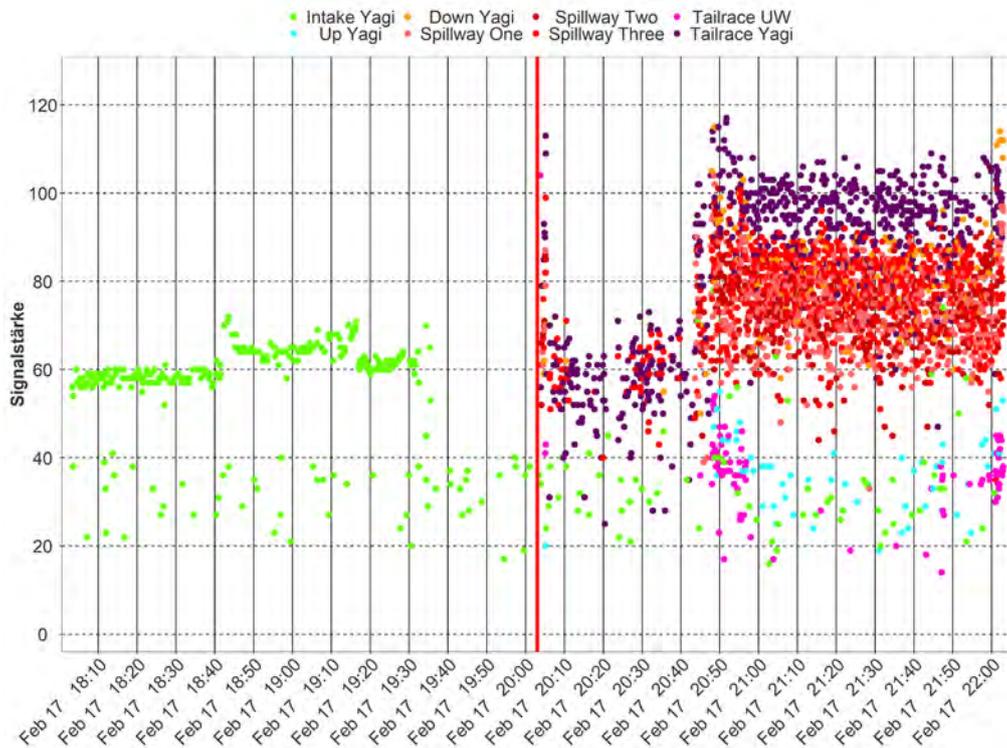


Abbildung 35: Barbe mit der ID 178 (Markierung 09.12.20, Aussatzeit 14:30 Uhr). Der Fisch wurde bereits zwei Stunden vor dem Abstieg im Oberwasser detektiert. Am 17.02.21 stieg er bei geöffneten Wehren über die Turbine ab. Dies kann durch die zeitliche Abfolge der Detektionen auf den Antennen nachvollzogen werden: auf der Unterwasserantenne beim Turbinenausgang wurde der Fisch um 20:03 Uhr erfasst, die Wehrantennen detektierten ihn erst später.



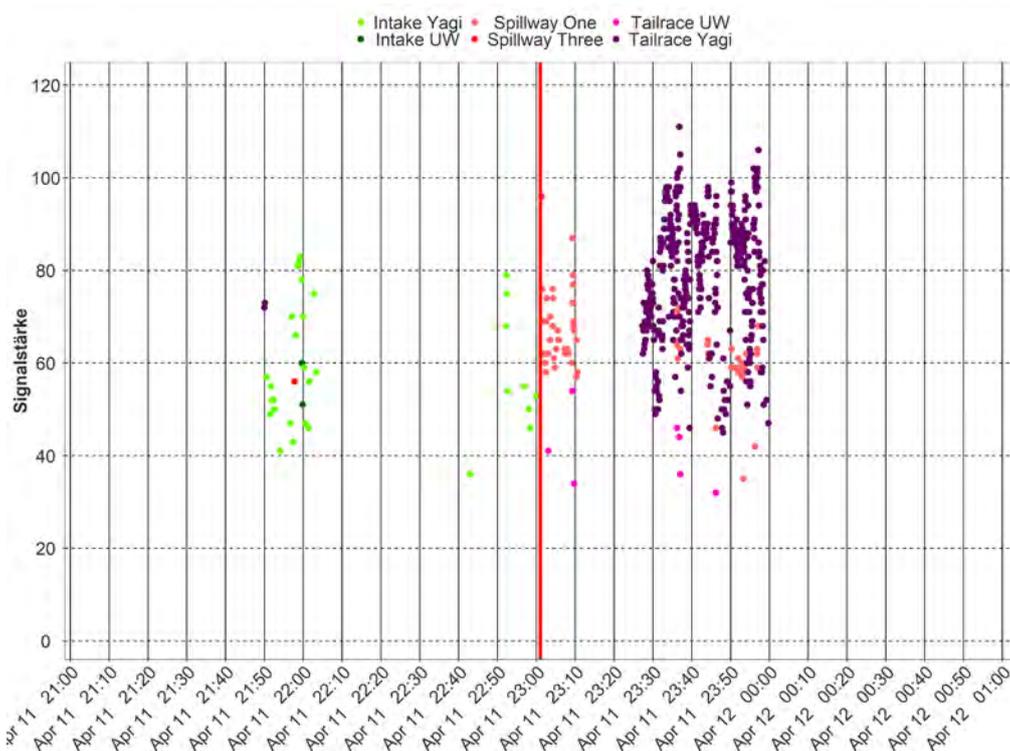


Abbildung 36: Barbe mit der ID 223 (Markierung 26.03.20, Aussetzzeit 14:45 Uhr). Der Fisch erschien am 11.04.20 70 Minuten vor dem Abstieg im Oberwasser. Um 23:01 Uhr stieg er über die Turbine ab, wo er sofort detektiert wurde. Er überlebte die Turbinenpassage und stieg erneut in den Fischpass ein. Diesen verliess er am 30.04.20 und wurde anschliessend bis Ende September zwischen Bannwil und Wynau mehrmals im mobilen Tracking registriert. Ab 12.10.20 war er wieder im Unterwasser des WKW Bannwil und stieg am 10.11.20 in den Fischpass ein. Am 08.12.20 wurde er dort gefangen und wiederum oberhalb des WKW Bannwil ausgesetzt. Am 09.12.20 um 21:48 Uhr stieg er ein zweites Mal über die Turbine ab.

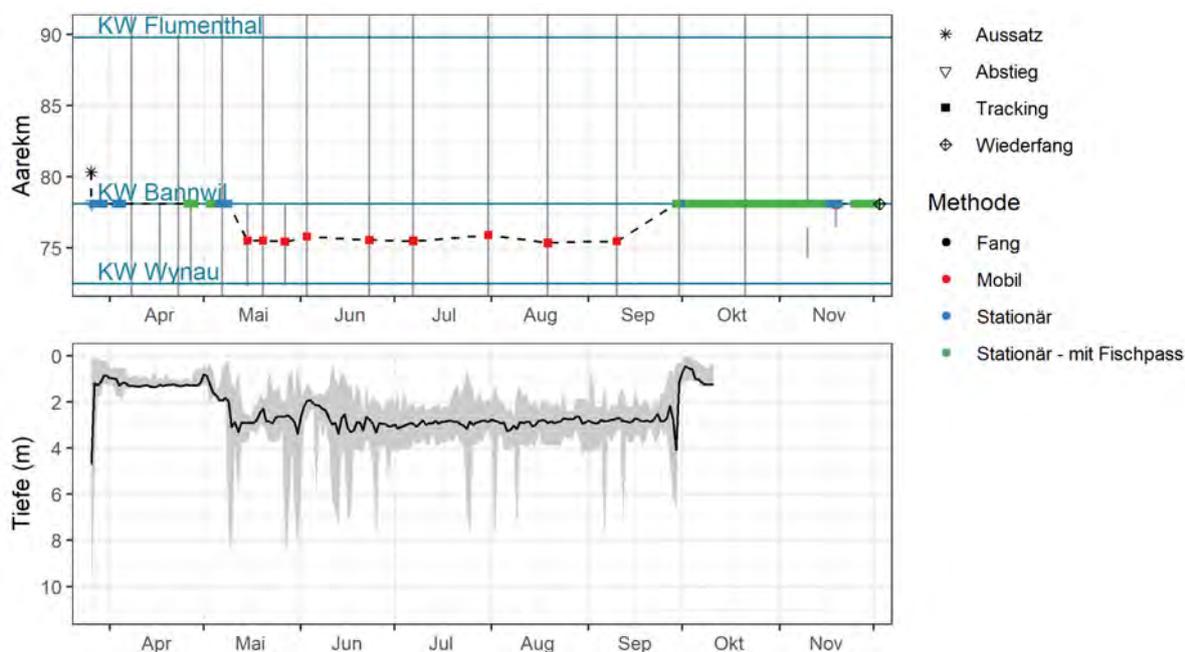


Abbildung 37: Oben: Fundorte der Barbe mit ID 105 im stationären (blau/grün) und mobilen (rot) Tracking. Vertikale Striche bezeichnen Datum und Bereich der mobilen Trackings. Unten: Aufgezeichnete Loggerdaten der Barbe mit ID 105. Die Daten des Fisches wurden ab der Markierung bis zum 11.10.2020 aufgezeichnet. Schwarze Linie=Tagesmittelwerte, grauer Bereich=Variationsbreite. Klar ersichtlich ist der kurze Aufenthalt an der tiefsten Stelle, bevor der Fisch in die Turbine hineinschwimmt (Ende März), sowie die geringen Tiefen während dem Aufenthalt im Fischpass (April und Oktober).



5.3.3 Schwimmtiefen

Besonders interessant ist die Schwimmtiefe der Fische, bevor sie über die Turbinen am WKW Bannwil absteigen. Die Detektionsdistanzen zur Turbine in tiefen Stellen ($> 5\text{ m}$) betragen zirka bis zu 50 m , hält sich der Fisch aber oberflächennah auf (Tiefe bis 3 m), so kann die Detektionsdistanz über $100\text{--}300\text{ m}$ betragen. Für insgesamt 22 Fische konnten Tiefendaten unmittelbar vor dem Abstieg mittels Tiefensensor registriert werden (Abbildung 39). Detaillierte Darstellungen der Schwimmtiefen für alle Fische mit Sensortags finden sich im Anhang unter dem Kapitel 10.3.2. Die Fische nutzten fast die komplette Tiefe vor dem Turbineneinlauf. Die Detektionswahrscheinlichkeit ist in den tieferen Stellen geringer. Allerdings ist nur für 2 Fische (ID 164 und ID 178) ein Einstieg unterhalb der Turbinenachse anzunehmen. Bei der ID 164 könnte kurz vor der Turbinenpassage noch ein Wechsel auf den Bereich oberhalb der Turbinenachse erfolgt sein. Die restlichen 20 Fische näherten sich bereits im oberen Bereich des Turbineneinlaufs oder gar darüber, wie zum Beispiel die Fische mit der IDs 98.5, 165 und 112. Diese näherten sich mit einer Schwimmtiefe von ca. $0\text{--}2\text{ m}$. Die restlichen Fische schienen den Bereich von $4\text{--}10\text{ m}$ Tiefe zu nutzen. Bei einigen Fischen kann ein Abtauchen vor dem Abstieg beobachtet werden (z. B. ID 14, 98.5, 113, 164). Der Verlauf gleicht fast der Krümmung des Turbineneinlaufs hinter dem Rechen (vgl. Abbildung 38). Natürlich kann es aufgrund dieser Daten nicht sicher belegt werden, aber es scheint, als würden sich einige der Barben langsam entlang der oberen Begrenzung des Turbineneinlaufs in die Turbine begeben. Ob sie dabei der Struktur oder Strömungen folgen kann nicht beurteilt werden.

Zudem gab es 11 weitere Fische mit Loggertags, die über die Turbinen abstiegen. Grafiken zu den Tiefendaten dieser Fische finden sich im Anhang (Abbildung 61 ff.). Von diesen wurden vor dem Abstiegszeitpunkt jedoch keine validen Signale registriert, und es ist demnach keine Aussage zur Annäherungstiefe möglich. Die fehlenden Daten könnten zum einen durch eine reduzierte Signalstärke, wenn sich ein Radiosender in grösserer Tiefe befindet, zum anderen durch eine Kollision der Signale mit anderen Sendern begründet sein. Die Verteilung der Tiefen vor dem Abstieg kann daher nicht als repräsentativ angesehen werden und gibt eher einen Aufschluss über die Spannweite der genutzten Tiefen. Es ist möglich, dass sich einige der Fische ohne valide Signale unterhalb der Turbinenachse dem Einlauf näherten und daher nicht erfasst wurden.

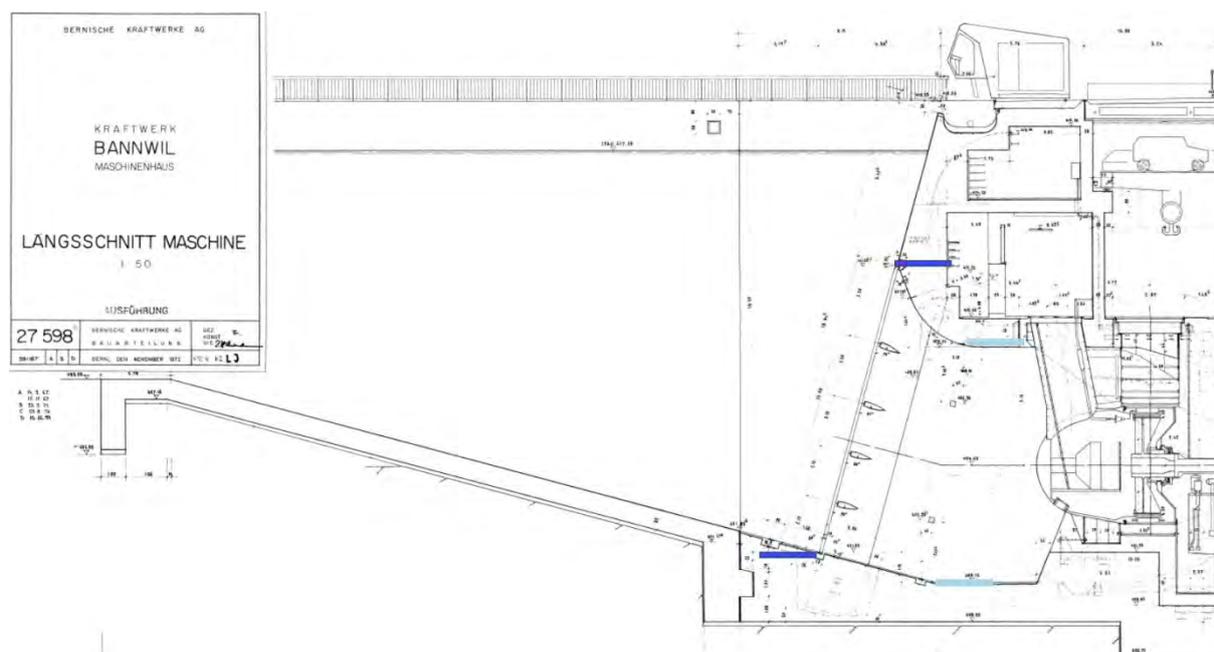


Abbildung 38: Längsschnitt der Situation vor dem Turbineneinlauf am WKW Bannwil (Plan BKW). Die dunkelblauen Balken markieren die obere und untere Begrenzung des Rechens, die hellblauen Balken den Grund und die obere Begrenzung des Turbineneinlaufs. Die Farbmarkierungen entsprechen denjenigen in den Darstellungen zur Schwimmtiefe.



Aus den Darstellungen in Abbildung 39 ist deutlich erkennbar, dass vor allem bei Fischen, die sich in grösseren Tiefen annäherten, nach der Turbinenpassage ein Sprung auf eine geringere Tiefe vollzogen wurde³. Dies war bedingt durch die im Unterwasser begrenzte Gewässertiefe. Meist kamen die Fische im Unterwasser in einen Bereich von ca. 4 m Tiefe. Vereinzelt gab es auch Exemplare, die nach dem Abstieg in 2 m Tiefe oder flacher detektiert wurden (z. B. ID 171 oder ID 160). Häufig stellten sich die Fische, zumindest in der ersten Stunde nach dem Abstieg, relativ konstant auf eine Tiefe ein.

³ Die dargestellten Begrenzungen des Turbineneinlaufs wurden in den Detaildarstellungen zur Schwimmtiefe jedes Fisches (Abbildung 39 und Kapitel 10.3.2) auf den Oberwasserpegel angeglichen, da dieser in Abhängigkeit des Abflusses und der Wehrsteuerung variierte. Die Auflösung der Angleichung betrug maximal 30 Sekunden, es wurde der am nächsten zum Abstiegszeitpunkt eines Fisches korrespondierende Oberwasserpegel zur Berechnung der Tiefen der Turbineneinlässe herangezogen. Insgesamt handelte es sich in den überwiegenden Fällen höchstens um wenige Zentimeter, daher fallen die Angleichungen in den Darstellungen der Tiefen bei der Turbinenpassage nicht wirklich auf. Als Referenzoberwasserpegel wurden 417.3 m ü. M. eingesetzt. Die Tiefe der Oberkante des Rechens vor der Rundung zum Turbineneinlauf liegt 4.71 m darunter, die Unterkante des Rechens 16.3 m darunter. Der gerade Turbinenschacht hat eine Oberkante bei 8.05 m und eine Unterkante bei 17.55 m unterhalb des Normalpegels.



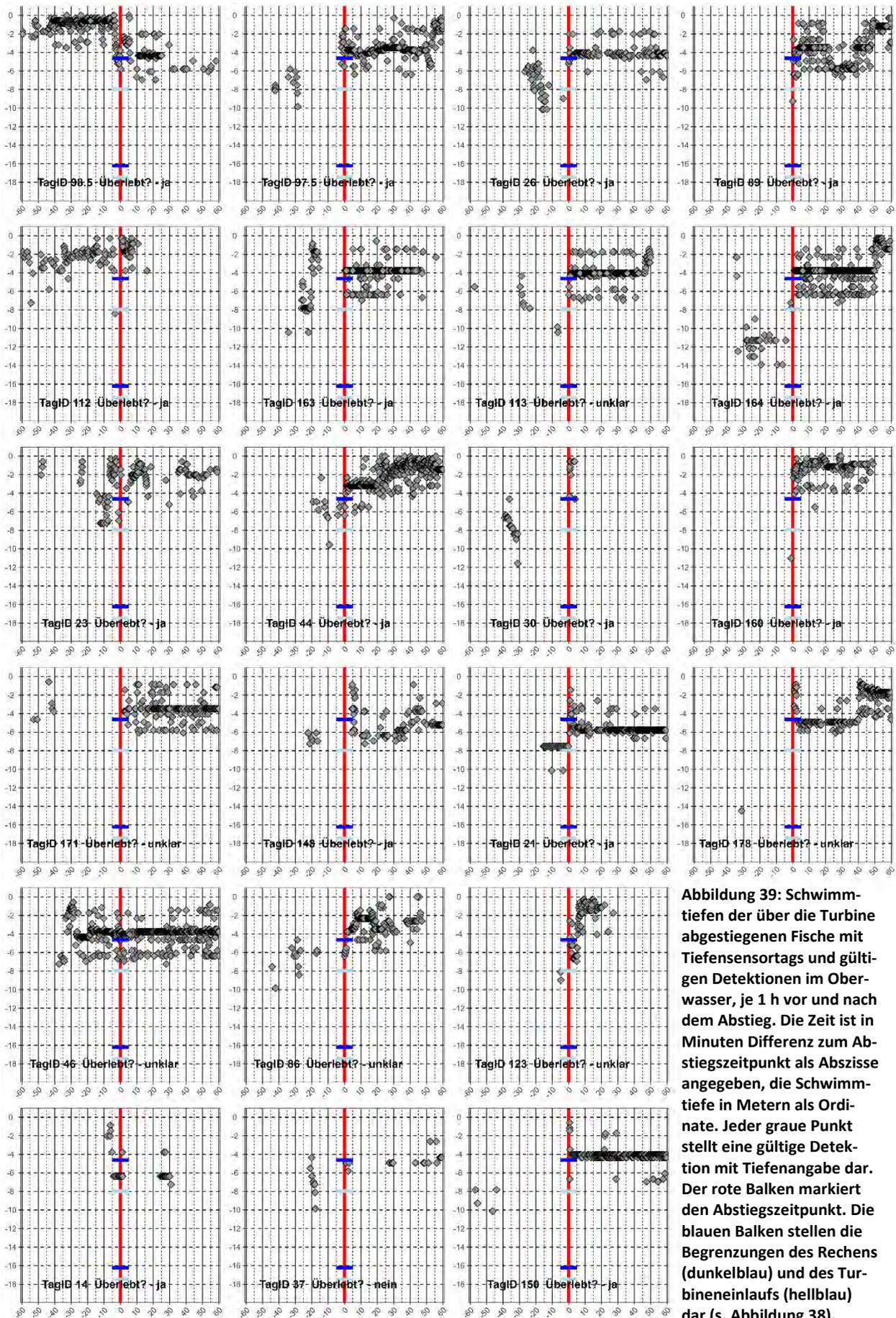


Abbildung 39: Schwimm-tiefen der über die Turbine abgestiegenen Fische mit Tiefensortags und gültigen Detektionen im Oberwasser, je 1 h vor und nach dem Abstieg. Die Zeit ist in Minuten Differenz zum Abstiegszeitpunkt als Abszisse angegeben, die Schwimm-tiefe in Metern als Ordinate. Jeder graue Punkt stellt eine gültige Detektion mit Tiefenangabe dar. Der rote Balken markiert den Abstiegszeitpunkt. Die blauen Balken stellen die Begrenzungen des Rechs (dunkelblau) und des Turbineneinlaufs (hellblau) dar (s. Abbildung 38).



5.4 Überlebensraten der abgewanderten Fische

91 Fische sind über die Turbine abgewandert. Anhand der weiteren Detektionen nach der Passage konnte ermittelt werden, das von diesen Fischen mindestens 63 (69 %) überlebt haben. Für die übrigen 26.4 % kann das Überleben nicht bestätigt werden, 4.4 % sind mit grosser Sicherheit gestorben. Vier Barben stiegen über das Wehr ab, wovon zwei mit Sicherheit überlebten, während für die anderen beiden das weitere Schicksal unklar blieb. Zwei Barben stiegen über die Fischtreppe ab, beide überlebten den Abstieg.

Von Interesse ist die Länge der Fische, welche die Turbinen passierten. Aus Abbildung 40 sind die Totallängen der Fische ersichtlich, welche die Turbinenpassage überlebten (1. Abstieg). Eine logistische Regressionsanalyse konnte keinen Zusammenhang der Überlebenswahrscheinlichkeit bei der Turbinenpassage in Abhängigkeit von der Totallänge der Barben nachweisen.

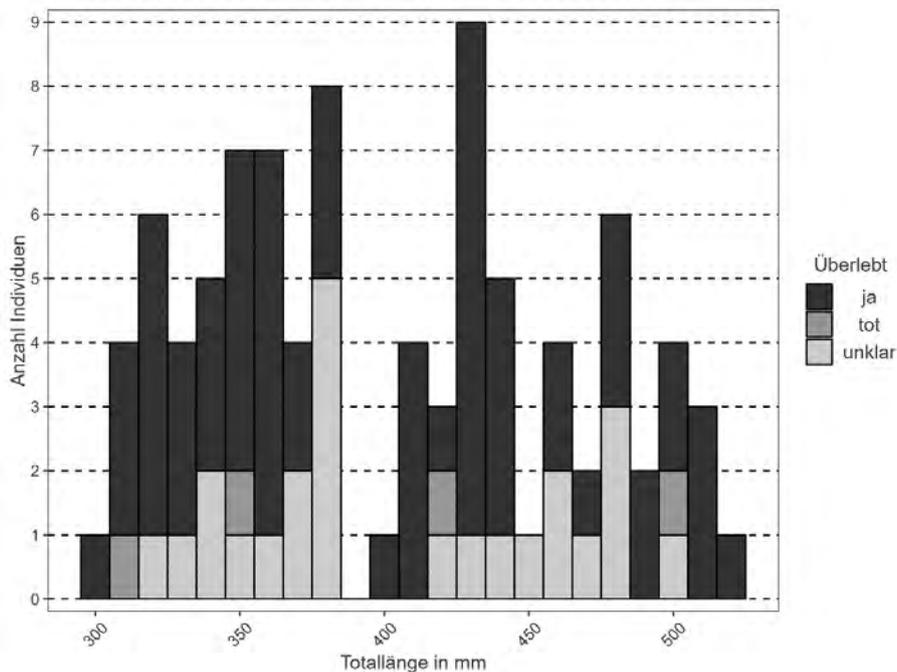


Abbildung 40: Längenverteilung der 91 über die Turbinen abgestiegenen Fische. Mindestens 69 % überlebten die Turbinenpassage (schwarz). Für 26.4 % der Fische ist das Überleben unklar (hellgrau) und 4.4 % sind mit grosser Sicherheit gestorben («tot», dunkelgrau).

Für sieben Barben konnte ein zweiter Abstieg beobachtet werden. Sechs davon benützten wiederum die Turbine als Abstiegsweg, eine stieg über den Fischpass ab. Vier der sechs über die Turbine abgestiegenen Fische überlebten den zweiten Abstieg, eine wurde vermutlich getötet (100 Minuten nach dem Abstieg wurde nie mehr ein Signal detektiert, weder an Fixstationen noch beim mobilen Tracking), für eine weitere Barbe ist das Überleben unklar. Das fehlende Signal nach 100 Minuten kann durch eine Beschädigung des Senders bei der Turbinenpassage oder durch Vogelprädaion erklärt werden.

Unterhalb des WKW Wynau wurden insgesamt 19 Tags registriert (vgl. Kapitel 5.6). Elf der Trägerfische dieser Tags wurden jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit oberhalb von Wynau Opfer von Prädatoren und sind nicht selbst über das Kraftwerk abgestiegen (vgl. Kapitel 5.5). Nur für eine der übrigen acht Barben war ein Überleben nach dem Abstieg am WKW Wynau anhand einer Bewegung flussaufwärts verifizierbar (ID 30). Von fünf Fischen gab es jeweils nur eine Detektion unterhalb des WKW Wynau und damit keine Grundlage, um ein Überleben zu erkennen. Die übrigen drei Fische wurden jeweils mehrmals unterhalb der Staustufe Ruppoldingen detektiert, aber immer am gleichen Ort.



5.5 Prädation

Die Prädation spielte in der vorliegenden Studie eine nicht zu unterschätzende Rolle. Rund 31 % aller ausgesetzten Fische wurden mit hoher Wahrscheinlichkeit im Verlauf der Studie gefressen. 18.7 % der Fische wurden erst nach dem Abstieg gefressen, der Grossteil mit 80.2 % dagegen bereits vorher. Etwa ein Viertel der Fische wurde bereits innerhalb der ersten 14 Tage nach dem Aussatz gefressen, die ersten sogar bereits noch am Aussatztag. Bei den abgestiegenen Fischen wurde rund ein Viertel der Fische innerhalb von 3 Tagen nach dem Abstieg gefressen.

Abbildung 41 zeigt beispielhaft die Radiosignale der Barbe mit der ID 148 zum Zeitpunkt ihrer Prädation. Aufgrund des Sensortags, ist die geringe Tiefe um 0-1 m und die rasant ansteigende Temperatur, von ca. 6 auf 35 °C, zu erkennen. Die Kombination aus beiden Messwerten lässt zweifelsfrei auf ein Prädationsereignis schliessen. Der Temperaturanstieg zeigt die Erwärmung des Tags im Verdauungstrakt des Prädators, die geringe Tiefe, dass sich dieser anschliessend an der Wasseroberfläche, oder an Land aufhielt. Die wechselnden Signale und Signalstärken an verschiedenen Antennen lassen auf eine Bewegung schliessen. Der Sender wurde daher sehr wahrscheinlich nicht am Ufer deponiert, sondern befand sich in einem Prädator, der sich bewegte und anschliessend aus dem Detektionsradius der Antennen verschwand.

Tabelle 12: Verteilung der Anzahl gefressener Fische, abhängig davon, ob sie abgestiegen sind.

	gefressen	abgestiegen	nicht abgestiegen	unklar
N	91	17	73	1
%	100	18.7	80.2	1.1

Tabelle 13: Zusammenfassung der Dauer von Aussatz bzw. Abstieg bis zur Prädation. Die Anzahl (N) der Fische, die für die Dauer bis zur Prädation berücksichtigt wurden ist, niedriger als die Gesamtzahl gefressener Fische, da nicht für alle Fische ein Prädationszeitpunkt bestimmt werden konnte.

	Mini- mum	1. Quantil	Median	Mittel- wert	3. Quantil	Maxi- mum	N
Tage bis Prädation nach Aussatz	0.1	13.8	49.9	75.7	88.7	416	89
Tage bis Prädation nach Abstieg	0.2	2.7	31.2	100.2	103.5	411.5	17



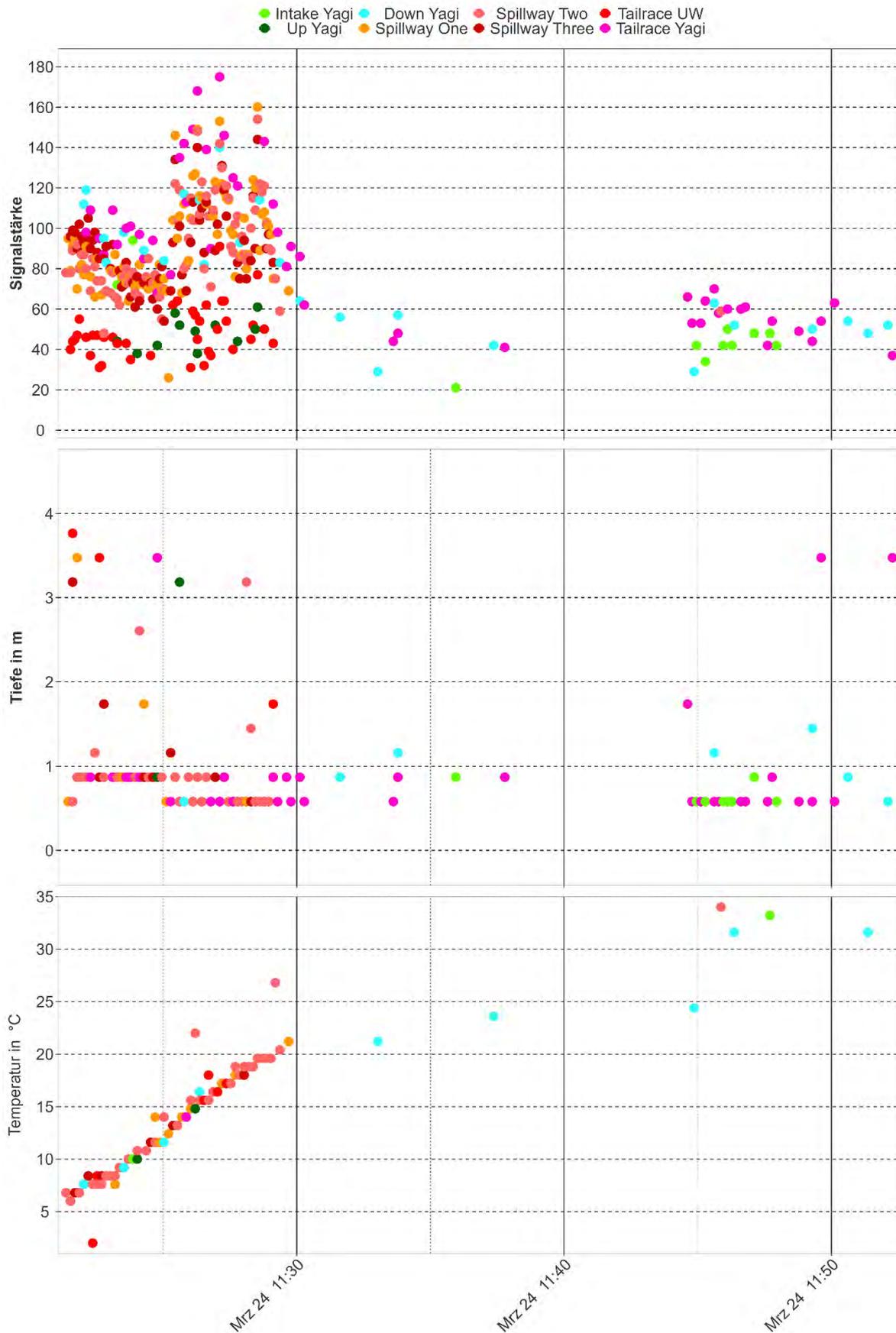


Abbildung 41: Prädationsereignis der Barbe mit der ID 148. Oben: Signalstärke, mitte: Wassertiefe gemessen von Sender, unten: Temperatur gemessen von Sender. Deutlich zu sehen ist die geringe Tiefe im Bereich von 0-1 m, sowie der steile Anstieg der angegebenen Temperatur von ca. 6 °C auf nahezu 35 °C innerhalb von etwa 30 min.



5.6 Mobiles Tracking und Erfassen langer Wanderdistanzen

5.6.1 Beschrieb verschiedener Wanderrouten

Von den 292 markierten Barben wurden 253 beim mobilen Tracking wieder gefunden. Bei 119 Fischen wurden alle (59 Individuen) oder ein Teil der Funde (60 Individuen) ausgeschlossen, bei denen es sich um inaktive Tags handelte (nachgewiesene Prädation, Tagverlust oder über mehr als ein halbes Jahr am selben Standort). So blieben Fundorte von 194 Fischen für die weitere Analyse. Für die Berechnung der Wanderdistanzen wurden zudem die Registrierungen an den stationären Antennen verwendet. Beispielhafte Wanderrouten einzelner Tiere werden in Abbildung 42 und Abbildung 43 gezeigt. Die Wanderrouten aller Fische, die mindestens drei Mal im mobilen Tracking gefunden wurden (223 Fische), sind zudem in gruppierten Abbildungen im Anhang ersichtlich (Abbildung 65 bis Abbildung 73).

Fische ohne Abstieg

Von den 194 beim mobilen Tracking gefundenen Barben wurden 106 (54.6 %) nur oberhalb des WKW Bannwil detektiert (inkl. stationärer Antennen). Die meisten (86 Fische) haben sich vom Aussatzpunkt mindestens 5 km flussaufwärts bewegt (Fundorte oberhalb Aarekm 85 (Wangen a. d. A.)). Nur eine Barbe wurde lebend oberhalb des WKW Flumenthal gefunden (Abbildung 42, ID 11; bei allen weiteren Detektionen oberhalb des WKW Flumenthal handelte es sich um inaktive Tags, z. B. ID 87 und 110).

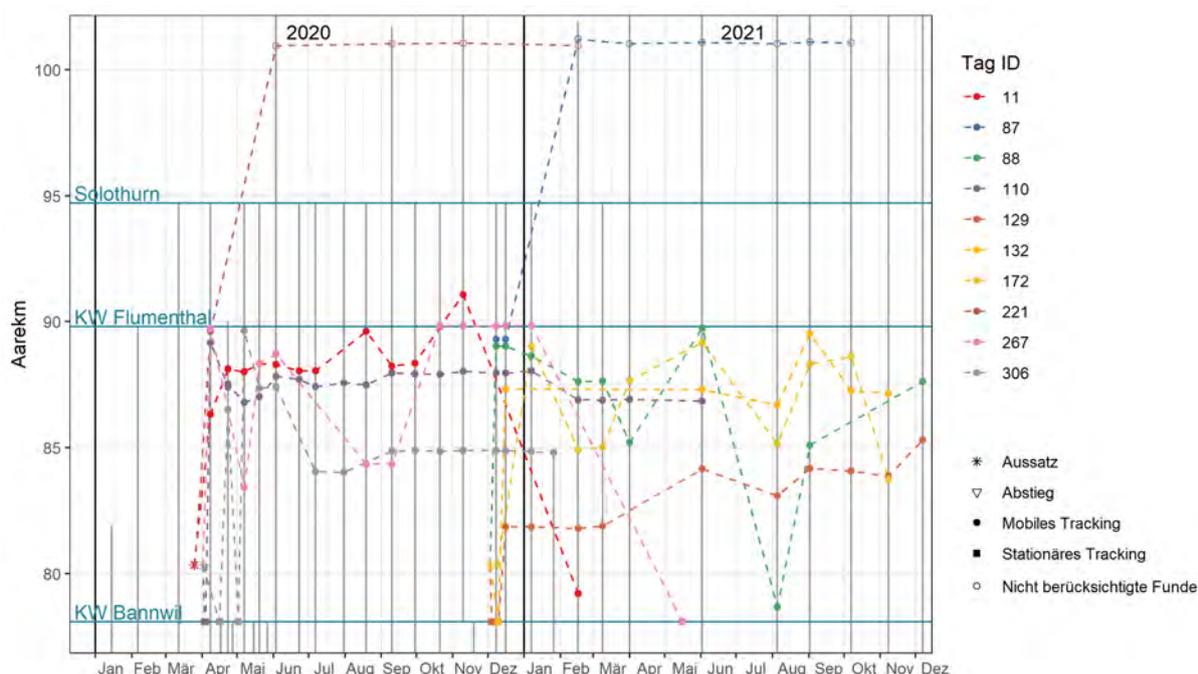


Abbildung 42: Beispielhafte Wanderrouten von zehn Fischen, die nicht über das WKW Bannwil abgestiegen sind. Vertikale Linien zeigen Zeitpunkt und Bereich des mobilen Trackings.



Fische mit Abstieg

Bei insgesamt 109 Fischen wurde ein Abstieg über das WKW Bannwil nachgewiesen (Daten der stationären Antennen eingeschlossen). 88 dieser Individuen wurden auch im mobilen Tracking erfasst, so dass Aussagen über ihren Aufenthaltsort vor und/oder nach dem Abstieg möglich sind. Davon waren 76 (86.4 %) soweit erkennbar nach dem Aussatz auf direktem Weg abgestiegen (Abbildung 75 bis Abbildung 78). Die restlichen 12 Fische (13.6 %) waren vor dem Abstieg bis unterhalb des WKW Flumenthal aufgestiegen (IDs 26, 44, 58, 93.5, 98.5, 112, 135, 182, 183, 247, 283 und 314). Details zum Abstieg dieser Fische sind in Tabelle 17, die Wanderrouten in Abbildung 80 ersichtlich.

Ein Teil der abgestiegenen Fische (20 Individuen, 22.7 %) wurde nur direkt am bzw. unter dem WKW Bannwil detektiert, während die restlichen 68 Barben auch weiter flussabwärts gefunden wurden. Von diesen wiederum wurden 29 Individuen später wieder in der Nähe des Kraftwerks detektiert oder im Fischpass gefangen. Zwei der abgestiegenen Barben wurden zu einem späteren Zeitpunkt wieder lebend oberhalb des WKW Bannwil gefunden (IDs 63 und 259). Bei weiteren Funden handelte es sich um gefressene Fische, deren Tags oberhalb des WKW Bannwil ausgeschieden worden waren. Bei sechs Individuen konnte ein weiterer Abstieg über das WKW Wynau nachgewiesen werden, die unterste Detektion eines Fisches lag bei Aarekm 36.75, im Unterwasserkanal des KW Rüchlig bei Aarau (Abbildung 78).

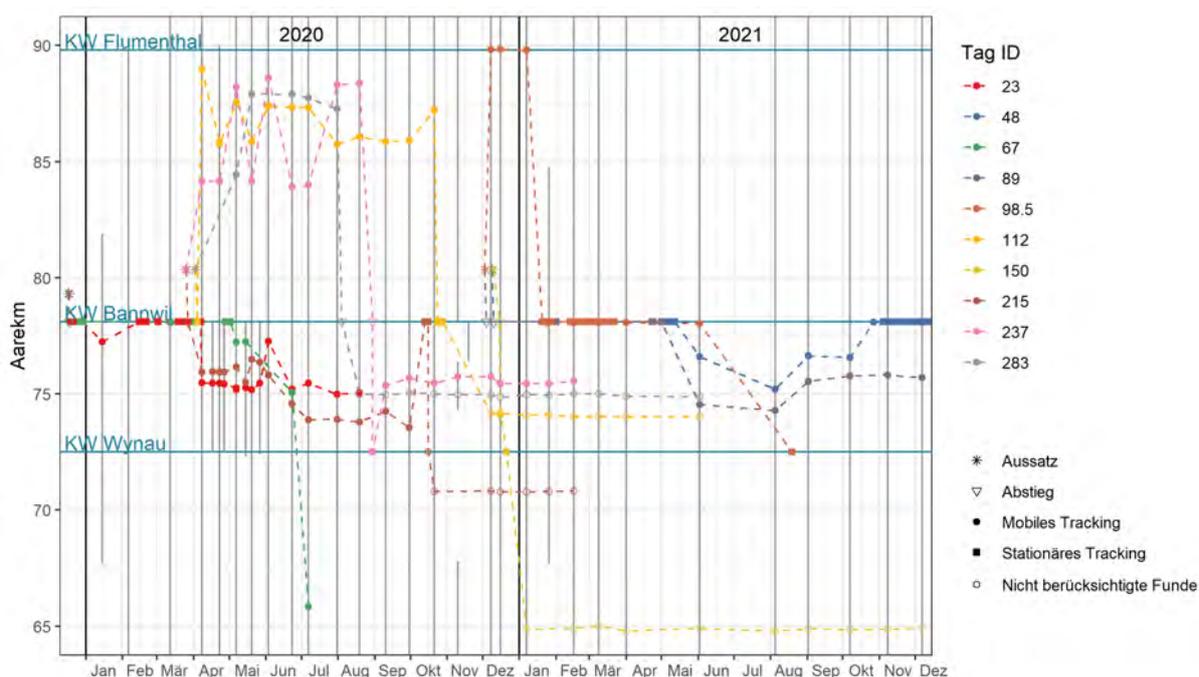


Abbildung 43: Beispielhafte Wanderrouten von zehn Fischen, die über das WKW Bannwil abgestiegen sind. Vertikale Linien zeigen Zeitpunkt und Bereich des mobilen Trackings.



5.6.2 Wanderdistanzen

Von den 292 markierten Barben wurden 270 im Laufe der gesamten Studiendauer im mobilen oder stationären Tracking registriert. Nach dem Ausschluss der Signale inaktiver Sender (mit hoher Wahrscheinlichkeit tote Fische), verblieben noch 248 Barben, die für die weitere Analyse verwendet wurden. 17 wurden nur an den stationären Antennen erfasst, 66 nur im mobilen Tracking.

Abbildung 44 zeigt die Fundorte mit der grössten Distanz zum Aussatzzort für jeden gefundenen Fisch. Die durchschnittliche Home Range der Barben betrug im Untersuchungszeitraum 6.9 km, bei einem Minimum von 0.11 km und einem Maximum von 43.6 km (Tabelle 14). Die maximale Distanz zum Aussatzzort war flussaufwärts (durchschnittlich 7.49 km) signifikant höher als flussabwärts (durchschnittlich 4.15 km; Mann-Whitney-U-Test, $p < 0.001$; s. Tabelle 14 und Abbildung 45).

Es bestand ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Anzahl der Funde eines Fisches im mobilen Tracking und der Home Range (Spearman-Rangkorrelation, $p = 0.02$, $\rho = 0.16$) sowie der maximalen Funddistanz flussaufwärts (Spearman-Rangkorrelation, $p < 0.01$, $\rho = 0.29$). Für die Maximaldistanz flussabwärts wurde kein Zusammenhang mit der Anzahl Funde oder der Dauer der Funde im mobilen Tracking gefunden (Spearman-Rangkorrelation, $p > 0.05$). Die Länge bzw. das Gewicht eines Fisches korrelierten signifikant mit dessen Home Range (Spearman-Rangkorrelation, $p = 0.04$, $\rho = 0.13$), jedoch nicht mit der maximalen Wanderdistanz flussauf- oder-abwärts ($p > 0.05$, Abbildung 44). Zwischen Fischen, die im Frühling oder im Winter markiert und ausgesetzt wurden, bestanden keine Unterschiede in den verschiedenen Distanzwerten (Mann-Whitney-U-Test, $p > 0.05$).

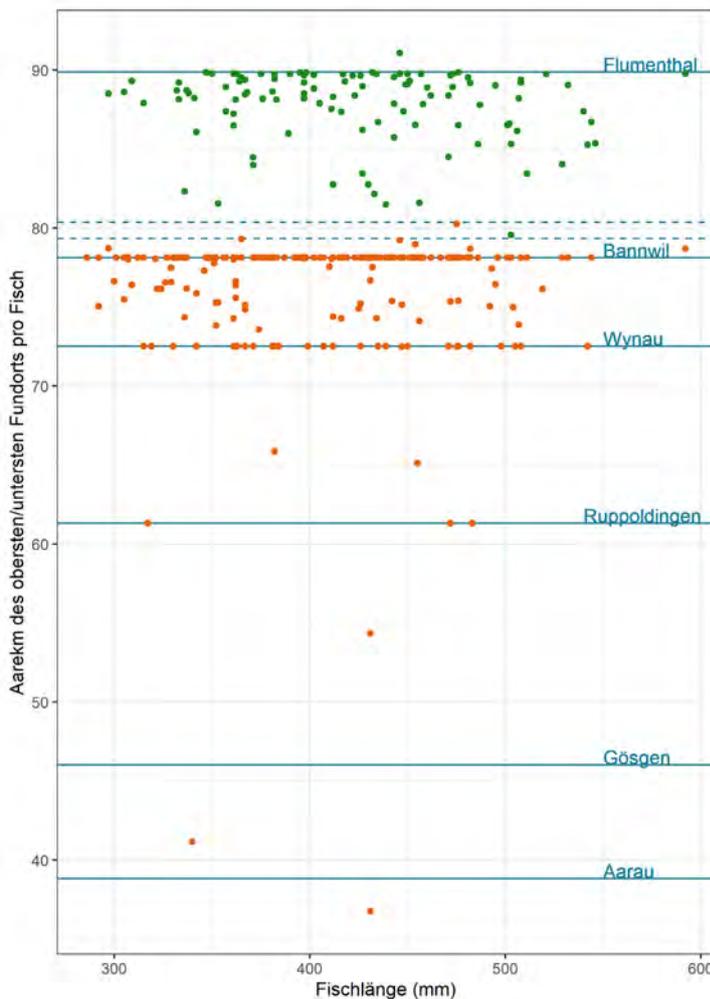


Abbildung 44: Maximale Funddistanz flussaufwärts (grün) bzw. flussabwärts (orange) des Aussatzzortes (gestrichelte blaue Linien), in Abhängigkeit der Fischlänge. Horizontale blaue Linien bezeichnen die Lage der WKW. Fische, die sowohl flussauf- als auch flussabwärts des Aussatzzortes gefunden wurden, sind mit zwei Punkten in der Graphik vertreten. Funde des mobilen und stationären Trackings berücksichtigt.



Werden die Signale inaktiver Tags in die Berechnungen mit einbezogen, sind die Durchschnittswerte der Home Range und der maximalen Distanzen flussauf- und -abwärts leicht höher. Die Medianwerte unterscheiden sich jedoch höchstens um 780 m. Einzig der Rekordwert für die Wanderung flussaufwärts ist beim kompletten Datensatz deutlich erhöht (Tabelle 14). Dabei handelt es sich um Barben, die oberhalb des WKW Flumenthal immer am gleichen Ort gefunden wurden. Mit hoher Wahrscheinlichkeit handelt es sich dabei um prädatierte Fische, deren Tags hier ausgeschieden wurden (vgl. Kap. 5.5). Die Barbe mit der weitesten Wanderungen flussabwärts wurde an ihrem untersten Fundort hingegen nur einmal gefunden. Da dadurch der Tod eines Fisches nicht mit hoher Wahrscheinlichkeit bestimmt werden konnte, wurden diese Daten für die Analyse behalten.

Tabelle 14: Home Range und maximale Distanzen zum Aussatort der markierten Barben. Schwarz: bereinigter Datensatz. Grau: kompletter Datensatz, ohne Ausschluss inaktiver Tags. N: Anzahl Fische

	Nur Signale aktiver Tags (N=248)			Alle Signale (N=270)		
	Home Range	Max. Distanz flussaufwärts	Max. Distanz flussabwärts	Home Range	Max. Distanz flussaufwärts	Max. Distanz flussabwärts
N	248	113	209	270	147	216
Minimum	0.11 km	0.23 km	0.11 km	0.11 km	0.04 km	0.11 km
Median	6.24 km	8.26 km	2.25 km	7.02 km	8.15 km	2.25 km
Durchschnitt	6.91 km	7.49 km	4.15 km	7.95 km	7.92 km	4.54 km
Maximum	43.6 km	10.72 km	43.6 km	43.6 km	24.12 km	43.6 km

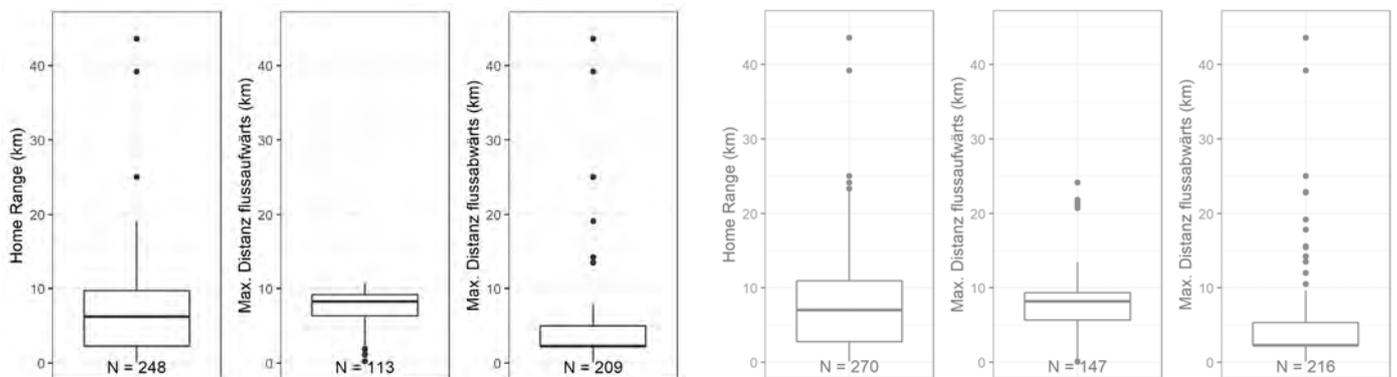


Abbildung 45: Home Range und maximale Distanzen zum Aussatort der markierten Barben. Links: bereinigter Datensatz; rechts: kompletter Datensatz, ohne Ausschluss inaktiver Tags. N: Anzahl Fische pro Distanzwert.

5.6.3 Saisonale Wanderungen

Wintereinstand FAH Bannwil

33 der im Winter 2019/2020 markierten Barben kehrten nach dem Aussatz in die FAH des WKW Bannwil zurück, um hier auch den Rest des Winters zu verbringen. Von diesen Fischen konnte das Austrittsdatum im Frühjahr 2020 bestimmt werden. Im Winter 20/21 befanden sich 50 markierte Barben in der FAH. Dabei handelte es sich sowohl um im Winter 20/21 frisch markierte Barben, als auch um solche, die bereits im Vorjahr markiert wurden und nun in die FAH zurückkehrten. Von 28 "Rückkehrern" konnte das Eintrittsdatum im Winter 2020 und von insgesamt 25 Barben das Austrittsdatum im Frühjahr 2021 bestimmt werden.



Der Einstieg in die FAH geschah 2020 vom 27.09. – 28.10.20, über einen Zeitraum von 31 Tagen. 90 % der Barben befand sich bereits am 15.10. in der FAH (innerhalb von 18 Tagen nach dem ersten ankommenden Fisch; Abbildung 46). Die Temperaturen unterschritten in diesem Zeitraum am 27.09.20 erstmals 18 °C und sanken bis auf 12.9 (15.10.) bzw. 12.3 °C (28.10.). Im Folgejahr (Herbst 2021) konnte der Eintritt in die FAH nur grob bestimmt werden, da die stationären Antennen am WKW Bannwil erst ab dem 18.10.21 wieder in Betrieb genommen wurden und nur sporadische Mobile Trackings durchgeführt wurden. Es konnte jedoch bei fünf Fischen ermittelt werden, dass sie zwischen dem 07.10. und 27.10.21 in die FAH einschwammen. Die Temperaturen sanken in diesem Zeitraum von 16.6 auf 13.1 °C. Der Zeitraum und die Wassertemperaturen stimmen somit in etwa mit dem Vorjahr überein.

Der Austritt aus der FAH geschah im Frühjahr 2020 07.04. – 28.05.20 (51 Tage), wobei 90 % der Austritte vom 27.04. – 17.05. (20 Tage) stattfanden (Abbildung 46). Die Wassertemperaturen stiegen während der Hauptaustrittsperiode von 11.7 auf 15.6 °C (Durchschnitt 13.4°C). 2021 verließen die Barben die FAH in einem sehr ähnlichen Zeitraum, vom 22.03. – 27.05.21 (über 66 Tage), wobei 90 % der Barben die FAH erst ab dem 23.04., innert 34 Tagen, verließ (Abbildung 46). Die Wassertemperaturen lagen in diesem Zeitraum bei 9.5-12.3 °C (Durchschnitt 11.3 °C) und damit rund 2.5 °C unter denen vom Vorjahr.

Von zehn Barben konnten für den Winter 20/21 sowohl das Eintritts- als auch das Austrittsdatum ermittelt, und daraus die Gesamtdauer des Aufenthalts in der FAH als Überwinterungshabitat ermittelt werden. Diese betrug durchschnittlich 207 Tage (min. 170, max. 230 Tage). Von sechs Fischen konnte für beide Winter das Eintrittsdatum in die FAH ermittelt werden. Der Unterschied zwischen den beiden Jahren betrug durchschnittlich nur 11 Tage (min. 1, max. 26 Tage).

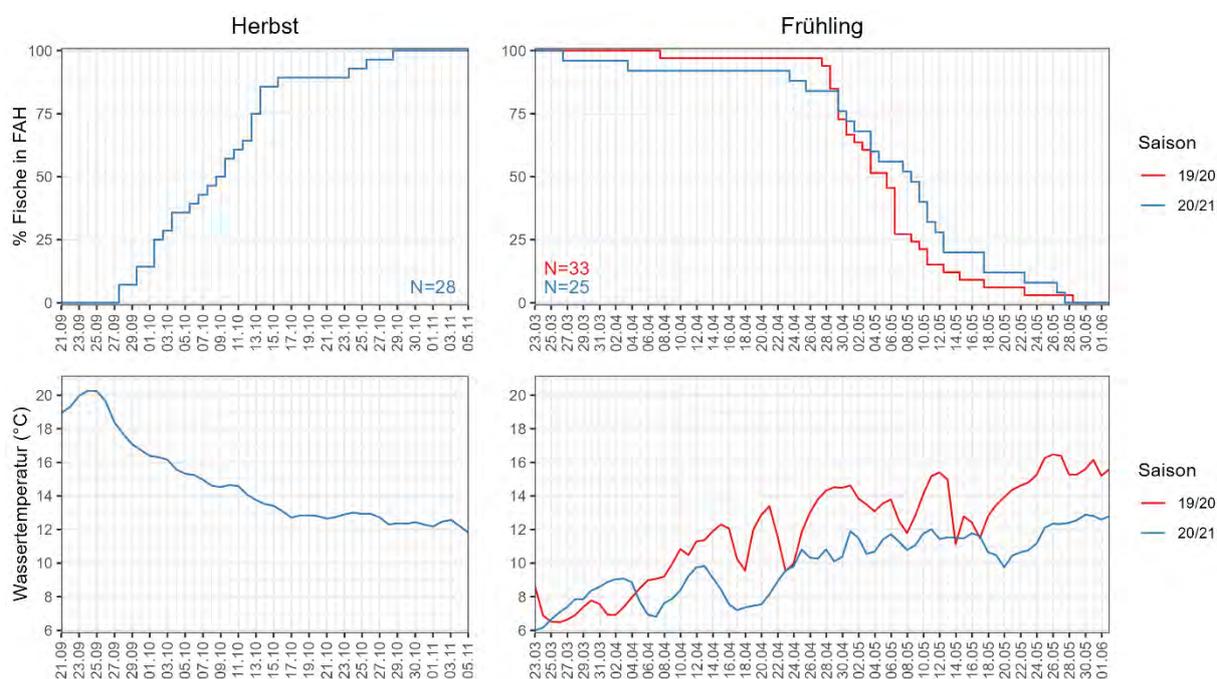


Abbildung 46: Oben: Eintrittsdatum (links) und Austrittsdatum (rechts) der in der FAH Bannwil überwinternden Barben. Y-Achse: Anteil der überwinternden Fische, die sich zum Zeitpunkt x bereits/noch in der FAH befindet. N: Anzahl Fische. Unten: Wassertemperaturen in derselben Zeitperiode (Tagesmittelwerte Temperaturlogger in der FAH)



Laichwanderung

Während der Laichzeit (Mai/Juni) konnte eine Häufung der Fische über jeweils rund 3 km unterhalb der WKW Bannwil und Flumenthal beobachtet werden. Die bevorzugte Strecke unterhalb des WKW Bannwil befand sich 1.3 – 3 km unterhalb des Wehres, in der Rechtskurve oberhalb der Ortschaft Aarwangen. Beim WKW Flumenthal verteilten sich die Barben ab dem WKW auf einer Strecke von 2.5 km, bis unterhalb der Mündung des Ruessbachs in die Aare. Anhand der Aufenthaltsorte zur Laichzeit wurden diese Gebiete als vermutliche Laichgebiete ausgemacht. 51 Barben laichten mit hoher Wahrscheinlichkeit unterhalb des WKW Bannwil. Die Laichwanderung ab dem Winterzustand beim WKW Bannwil führte diese Fische max. 3.8 km flussabwärts (Beispiele siehe Abbildung 47 bis Abbildung 49). Zwei Fische befanden sich gegen Ende des Winters noch oberhalb von Bannwil und führten eine Laichwanderung von 14.6 bzw. 7.7 km flussabwärts durch (ID 247 und 314; Abbildung 48). Neun Barben wurden sowohl 2020 als auch 2021 unterhalb des WKW Bannwil gefunden. Acht davon kehrten zur Laichzeit an den genau gleichen Ort zurück wie im Vorjahr (Abbildung 49; max. Distanz zwischen den Jahren 57 m), die letzte befand sich im zweiten Jahr 450 m weiter flussabwärts.

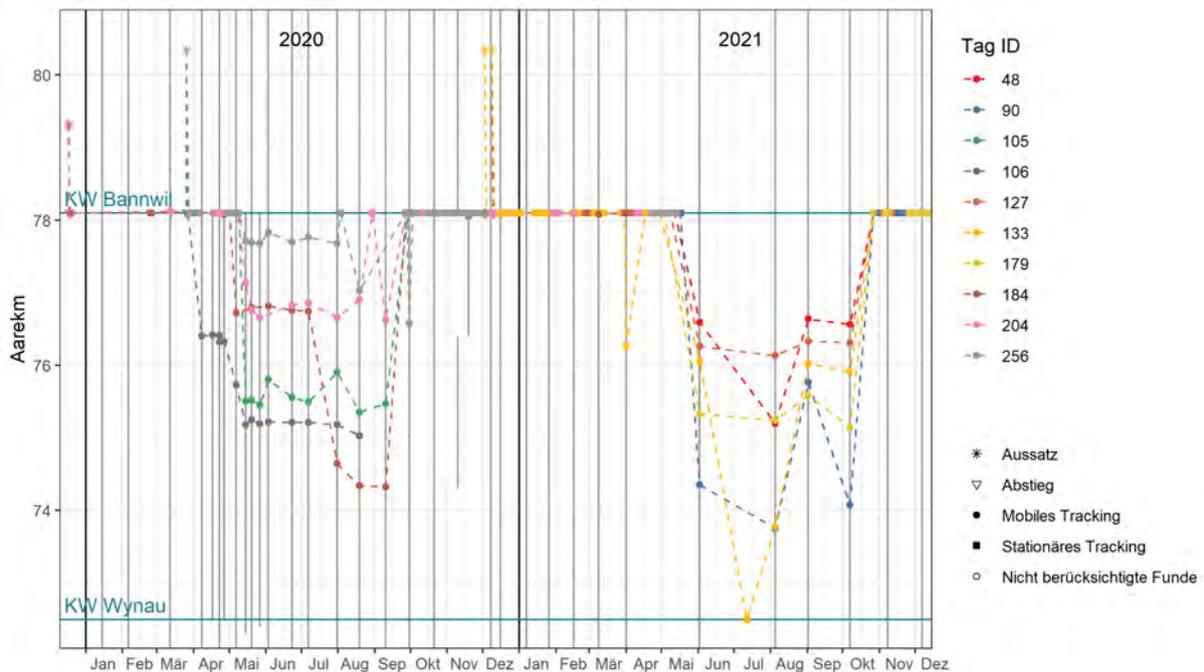


Abbildung 47: Fundorte einiger Fische, die mit hoher Wahrscheinlichkeit unterhalb des WKW Bannwil laichten (Laichzeit=Mai-Jun). Graue vertikale Linien bezeichnen Zeitpunkt und Ausdehnung der mobilen Trackings.



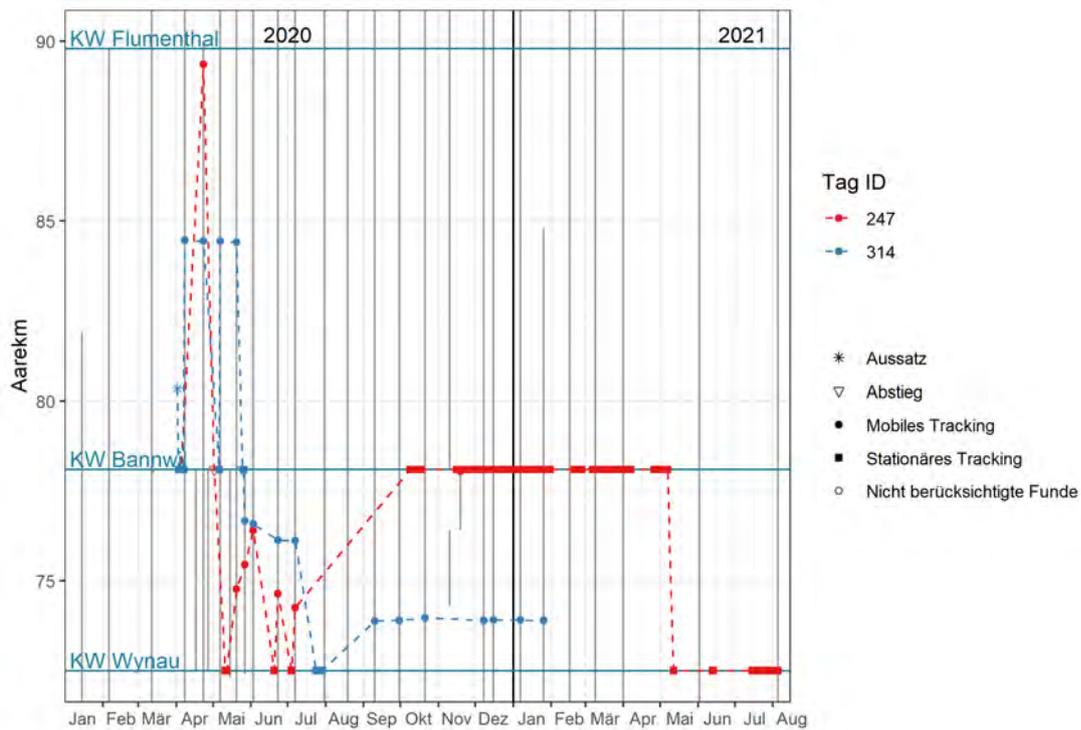


Abbildung 48: Fundorte der beiden Fische, die erst zur Laichzeit (Mai-Jun) über das WKW Bannwil abstiegen um zu den darunter liegenden Laichplätzen zu gelangen. Graue vertikale Linien bezeichnen Zeitpunkt und Ausdehnung der mobilen Trackings.

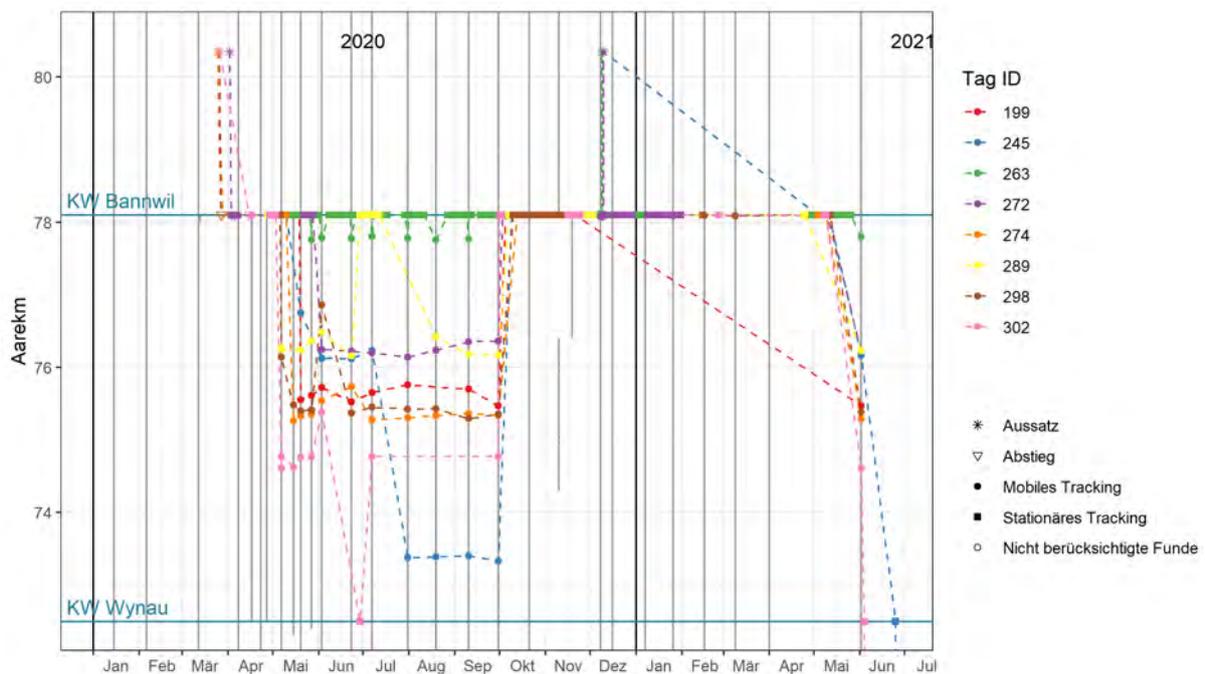


Abbildung 49: Fundorte der Fische, die zur Laichzeit (Mai-Jun) 2021 genau an den Standort vom Vorjahr zurückkehrten. Die Barben mit den IDs 245, 263 und 272 wurden im Dezember 2020 in der FAH wiedergefangen und ein zweites Mal oberhalb des WKW Bannwil ausgesetzt. Graue vertikale Linien bezeichnen Zeitpunkt und Ausdehnung der mobilen Trackings.



44 Barben laichten mit hoher Wahrscheinlichkeit unterhalb des WKW Flumenthal. Einige davon waren nach dem Aussatz direkt flussaufwärts geschwommen, während andere zuerst noch kurz an den stationären Antennen des WKW Bannwil registriert wurden (Abbildung 50 und Abbildung 51). Acht Barben legten die Distanz von 11.7 km zwischen den beiden Kraftwerken erst zur Laichzeit zurück. Mindestens zwei dieser Fische hielten sich im Winter in der FAH Bannwil auf, sie waren also nach dem Aussatz über das WKW Bannwil ab- und zur Laichzeit wieder aufgestiegen (IDs 63 und 259, Abbildung 50). Neun Barben hielten sich vor Beginn der Laichzeit unterhalb des WKW Flumenthal auf, schwammen jedoch im Mai flussabwärts bis zum WKW Bannwil und anschliessend wieder aufwärts auf die Laichplätze unterhalb des WKW Flumenthal (Abbildung 25). Diese Fische führten somit eine Laichwanderung von bis zu 11.7 km flussabwärts und 11.7 km flussaufwärts durch.

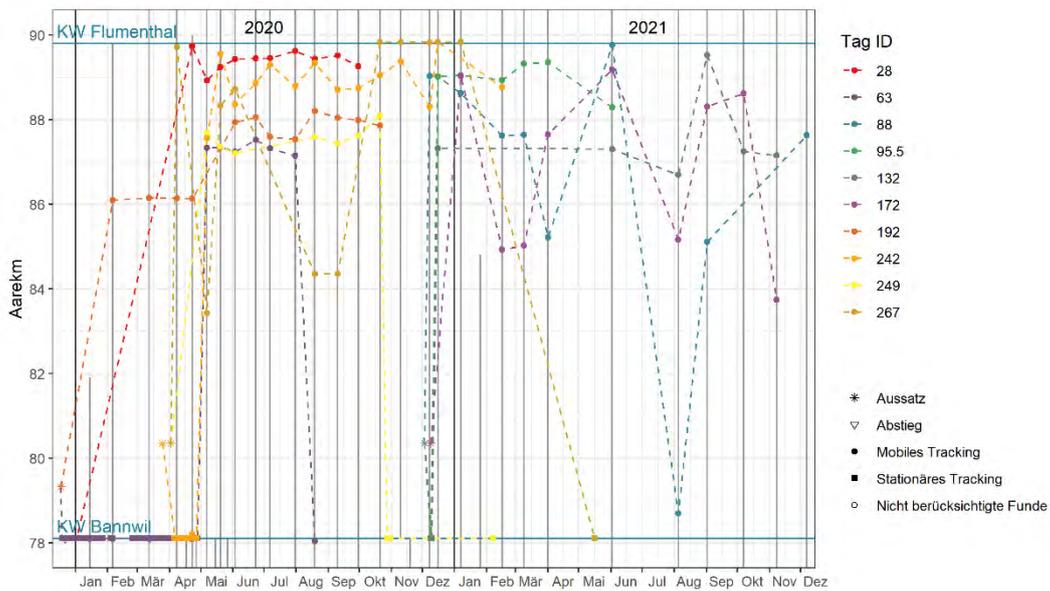


Abbildung 50: Fundorte einiger Fische, die mit hoher Wahrscheinlichkeit unterhalb des WKW Flumenthal laichten (Laichzeit=Mai-Jun). Graue vertikale Linien bezeichnen Zeitpunkt und Ausdehnung der mobilen Trackings.

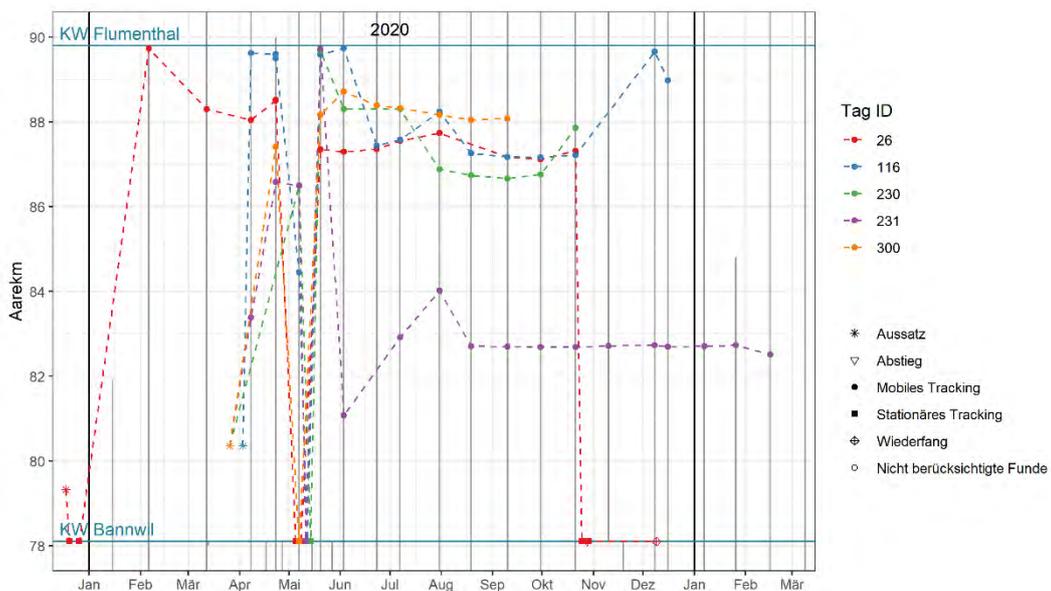


Abbildung 51: Fundorte einiger Fische, die zu Beginn der Laichzeit (Mai-Jun) erst flussabwärts bis zum WKW Bannwil und anschliessend wieder flussaufwärts zu den Laichplätzen unterhalb des WKW Flumenthal schwammen. Graue vertikale Linien bezeichnen Zeitpunkt und Ausdehnung der mobilen Trackings.



6 Diskussion

6.1 System der Radiotelemetrie und ihre Eignung zur Dokumentation der Abwanderungskorridore

Die wichtigsten Ziele dieser Untersuchung waren es, den Abstiegskorridor der Fische am WKW Bannwil zu erfassen und das grossräumige Wanderverhalten der Fische zu dokumentieren. Die Radiotelemetrie ist dafür die ideale Methode, obwohl das exakte Verhalten der Fische vor dem Kraftwerk nicht detailliert mit einem Aufzeigen von Schwimmpfaden ermittelt werden kann. Die Radiotelemetrie war weniger gut geeignet bei Wassertiefen von $> 6 - 8$ m, da Signale aus grosser Tiefe nicht mehr regelmässig detektiert wurden. Für eine exakte Verhaltensstudie vor dem Kraftwerk könnte dann, je nach Ort, die akustische Telemetrie bessere Resultate liefern. Problematisch zeigte sich das Aussetzen von Dutzenden von Fischen am selben Tag. Schwammen die Fische gleichzeitig vor das Kraftwerk, konnte es zu Überlagerungen von Signalen kommen (collision) und die IDs einiger Fische konnten nicht gelesen werden. Für künftige Experimente wird empfohlen, pro Markiertag nur noch eine begrenzte Anzahl von Fischen zu markieren. Der Nachteil wäre ein höherer Markieraufwand, der Vorteil aber, so die Kollisionen der Signale deutlich zu reduzieren.

Kollisionen von verschiedenen Signalen traten auch im mobilen Tracking auf, wenn sich viele Fische am gleichen Standort aufhielten (z. B. in der Vogelraupfi oberhalb des WKW Bannwil). Wenn alle verwendeten Sender auf einer einzigen Frequenz senden, treten Kollisionen gehäuft auf. Dies war bei unseren Experimenten der Fall. Die Alternative wäre, Marken mit unterschiedlichen Frequenzen zu verwenden und über mehrere Frequenzen zu scannen. Dies vermindert jedoch die Leserate und kann somit ebenfalls zu Signalverlusten führen. Die Vorteile einer einzigen Frequenz überwiegen klar. Für künftige Studien ist vorher zu entscheiden, ob neben translozierten Fischen auch andere Fische verwendet werden sollen, welche wieder am Fangort ausgesetzt werden. Beide Ansätze haben ihre Vor- und Nachteile.

Der grosse Vorteil der Radiotelemetrie war es, die Fische über weite Distanzen verfolgen zu können (mobiles Tracking), auch im sehr turbulenten Unterwasser. Somit konnten zur Ökologie der Barbe in der Aare wichtige Erkenntnisse gesammelt werden. Auch in anderen Studien wurde die Radiotelemetrie zur Dokumentation der Abwanderung über weite Distanzen eingesetzt. Calles et al. 2019 verfolgten mit der Radiotelemetrie in grossen Flüssen die Abwanderung von Lachssmolts, Kelts (Lachs nach dem Ablachen) und Blankaalen. Haven et al (2019) zeigten mit Radiosendern die Abwanderungsgeschwindigkeit, den Korridor der Abwanderung sowie das Verhalten von Lachssmolts am WKW Unkelmühle auf und verfolgten die Passage an weiteren Kraftwerken und dokumentierten die Mortalitätsraten.

Bezüglich Installationsaufwand ist die Radiotelemetrie etwas einfacher und günstiger als die akustische Telemetrie. Bei der akustischen Telemetrie müssen aus den Rohsignalen Koordinaten berechnet werden. Dieses Vorgehen ist kompliziert und aufwendig. Bei der Datenanalyse sind die Unterschiede eher gering, weil bei beiden Systemen mit sehr grossen Datenmengen gerechnet werden muss. In der vorliegenden Studie wurden pro markierten Fisch durchschnittlich 156'600 valide Detektionen (von den fix installierten Antennen) registriert und verarbeitet, was ein vorsichtiges und möglichst automatisiertes Datenhandling bedingt. Für die Radiotelemetrie ist es von besonderer Wichtigkeit, bereits bei der Planung und beim Bau (Umbau oder Neubau von Fischtreppe oder von Kraftwerken) das Konzept der Wirkungskontrolle miteinzubeziehen. Eine im Bereich der Turbine montierte Antenne kann ein wertvolles Instrument beim Monitoring sein. Der Einbau in eine bestehende Turbine ist jedoch äusserst schwierig. Weiter ist die Radiotelemetrie kaum anfällig auf Turbulenzen und Luft im Wasser. Hingegen gilt für jeden Standort einer Antenne vorher abzuklären, wie gross die Störungen (Noise) durch die Umgebung sind. Diese können das Betreiben einer Antenne gerade an Kraftwerken verunmöglichen.



Der Entscheid, Fische nicht nur mit einem Radiosender auszurüsten, sondern zusätzlich einen PIT-Tag zu verwenden, erwies sich als richtig und wird für künftige Studien empfohlen. Der Einsatz von PIT-Tag- und Radiotelemetrieantennen in der Fischtreppe half, die Schwimmbewegungen richtig zu interpretieren. Ebenso lassen sich dank des PIT-Tags wiedergefangene Individuen identifizieren, deren Radiosender abgelaufen ist oder die den Radiosender ausgestossen haben.

Nicht trivial war die Abschätzung, ob ein Fisch nach der Turbinenpassage noch lebte. Falls die Mortalität im Zentrum steht, wird für künftige Studien empfohlen, Radiosender mit Aktivitätssensoren zu verwenden. Dies impliziert allerdings die Verwendung eines grösseren Senders. Es zeigte sich, dass gerade die kleinen Nanosender sehr gute Resultate lieferten und den Fisch am geringsten beeinträchtigten.

Die Kombination der fixen Installation mit dem mobilen Tracking erwies sich als hervorragend. Es führte zu wesentlichen Erkenntnissen bezüglich Ausbreitung und Wanderdistanzen der Barbe. So konnte zum Beispiel am WKW Bannwil aufgezeigt werden, dass die Barben wiederholt in den Fischpass einsteigen um zu überwintern. Der Einstieg erfolgte im Oktober/November und die Fische verblieben bis im April oder frühen Mai im Fischpass. Neben Wanderkorridoren konnten somit auch die saisonal genutzten Habitate erkannt werden.

Es wurden deutlich mehr mobile Trackings als ursprünglich geplant durchgeführt. Die Barben konnten so bis am Ende der Lebensdauer der Radiosender geortet werden.

6.2 Zielart und Fang der Fische

Die Beschränkung auf eine einzige Zielart, die Barbe, hatte Vor- und Nachteile. Die Barbe ist eine der häufigsten Fischarten in diesem Aareabschnitt und als ausgesprochener Wanderfisch ganz speziell auf einen funktionierenden Wanderkorridor angewiesen. Als grosser Vorteil wird die hohe Anzahl markierter Fische derselben Art eingestuft, wodurch eine sehr hohe Stichprobenzahl erreicht werden konnte. Nachteilig ist, dass nur Resultate einer einzigen Fischart vorliegen. Die Ergebnisse der grosswüchsigen, bodenorientierten Fischart Barbe können nur bedingt auf andere Fischarten übertragen werden. Z. B. wäre es denkbar, dass für oberflächenorientierte Fische (z. B. Schneider) dem Abstieg über das Wehr eine grössere Bedeutung zukommt. Die einigermaßen einfache Fangmöglichkeit der überwinternden Barben im Fischpass half entscheidend mit, viele Individuen fangen und markieren zu können. Leider stiegen im Winter neben den Barben keine weiteren Fischarten in den Fischpass ein. Diese Fische mit Elektrofischerei aus dem Fluss zu fangen, wäre sehr schwierig gewesen. Mit den vorhandenen Daten konnte ein spannender Einblick zu den Wandermustern der Barbe in der Aare gewonnen werden. Der grosse Vorteil war, die Ausbreitung der Fische über ein Jahr lang beobachten zu können.

6.3 Markierte Fische

Die Anzahl markierter Fische ($N = 292$, davon 57 aus dem Projekt FiThydro) wird als ausreichend betrachtet. Damit steht ein solides Datenset zur Verfügung, um die zentrale Frage nach dem Abwanderungskorridor sicher beantworten zu können. Es wurden aus markierungstechnischen Gründen keine Fische mit einer Totallänge < 285 mm markiert. Der Konditionsindex (K-Wert) der zur Markierung verfügbaren Fische lag bei 0.76 (Winter) resp. 0.75 (Frühling). Der mittlere K-Wert für 255 Barben in der Aare (gemessen in Sommermonaten und im frühen Herbst) betrug im Mittel 0.83 (unveröffentlichte Daten). Eichenberger & Kirchhofer (2013) ermittelten für 46 Barben (> 17 cm) in der Limmat einen K-Wert von 0.79. Nachev & Sures (2009) stellten in der Donau zwischen Frühling und Herbst an drei Probenahmestellen mittlere K-Werte von 0.87, 0.88 resp. 1.00 fest. Daher kann der mittlere Konditionsindex der Barben in Bannwil von 0.76 im Winter oder 0.75 im Frühling als eher niedrig betrachtet werden, was vermutlich mit dem Überwintern und der reduzierten Nahrungsaufnahme zusammenhängt. Das Alter der markierten Barben ist nicht bekannt.



6.4 Annäherung an das Kraftwerk

Rund die Hälfte der Fische näherten sich dem Kraftwerk an, ohne abzustiegen. Bei der Berechnung mit 10 konsekutiven Detektionen stiegen 47 % der Fische, bei 50 konsekutiven Detektionen 52.5 % der Fische ab. Daraus lässt sich folgern, dass die Kraftwerksanlage als eine Barriere wahrgenommen wurde. Die Aufenthaltszeit vor dem Kraftwerk nahm für die ersten fünf Annäherungen kontinuierlich zu, was auf vermehrte Suchaktivität im Laufe der Zeit hindeutet. Werden die Annäherungen im Tagesverlauf analysiert, ergab sich eine hohe Aktivität zwischen Mitternacht bis morgens um 7 Uhr. Danach war die Aktivität bis ca. um 15 Uhr tief, um dann ab 17 Uhr bis um Mitternacht anzusteigen. Etwa 70-80 % aller Annäherungen fanden nachts oder in der Stunde nach Sonnenaufgang bzw. vor Sonnenuntergang statt. Dies spiegelt die Nachtaktivität der Barben wider. Dieses Muster der täglichen Hauptaktivitätsphasen in den Morgen- und Abendstunden, sowie in der Nacht, wurde bereits von Lucas & Batley (1996) beschrieben. Diese Autoren beobachteten im Winter allerdings nur einen einzigen Aktivitätspeak bei der Abenddämmerung.

Wie die Abstiege, geschahen auch die meisten Annäherungen an das WKW Bannwil kurz nach dem Aussetzen der markierten Fische (vgl. Abbildung 27, Abbildung 28 und Abbildung 29). Zusätzlich konnte ein kleiner positiver Zusammenhang zwischen dem Abfluss und dem Anteil der Barben aus dem Oberwasser, die an einem bestimmten Tag eine Annäherung durchführten, gefunden werden (Tage innerhalb einer Woche nach dem Aussatz ausgeschlossen). Bei der Temperatur bestand hingegen ein negativer Zusammenhang; bei höheren Temperaturen führten weniger Fische eine Annäherung durch. Dies passt zum natürlichen Verhalten der Barben, die im Sommer in der Regel standorttreu sind (Baras & Cherry 1990). Die Ergebnisse sind jedoch mit Vorbehalt zu behandeln, da die Aktivität der Fische nach dem Aussatz am grössten war und alle Aussatzzeitpunkte in der kalten Jahreszeit lagen. Ein Artefakt des Aussatzzeitpunktes kann in der vorliegenden Studie nicht ganz ausgeschlossen werden. Zudem waren die Faktoren Abfluss und Wassertemperatur interkorreliert, so dass nicht bestimmt werden kann, welcher der beiden Faktoren wirklich entscheidend ist.

6.5 Abwanderungskorridore und Zeitpunkt der Abwanderung

37.3 % aller markierten Fische wanderten über das Kraftwerk ab. 59.2 % der Individuen verblieben im Oberwasser und 36.6 % stiegen trotz Annäherungen an das Kraftwerk – teilweise mehrfach – nicht ab. Die Analysen zum Abwanderungskorridor und dem exakten Abstiegszeitpunkt mussten anhand der detektierten Signale mit den erstellten Grafiken durchgeführt werden. Dies erforderte einen hohen Zeitaufwand, weil Hunderte von grafischen Darstellungen analysiert werden mussten. Oft war es nötig, die Originalfiles der Empfangsgeräte zu konsultieren, um sich ein exaktes Bild zu verschaffen. Die Musterplots der Abbildung 33 und ff. veranschaulichen die Analyse des Zeitpunkts des Abstieges.

Der wichtigste Faktor für den Abstieg ist der Zeitpunkt des Aussetzens. Auf alle Aussatzdaten folgte rasch ein Peak der Abwanderung über das WKW Bannwil. 35 Fische (35.4 %) stiegen innerhalb der ersten 24 Stunden ab, 53 Fische (53.5 %) innerhalb der ersten 48 Stunden und 75 Fische (75.8 %) in der ersten Woche. Diese Fische – gefangen aus dem Fischpass des Kraftwerkes – zeigten also eine deutliche Abwanderung kurz nach dem Aussetzen. Dies war der beabsichtigte Effekt der Translokation der Fische vom Unterwasser ins Oberwasser, der sehr rasche Abstieg so vieler Fische nach dem Aussatz ist jedoch als überraschend einzustufen und muss so gedeutet werden, dass viele Barben möglichst rasch wieder in ihr Winterhabitat zurückschwimmen wollten. Dieser Tatsache ist für künftige Experimente Rechnung zu tragen. Der Nachteil war, dass somit viele Fische beim Abstieg die gleichen, durch den Aussatzzeitpunkt bestimmten Umweltbedingungen (inkl. Verfügbarkeit der Wanderkorridore) antrafen. Ideal wäre es, eine Studie mit markierten Fischen über einen Zeitpunkt von 3-4 Jahren durchzuführen. Allerdings ist auch dann nicht gewährleistet, dass die Fische natürliche Abwanderungen über das Kraftwerk durchführen.



Die tageszeitliche Verteilung der Abstiegszeitpunkte war noch deutlicher ausgeprägt als die der Annäherungen an das Kraftwerk. Im 24-Stunden-Verlauf gab es ein ausgeprägtes Muster, die meisten Abstiege erfolgten zwischen 18 Uhr und 7 Uhr morgens. 90.9 % der Abstiege erfolgte nachts, inklusive der Stunde nach Sonnenaufgang und einer Stunde vor Sonnenuntergang waren es sogar 97 %. Dies spiegelt die Nachtaktivität der Barben wider. Dieses Muster war im Winter (Dezember) sowie im Frühling (März/April) sehr ähnlich.

91 Barben (83.4 % aller abgestiegenen Fische) wanderten über die Turbinen ab. Somit waren die Turbinen der Hauptwanderkorridor. Wehrabstiege spielten eine sehr untergeordnete Rolle (3.7 %), noch weniger wichtig waren Abstiege über den Fischpass (2.8 %). Die Wehre waren während der ganzen Untersuchungsdauer an 128 Tage zumindest zeitweise geöffnet. Während der Hauptabstiegszeit der Fische, kurz nach dem Aussatz, standen die Wehre als Abstiegskorridore meist nicht zur Verfügung. Aufgrund von Maschinenrevisionen, die an 170 Tagen während der Untersuchungsperiode durchgeführt wurden, liegt die Anzahl Tage mit Wehrüberfall deutlich über der Anzahl Tage, bei welchen der Aareabfluss über der Ausbauwassermenge vom Kraftwerk lag. Da der Abwanderungskorridor über das Wehr in Bannwil jedoch durchschnittlich nur an 40 Tagen pro Jahr zur Verfügung steht (85 Tage im Jahr 2020), dürfte dies auch für nicht translozierte unmarkierte Fische in der Aare gelten. Daraus lässt sich schliessen, dass ein zeitlich nur sehr kurz verfügbarer Wanderkorridor generell einen geringen Anteil zur Abwanderung beiträgt. Zudem weisen die Wehre am WKW Bannwil nur einen Anteil am Gesamtabfluss von etwa 5 – 10 % auf (2020 4.85 %, während der Untersuchungsperiode 9.22 %, 11 % für die Jahre 2018-2022). An den Tagen mit offenen Wehren gab es insgesamt 13 Fischabstiege. Davon erfolgten vier über die Wehre und neun über die Turbinen. Die Abflussverhältnisse zum Abstiegszeitpunkt für die vier über die Wehre abgestiegenen Fische sind in Tabelle 17 ersichtlich (Bereich Wehrabfluss 20 - 342 m³/s). Möglicherweise würde der Wehrabstieg häufiger benutzt, wenn dieser Abstiegsweg häufiger zur Verfügung stünde. Dies bleibt jedoch Spekulation, da die Stichprobenzahl für diese Tage sehr klein ist. Sicher ist hingegen, dass Barben auch bei geöffneten Wehrfeldern den Abstieg über die Turbinen benützen. Zwei der Abstiege über das Wehr erfolgten am Tag. Bei der geringen Stichprobenzahl von vier Wehrabsteigern entspricht dies 50 % (in Vergleich zu insgesamt 90.9 % der Abstiege bei Nacht). Die neun Fische, welche bei Wehrüberfall den Korridor der Turbinen benutzten, taten dies alle in der Nacht. Die unbedeutende Rolle des Fischpasses für den Fischabstieg am WKW Bannwil mag daran liegen, dass der Fischpass rund 100 m oberhalb des Maschinenhauses einmündet (ungünstig für absteigende Fische) und zudem seine Dotiermenge mit 100 l/s (ca. 0.04 % des Gesamtabflusses) als gering einzustufen und von absteigenden Fischen wohl kaum wahrnehmbar ist. Es ist unter diesen Voraussetzungen eher erstaunlich, dass er von zwei Individuen überhaupt aufgefunden wurde und könnte ein Hinweis auf ein Orientierungsvermögen der Fische sein. Für 10.1 % der absteigenden Fische konnte der Abstiegsweg nicht eindeutig identifiziert werden. Das kann an den diskutierten Tag-Kollisionen liegen oder an anderen Umgebungsparametern, welche eine Detektion verhinderten.

Unfer & Rauch (2019) kamen in Österreich zu anderen Resultaten zum Wanderkorridor: in ihrer Studie wurde in drei Gewässern die Fischaufstiegshilfe von absteigenden Fischen rege benutzt, ebenso die überströmten Wehre. Bei Wehrabfluss wurde der Wehrabstieg für Perlfische sogar zum Hauptwanderkorridor. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich diese Aussagen auf deutlich kleinere Gewässer als die Aare und auf andere Jahreszeiten beziehen. Diese unterschiedlichen Resultate verdeutlichen den grossen Einfluss standortspezifischer Parameter auf den Fischabstieg. Resultate von einem Kraftwerk können deshalb nicht ohne weiteres auf einen anderen Standort übertragen werden.

Es bestätigte sich deutlich, dass die Fische beim Abstieg der Hauptströmung folgen. Die Aufteilung der Abstiege entsprach in etwa der mittleren jährlichen Abflussmenge über den jeweiligen Korridor, zumindest für das Wehr und die Turbinen. Der Fischpass hingegen wurde im Verhältnis zum Abfluss überproportional genutzt. Allerdings handelte es sich hierbei auch nur um drei Individuen. Im Vergleich zu den Turbinen spielten alternative Abstiegswege damit kaum eine Rolle.



6.6 Schwimmtiefen der über die Turbine abgewanderten Fische

Die Leitfähigkeit des Wassers und die Tiefe des Radiosenders sind die kritischsten Parameter beim Empfang der Radiosignale (Kuechle & Kuechle 2012). Die reduzierte Detektionswahrscheinlichkeit von Signalen aus tiefen Stellen verhindert eine Aussage über präferierte Schwimmtiefen der Fische im Oberwasser des Kraftwerks. Die Aufzeichnungen zeigen jedoch, dass die oberen 10 m der Wassersäule im Staubereich und vor den Turbinen intensiv genutzt wurden.

Von grossem Interesse ist die Akklimatisation der Fische in einer bestimmten Tiefe vor dem Abstieg. Diese hat einen wesentlichen Einfluss auf die Stärke des Barotraumas und somit auf die Mortalität bei der Turbinenpassage. Durch starke Druckunterschiede bei der Turbinenpassage kann die Schwimmblase zerstört werden. Barben gehören zu den physostomen Fischen (Fische bei denen die Schwimmblase durch einen Gang mit dem Darm verbunden ist). Die Schwimmblase – bei der Barbe mit zwei Kammern - hat die Funktion, das spezifische Gewicht des Fisches und somit den Auftrieb im Wasser zu regulieren. Die Abbildungen der Schwimmtiefen vor dem Abstieg (Abbildung 39 und Abbildung 53 ff) zeigen auf, dass die Fische – gegeben durch die Flusstopographie am WKW Bannwil – nach der Turbinenpassage vorwiegend in Tiefen zwischen 0 – 6 m stehen. Gegeben durch die vorhandene Konstruktion können Fische oberflächennah die Turbine nicht passieren. Bei einem Pegel am Kraftwerk auf 417.3 m ü. M. müssen die Fische auf eine Tiefe von mindestens 8.05 m abtauchen, um die Turbine zu passieren. Somit schwimmen die Fische aus beträchtlichen Tiefen in die Turbine ein. Da sie sich vorher aber eher oberhalb dieser Tiefen in der Wassersäule aufhielten, sind sie auf eine geringere Wassersäule adaptiert, was ein Vorteil für die Turbinenpassage darstellt.

Die Analysen der Schwimmtiefen lassen – technisch bedingt – keine definitiven Aussagen zu der Tiefenpräferenz der Fische zu. Es könnte sein, dass tiefer schwimmende Fische nicht erfasst wurden (z. B. abgestiegene Fische ohne Detektionen vor dem Abstieg), auch wenn vereinzelt dennoch Signale bis über 14 m Tiefe registriert wurden. Die Mehrheit der validen Signale liess einen Abstieg oberhalb der Turbinenachse vermuten und eine Annäherung im oberen Bereich des Turbineneinlaufs.

6.7 Überlebensraten der abgewanderten Fische

Von mehreren Fischen konnte das Überleben anhand der Signale auf den stationären Antennen oder mit Wiederfängen nachgewiesen werden. Beim mobilen Tracking konnte ein Überleben nur dann zweifelsfrei identifiziert werden, wenn sich die Fische nach dem Abstieg wieder flussaufwärts bewegten. Der Tod eines Fisches konnte nur dann eindeutig identifiziert werden, wenn es sich um einen Sensortag handelte, der ausserhalb des Wassers lag (Tiefe = 0 m). Bei solchen Fällen kann von Prädation ausgegangen werden. Für zukünftige Studien wird deshalb empfohlen, wenn möglich mit Tags zu arbeiten, welche die Aktivität eines Fisches messen (Aktivitätssensoren).

Basierend auf den Bewegungsmustern nach der Kraftwerkspassage überlebten mindestens 69.2 % (N = 63) der über die Turbinen abgewanderten Barben (N = 91). Für 26.4 % (N = 24) der Fische kann nicht eindeutig bestimmt werden, ob sie die Turbinenpassage überlebten. 4.4 % (N = 4) der Fische starben mit grosser Sicherheit. Es konnte kein Zusammenhang zwischen der Totallänge der Barben und der Überlebenswahrscheinlichkeit bei der Turbinenpassage festgestellt werden. Da die genaue Mortalitätsrate nach der Turbinenpassage nicht bekannt ist, wird auf ein Vergleich mit empirischen Modellen zur Mortalitätsabschätzung verzichtet.

Von den vier über das Wehr abgestiegenen Barben überlebten mindestens zwei, für die anderen beiden blieb das weitere Schicksal unklar. Die drei Barben, die über die Fischtreppe abstiegen, überlebten den Abstieg.



Da die Turbine als Abwanderungskorridor eine grosse Rolle spielt und Schädigungen und Mortalität der Fische auftreten können, ist die Notwendigkeit eines Fischschutzes und sicheren Abstieges gegeben. Ganz besonders wenn man bedenkt, dass einige Barben weiter abwandern und das WKW Wynau passieren und sich die Mortalität somit durch kumulative Effekte deutlich erhöht. Während dem Untersuchungszeitraum stiegen acht markierte Fische auch über das WKW Wynau/Schwarzhäusern ab. Bei keinem dieser Fische konnte bis zum Abschluss der Untersuchungen ein Überleben verifiziert werden. Von den zwölf wiedergefangenen, markierten Fischen im Fischpass wies lediglich ein Individuum deutliche Verletzungen durch die Markierung auf. Aus diesem Grunde wird die Markierung nicht als ein entscheidender Faktor betrachtet, der die Mortalität erhöhte.

6.8 Prädation

Rund ein Drittel aller markierten Fische wurde in dieser Studie gefressen. Damit ist der Prädationsdruck auf die Barben in der Aare nicht zu unterschätzen. Besonders Kormorane stehen in Verdacht für die Prädation verantwortlich zu sein, da Sender oftmals an Kormoranruheplätzen über längere Zeit geortet werden konnten. Kormorane sind im Rahmen ihrer fischbasierten Ernährung Generalisten, d. h. sie erbeuten vor allem die häufigsten und am leichtesten zu fangenden Fische. In Cyprinidengewässern im Südwesten Frankreichs machten Barben mit 22.2 % den grössten Anteil der von Kormoranen gefressenen Biomasse aus (Santoul 2005). An anderen europäischen Gewässern waren hingegen andere Arten wichtiger und Barben wurden nur in kleinen Mengen gefressen (Keller 1995; Lyach et al. 2018), so auch in der Schweiz (Suter 1997). Es wurde nachgewiesen, dass Kormorane Barben mit einer Grösse von bis zu 49 cm fressen (Lyach et al. 2018). Somit liegen beinahe alle markierten Fische im Beuteschema dieser Vögel. Die hohe Prädationsrate der translozierten Fische gibt eine Erklärung, warum die Barben im Winter Einstände, wie den Fischpass des WKW Bannwil, aufsuchen. Aufgrund der niedrigeren Stoffwechselaktivität der Barben bei niedrigen Wassertemperaturen war die Fähigkeit vor Prädatoren zu fliehen vermutlich stark herabgesetzt. Zudem kam bei den frisch markierten Barben möglicherweise auch noch eine Schwächung durch den Stress der Narkose und der Markierung dazu.

Nach einem Abstieg war die Wahrscheinlichkeit gefressen zu werden vermutlich nochmals höher. Rund ein Viertel der Fische wurde innerhalb der ersten 3 Tage nach dem Abstieg gefressen. Als möglicher Grund kommt hier eine Verletzung oder Desorientierung durch den Abstieg was ihn einem grösseren Prädationsrisiko aussetzt. Ein anderer Grund könnte sein, dass die Habitate im Unterwasser des WKW Bannwil nicht so viel Deckung bieten, wie der Stauraum im Oberwasser. Falls die Fische nicht bald in die Fischaufstiegshilfe fanden, waren sie stärker den Prädatoren ausgesetzt.

6.9 Mobiles Tracking

6.9.1 Wanderdistanzen

Verhaltensstudien von Barben in grossen Gewässern (Flussordnungszahl fünf und höher) sind rar (Capra et al. 2018) und telemetrische Untersuchungen wurden bisher meist mit deutlich kleineren Stichprobenanzahl durchgeführt (Tabelle 15). Die Ergebnisse dieser Studie liefern deshalb über den Fischabstieg am WKW Bannwil hinaus wertvolle Daten über das Wanderverhalten der Barben.

Die beobachteten durchschnittlichen bzw. maximalen Wanderdistanzen (Home Ranges) betragen im aktuellen Projekt 6.91 bzw. 43.6 km. Diese Werte liegen tendenziell über den Werten der meisten internationaler Untersuchungen der letzten Jahrzehnte, bei denen für Barben (*Barbus barbus*) Home Ranges von wenigen hundert Metern bis zu 35 km nachgewiesen wurden (s. Tabelle 15; Baras 1998; Capra et al. 2018; Hunt & Jones 1974; Lucas & Batley 1996; Ovidio et al. 2007; Panchan et al. 2022; de Vocht & Baras 2003).



Tabelle 15: Vergleich der Resultate verschiedener Studien zu Barbenbewegungen. Angegeben wird je nach Angaben der Originalstudien die Home Range oder die maximale Distanz zum Aussatzort sowie wo vorhanden Mittelwerte (DS=Durchschnitt). Gewässer: Name (Land) und Grössenangaben (Breite, Abfluss, Flussordnungszahl (FLOZ)) gem. Originalstudie. Methoden: M-W=Markierung-Wiederfang, RT=Radiotelemetrie, AT=Akustische Telemetrie.

Referenz	Home Range / max. Distanz	Gewässer	Methode	Anzahl Fische	Länge Untersuchungsstrecke	Untersuchungszeitraum
Hunt & Jones 1974	Max. 34 km	Severn (GB), 25 - 55 m	M-W	531		> 1 Jahr
Lucas & Batley 1996	2 – 20 km	Nidd (GB), 12 m, 8 m ³ /s	RT	31	> 22.5 km	> 1 Jahr
Baras 1998	0.7 – 14.9 km DS 5.9 km	Ourthe (B), 28 m, 23 m ³ /s	RT	7		112 Tage (Frühjahr)
Ovidio et al. 2007	0.2 – 22.7 km		RT	9	27 km	Apr-Jul
Penaz et al. 2002	Max. 2 km	Jihlava (CZE), FLOZ 5	M-W	149	3 km	> 1 Jahr
De Vocht & Baras 2003	1.05 – 27.3 km DS 1.5 / 12.5 km (variabler / homogener Abschnitt)	Meuse (B/NL), 230 m ³ /s	RT	14	40 km	> 1 Jahr
Capra et al. 2018	0.15 – 35 km (Median 3 km)	Rhone (F), 473 m ³ /s	AT	37	35.5 km	Apr-Okt
Panchan et al. 2022	Max. > 40 km (DS 34.4 km)	Donau (A) 250 – 350 m, 2207 m ³ /s	RT	25	58 km	1 Jahr
Diese Studie	0.1 – 43.6 km (DS 6.9 km, Median 6.2 km)	Aare (CH), 272 m ³ /s	RT	225	Regulär 37 km, max. Ausdehnung 107 km	> 1 Jahr

Rekorddistanzen, wie sie in der Donau (318 km flussaufwärts und 301 km flussabwärts; Steinmann et al. 1937) oder dem Rhein (150 km; Schwevers et al. 2020) dokumentiert wurden, konnten in der Aare nicht nachgewiesen werden. Wie Abbildung 44 ersichtlich ist, stimmen die Grenzen der Home Ranges in vielen Fällen mit der Lage der WKW Bannwil, Wynau/Schwarzhäusern und Flumenthal überein. Die Kraftwerke stellen mit grosser Wahrscheinlichkeit Barrieren für die untersuchten Fische dar. Auch die in der Fachliteratur rapportierten Wanderdistanzen werden zum Grossteil von solchen Barrieren beeinflusst. Oft wurden die Untersuchungsgebiete auf Abschnitte innerhalb zweier Wehre begrenzt (z. B. bei Capra et al. (2018), Ovidio et al. (2007) und de Vocht & Baras (2003)) wodurch das volle Wanderpotential der Barben gar nicht aufgezeigt werden konnte. Zudem dürfen der Einfluss der Mortalität bei der Kraftwerkspassage und der Prädation durch fischfressende Vögel nicht unterschätzt werden.

Neben vorhandenen Barrieren wird die Wanderdistanz von Fischen durch die Verfügbarkeit geeigneter Habitate bestimmt. In hochvariablen Gewässerabschnitten, die alle Habitate aufweisen, die ein Fisch für seinen Lebenszyklus benötigt, sind die zurückgelegten Wanderdistanzen deutlich kürzer als in eintönigeren Abschnitten (Capra et al. 2018; De Vocht & Baras 2003). Die Verknüpfung von Wanderdistanzen und verschiedenen Habitaten war jedoch nicht Teil dieser Studie und wurde deshalb nicht weiter untersucht.

Die Wanderdistanzen der Bannwiler Fische waren flussaufwärts signifikant grösser als flussabwärts (Abbildung 45). Dies kann mit der Translokation der Fische zusammenhängen, da solche üblicherweise im Rahmen von Hochwassern geschehen, und die Fische ihr angestammtes Habitat flussaufwärts suchen. Der sehr schnelle Abstieg einiger Fische widerspricht dem jedoch und deutet eher darauf hin,



dass die Fische die Umgebung des Kraftwerks durchaus kennen. Ein Barriereneffekt des WKW Bannwil scheint hier der wahrscheinlichere Auslöser für die Unterschiede zu sein. Flussaufwärts des Aussatzortes liegt mit dem WKW Flumenthal die nächste Barriere deutlich weiter weg als flussabwärts, wodurch eine grössere frei durchwanderbare Strecke in dieser Richtung liegt.

Es bestanden kleine, aber signifikante Zusammenhänge zwischen der Anzahl Funde eines Fisches und seiner Home Range sowie der maximalen Distanz flussaufwärts des Aussatzortes. Grosse Home Ranges und Maximaldistanzen wurden jedoch auch bei Fischen nachgewiesen, die nur selten gefunden wurden (oft wurden lange Distanzen flussaufwärts direkt nach dem Aussatz zurückgelegt). Der Effekt begründet sich deshalb eher darauf, dass häufig gefundene Fische selten eine ganz kleine Home Range und Maximaldistanzen aufwiesen. Ein signifikanter Zusammenhang bestand zudem zwischen Länge bzw. Gewicht einer Barbe und ihrer Home Range. Dieser Effekt wurde bei verschiedenen Fischarten nachgewiesen, wobei die Resultate aus der wissenschaftlichen Literatur insgesamt noch widersprüchlich sind (Radinger & Wolter 2014). Hier war der Effekt nur klein. Das Resultat wird auch durch das Untersuchungsdesign beeinflusst: Mit einer Mindestlänge von 285 mm waren alle hier untersuchten Fische bereits adult und relativ gross, wodurch ein möglicher Effekt kleiner Fische ausgeschlossen war.

6.9.2 Saisonale Wanderungen

Die FAH Bannwil stellt in der Aare einen bedeutenden Wintereinstand dar. Der Fang der Fische konnte hier relativ leicht durchgeführt werden, da die FAH jeden Winter von hunderten, wenn nicht tausenden Barben aufgesucht wird. Wintereinstände von Barben wurden sonst in tiefen Rinnen mit grossen Steinblöcken bzw. bei Hochwassern unter unterspülten Ufern oder Bäumen beobachtet (De Vocht & Baras 2003). In den gedeckten Becken der FAH Bannwil finden die Fische vermutlich Schutz vor Fressfeinden wie Kormoranen, die die poikilothermen Fische im Winter leicht erbeuten können. Der konstante Abfluss in der FAH schützt sie zudem vor möglichem Verdriften bei Hochwassern.

Die Barben fingen an in die FAH einzusteigen, sobald die Wassertemperaturen im Herbst 18 °C unterschritten (Abbildung 46). Verglichen mit dem Beginn der Aktivität im Frühjahr, sind dies sehr hohe Temperaturen, bei denen die Fische durchaus noch aktiv sein und Nahrung zu sich nehmen könnten. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Barben sich in dieser Zeit noch zwischen der Aare und der FAH bewegten. Dies könnte z. B. einem ersten Auskundschaften der Eignung der FAH oder einen Aufenthalt in der FAH nur während bestimmten Tageszeiten zu Beginn der Winterruhe bedeuten. Im Frühjahr verliessen die meisten Barben die FAH erst ab Ende April. Dabei scheint die Wassertemperatur eine untergeordnete Rolle zu spielen; Obwohl die Temperaturen 2021 rund 2.5 °C tiefer lagen als 2020, verliessen die Fische die FAH im gleichen Zeitraum (Abbildung 46). Dies steht im Gegensatz zu bisherigen Studien, die die Aktivität der Barben vor allem mit der Wassertemperatur in Verbindung brachten. Der Einfluss der Tageslänge wurde bisher möglicherweise unterschätzt. Die Barben führen vermutlich jedes Jahr eine Homing-Bewegung in die FAH Bannwil durch – insgesamt wurden 64 der Fische, die aus der FAH gefangen wurden, später wieder dort registriert. Es gab jedoch auch Barben, die den Winter ausserhalb der FAH Bannwil verbrachten, die meisten davon oberhalb des WKW Bannwil. Es wird davon ausgegangen, dass diese Fische den Abstieg über das WKW Bannwil und somit den Weg in die FAH nicht gefunden haben.

Der wichtigste Laichplatz für die markierten Barben lag unterhalb des WKW Bannwil. Die Laichwanderung führte die meisten Fische also nicht, wie in der Literatur beschrieben, flussaufwärts, sondern flussabwärts (Abbildung 47). Dies zeigt die grosse Variabilität im Verhalten potamodromer Arten. Die Länge und Richtung der Laichwanderung ist für diese Fische nicht vorgegeben, sondern ergibt sich aus der Verfügbarkeit und Lage der geeigneten Habitate. Wie in der Ourthe (Ovidio et al. 2007) führten die über mehrere Laichsaisons beobachteten Barben auch in der Aare ein striktes reproduktives Homing durch; acht Fische wurden zur Laichzeit an Standorten mit weniger als 60 m Abweichung zum Vorjahr



beobachtet (Abbildung 49). Das Homing von Barben wird auch von Panchan et al. (2022) in der Donau beschrieben. Fische, die sich zur Laichzeit oberhalb des WKW Bannwil befanden, hielten sich vor allem in den drei Kilometern unterhalb des WKW Flumenthal auf. Dabei handelte es sich grösstenteils um Fische, die nach dem Aussatz flussaufwärts geschwommen und nicht über das WKW Bannwil abgestiegen waren (Abbildung 50). Neun Fische, die sich im Winter bereits an diesem Standort befanden, führten zur Laichzeit eine Wanderung flussabwärts bis zum WKW Bannwil durch und schwammen anschliessend wieder aufwärts auf die Laichplätze unterhalb des WKW Flumenthal (Abbildung 51). Vermutlich versuchten sie, zu ihren angestammten Laichplätzen unterhalb des WKW Bannwil zu gelangen, fanden jedoch keinen Abstiegsweg. Nur zwei Fische überwinterten in der FAH Bannwil und führten anschliessend eine Laichwanderung von rund 10 km flussaufwärts durch. Beide kehrten anschliessend wieder zum WKW Bannwil zurück (Abbildung 50, IDs 63 und 259). Für die Reproduktion benötigen Barben kiesige Stellen mit einem geringen Anteil von Feinsedimenten und passende Fließgeschwindigkeiten (Melcher & Schmutz 2010, Ebel 2002, Baras 1992). Die Strecken unterhalb der Kraftwerke bilden zwischen Solothurn und Wynau möglicherweise die einzigen geeigneten Laichplätze für die Barben und verdienen deshalb in Zukunft besondere Aufmerksamkeit.

6.10 Auswirkung der Markierung auf die Fische

In der Fachliteratur gibt es unterschiedliche Aussagen zum Effekt von implantierten Telemetriemarken auf die Fische. Das Verhalten von markierten Fischen wird im Vergleich mit unmarkierten Fischen oft als unverändert beschrieben (Angela et al. 2004). Wilson et al. (2017) dokumentierten beim adulten Amerikanischen Zander (*Sander vitreus*) kurzfristige Verhaltensänderungen nach der Platzierung der Marke in der Bauchhöhle. Eine Studie von Perry et al. (2018) lieferte sehr umfangreiche Resultate. Bei Jährlingen von Königslachsen konnte durch den im Körper implantierten Sender eine Reduktion der Sprintgeschwindigkeit festgestellt werden, vor allem bei kleinen Fischen und bei schweren Sendern (relativ zum Körpergewicht). Bei 0+-Fischen konnte eine Reduktion der gesteigerten Schwimmgeschwindigkeit beobachtet werden, besonders für Fische, deren Sendergewicht mehr als 5 % des Körpergewichtes betrug. Individuen mit schweren Marken mussten zudem häufiger an die Oberfläche aufsteigen um Luft zu schlucken. Individuen mit einer aus dem Körper herausragenden Antenne unterschieden sich nicht von Fischen ohne Antenne. Deutliche Effekte von Markierungen auf den Fisch wurden bei hohen Temperaturen (25 °C) festgestellt. Jepsen et al. (2008) testeten wilde Forellen mit Sendern mit und ohne Antennen. Im Vergleich zu einer Kontrollgruppe ergab sich keine Differenz zwischen den Gruppen bezüglich dem Überleben nach fünf Monaten. Die markierten Fische wiesen jedoch eine geringere Wachstumsrate auf. Das Verhältnis des Gewichts der Marke zum Fischgewicht hatte eine negative Auswirkung auf die Wachstumsrate. Beide markierten Gruppen wiesen zudem eine relativ hohe Ausstossrate (23 %) der Marken auf.

In der vorliegenden Studie wurde speziell darauf geachtet, dass das Gewicht des Radiosenders 2 % des Körpergewichtes des Fisches nie überschritt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Barben in ihrem Schwimmverhalten höchstens in einer geringen Weise beeinträchtigt waren. Leider fehlen zu Cypriniden entsprechende Studien. Das Abstossen eines Senders konnte bei einer wiedergefangenen Barbe festgestellt werden. Dies kommt also auch bei Cypriniden vor. Insgesamt wird der Einfluss der Radiomarkierung auf den Fisch als gering eingestuft. Der in der Studie mit Königslachsen (Perry et al. 2018) erwähnte nachteilige Effekt bei hohen Temperaturen dürfte für die Barbe keine wesentliche Rolle spielen. Der Effekt der aus dem Körper herausragenden Antenne wird, basierend auf den genannten Studien, als minimal eingestuft.

Zwölf abgestiegene Fische wurden in der Fischtreppe wiedergefangen. Diese wiesen mit einer Ausnahme keine wesentlichen Beeinträchtigungen auf. Bei allen Barben war der durch das Markieren nötige Schnitt gut verheilt. Die Austrittsstelle der Antenne war bei einem Fisch entzündet. Der



Konditionsindex der wiedergefangenen Fische betrug 0.72. Somit war er etwas geringer als der Mittelwert von 0.76 bei der Markierung. Neun dieser Fische sind über die Turbinen abgestiegen. Obwohl keiner dieser Fische äussere Verletzungen aufwies, die von einer Turbine verursacht worden wären, lässt sich nichts über turbinenbedingte Verletzungen aussagen. Wie in Kap. 2.1 erwähnt, sind solche Verletzungen äusserlich oft nicht sichtbar und nur durch spezielle Methoden (z B. Röntgenaufnahmen) erkennbar.



7 Fazit und Zusammenfassung

Am WKW Bannwil wurden im Oktober und November 2019 umfassende radiotelemetrische Installationen vorgenommen. Dazu wurden 13 Telemetrie- und zwei PIT-Tag Antennen montiert. Ziel war es, die Wanderkorridore der Fische bei der Kraftwerkspassage zu identifizieren. Zudem sollten saisonale und tageszeitliche Aspekte der Abwanderung und Informationen zur Annäherung der Fische an das Kraftwerk erfasst werden. Mit dem mobilen Tracking kann zusätzlich ein Einblick in die Wanderungen vor und nach der Passage des Kraftwerkes gewonnen werden. Dafür wurden 37 mobile Trackings zu Fuss oder mit dem Fahrrad durchgeführt, um die Wanderdistanzen in der Aare präzise zu dokumentieren. Aus diesem Grund wurde auch an den beiden unterliegenden Kraftwerken (Wynau und Ruppoldingen) eine Antenne montiert. Die Barbe, ein rheophiler und häufiger Fisch in der Aare, war als Zielart dieser Studie gewählt worden. Sie ist ein typischer Vertreter der Fischlebensgemeinschaft in diesem Aareabschnitt, der dem Epipotamal zuzuordnen ist. Im Rahmen des Projekts FiThydro erfolgten im Winter 2019 erste Markierungen (57 Barben). Die Resultate dieser 57 Fische sind im vorliegenden Bericht integriert. Im Weiteren wurden im März/April 2020 (152 Fische) und Dezember 2020 (83 Fische) - insgesamt 235 Barben - markiert. Es wurden drei verschiedene Radiosender (Radiotags) in unterschiedlichen Grössen verwendet. In den grössten Sendern waren Sensoren (Temperatur und Druck) und ein Datenspeicher eingebaut, welcher die registrierten Daten abspeicherte. Jedem Fisch wurde zudem ein PIT-Tag implantiert. Die Grösse der markierten Fische lag zwischen 285 – 592 mm. Sämtliche markierten Fische wurden aus dem unteren Bereich der Fischtreppe des Kraftwerkes Bannwil gefangen, und nach dem Markieren und ausreichender Erholung wurden die Fische 2.19 km oberhalb des Kraftwerkes wieder in der Aare ausgesetzt. Für die FiThydro Fische lag der Aussatzort 1.27 km oberhalb des Kraftwerkes.

Den Fischen standen am Kraftwerk Bannwil drei verschiedene Abstiegswege zur Verfügung: 1. der Abstieg über eine der drei Turbinen, 2. der Abstieg über eines der drei Wehrfelder oder 3. der Abstieg über den Fischpass, welcher 100 m oberhalb des Maschinenhauses Richtung Unterwasser abzweigt. Bei den aus der Fischtreppe gefangenen und flussaufwärts translozierten Fischen handelte es sich zu einem wesentlichen Teil um abstiegswillige Individuen, denn 37.3 % der Fische stiegen über das Kraftwerk ab. Die Barben stiegen nach der Translokation relativ rasch ab. 84.8 % der Fische waren nach einem Monat abgestiegen. Die Turbinen stellten mit 83.5 % der absteigenden Fische den Hauptwanderkorridor dar. Der Wanderkorridor über das Wehr stand jedoch meistens gar nicht zur Verfügung. Dies ist aber für das WKW Bannwil mit rund 40 Tagen Wehrabfluss pro Jahr eine typische Situation. Mit dem verwendeten Untersuchungsdesign liessen sich daher nur bedingt Präferenzen für den Wanderkorridor Wehr bestimmen. Allerdings dürfte dies an der Tatsache, dass die meisten abstiegswilligen Fische in Bannwil über die Turbinen abwandern, nichts ändern. Da im Jahresverlauf der Abwanderungskorridor über das Wehr nur an wenigen Tagen und oft nur sehr kurzfristig zur Verfügung steht, dürfte er, quantitativ betrachtet, nur eine geringe Bedeutung haben.

Die wichtigsten Resultate der Untersuchungen sind:

- **Annäherung an das Kraftwerk**

Die Annäherung an das Kraftwerk begann in der ersten Nacht nach dem Aussetzen der Fische. Viele Individuen näherten sich dem Kraftwerk, ohne abzustiegen. Je nach Berechnungsart stiegen 47 % resp. 52.5 % der sich annähernden Fische ab. Dies lässt die Folgerung zu, dass die Fische das Kraftwerk als eine Barriere wahrnahmen. Erfolgte kein Abstieg, näherten sich die meisten Fische dem Kraftwerk mehrmals an. Die Aufenthaltsdauer vor dem Kraftwerk nahm dabei mit jeder zusätzlichen Annäherung zu (untersucht für die ersten fünf Annäherungen pro Individuum). Annäherungen ohne Abstieg dauerten länger als Annäherungen des gleichen Individuums, die mit einem Abstieg enden.



- **Bedeutung von Tageszeit, Abfluss und Temperatur für die Annäherungen**

Ca. 70 - 80 % der Annäherungen fanden nachts und in den Abend- und Morgenstunden statt. Dies zeigte deutlich die Nachtaktivität der Barben. Der Anteil der Fische, die an einem bestimmten Tag eine Annäherung durchführt, korrelierte leicht mit der Abflussmenge und der Temperatur der Aare. Mit zunehmendem Abfluss erhöhte sich die Annäherungsrate, mit steigender Temperatur verringerte sie sich. Da die meisten Annäherungen kurz nach dem Aussatz der Fische geschahen, wurde für diese Analyse der Zeitraum von einer Woche nach dem Aussatz ausgeschlossen. Trotzdem können die Resultate noch durch den Aussatzzeitpunkt in der kalten Jahreszeit beeinflusst werden.

- **Abwanderungskorridor und Zeitpunkt der Abwanderung**

109 der 292 markierten Fische sind über das Kraftwerk abgewandert (37.3 %). 91 der abgewanderten Barben (83.5 % aller abgestiegenen Fische) wanderten über die Turbinen ab. 4 Fische (3.7 %) benutzten die Wehrfelder als Abstieg, 3 Fische (2.8 %) den Fischpass. Für 11 abgestiegene Fische (10.1 %) konnte der Abwanderungskorridor nicht eindeutig bestimmt werden. Obwohl in der Untersuchungsperiode an den Wehren während 128 Tagen Überfall bestand, spielten die Abwanderungen über das Wehr nur eine sehr untergeordnete Rolle und Wehröffnungen lösten keine grösseren Abwanderungen aus. Gemessen an ihrem Anteil von 0.04 % am gesamten Abfluss, wurde die Fischaufstiegshilfe überproportional häufig genutzt, wenn auch nur von 3 Individuen insgesamt (2.8 %). Nach der Markierung und Translokation nach oben, waren viele Individuen als abwanderungswillig einzustufen. Allerdings warteten die Fische nicht tagelang, bis sich die Wehre bei zunehmendem Abfluss öffneten, sondern sie wanderten rasch über den Korridor ab, der am meisten Wasser führte. Dabei handelte es sich um den Korridor über die Turbinen. Diese Tatsache verlangt nach einem effektiven Schutz der Fische bei der Abwanderung. Für 99 Fische war die Dauer vom Aussatz bis zum Abstieg bekannt. 35 Fische (35.4 %) sind innerhalb der ersten 24 Stunden abgestiegen, 53 Fische (53.5 %) innerhalb der ersten 48 Stunden. 75 Fische (75.8 %) sind in der ersten Woche abgestiegen, 84 Fische (84.8 %) im ersten Monat. Der tageszeitliche Aspekt der Abwanderung zeigte noch deutlicher als die Aktivität bei der Annäherung die Nachtaktivität der Barben. Im Verlaufe des Tages waren praktisch keine Abwanderungen festzustellen. Die Abstiegsaktivität startete ca. um 18 Uhr und dauert bis morgens um 7 Uhr. Dies gilt für den Winter wie auch für den Frühling. 90.9 % der Abstiege geschahen in der Nacht.

- **Überlebensraten der abgewanderten Fische**

Von den 91 über die Turbine abgewanderten Fischen überlebten mindestens 63 (69.2 %). Bei den vier über das Wehr abgestiegenen Fischen lag die Mindestüberlebensrate bei 50 %. Dies wurde anhand der Wandermuster nach der Kraftwerkspassage analysiert. Für 26 (23.9 %) der Fische konnte nicht eindeutig entschieden werden, ob sie nach dem Abstieg tot oder lebendig waren. Sieben Barben stiegen zwei Mal ab. Sie waren im Anschluss an den Wiederfang in der Fischtreppe wiederum im Oberwasser ausgesetzt worden. Sechs von ihnen stiegen erneut über die Turbine ab. Mindestens vier überlebten den zweiten Abstieg.

- **Prädation**

Rund ein Drittel aller markierten Fische wurde mit hoher Wahrscheinlichkeit gefressen, vermutlich hauptsächlich durch Vögel. Ein möglicher Grund für die hohe Prädationsrate ist das Translokieren der Fische aus ihrem geschützten Winterhabitat und die durch einen niedrigen Stoffwechsel und Mangel an Unterständen erhöhte Exposition gegenüber homoiothermen Prädatoren.



- **Schwimmtiefen**

Von grossem Interesse sind die Schwimmtiefen kurz vor dem Abstieg über die Turbine. Es liess sich keine Präferenz für bestimmte Schwimmtiefen berechnen, da Radiosignale aus tiefen Stellen eine reduzierte Stärke haben und daher diese Signale oft nicht detektiert wurden. Der Bereich der benutzten Tiefe liess sich jedoch klar erkennen: Die gesamte zur Verfügung stehende Wassersäule vor dem Kraftwerk wurde genutzt (maximale Tiefe ca. 14 m). Viele Fische näherten sich aber oberhalb der Turbinenachse an. Nach der Turbinenpassage standen den Fischen nur noch deutlich geringere Tiefen (bis zu 6 m) zur Verfügung. Für Fische, die sich in grosser Tiefe annäherten, kam es somit zu einem schnellen Wechsel der Druckverhältnisse nach der Turbinenpassage. Dies hat in der Regel einen Einfluss auf die Stärke des Barotraumas.

- **Mobiles Tracking zur Erfassung langer Wanderdistanzen**

253 der 292 markierten Barben konnten mit dem mobilen Tracking wieder geortet werden, wobei es sich nur bei 194 gefundenen Tags um lebende Individuen handelte. Rund 55 % der Fische wurden ausschliesslich oberhalb von Bannwil detektiert. 86 Individuen wurden bis zu 5 km unterhalb des WKW Flumenthal gefunden, jedoch nur eines oberhalb davon. Von den 109 insgesamt detektierten Absteigern wurden 88 Fische durch das mobile Tracking unterhalb von Bannwil festgestellt. 12 von ihnen wurden zuvor am WKW Flumenthal registriert. Am WKW Wynau liess sich der Abstieg für sechs Fische nachweisen.

Der durchschnittliche Aktionsraum (Home Range) der markierten Barben betrug 6.91 km (Bereich 0.11 (Individuum wurde nur einmal gefunden) – 43.6 km). Die maximale Wanderdistanz ab dem Aussatzort war flussaufwärts mit durchschnittlich 7.49 km deutlich höher als der entsprechende Wert von 4.15 km flussabwärts. Dies wurde bedingt durch die geringere Distanz zum nächsten Wanderhindernis.

- **Saisonale Wanderungen**

Mit der Radiotelemetrie konnten Erkenntnisse zu den Laichgebieten und dem Wintereinstand der Barben in der Aare gewonnen werden. Die wichtigsten Laichgebiete lagen unterhalb der WKW Bannwil und Flumenthal. Vermutlich wandern die meisten Barben aus dem Wintereinstand in der FAH des WKW Bannwil nur wenige km flussabwärts zu den Laichplätzen. Es wurden aber auch Laichwanderungen von rund 10 km flussaufwärts (vom WKW Bannwil bis zum WKW Flumenthal) beobachtet. Die Barben, die über zwei Laichperioden beobachtet werden konnten, führten ein striktes Homing aus.

Die FAH des WKW Bannwil stellt einen bedeutenden Wintereinstand für die Barben in der Aare dar, in dem tausende Fische überwintern. Sie fingen an in die FAH einzusteigen, sobald die Wassertemperaturen im Herbst 18 °C unterschritten und verliessen sie grösstenteils ab Ende April.

- **Auswirkung der Markierung auf die Fische**

Die langfristige Auswirkungen der Markierung mit einem Radiosender auf die Fische konnte anhand von zwölf Wiederfängen im Fischpass dokumentiert werden. Zusätzlich wurden Resultate aus der Literatur bei der Beurteilung mitberücksichtigt. Insgesamt wird der Einfluss der Radiomarkierung auf den Fisch als gering eingestuft. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Schnittwunde nach wenigen Tagen zugewachsen ist. Kurzfristige Auswirkungen von Markierungen bei der Turbinenpassage sind nicht bekannt.



- **Eignung der Radiotelemetrie für die Dokumentation des Abwanderungskorridors**

Für jede Studie ergibt sich aus der Fragestellung und den standortspezifischen Begebenheiten die geeignete Methode zur Analyse der Fischabwanderung. Wenn die Annäherung an das Kraftwerk, der Abstiegskorridor sowie die Bewegungen nach der Passage des Kraftwerkes im Zentrum der Betrachtungen sind, dann eignet sich die Radiotelemetrie hervorragend. Diese Methode liefert jedoch keine zwei- oder dreidimensionalen Bewegungsmuster vor dem Kraftwerk. Steht dies im Zentrum der Betrachtung, dann ist die akustische Telemetrie die geeignetere Methode. Dies trifft auch für sehr tiefe Gewässer zu. Jedoch bietet die Radiotelemetrie neben diesem Nachteil einige deutliche Vorteile. Die Installationen vor dem Kraftwerk sind in der Regel einfacher. Turbulenzen und Geräusche unter Wasser haben kaum Einfluss auf die Detektion der Fische. Trotz zunehmender Bedeutung der akustischen Telemetrie weist die Radiotelemetrie einige deutliche Vorteile auf, die für eine Studie entscheidend sein können (prädestiniert für den Einsatz in Flüssen mit Tiefen < 5 m, Detektion über lange Distanzen, relativ einfache mobile Detektionsmöglichkeiten entlang eines Flusses).

Die radiotelemetrische Studie am WKW Bannwil konnte wesentliche Fragen beantworten. Ein wichtiges Ergebnis der Studie ist, dass ein grosser Anteil der Fische über die Turbinen absteigt, obwohl die Präferenzen für den Korridor Wehrabstieg nicht eindeutig ermittelt werden konnten. Ein Hauptabstieg über die Turbinen erfordert künftig grosse Anstrengungen zum Schutz der Fische an grossen Kraftwerken. Die Turbinen als Abwanderungskorridor zu betrachten, ist aus der ökologischen Perspektive problematisch. Fischschutz und Fischgängigkeit sind somit auch an grossen Kraftwerken eine wichtige Thematik. Ebenfalls wichtige Ergebnisse der Studie sind der Kenntniserwerb zur Ökologie der Barbe bezüglich Wanderdistanzen, Reproduktionsarealen, Homingverhalten sowie die Dokumentation von Wanderungen zwischen Sommer- und Winterhabitaten.

Da die Wehre am WKW Bannwil ausschliesslich bei grossen Abflussmengen offen sind, lässt sich nur in einem limitierten Ausmass abklären, was der Einfluss eines offenen Wehres auf die Fischwanderung bedeutet. Bei Kraftwerken mit seltener Wehröffnung ist die Wahrscheinlichkeit dann auch eher klein, dass der Zeitraum der offenen Wehre gerade mit der Abwanderungszeit der Fische zusammenfällt. Für die potamodromen Fischarten sind bisher keine klaren Auslöser (Trigger) für Fischwanderungen bekannt.

Für die Tiefenpräferenz sind künftig weitere Untersuchungen nötig. Nur so kann die Heftigkeit des Barotraumas dokumentiert werden. Der Einbezug weiterer Fischarten ist ebenso von Interesse. Allerdings werden mit der Methode der akustischen Telemetrie oder der Radiotelemetrie vorwiegend grössere Individuen markiert und die Aussagen sind auf diese Grössenklassen beschränkt. Um Kollisionen von Signalen mit markierten Fischen vor dem Kraftwerk künftig zu vermeiden, wird empfohlen, an mehreren Tagen kleinere Mengen von Fischen zu markieren. Dies erhöht zwar den Fang- und Markierungsaufwand, dürfte jedoch zu deutlich besseren Detektionsergebnissen führen. Die Verwendung von translozierten Fischen hat einige Vorteile, aber auch Nachteile. Diese Tatsache gilt es für künftige Studien zu berücksichtigen. Auf translozierte Fische zu verzichten bedeutet jedoch, dass die Fische über einen langen Zeitraum (2-3 Jahre) beobachtet werden sollten. Damit erreicht man aber rasch die Limite der Lebensdauer von Radiosendern oder es können nur noch sehr grosse Individuen markiert werden.



8 Dank

Wir bedanken uns bei den zuständigen Personen der BKW für die Unterstützung und die unkomplizierte Abwicklung der Zusammenarbeit (Carl Robert Kriewitz, Alexander Andreaus und Sandra Krähenbühl). Ganz speziell danken wir Thomas Lüthi und seinem Team im WKW Bannwil für die vielen Unterstützungen und Hilfeleistungen. Ebenso danken wir Stefan Wicki, BKW, für die Ermöglichung des Zuganges zum Kraftwerk Wynau und Stefan Recher, BKW, für die zur Verfügung gestellten Daten zu den Wehröffnungen am WKW Bannwil. Die Alpiq AG ermöglichte die Montage und das Betreiben einer Antenne am WKW Ruppoldingen. Dafür möchten wir uns ebenfalls bei Roland von Arx für seine Unterstützung bedanken. Dem Fischereiinspektorat Bern danken wir für die Unterstützung der Untersuchungen (Daniel Bernet, Tihomir Prevendar) sowie für diverse Auskünfte und die gute Zusammenarbeit. Im Weiteren danken wir Christine Reich, Oliver Kastenhofer und Marcel Arter für die Unterstützung beim mobilen Tracking. Diversen Vertretern des EU-Projekts FITHydro danken wir für die vielen Synergien, welche sich in der Zusammenarbeit ergaben. Dies gilt besonders für Stephan Kammerer und Ismail Albayrak (beide VAW). Dem BAFU danken wir für die Finanzierung des Projekts und der Bereitstellung der Abflussdaten der Aare. Schliesslich geht unser Dank auch an den Verband Aare-Rheinwerke (VAR), welcher den Auftrag koordinierte.

Das Feedback von Sandra Krähenbühl, Sabrina Jörg, Julian Meister und Ricardo Mendez unterstützte uns für den Schlussbericht mit wertvollen Bemerkungen und hilfreichen Kommentaren.



9 Literatur

- Angela, S. M., Geist, D. R., Brown, R. S., Deters, K. A. & McDonald, R. D. 2004. Effects of acoustic transmitters on swimming performance and predator avoidance in juvenile Chinook salmon. *North American Journal of Fisheries Management*, 24:162-170.
- Baras, E. 1992. Etudes des stratégies d'occupation du temps et de l'espace chez le barbeau fluviatile, *Barbus barbus* (L.). *Cahiers d'éthologie*, 12:125-442.
- Baras, E. 1994. Constraints imposed by high densities on behavioural spawning strategies in the barbel, *Barbus barbus*. *Folia Zoologica*, 43:255-266.
- Baras, E. 1998. Selection of optimal positioning intervals in fish tracking: An experimental study on *Barbus barbus*. *Hydrobiologia*, 371/372:19-28.
- Baras, E. & Cherry, B. 1990. Seasonal activities of female barbel *Barbus barbus* (L.) in the River Ourthe (Southern Belgium) as revealed by radio-tracking. *Aquatic Living Resources*, 3:283-294.
- Baras, E. & Nindaba, J. 1999. Diel dynamics of habitat use by riverine young-of-the-year *Barbus barbus* and *Chondrostoma nasus* (Cyprinidae). *Archiv für Hydrobiologie*, 146:431-448.
- Bischoff, A. & Freyhof, J. 1999. Seasonal shifts in day-time resource use of 0+ barbel, *Barbus barbus*. *Environmental Biology of Fishes*, 56:199-212.
- Britton, J. R. & Pegg, J. 2011. Ecology of European barbel *Barbus barbus*: Implications for river, fishery, and conservation management. *Reviews in Fisheries Science*, 19,4:321-330.
- Brown, R. S., Colotelo, A. H., Pflugrath, B. D., Boys, C. A., Baumgartner, L. J., Deng, Z. D., Silva, L. G. M., Brauner C. J., Mallen-Cooper, M., Phonekhangpeng, O., Thorncraft, G. & Singhanouvong, D. 2014. Understanding barotrauma in fish passing hydro structures: A global strategy for sustainable development of water resources. *Fisheries*, 39, 3:108-122.
- Cada, G. F. 2001. The Development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival. *Fisheries*, 26:14-23.
- Calles, O., Rivinoja, P. & Greenberg, L. 2013. A historical perspective on downstream passage at hydroelectric plants in Swedish rivers. S. 309-322. In: Maddock, I., Harby, A., Kemp, P. & Wood, P. Editoren. *Ecohydraulics*. Wiley, Chichester.
- Capra, H., Pella, H. & Ovidio, M. 2018. Individual movements, home ranges and habitat use by native rheophilic cyprinids and non-native catfish in a large regulated river. *Fisheries Management and Ecology*, 25, 2:136-149.
- de Vocht, A. & Baras, E. 2003. Effect of hydropeaking on migrations and home range of adult barbel (*Barbus barbus*) in the river Meuse: S. 9-13. In: Spedicato, M. T., Lembo, G. & Marmulla, G. Editoren. *Aquatic telemetry: advances and applications*. Proceedings of the Fifth Conference on Fish Telemetry held in Europe. Ustica. Rome, FAO/COISPA.
- Dingle, H. 1996. *Migration: the biology of life on the move*. Oxford University Press, Oxford: 326 Seiten.
- Ebel, G. 2002. Untersuchungen zur Stabilisierung von Barbenpopulationen – dargestellt am Beispiel eines mitteldeutschen Fließgewässers. *Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie*, Halle, 2:152 Seiten.
- Eichenberger, D. & Kirchhofer, A. 2013. *Barben in der Limmat*. WFN: 33 Seiten.
- FIThydro www.fithydro.eu
- Guthruf, J. 2006. Koordinierte Fischaufstiegskontrollen an den Aare-Kraftwerken zwischen Solothurn und der Mündung in den Rhein. Gutachten im Auftrag des Amtes für Umwelt des Kantons Solothurn, des Amtes für Wald, Jagd und Fischerei des Kantons Solothurn, der Sektion Jagd und Fischerei, BVU des Kantons Aargau und der Abt. Landschaft und Gewässer, BVU des Kantons Aargau: 99 S. + 44 S. Anhang.



- Havn, T. B., Økland, F., Teichert, M. A. K., Heermann, L., Borcharding, J., Sæther, S. A., Tambets, M., Diserud, O. H. & Thorstad, E. B. 2017. Movements of dead fish in rivers. *Animal Biotelemetry*, 5 (1), 1–10. BioMed Central.
- Havn, T. B., Thorstad, E. B., Borcharding, J., Heermann, L., Teichert, M. A., Ingendahl, D., Tambets, M., Saether, S. A. & Okland, F. 2019. Impacts of a weir and power station on downstream migrating Atlantic salmon smolts in a German river. *River Research and Application*, 1-13.
- Huet, M. 1949. Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courantes. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, Vol. XI, Fasc. 3/4:332-351.
- Hunt, P. C. & Jones, J. W. 1974. A population study of *Barbus barbus* (L.) in the River Severn, England: II. Movements. *Journal of Fish Biology*, 6, 3:269–278.
- Jepsen, N., Mikkelsen, J. S. & Koed, A. 2008. Effects of tag and suture type on survival and growth of brown trout with surgically implanted telemetry tags in the wild. *Journal of Fish Biology*, 72:594–602.
- Jepsen, N., Schreck, C., Clemens, S. & Thorstad E. 2005. A brief discussion on the 2 % tag/body mass rule of thumb: S. 255-259. In: Spedicato, M. T., Lembo, G. & Marmulla, G. Editoren. *Aquatic telemetry: advances and applications*. Proceedings of the Fifth Conference on Fish Telemetry held in Europe. Ustica. Rome, FAO/COISPA.
- Jungwirth, M., Haidvogel, G., Moog, O., Muhar, S. & Schmutz, S. 2003. *Angewandte Fischökologie an Fließgewässern*. Facultas, Wien:547 S.
- Keller, T. (1995). Food of cormorants *Phalacrocorax carbo sinensis* wintering in Bavaria, southern Germany. *Ardea*, 83 (1), 185–192.
- Kraiem, M. & Pattee, E. 1980. La tolérance à la température et au déficit en oxygène chez le barbeau (*Barbus barbus* L.) et d'autres espèces provenant des zones voisines. *Archiv für Hydrobiologie* 88:250-261.
- Kuechle, V. B. & Kuechle, P. J. 2012. Radio telemetry in freshwater: the basics. Seiten 91-137. In: Adams, N. S, Beeman, J. W. & Eiler, J. H. Editoren. *Telemetry techniques: a user guide for fisheries research*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.
- Lucas, M. C. & Baras, E. 2001. *Migration of freshwater fishes*. Blackwell Science, Oxford: 440 Seiten
- Lucas, M. C. & Batley, M. 1996. Seasonal movements and behaviour of adult barbel *Barbus barbus*, a riverine cyprinid fish: implications for river management. *Journal of applied ecology*, 33:1345-1358.
- Lucas, M. C. & Frear, P. A. 1997. Effects of a flow-gauging weir on the migratory behaviour of adult barbel, a riverine cyprinid. *Journal of Fish Biology*, 50:382-396.
- Lyach, R., Blabolil, P. & Čech, M. (2018). Great Cormorants *Phalacrocorax carbo* feed on larger fish in late winter. *Bird Study*, 65 (2), 249–256. Taylor & Francis.
- Mueller, M., Sternecker, K., Milz, S. & Geist, J. 2020. Assessing turbine passage effects on internal fish injury and delayed mortality using X-ray imaging. *PeerJ* 8:e9977
- Nachev, N. & Sures, B. 2009. The endohelminth fauna of barbel (*Barbus barbus*) correlates with water quality of the Danube River in Bulgaria. *Parasitology* 136:545-552.
- Ovidio, M., Parkinson, D., Philippart, J. C. & Baras, E. 2007. Multiyear homing and fidelity to residence areas by individual barbel (*Barbus barbus*). *Belgian Journal of Zoology*, 137, 2:183–190.
- Panchan, R., Pinter, K., Schutz, S. & G. Unfer. 2022. Seasonal migration and habitat use of adult barbel (*Barbus barbus*) and nase (*Chondrostoma nasus*) along a river stretch of the Austrian Danube River. *Environmental Biology of Fishes*, 105:1601-1616.
- Penaz, M. 1977. Population analysis of the barb *Barbus barbus*, from some Moravian rivers (Czechoslovakia). *Acta Scientiarum Naturalium Brno*, 11:1-30.



- Perry, R.W. & Liedtke, T.L. Editoren. 2018. Effects of transmitter type, tagging method, body size, and temperature on behavior, physiology, and swimming performance of juvenile Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*): U.S. Geological Survey Open Report 2018–1186, 74 S.
- Pracheil, B. M., DeRolph, C. R., Schramm, M. P. & Bevelhimer, M. S. 2016. A fish-eye view of riverine hydropower systems: the current understanding of the biological response to turbine passage. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 26:153-167.
- QGIS.org. 2021. QGIS Geographic Information System. QGIS Association.
- R Development Core Team. 2020. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Wien.
- Radinger, J. & Wolter, C. 2014. Patterns and predictors of fish dispersal in rivers. *Fish and Fisheries*, 15, 3:1–18.
- Richmond, M. C., Serkowski, J. A., Ebner, L. L., Sick, M., Brown, R. S. & Carlson, T. J. 2014. Quantifying barotrauma risk to juvenile fish during hydro-turbine passage. *Fisheries Research*, 154, 152–164.
- Santoul, F. (2005). The Diet of Great Cormorants *Phalacrocorax carbo* wintering in Southwestern France. *Revue D'Ecologie - La Terre Et La Vie*, 60 (33), 83–87.
- Schwevers, U. & Adam, B. 2020. Fish protection technologies and fish ways for downstream migration. Springer, Cham: 279 Seiten.
- Schwevers, U. & Adam, B. & Mögeltönder-Löwenberg, S. 2020. PIT-Tagging Hochrhein. Abschlussbericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU. 169 S.
- Steinmann, P., Koch, W. & Scheuring, L. 1937. Die Wanderung unserer Süßwasserfische, dargestellt auf Grund von Markierungsversuchen. *Zeitschrift für Fischerei und deren Hilfswissenschaften*, Band XXXV:369-467.
- Sunrise-and-sunset.com: Sonnenaufgangszeiten und Sonnenuntergangszeiten: <https://www.sunrise-and-sunset.com/de/sun/schweiz/aarau>. Zugriff am 13.06.2023.
- Suter, W. (1997). Roach rules: Shoaling fish are a constant factor in the diet of Cormorants *Phalacrocorax carbo* in Switzerland. *Ardea*, 85 (1), 9–27.
- Summerfelt, R. C. & Smith L. S. 1990. Anesthesia, surgery, and related techniques. S. 213-272. In: Schreck, C. B. & Moyle, P. B. Editoren. *Methods for fish biology*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.
- Thurrow, R. F. 2016. Life histories of potamodromous fishes. Seiten: 29-54. In Morais, P., & Daverat, F, Editoren: *An introduction to fish migration*. CRC Press, Boca Raton.
- Turnpenny, A. W. H., Clough, S., Hanson, K. P., Ramsay, R. & McEwan, D. 2000. Risk assessment for fish passage through small, low-head turbines. ETSU-Report H/06/00054/REP: 58 Seiten.
- Unfer, G. & Rauch P. 2019. *Fischschutz und Fischabstieg in Österreich – Endbericht*. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien.
- Vikström, L., Leonardsson, K., Leander, J., Shry, S., Calles, O. & Hellström, G. 2020. Validation of Francis-Kaplan turbine blade strike models for adult and juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*, L.) and anadromous brown trout (*Salmo trutta*, L.) passing high head turbines. *Sustainability*, 12, 6384:doi:10.3390/su12166384.
- Watkins, M.S., Doherty, S. & Copp. G. H. 1997. Microhabitat use by 0+ and older fishes in a small English chalk stream. *J. Fish Biol.*, 50:1010-1024.
- Wilson, A. D. M., Hayden, T. A., Vandergoot C. S., Kraus, R. T., Dettmers, J. M., Cooke, S. J. & Krueger, C. C. 2017. Do intracoelomic telemetry transmitters alter the post-release behavior of migratory fish? *Ecology of Freshwater Fish*, 26:292-300.



10 Anhang

10.1 Anhang Aarekraftwerk Bannwil

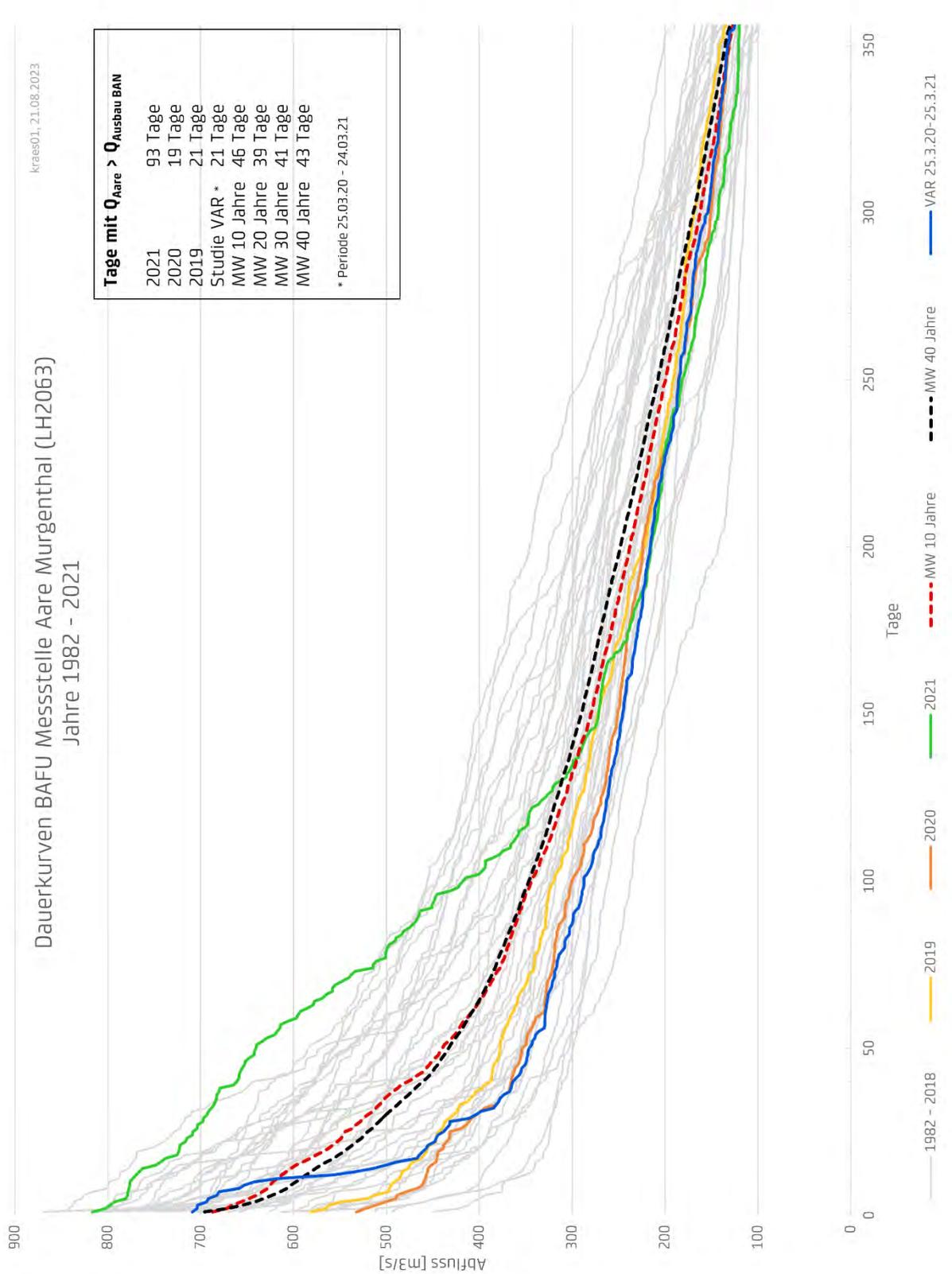


Abbildung 52: Dauerkurve des Aareabflusses bei der Messstelle Murgenthal 1982-2021 mit der Untersuchungsperiode in blau (Graphik BKW)



10.2 Anhang Methoden

Tabelle 16: Übersicht über alle durchgeführten mobilen Trackings. Grau: Trackings für das Projekt Flussforelle

Datum	Route	Fortbewegung
24.06.2019	Aarwangen – Wangen a. d. A.	zu Fuss
21.08.2019	Aarwangen – WKW Bannwil	zu Fuss
11.01.2020	Stauwehr Schönenwerd – Aarburg	Fahrrad
15.01.2020	Murgenthal – Walliswil	zu Fuss
31.01.2020	WKW Aarau – Boningen	Fahrrad
06.02.2020	Olten – WKW Flumenthal	Fahrrad
12.03.2020	Olten – Solothurn	Fahrrad
08.04.2020	Olten – Solothurn	Fahrrad
17.04.2020	WKW Wynau - WKW Bannwil	zu Fuss
23.04.2020	Olten - WKW Flumenthal	Fahrrad
27.04.2020	WKW Wynau - WKW Bannwil	zu Fuss
07.05.2020	WKW Wynau - WKW Bannwil	zu Fuss
07.05.2020	Olten – Solothurn	Fahrrad
15.05.2020	WKW Wynau - WKW Bannwil	zu Fuss
20.05.2020	Olten – Solothurn	Fahrrad
27.05.2020	WKW Wynau - WKW Bannwil	zu Fuss
03.06.2020	Olten - Biel	Fahrrad
23.06.2020	Olten – Solothurn	Fahrrad
07.07.2020	Olten – Solothurn	Fahrrad
31.07.2020	Olten – Solothurn	Fahrrad
19.08.2020	Olten – Solothurn	Fahrrad
21.08.2020	Brugg – Olten	Fahrrad
25.08.2020	Koblenz – Brugg	Fahrrad
10.09.2020	Olten - Nennigkofen "Inseli"	Fahrrad
15.09.2020	Brugg – Olten	Fahrrad
30.09.2020	Olten – Solothurn	Fahrrad
12.10.2020	Brugg – Olten	Fahrrad
21.10.2020	Olten – Solothurn	Fahrrad
05.11.2020	Brugg – Olten	Fahrrad
10.11.2020	Olten - Orpund (mit Lücke unterhalb Bannwil)	Fahrrad
19.11.2020	Bannwil "Schwanau" - WKW (Lücke vom 10.11.20)	zu Fuss
30.11.2020	Brugg – Olten	Fahrrad
08.12.2020	Olten – Solothurn	Fahrrad
16.12.2020	Olten – Solothurn	Fahrrad
22.12.2020	Brugg – Olten	Fahrrad
05.01.2021	Brugg – Olten	Fahrrad
07.01.2021	Olten – Solothurn	Fahrrad
26.01.2021	Murgenthal - Wangen a. d. A.	zu Fuss
08.02.2021	Brugg – Olten	Fahrrad
16.02.2021	Olten - Nennigkofen "Inseli"	Fahrrad
09.03.2021	Olten – Solothurn	Fahrrad
01.04.2021	Olten – Biel	Fahrrad
02.06.2021	Olten – Altreu	Fahrrad
10.06.2021	Brugg – WKW Ruppoldingen	Fahrrad
05.08.2021	Olten – Altreu	Fahrrad
10.08.2021	Brugg – Olten	Fahrrad
02.09.2021	Olten – Grenchen	Fahrrad
07.10.2021	Olten – Grenchen	Fahrrad
08.11.2021	Olten – Grenchen	Fahrrad
16.11.2021	Brugg – WKW Ruppoldingen	Fahrrad
07.12.2021	Olten - Solothurn	Fahrrad



10.3 Anhang Resultate

10.3.1 Abstiegswege

Tabelle 17: Abstiegswege und Zeitpunkte für alle abgestiegenen Fische mit bekanntem Abstiegskorridor und Zeitpunkt. Zudem sind das Überleben («tot» = hat mit hoher Sicherheit nicht überlebt), der Wehrabfluss im Gesamten, sowie für die sechs Wehrteile (in grau) zum Abstiegszeitpunkt, der Gesamtabfluss als 2h-Mittel, sowie Abfluss und Temperatur der Aare zum Abstiegszeitpunkt angegeben. Abkürzung Abstiegswege: T = Turbine, W1-W3 = Wehrfelder 1-3, FAH = Fischaufstiegshilfe, U = Unbekannt

Tag ID	TL in mm	Abstiegsweg	Abstiegszeitpunkt	Überlebt?	Abfluss Klappe 1 in m ³ /s	Abfluss Klappe 2 in m ³ /s	Abfluss Klappe 3 in m ³ /s	Abfluss Segment 1 in m ³ /s	Abfluss Segment 2 in m ³ /s	Abfluss Segment 3 in m ³ /s	Gesamtabfluss_Wehr in m ³ /s	Gesamtabfluss Wehr 2h Mittelw. in m ³ /s	Wassertemperatur in °C	Abfluss Aare in m ³ /s	Tag ID
14	432	T	28.03.2020 23:56	ja	-	-	-	-	-	-	-	-	7.7	184.8	14
21	493	T	02.04.2020 16:25	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.7	170.4	21
23	504	T	18.12.2019 22:31	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	8.1	343.6	23
26	457	T	28.10.2020 22:15	ja	17.7	6.6	0	0	0	0	24.3	3.7	12.4	465.2	26
30	431	T	17.12.2019 23:03	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	8.1	342.6	30
37	496	T	25.12.2019 01:15	tot	28.4	26.5	10.6	0	0	0	65.5	11.1	7.7	515.6	37
41	455	T	19.12.2019 05:38	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	8.1	340.4	41
44	507	T	25.10.2020 04:42	ja	0	0	0	0	0	0.4	0.4	0.1	12.8	336.9	44
46	483	T	10.12.2020 20:29	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	7.5	140.5	46
48	426	T	10.12.2020 23:14	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.4	137.6	48
51	472	T	11.12.2020 03:47	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.3	135.6	51
53	382	T	31.03.2020 21:37	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	6.9	174.7	53
56	416	T	26.03.2020 06:09	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	6.3	213.1	56
57	384	T	26.03.2020 06:42	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	6.3	213.5	57
58	383	FAH	25.07.2020 00:42	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	20.3	327.8	58
59	425	T	26.03.2020 02:00	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	6.5	216.7	59
60	419	T	05.01.2020 04:43	tot	0	0	0	0	0	0	0	0	7.1	262.6	60
61	399	T	19.12.2019 00:01	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	8.1	345.8	61
63	411	FAH	22.12.2019 16:06	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	8	435.4	63
65	384	T	27.12.2019 00:44	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.6	434.7	65
67	382	T	18.12.2019 01:50	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	8.1	341.2	67
68	407	T	18.12.2019 04:25	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	8.1	342.3	68
69	379	T	15.12.2020 21:08	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.6	213.9	69
71	376	T	19.12.2019 23:00	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	8.1	341.8	71
85	430	W2	08.02.2021 23:37	unklar	5.9	0	0	67.6	118.4	150.7	342.6	57	5.7	592.1	85
86	498	T	05.12.2020 01:36	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	7.8	137.8	86
89	434	T	04.12.2020 19:06	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	8	139.2	89



Anhang

90	439	T	04.12.2020 03:01	ja	0	0	0	0.8	0	0	0.8	0.1	7.9	136.5	90
97.5	431	T	10.12.2020 02:27	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.6	137.5	97.5
98.5	476	T	24.01.2021 21:41	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	5.2	261.2	98.5
100	451	T	06.12.2020 00:42	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	7.9	136.6	100
105	442	T	26.03.2020 23:58	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	6.8	216.8	105
106	492	T	27.03.2020 00:24	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	6.7	216.8	106
112	427	T	25.10.2020 03:48	ja	0	0	0	0	0	0.4	0.4	0.1	12.8	338.1	112
113	426	T	06.04.2020 02:25	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	9.2	154.9	113
114	435	T	07.04.2020 00:20	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	9	140.2	114
123	456	T	05.12.2020 02:32	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	7.8	139.9	123
127	519	T	04.12.2020 07:13	ja	0	0	0	0.8	0	0	0.8	0.1	7.9	135.9	127
131	475	T	08.12.2020 00:30	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	7.9	143.7	131
133	505	T	04.12.2020 22:42	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.9	135.8	133
135	450	W3	08.02.2021 12:40	unklar	2.3	0	0	80.5	132.9	153.8	369.5	62.7	5.8	618.6	135
136	495	T	04.12.2020 04:59	ja	0	0	0	0.8	0	0	0.8	0.1	7.9	136.2	136
147	482	T	15.12.2020 18:49	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.6	208.2	147
148	436	T	10.12.2020 22:50	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.4	137.6	148
150	508	T	15.12.2020 07:21	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.4	198	150
160	456	T	12.12.2020 19:06	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.4	140.7	160
163	431	T	11.12.2020 04:57	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.3	133.9	163
164	410	T	12.12.2020 02:50	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.2	137.4	164
165	441	T	10.12.2020 04:10	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	7.6	135.9	165
171	480	T	10.12.2020 03:10	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	7.6	137	171
177	476	T	10.12.2020 19:15	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.6	141.4	177
178	472	T	17.02.2021 20:03	unklar	35.7	28.8	10.5	0	0	0	75	12.6	5.4	352.1	178
183	309	T	15.10.2020 06:53	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	13.2	231.4	183
184	336	T	18.12.2019 23:36	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	8.1	345.8	184
185	329	T	26.03.2020 20:18	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	7	212	185
187	362	T	19.12.2019 01:04	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	8.1	343.7	187
193	367	W1	24.12.2019 02:49	ja	18	5.3	0	0	0	0	23.3	4.2	7.8	467.3	193
194	367	T	18.12.2019 23:11	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	8.1	343.6	194
199	305	T	27.03.2020 02:17	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	6.7	215.7	199
202	300	T	26.03.2020 04:23	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	6.4	214.8	202
204	362	T	19.12.2019 01:00	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	8.1	343.7	204
205	322	T	19.12.2019 01:05	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	8.1	343.7	205
208	307	T	18.12.2019 07:54	tot	0	0	0	0	0	0	0	0	8	344	208
209	361	T	18.12.2019 08:35	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	8	341.3	209
212	315	T	19.12.2019 03:45	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	8.1	342.8	212



Anhang

214	415	T	27.03.2020 06:50	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	6.5	210.6	214
215	374	T	27.03.2020 05:28	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	6.6	211.3	215
219	350	T	05.08.2020 02:11	tot	27.3	8.5	0	0	0	0	35.8	0.6	20.6	379.6	219
223	412	T	11.04.2020 23:01	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	11.8	130.4	223
234	412	T	03.09.2020 04:19	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	18.8	340.4	234
235	378	T	16.04.2020 20:19	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	9.6	141.2	235
237	381	T	30.08.2020 04:40	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	19.8	194.1	237
245	340	T	03.04.2020 03:19	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.5	155.5	245
247	367	T	02.05.2020 00:08	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	13.7	296.3	247
251	319	T	27.03.2020 03:50	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	6.6	213.7	251
253	351	T	28.03.2020 05:24	unklar	-	-	-	-	-	-	-	-	7	198.3	253
255	351	T	31.03.2020 00:02	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	7.2	174.5	255
256	329	T	28.03.2020 23:50	ja	-	-	-	-	-	-	-	-	7.7	184.8	256
259	333	T	08.04.2020 01:33	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	9.5	144.3	259
261	321	W1	03.04.2020 12:30	ja	1	0	0	0	14.6	5.1	20.7	4.3	8	162.3	261
262	342	T	03.04.2020 02:50	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	7.6	155.5	262
263	351	T	03.04.2020 20:15	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	8.5	159.2	263
268	352	T	22.04.2020 01:00	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	9.9	170.1	268
272	324	T	05.04.2020 23:35	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	9.4	154.1	272
274	352	U	28.03.2020 01:10	ja	-	-	-	-	-	-	-	0	7.1	201.3	274
276	361	T	26.03.2020 22:53	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	6.8	216	276
279	362	T	26.03.2020 05:09	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	6.4	213.7	279
282	312	T	09.04.2020 05:16	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	10.3	130.2	282
283	315	T	04.08.2020 02:51	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	20.7	391.2	283
288	346	T	28.03.2020 20:41	ja	-	-	-	-	-	-	-	-	7.8	182.6	288
289	337	T	27.03.2020 06:00	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	6.6	210.6	289
290	330	T	28.03.2020 00:29	ja	-	-	-	-	-	-	-	0	7.1	200	290
293	342	T	27.03.2020 01:12	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	6.7	217	293
295	361	T	17.04.2020 18:52	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	9.9	144.7	295
296	361	T	27.03.2020 01:10	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	6.7	217	296
298	353	T	27.03.2020 01:48	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	6.7	215.7	298
302	317	T	15.04.2020 01:58	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	12.1	135.6	302
310	397	FAH	01.11.2020 21:00	ja	0	0	0	0	0	0	0	0	12.2	292.2	310
314	371	T	25.05.2020 23:24	unklar	0	0	0	0	0	0	0	0	16.8	205.2	314



10.3.2 Schwimmtiefen

Nachfolgend sind die Schwimmtiefen der abgestiegenen Fische mit Tiefensensor im Detail dargestellt. Zuerst die 21 Individuen, bei denen Detektionen vor dem Abstieg erfasst werden konnten und anschliessend die neun ohne Detektionen vor dem bestimmten Abstiegszeitpunkt. Die Abbildungen sind nach der zunehmenden mittleren Schwimmtiefe vor dem Abstieg sortiert. Wie im Haupttext erwähnt, markieren die dunkelblauen Balken die obere und untere Begrenzung des Rechens, die hellblauen Balken den Grund und die obere Begrenzung des Turbineneinlaufs (vgl. Abbildung 38).



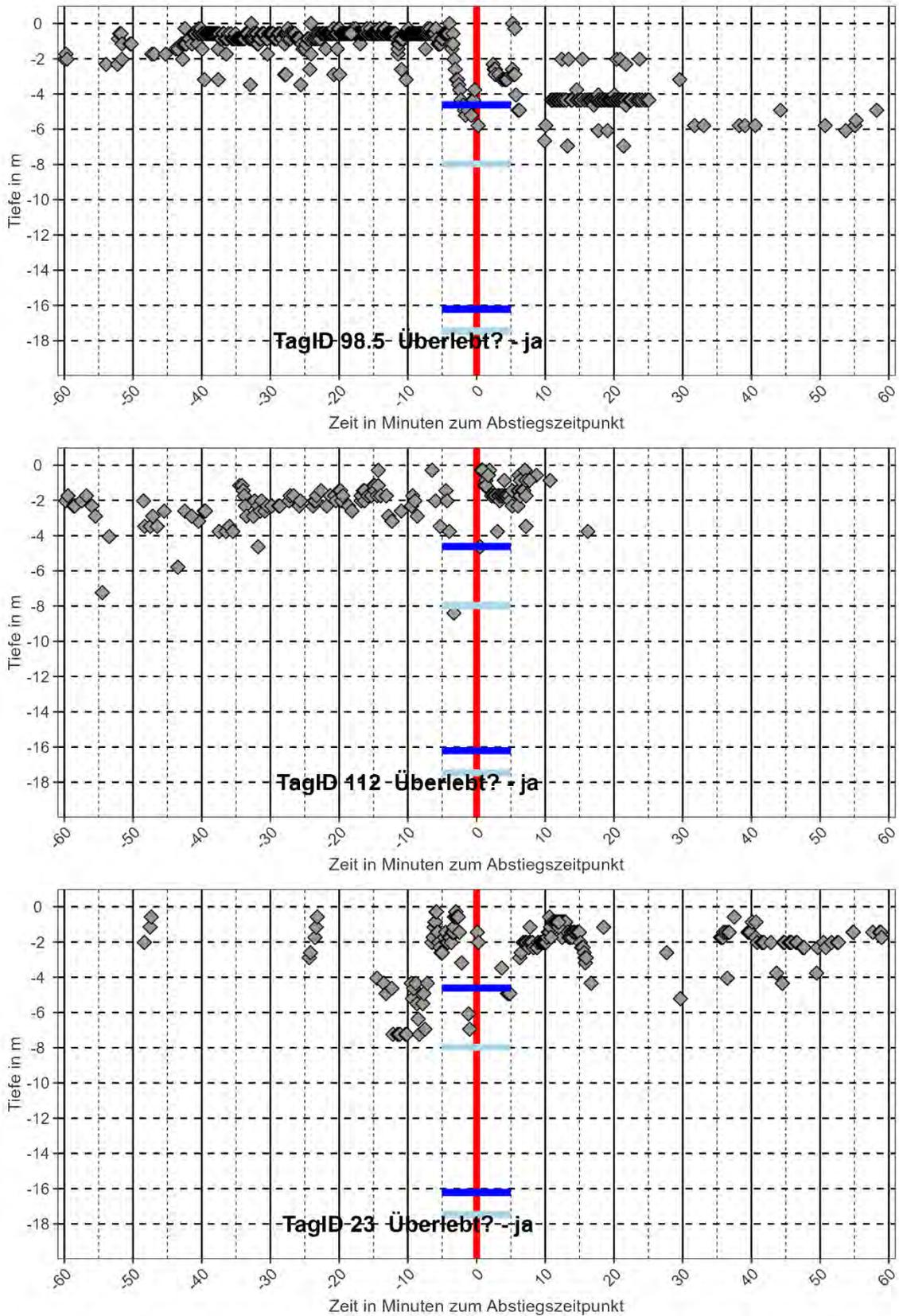


Abbildung 53: Darstellung der Schwimmtiefen der Fische mit Sensortags 60 min vor, bis 60 min nach dem Abstiegszeitpunkt. IDs 98.5, 112, und 23, alle mit Daten zur Schwimmtiefe vor dem Abstieg.



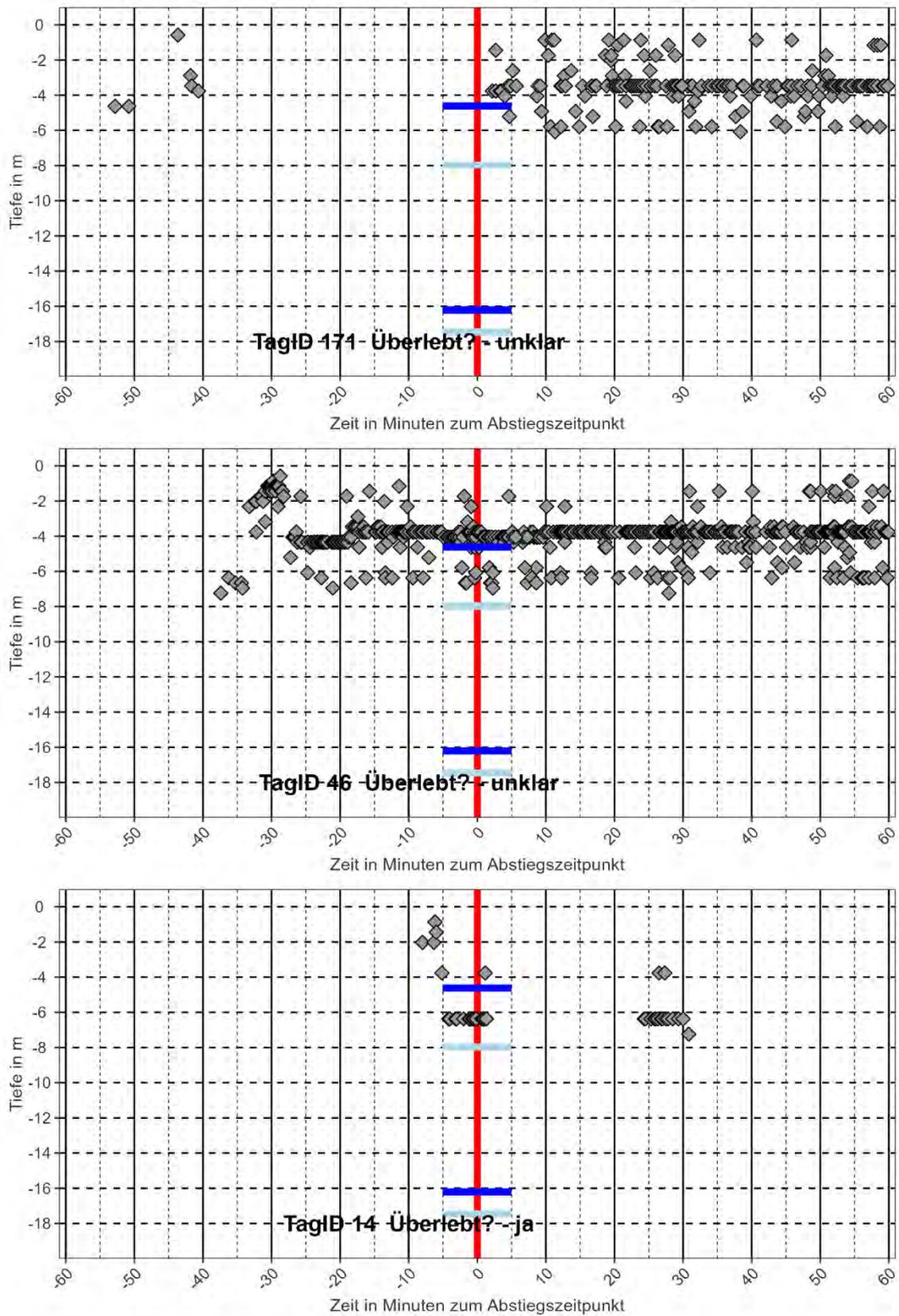


Abbildung 54: Darstellung der Schwimmtiefen der Fische mit Sensortags 60 min vor, bis 60 min nach dem Abstiegszeitpunkt. IDs 171, 46 und 14, alle mit Daten zur Schwimmtiefe vor dem Abstieg.



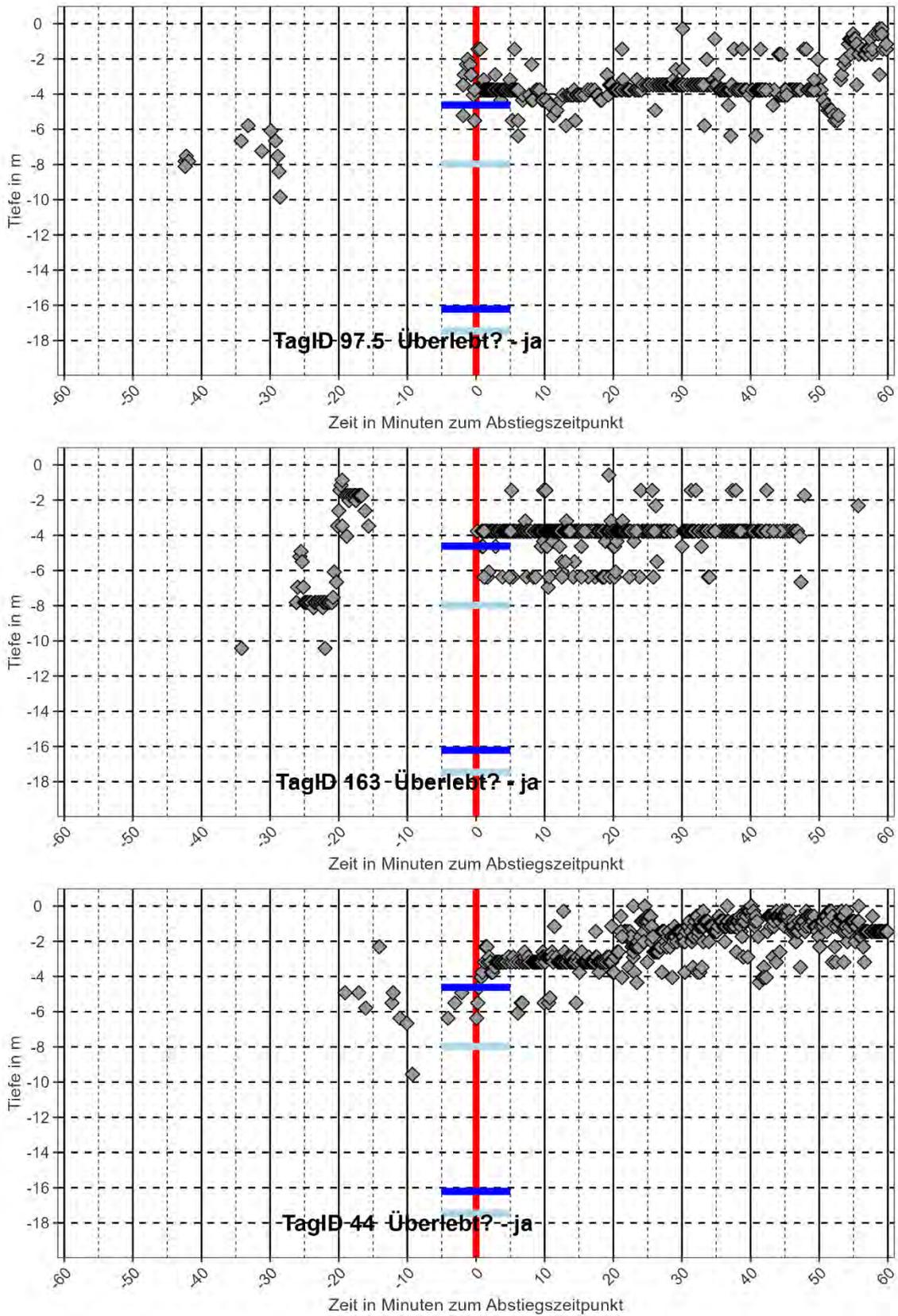


Abbildung 55: Darstellung der Schwimmtiefen der Fische mit Sensortags 60 min vor, bis 60 min nach dem Abstiegszeitpunkt. IDs 97.5, 163 und 44, alle mit Daten zur Schwimmtiefe vor dem Abstieg.



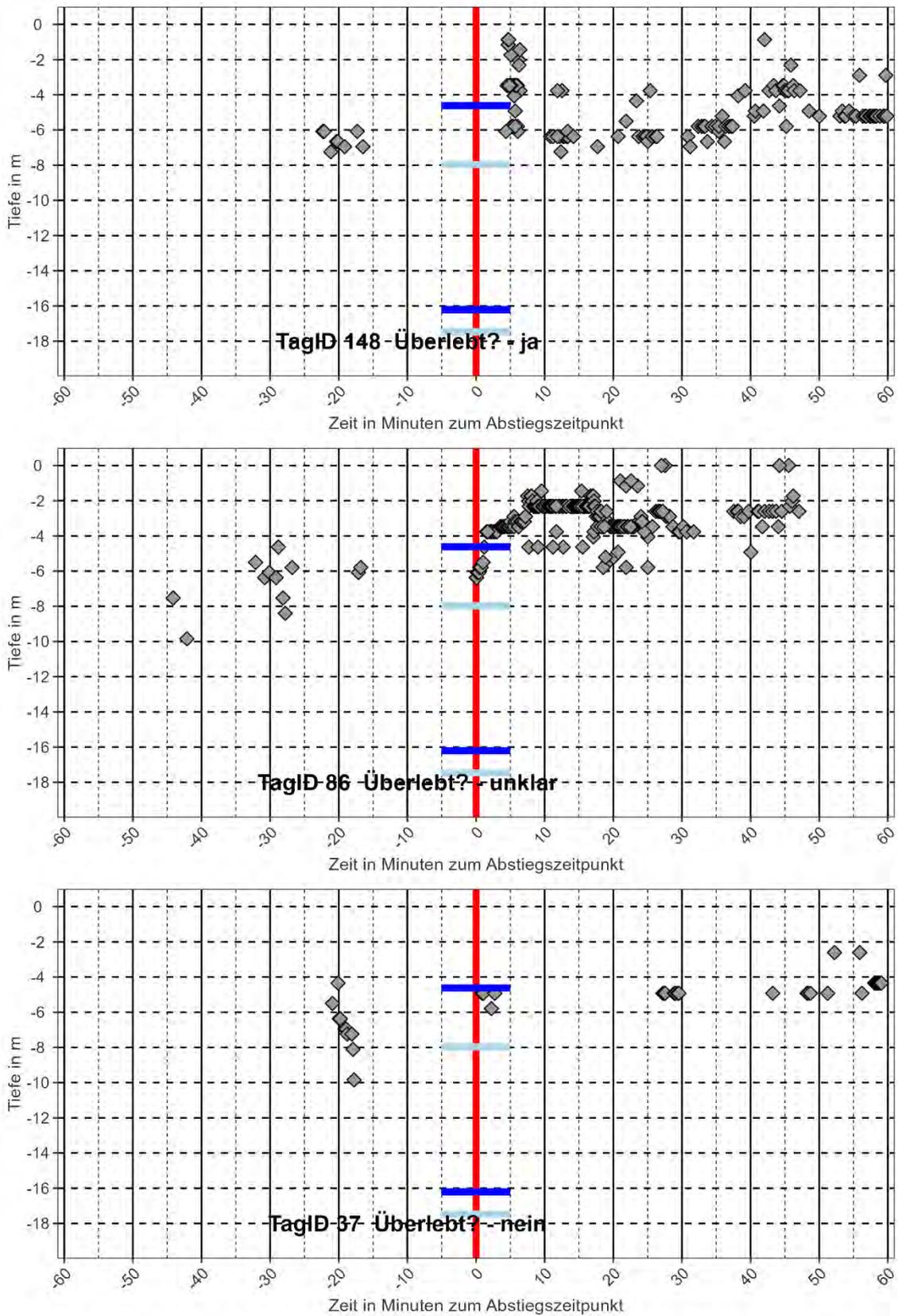


Abbildung 56: Darstellung der Schwimmtiefen der Fische mit Sensortags 60 min vor, bis 60 min nach dem Abstiegszeitpunkt. IDs 148, 86 und 37, alle mit Daten zur Schwimmtiefe vor dem Abstieg.



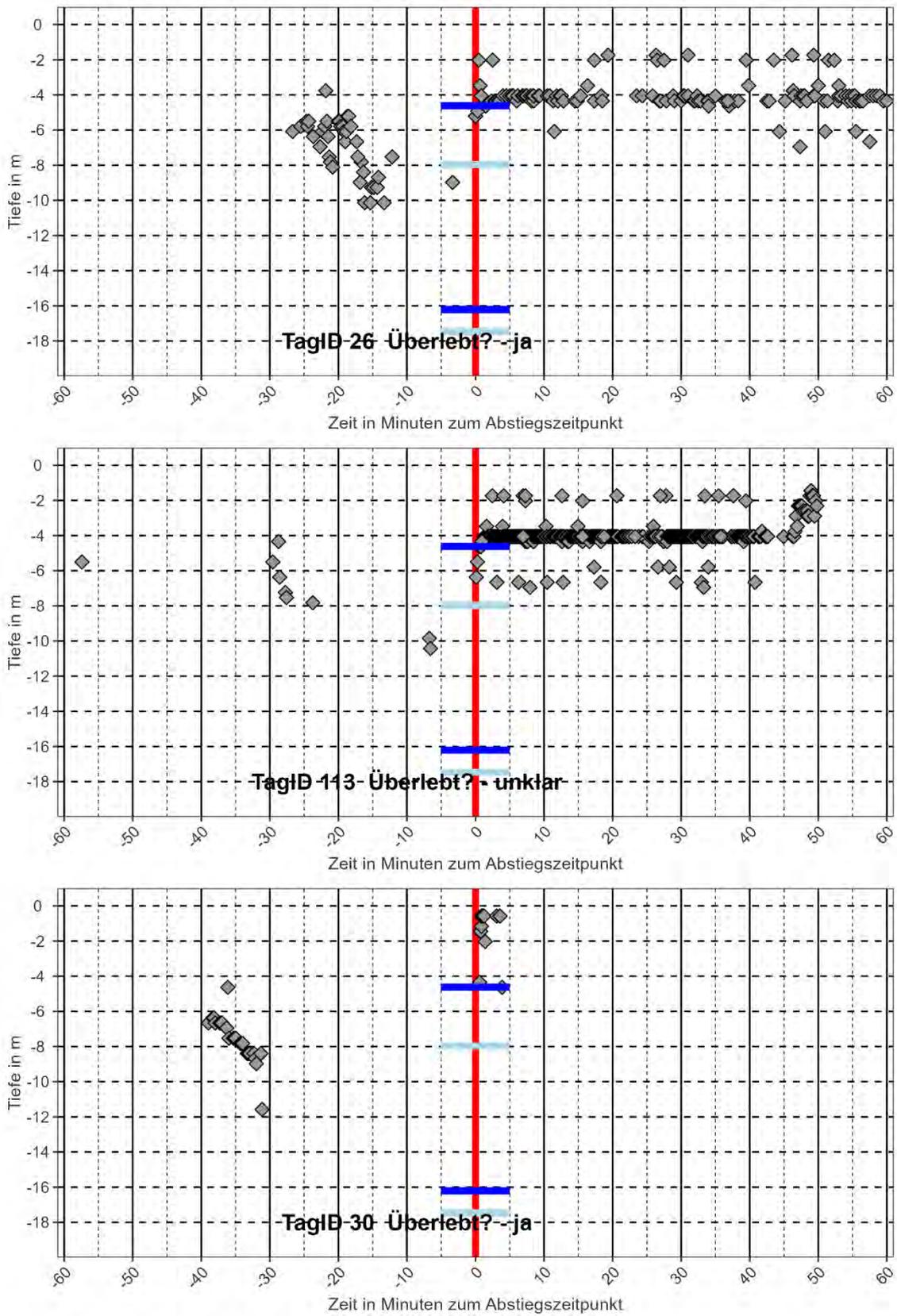


Abbildung 57: Darstellung der Schwimmtiefen der Fische mit Sensortags 60 min vor, bis 60 min nach dem Abstiegszeitpunkt. IDs 26, 113 und 30, alle mit Daten zur Schwimmtiefe vor dem Abstieg.



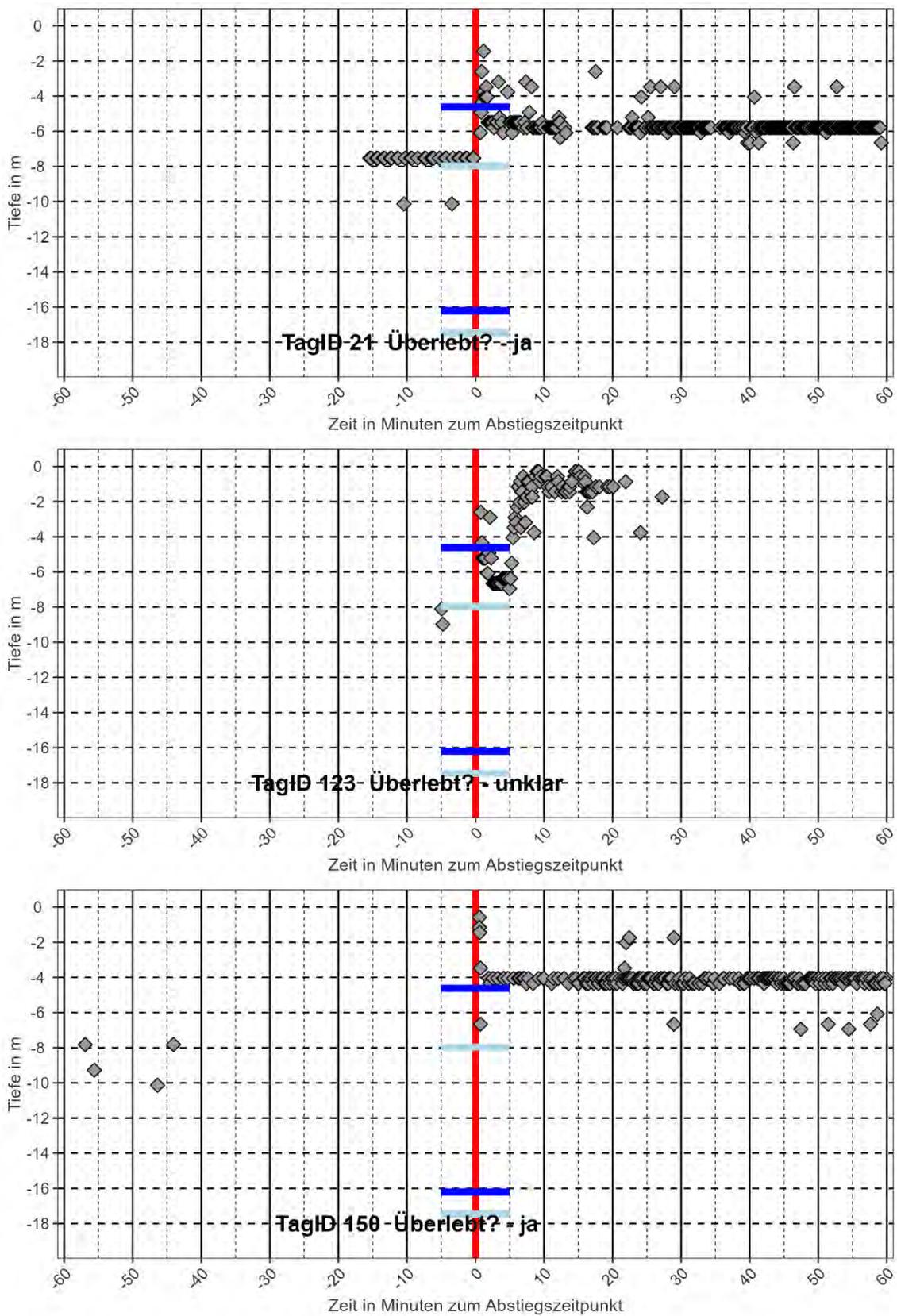


Abbildung 58: Darstellung der Schwimmtiefen der Fische mit Sensortags 60 min vor, bis 60 min nach dem Abstiegszeitpunkt. IDs 21, 123 und 150, alle mit Daten zur Schwimmtiefe vor dem Abstieg.



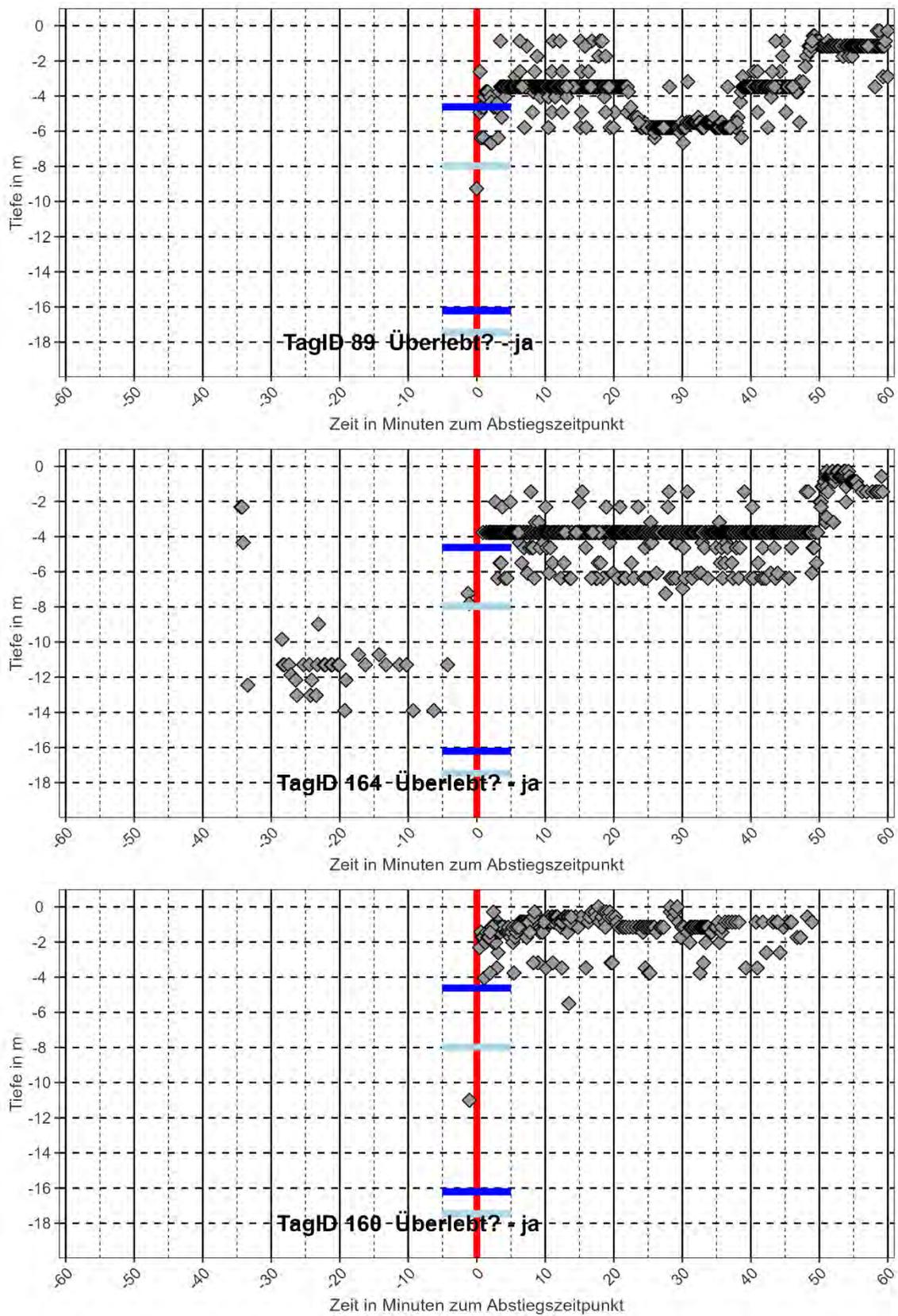


Abbildung 59: Darstellung der Schwimmtiefen der Fische mit Sensortags 60 min vor, bis 60 min nach dem Abstiegszeitpunkt. IDs 89, 164 und 160, alle mit Daten zur Schwimmtiefe vor dem Abstieg.



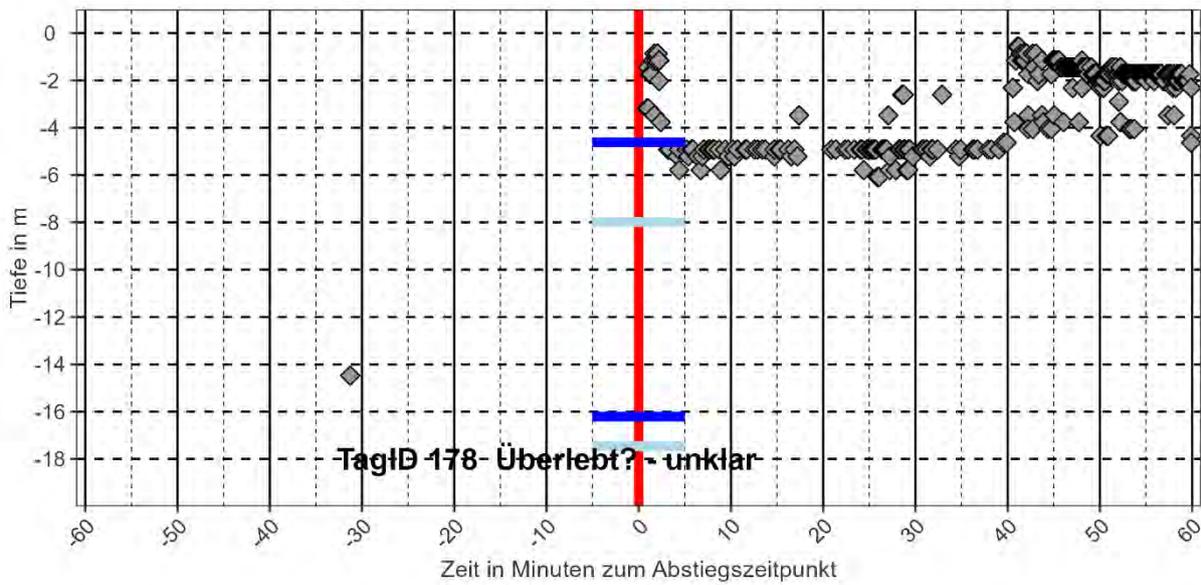


Abbildung 60: Darstellung der Schwimmtiefe der ID 178 mit Sensortags 60 min vor, bis 60 min nach dem Abstiegszeitpunkt. ID 178 hat Daten zur Schwimmtiefe vor dem Abstieg.



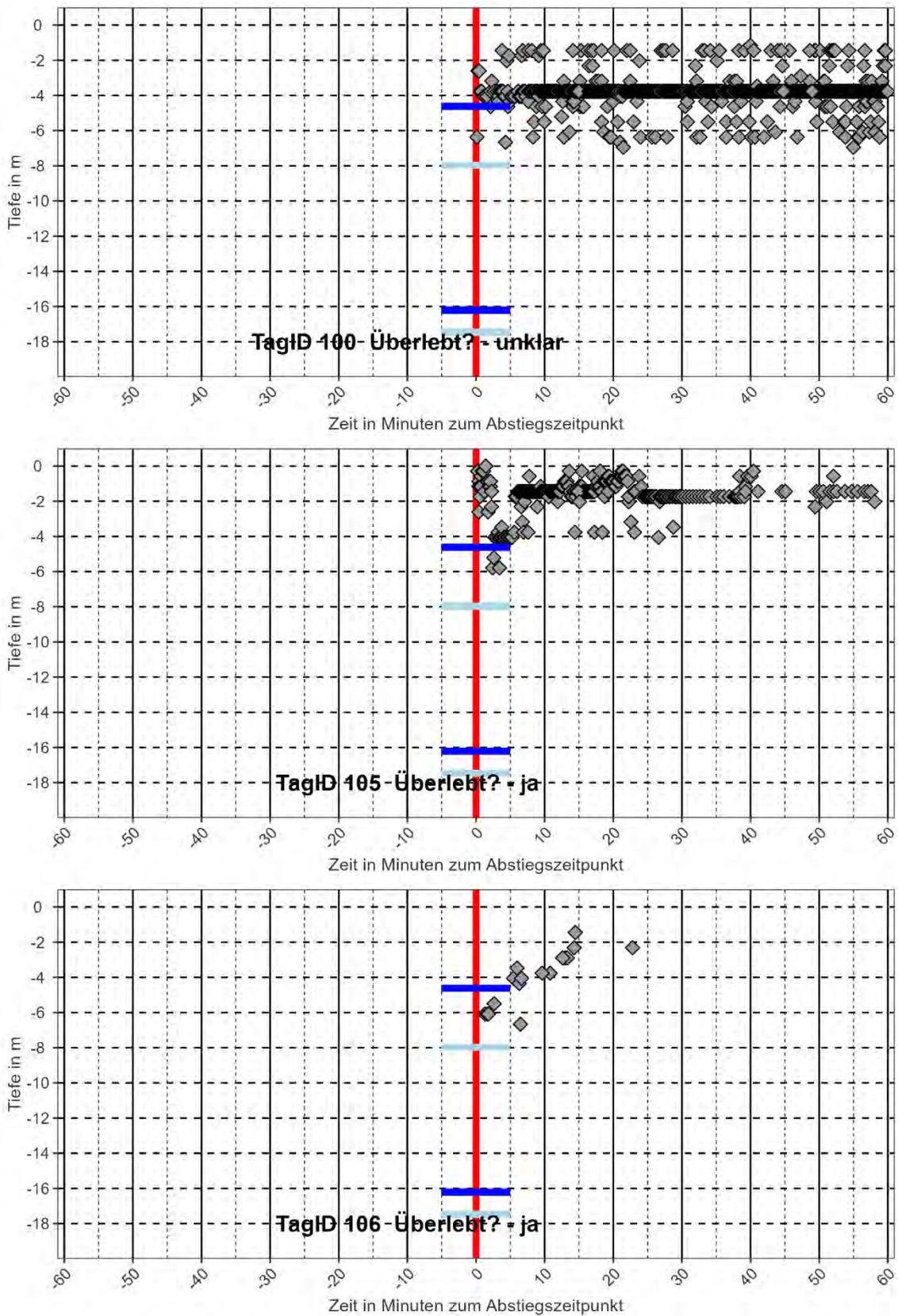


Abbildung 61: Darstellung der Schwimmtiefen der Fische mit Sensortags 60 min vor, bis 60 min nach dem Abstiegszeitpunkt. IDs 100, 105 und 106 haben alle keine Daten zur Schwimmtiefe vor dem Abstieg.



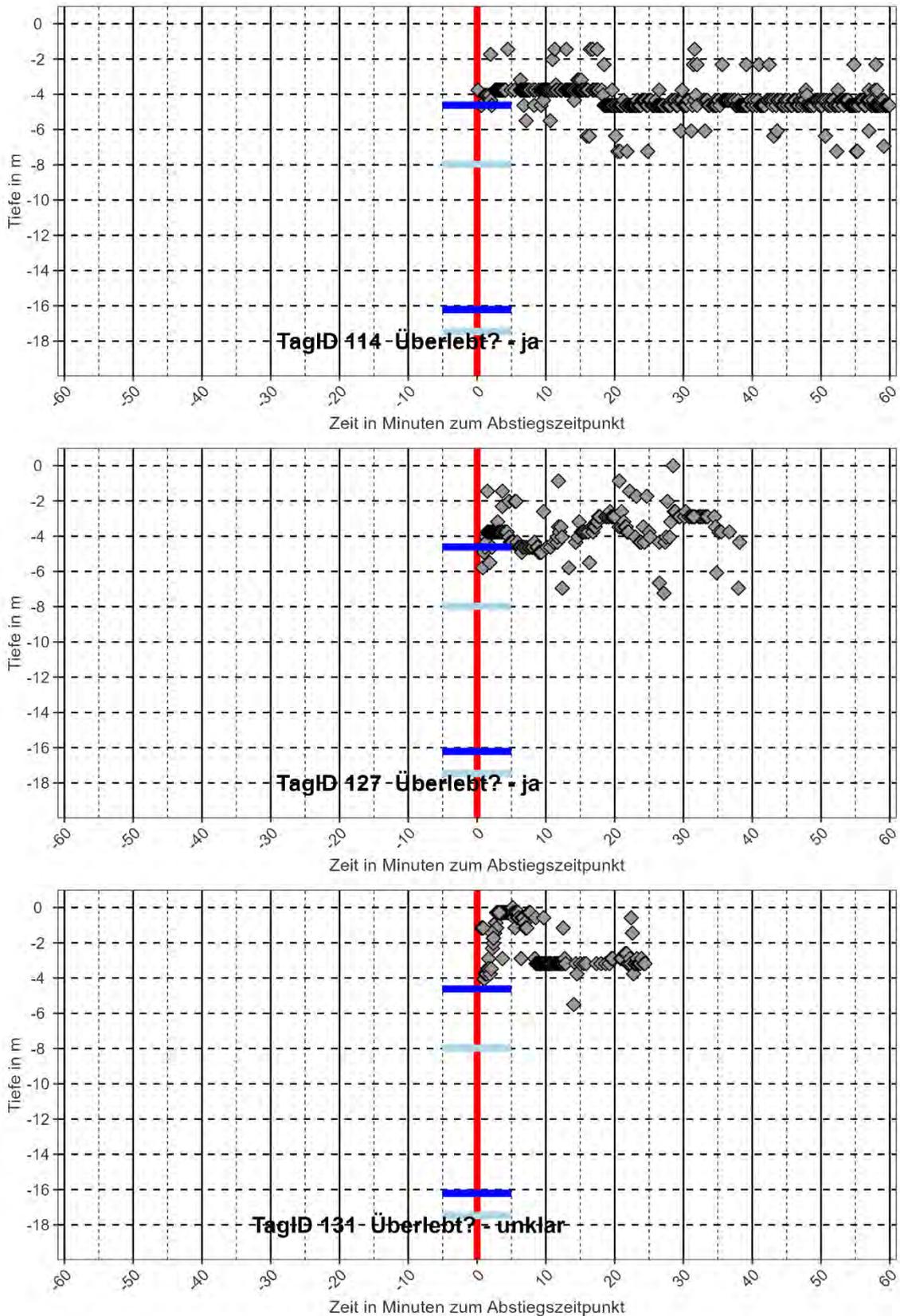


Abbildung 62: Darstellung der Schwimmtiefen der Fische mit Sensortags 60 min vor, bis 60 min nach dem Abstiegszeitpunkt. IDs 114, 127 und 131 haben alle keine Daten zur Schwimmtiefe vor dem Abstieg.



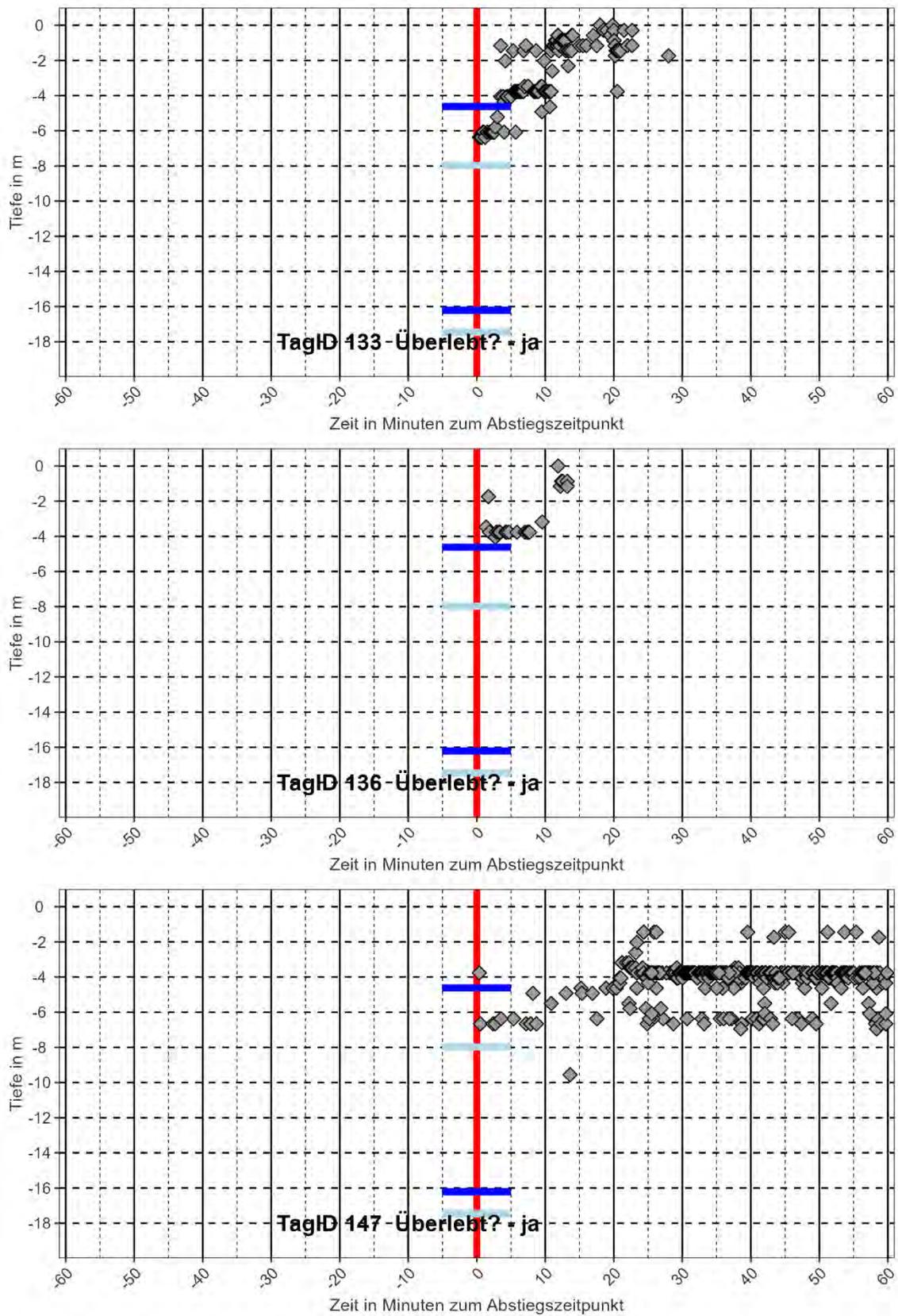


Abbildung 63: Darstellung der Schwimmtiefen der Fische mit Sensortags 60 min vor, bis 60 min nach dem Abstiegszeitpunkt. IDs 133, 136 und 147 haben alle keine Daten zur Schwimmtiefe vor dem Abstieg.



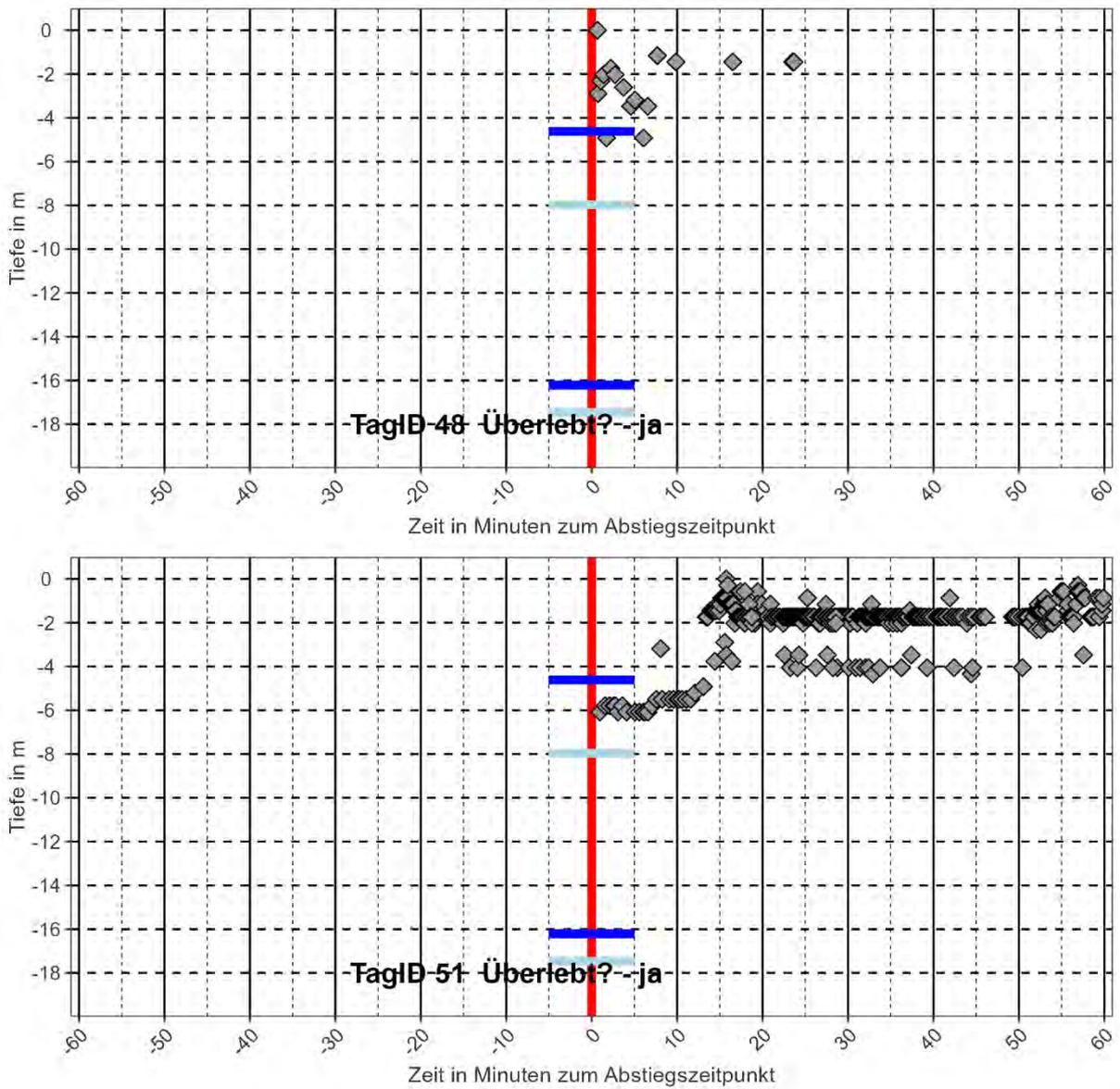


Abbildung 64: Darstellung der Schwimmtiefen der Fische mit Sensortags 60 min vor, bis 60 min nach dem Abstiegszeitpunkt. IDs 48 und 51 haben alle keine Daten zur Schwimmtiefe vor dem Abstieg.



10.3.3 Dauer der Annäherungen

Tabelle 18: Aufenthaltszeiten (in Minuten) im Detektionsradius der Antennen im Oberwasser des WKW Bannwil. Die Zeiten geben die Aufenthaltsdauer der ersten fünf Annäherungen für alle abgestiegenen und nicht abgestiegenen Fische an. Die Auswertung ist aufgeteilt in Annäherungen mit mindestens 10 (grau) bzw. 50 konsekutiven Detektionen (weiss).

Annäherung Nr.	konsekutive Detektionen	Abgestiegen	Min.	Median	Durchschnitt	Max.
1	10	Abstieg	0	69	143	2129
2	10	Abstieg	0	5	114	700
3	10	Abstieg	1	119	276	1435
4	10	Abstieg	8	138	393	1833
5	10	Abstieg	6	184	324	1104
1	50	Abstieg	0	77	167	2129
2	50	Abstieg	0	90	225	1435
3	50	Abstieg	8	148	293	1443
4	50	Abstieg	17	273	465	1833
5	50	Abstieg	0	439	594	2331
1	10	kein Abstieg	1	58	134	1615
2	10	kein Abstieg	1	56	222	4641
3	10	kein Abstieg	2	92	250	1792
4	10	kein Abstieg	7	151	303	3150
5	10	kein Abstieg	4	61	271	4558
1	50	kein Abstieg	6	140	291	4641
2	50	kein Abstieg	21	184	304	1552
3	50	kein Abstieg	15	251	319	1792
4	50	kein Abstieg	22	234	407	3150
5	50	kein Abstieg	23	267	609	4558



10.3.4 Wanderrouten

Im Folgenden werden die Wanderrouten aller Fische, die mindestens drei Mal beim mobilen Tracking gefunden wurden, graphisch dargestellt. Neben den Funden beim mobilen Tracking wurden die an den stationären Antennen registrierten Abstiege sowie Wiederfänge in der FAH Bannwil gekennzeichnet. Zur besseren Übersicht sind jeweils bis zu 15 Fische, deren Fundorte eine ähnliche räumliche Ausdehnung aufweisen, zusammengefasst. Die y-Achse wurde entsprechend angepasst. Folgende Gruppen wurden eingeteilt (die Benennung dient nur der besseren Lesbarkeit und entspricht keiner Einteilung im übrigen Bericht):

- «Wanderer ohne Abstieg»: Aarekm 78 - 105 (WKW Bannwil bis Leuzigen). Fische ohne Abstieg am WKW Bannwil (89 Fische, 6 Abbildungen)
- «Standorttreue ohne Abstieg»: Aarekm 77 - 85 (WKW Bannwil bis Wangen a. d. A.). Fische ohne Abstieg am WKW Bannwil und mit Aufstieg von weniger als 4 km ab dem Aussatort (42 Fische, 3 Abbildungen)
- «Absteiger Bannwil»: Aarekm 72 - 78 (WKW Wynau bis WKW Bannwil). Fische, die nur unterhalb des WKW Bannwil, aber nicht unterhalb des WKW Wynau gefunden wurden (63 Fische, 5 Abbildungen)
- «Absteiger Wynau»: Aarekm 36 - 85 (Aarau bis Wangen a. d. A.). Fische die unterhalb des WKW Wynau gefunden wurden (14 Fische, 1 Abbildung).
- «Mobile»: Aarekm 70 - 90 (Wolfwil bis WKW Flumenthal) Fische mit mind. 4 km Aufstieg ab dem Aussatort UND Abstieg über das WKW Bannwil (15 Fische, 1 Abbildung)

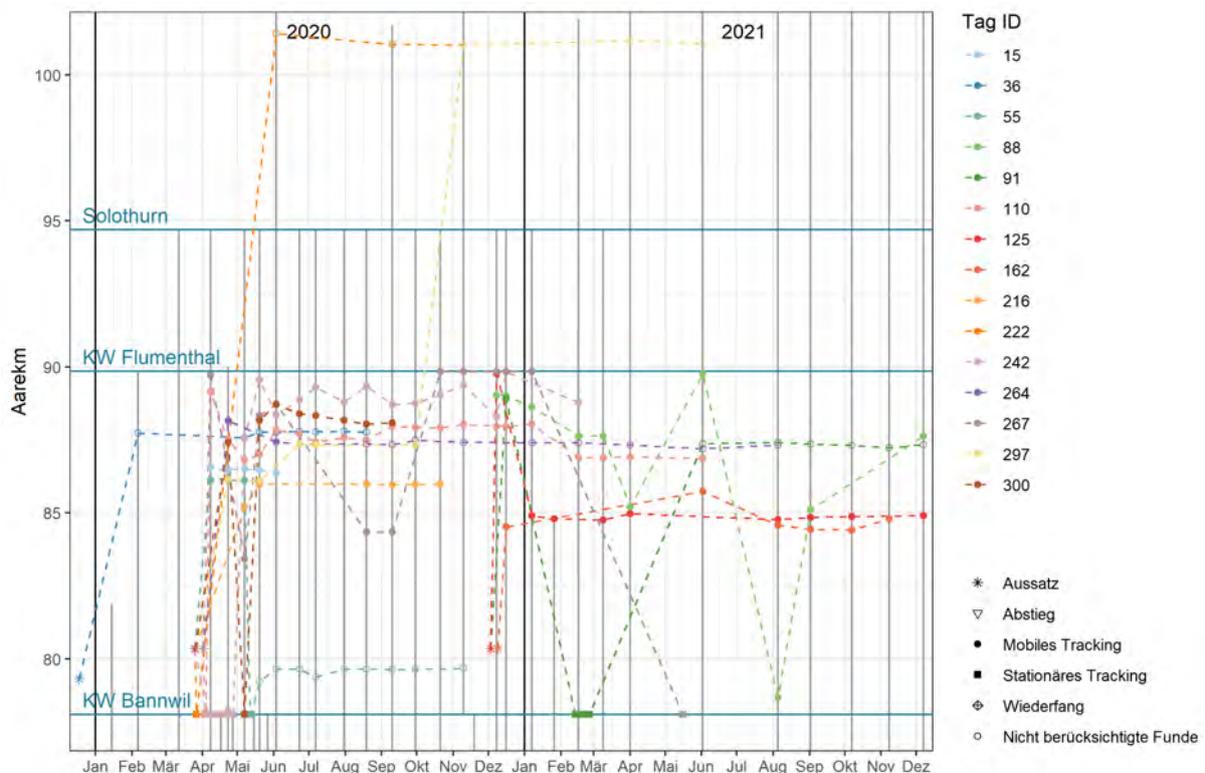


Abbildung 65: «Wanderer ohne Abstieg 1/6». Fundorte der IDs 15, 36, 55, 88, 91, 110, 125, 162, 216, 222, 242, 264, 267, 297 und 300.



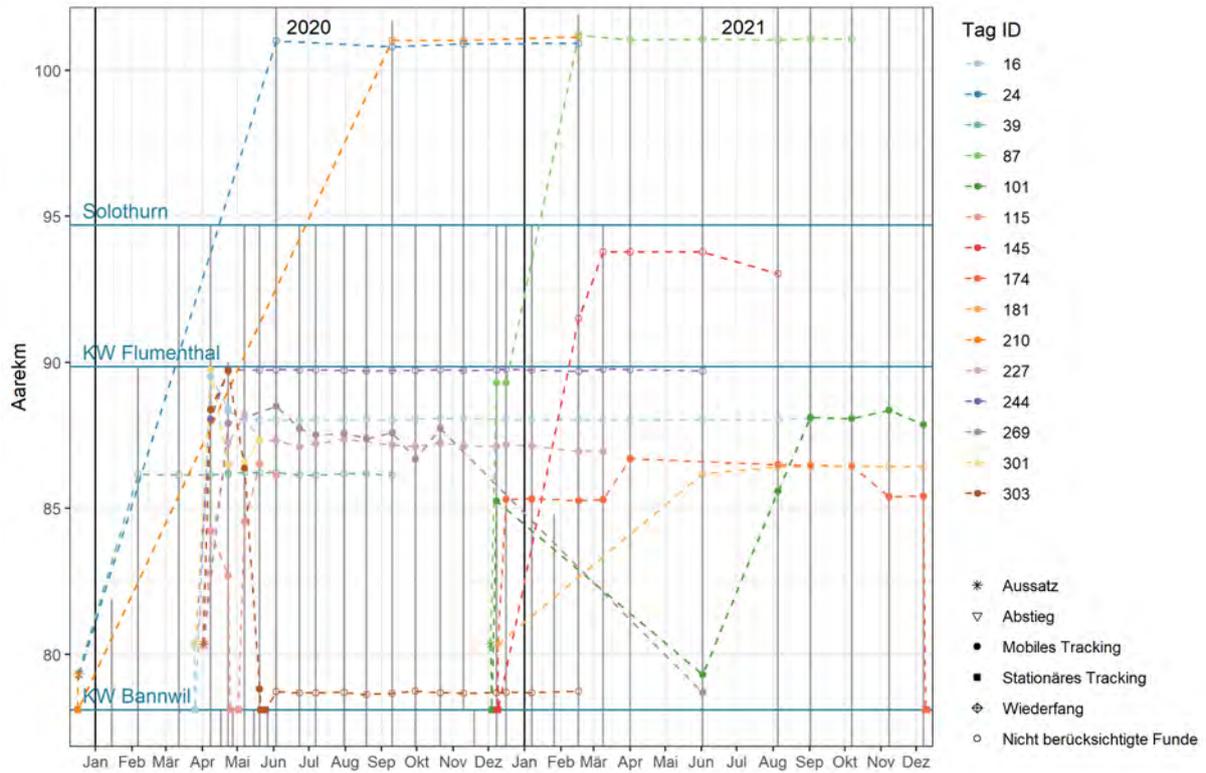


Abbildung 66: «Wanderer ohne Abstieg 2/6». Fundorte der IDs 16,24,39, 87, 101, 115, 145, 174, 181, 210, 227, 244, 269, 301 und 303.

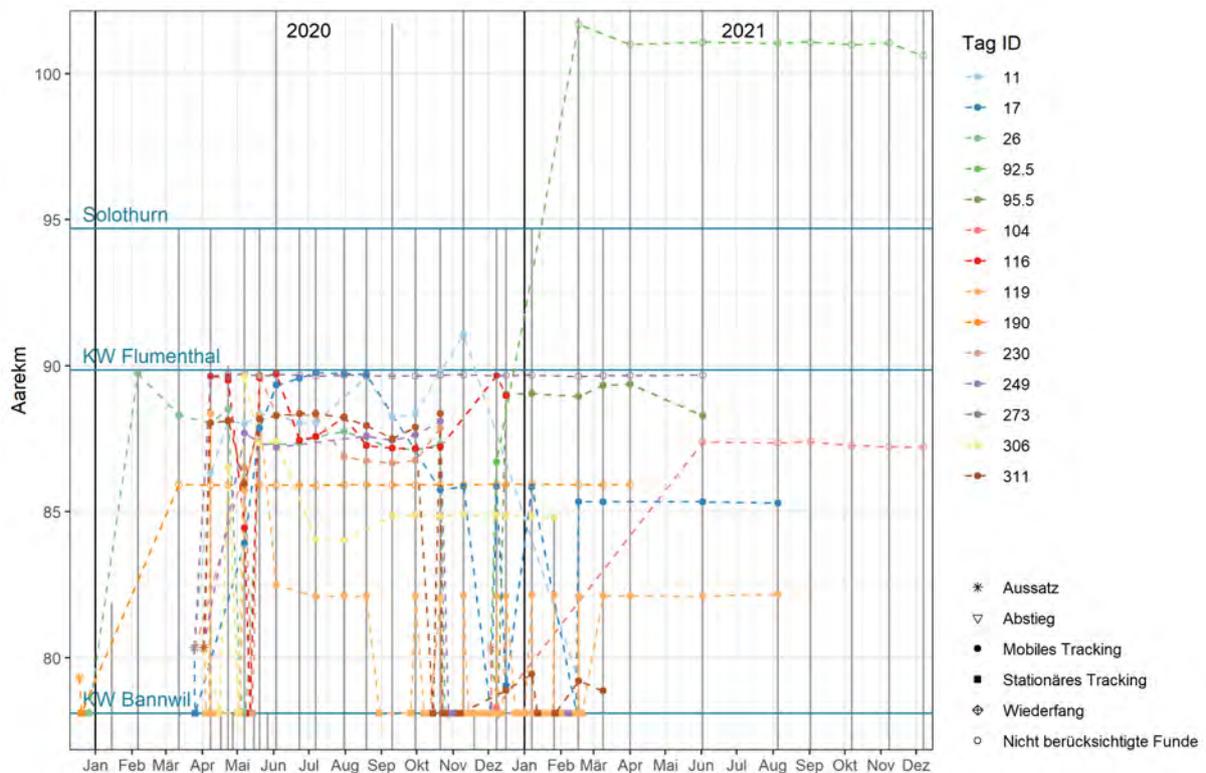


Abbildung 67: «Wanderer ohne Abstieg 3/6». Fundorte der IDs 11, 17, 26, 92.5, 95.5, 104, 116, 119, 190, 230, 249, 273, 306 und 311.



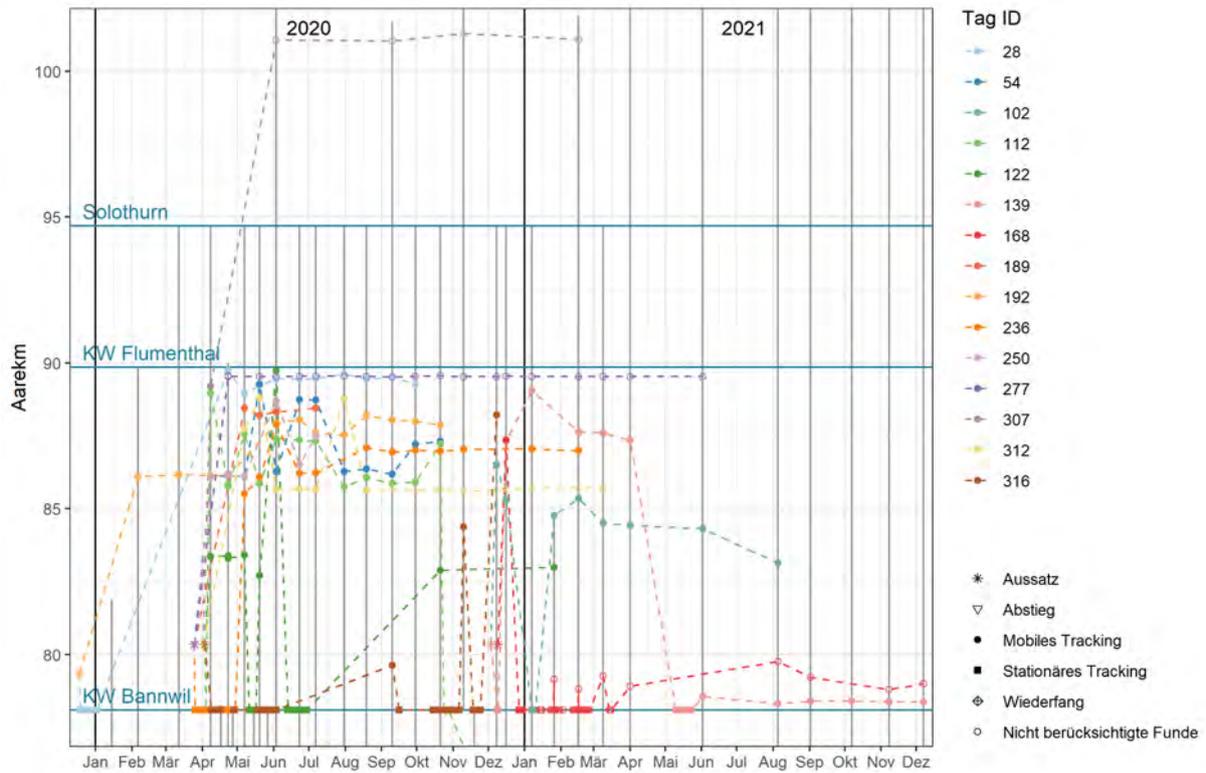


Abbildung 69: «Wanderer ohne Abstieg 4/6». Fundorte der IDs 28, 54, 102, 112, 122, 139, 168, 189, 236, 250, 277, 307, 312 und 316.

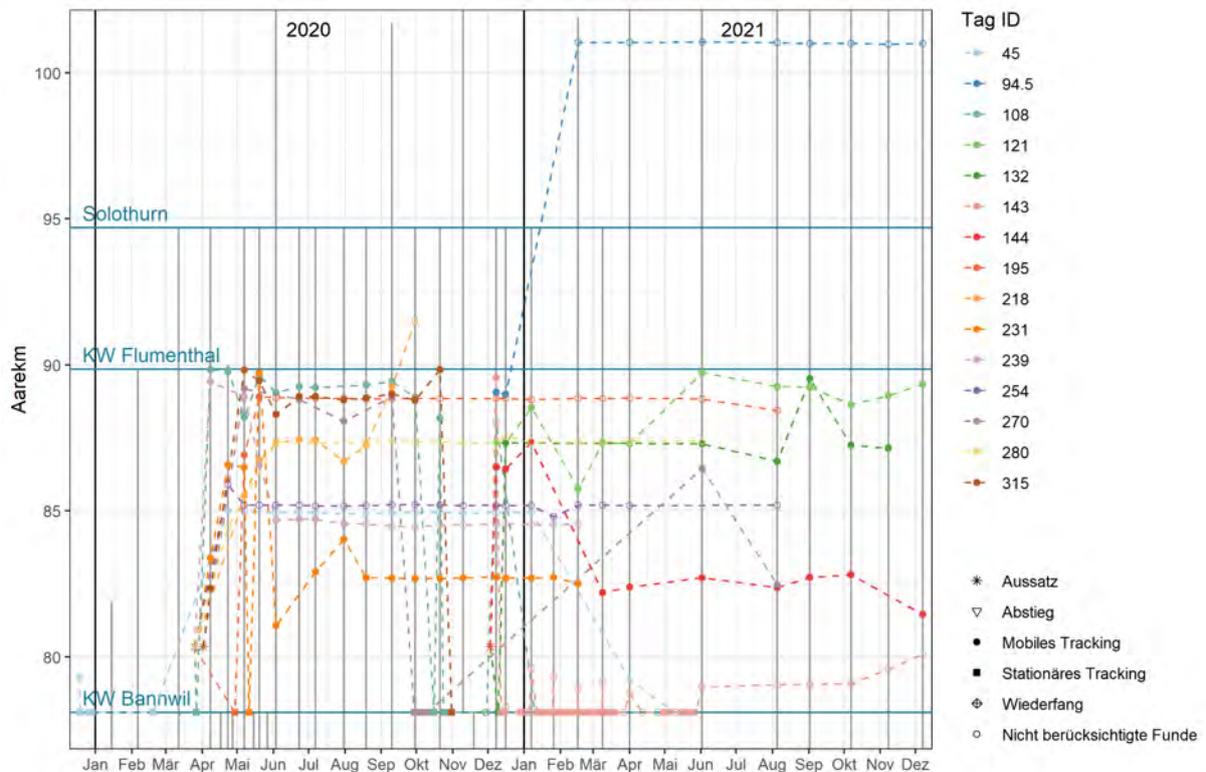


Abbildung 68: «Wanderer ohne Abstieg 5/6». Fundorte der IDs 45, 94.5, 108, 121, 132, 143, 144, 195, 218, 231, 239, 254, 270, 280 und 315.



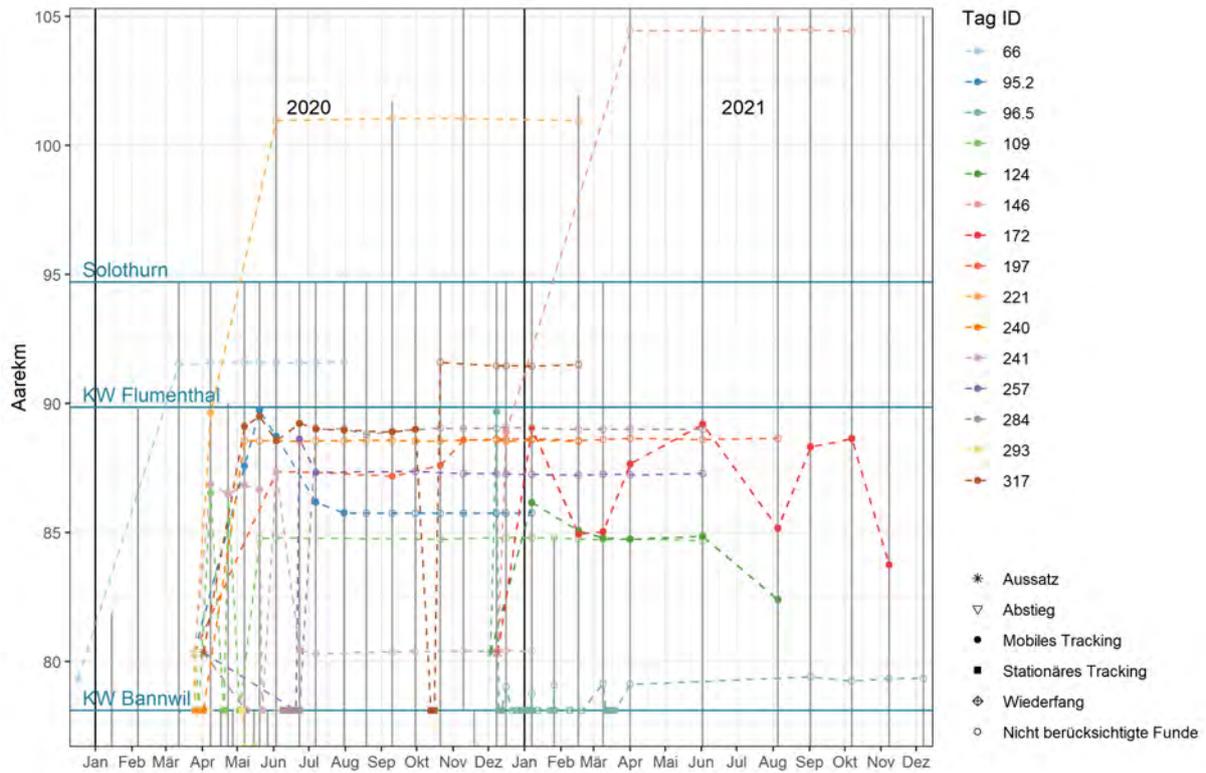


Abbildung 71: «Wanderer ohne Abstieg 6/6». Fundorte der IDs 66,95.2, 96.5, 109, 124, 146, 172, 197, 221, 240, 241, 257, 284, 293 und 317.

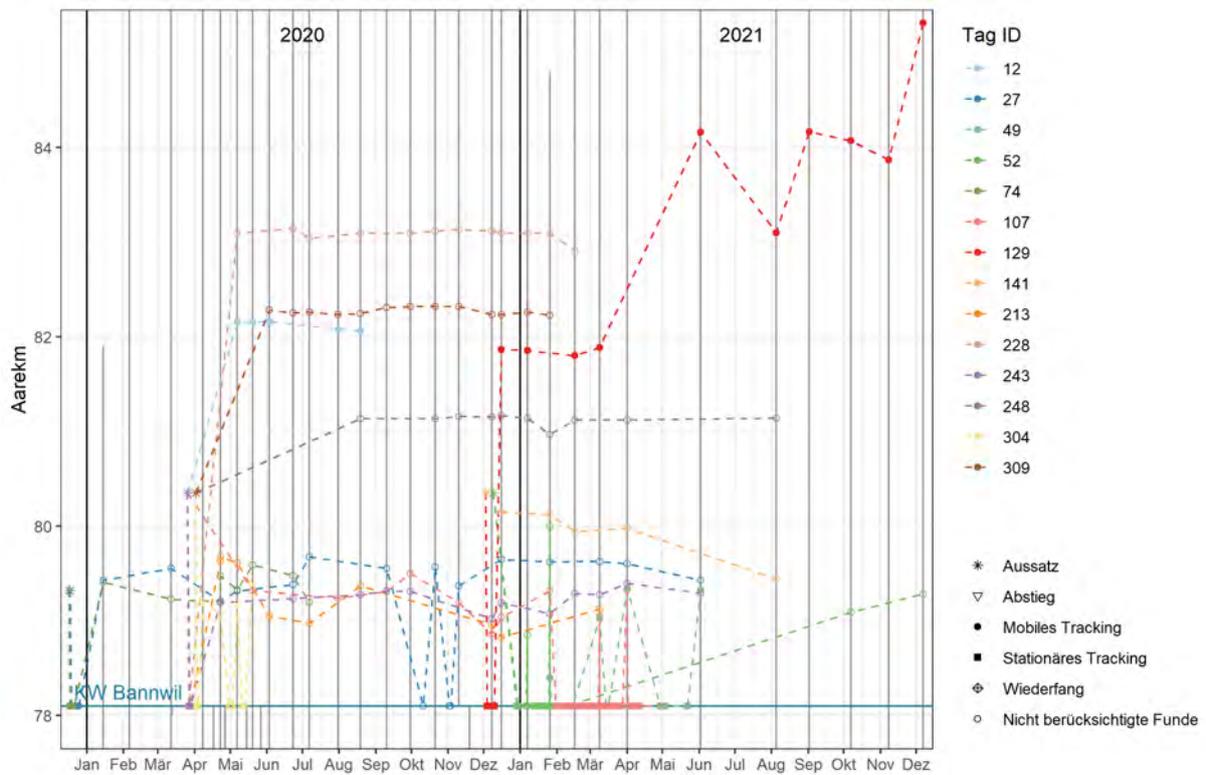


Abbildung 70: «Standorttreue ohne Abstieg 1/3». Fundorte der IDs 12, 27, 49, 52, 74, 107, 129, 141, 213, 228, 243, 248, 304 und 309.



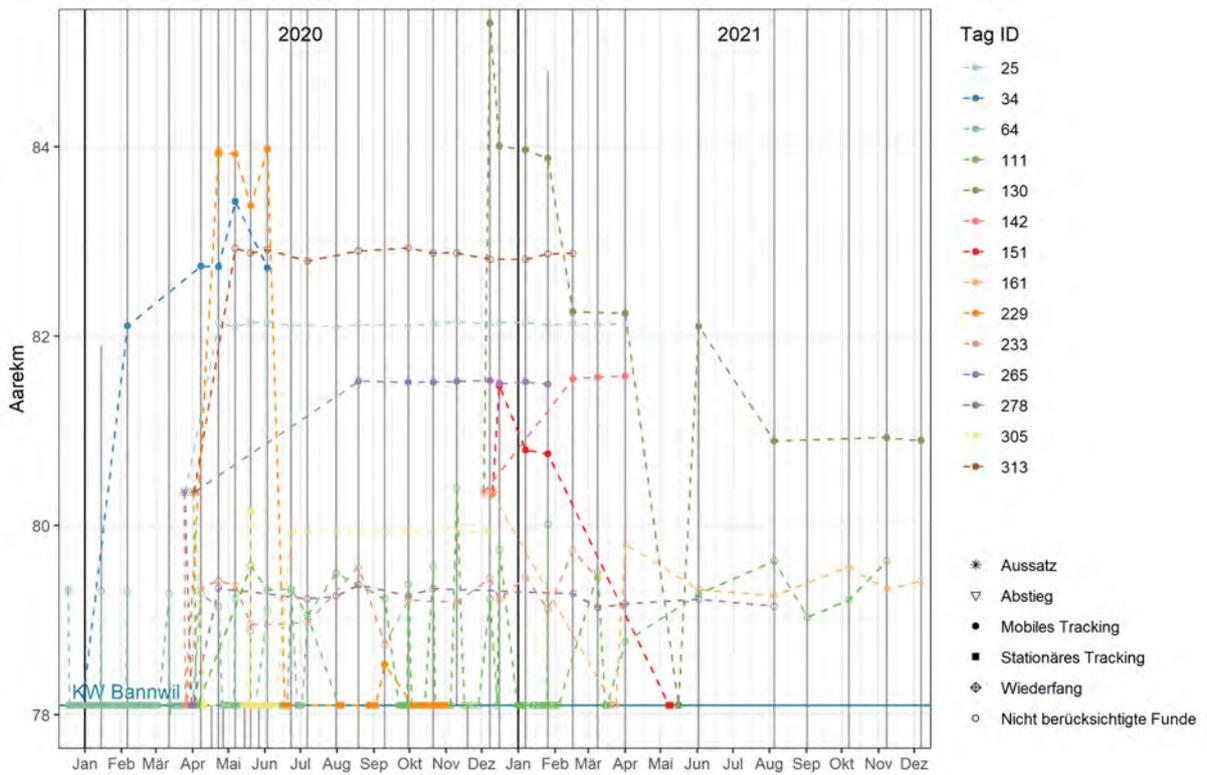


Abbildung 72: «Standorttreue ohne Abstieg 2/3». Fundorte der IDs 25, 34, 64, 111, 130, 142, 151, 161, 229, 233, 265, 278, 305 und 313.

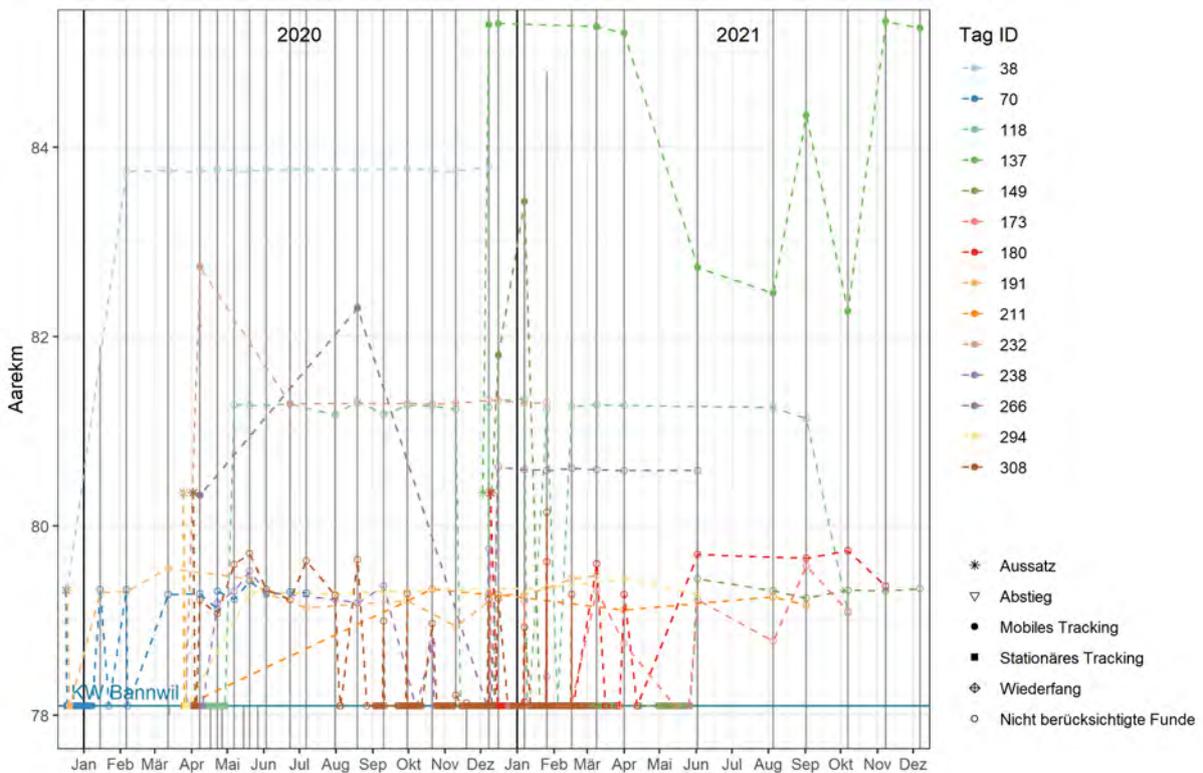


Abbildung 73: «Standorttreue ohne Abstieg 3/3». Fundorte der IDs 38, 70, 118, 149, 173, 180, 191, 211, 232, 238, 266, 294 und 308.



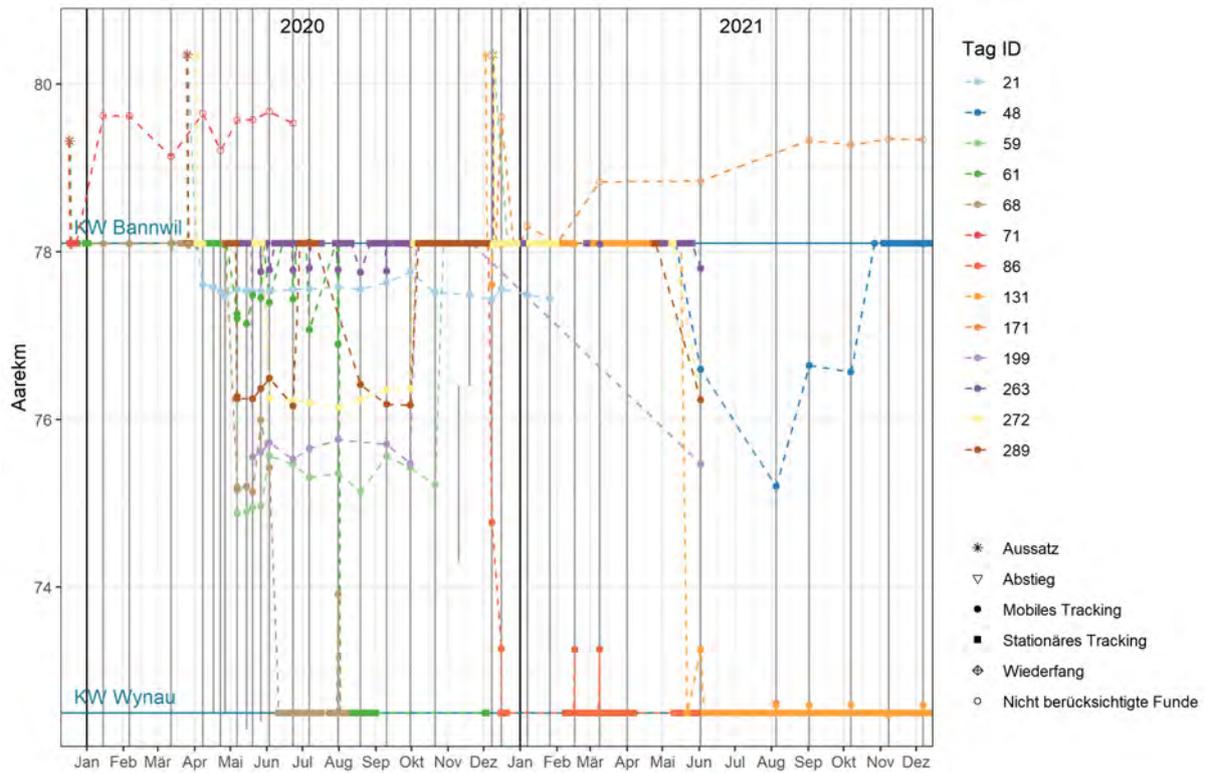


Abbildung 75: «Absteiger Bannwil 1/3»: Standorte der IDs 21, 48, 59, 61, 68, 71, 86, 131, 171, 199, , 263, 272, 289. Punkte auf der Linie des WKW Bannwil entsprechen Fundorten direkt unterhalb des Kraftwerkes. Die Fische mit den IDs 59, 263 und 272 wurden am 09./10.12.20 erneut in der FAH Bannwil gefangen und wiederum am Aussatzort ausgesetzt.

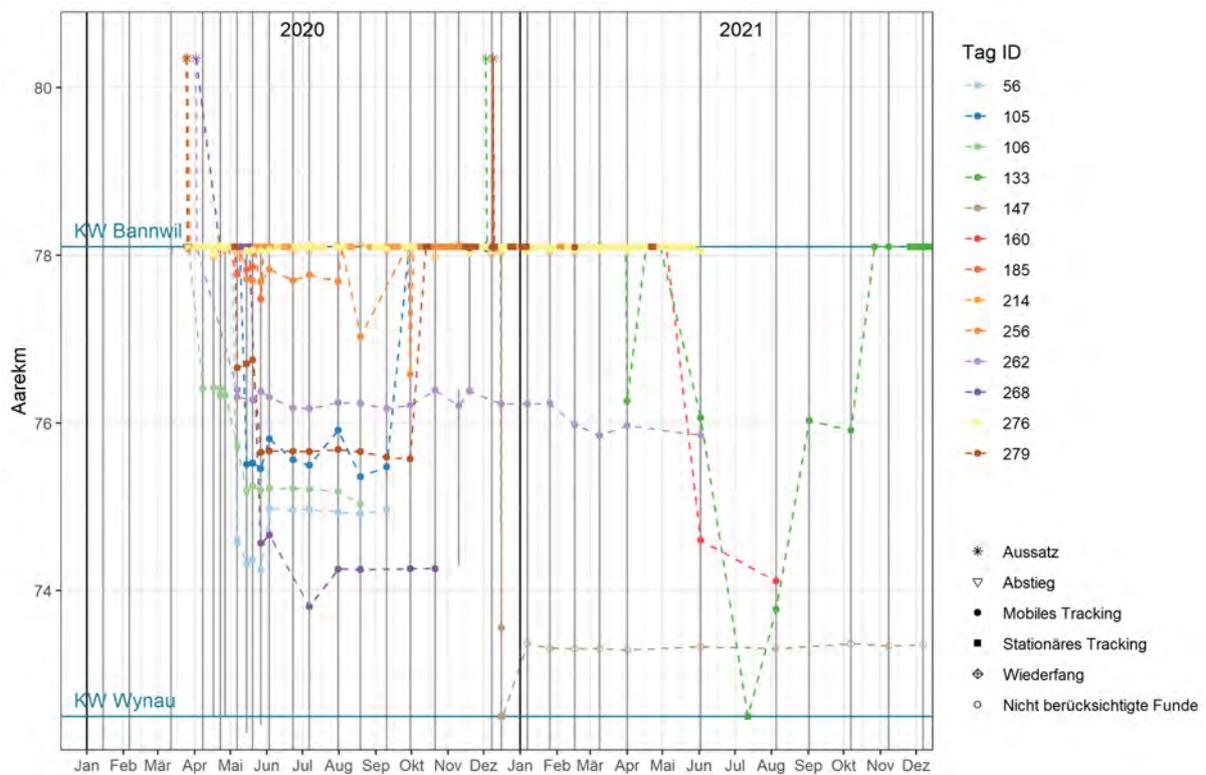


Abbildung 74: «Absteiger Bannwil 2/3»: Standorte der IDs 56, 105, 106, 133, 147, 160, 185, 214, 256, 262, 268, 276 und 279. Punkte auf der Linie des WKW Bannwil entsprechen Fundorten direkt unterhalb des Kraftwerkes. ID 105: Wiederfang in der FAH Bannwil am 03.12.20 und Entnahme des Loggertags. ID 279: Wiederfang am 09.12.20 und erneuter Aussatz am Aussatzort.



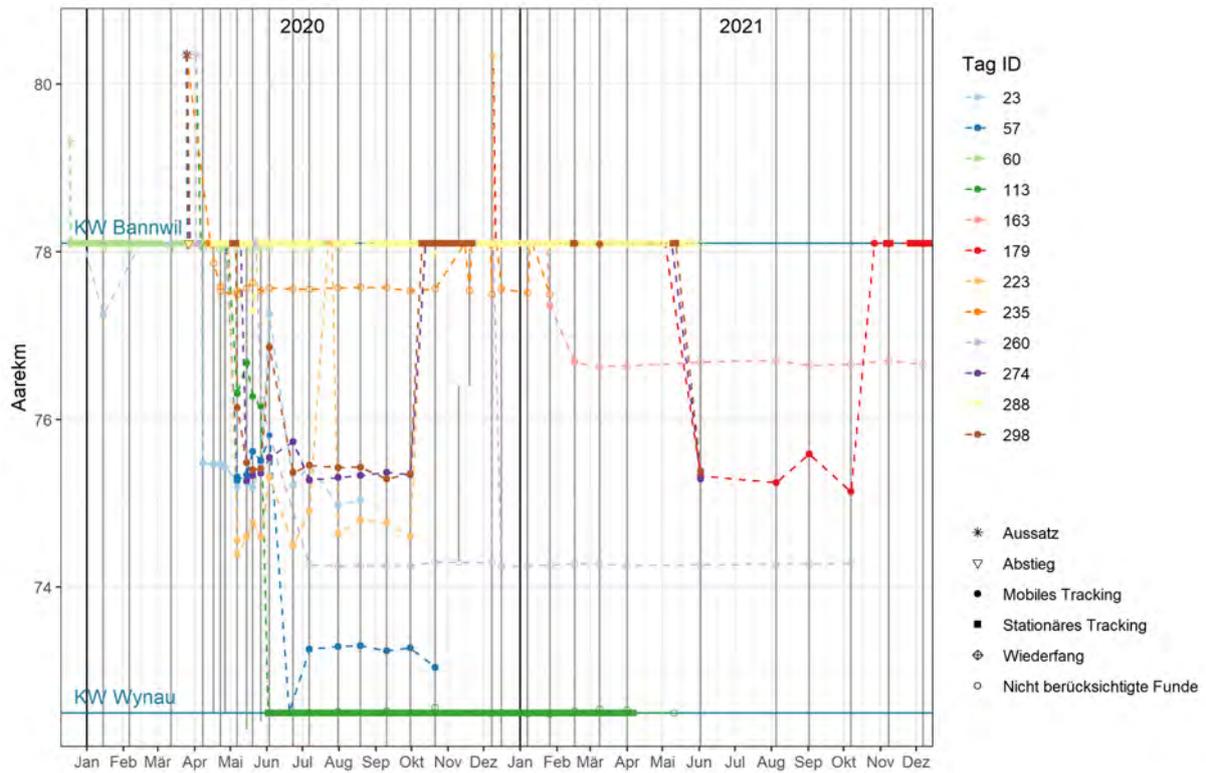


Abbildung 77: «Absteiger Bannwil 3/3»: Standorte der IDs 23, 57, 60, 113, 163, 179, 223, 235, 260, 274, 288, 298. Punkte auf der Linie des WKW Bannwil entsprechen Fundorten direkt unterhalb des Kraftwerkes. ID 260: Wiederfang in der FAH Bannwil am 09.12.20 ohne Radiotag. Dieser wurde über längere Zeit immer am selben Standort gefunden. IDs 223: Wiederfang am 10.12.20 und erneuter Aussatz am Aussatort

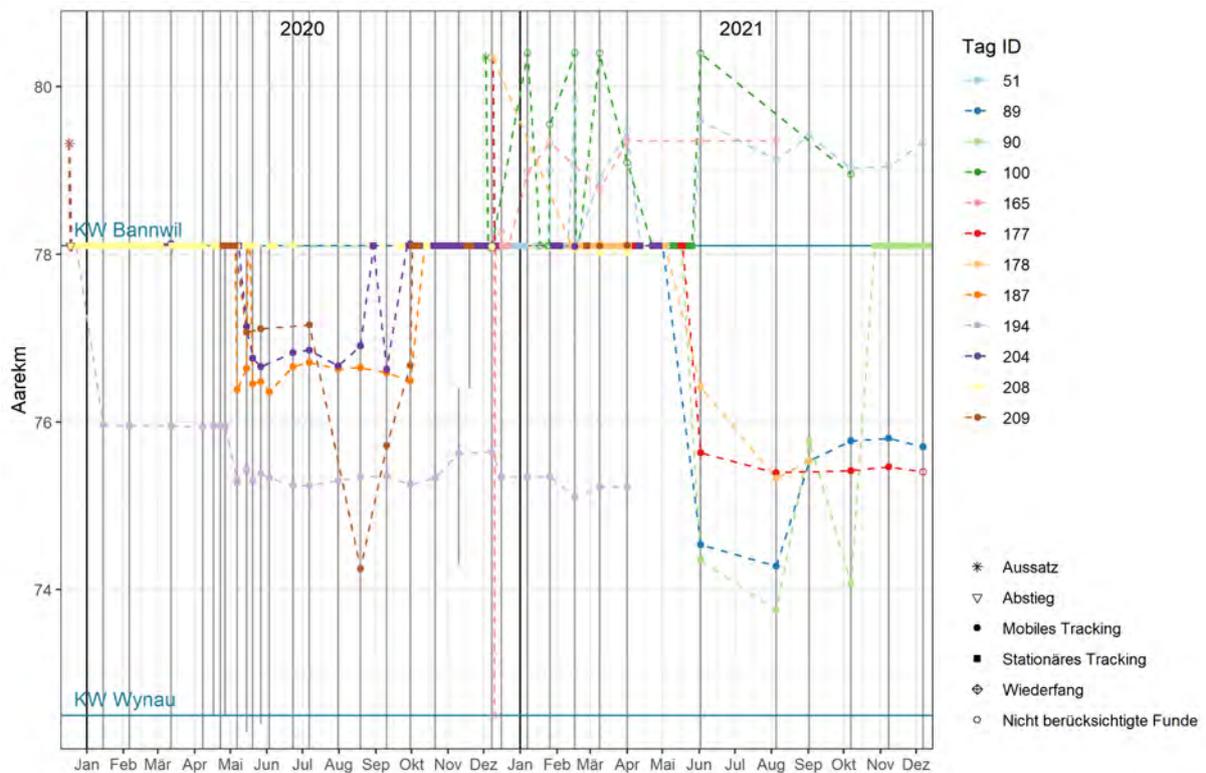


Abbildung 76: «Absteiger Bannwil 4/3»: Standorte der IDs 51, 89, 90, 100, 165, 177, 178, 187, 194, 204, 208, 209. Punkte auf der Linie des WKW Bannwil entsprechen Fundorten direkt unterhalb des Kraftwerkes.



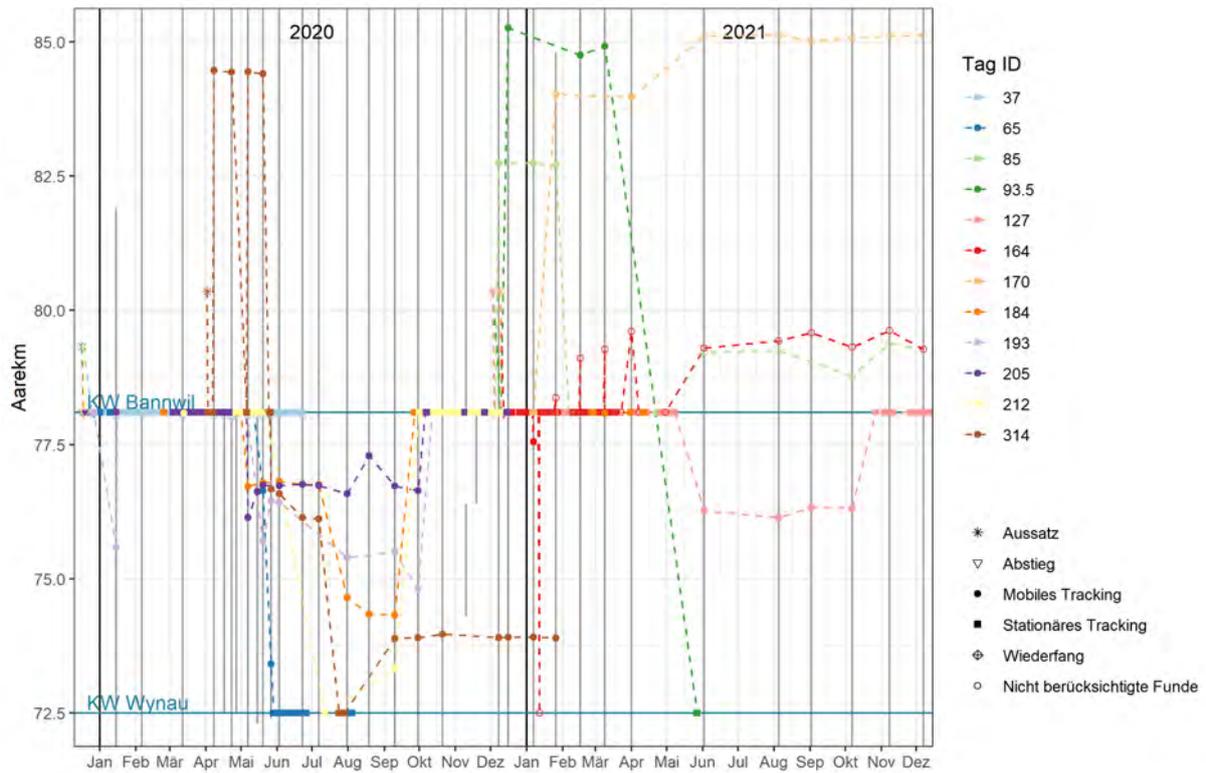


Abbildung 79: «Absteiger Bannwil 5/3»: Standorte der IDs 37, 65, 85, 93.5, 127, 164, 170, 184, 193, 205, 212, 314. Punkte auf der Linie des WKW Bannwil entsprechen Fundorten direkt unterhalb des Kraftwerkes.

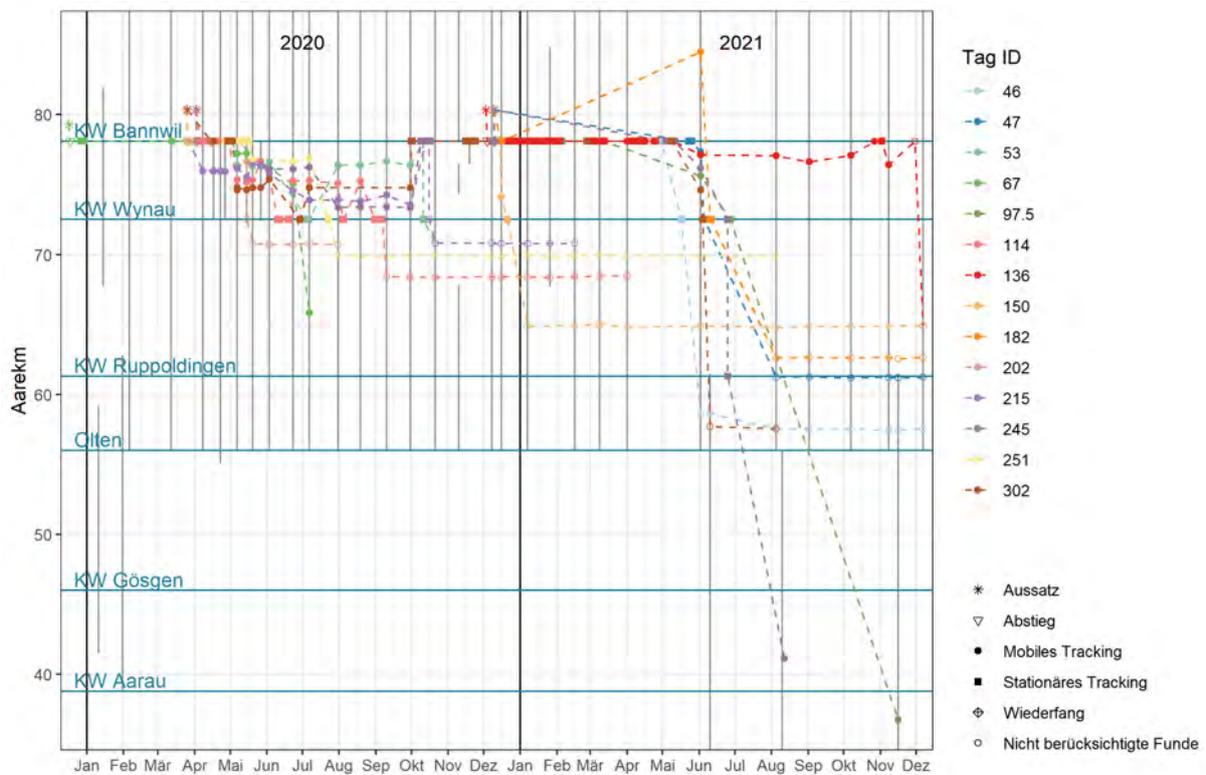


Abbildung 78: «Absteiger Wynau 1/1». Fundorte der IDs 46, 47, 53, 67, 97.5, 114, 136, 150, 182, 202, 215, 245, 251 und 302. Punkte auf der Linie des WKW Bannwil entsprechen Fundorten direkt unterhalb des Kraftwerkes.



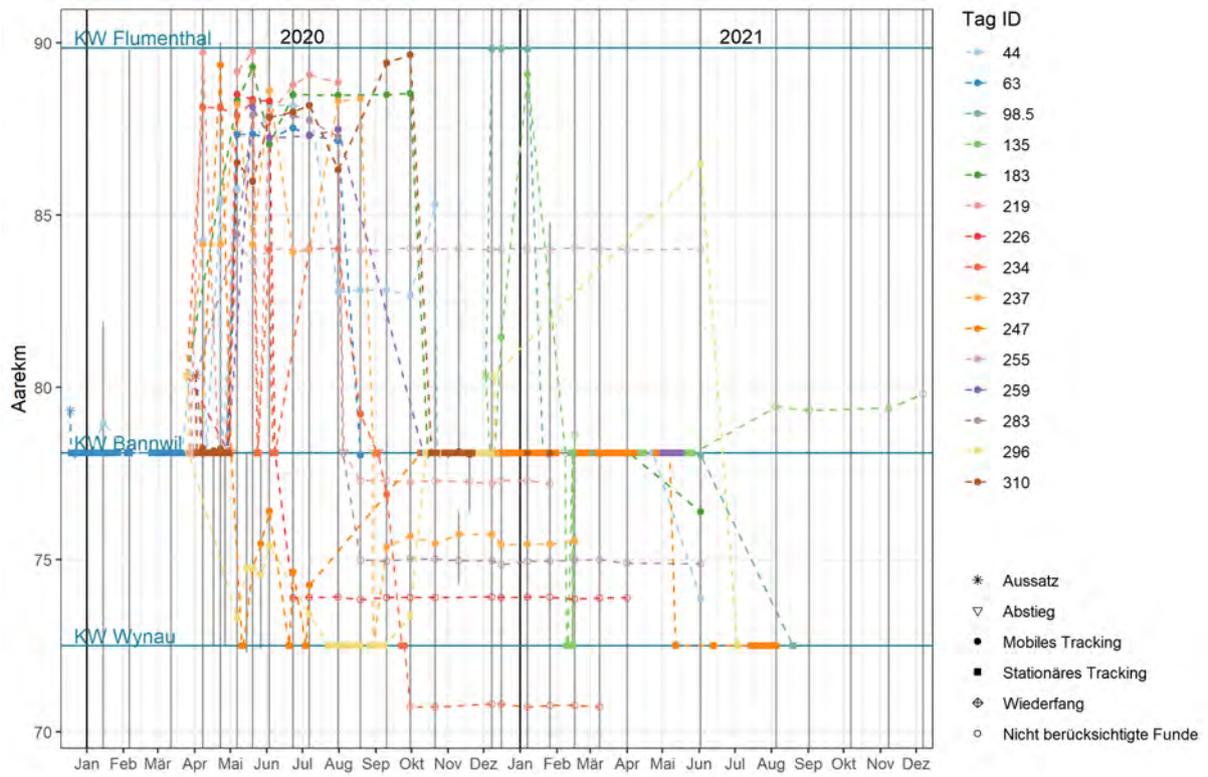


Abbildung 80: «Mobile 1/1». Fundorte der IDs 44, 63, 98.5, 135, 183, 219, 226, 234, 237, 247, 255, 259, 283, 296 und 310. Punkte auf der Linie des WKW Bannwil entsprechen Fundorten direkt unterhalb des Kraftwerkes.

