

**Bericht**

Bundesamt für Umwelt BAFU

Fischabstieg bei grossen Flusskraftwerken

Weiteres Vorgehen bei der Umsetzung von Fischabstiegsmassnahmen



Meister Julian HTU-W

22. Juli 2024

Ref.-Nr. H 18663

## Details zum Dokument

Titelbild	Blick in Fließrichtung auf das Kraftwerk Rüchlig als Beispiel für ein grosses Schweizer Flusskraftwerk
Dokumentart/ -klasse	Bericht
Nummer	H 18663
Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt BAFU
Anlage/Objekt	Fischabstieg bei grossen Flusskraftwerken
Titel	Weiteres Vorgehen bei der Umsetzung von Fischabstiegsmassnahmen
Betreff	Ergänzungsstudie zum VAR-Pilotprojekt Fischabstieg Grosswasserkraft
Erstellt	22.07.2024 Meister Julian HTU-W
Geprüft	22.07.2024 Mendez Ricardo HTU-W
Freigegeben	22.07.2024 Semadeni Nadia HTU
Datei	FAb GrossWK 2024.07.22 H-18663 Ergänzungsstudie Fischabstieg Grosswasserkraft.docx
Attribute	Bericht   ---   ---   Ökologie   Fischauf-, -Abstieg

## Verteiler

Name	STKZ
Martin Huber Gysi	Bundesamt für Umwelt
Martin Pfändler	Bundesamt für Umwelt
Ablage Axpo	Axpo

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung	5
1. Einleitung und Veranlassung	6
2. Hauptfragestellungen bzw. Ziele	6
3. Fischabstiegsmaßnahmen	7
3.1 Einleitung	7
3.2 Leitrechen-Bypass-Systeme mit <i>Bar Racks</i>	9
3.3 Bypässe ohne Leitvorrichtung	10
3.4 Erhöhung Barrierewirkung bestehender Einlaufrechen	11
3.5 Partiiell eingetauchten Feinrechen hinter Grobrechen	13
3.6 Luftblasenvorhänge	14
3.7 <i>BioAcoustic Fish Fence</i>	14
3.8 Seilrechen	15
3.9 Elektro-Seilrechen	15
3.10 Partielle Leitrechen (nicht gesamte Gewässerbreite)	16
3.11 <i>Partial depth</i> Leitrechen	17
3.12 Mobile Tauchwände	18
3.13 Wirbelbasierte Leitstrukturen ( <i>FishPath</i> )	18
3.14 Ökomorphologische Leitstrukturen	18
3.15 Konventionelle schädigungsarme Turbinen	20
3.16 Restauration Hydro Turbine	20
3.17 IDA-Ansatz	21
3.18 Erhöhung Wehrabfluss bei hoher Abstiegsaktivität	22
3.19 Reduktion Teillastbetrieb, falls betrieblich möglich	23
3.20 Zusammenfassung Fischabstiegsmaßnahme	23
3.21 Nutzen der empfohlenen Fischabstiegsmaßnahmen	25
3.22 Kosten der empfohlenen Fischabstiegsmaßnahmen	26
3.23 Terminplan für Pilotanlagen	29
4. Fischbiologische Verhaltensstudien	31
4.1 Vorgehen	31
4.2 Verallgemeinerbarer Wissensstand	31
4.3 Zusätzlich erreichbarer Wissensstand	32
4.4 Wichtigste benötigte Informationen	33
4.5 Konkrete Empfehlungen	35
4.6 Anforderungen an Pilotstandorte	36
5. Kraftwerksspezifische Grundlagen	37
5.1 Zielsetzung und allgemeine Empfehlungen	37
5.2 Allgemeine Kraftwerksinformationen	37
5.3 Abflussaufteilung Korridore	38
5.4 Angaben Turbinen	40
5.5 Angaben Wehr	40
6. Vorübergehende betriebliche Massnahmen	41
6.1 Zielsetzung und Vorgehen	41
6.2 Wissensstand zu den Hauptabwanderungszeiträumen	41
6.3 Parameter	43
6.4 Biologische Limitationen	44
6.5 Machbarkeit und Kosten	46
6.6 Empfehlung zum weiteren Vorgehen bezüglich betrieblicher Massnahmen	47

7. Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen	48
Literaturverzeichnis	49
Abbildungsverzeichnis	51
Tabellenverzeichnis	51

## Zusammenfassung

Nach den Bestimmungen des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) und des Bundesgesetzes über die Fischerei (Art. 9 und 10 BGF) muss unter anderem die wesentliche Beeinträchtigung von Wasserkraftwerken auf die flussabwärts gerichtete Fischwanderung behoben werden. Im Gegensatz zu relativ kleinen Kraftwerken mit Ausbaudurchflüssen unter ca. 100 m<sup>3</sup>/s gibt es für den Fischabstieg bei grossen Flusskraftwerken trotz umfangreicher Untersuchungen noch keinen Stand der Technik.

Zwischen 2016 und 2024 wurde unter der Dachherrschaft des Verbands Aare-Rheinwerke (VAR) ein umfangreiches Forschungsprojekt durchgeführt, welches unter anderem gezeigt hat, dass Leitrechen-Bypass-Systeme mit *Bar Racks* technisch machbar, aber teuer sind. Bevor das Bundesamt für Umwelt (BAFU) über das weitere Vorgehen bezüglich Leitrechen-Bypass-Systemen bei grossen Flusskraftwerken entscheidet, soll eine übergeordnete Strategie für das weitere Vorgehen zum Fischabstieg bei grossen Flusskraftwerken ausgearbeitet werden. Die vorliegende Ergänzungsstudie zum erwähnten VAR-Pilotprojekt soll durch das Zusammenstellen fehlender Grundlagen und Empfehlungen als Grundlage zur Erarbeitung dieser Strategie dienen.

In dieser Studie wurden in einem ersten Schritt für alle der im VAR-Pilotprojekt beschriebenen Fischabstiegsmassnahmen Empfehlungen zum weiteren Vorgehen und zur Durchführung einer Wirkungskontrolle nach Realisierung der Massnahme gegeben. Das Projektteam schätzt aktuell Leitrechen-Bypass-Systeme mit *Bar Racks*, den *BioAcoustic Fish Fence* (BAFF-System), partielle Leitrechen und die *Restoration Hydro Turbine* (RHT) als die vielversprechendsten Fischabstiegsmassnahmen ein. Es wird empfohlen diese Massnahmen in konkreten Pilotprojekten zu vertiefen, wobei das Vorgehen bezüglich Leitrechen-Bypass-Systemen mit *Bar Racks* insbesondere davon abhängt, ob das BAFU die im Rahmen des VAR-Pilotprojekts geschätzten Kosten als verhältnismässig einschätzt.

Der zweite Teil des vorliegenden Berichts befasst sich mit der Fragestellung, wie viele Telemetriestudien im Ist-Zustand sinnvoll bzw. zielführend sind, um eine bessere Planungsgrundlage für den Fischabstieg bei grossen Flusskraftwerken zu schaffen. Das Projektteam empfiehlt aktuell keine weitere Telemetriestudie im Ist-Zustand durchzuführen, welche das Hauptziel verfolgt, verallgemeinerbare und für die Planung von Fischabstiegsanlagen praxisrelevanten Erkenntnisse zum Abstiegsverhalten potamodromer Arten zu erhalten. Der Hauptgrund hierfür ist die schwierige Übertragbarkeit auf andere Kraftwerksstandorte und Fischarten. Stattdessen wird empfohlen, diese Ressourcen in die Realisierung von Pilotprojekten von Fischabstiegsmassnahmen mit umfassenden Wirkungskontrollen zu investieren. Es wird jedoch nicht von Telemetriestudien im Ist-Zustand abgeraten, falls der Fokus eines solchen Projekts auf der Beantwortung standortspezifischer Fragestellungen liegt.

Im dritten Teil dieses Projekts werden alle Daten aufgelistet, welche für eine fundierte Entscheidung zum weiteren Vorgehen bezüglich des Fischabstiegs auf jeden Fall benötigt werden. Diese Daten können schon erfasst werden, bevor klar ist, welche Fischabstiegsmassnahme am entsprechenden Standort umgesetzt werden soll.

Im letzten Teil dieses Projekts werden alle Parameter aufgelistet, welche für die Beurteilung von betrieblichen Massnahmen benötigt werden. Insbesondere aufgrund der unklaren biologischen Wirkung, den voraussichtlich sehr hohen Kosten und den negativen energiepolitischen Auswirkungen, empfiehlt das Projektteam nicht die temporäre Erhöhung des Wehrabflusses als betriebliche Fischabstiegsmassnahme weiterzuverfolgen.

## 1. Einleitung und Veranlassung

Bereits im Jahr 2011 initiierte der Verband Aare-Rheinwerke (VAR) das Forschungsprojekt «Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken», welches Anfang 2015 mit der Publikation der Dissertation «Leitrechen an Fischabstiegsanlagen – Hydraulik und fischbiologische Effizienz» [1] und des zusammenfassenden Fachartikels «Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs» [2] abgeschlossen wurde. Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein ausführliches Variantenstudium zu verschiedenen Fischabstiegsmassnahmen für grosse Flusskraftwerke durchgeführt. Als vielversprechendste Variante wurden dabei Leitrechen-Bypass-Systeme mit einem *Bar Rack* eingestuft, welche anschliessend im Labor im Detail untersucht wurden.

Die erwähnte Dissertation hat wichtige Erkenntnisse auf Stufe Labor hervorgebracht, jedoch gleichzeitig Fragen zur technischen und betrieblichen Machbarkeit sowie zu den Kosten aufgeworfen. Zur Klärung dieser Fragen wurde zwischen 2016 und 2024 unter der Dachherrschaft des VAR ein grosses Pilotprojekt durchgeführt, in welchem sowohl technische Vorprojekte zu Leitrechen-Bypass-Systemen mit *Bar Racks* als auch verhaltensbiologische Untersuchungen durchgeführt wurden. Das Pilotprojekt umfasst auch einen Synthesebericht [3] mit einer Beschreibung von Alternativmassnahmen zu Leitrechen-Bypass-Systemen für den Fischabstieg bei grossen Flusskraftwerken. In diesem Synthesebericht wurden unter anderem Empfehlungen zum weiteren Vorgehen bezüglich des Fischabstiegs bei den beiden Pilotstandorten, dem Kraftwerk Wildegg-Brugg (KWWB) der KWWB Villnachern AG und dem Kraftwerk Bannwil (WKW BAN) der BKW Energie AG, abgegeben.

Parallel zum Abschluss des Pilotprojekts beim KWWB und WKW BAN beauftragte das Bundesamt für Umwelt (BAFU) am 30. Juni 2023 die Abteilung Umwelt der Axpo Power AG (Axpo) mit der vorliegenden Ergänzungsstudie. Das Hauptziel dieser Studie ist es – aufbauend auf den bisherigen Untersuchungen – eine Entscheidungsgrundlage und Empfehlungen zum weiteren Vorgehen für die Sanierung des Fischabstiegs bei grossen Schweizer Flusskraftwerken zu liefern.

## 2. Hauptfragestellungen bzw. Ziele

Dieser Auftrag umfasst die folgenden vier im Pflichtenheft definierten Hauptfragestellungen bzw. Ziele.

### 1 Alternative Massnahmen

Im Synthesebericht des VAR-Pilotprojekts [3] wurden 15 alternative Fischabstiegs-massnahmen zu Leitrechen-Bypass-Systemen mit *Bar Racks* beschrieben. Für jede dieser Massnahmen und auch für Leitrechen-Bypass-Systeme mit *Bar Racks* soll eine Empfehlung abgegeben werden, ob bzw. welche zusätzlichen Arbeiten aus Sicht des Auftragnehmers vor einer allfälligen Umsetzung bei einem grossen Flusskraftwerk durchgeführt werden sollen. Dies können z.B. Verhaltensstudien, Laborversuche, Tests an einer kleineren Anlage oder weitere Literaturrecherchen sein. Zusätzlich soll für jede Fischabstiegs-massnahme angegeben werden, welche Methoden für die Durchführung einer Wirkungskontrolle nach Realisierung der entsprechenden Massnahmen zielführend sein könnten.

## **2 Verhaltensstudien**

Aktuell gibt es bezüglich des Fischverhaltens beim Abstieg im Ist-Zustand bei Wasserkraftwerken viele Wissenslücken. Aus Sicht des Auftraggebers können viele Alternativmassnahmen erst nach Schliessung dieser Wissenslücken zielgerichtet geplant werden. Aus diesem Grund soll im Rahmen des vorliegenden Projekts eine Einschätzung gegeben werden, wie viele und welche fischbiologischen Verhaltensstudien im Ist-Zustand aus Sicht des Auftragnehmers als sinnvoll erachtet werden. Zudem soll definiert werden, welche Anforderungen ein Pilotstandort erfüllen soll, damit mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen einerseits möglichst viele Wissenslücken geschlossen werden können und die Resultate andererseits auf möglichst viele Kraftwerke übertragen werden können.

## **3 Grundlagenarbeiten**

Für die Entscheidung, welche Fischabstiegsmassnahmen sich für einen Standort am besten eignen, und auch für die weitere Planung und Bewertung einer speziellen Fischabstiegsmassnahme, werden kraftwerksspezifische Grundlagen benötigt. Dazu gehören beispielsweise die Abflussaufteilung zwischen den verschiedenen Wanderkorridoren und Berechnungen, beziehungsweise Abschätzungen zu den Überlebensraten. Im vorliegenden Projekt sollen diese kraftwerksspezifischen Daten, welche für eine fundierte Entscheidung zum weiteren Vorgehen bezüglich des Fischabstiegs auf jeden Fall benötigt werden, aufgelistet werden. Dies ermöglicht dem Auftraggeber die Datenerfassung zu standardisieren und den Sanierungsprozess zu beschleunigen. Die Datenerfassung selbst ist nicht Teil des vorliegenden Projekts.

## **4 Vorübergehende betriebliche Massnahmen**

Die Umsetzung der Massnahmen zur Wiederherstellung des Fischabstiegs an grossen Flusskraftwerken wird noch einige Zeit in Anspruch nehmen. Das BAFU möchte, dass Betreiber von Wasserkraftanlagen vorübergehende betriebliche Massnahmen prüfen, die vor der Realisierung von baulichen Massnahmen zur Umsetzung in Fragen kommen könnten. Denkbar sind beispielsweise die Reduktion des Teillastbetriebs zwecks Verbesserung der Überlebensraten bei der Turbinenpassage und die temporäre Ausserbetriebnahme oder Reduktion des Betriebs eines Kraftwerks während ausgeprägter Abwanderungsspeaks. In vorliegendem Projekt geht es darum, möglichst alle kraftwerksspezifischen Parameter aufzulisten, welche für die Beurteilung von betrieblichen Massnahmen benötigt werden. Berücksichtigt werden sollen dabei einerseits Parameter, welche für die Abschätzung der fischbiologischen Auswirkung benötigt werden, und andererseits Parameter, welche einen Einfluss auf die Kosten der Massnahmen haben. Nicht Teil dieses Projekts ist die Datenerfassung selbst und die Beurteilung von vorübergehenden betrieblichen Massnahmen an einzelnen Kraftwerken.

# **3. Fischabstiegsmassnahmen**

## **3.1 Einleitung**

Tab. 3.1 gibt einen Überblick über die im Synthesebericht des VAR-Pilotprojekts [3] beschriebenen Fischabstiegsmassnahmen. In den nachfolgenden Kapiteln 3.2–3.19 werden die Massnahmen nicht beschrieben, sondern es wird direkt auf Empfehlungen zum weiteren Vorgehen und auf mögliche zielführende Methoden zur Durchführung der Wirkungskontrolle nach der Realisierung eingegangen. Nur die in Kapitel 3.14 beschriebenen ökomorphologischen Leitstrukturen sind im Synthesebericht nicht beschrieben, da diese Massnahme erst im Rahmen des vorliegenden Projekts als

mögliche Fischabstiegsmaßnahme mitaufgenommen wurde. In den Kapiteln 3.20–3.23 werden die in konkreten Pilotprojekten zur Weiterverfolgung empfohlenen Fischabstiegsmaßnahmen hinsichtlich des Nutzens, der Kosten und der zeitlichen Realisierung genauer beschrieben.

	<b>Fischabstiegsmaßnahme</b>	<b>Kapitel</b>
Abschirmung und Umleitung	Leitrechen-Bypass-Systeme mit <i>Bar Racks</i> (gesamte Gewässerbreite)*	3.2
	Bypässe ohne Leitvorrichtung	3.3
	Erhöhung Barrierewirkung Einlaufrechen* - Reduktion lichter Stababstand - Elektrifizierung - Weitere sensorische Reize	3.4
	Partiell eingetauchte Feinrechen hinter Grobrechen*	3.5
	Luftblasenvorhänge (ohne Kombination mit Schall/Licht)*	3.6
	<i>BioAcoustic Fish Fence</i> (BAFF)*	3.7
	Seilrechen*	3.8
	Elektro-Seilrechen*	3.9
	Partielle Leitrechen (nicht gesamte Gewässerbreite)*	3.10
	<i>Partial depth</i> Leitrechen (nicht gesamte Wassertiefe)*	3.11
	Mobile Tauchwände*	3.12
	Wirbelbasierte Leitstrukturen ( <i>FishPath</i> )*	3.13
	Ökomorphologische Leitstrukturen*	3.14
Durchleitung	Konventionelle schädigungsarme Turbinen	3.15
	<i>Restoration Hydro Turbine</i> (RHT)	3.16
	IDA-Ansatz	3.17
	Erhöhung Wehrabfluss bei hoher Abstiegsaktivität	3.18
	Reduktion Teillastbetrieb, falls betrieblich möglich	3.19

**Tab. 3.1 Überblick über die im Synthesebericht [3] beschriebenen Fischabstiegsmaßnahmen; \* i.d.R. wird für den sicheren Fischabstieg zusätzlich zur Leitvorrichtung ein Bypass benötigt.**

## 3.2 Leitrechen-Bypass-Systeme mit *Bar Racks*

### 3.2.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Aus den im Rahmen des VAR-Pilotprojekts zum Fischabstieg durchgeführten technischen Vorprojekten beim KWWB und WKW BAN ist bekannt, dass Leitrechen-Bypass-Systeme mit *Bar Racks* bei grossen Schweizer Flusskraftwerken technisch machbar sind. Es hat sich aber auch gezeigt, dass diese Systeme teuer sind, falls sie bei bestehenden Kraftwerken nachgerüstet werden müssen. Es wird davon ausgegangen, dass Leitrechen-Bypass-Systeme mit *Bar Racks* bei mit dem KWWB und WKW BAN vergleichbaren Anlagen ähnlich teuer sind. Entsprechend kann der Entscheid zur Verhältnismässigkeit beim KWWB und WKW BAN auch auf andere bestehende grosse Schweizer Flusskraftwerke übertragen werden. Das weitere Vorgehen bezüglich Leitrechen-Bypass-Systemen mit *Bar Racks* ist daher insbesondere davon abhängig, ob das BAFU die für das KWWB und WKW BAN geschätzten Kosten als verhältnismässig einstuft.

Sollten Leitrechen-Bypass-Systeme mit *Bar Racks* bei diesen Kraftwerken als nicht verhältnismässig eingestuft werden, wird auch die Realisierung eines Pilotprojekts als wenig sinnvoll erachtet. In diesem Fall würde sich der Bau von Leitrechen-Bypass-Systemen mit *Bar Racks* voraussichtlich auf Neubauprojekte von Kraftwerken beschränken, bei welchen Leitrechen-Bypass-Systeme mit *Bar Racks* eher verhältnismässig sind als bei bestehenden Kraftwerken.

Sollte das BAFU Leitrechen-Bypass-Systeme mit *Bar Racks* beim KWWB und/oder WKW BAN als verhältnismässig einstufen, könnte die Planung bei diesen oder allenfalls auch bei anderen Kraftwerken fortgesetzt werden. Da die Realisierung von *Bar Racks* bei Kanalkraftwerken einfacher und kostengünstiger ist als bei anderen Kraftwerksbauweisen, würde sich prinzipiell das KWWB als Pilotanlage eignen. Da sich das KWWB aber auch als Pilotanlage für partiellen Leitrechen anbietet (Kapitel 3.10), muss für Leitrechen-Bypass-Systeme mit *Bar Racks* allenfalls ein alternativer Standort gesucht werden. Um das Investitionsrisiko zu reduzieren und die Wirkungskontrolle zu vereinfachen, könnte ein solches Pilotprojekt auch bei einem mittelgrossen Kraftwerk durchgeführt werden. Wichtig wäre in diesem Fall, dass der Standort repräsentativ für die grossen Flusskraftwerke ist (z.B. Fischzusammensetzung, Geschwemmselaufkommen) und der *Bar Rack* so geplant wird, dass die Resultate so gut wie möglich auf grosse Flusskraftwerke übertragen werden können (z.B. Rechenanordnung, Stababstand). Alternativ könnte die Fischleitwirkung im Freiland für ein breites Artenspektrum in einem temporären Testversuch, beispielsweise beim Kleinwasserkraftwerk Stoppel, ermittelt werden. Dort wäre es möglich, einen temporären *Bar Rack* vor dem bestehenden Horizontalrechen zu installieren.

Eine mögliche Fischabstiegsmassnahme wäre auch die Elektrifizierung eines *Bar Racks*. Damit könnten zwar gewisse Kosten eingespart werden, da beispielsweise gegebenenfalls der lichte Stababstand erhöht werden kann. Dem gegenüber stehen zusätzliche Kosten für die Elektrifizierung inkl. der Sicherstellung des Personenschutzes. Auch wenn bisher gemäss dem Kenntnisstand des Projektteams kein solches Projekt für ein bestehendes, grosses Flusskraftwerk ausgearbeitet wurde, geht das Projektteam davon aus, dass die Kosten eines solchen Projekts in einer ähnlichen Grössenordnung liegen würden wie die Kosten für einen *Bar Rack* ohne Elektrifizierung. Somit ist das weitere Vorgehen bezüglich elektrifizierten *Bar Racks* unter anderem von der Entscheidung des BAFU zur Verhältnismässigkeit von *Bar Racks* ohne Elektrifizierung und den in Kapitel 3.4 beschriebenen generellen Aspekten zur Elektrifizierung abhängig.

### 3.2.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Das Hauptziel einer Wirkungskontrolle mit Leitrechen-Bypass-Systemen mit einem *Bar Rack* muss die Quantifizierung bzw. Abschätzung der Fischleiteffizienz sein. Theoretisch müsste somit ermittelt werden, welcher Prozentsatz aller abstiegswilliger Fische zum Bypass geleitet wird und diesen auch für den Abstieg nutzt. In der Praxis kann die Fischleiteffizienz aber aus diversen Gründen nicht ermittelt, sondern bestenfalls abgeschätzt werden. Für eine solche Abschätzung würde sich v.a. der zeitgleiche Einsatz eines Turbinen- und eines Bypasshamens eignen. Gemäss Ebel [4] können Turbinenhamen technisch nur bei Turbinenabflüssen bis zu 100 m<sup>3</sup>/s eingesetzt werden. Entsprechend ist diese Methode für die meisten grossen Flusskraftwerke nicht geeignet. Die Ausnahme sind grosse Flusskraftwerke mit mehreren verhältnismässig kleinen Turbinen. Daher sollte der Einsatz eines Turbinen- und Bypasshamens geprüft werden, falls ein Leitrechen-Bypass-System mit einem *Bar Rack* bei Wasserkraftwerken mit einem Turbinendurchfluss unter 100 m<sup>3</sup>/s geplant wird.

Für grosse Flusskraftwerke, bei welchen ein Turbinenhamen technisch nicht möglich ist, werden folgende Methoden für die Durchführung der Wirkungskontrolle als zielführend erachtet:

- Akustische Telemetrie + Fischzählung und Überprüfung etwaiger Verletzungen im Bypass
- Radiotelemetrie + Fischzählung und Überprüfung etwaiger Verletzungen im Bypass
- Sonaruntersuchung + Fischzählung und Überprüfung etwaiger Verletzungen im Bypass

Fischzählungen und Überprüfungen der Verletzungen im Bypass, welche beispielsweise mit einem Bypasshamen durchgeführt werden können, müssen dabei zwingend durchgeführt werden. Anderenfalls kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich Fische beim Abstieg über den Bypass verletzen. Diese Methode lässt jedoch weder Rückschlüsse auf die Anzahl abstiegswilliger Fische noch auf die Anzahl Rechenpassagen zu. Da mit einem Bypasshamen zudem keine Aussagen bezüglich des Verhaltens vor dem *Bar Rack* möglich sind, sind weitere Untersuchungen notwendig. Diesbezüglich könnten mit einer akustischen Telemetriestudie wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Die Hauptnachteile der akustischen Telemetrie sind die hohen Kosten bzw. der hohe Aufwand und die Tatsache, dass nur relativ wenige Fische markiert werden können und sich eine solche Untersuchung damit auf wenige Fischarten und Grössenklassen beschränken müsste. Im Vergleich zu einer akustischen Telemetrieuntersuchung würde eine Radiotelemetrieuntersuchung zwar weniger Informationen zum Fischverhalten vor dem Rechen liefern, Aussagen zur Anzahl Turbinen- und Bypasspassagen und somit zur Leiteffizienz wären jedoch möglich. Sonaruntersuchungen eignen sich v.a. zur qualitativen Beschreibung des Fischverhaltens, während quantitative Analysen mit grossen Unsicherheiten behaftet sind. Welche dieser Methoden oder Methodenkombination sich nach Realisierung eines Leitrechen-Bypass-Systems mit einem *Bar Rack* am besten eignet, muss im Einzelfall unter Berücksichtigung der lokalen Randbedingungen entschieden werden.

## 3.3 Bypässe ohne Leitvorrichtung

### 3.3.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Wie im Synthesebericht [3] beschrieben, wird basierend auf Literaturangaben nicht davon ausgegangen, dass Bypässe ohne Leitvorrichtung bei grossen Flusskraftwerken von vielen Fischen für den Abstieg genutzt werden würden. Aus diesem Grund

wird nicht empfohlen, dass diese Alternativmassnahme in einem separaten Projekt untersucht wird.

Es gibt jedoch Massnahmen, wie beispielsweise partielle Leitrechen (Kapitel 3.5) oder das BAFF-System (Kapitel 3.7), bei welchen eine Leitvorrichtung mit einem Bypass kombiniert wird. Es wird empfohlen, dass bei der Wirkungskontrolle dieser Massnahmen auch Zeiträume untersucht werden, während welcher die Leitvorrichtung ausser Betrieb genommen wird und somit jeweils nur der Bypass in Betrieb ist. Die nur mit dem Bypass gesammelten Daten können dann als Referenz zur Beurteilung der Wirkung der Leitvorrichtung genutzt werden. Zudem können diese Daten für eine Einschätzung bezüglich der Effizienz von Bypässen ohne Leitvorrichtung als Fischabstiegsmassnahme verwendet werden. Sollte sich bei diesen Versuchen zeigen, dass die Bypässe ohne Leitvorrichtungen von vielen Fischen für den Abstieg genutzt werden, könnten Bypässe ohne Leitvorrichtung auch bei anderen Kraftwerken als Fischabstiegsmassnahme in Betracht gezogen werden.

Auch wenn die geometrischen Abmessungen und die Strömungsverhältnisse nicht identisch sind, ähnelt der Ausstieg aus einer Fischaufstiegshilfe (FAH) einem Bypass ohne Leitvorrichtung für den Fischabstieg. Um besser abschätzen zu können, wie viele Fische einen Bypass ohne Leitvorrichtung für den Abstieg nutzen, wäre es auch denkbar, im Einstiegsbereich einer FAH eine Zählvorrichtung zu installieren. Basierend auf Literaturangaben und den im Rahmen des VAR-Pilotprojekts zum Fischabstieg durchgeführten Telemetriestudien wird jedoch nicht davon ausgegangen, dass viele Fische die FAH grosser Flusskraftwerke für den Abstieg nutzen. Entsprechend wird eine solche Untersuchung des Abstiegs über die FAH nicht empfohlen, sondern lediglich als mögliche Option aufgezeigt.

Zusammenfassend wird empfohlen, Bypässe ohne Leitvorrichtung nicht in einem separaten Projekt, aber in Kombination mit anderen Projekten mit Leitvorrichtungen zu untersuchen.

### 3.3.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Wie viele Fische den Bypass ohne Leitvorrichtung für den Abstieg nutzen, sollte mit einer Zählvorrichtung im Bypass untersucht werden. Das Verhalten bei der Annäherung an den Bypass könnte mit einem Sonar beobachtet werden. Alternativ wäre auch eine Telemetriestudie zielführend, wobei in einer solchen Studie trotz grossen Aufwands und hoher Kosten nur verhältnismässig wenige Fische markiert werden könnten.

## 3.4 Erhöhung Barrierewirkung bestehender Einlaufrechen

### 3.4.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Gemäss Tab. 3.1 in Kapitel 3.1 und den Ausführungen im Synthesebericht [3] kann die Barrierewirkung bestehender Einlaufrechen generell durch die Reduktion des lichten Stababstands, durch Elektrifizierung und durch den Einsatz weiterer sensorischer Reize erreicht werden. In diesem Kapitel werden separate Empfehlungen zu diesen drei Möglichkeiten zur Erhöhung der Barrierewirkung bestehender Einlaufrechen gegeben.

#### **Reduktion des lichten Stababstands**

Aufgrund der generell hohen Fliessgeschwindigkeiten bei grossen Flusskraftwerken und dem damit verbundenen Risiko von *fish impingement* wird nicht empfohlen, die Reduktion des lichten Stababstands bestehender Einlaufrechen bei grossen Flusskraft-

werken als Fischschutz- oder Fischabstiegsmassnahme weiterzuverfolgen. Detailliertere Ausführungen zu dieser Empfehlung können dem Synthesebericht entnommen werden [3].

### **Elektrifizierung**

Laborversuche mit gepulstem Gleichstrom (pDC) haben gezeigt, dass die Barrierewirkung von konventionellen Einlaufrechen durch die Elektrifizierung mit gepulstem Gleichstrom insbesondere für Aale und Cypriniden erhöht werden kann. Die Schutzwirkung ist jedoch stark von der Art der Elektrifizierung, der Fischart, den Anströmgeschwindigkeiten und dem Stababstand abhängig. Insbesondere da noch Fragen bezüglich der biologischen Effizienz bei hohen Fliessgeschwindigkeiten, der Korrosion am Rechen, etwaigen Fischverletzungen und der Personensicherheit offen sind, empfiehlt Axpo momentan nicht, dieses System bei einer gut zugänglichen Wasserkraftanlage zu testen. Stattdessen empfiehlt Axpo die wichtigsten Aspekte wie folgt zu untersuchen:

- **Biologische Effizienz bei hohen Fliessgeschwindigkeiten**

Es wird empfohlen, im Labor zu untersuchen, ob sich elektrifizierte Einlaufrechen auch bei hohen Fliessgeschwindigkeiten für den Schutz eines breiten Fischartenspektrums eignen. Mit hohen Fliessgeschwindigkeiten sind Fliessgeschwindigkeiten von rund 1 m/s gemeint, wie diese gemäss Meusburger (2022) [5] bei den meisten grossen Schweizer Flusskraftwerken bei Ausbaudurchfluss in der unverbauten Rechenebene auftreten.

- **Korrosion**

Bei der Verwendung von pDC muss ein Konzept vorgelegt werden, wie die korrodierenden Anoden kostengünstig ersetzt werden können. Anderenfalls ist mit hohen Erneuerungskosten zu rechnen. Gemäss Erfahrungen aus Deutschland kann die Korrosion durch die Verwendung von gepulstem Wechselstrom (pAC) bei einem Pulsabstand von positivem und negativem Puls von < 5 ms verhindert werden. Trotzdem bedingt auch diese Art der Elektrifizierung die Ausarbeitung eines Konzepts zum Korrosionsschutz, da bei der Elektrifizierung die Elektroden, und somit je nach Art der Elektrifizierung die Einlaufrechen, nicht mit Korrosionsschutzfarbe behandelt werden können. Somit müssen für alle Arten der Elektrifizierung Konzepte zum Korrosionsschutz ausgearbeitet werden (z.B. zusätzlicher kontinuierlicher kathodischer Korrosionsschutz).

- **Fischverletzungen**

Es wird empfohlen, im Labor zu untersuchen, ob die Elektrifizierung von Einlaufrechen zu äusseren oder inneren Fischverletzungen führt. Bei diesem Nachweis soll darauf geachtet werden, dass die Art der Elektrifizierung im Labor so gewählt wird, wie diese dann auch später bei Kraftwerken zum Einsatz kommen soll (z.B. pDC vs. pAC). Dies ist insbesondere deshalb wichtig, da etwaige Fischverletzungen im Feld kaum oder gar nicht untersucht bzw. nachgewiesen werden können. Falls das elektrische Feld so aufgebaut wird, dass das Risiko besteht, dass grössere Fische gleichzeitig mit der Anode und der Kathode in Kontakt kommen, wird empfohlen, auch dieses spezifische Verletzungsrisiko insbesondere für Aale zu untersuchen.

- **Personensicherheit**

Gemäss Aussagen der Hersteller ist durch den angelegten Strom bei Fischschutzanlagen nicht mit direkten Personenschäden zu rechnen. Allerdings kann durch das elektrische Feld eine verminderte Schwimffähigkeit oder Panikreaktion ausgelöst werden, was zu einem erhöhten Ertrinkungsrisiko führt. Bevor die Elektrifizierung in den gut zugänglichen Schweizer Mittellandflüssen installiert wird, empfiehlt Axpo die Entwicklung eines automatisierten, redundanten und zuverlässigen Notabstellmechanismus, welcher beispielsweise auf Wärmebildkameras basieren könnte.

Sollten die oben aufgeführten Nachweise erbracht werden, könnte im nächsten Schritt eine Pilotanlage realisiert werden. Aus Sicht Axpo wäre es sinnvoll, ein kleines Kraftwerk als Pilotanlage zu wählen, bei welchem jedoch die Rechenanordnung, die Fließgeschwindigkeiten und die Fischfauna mit grossen Flusskraftwerken vergleichbar sind. Dies würde einerseits die Investitionskosten reduzieren und gleichzeitig eine umfassende Wirkungskontrolle mit einem Turbinenhamen ermöglichen. Bei grossen Turbinen wäre dies hingegen technisch nicht möglich. Zudem könnte bei einer kleinen Pilotanlage untersucht werden, wie sich die Fische vor einem verhältnismässig kleinen Rechen verhalten. Diese Erkenntnisse könnten vor der Realisierung einer grossen Pilotanlage für eine Einschätzung zum Fischverhalten vor einer grossen elektrifizierten Rechenfläche genutzt werden. Hier steht v.a. die Frage im Vordergrund, ob sich Fische bei einer grossen, elektrifizierten Rechenfläche über einen längeren Zeitraum an der Rechenpassage hindern lassen. Sollte sich das System bei einer Pilotanlage bewähren, könnte dieses im nächsten Schritt auch bei grossen Flusskraftwerken eingesetzt werden.

### **Weitere sensorische Reize**

Die Erhöhung der Barrierewirkung bestehender Einlaufrechen durch die Kombination mit anderen sensorischen Reizen als Strom, d.h. beispielsweise mit Schall und Licht, könnte sich in Kombination mit einem Bypass als verhältnismässig günstige Fischabstiegsmassnahme eignen. Da dem Projektteam bisher kein solches System bekannt ist, welches kommerziell verfügbar und nachweislich für ein breites Artenspektrum wirksam ist, kann nicht direkt ein Pilotprojekt aufgelegt werden. Basierend auf dem vorhandenen Wissen kann nicht erwartet werden, dass ein solches System zu einem vergleichbar hohen Nutzen führt wie beispielsweise ein Leitrechen-Bypass-System. Aufgrund der voraussichtlich verhältnismässig tiefen Kosten könnte eine solche Massnahme aber dennoch ein gutes Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweisen. Somit könnte sich ein solches System vor allem für Kraftwerke eignen, bei welchen andere Fischabstiegsmassnahmen unverhältnismässig sind. Aus diesen Gründen wird empfohlen, dass ein Literaturstudium in Auftrag gegeben wird, mit welchem der Wissensstand zur Erhöhung der Barrierewirkung bestehender Einlaufrechen mit weiteren sensorischen Reizen als Strom zusammengefasst wird. In diesem Projekt könnte neben dem Literaturstudium auch Kontakt mit Herstellern von Fischschutz- und -leitsysteme mit sensorischen Reizen aufgenommen werden. Sollte dabei ein vielversprechender Lösungsansatz gefunden werden, wird empfohlen, diesen zuerst unter standardisierten Bedingungen im Labor und dann im Feld bei einem kleinen Wasserkraftwerk zu testen. Erst wenn diese Tests erfolgreich verlaufen, macht die Anwendung bei einer grossen Wasserkraftanlage Sinn.

#### **3.4.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung**

Das Verhalten vor dem Rechen könnte bis zu einem gewissen Grad mit Video- und Sonaraufnahmen qualitativ beurteilt werden. Besonders wichtig wäre es dabei das Verhalten als Referenz auch mit deaktivierter Barriere zu untersuchen. Für eine quantitative Analyse müsste hingegen ein Turbinenhamen eingesetzt werden. Auch die Radiotelemetrie würde sich für eine solche Studie eignen, wobei in diesem Fall v.a. der Vergleich von Zeiträumen mit aktiver und inaktiver Barriere interessant wäre.

### **3.5 Partiiell eingetauchten Feinrechen hinter Grobrechen**

#### **3.5.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen**

Mit partiell eingetauchten Feinrechen hinter Grobrechen sind sogenannte

*Submersible traveling screens und extended submersible bar screens* gemeint, welche im Synthesebericht [3] genauer beschrieben sind. Da partiell eingetauchte Feinrechen hinter Grobrechen bei grossen Schweizer Flusskraftwerken gemäss den Ausführungen im Synthesebericht [3] voraussichtlich nicht machbar bzw. betreibbar oder zumindest sehr teuer wären, wird nicht empfohlen, diese Massnahme weiterzuverfolgen.

### 3.5.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Sollten partiell eingetauchte Feinrechen hinter dem Grobrechen dennoch umgesetzt werden, wäre zusätzlich zu einer Zählung im Bypass beispielsweise eine Wirkungskontrolle mit akustischer Telemetrie oder Radiotelemetrie denkbar.

## 3.6 Luftblasenvorhänge

### 3.6.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Es wird nicht empfohlen, reine Luftblasenvorhänge weiterzuverfolgen, da das in Kapitel 3.7 beschriebene BAFF-System für den Schutz eines breiten Artenspektrums vielversprechender ist.

### 3.6.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Sollten Luftblasenvorhänge dennoch weiterverfolgt werden, eignen sich die in Kapitel 3.7.2 für das BAFF-System beschriebenen Methoden für die Durchführung der Wirkungskontrolle.

## 3.7 BioAcoustic Fish Fence

### 3.7.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Beim *BioAcoustic Fish Fence* (BAFF-System) handelt es sich um ein kommerziell verfügbares System, bei welchem jedoch noch wenig über die biologische Effizienz der heimischen Fischfauna bei einem Einsatz als Fischabstiegsanlage bekannt ist. Aus diesem Grund wird empfohlen, das System im Labor oder bei einem kleinen Wasserkraftwerk zu testen. Ein Laborversuch hat den Vorteil, dass der Grossteil der Umwelteinflüsse kontrolliert werden kann. Der Hauptnachteil ist hingegen, dass das natürliche Fischverhalten nur bedingt abgebildet werden kann. Ein Laborversuch wäre somit wünschenswert, kann eine Untersuchung im Feld aber nicht ersetzen. Aus diesen Gründen wird empfohlen, entweder direkt einen temporären Testversuch bei einem kleinen oder mittelgrossen Wasserkraftwerk zu starten oder vor diesem Versuch eine Laborstudie in Auftrag zu geben. Alternativ könnte das Verhalten von Fischen vor dem BAFF-System in einem ersten Schritt auch in einem Bach oder Kanal ohne Kraftwerk untersucht werden. Von einem direkten Einsatz als Fischabstiegsmassnahme bei einer grossen Wasserkraftanlage wird abgeraten, da in diesem Fall im Vergleich zu einem Test bei einem kleinen Wasserkraftwerk die Investitionskosten voraussichtlich deutlich höher wären, eine aussagekräftige Wirkungskontrolle deutlich schwieriger wäre und gegebenenfalls notwendige nachträgliche Anpassungen an der Barriere deutlich teurer und aufwendiger wären. Sollte die biologische Effizienz bei einem kleinen Wasserkraftwerk getestet werden, könnte es jedoch durchaus sinnvoll sein, ein Testelement des BAFF-Systems bei einer grossen Wasserkraftanlage zu installieren, um Betriebserfahrungen unter realen Bedingungen bei grossen Flusskraftwerken zu sammeln. Diese Versuche könnten nach dem Nachweis der biologischen Wirkung bei einer kleinen Wasserkraftanlage erbracht werden oder – um Zeit zu sparen – parallel zu den Versuchen bei einem kleinen Wasserkraftwerk. Falls die

biologische Wirkung bei einem kleinen Wasserkraftwerk nachgewiesen werden kann und die Versuche zum Betrieb bei einer grossen Wasserkraftanlage positiv verlaufen und gleichzeitig das Nutzen-Kosten-Verhältnis basierend auf einer Kostenschätzung für ein grosses Kraftwerk als hoch eingeschätzt wird, wird die Umsetzung einer Pilotanlage bei einer grossen Wasserkraftanlage empfohlen.

### 3.7.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Die genaueste Methode zur Analyse des Schwimmverhaltens der Fische ist die akustische Telemetrie, wobei unklar ist, ob die Hydrophone in diesem Fall nicht durch das BAFF-System gestört werden würden. Weitere Möglichkeiten sind die Radiotelemetrie zur Erfassung der Passagen durch das BAFF-System und Sonaruntersuchungen zur Untersuchung des Schwimmverhaltens vor dem BAFF-System. Inwiefern Sonaruntersuchungen möglich sind, insbesondere mit einem automatisierten Auswertalgorithmus, müsste jedoch im Detail geprüft werden, da die aufsteigenden Luftblasen voraussichtlich zu speziellen Herausforderungen führen. Eine weitere Möglichkeit, welche jedoch nur bei einem kleinen Wasserkraftwerk realisiert werden kann, ist der zeitgleiche Einsatz eines Turbinen- und eines Bypasshamens. Insbesondere wenn Zeiträume mit aktiver und inaktiver Barriere miteinander verglichen werden, könnten so interessante Aussagen zur Effizienz gemacht werden. Da diese Methode keine Rückschlüsse auf das Verhalten vor der Barriere zulässt, müsste eine solche Untersuchung mit einer weiteren Methode, beispielsweise einer Sonaruntersuchung, kombiniert werden.

## 3.8 Seilrechen

### 3.8.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Wie im Synthesebericht [3] beschrieben, ist ein nicht elektrifizierter Seilrechen nur mit einem sehr geringen lichten Seilabstand wirksam. Da ein solch geringer lichter Seilabstand aufgrund der grossen hydraulischen Verluste und betrieblichen Herausforderungen gerade bei grossen Wasserkraftanlagen nicht praktikabel ist, wird der Seilrechen ohne Elektrifizierung nicht zur Weiterverfolgung empfohlen.

### 3.8.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Sollte dennoch ein nicht elektrifizierter Seilrechen realisiert werden, eignen sich die in Kapitel 3.7.2 für das BAFF-System beschriebenen Methoden für die Durchführung der Wirkungskontrolle.

## 3.9 Elektro-Seilrechen

### 3.9.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Im Synthesebericht [3] sind die Vor- und Nachteile des Elektro-Seilrechens beschrieben. Zu den Hauptnachteilen gehören offene Fragen bezüglich der Personensicherheit und bezüglich der Auswirkungen von gepulstem Wechselstrom auf das Fischverhalten und etwaige Fischverletzungen. Zudem ist noch unklar, ob ein Elektro-Seilrechen in grossen Fliessgewässern im Schweizer Mittelland mit entsprechend hohem Geschwemmselanfall zuverlässig betrieben werden kann.

Aus Sicht des Projektteams handelt es sich bei der Personensicherheit um ein Ausschlusskriterium. Solange der Nachweis nicht erbracht werden kann, dass der Elektro-Seilrechen für Menschen ungefährlich betrieben werden kann, ist es nicht zielführend, ein konkretes Projekt an einem grossen Flusskraftwerken zu realisieren. Dies, da keine Partei die Verantwortung für etwaige Personenschäden übernehmen

kann und ein Projekt in den gut zugänglichen Flüssen im Schweizer Mittelland – Stand 2024 – wahrscheinlich nicht bewilligungsfähig ist. Aus Sicht des Projektteams ist ein sicherer Betrieb eines solchen Systems, wie in Kapitel 3.4.1 für die Elektrifizierung von bestehenden Einlaufrechen beschrieben, nur möglich, falls ein automatisierter, redundanter und zuverlässiger Notabstellmechanismus entwickelt wird.

Bisher sind dem Projektteam keine Studien bekannt, in welchen untersucht wurde, ob ein mit gepulstem Wechselstrom betriebener Elektro-Seilrechen zu Fischverletzungen führt. Vor Realisierung einer Pilotanlage wird, wie für die Elektrifizierung von bestehenden Einlaufrechen (Kapitel 3.4.1), die Durchführung einer Laboruntersuchung empfohlen, bei welcher die Fische nicht nur auf äussere, sondern auch auf innere Verletzungen hin untersucht werden. Falls der Elektro-Seilrechen in einem Aalgewässer eingesetzt werden soll, wird empfohlen, vorab Untersuchungen zum Verletzungs- und Immobilisationsrisiko durchzuführen. Der Grund hierfür ist, dass Aale bei Elektro-Seilrechen gleichzeitig mit der Anode und Kathode in Kontakt kommen können.

Falls beim Elektro-Seilrechen Personenschäden und Fischverletzungen nachweislich ausgeschlossen werden können, könnte diese Massnahme bei einem Pilotkraftwerk installiert und getestet werden. Damit die bei dieser Pilotanlage gesammelten Betriebserfahrungen auf grosse Flusskraftwerke im Schweizer Mittelland übertragbar sind, müssen die Strömungsbedingungen und der Geschwemmselanfall mit diesen Kraftwerken vergleichbar sein. An dieser Pilotanlage könnten nicht nur Betriebserfahrungen, sondern auch Erfahrungen zur biologischen Wirkung gesammelt werden. Sollte sich die Pilotanlage bezüglich des Betriebs und der biologischen Leitwirkung bewähren, könnte mit der Planung einer Pilotanlage bei einem grossen Schweizer Flusskraftwerk gestartet werden.

### 3.9.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Sollte ein Elektro-Seilrechen realisiert werden, eignen sich die in Kapitel 3.7.2 für das BAFF-System beschriebenen Methoden für die Durchführung der Wirkungskontrolle.

## 3.10 Partielle Leitrechen (nicht gesamte Gewässerbreite)

### 3.10.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Die im Rahmen des VAR-Pilotprojekts beim KWWB durchgeführte akustische Telemetrieuntersuchung [6] hat gezeigt, dass viele der markierten Fische in den Uferbereichen des KWWB nach einem Abstiegskorridor suchten. Diese Beobachtungen legen die Vermutung nahe, dass mit partiellen Leitrechen, d.h. mit Leitrechen, welche nicht die gesamte Gewässerbreite abdecken, beim KWWB viele Fische zu einem Bypass geleitet werden können. Gleichzeitig sind partielle Leitrechen beim KWWB günstiger als über die gesamte Kanalbreite installiertes Leitrechen-Bypass System mit einem *Bar Rack* (Kapitel 3.22). Da Erfahrungen mit einem vergleichbaren System fehlen, sind die Unsicherheiten bezüglich der biologischen Wirkung, der Kosten und der betrieblichen Herausforderungen gross. Aus diesem Grund empfiehlt Axpo einen temporären Testversuch mit partiellen Leitrechen durchzuführen, um diese Unsicherheiten zu reduzieren. Details zu einem solchen temporären Testversuch können dem Synthesebericht [3] entnommen werden. Als Testanlage bietet sich aufgrund der Resultate der akustischen Telemetrieuntersuchung das KWWB an. Sollte der temporäre Testversuch sowohl aus fischbiologischer als auch aus betrieblicher Sicht erfolgreich verlaufen und sollten die Kosten als verhältnismässig eingeschätzt werden, könnte der Fischabstieg beim KWWB mit permanent installierten partiellen Leitrechen verbessert werden. Bevor partielle Leitrechen bei anderen Kraftwerken eingesetzt

werden, sollte überprüft werden, ob sich die Suchbewegungen absteigender Fische wie beim KWVB auf die Uferbereiche konzentrieren. Je nach Standort und Entwicklung von *Live Imaging Sonaren* könnten solche Sonargeräte für diese Untersuchungen genutzt werden. Alternativ könnte – wie beim KWVB – eine akustische Telemetrieuntersuchung durchgeführt werden. Dabei stellt sich insbesondere die Frage, ob es auch bei anderen Kraftwerksbauweisen, d.h. beispielsweise bei Blockkraftwerken, Bereiche gibt, in welchen Fische vermehrt nach einem Abstiegskorridor suchen und ob es möglich ist, Fische von diesen Bereichen mit partiellen Leitrechen zu einem Bypass zu leiten.

### 3.10.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Es wird eine Zählung im Bypass mittels Zählvorrichtung empfohlen, um überprüfen zu können, ob bzw. welche und wie viele Fische in den Bypass geleitet werden. Falls die partiellen Leitrechen so ausgebildet werden, dass diese angehoben werden können, um den Abflussquerschnitt freizugeben, wird empfohlen, die Zählungen im Bypass abwechselnd mit und ohne eingesetzte Leitrechen durchzuführen. Dadurch könnte die Leitwirkung der Rechen abgeschätzt werden und zudem wäre es möglich, Informationen über die Effizienz von Bypässen ohne Leitvorrichtung zu erhalten (Kapitel 3.3). Das Verhalten vor dem Rechen könnte mit einem *Live Imaging Sonar* zumindest qualitativ beurteilt werden. Alternativ könnte mit einer Radiotelemetrieuntersuchung überprüft werden, wie viele Fische den Bypass und nicht die Turbinen als Abstiegskorridor nutzen. Auch die Durchführung einer akustischen Telemetrieuntersuchung wäre denkbar, da damit einerseits Erkenntnisse zum Schwimmverhalten entlang des Rechens und andererseits auch zum Verhältnis der Bypass- und Turbinenpassagen gewonnen werden könnten. Da mit den Telemetriestudien nur Aussagen über die markierten Fische und nicht über den natürlich Fischabstieg gemacht werden können, kann eine solche Studie jedoch Zählungen im Bypass nicht ersetzen.

## 3.11 *Partial depth* Leitrechen

### 3.11.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Bei *partial depth* Leitrechen handelt es sich um Leitrechen, z.B. *Bar Racks*, welche nicht die gesamte Wassertiefe abdecken. Nach wie vor ist sehr wenig darüber bekannt, welche Wassertiefen potamodrome Fischarten beim Abstieg nutzen. Literaturangaben, sowie die beim KWVB und WKW BAN im Rahmen des VAR-Pilotprojekts durchgeführten Telemetriestudien [7] [8], deuten jedoch nicht darauf hin, dass ein breites potamodromes Artenspektrum primär oberflächennah abwandert. Entsprechend wird aktuell nicht empfohlen, *partial depth* Leitrechen als Fischabstiegsmaßnahme für ein breites potamodromes Artenspektrum weiterzuverfolgen. Sollten jedoch zukünftige fischbiologische Untersuchungen zeigen, dass die Zielfischarten bei einem grossen Flusskraftwerk primär oberflächennah abwandern, könnten sich *partial depth* Leitrechen durchaus als Fischabstiegsmaßnahme für dieses Kraftwerk eignen.

### 3.11.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Sollte zukünftig ein *partial depth* Leitrechen realisiert werden, wäre die akustische Telemetrie mit Tiefensensoren eine geeignete Methode zur Durchführung der Wirkungskontrolle. Damit könnte analysiert werden, in welchen Wassertiefen sich Fische dem Rechen nähern und ob sie entsprechend unter diesem hindurch tauchen. Insbesondere wenn ein *partial depth* Leitrechen nicht die gesamte Gewässerbreite abdeckt, ist eine akustische Telemetrieuntersuchung mit Tiefensensoren für die Quantifizierung der Effizienz nahezu unumgänglich, da anderenfalls nicht gesagt werden

kann, ob Fische unter dem *partial depth* Leitrechen hindurchgetaucht oder an diesem vorbeigeschwommen sind. Falls ein *partial depth* Leitrechen die gesamte Kanalbreite abdeckt, könnten auch andere Methoden wie die Radiotelemetrie mit Tiefensensoren sinnvoll sein.

### **3.12 Mobile Tauchwände**

#### 3.12.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Der Einsatz mobiler Tauchwände ist nur sinnvoll, wenn die Zielfischarten nachweislich primär oberflächennah abwandern, wovon gemäss den Ausführungen in Kapitel 3.11.1 für ein breites potamodromes Artenspektrums aktuell nicht ausgegangen wird. Aufgrund der grossen Gefällsverluste würden sich mobile Tauchwände nur eignen, wenn die Zielfischarten während sehr kurzer Zeiträume absteigen. Auch davon wird für ein breites potamodromes Artenspektrum gemäss den Ausführungen im Synthesebericht [3] aktuell nicht ausgegangen. Aus diesen Gründen wird nicht empfohlen, mobile Tauchwände als Fischabstiegsmassnahme bei grossen Schweizer Flusskraftwerken weiterzuverfolgen.

#### 3.12.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Sollten mobile Tauchwände realisiert werden, könnte die Wirkungskontrolle mit den in Kapitel 3.11.2 für *partial depth* beschriebenen Methoden durchgeführt werden.

### **3.13 Wirbelbasierte Leitstrukturen (*FishPath*)**

#### 3.13.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Bei den wirbelbasierten Leitstrukturen des *FishPath* Projekts handelt es sich um ein laufendes Forschungsprojekt, bei welchem – Stand Juli 2024 – für das Projektteam nicht absehbar ist, ob sich aus diesem Projekt eine vielsprechende und praxistaugliche Fischabstiegslösung entwickelt. Entsprechend wird empfohlen, die für 2025–2026 erwarteten Ergebnisse bzw. Bemessungsempfehlungen abzuwarten. Sollten diese Ergebnisse vielversprechend sein, könnte das System beispielsweise im Rahmen eines temporären Versuchs getestet werden. Aus Sicht des Projektteams ist es – Stand Juli 2024 – jedoch sehr unsicher, ob mit diesem System ein breites Artenspektrum bei variablen Abflussbedingungen effizient geleitet werden kann und gleichzeitig ein unterhaltsarmer Betrieb mit geringen Produktionseinbussen möglich ist.

#### 3.13.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Sollten wirbelbasierte Leitstrukturen umgesetzt werden, könnte die Wirkungskontrolle mit den in Kapitel 3.7.2 für das BAFF-System beschriebenen Methoden durchgeführt werden.

### **3.14 Ökomorphologische Leitstrukturen**

#### 3.14.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Die Idee, Fische mittels ökomorphologischer Leitstrukturen zu einem Bypass zu leiten, wurde bei der im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Fachgruppensitzung am 13. Februar 2024 von Gabriel van der Veer, Amt für Wald, Jagd und Fischerei des Kantons Solothurn, eingebracht. Die Grundidee dieser Massnahme ist, dass in stark künstlich geprägten Kraftwerkseinläufen für Fische attraktive ökomorphologische Strukturen geschaffen werden, die die Fische zu einem Bypasseinlauf «leiten». Diese

Strukturen könnten schon dutzende Meter oberstrom eines Einlaufs installiert werden. Angedacht sind strömungslenkende und -beruhigende Strukturen, die die Fische durch die verringerte Fliessgeschwindigkeit, die erhöhte Lebensraumqualität und das grosse Ausmass an Deckungsstrukturen im ansonsten sehr strukturarmen Stauraum von der Gewässersohle zunächst an die Böschung und vor dort weiter zum Bypass «leiten», ohne grosse Effekte auf die Stromproduktion zu generieren. Oberflächen-nah wandernde Fische könnten mittels schwimmender Inseln mit ins Wasser wachsenden Rhizomen an die Böschungsstrukturen und weiter zum Bypass geleitet werden. Die linearen schwimmenden Inseln werden in der Draufsicht ähnlich inklinanter Bühnen angeordnet, d.h. sie ragen weit in den Stauraum hinein und könnten daher grossräumig wirken. Durch die Anordnung schräg zur Strömung (inklinant) dürfte sich ihre «Leitwirkung» für Fische gegenüber einer rechtwinkligen Anordnung verbessern. Vermutlich müssten die Inseln so gestaltet werden, dass sie im Hochwasserfall (Schwemmholz) z.B. mittels einer Seilkonstruktion parallel zum Ufer abgelegt werden könnten. Die ufernahen Strukturen können aus verschiedenen Materialien wie Holz, lebenden Pflanzen, Stein oder Beton erstellt werden. Sie sind so auszugestalten, dass sie Deckung und Schutz bieten, zum Beispiel gegen piscivore Vögel. So könnten neben der Verbesserung des Abstiegs gegebenenfalls auch Prädationsverluste, insbesondere fliessgewässertypischer Fische (z.B. Smolts) in Stauräumen, reduziert werden.

Wie viele absteigende Fische mit solchen ökomorphologischen Leitstrukturen effektiv zu einem Bypass geleitet werden könnten, lässt sich aktuell kaum abschätzen, da bisher nur erste Ideen und noch keine konkreten Planungen oder Erfahrungen vorliegen. Es wäre auch möglich, ökomorphologische Leitstrukturen ober- und unterstrom von den in Kapitel 3.10 beschriebenen partiellen Leitrechen zu installieren, da so die zumindest beim KWVB ohnehin von Fischen häufig genutzten Uferbereiche noch attraktiver gestaltet werden könnten. Generell wird davon ausgegangen, dass ökomorphologische Leitstrukturen selbst relativ günstig realisiert werden können, aber trotzdem ein Bypass für den Fischabstieg benötigt wird. Die betrieblichen Auswirkungen ökomorphologischer Leitstrukturen können erst beurteilt werden, wenn klarer ist, wie diese Strukturen genau aussehen sollen.

Bei ökomorphologischen Leitstrukturen handelt es sich um einen neuartigen, experimentellen Ansatz. Bevor ein Pilotprojekt zu ökomorphologischen Leitstrukturen gestartet wird, wird ein Literaturstudium empfohlen, um herauszufinden, ob ein vergleichbares System schon bei einem Kraftwerk im Ausland getestet wurde. Je nach Ergebnis der Literaturstudie könnte – vergleichbar zu den in Kapitel 3.13 beschriebenen wirbelbasierten Leitstrukturen – anschliessend ein Forschungsprojekt aufgelegt werden. Ein solches Forschungsprojekt sollte jedoch im Freiland und nicht im Labor durchgeführt werden, um die Übertragbarkeit der Resultate auf grosse Flusskraftwerke sicherstellen zu können. Sollte in einem solchen Forschungsprojekt nachgewiesen werden, dass sich ökomorphologischen Leitstrukturen in Kombination mit einem Bypass als Fischabstiegsanlage eignen, könnte anschliessend mit der Planung eines Pilotprojekts bei einem grossen Flusskraftwerk gestartet werden.

#### 3.14.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Die akustische Telemetrie ist die einzige Methode, mit welcher die Schwimmpfade von absteigenden Fischen individuenbasiert ermittelt werden können. Da nur mittels dieser individuenbasierten Schwimmpfade beurteilt werden kann, wie viele Fische ökomorphologische Leitstrukturen für den Abstieg nutzen, empfiehlt das Projektteam eine akustische Telemetriestudie durchzuführen, falls ökomorphologische Leitstrukturen umgesetzt werden sollten. Um den Effekt der ökomorphologischen Leitstrukturen

quantifizieren zu können, müssten Zeiträume ohne ökomorphologische Leitstrukturen, d.h. nur mit einem Bypass, mit Zeiträumen mit ökomorphologischen Leitstrukturen verglichen werden. Sollte sich eine solche Studie nur auf Zeiträume mit installierten ökomorphologischen Leitstrukturen fokussieren, könnte nicht quantifiziert werden, wie viele Fische die Uferbereiche auch ohne ökomorphologischer Leitstrukturen genutzt hätten bzw. wie viele Fische ohne ökomorphologische Leitstrukturen in den Bypass geschwommen wären. Eine Zählung der über den Bypass abgestiegenen Fische könnte ein Indiz zur Funktionstüchtigkeit ökomorphologischer Leitstrukturen liefern. Ohne entsprechende Referenzzählung ohne ökomorphologische Leitstrukturen und ohne dass bekannt ist, wie viele Fische andere Korridore für den Abstieg nutzen, würde eine solche Zählung aber kaum eine abschliessende Beurteilung der Funktionstüchtigkeit ökomorphologischer Leitstrukturen zulassen.

### 3.15 Konventionelle schädigungsarme Turbinen

#### 3.15.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Aufgrund der im Synthesebericht [3] beschriebenen Gründe wird das Verbesserungspotenzial konventioneller schädigungsarmer Turbinen als relativ gering eingeschätzt. Da ein Turbinenersatz zudem relativ teuer ist, wird in den meisten Fällen nicht von einem guten Nutzen-Kosten-Verhältnis ausgegangen. Aus diesem Grund wird nicht empfohlen, konventionelle schädigungsarme Turbinen als Fischabstiegsmassnahme weiterzuverfolgenden. Dies heisst jedoch nicht, dass es nicht sinnvoll ist, konventionelle schädigungsarme Turbinen einzusetzen, wenn die Turbinen eines Kraftwerks aus technischen oder betrieblichen Gründen ersetzt werden müssen.

#### 3.15.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Verhaltensstudien sind nach einem Turbinenersatz nicht nötig, aber idealerweise würde die Verbesserung der Überlebenswahrscheinlichkeit untersucht werden. Dies ist nur mit einem Turbinenhamen möglich, welcher sowohl mit der alten als auch mit der neuen Turbine eingesetzt werden müsste. Dies ist nur bei Turbinen mit Ausbaudurchflüssen unter 100 m<sup>3</sup>/s technisch machbar ist (Ebel, 2024) [4]. Da eine solche Untersuchung auch bei kleineren Turbinen mit grossem Aufwand verbunden wäre und die Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Überlebenswahrscheinlichkeiten mit einem Turbinenhamen gross sind, wäre eine solche Untersuchung voraussichtlich nicht verhältnismässig. Die Alternative ist, dass keine Untersuchung durchgeführt wird und das Verbesserungspotenzial mit theoretischen Modellen abgeschätzt wird.

### 3.16 Restoration Hydro Turbine

#### 3.16.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Bei der *Restoration Hydro Turbine* (RHT) handelt es sich um eine vielversprechende Fischabstiegslösung, bei welcher jedoch noch viele Fragen ungeklärt sind. Aus diesem Grund empfiehlt das Projektteam eine RHT an einem geeigneten Pilotstandort zu planen und bei aussichtsreichen Ergebnissen entsprechend zu realisieren. Die so gesammelten Erfahrungen bezüglich der Kosten, des Betriebs und der biologischen Wirkung könnten dann für die Umsetzung bei weiteren Kraftwerken genutzt werden. Im Jahr 2023 führte die Entwicklungsfirma der RHT, Natel Energy, eine Machbarkeitsstudie für einen Turbinenersatz beim Kraftwerk Eglisau (KWE) durch [9]. Die wichtigsten Erkenntnisse, Risiken und Auswirkungen und Empfehlungen für das weitere Vorgehen wurden von Axpo in einem Bericht [10] zusammengefasst. Die Machbarkeitsstudie beim KWE hat gezeigt, dass ein Laufradersatz mit einer RHT technisch voraussichtlich machbar ist, jedoch weiterhin viele Fragen offen sind. Beispielsweise sind die

Unsicherheiten bezüglich des effektiven Wirkungsgrads mit einer RHT gross. Sollte eine bestehende Kaplanturbine durch eine RHT ersetzt werden, wird dies in vielen Fällen voraussichtlich zu Wirkungsgradeinbussen und somit zu Erlöseinbussen führen. Dies wirkt sich wiederum stark auf die Kosten und somit das Nutzen-Kosten-Verhältnis dieser Sanierungsmassnahme aus und hat zudem auch energiepolitische Konsequenzen. Um diesbezüglich mehr Klarheit zu schaffen, wird empfohlen, an einem Pilotstandort wie dem KWE ein Detailprojekt einer RHT auszuarbeiten, welches u.a. physikalische Modellversuche zur Quantifizierung des Wirkungsgrads umfasst.

### 3.16.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Falls eine bestehende Kaplanturbine durch eine RHT ersetzt wird, treffen weitgehend die in Kapitel 3.15.2 für schädigungsarme Turbinen getroffenen Aussagen zu. Der Hauptunterschied ist, dass bei der RHT von einem deutlich höheren Verbesserungspotenzial ausgegangen wird. Dies bedeutet, dass das Verbesserungspotenzial bei Untersuchungen mit einem Turbinenhamen einfacher quantifiziert werden kann. Hinzu kommt, dass es sich bei der RHT um eine neuartige Technologie handelt, für welche aus fischbiologischer Sicht zwar vielversprechende Resultate vorliegen, jedoch kaum Erfahrungen von Pilotanlagen. Sollte eine erste RHT in der Schweiz installiert werden, wird somit eine Untersuchung mit einem Turbinenhamen empfohlen, was gemäss Ebel (2024) [4] nur bei Turbinendurchflüssen unter  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  möglich ist. Bei der Realisierung weiterer RHT könnte gegebenenfalls auf diese Untersuchungen verzichtet werden.

## 3.17 IDA-Ansatz

### 3.17.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Beim sogenannte IDA-Ansatz, welcher als Abkürzung für die Bezeichnung «Induzierte Drift Anwendung» steht, soll die Überlebenswahrscheinlichkeit von über die Turbine absteigenden Fischen durch die Auswirkungen eines elektrischen Feldes erhöht werden. Dies soll dadurch erreicht werden, dass die Fische die Turbine aufgrund des elektrischen Feldes im Nahbereich der Nabe passieren und dadurch, dass die Fische durch das elektrische Feld nicht mit positiver Rheotaxis gegen die Strömung schwimmen. Dies würde das Kollisionsrisiko reduziert und somit die Überlebenswahrscheinlichkeit erhöhen. Beim IDA-Ansatz handelt es sich um ein experimentelles System, bei welchem noch viele Fragen bezüglich der technischen Auswirkungen und der biologischen Wirkung offen sind. Diese Fragen können nur mit aufwendigen Abklärungen bzw. Untersuchungen geklärt werden. Hinzu kommt, dass mit diesem Ansatz selbst im Idealfall nicht dem Grossteil der abwandernden Fische ein verletzungsfreier Abstieg ermöglicht werden kann. Dies liegt u.a. daran, dass die Fische weiterhin über die bestehende Turbine absteigen müssen. Gemäss ersten Untersuchungen kann die Schädigungsrate bei der Turbinenpassage mit dem IDA-Ansatz um rund 50% reduziert werden [11]. Nicht berücksichtigt sind dabei Faktoren wie ein gegebenenfalls erhöhtes Prädationsrisiko im Unterwasser. Aus diesen Gründen empfiehlt Axpo den IDA-Ansatz nicht weiterzuverfolgen. Falls der IDA-Ansatz dennoch weiterverfolgt werden sollte, dann müsste das System im Rahmen eines Pilotversuch bei einer kleinen Wasserkraftanlage getestet werden. Bei so einem Versuch müssten nicht nur die Überlebenswahrscheinlichkeiten von über die Turbine absteigenden Fischen vor und nach Umsetzung der Massnahme untersucht werden, sondern auch die Auswirkungen des elektrischen Feldes auf die Turbinen und andere Bauteile.

### 3.17.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Falls der IDA-Ansatz entgegen den Empfehlungen umgesetzt werden würde, könnte die effektive Erhöhung der Überlebenswahrscheinlichkeit, wie für konventionelle schädigungsarme Turbinen in Kapitel 3.15.2 beschrieben, nur mit einem Turbinenhamen ermittelt werden. Im Gegensatz zu den schädigungsarmen Turbinen gibt es für den IDA-Ansatz noch keine erprobte Methode zur Quantifizierung der Überlebenswahrscheinlichkeit, sodass auch eine theoretische Abschätzung des Verbesserungspotenzials mit sehr grossen Unsicherheiten behaftet wäre.

## 3.18 Erhöhung Wehrabfluss bei hoher Abstiegsaktivität

### 3.18.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Bei der Erhöhung des Wehrabflusses bei hoher Abstiegsaktivität handelt es sich um eine betriebliche Massnahme, mit welcher der Fischabstieg bei Kraftwerken ohne Restwasserstrecke verbessert werden könnte. Diese Massnahme ist insbesondere dann interessant, wenn sehr ausgeprägte Abwanderungsspeaks der Zielfischarten stattfinden, welche gut prognostiziert bzw. quantifiziert werden können. Wie im Synthesebericht [3] beschrieben, wird aktuell jedoch nicht davon ausgegangen, dass dies für ein breites potamodromes Artenspektrum zutrifft. Zudem wäre eine solche Massnahme sehr teuer und hätte negative Auswirkungen auf die heimische Energieversorgung, Netzstabilität und Energiepolitik. Daher empfiehlt Axpo, diese Massnahme nicht weiterzuverfolgenden, wobei ausführlichere Erläuterungen dem Kapitel 6 entnommen werden können. Sollte diese Massnahme dennoch weiterverfolgt werden, müsste einerseits festgelegt werden, wie viel diese Massnahme kosten dürfte, damit sie als verhältnismässig erachtet wird und andererseits müssten weitere Grundlagen geschaffen werden, um den biologischen Nutzen genauer quantifizieren zu können. Für die Grundlagenbeschaffung erachtet Axpo insbesondere *Live Imaging Sonare* als vielversprechende Technologie, wobei der biologische Nutzen einer solchen Massnahme aufgrund der Komplexität des Fischabstiegs insbesondere von potamodromen Arten voraussichtlich auch in Zukunft nur mit sehr grossen Unsicherheiten quantifiziert werden kann. Nach Abschätzung der Kosten und des Nutzens für konkrete Fälle könnte das Nutzen-Kosten-Verhältnis mit anderen Sanierungsmassnahmen verglichen werden.

### 3.18.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Die Verbesserung einer temporären Erhöhung des Wehrabflusses zu quantifizieren ist generell sehr schwierig. Denkbar wäre eine Radiotelemetriestudie, in welcher aber nur wenige und relativ grosse Fischen markiert werden könnten. Bei einer solchen Studie müssten Perioden ohne zusätzlichen Wehrabfluss mit Perioden mit zusätzlichem Wehrabfluss miteinander verglichen werden. Da das Fischverhalten von vielen weiteren Faktoren beeinflusst wird, wäre es aber selbst mit einer Radiotelemetriestudie schwierig, den effektiven Einfluss des zusätzlichen Wehrabflusses zu quantifizieren. Möglich wäre auch eine Sonaruntersuchung, bei welcher versucht werden könnte, die Anzahl von über das Wehr absteigenden Fischen zu quantifizieren. Da quantitative Sonaruntersuchungen erfahrungsgemäss sehr schwierig sind, könnte mit einer solchen Untersuchung auch im Idealfall nur die Grössenordnung des Fischabstiegs über das Wehr abgeschätzt werden.

### **3.19 Reduktion Teillastbetrieb, falls betrieblich möglich**

#### 3.19.1 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Mit der Reduktion des Teillastbetriebs, falls betrieblich möglich, ist gemeint, dass der nutzbare Kraftwerkszufluss mit möglichst wenigen Turbinen verarbeitet wird. Da Axpo, wie im Synthesebericht [3] beschrieben, generell von einem relativ geringen Verbesserungspotenzial dieser Massnahmen ausgeht, wird empfohlen, diese Massnahme nicht weiterzuverfolgenden. Sollte diese Massnahme dennoch weiterverfolgt werden, müsste im nächsten Schritt der potenzielle Nutzen der Reduktion des Teillastbetriebs abgeschätzt werden. Dafür wird eine Literaturrecherche zu den Überlebenswahrscheinlichkeiten im Teil- und Vollastbetrieb empfohlen. Wichtig ist, dass sich diese Literaturrecherche nicht nur auf die kollisionsbedingte Schädigung beschränkt, sondern auch andere Schädigungsmechanismen, wie beispielsweise die druckbasierte Schädigung, miteinbezieht. Zudem müsste eine Studie zur Quantifizierung des biologischen Verbesserungspotenzials für diverse Kraftwerke durchgeführt werden. Es müsste auch abgeklärt werden, wie betriebliche Einschränkungen oder personelle Mehraufwände entschädigt werden könnten. Mit diesen Informationen könnte das Nutzen-Kosten-Verhältnis für ausgewählte Kraftwerke abgeschätzt und entsprechend entschieden werden, ob diese Massnahme umgesetzt werden soll.

#### 3.19.2 Mögliche zielführende Wirkungskontrollen nach der Realisierung

Wie bei dem in Kapitel 3.15.2 beschriebenen Einsatz von konventionellen schädigungsarmen Turbinen wird auch bei der Reduktion des Teillastbetriebs generell von einem geringen Verbesserungspotenzial ausgegangen, welches voraussichtlich im Feld selbst mit einem Turbinenhamen nicht quantifiziert werden könnte. Somit sieht das Projektteam für diese Massnahme keine realistische Alternative zur Quantifizierung des Verbesserungspotenzials mit theoretischen Modellen.

### **3.20 Zusammenfassung Fischabstiegsmassnahme**

In den Kapiteln 3.2–3.19 wurden für diverse Fischabstiegsmassnahmen Empfehlungen zum weiteren Vorgehen gegeben, welche in Tab. 3.2 zusammengefasst sind. Konkret wird empfohlen, Leitreechen-Bypass-Systeme (*Bar Racks*), das BAFF-System, partielle Leitreechen und die RHT an konkreten Projekten weiterzuverfolgen. Für die orange markierten Massnahmen empfiehlt Axpo vor der Realisierung an konkreten Standorten zusätzliche Abklärungen zu treffen bzw. Voruntersuchungen durchzuführen.

	Fischabstiegsmassnahme	Empfehlung zum weiteren Vorgehen
Abschirmung und Umleitung	Leitrechen-Bypass-Systeme ( <i>Bar Racks</i> )	Falls verhältnismässig, Detailplanung und ggf. Realisierung einer Pilotanlage
	Bypässe ohne Leitvorrichtung	Kein separates Projekt, aber Untersuchung bei anderen Projekten (z.B. par. Leitrechen)
	Erhöhung Barrierewirkung Einlaufrechen	
	- Reduktion lichter Stababstand	Nicht weiterverfolgen, insbesondere da Risiko <i>fish impingement</i>
	- Elektrifizierung	Weitere Abklärungen nötig (u.a. Personenschutz, Fischverletzungen)
	- Weitere sensorische Reize	Optionen mit Firmen bespr. → falls aussichtsreiche Option → Pilotprojekt aufgleisen
	Partiell einget. Feinrechen hinter Grobrechen	Nicht weiterverfolgen, u.a. da teuer und nur für oberflächennah wandernde Fische
	Luftblasenvorhänge (ohne Kombina. Schall/Licht)	Nicht weiterverfolgen, da Kombination mit Schall und Licht vielversprechender
	<i>BioAcoustic Fish Fence</i> (BAFF-System)	Test bei einem kleinen Wasserkraftwerk (z.B. Kleinwasserkraftwerk Stoppel)
	Seilrechen	Nicht weiterverfolgen, da keine gute Schutzwirkung
	Elektro-Seilrechen	Klärung Personensicherheit und potenz. Fischverletzungen; dann ggf. kl. Pilotanlage
	Partielle Leitrechen (nicht gesamte Breite)	Temporärer Testversuche beim KWWB
	<i>Partial depth</i> Leitrechen (nicht gesamte Tiefe)	Nur weiterverfolgen, wenn neuere Studien auf oberflächennahen Fischabstieg hindeuten
	Mobile Tauchwände	Nicht weiterverfolgen, da keine hohe Leitwirkung erwartet
Durchleitung	Wirbelbasierte Leitstrukturen ( <i>FishPath</i> )	Abwarten; Einschätzung erst möglich, wenn Bemessungsempfehlungen vorliegen
	Ökomorphologische Leitstrukturen	Literaturstudium und anschliessend gegebenenfalls ein Forschungsprojekt
	Konventionelle schädigungsarme Turbinen	Nicht weiterverfolgen, da teuer und geringes Verbesserungspotenzial
	<i>Restoration Hydro Turbine</i> (RHT)	Fortführung des Pilotprojekts beim Kraftwerk Eglisau
	IDA-Ansatz	Nicht weiterverfolgen, da viele offene Fragen und geringes Verbesserungspotenzial
	Erhöhung Wehrabfluss bei hoher Abstiegsaktivität	Nicht weiterverfolgen, da hohe Kosten; anderenfalls weitere Grundlagen schaffen
	Reduktion Teillastbetrieb, falls betrieblich möglich	Nicht weiterverfolgen, da voraussichtlich geringes Verbesserungspotenzial

Tab. 3.2 Zusammenfassung der Empfehlungen zum weiteren Vorgehen diverser Fischabstiegsmassnahmen; **rot**: nicht weiterverfolgen, **orange**: aktuell kein konkretes Projekt empfohlen, da weitere Abklärungen nötig sind; **grün**: Massnahme soll in einem konkreten Projekt weiterverfolgt werden.

### 3.21 Nutzen der empfohlenen Fischabstiegsmassnahmen

Da bisher in der Schweiz noch keine der in Kapitel 3.20 empfohlenen Fischabstiegs-massnahmen bei grossen Flusskraftwerken realisiert wurde und auch international nur wenige und teils widersprüchliche Informationen vorliegen, ist eine objektive Bewertung des Nutzens schwierig. Nichtsdestotrotz wird mit Tab. 3.3 auf Wunsch des BAFU versucht, die empfohlenen Massnahmen mit dem vorhandenen Wissensstand aus fischbiologischer Sicht qualitativ zu bewerten. Die Gesamtbewertung setzt sich aus den Bewertungen der einzelnen Fischarten zusammen, wobei es sich bei dieser Bewertung um eine Einschätzung von Axpo mit Kenntnisstand Juli 2024 handelt. Aufgrund fehlender Erfahrungen mit vergleichbaren Fischabstiegsanlagen ist diese Einschätzung mit entsprechend grossen Unsicherheiten behaftet. Es wird empfohlen, diese Bewertung zu aktualisieren, sobald neue Erkenntnisse vorliegen.

Fischabstiegs-massnahme	Fischart						Gesamt
	Aal	Lachs	Bachforelle	Barbe	Alet	Weit. Arten	
Leitrechen-Bypass-System mit <i>Bar Rack</i>	2	3	2	3	3	3	3
<i>BioAcoustic Fish Fence</i> (BAFF)	2	2	2	2	2	2	2
Partielle Leitreechen (nicht gesamte Breite)	1	2	2	2	3	2	2
<i>Restoration Hydro Turbine</i>	3	3	3	3	3	3	3

**Tab. 3.3 Bewertung der empfohlenen Fischabstiegs-massnahmen aus fischbiologischer Sicht; 3 gute Funktionstüchtigkeit erwartet, 2 mittlere Funktionstüchtigkeit erwartet oder kaum Informationen vorhanden, 1 geringe Funktionstüchtigkeit erwartet.**

Die Bewertung des Leitreechen-Bypass-Systems mit einem *Bar Rack* erfolgte basierend auf den Laboruntersuchungen von Beck (2020) [12] und Beck et al. (2021) [13] mit einem *Curved-Bar Rack* (CBR). Der lichte Stababstand dieses CBR betrug an der Vorderkante der Rechenstäbe 50 mm und an der Engstelle 30.5 mm. Während die meisten Fischarten mit dem untersuchten CBR im Labor gut geleitet wurden, war die Fischleitwirkung für Aale und Bachforellen deutlich schlechter. Gemäss neueren, noch unveröffentlichten Untersuchungen der VAW mit dem *foil-shaped* CBR (f-CBR) eignet sich der f-CBR jedoch bis zu einem gewissen Grad auch für Aale. Da weder mit dem CBR noch mit dem f-CBR Erfahrungen zur Fischleiteffizienz im Freiland vorliegen, ist noch unklar, ob die relativ guten Leiteffizienzen aus dem Labor ins Freiland übertragen werden können. Dies ist unter anderem deshalb relevant, da die Laborversuche auf einem rund 2.5 m langen Rechen basieren, während beispielsweise der im technischen Vorprojekt beim KWWB [7] geplante *Bar Rack* 108 m lang ist.

Der Wissenstand zum BAFF-System wird im Synthesebericht [3] beschrieben. Aufgrund der grossen Wissenslücken, bzw. da vorhandene Untersuchungen teils widersprüchlich sind, wurde in Tab. 3.3 für alle Fischarten von einer mittleren Funktionstüchtigkeit ausgegangen.

Die Bewertung partieller Leitreechen in Tab. 3.3 basiert auf der im Synthesebericht [3] für das KWWB beschriebenen Anordnung und ist somit nicht ohne Weiteres auf andere Kraftwerke übertragbar. Für Aale wird in Tab. 3.3 von einer geringen Funktionstüchtigkeit ausgegangen, da Aale voraussichtlich nicht primär ufernah abwandern

und basierend auf den Laboruntersuchungen von Beck (2020) [12] und Beck et al. (2021) [13] nicht von einer hohen Leitwirkung des CBR für Aale ausgegangen wird. Für Alet wird eine gute Funktionstüchtigkeit erwartet, da Alet in der beim KWWB durchgeführten akustischen Telemetrieuntersuchung [6] häufig ufernah nach einem geeigneten Abstiegskorridor suchten. Im Gegensatz dazu hielten sich Barben häufiger in der Kanalmitte auf. Da bezüglich des Verhaltens anderer Fischarten kaum Wissen vorhanden ist, wurde von einer mittleren Funktionstüchtigkeit ausgegangen.

Die Bewertung der RHT basiert auf der im Synthesebericht [3] beschriebenen Literatur und der Machbarkeitsstudie beim KWE [9][10]. Für die RHT beim KWE geht Natel Energy für 60–80 cm lange Aale dabei von einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 98.5% aus. Für andere Fischarten ist die Überlebenswahrscheinlichkeit mit der RHT von der Fischlänge aber auch von kraftwerksspezifischen Parametern abhängig. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie der RHT beim KWE wurde die Gesamtüberlebenswahrscheinlichkeiten einer Sanierung des Kraftwerks mit RHT und mit einem *Bar Rack* miteinander verglichen. Da bei diesem Vergleich einige unsichere Annahmen getroffen werden mussten, sind die Aussagen mit entsprechend hohen Unsicherheiten behaftet. Nichtsdestotrotz zeigt dieser Vergleich, dass die RHT für Fische mit einer Totallänge unter 20 cm besser abschneidet als der *Bar Rack*, selbst wenn für den *Bar Rack* optimistische Annahmen getroffen werden. Für grössere Fische kann keine klare Aussage gemacht werden, da das Ergebnis von den getroffenen Annahmen bzw. vom verwendeten Modell für die Abschätzung der Überlebenswahrscheinlichkeit der Kaplan-Turbinen abhängt. Einschränkend muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass noch kaum Erfahrungen bezüglich des Verletzungsrisikos potamodromer Arten bei RHT vorliegen und die gemachte Einschätzung auf Angaben von Natel Energy basiert. Um diese Wissenslücke zu schliessen, wird empfohlen, das Verletzungsrisiko potamodromer Arten bei der Passage von RTH systematisch zu untersuchen.

Auch wenn die biologische Bewertung der empfohlenen Fischabstiegsmassnahmen mit grossen Unsicherheiten behaftet ist, geht Axpo aktuell davon aus, dass es sich bei Leitrechen-Bypass-Systemen mit einem *Bar Rack* und der RHT aus fischbiologischer Sicht um gute Massnahmen handelt. Beim BAFF-System und den partiellen Leitrechen wird von einer mittleren Funktionstüchtigkeit ausgegangen. Wichtig ist, dass die Funktionstüchtigkeit dieser Massnahmen auch zwischen verschiedenen Kraftwerken variieren kann und dass sich kleine Details in der Planung auf die Funktionstüchtigkeit der Massnahme an einem Standort auswirken können.

## **3.22 Kosten der empfohlenen Fischabstiegsmassnahmen**

### **3.22.1 Allgemeine Anmerkungen**

Gemäss Kapitel 3.20 wird empfohlen, Leitrechen-Bypass-Systeme (*Bar Racks*), das BAFF-System, partielle Leitrechen und die RHT in konkreten Projekten weiterzuvorführen. Ein direkter Kostenvergleich dieser Massnahmen ist aktuell nicht möglich, da dies die konkrete Planung dieser Massnahmen für das gleiche Kraftwerk voraussetzen würde. Und selbst wenn ein solcher Kostenvergleich für ein Kraftwerk vorliegen würde, wäre dieser nicht ohne Weiteres auf andere Kraftwerke übertragbar. Ein direkter Vergleich der Kosten dieser Massnahmen ist auch schwierig, da bisher nur für Leitrechen-Bypass-Systeme mit *Bar Racks* technische Vorprojekte ausgearbeitet wurden und die Kostenschätzungen für die anderen Massnahmen vielen Annahmen und entsprechend hohen Unsicherheiten unterliegen. Nichtsdestotrotz wird in den nachfolgenden Kapiteln der aktuelle Wissensstand bezüglich der Kosten der zur Weiterverfolgung empfohlenen Fischabstiegsmassnahmen zusammengefasst.

### 3.22.2 Leitrechen-Bypass-System mit *Bar Rack*

Die Kosten für die Nachrüstung von Leitrechen-Bypass-Systemen mit *Bar Racks* bei grossen Flusskraftwerken wurden in den technischen Vorprojekten beim KWWB [7] und WKW BAN [8] ermittelt. Details zu den getroffenen Annahmen und eine genauere Aufschlüsselung dieser Kosten können den Schlussberichten [7] und [8] entnommen werden.

Die Investitionskosten belaufen sich beim WKW BAN auf CHF 68 Mio. exkl. MWST und beim KWWB auf CHF 44 Mio. exkl. MWST (Annahme Strompreis 56 CHF/MWh; Kostengenauigkeit +/- 30%). Die Gesamtkosten, welche neben den Investitionskosten die Erlöseinbussen während der Betriebsphase sowie Betriebs-, Instandhaltungs- und Erneuerungskosten über 40 Jahre und eine Grobkostenschätzung für die Wirkungskontrolle beinhalten, wurden für das WKW BAN auf CHF 102 Mio. exkl. MWST und für das KWWB auf CHF 72 Mio. exkl. MWST geschätzt (Annahme Strompreis 56 CHF/MWh; Kostengenauigkeit +/- 30%, ausser Erlöseinbussen). Die höheren Kosten beim WKW BAN im Vergleich zum KWWB sind v.a. auf die schwierigere bauliche Umsetzung bei einem Blockkraftwerk als bei einem Kanalkraftwerk zurückzuführen.

### 3.22.3 *BioAcoustic Fish Fence* inkl. Bypass

Das Projektteam hat bisher noch kein Projekt mit einem BAFF-System ausgearbeitet. Aktuell geht das Projektteam davon aus, dass die Kosten für ein BAFF-System mit einem Bypass in der gleichen Grössenordnung wie die in Kapitel 3.22.4 beschriebenen Kosten für partielle Leitrechen mit einem Bypass liegen. Diese erste Einschätzung zu den Kosten des BAFF-Systems müsste jedoch in einem konkreten Projekt überprüft werden.

### 3.22.4 Partielle Leitrechen (nicht gesamte Breite)

Im Synthesebericht [3] wurden erste Überlegungen zur Anordnung von partiellen Leitrechen beim KWWB geschildert. Da die Kosten der partiellen Leitrechen stark von der effektiven Ausgestaltung der Rechen und des Bypasses abhängen, werden nachfolgend die wichtigsten Annahmen der Grobkostenschätzung für einen temporären Testversuch und die Installation permanenter partieller Leitrechen erläutert. Da die nachfolgend beschriebenen partiellen Leitrechen noch nicht im Detail geplant wurden, ist auch die entsprechende Kostenschätzung nur als Grössenordnung zu verstehen (Kostengenauigkeit +/- 40%).

Für den temporären Testversuch werden die partiellen Leitrechen voraussichtlich als schwimmende Konstruktion ausgeführt, da diese Bauweise wesentlich günstiger ist, als eine an der Kanalsole fundierte Bauweise, insbesondere da keine Baugruben erstellt werden müssen. Zur Kostenoptimierung wird ein temporärer Bypass geplant. Die Fische gelangen – wie beim im technischen Vorprojekt für den *Bar Rack* [7] ausgearbeiteten Bypass – über einen oberflächennahen Überfall in den Bypass. Da der Bypass des temporären Testversuchs aus Kostengründen nicht ins Unterwasser geführt werden soll, entspricht der Bypass für den temporären Testversuch im Wesentlichen einem grossen Becken, aus welchem das Wasser zurück in den Oberwasserkanal gepumpt wird. Ähnlich wie bei einem Zählbecken für den Fischaufstieg können die Fische dann täglich gezählt und die entsprechenden Arten bestimmt werden. Damit sich die Fische nicht bei den Pumpen verletzen, wird der Bereich der Wasserentnahme für die Pumpen mit einem feinmaschigen Gitter von dem für die Fischzählung genutzten Bereich des Bypasses abgetrennt.

Für den temporären Testversuch mit zwei 8.5 m langen partiellen Leitrechen am linken Ufer rechnet Axpo mit direkten Baukosten von CHF 2.6 Mio. exkl. MWST (inkl. 20% Unvorhergesehenes). Die Gesamtkosten, welche neben den direkten Baukosten die Planungskosten, die Erlöseinbussen während der Bau- und Betriebsphase, die Kosten für die Wirkungskontrolle, die Betriebskosten und die Finanzierungskosten beinhalten, werden auf CHF 4.0 Mio. exkl. MWST geschätzt.

Sollten sich die partiellen Leitrechen im temporären Testversuch beim KWWB bewähren, könnten im nächsten Schritt permanent installierte Leitrechen geplant und realisiert werden. Für eine permanente Fischabstiegsanlage mit zwei 8.5 m langen partiellen Leitrechen am linken Ufer inkl. eines Bypasses rechnet Axpo mit direkten Baukosten inkl. 20% Unvorhergesehenes von CHF 10.0 Mio. exkl. MWST bzw. mit Gesamtkosten von CHF 22.0 Mio. exkl. MWST. Sollten links- und rechtsufrig jeweils zwei permanente partielle Leitrechen installiert werden, rechnet Axpo mit direkten Baukosten inkl. 20% Unvorhergesehenes von CHF 18.0 Mio. exkl. MWST bzw. Gesamtkosten von CHF 39.5 Mio. exkl. MWST. Die Gesamtkosten umfassen dabei – analog zum technischen Vorprojekt des über die gesamte Kanalbreite installierten *Bar Racks* – neben den direkten Baukosten die Planungskosten, die Erlöseinbussen während der Bau- und Betriebsphase (40 Jahre), die Kosten für die Wirkungskontrolle, die Betriebs- und Erneuerungskosten (40 Jahre) und die Finanzierungskosten. Die Kostengenauigkeit beträgt generell +/- 40% (ausser Strompreis, Preisbasis 2021, Annahme Strompreis: 56 CHF/MWh). Sollte jedoch von den dieser Kostenschätzungen zugrunde liegenden Annahmen abgewichen werden (z.B. längere oder kürzere Rechen), sind auch grössere Abweichung von dieser Kostengenauigkeit möglich. Der Übersichtlichkeit halber sind die genannten Kosten in Tab. 3.5 zusammengefasst.

	Direkte Baukosten [CHF]	Gesamtkosten [CHF]
2 x 8.5 m Rechen temporär <sup>1</sup>	2.6	4.0
2 x 8.5 m Rechen permanent <sup>1</sup>	10.0	22.0
4 x 8.5 m Rechen permanent <sup>2</sup>	18.0	39.5

**Tab. 3.4 Grobkostenschätzung des temporären Testversuchs und der permanent installierten partiellen Leitrechen beim KWWB. Alle Angaben in CHF exkl. MWST; <sup>1</sup> zwei Rechen und ein Bypass an einem Ufer, <sup>2</sup> jeweils zwei Rechen und ein Bypass am linken und rechten Ufer.**

### 3.22.5 Restoration Hydro Turbine

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie beim KWE wurden die Kosten für eine RHT beim KWE geschätzt [10]. In diesem Kapitel werden die entsprechenden Annahmen und Zahlen in verkürzter Form wiedergegeben.

Tab. 3.5 fasst die geschätzten Kosten für die Planung, Realisierung, Wirkungskontrolle und den Betrieb einer RHT beim KWE für eine Dauer von 40 Jahren zusammen. Dabei wurde zwischen dem Fall unterschieden, dass nur eine Kaplan turbine durch eine RHT ersetzt wird und dem Fall, dass nach erfolgreicher Umsetzung der ersten RHT die restlichen sechs Kaplan turbinen durch RHT ersetzt werden. Mit dem ersten Szenario sollen vor allem Erfahrungen mit einer RHT gesammelt werden, während mit dem zweiten Szenario voraussichtlich die wesentliche Beeinträchtigung des KWE auf den Fischabstieg behoben werden könnte.

Die nachfolgende Gesamtkostenschätzung ist mit grossen Unsicherheiten verbunden, was primär an den grossen Unsicherheiten bezüglich der Erlöseinbussen und den

fehlenden Erfahrungswerten mit vergleichbaren Projekten liegt. Die Erlöseinbussen resultieren dabei durch erwartete Wirkungsgradverluste, falls eine bestehende Kaplanmaschine durch eine RHT ersetzt wird. Da die Unsicherheiten diesbezüglich in der Machbarkeitsstudie sehr hoch sind, wurde mit mehreren Szenarien gerechnet. Beim optimistischen Szenario wurde mit Wirkungsgradeinbussen von 1.5% und einem Strompreis von 56 CHF/MWh gerechnet und beim pessimistischen Szenario von 7% und einem Strompreis von 100 CHF/MWh, wobei in Tab. 3.5 die Spannweite zwischen diesen beiden Szenarien angegeben ist. Weitere Szenarien können dem Bericht [10] entnommen werden. Eine genauere Quantifizierung der Erlöseinbussen ist erst in der nächsten Projektphase möglich. Natel Energy hat zudem erwähnt, dass sie pro realisierter RHT eine Lizenzgebühr für die Nutzung ihres geistigen Eigentums verlangen. Da die Höhe dieser Lizenzgebühr aktuell nicht abgeschätzt werden kann, wurde diese in Tab. 3.5 nicht berücksichtigt.

Phase	Kosten [Mio. CHF]	
	1 Turbine	7 Turbinen
Phase 1: Machbarkeitsstudie	0.05	0.05
Phase 2: Hydr. Modellversuche & Fischversuche <sup>1,2</sup>	2.29	2.29
Phase 3: Planung Turbinenhersteller <sup>2</sup>	0.70	0.70
Phase 4: Realisierung Turbine 1 <sup>2</sup>	2.00	2.00
Phase 5: Wirkungskontrolle Turbine 1	0.50	0.50
Phase 6: Realisierung Turbinen 2-7 <sup>2</sup>	0.00	10.80
Mehraufwand Erneuerung & Instandhaltung (40 a) <sup>3</sup>	1.00	0.00
Erlöseinbussen (40 a) <sup>4</sup>	1.53–12.72	10.68–89.04
<b>Gesamtkosten (gerundet) <sup>1,2,3,4,5</sup></b>	<b>8–19</b>	<b>27–105</b>

**Tab. 3.5** Schätzung der Gesamtkosten der Installation einer RH-Turbine bzw. von sieben RH-Turbinen beim KWE; <sup>1</sup> enthält Währungsrisiko CHF/USD; <sup>2</sup> es wird von einem reinen Laufradersatz ausgegangen, der Ersatz weiterer Komponenten (z.B. Lager, Hydraulikaggregat) wurde nicht berücksichtigt; <sup>3</sup> Annahme eines primär konstruktionsbedingten Mehraufwands bei Realisierung 1 Turbine und Annahme, dass 7 Turbinen nur umgerüstet werden, wenn sich herausstellt, dass kein konstruktionsbedingter Mehraufwand resultiert; <sup>4</sup> Annahmen Strompreise und Wirkungsgrade gemäss [10]; <sup>5</sup> ohne Berücksichtigung Lizenzgebühren Natel Energy.

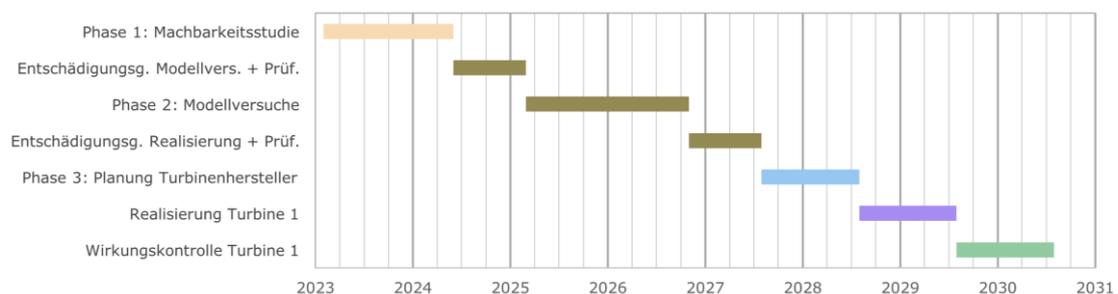
Tab. 3.5 zeigt, dass die Erlöseinbussen insbesondere bei einem pessimistischen Wirkungsgrad- und Strompreisszenario für einen grossen Teil der Gesamtkosten verantwortlich sind. Wichtig zu erwähnen ist, dass diese Aussage nicht verallgemeinert werden kann und nur auf das KWE zutrifft. Ein Grund für die erwarteten grossen Wirkungsgradeinbussen beim KWE ist, dass die bestehenden Kaplanmaschinen beim KWE einen hohen Wirkungsgrad aufweisen, da diese Turbinen erst 2012 im Zuge der Konzessionserneuerung installiert wurden und dem heutigen Stand der Technik entsprechen. Im Unterschied dazu haben ältere Turbinen tendenziell einen tieferen Wirkungsgrad, sodass bei einem Ersatz älterer Kaplanmaschinen durch eine RHT generell von geringeren Wirkungsgradverlusten ausgegangen wird.

### 3.23 Terminplan für Pilotanlagen

Das BAFU hat gewünscht, dass Axpo einen möglichst realistischen Terminplan für die Realisierung von Pilotanlagen aufzeigt. In diesem Kapitel werden mit Stand Juli 2024 aus Sicht Axpo realistische Terminpläne für die Realisierung einer RHT beim KWE und

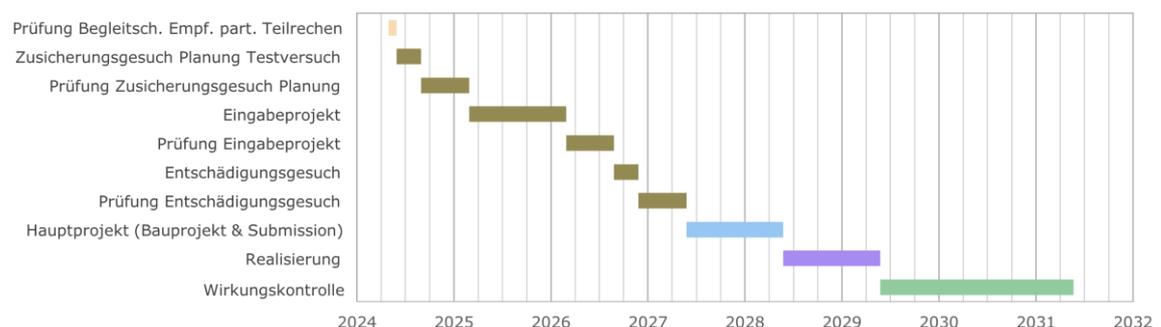
eines temporären Testversuchs mit partiellen Teilrechen beim KWWB aufgezeigt. Bei diesen Terminplänen wurde davon ausgegangen, dass bereits Mitte 2024 von den Behörden entschieden wird, ob die Projekte weiterverfolgt werden sollen. Diese Terminpläne basieren auf Erfahrungswerten von Axpo mit anderen Projekten, wobei diese nur eingehalten werden können, wenn es bei Lieferanten und bei der Bearbeitung von Seiten der Behörden zu keinen Verzögerungen kommt. Zudem können die gezeigten Terminpläne nicht ohne Weiteres auf andere Projekte übertragen werden. Aus diesen Gründen sind die aufgeführten Termine nur als Richtwerte zu verstehen.

Abb. 3.1 zeigt den im Rahmen der Machbarkeitsstudie beim KWE erstellten Terminplan für den Ersatz einer Kaplanturbine durch eine RHT. Gemäss diesem Zeitplan könnte eine erste RHT bis 2029 installiert werden und die Resultate der Wirkungskontrolle würden 2030 vorliegen. Dann könnte entschieden werden, ob weitere Kaplanturbinen beim KWE durch RHT ersetzt werden sollen und ob mit der Planung von RHT für andere Kraftwerke gestartet werden soll. Für die Beschreibung der einzelnen Projektphasen und weiteren Details zu diesem Terminplan und wird auf die Machbarkeitsstudie beim KWE [10] verwiesen.



**Abb. 3.1** Möglicher Terminplan für das RHT-Pilotprojekt beim Kraftwerk Eglisau [10].

Abb. 3.2 zeigt einen Grobterminplan für die Durchführung von temporären Testversuchen mit partiellen Leitrechen beim KWWB. Ähnlich wie bei der RHT beim KWE könnte diese Massnahme gemäss dem Zeitplan in Abb. 3.2 2029 realisiert werden. Sollten die Resultate der Wirkungskontrolle sowohl aus biologischer als auch aus betrieblicher Sicht positiv verlaufen, könnte nach der Wirkungskontrolle mit der Planung permanent installierter partieller Leitrechen gestartet werden.



**Abb. 3.2** Grobterminplan für die Durchführung von temporären Testversuchen mit partiellen Leitrechen beim Kraftwerk Wildegg-Brugg.

Für das BAFF-System wurde noch kein Terminplan ausgearbeitet, da bisher noch kein konkretes Projekt vorliegt. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass ein ähnlicher Terminplan wie bei der RHT und den partiellen Leitrechen realistisch ist. Zusammengefasst kann somit gesagt werden, dass es möglich ist, erste Resultate von

zumindest temporären Installationen bei Pilotuntersuchungen bis 2030 zu erhalten. Sollten sich die getesteten Massnahmen bei den Pilotkraftwerken bewähren, könnten diese genutzt werden, um den Fischabstieg bei diesen Kraftwerken permanent deutlich zu verbessern. Damit ist gemeint, dass beispielsweise beim KWE weitere Kaplan-turbinen durch RHT ersetzt werden und permanent installierte partielle Leitrechen beim KWWB realisiert werden. Aus Sicht des Projektteams ist dafür – Stand Juli 2024 – eine Umsetzung bis ca. 2035 realistisch. Massnahmen, welche sich bei den Pilotprojekten bewähren, könnten anschliessend für andere Kraftwerke geplant und realisiert werden.

## 4. Fischbiologische Verhaltensstudien

### 4.1 Vorgehen

Um die Anzahl und den Nutzen zusätzlicher fischbiologischer Verhaltensstudien im Ist-Zustand besser abschätzen zu können, stellte sich das Projektteam die folgenden Hauptfragestellungen.

1. Verallgemeinerbarer Wissensstand: Was wissen und was vermuten wir bezüglich des Fischabstiegs bei grossen Schweizer Flusskraftwerken? Diese Frage bezieht sich auf für die Planung von Fischabstiegsanlagen praxisrelevante und verallgemeinerbare Informationen.
2. Zusätzlich erreichbarer Wissensstand: Welche zusätzlichen, für die Planung von Fischabstiegsmassnahmen praxisrelevanten und verallgemeinerbaren Erkenntnisse erwarten wir von zusätzlichen Verhaltensstudien im Ist-Zustand?
3. Wichtigste benötigte Informationen: Was sind die wichtigsten praxisrelevanten Erkenntnisse für die Planung von Fischabstiegsmassnahmen?

Diese Fragestellungen werden in den nachfolgenden Kapiteln beantwortet. Anschliessend werden konkrete Empfehlungen zum weiteren Vorgehen gegeben und Anforderungen an Pilotstandorte definiert.

### 4.2 Verallgemeinerbarer Wissensstand

Das Fischabstiegsverhalten ist sehr komplex und wird von vielen biotischen und abiotischen sowie standortspezifischen Faktoren beeinflusst. Es ist daher nicht überraschend, dass in unterschiedlichen Studien unterschiedliche Beobachtungen gemacht werden. Diese unterschiedlichen Beobachtungen können beispielsweise durch ein anderes Arten- und Grössenspektrum der untersuchten Fischarten oder standortspezifische, hydrologische oder methodische bedingte Unterschiede resultieren. Die im Pflichtenheft beschriebene und in Kapitel 2 zusammengefasste Grundidee hinter weiteren fischbiologischen Verhaltensstudien im Ist-Zustand ist, dass eine geringe Anzahl an fischbiologischen Untersuchungen im Ist-Zustand ausreicht, um die Planungsgrundlage von Fischabstiegsanlagen für möglichst viele grosse Schweizer Flusskraftwerke wesentlich zu verbessern. Dies setzt voraus, dass die gewonnenen Erkenntnisse von einem auf mehrere Kraftwerke übertragbar sind. Das Ziel dieses Kapitels ist es daher den verallgemeinerbaren Wissensstand bezüglich des Abstiegsverhalten bei grossen Schweizer Flusskraftwerken kurz zusammenzufassen. Dabei werden nur praxisrelevante Erkenntnisse berücksichtigt, d.h. Erkenntnisse, welche direkt für die Planung einer oder mehrerer Fischabstiegsmassnahmen nützlich sind. Die Hauptquelle nachfolgender Aussagen sind die telemetrischen Untersuchungen beim KWWB [6] und WKW BAN [14].

### **Voraussichtlich verallgemeinerbares Wissen**

- Absteigende potamodrome Fische nehmen die Turbinen als Hindernis wahr
- Es findet häufig kein direkter Turbinenabstieg innerhalb weniger Minuten statt
- Stattdessen führen die Fische Suchbewegungen durch
- Falls die Fische trotz Suchbewegungen keinen geeigneten Abstiegskorridor finden, steigt der Grossteil der Fische entweder über die Turbinen ab oder verbleibt im Oberwasser
- Ohne Fischabstiegsanlage und ohne häufigem Wehrüberfall sind die Turbinen i.d.R. der Hauptabstiegskorridor
- In den Dämmerungsstunden im Herbst steigen bei bestimmten abiotischen Faktoren (Abfluss, Temperatur) viele juvenile Cypriniden ab (Erkenntnisse aus [15] [16]). Wie gross der Anteil dieser Cypriniden an der Gesamtpopulation ist, kann bisher jedoch noch nicht abgeschätzt werden.

### **Vermutungen, welche aber gegebenenfalls nicht verallgemeinerbar sind**

- Abstieg eines breiten Arten- und Grössenspektrums konzentriert sich nicht auf kurze Zeiträume und auch nicht auf eine geringe Bandbreite von abiotischen Faktoren
- Potamodrome Arten nutzen beim Abstieg in heimischen Gewässern einen Grossteil der Wassersäule

### **4.3 Zusätzlich erreichbarer Wissensstand**

In diesem Kapitel wird versucht, abzuschätzen, welche zusätzlichen verallgemeinerbaren Erkenntnisse gewonnen werden könnten, wenn zusätzliche fischbiologische Untersuchungen im Ist-Zustand durchgeführt werden würden. Bei nachfolgender Einschätzung wird davon ausgegangen, dass entweder rund fünf Radiotelemetriestudien oder rund fünf akustische Telemetriestudien bei verschiedenen Schweizer Flusskraftwerken durchgeführt werden. Es wird dabei von einem ähnlichem Untersuchungsaufbau wie bei der durchgeführten Radiotelemetriestudie beim WKW BAN [14] bzw. der akustischen Telemetriestudie beim KWVB [6] ausgegangen. Zudem wird eine Einschätzung gegeben, welche Erkenntnisse von Sonaruntersuchungen mit *Live Imaging Sonaren* erwartet werden können. Dabei wird davon ausgegangen, dass der für das Kleinwasserkraftwerk StroppeI entwickelte automatisierte Fischerkennungsalgorithmus für *Live Imaging Sonare* [17] weiterentwickelt wird und sich dieser auch für den Einsatz bei grösseren Kraftwerken eignet.

#### **Zusätzliche Radiotelemetriestudien**

- Informationen zur Schwimmtiefe einzelner Fischarten (jedoch ohne genaue Position der Fische)
- Weitere Informationen zur Nutzung bestehender, alternativer Korridore (z.B. Wehr, Fischaufstiegshilfe)
- Weitere Informationen zu den Abwanderungszeiträumen und dem Einfluss abiotischer Faktoren

#### **Zusätzliche akustische Telemetriestudien**

- Informationen zur Schwimmtiefe einzelner Fischarten (nur falls Sender mit Drucksensoren verwendet werden)
- Weitere Informationen zur Nutzung alternativer Korridore (z.B. Wehr, Fischaufstiegshilfe)
- Weitere Informationen zu den Abwanderungszeiträumen und dem Einfluss abiotischer Faktoren
- Hotspots der Suchbewegungen der Fische, welche aus den Schwimmpfaden ermittelt werden können

### **Zusätzliche Sonaruntersuchungen**

- Hotspots der Suchbewegungen der Fische (nur im Blickkegel des Sonars, nur in 2D, nicht individuenbasiert)

Diese Auflistung zeigt, dass mit akustischen Telemetriestudien am meisten zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden können. Diese Erkenntnisse lassen sich mit den Stichworten Schwimmtiefe, Korridornutzung, Abwanderungszeiträume und Hotspots zusammenfassen. Da bei diesem Vergleich Faktoren wie der Aufwand und die Kosten nicht berücksichtigt wurden, kann daraus nicht geschlossen werden, dass es sich bei der akustischen Telemetrie um die beste Technologie für alle fischbiologischen Untersuchungen handelt.

### **4.4 Wichtigste benötigte Informationen**

Mit Tab. 4.1 gibt das Projektteam eine Einschätzung, welche der in Kapitel 4.3 beschriebenen fischbiologischen Erkenntnisse für die Planung verschiedener Fischabstiegsmaßnahmen besonders relevant sind. Da es herausfordernd ist die teilweise komplexen Zusammenhänge in einer einfachen Tabelle zusammenzufassen, kann diese Tabelle eine Einzelfallentscheidung nicht ersetzen. Beispielsweise können auch Informationen zur Schwimmtiefe für die Planung von Leitrechen-Bypass-Systemen mit *Bar Racks* nützlich sein, wenn die Frage beantwortet werden soll, ob die Planung von Sohl- und/oder Tauchleitwände aus biologischer Sicht sinnvoll ist. Da jedoch prinzipiell davon ausgegangen wird, dass *Bar Racks* Fische in allen Wassertiefen leiten, wurde die Schwimmtiefe in Tab. 4.1 für Leitrechen-Bypass-Systeme mit *Bar Racks* generell als «weniger relevant» bewertet.

Fischabstiegsmassnahme		Schwimmtiefe	Korridornutzung	Abwanderungs- zeiträume	Hotspots
Abschirmung und Umleitung	Leitrechen-Bypass-Systeme ( <i>Bar Racks</i> ) <sup>1,2</sup>	-	-	-	o
	Bypässe ohne Leitvorrichtung	+	-	-	+
	Erhöhung Barrierewirkung Einlaufrechen <sup>1,2</sup> - Reduktion lichter Stababstand - Elektrifizierung - Weitere sensorische Barrieren	-	-	-	-
	Partiell eingetauchte Feinrechen hinter Grobrechen <sup>1</sup>	+	-	+	-
	Luftblasenvorhänge (ohne Kombination mit Schall/Licht) <sup>1,2</sup>	-	-	-	o
	<i>BioAcoustic Fish Fence</i> inkl. Bypass <sup>1,2</sup>	-	-	-	o
	Seilrechen <sup>1,2</sup>	-	-	-	o
	Elektro-Seilrechen <sup>1,2</sup>	-	-	-	o
	<i>Partial depth</i> Leitrechen <sup>1</sup>	+	-	-	o
	Partielle Leitrechen (nicht gesamte Breite) <sup>2</sup>	o	-	-	+
	Wirbelbasierte Leitstrukturen ( <i>FishPath</i> ) <sup>1,2</sup>	-	-	-	o
Mobile Tauchwände <sup>1</sup>	+	-	+	-	
Durchleitung	Konventionelle schädigungsarme Turbinen	-	-	-	-
	<i>Restoration Hydro Turbine</i> (RHT)	-	-	-	-
	IDA-Ansatz	-	-	-	-
	Erhöhung Wehrabfluss bei hoher Abstiegsaktivität	-	-	+	-
	Reduktion Teillastbetrieb, falls betrieblich möglich	-	-	+	-

**Tab. 4.1** Einschätzung, welche verallgemeinerbaren fischbiologischen Erkenntnisse für unterschiedliche Fischabstiegsmassnahmen besonders relevant sind; ■ sehr wichtige Information für die Planung, ■ ggf. wichtige Informationen für die Planung, ■ weniger relevante Informationen für die Planung; <sup>1</sup> bei der Bewertung wurde davon ausgegangen, dass die Barriere über die gesamte Gewässerbreite bzw. Breite der Turbineneinläufe installiert wird; <sup>2</sup> bei der Bewertung wurde davon ausgegangen, dass die Barriere über die gesamte Wassersäule installiert wird.

Tab. 4.1 zeigt, dass die Schwimmtiefe v.a. für die nicht über die gesamte Wassertiefe installierten Massnahmen wichtig ist. Gemäss Kapitel 4.2 wird jedoch aktuell nicht davon ausgegangen, dass ein breites potamodromes Fischarten- und Grössenspektrum grösstenteils oberflächennah abwandert.

Gemäss Tab. 4.1 sind Informationen zur Korridornutzung für die Planung aller Fischabstiegsmassnahmen weniger relevant. Damit ist gemeint, dass Informationen zur Korridornutzung keinen oder nur einen geringen direkten Einfluss auf die Auslegung von Fischabstiegsmassnahmen haben. Das heisst jedoch nicht, dass die Korridornutzung generell nicht relevant ist. Die Korridornutzung wird beispielsweise für die Ermittlung der Gesamtschädigungsrate einer Staustufe und somit zur Quantifizierung des Verbesserungspotenzials einer Sanierungsmassnahme benötigt.

Die Abwanderungszeiträume sind v.a. für Massnahmen wichtig, welche nur temporär, d.h. während Phasen mit erhöhter Abstiegsaktivität, eingesetzt werden. Gemäss Kapitel 4.2 wird jedoch aktuell nicht davon ausgegangen, dass ein breites potamodromes Fischarten- und Grössenspektrum grösstenteils oberflächennah abwandert.

Hotspots ausfindig zu machen ist v.a. für Bypässe ohne Leitvorrichtung, aber auch für partielle Leitrechen sehr wichtig. Allgemein kann gesagt werden, dass das Identifizieren von Hotspots für alle Leitvorrichtungen wichtig ist, welche nicht den gesamten Gewässerquerschnitt abdecken. Hotspots können aber auch für die Planung von über die gesamte Gewässerbreite installierten Leitvorrichtungen wichtig sein. Wenn beispielsweise auf der linken Seite eines Kanals deutlich mehr Fische beobachtet werden als auf der rechten Seite, macht es aus fischbiologischer Sicht Sinn, eine schräge Leitvorrichtung inkl. eines anschliessenden Bypasses vom rechten zum linken Ufer anzuordnen. Dadurch müssen die Fische nur über eine kürzere Distanz geleitet werden, wodurch wiederum das Passagerisiko reduziert werden kann, falls es sich für die entsprechenden Fische nicht um eine physische Barriere handelt.

#### **4.5 Konkrete Empfehlungen**

In Kapitel 4.3 wurde gezeigt, welche praxisrelevanten und verallgemeinerbaren Erkenntnisse von zusätzlichen fischbiologischen Untersuchungen im Ist-Zustand erwartet werden können, während in Kapitel 4.4 gezeigt wurde, für welche Fischabstiegsmassnahmen diese Erkenntnisse in der Planungsphase wichtig sind.

Das Projektteam geht davon aus, dass der Erkenntnisgewinn an für die Planung diverser Fischabstiegsmassnahmen praxisrelevanter Information für eine Vielzahl an Standorten auch nach der Durchführung von beispielsweise fünf weiteren Telemetriestudien im Ist-Zustand nicht so gross ist, dass dieser die Planung vieler Fischabstiegsmassnahmen wesentlich beeinflusst. Der Grund hierfür ist nicht, dass bereits sehr viel Wissen vorhanden ist, sondern dass in der Schweiz ein möglichst breites Fischarten- und -grössenspektrum geschützt werden soll. Zudem ist es aufgrund der Komplexität des Fischabstiegsverhaltens sehr schwierig, für die Planung von Fischabstiegsanlagen praxisrelevante Erkenntnisse zu verallgemeinern. Hinzu kommt, dass aussagekräftige Telemetriestudien aufwendig und teuer sind, viel Zeit in Anspruch nehmen und nur relativ wenige Individuen bzw. Fischarten und Grössenklassen markiert werden können. Zudem haben die Erfahrungen mit den Telemetriestudien beim KWWB und WKW BAN gezeigt, dass viele markierte potamodrome Fische während der Untersuchungsperiode, respektive während der Lebensdauer der Batterie im Sender, nicht abgestiegen sind. Dies erschwert es, belastbare Aussagen zu treffen.

Zusammengefasst empfiehlt das Projektteam keine weiteren Telemetriestudie im Ist-Zustand durchzuführen, welche das Hauptziel verfolgen, verallgemeinerbare und für die Planung von Fischabstiegsanlagen relevanten Erkenntnisse zum Abstiegsverhalten potamodromer Arten zu erhalten. Dies bedeutet jedoch nicht, dass von weiteren Telemetriestudien abgeraten wird, falls mit diesen Studien standortspezifische

Fragestellungen beantwortet werden sollen. Diese Entscheidung kann aber nur im Einzelfall getroffen werden. Anstelle der Durchführung der Telemetriestudien im Ist-Zustand wird empfohlen, die vorhandenen Ressourcen in Pilotprojekte mit verschiedenen Fischabstiegsmassnahmen inkl. umfassender Wirkungskontrollen zu investieren. Bei sorgfältiger Planung und Durchführung können dadurch einerseits wertvolle Erkenntnisse zur Funktionstüchtigkeit der entsprechenden Fischabstiegsanlage gewonnen werden, andererseits aber auch Erkenntnisse zum allgemeinen Fischabstiegsverhalten.

Zudem wird empfohlen, den automatisierten Fischerkennungsalgorithmus für *Live Imaging Sonare* weiterzuentwickeln, was aktuell im Rahmen von Pilotprojekten beim Kleinwasserkraftwerk Stropfel und dem Kraftwerk Lavey erfolgt. Falls diese Technologie wie erhofft funktioniert, könnte sich diese für diverse fischbiologische Untersuchungen eignen. Der Hauptvorteil dieser Technologie ist, dass sie deutlich kostengünstiger ist als Telemetriestudien und es somit zukünftig gegebenenfalls möglich ist, *Live Imaging Sonare* bei einer Vielzahl von Kraftwerken einzusetzen. Dadurch wären die Planer von Fischabstiegsanlagen nicht mehr so sehr stark von der schwierigen Verallgemeinerbarkeit und Übertragbarkeit des Fischverhaltens von einem zu anderen Kraftwerken angewiesen.

Es gibt einen Fall, in welchem aus Sicht des Projektteams akustische Telemetriestudien bei weiteren Kraftwerken im Ist-Zustand, mit dem Hauptziel verallgemeinerbare Erkenntnisse zu gewinnen, sinnvoll sind. Falls partielle Leitrechen beim KWWB getestet werden und es mit *Live Imaging Sonaren* nicht möglich ist, Hotspots bei anderen Kraftwerken zu identifizieren, gibt es zur akustischen Telemetrie – Stand 2024 – nahezu keine Alternativen. Wichtig wäre es dann herauszufinden, ob sich Fische bei anderen Kanalkraftwerken ähnlich wie beim KWWB verhalten bzw. ob bei anderen Kraftwerksbauweisen (z.B. Blockkraftwerken) für die Planung von partiellen Leitrechen relevante Hotspots identifiziert werden können.

Zusammenfassend wird somit empfohlen, keine weiteren Telemetriestudien im Ist-Zustand mehr durchzuführen, mit welchen das Hauptziel verfolgt wird, verallgemeinerbare und für die Planung von Fischabstiegsanlagen praxisrelevante Erkenntnisse zu gewinnen. Stattdessen wird empfohlen, diese Ressourcen in die Planung und Realisierung von vielversprechenden Fischabstiegsmassnahmen inklusiver umfassender Wirkungskontrollen zu investieren.

#### **4.6 Anforderungen an Pilotstandorte**

Gemäss dem Pflichtenheft sollen Anforderungen definiert werden, welche Pilotstandorte für fischbiologische Untersuchungen im Ist-Zustand mitbringen sollen. Wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, geht das Projektteam nicht davon aus, dass es möglich ist, mit wenigen fischbiologischen Studien für die Planung von Fischabstiegsanlagen praxisrelevante und verallgemeinerbare Erkenntnisse für ein breites potamodromes Fischarten- und Grössenspektrum zu gewinnen. Daher ist es auch nicht möglich, Anforderungen an Pilotstandorte für solche Untersuchungen zu definieren. In diesem Kapitel wird jedoch erläutert, welche Anforderungen an Pilotstandorte neuer Fischabstiegsmassnahmen mit entsprechenden Wirkungskontrollen gestellt werden sollen.

Zuerst ist es wichtig zu definieren, für welche Kraftwerke sich die zu testende Fischabstiegsmassnahme mutmasslich eignet. Dazu gehören beispielsweise die Kraftwerksanordnung (z.B. Kanalkraftwerk vs. Blockkraftwerk), der Ausbaudurchfluss pro

Turbine und die Bruttofallhöhe. Zudem müssen die Zielfischarten und Grössenklassen definiert werden.

Bei der Wahl des Pilotstandorts sollen dann insbesondere folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Möglichst **«einfacher/optimaler» Standort**, damit die Erfolgchancen am grössten sind
- Möglichst **gute Übertragbarkeit** (Beispiel: gemischter Fischartenbestand)
- Möglichst **geringe Kosten** (ggf. zuerst kleinere Pilotanlage)
- Möglichst ein Standort, welcher eine **umfassende und aussagekräftige Wirkungskontrolle erlaubt** (Beispiel: Bei Leitvorrichtungen mit einem Bypass soll möglichst erfasst werden, wie viele Fische die Barriere durchschwimmen und wie viele Fische den Bypass nutzen)

## 5. Kraftwerksspezifische Grundlagen

### 5.1 Zielsetzung und allgemeine Empfehlungen

Das Ziel dieses Kapitels ist es, möglichst alle Parameter aufzulisten, welche für eine fundierte Entscheidung zum weiteren Vorgehen bezüglich des Fischabstiegs bei grossen Flusskraftwerken auf jeden Fall benötigt werden. Diese Daten können in vier unterschiedliche Datengruppen unterteilt werden, welche in den nachfolgenden Kapiteln 5.2–5.5 beschrieben werden. Generell empfiehlt das Projektteam eine standardisierte und systematische Datenerfassung und Datenanalyse, da so einerseits Synergien genutzt werden können und andererseits nur so ein direkter Vergleich der Daten zwischen verschiedenen Kraftwerken möglich ist.

### 5.2 Allgemeine Kraftwerksinformationen

Allgemeine Kraftwerksinformationen sind u.a. wichtig, um eine erste Einschätzung geben zu können, welche Massnahmen technisch machbar bzw. sinnvoll sind. Zudem werden einige der allgemeinen Kraftwerksinformationen für die Planung diverser Alternativmassnahmen benötigt. Die wichtigsten allgemeinen Kraftwerksinformationen sind:

- Bruttofallhöhe
- Ausbaudurchfluss (je Turbine)
- Leistung
- Jahresproduktion
- Konzessionsende
- Turbinentyp (z.B. Kaplan turbine, Francisturbine, Propellerturbine, Strafloturbine)
- Anzahl und Alter der Turbinen (Ersatz geplant?)
- Kraftwerksanordnung (Blockkraftwerk, Kanalkraftwerk, Buchtenkraftwerk, Zwillingbauweise)
- Anordnung des Einlaufrechens (Vertikaler und horizontaler Winkel zur Hauptflussrichtung)
- Lichte Stababstand Einlaufrechen
- Wassertiefe vor dem Einlaufrechen
- Fläche des Einlaufrechens (benetzt bei typischem Betriebszustand, z.B. bei Einhaltung des Stauziels)

Einige dieser Parameter, wie die mittlere Bruttofallhöhe, der Turbinentyp, die Anzahl der Turbinen, die Anordnung, der lichte Stababstand und die Fläche der

Einlaufrechen, wurden bereits von Meusburger (2002) [5] für alle grossen Schweizer Flusskraftwerke erfasst und im Anhang A der erwähnten Publikation veröffentlicht.

### 5.3 Abflussaufteilung Korridore

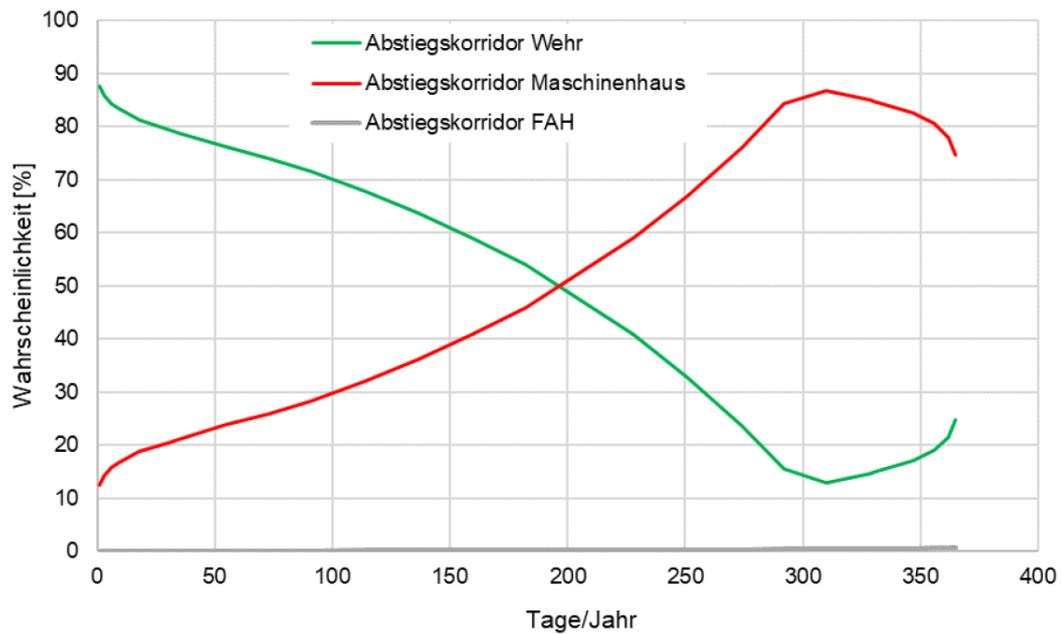
Wie bereits in Kapitel 4.4 erwähnt, sind Informationen zur Korridornutzung wichtig, um die Bedeutung unterschiedlicher Abstiegskorridore abschätzen zu können. Weil das Abstiegsverhalten sehr komplex ist und insbesondere bezüglich des Abstiegsverhaltens potamodromer Arten relativ wenig Wissen vorhanden ist, wird häufig die vereinfachende Annahme getroffen, dass sich Fische beim Abstieg proportional zum Abfluss aufteilen. Dass eine solche Aufteilung in der Natur tatsächlich so eintritt, ist sehr unwahrscheinlich und wissenschaftlich nicht belegt, im Moment in vielen Fällen jedoch die einzige praktikable Möglichkeit zur Abschätzung der Korridornutzung. Aus diesem Grund wird eine repräsentative Ganglinie des Kraftwerkszuflusses, d.h. beispielsweise die Ganglinie der letzten 10 Jahre, benötigt.

Relevant ist die Abflussaufteilung zwischen allen potenziellen Fischabstiegskorridoren eines entsprechenden Kraftwerks. Hierbei handelt es sich in den meisten Fällen um die folgenden Korridore:

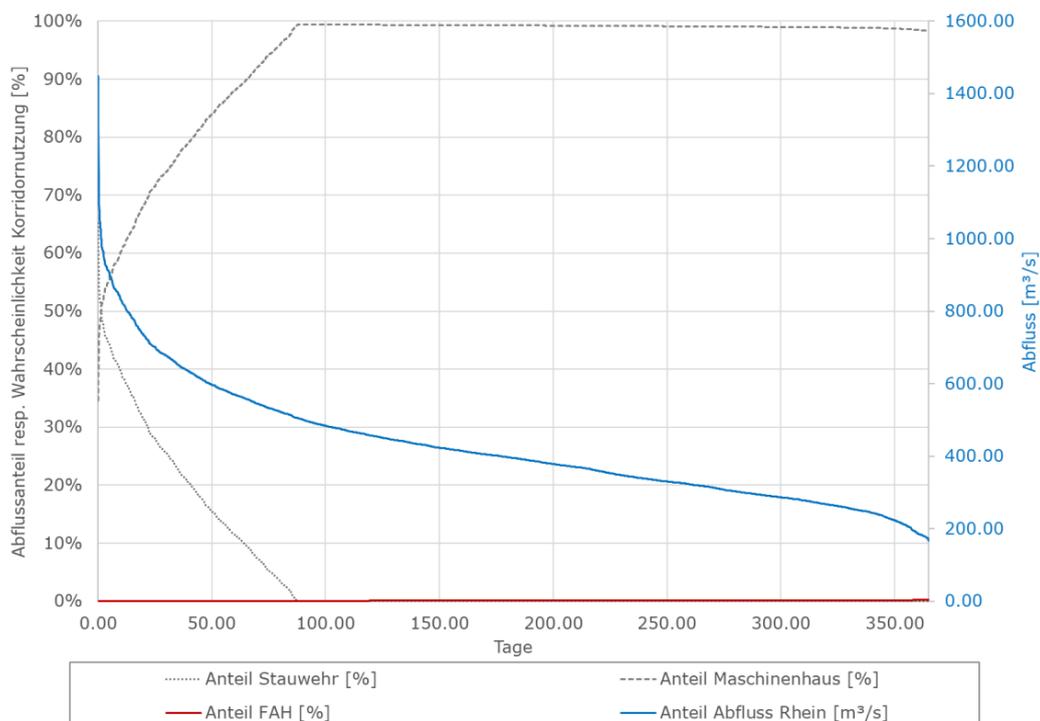
- Turbinen (nicht baugleiche Turbinen separat)
- Wehr unterströmt
- Wehr überströmt
- Fischaufstiegshilfe
- Dotierkraftwerk, falls vorhanden
- Weitere Korridore (z.B. Schiffsschleuse), falls vorhanden

Falls durch einen Korridor ganzjährig in etwa die gleiche Wassermenge fliesst, wie dies in der Regel bei Fischaufstiegshilfen bei Kraftwerken mit konstantem Oberwasserpegel der Fall ist, muss diese Wassermenge erfasst werden. Falls ein Korridor mit einem variablen Abfluss dotiert wird, wie dies beispielsweise bei Dotierkraftwerken vorkommen kann, wird das Betriebsregime dieses Korridors benötigt.

Mit diesen Daten kann die Abflussaufteilung auf die unterschiedlichen potenziellen Fischabstiegskorridore ermittelt werden. Als Beispiel hierfür zeigt Abb. 5.1 die langjährigen Dauerkurven beim Kleinwasserkraft Windisch, welche im Rahmen des Variantenstudiums zum Fischabstieg erstellt wurden. Als weiteres Beispiel zeigt Abb. 5.2 die Situation beim KWE, welche im Rahmen einer Gesamtschau der Ist-Situation des Fischabstiegs erstellt wurde.



**Abb. 5.1** Wahrscheinlichkeit der Nutzung der bestehenden Abstiegskorridore beim Kleinwasserkraftwerk Windisch unter der Annahme, dass sich Fische beim Abstieg proportional zum Abfluss aufteilen (Datengrundlage: BAFU Messstelle Reuss-Mellingen 1935–2018).



**Abb. 5.2** Dauerlinien der prozentualen Abflussanteile der für den Fischabstieg relevanten Korridore beim Kraftwerk Eglisau: Maschinenhaus, Stauwehr, FAH inkl. Schiffschleuse.

## 5.4 Angaben Turbinen

Die Angaben zu den Turbinen werden benötigt, um die Überlebenswahrscheinlichkeiten von über die Turbinen absteigenden Fischen zu ermitteln. Die in der Fachliteratur empfohlenen empirischen und physikalischen Modelle benötigen die folgenden Eingangsparameter:

- Turbinentyp (vertikalachsige Kaplan turbine, Rohrturbine, Francisturbine)
- Anzahl Turbinen (falls nicht baugleiche Turbinen → nachfolgende Parameter für jede Turbine einzeln)
- Anzahl der Laufradschaufeln ( $z$ )
- Drehzahl ( $n$ )
- Maximaler Laufraddurchmesser ( $d_{\max}$ )
- Minimaler Laufraddurchmesser/Nabendurchmesser ( $d_{\min}$ )
- Ausbauwassermenge pro Turbine ( $Q_A$ )
- Höhe der Leitschaufeln/Länge der Schaufelkante (nur für Francisturbinen)

Physikalische Modelle berücksichtigen in der Regel nur die kollisionsbedingte Schädigung, welche jedoch gemäss aktuellem Kenntnisstand für die meisten heimischen Zielfischarten bei einem Grossteil der grossen Schweizer Flusskraftwerken massgebend ist. Dass die Quantifizierung des Verletzungsrisikos durch weitere Schädigungsmechanismen, wie beispielsweise der druckbasierten Schädigung, insbesondere für potamodrome Fischarten sehr schwierig ist, hat die im Rahmen des VAR-Pilotprojekts beim WKW BAN durchgeführte Sensorfisch-Untersuchung gezeigt [18]. Dies liegt einerseits daran, dass es sehr aufwendig ist, die für die Ermittlung der druckbasierten Schädigung relevanten Parameter, wie beispielsweise den Nadirdruck und die Druckänderungsrate, zu erfassen. Andererseits sind für viele Fischarten in der Literatur keine Informationen zum Zusammenhang der druckbasierten Parameter und des Verletzungsrisikos vorhanden. Aus diesem Grund empfiehlt das Projektteam die druckbasierte Schädigung in einem ersten Schritt nur über die Fallhöhe abzuschätzen. Für grosse Flusskraftwerke mit hohen Fallhöhen, bei welchen das Ausmass der druckbasierten Schädigung einen Einfluss auf das weitere Vorgehen bezüglich der Sanierung des Fischabstiegs hat, kann die druckbasierte Schädigung in einem nächsten Schritt mit standortspezifischen Untersuchungen genauer quantifiziert werden.

## 5.5 Angaben Wehr

Für die Abschätzung der Überlebenswahrscheinlichkeiten bzw. des Verletzungsrisikos bei der Wehrpassage werden die folgenden Parameter benötigt:

- Art der Wehranlage (unter- oder überströmt oder beides möglich?)
- Fallhöhe
- Wassertiefe im Tosbecken an Position des Aufpralls des Überfallstrahls
- Tosbeckenvolumen
- Störkörper vorhanden? (falls ja, Anordnung relevant)
- Wehrregime

Mit der Fallhöhe können die Aufprallgeschwindigkeiten berechnet und somit das Verletzungsrisiko bei überströmten Wehranlagen abgeschätzt werden. Bei unterströmten Schützen wirkt sich die Fallhöhe auf die Fliessgeschwindigkeiten und somit die entstehenden Scherkräfte aus. Die Wassertiefe im Tosbecken wird zur Beurteilung des Verletzungsrisikos bei einem Aufprall auf das Unterwasser oder auf bauliche Strukturen im Unterwasser benötigt. Mit Informationen zu Störkörpern kann das entsprechende Kollisionsrisiko beurteilt werden, während das Tosbeckenvolumen für die Beurteilung des Verletzungsrisikos durch Scherkräfte und Turbulenzen benötigt wird.

und das Wehrregime u.a. für die Ermittlung der massgebenden Lastfälle. Entsprechende Gleichungen und Richtwerte zur Beurteilung des Verletzungsrisikos bei der Wehrpassage können der Fachliteratur wie beispielsweise Ebel (2024) [4] entnommen werden.

Zu beachten ist, dass einige dieser Parameter variabel sind, d.h. dass diese von den entsprechenden Abflussbedingungen und gegebenenfalls auch anderen Faktoren wie dem Betriebsregime abhängen. Daher müssen die kritischen und massgebenden Abflusszustände identifiziert werden und die variablen Parameter für diese Abflusszustände erfasst werden. Für diese Beurteilung werden entsprechende Pläne des Wehrs benötigt. Für die Gesamtbeurteilung des Verletzungsrisiko bei der Wehrpassage ist es auch entscheidend, wie häufig ein Abflusszustand vorkommt. Falls ein kritischer Abflusszustand vermehrt zu einer bestimmten Jahreszeit vorkommt, sollte auch diese Information in die Beurteilung des Fischabstiegs einfließen. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die Hauptwanderzeiträume der Zielfischarten ausgeprägt sind.

## **6. Vorübergehende betriebliche Massnahmen**

### **6.1 Zielsetzung und Vorgehen**

Das Ziel dieses Kapitels ist es, möglichst alle kraftwerksspezifischen Parameter aufzulisten, welche für die Beurteilung von betrieblichen Massnahmen nötig sind. Mit betrieblichen Massnahmen sind die im Synthesebericht [3] beschriebene Erhöhung des Wehrabflusses bei hoher Abstiegsaktivität und die Reduktion des Teillastbetriebs, falls betrieblich möglich, gemeint. Da die Beurteilung üblicherweise anhand des Nutzen-Kosten-Verhältnisses erfolgt, werden alle Parameter benötigt, welche den Nutzen oder die Kosten beeinflussen. Kapitel 6.2 gibt einen kurzen Überblick über den Wissensstand zu den Hauptabwanderungszeiträumen, da es sich hierbei um wichtige Grundlagen für die Beurteilung von vorübergehenden betrieblichen Massnahmen handelt. Kapitel 6.3 gibt einen Überblick über die relevanten Parameter, während in Kapitel 6.4 auf die biologischen Limitationen und in Kapitel 6.5 auf die Machbarkeit und die Kosten eingegangen wird.

### **6.2 Wissensstand zu den Hauptabwanderungszeiträumen**

Es gibt viele Veröffentlichungen, welchen gewisse Erkenntnisse zu den Hauptabwanderungszeiträumen verschiedener Fischarten entnommen werden können. Der Grossteil dieser Untersuchungen fokussiert sich jedoch auf diadrome Fischarten, während für die Planung von Fischabstiegsanlagen in der Schweiz insbesondere auch das Verhalten potamodromer Arten wichtig ist. Die meisten Untersuchungen zum Abstiegsverhalten potamodromer Arten umfassen jedoch nicht alle Abstiegskorridore, sind zeitlich sehr begrenzt oder fokussieren sich auf wenige Fischarten oder wenige Individuen (z.B. aktive Telemetriestudien). Belastbare Untersuchungen, während welcher der natürliche Fischabstieg potamodromer Arten über einen längeren Zeitraum lückenlos erfasst wurde, sind dem Projektteam nicht bekannt. Ebel (2024) [4] analysierte veröffentlichte Untersuchungen zum Fischabstieg und grenzte so die Hauptabwanderungszeiträume ausgewählter Fischarten ein (Abb. 6.1).

**Tafel 2: Hauptabwanderungszeiträume ausgewählter Arten sowie Körperlängen abwandernder Individuen (idealisiert, Erläuterungen vgl. Text)**

Art / Artengruppe	Entwicklungsstadium	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Aal ( <i>Anguilla anguilla</i> )	4 (Gelbaale)				20 – 70 cm								
	5 (Blankaale)						30 – 45 cm (Männchen) bzw. 50 – 90 cm (Weibchen)						
Atlantischer Lachs ( <i>Salmo salar</i> )	4 (Smolts)			10 – 20 cm									
	5 (Kelts)		50 – 100 cm										
Europäischer Stör ( <i>Acipenser sturio</i> )	3 + 4		?	Mehrsömmrige (<60 cm)				?	Einsömmrige (<20 cm) + Mehrsömmrige (<60 cm)				?
	5				100 – 350 cm (maximal 600 cm)					?			
Finte ( <i>Alosa fallax</i> )	1 + 2 + 3 + 4					≤ 12 cm							
	5				20 – 50 cm								
Flussneunauge ( <i>Lampetra fluviatilis</i> )	4 (Macrophth.)		9 – 15 cm									9 – 15 cm	
Maifisch ( <i>Alosa alosa</i> )	1 + 2 + 3 + 4					≤ 12 cm							
	5				30 – 70 cm								
Meerneunauge ( <i>Petromyzon marinus</i> )	4 (Macrophth.)		11 – 18 cm									11 – 18 cm	
potamodrome Arten (Frühjahrs- und Sommerlaicher)	1 + 2 + 3				≤ 3 cm								
	4			3 – 60 cm (maximal 80 cm)									
	5			4 – 160 cm (maximal 250 cm)									

1	Eier / Embryonen
2	Dottersackbrütlinge / Eleutheroembryonen
3	Larven
4	Juvenile
5	Adulte / Subadulte

	keine Präsenz im Süßwasser oder geringe Wander- bzw. Driftaktivität
	potamodrome Wanderung bzw. Drift mit unterschiedlicher Motivation
	diadrome Wanderung bzw. Drift zum Nahrungsgebiet
	diadrome Wanderung bzw. Drift zum Laichgebiet
?	Begrenzung des Abwanderungszeitraums ungeklärt

**Abb. 6.1 Hauptabwanderungszeiträume ausgewählter Fischarten gemäss Ebel (2024) [4].**

Aus Abb. 6.1 wird ersichtlich, dass die Hauptwanderungszeiträume zwar eingeschränkt werden können, insbesondere für potamodrome Arten muss gemäss Abb. 6.1 aber fast ganzjährig mit Abstiegen gerechnet werden. Die bisher in diesem Kapitel beschriebenen Erfahrungen beziehen sich auf internationale Untersuchungen. In der Schweiz wurden bisher noch kaum Studien zum Abwanderungsverhalten potamodromer Arten durchgeführt bzw. veröffentlicht. Bei den Wirkungskontrollen der Horizontalrechen beim Kleinwasserkraftwerk Stropfel an der Limmat [15] und beim Dotierkraftwerk Rüchlig an der Aare [16] wurde festgestellt, dass vor allem im Herbst viele juvenile Cypriniden absteigen. Diese Erkenntnisse basieren auf stichprobenartigen Hamenuntersuchungen an den Bypassausläufen der Fischabstiegsanlagen. Daher kann basierend auf diesen Untersuchungen nicht ausgeschlossen werden, dass es noch andere Zeiträume gibt, während welcher viele juvenile Cypriniden absteigen.

Bezüglich des Abstiegsverhaltens adulter potamodromer Arten konnten mit der akustischen Telemetriestudie beim KWWB [6] und der Radiotelemetriestudie beim WKW BAN [14] interessante Erkenntnisse gewonnen werden. Die Datenanalyse lieferte zwar gewisse Trends, jedoch keine klaren Korrelationen zwischen dem Abstiegsverhalten adulter potamodromer Fischarten und abiotischer Faktoren. Es konnten auch keine Zeiträume identifiziert werden, während welchen besonders viele Fische natürlicherweise abgestiegen sind. Es wurden praktisch während des ganzen Jahres zumindest vereinzelte Abstiege markierter Fische beobachtet.

Im Jahr 2024 startete die EAWAG das Forschungsprojekt «Klimawandel und Fischbewegungsmuster», bei welchem das grossräumige Wanderverhalten potamodromer Fischarten mittels akustischer Telemetrie untersucht wird. Zudem wird 2024 ein von Axpo beim Kleinwasserkraftwerk Stropfel durchgeführtes Pilotprojekt mit einem *Live Imaging Sonar* abgeschlossen, mit welchem das Fischaufkommen vor dem Kraftwerk während eines gesamten Jahres beobachtet wurde. Diese beiden Untersuchungen liefern voraussichtlich weitere interessante Erkenntnisse zum Fischabstiegsverhalten potamodromer Fischarten in der Schweiz. Aufgrund der Komplexität der Thematik sollte jedoch nicht erwartet werden, dass mit diesen beiden Untersuchungen der Grossteil der offenen Fragen zum Fischabstiegsverhalten geklärt werden kann und dass kurze ausgeprägte und verallgemeinerbare Hauptabwanderungszeiträume ermittelt werden können.

### **6.3 Parameter**

Für die Beurteilung von betrieblichen Massnahmen benötigte Parameter können in allgemeine Kraftwerksparameter, Angaben zu den Turbinen und zum Wehr, Angaben zum aktuellen Betriebsregime und in Angaben zu den fischbiologischen Auswirkungen unterteilt werden. Auf die einzelnen Parameter wird nachfolgend genauer eingegangen.

#### **Allgemeine Kraftwerksparameter**

Von den in Kapiteln 5.2 aufgeführten allgemeinen Kraftwerksparametern sind für die Beurteilung vorübergehender betrieblicher Massnahmen insbesondere die Leistung, die Jahresproduktion und die Kraftwerksanordnung relevant. Die Leistung und die Jahresproduktion werden zur Abschätzung der Erlöseinbussen durch Wasserverluste benötigt und die Kraftwerksanordnung für die Beurteilung etwaiger negativer fischbiologischer Auswirkungen von betrieblichen Massnahmen, wie beispielsweise künstliche Hochwasserereignisse in der Restwasserstrecke.

### **Angaben zu den Turbinen und zum Wehr**

Um den Nutzen einer temporären Abflusserhöhung über das Wehr quantifizieren zu können, müssen die Überlebenswahrscheinlichkeiten von über die Turbinen und das Wehr absteigenden Fischen ermittelt werden. Dafür werden die in den Kapiteln 5.3–5.5 aufgeführten Parameter benötigt.

### **Angaben zum aktuellen Betriebsregime**

Angaben zum aktuellen Betriebsregime sind wichtig, um das Potenzial der Reduktion des Teillastbetriebs ermitteln zu können. Hierbei stehen die folgenden Fragen im Vordergrund:

- Gibt es Phasen, während welcher mehrere Turbinen gleichzeitig mit Teillast betrieben werden, obwohl es möglich wäre, die gleiche Wassermenge mit einer geringeren Anzahl von Turbinen zu verarbeiten?
- Beschränken sich diese Phasen auf gewisse Zeiträume (z.B. nur Wochenenden)?
- Könnten diese Phasen reduziert werden? Falls ja, welche Auswirkung hätte dies (Personalkosten, Wirkungsgrad, Strommarktprodukte)?

## **6.4 Biologische Limitationen**

In diesem Kapitel wird auf die biologischen Limitationen der beiden erwähnten betrieblichen Massnahmen eingegangen.

### **6.4.1 Massnahme 1: Erhöhung des Wehrabflusses bei hoher Abstiegsaktivität**

Mittels der Angaben zu den Turbinen und zum Wehr kann die theoretische Differenz der Überlebenswahrscheinlichkeit zwischen einer Wehr- und Turbinenpassage ermittelt werden. Zur Quantifizierung des Verbesserungspotenzials einer temporären Abflusserhöhung müssen zudem die Anzahl und Grösse der Fische abgeschätzt werden, welche durch die Massnahme über das Wehr anstatt über die Turbinen absteigen. Dass die Ermittlung dieses Verbesserungspotenzials in der Praxis nahezu unmöglich ist, zeigen die im Rahmen des VAR-Pilotprojekts beim WKW BAN durchgeführten Sensorfisch-Versuche [18]. In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit sowohl von über die Turbinen als auch von über das Wehr des WKW BAN absteigenden Fischen grösser als 90% ist. Eine genauere Quantifizierung der Überlebensraten war methodisch bedingt und aufgrund von fehlenden Grundlagen nicht möglich. Somit konnte trotz dieser umfangreichen Untersuchungen nicht quantifiziert werden, ob bzw. wie viel höher die Überlebenswahrscheinlichkeit beim WKW BAN ist, wenn ein Fisch statt über die Turbine über das Wehr absteigt. Auch mit der beim WKW BAN durchgeführten Radiotelemetriestudie [14] konnte dieses Verbesserungspotenzial nicht ermitteln werden. Dies liegt einerseits an der geringen Anzahl an über das Wehr abgestiegenen Fischen und andererseits daran, dass es methodisch bedingt sehr schwierig ist, mit Sicherheit nachzuweisen, dass ein Fisch den Abstieg über einen Korridor nicht überlebt hat.

Um das fischbiologische Potenzial einer temporären Erhöhung des Wehrabflusses abschätzen zu können, müssen u.a. auch die Zielfischarten definiert werden. Es ist insbesondere wichtig zu wissen, ob die Massnahme auf den Schutz potamodromer oder diadromer Arten abzielt. Zudem müssen die Hauptabwanderungszeiträume der Zielfischarten möglichst genau eingegrenzt werden können, was gemäss den Ausführungen in Kapitel 6.2 insbesondere für potamodrome Arten sehr schwierig ist. Eine der grössten Herausforderungen ist, dass der Fischabstieg in der Schweiz für ein möglichst breites Arten- und Grössenspektrum sichergestellt werden soll. Gemäss den Ausführungen in Kapitel 6.2 wäre es zwar gegebenenfalls möglich mit relativ kurzen betrieblichen Einschränkungen viele juvenile Cypriniden vor der Turbinenpassage zu

schützen, wie gross der Anteil dieser Fische an der Gesamtpopulation ist und wie viele grössere Fische mit einer solchen Massnahme geschützt werden könnten, kann hingegen aktuell nicht gesagt werden. Diese Limitationen erklären, warum die temporäre Erhöhung des Wehrabflusses gemäss dem Kenntnisstand des Projektteams international nur für die Verbesserung des Abstiegs diadromer Arten und nicht für potamodrome Arten eingesetzt wird.

Bei den fischbiologischen Auswirkungen muss auch berücksichtigt werden, dass die Erhöhung des Wehrabflusses insbesondere bei Kraftwerken mit einer Restwasserstrecke auch negative biologische Auswirkungen haben kann. Dazu gehört je nach Jahreszeit das Ausschwemmen von Laichgruben, die ungewollte Drift von Jungfischen und im schlimmsten Fall ein Stranden von Fischen. Aus diesem Grund wird, wie im Synthesebericht [3] beschrieben, davon ausgegangen, dass die temporäre Erhöhung des Wehrabflusses im Schweizer Mittelland nur bei Kraftwerken ohne Restwasserstrecke biologisch sinnvoll ist.

Bei der Beurteilung der temporären Erhöhung des Wehrabflusses muss auch berücksichtigt werden, dass diese in gewissen Fällen zu einer Erhöhung des Teillastbetriebs führen kann, was wiederum das kollisionsbedingte Verletzungsrisiko bei der Turbinenpassage erhöht.

Das Nutzen-Kosten-Verhältnis der temporären Erhöhung des Wehrabflusses ist zudem stark davon abhängig, ob konzentrierte Abwanderungsspeaks der Zielfischarten stattfinden und ob diese konzentrierten Abwanderungsspeaks prognostiziert oder in Echtzeit ermittelt werden können. Das Projektteam geht nicht davon aus, dass in naher Zukunft eine zuverlässige Prognose des Abstiegsverhaltens für ein breites, potamodromes Artenspektrum möglich ist. Deutlich einfacher ist dies für diadrome Arten, obwohl auch die Prognose für diadrome Arten mit gewissen Unsicherheiten behaftet sind. Für potamodrome Arten ist es eher realistisch, dass das Aufkommen absteigender Fische in Echtzeit mit *Live Imaging Sonaren* erfasst bzw. abgeschätzt werden kann. Inwiefern dies möglich ist und welchen Einschränkungen eine solche Echtzeit-Erfassung des Fischaufkommens unterliegt, werden die Pilotprojekte beim Kleinwasserkraftwerk Stropfel und Kraftwerk Lavey zeigen.

#### 6.4.2 Massnahme 2: Reduktion Teillastbetrieb, falls betrieblich möglich

Die grösste biologische Limitation der Reduktion des Teillastbetriebs, falls betrieblich möglich, ist, dass das Verbesserungspotenzial bei den allermeisten Kraftwerken voraussichtlich relativ gering ist. Bisher sind diesbezüglich kaum Informationen vorhanden. Im Synthesebericht [3] wurde jedoch gezeigt, dass das theoretische Verbesserungspotenzial beim KWWB wenige Prozent beträgt. Das effektiv realisierbare Potenzial, welches aufgrund diverser Randbedingungen voraussichtlich noch deutlich geringer ist, wurde hingegen noch nicht abgeschätzt. Eine weitere Limitation dieser Massnahme ist, dass der effektive Nutzen kaum quantifiziert werden kann. Als Beispiel hierfür wird auf die Studie von Schwevers et al. (2011) [19] verwiesen, in welcher im Feld versucht wurde, den Einfluss des Betriebszustands einer Turbine auf die Überlebenswahrscheinlichkeit von absteigenden Aalen zu quantifizieren. Es konnte jedoch nur eine schwache Korrelation zwischen dem Anstellwinkel und der Überlebenswahrscheinlichkeit ermittelt werden. Somit muss davon ausgegangen werden, dass das Verbesserungspotenzial dieser Massnahme nicht quantitativ gemessen, sondern nur mit theoretischen Modellen abgeschätzt werden kann. Diese theoretische Abschätzung ist jedoch nur für die kollisionsbedingte Schädigung möglich, während eine Abschätzung für andere Schädigungsmechanismen nur mit sehr grossem Aufwand und hohen Unsicherheiten möglich ist.

## 6.5 Machbarkeit und Kosten

### 6.5.1 Allgemeines

Das BAFU hat gewünscht, Vorschläge zu machen, wie betrieblichen Massnahmen zur Verbesserung des Fischabstiegs aussehen könnten. Zudem sollen die Kosten und die Machbarkeit abgeschätzt werden. Für eine Beschreibung der Massnahmen wird zugunsten des Syntheseberichts [3] verzichtet. Um fundierte und konkrete Empfehlungen bezüglich der Dauer der Massnahme und der abzugebenden Wassermenge geben zu können, fehlen aktuell insbesondere Grundlagen zum Nutzen der Massnahme. Wie die Reduktion des Teillastbetriebs, falls betrieblich möglich, aussehen könnte, wurde im Synthesebericht anhand des Beispiels KWWB beschrieben.

### 6.5.2 Machbarkeit

Bezüglich der Machbarkeit kann gesagt werden, dass die Reduktion des Turbinendurchflusses und die Erhöhung des Wehrabflusses bei allen Kraftwerken technisch möglich ist. Aus biologischer Sicht ist diese Massnahme gemäss den Ausführungen in Kapitel 6.4.1 jedoch nicht in allen Fällen sinnvoll. Auch bei der Reduktion des Teillastbetriebs ist nicht die technische Machbarkeit limitierend, sondern vielmehr das vorhandene Optimierungspotenzial und gegebenenfalls die Entschädigung betrieblicher Mehraufwände oder betrieblicher Einschränkungen.

Bei der Machbarkeit betrieblicher Massnahmen müssen auch die Folgen für die heimische Energieversorgung, Netzstabilität und Energiepolitik berücksichtigt werden, insbesondere falls der Betrieb mehrerer grosser Flusskraftwerke gleichzeitig reduziert werden sollte. Falls diese Reduktion kurzfristig, d.h. beispielsweise basierend auf Echtzeit-Beobachtungen mit einem *Live Imaging* Sonar erfolgen sollen, muss zudem berücksichtigt werden, dass der Strom spätestens im Day-Ahead Markt nach Produktionserwartung im Voraus verkauft wurde. Durch Abweichung von der Produktionserwartung fällt Ausgleichsenergie an. Die Ausgleichsenergie kostet i.d.R. ein Vielfaches des Spotpreises und unterliegt starken Schwankungen, welche auf die Unausgeglichenheit des Schweizer Stromnetzes zurückzuführen ist.

### 6.5.3 Kosten

Bezüglich der Kosten kann gesagt werden, dass betriebliche Massnahmen in der Regel keine oder nur geringfügige bauliche Anpassungen voraussetzen. Der Grossteil der Kosten für die Erhöhung des Wehrabflusses resultiert aus den Erlöseinbussen. Diese wurden in der Vergangenheit schon mehrmals geschätzt, beispielsweise im Schreiben des VAR zuhanden des BAFU vom 22. Februar 2021. In diesem Schreiben wurde für Überlegungen zum Aalschutz davon ausgegangen, dass zwischen Oktober und Dezember während 10 Tagen pro Monat alle Kraftwerke an der Aare und dem Rhein, sowie die grossen Kraftwerke an der Limmat (Wettingen und Kappelerhof) und der Reuss (Bremgarten-Zufikon) ausser Betrieb genommen werden bzw. nur noch mit Halblast betrieben werden. Bei einem Strompreis von 50 CHF/MWh wurde damals über 40 Jahre aufsummiert mit Erlöseinbussen von CHF 512.1 Mio. für das Szenario im Halblastbetrieb und mit CHF 1'024.3 Mio. für das Szenario der vollständigen Ausserbetriebnahme gerechnet. Höhere Strompreise führen zu entsprechend höheren Kosten. Bei der Interpretation dieser Zahlen muss berücksichtigt werden, dass bei dieser Berechnung davon ausgegangen wurde, dass die betrieblichen Massnahmen nur im Herbst und speziell für den Aal umgesetzt werden. Alle anderen Fischarten würden bei diesem Szenario voraussichtlich nur marginal von der betrieblichen Massnahme profitieren.

#### 6.5.4 Vergleich bauliche vs. betriebliche Massnahmen

Im Rahmen der vorliegenden Studie hat das BAFU gefragt, wie viele Tage Nutzungseinschränkung durch betriebliche Massnahmen noch günstiger sind als bauliche Massnahmen. Diese Frage kann nicht allgemein beantwortet werden, da für eine fundierte Aussage wichtige Grundlagen fehlen. Beispielsweise ist – wie in Kapitel 6.4.1 beschrieben – nicht bekannt, wie viele Fische eine künstliche Erhöhung des Wehrabflusses effektiv für den Fischabstieg nutzen. Nachfolgend wird jedoch mit einem vereinfachten Berechnungsbeispiel aufgezeigt, wie ein solcher Vergleich durchgeführt werden kann. Aufgrund der grossen Unsicherheiten bei den getroffenen Annahmen und da viele Phänomene wie variable Strompreise und die variable Kraftwerksproduktion bei dieser Berechnung nicht berücksichtigt wurden, sind die Unsicherheiten dieser Abschätzung sehr gross. Nicht berücksichtigt wurden bei dieser Abschätzung ausserdem die in Kapitel 6.5.2 erwähnten Einschränkungen zur Machbarkeit.

##### **Annahmen und Grundlagen**

- Jahresproduktion KWWB: 290 GWh
- Bauliche Massnahme: Leitrechen-Bypass-System mit *Bar Rack* beim KWWB
- Kosten bauliche Massnahme über 40 Jahre: CHF 77'000'000 inkl. MWST
- Strompreis: 100 CHF/MWh
- Nutzungseinschränkung: Reduktion des Betriebs um 50%

Mit den getroffenen Annahmen, d.h. wenn der Betrieb des KWWB um 50% reduziert wird, resultieren für das KWWB tägliche Erlöseinbussen von ca. CHF 40'000. Mit diesen Annahmen wäre die genannte Nutzungseinschränkung beim KWWB theoretisch günstiger als die bauliche Massnahme, wenn die Nutzungseinschränkung an weniger als 1'925 Tagen bzw. ca. 5 Jahren umgesetzt werden würde. Anders ausgedrückt wären die betrieblichen Massnahmen unter den getroffenen Annahmen über 40 Jahre gleich teuer wie die bauliche Massnahme, wenn die Kraftwerksproduktion über 40 Jahre jeden 8. Tag um 50% reduziert werden würde. Diese Abschätzung wurde für das KWWB gemacht, da für das KWWB eine belastbare Kostenschätzung für die bauliche Massnahme vorliegt. Einschränkend muss erwähnt werden, dass sich die Erhöhung des Wehrabflusses beim KWWB aufgrund der Bauweise als Ausleitkraftwerk mit Restwasserstrecke gemäss den Ausführungen in Kapitel 3.18 und 6.4.1 nicht als Fischabstiegsmassnahme eignet. Ausserdem ist – wie in Kapitel 6.4.1 beschrieben – völlig unklar, ob mit einer solchen Massnahme die wesentliche Beeinträchtigung eines Kraftwerks auf den Fischabstieg behoben werden kann.

#### **6.6 Empfehlung zum weiteren Vorgehen bezüglich betrieblicher Massnahmen**

Aufgrund der Ausführungen in den Kapiteln 6.4 und 6.5, d.h. insbesondere aufgrund der unklaren biologischen Wirkung, den voraussichtlich sehr hohen Kosten und den negativen energiepolitischen Auswirkungen, empfiehlt das Projektteam die temporäre Erhöhung des Wehrabflusses als Fischabstiegsmassnahme nicht weiterzuverfolgen. Eine Reduktion des Teillastbetriebs, falls betrieblich möglich, empfiehlt das Projektteam aufgrund des voraussichtlich geringen biologischen Verbesserungspotenzials nicht.

Sollte die Erhöhung des Wehrabflusses dennoch als betriebliche Massnahme weiterverfolgt werden, empfiehlt das Projektteam, dass sich die Behörden zur Verhältnismässigkeit der bereits vorliegenden Kostenschätzungen äussern oder festlegen, wie viel betriebliche Massnahmen kosten dürfen, damit diese als verhältnismässig erachtet werden. Dann könnte in einem nächsten Schritt versucht werden, das ökologische Verbesserungspotenzial abzuschätzen, welches mit diesen Kosten erreicht werden

kann. Dies würde einen Vergleich des Nutzen-Kosten-Verhältnis mit anderen Sanierungsmassnahmen erlauben. Berücksichtigt werden muss bei einem solchen Vergleich, dass die Quantifizierung des ökologischen Verbesserungspotenzials selbst mit umfangreichen biologischen Verhaltensstudien schwierig und entsprechend mit grossen Unsicherheiten behaftet ist.

Die Weiterverfolgung der Reduktion des Teillastbetriebs, falls betrieblich möglich, wird aufgrund des voraussichtlich geringen Verbesserungspotenzials nicht empfohlen. Sollte diese Massnahme dennoch weiterverfolgt werden, wird gemäss den Ausführungen in Kapitel 3.19.1 in einem ersten Schritt eine Literaturrecherche zu Überlebenswahrscheinlichkeiten im Teillastbetrieb empfohlen.

## 7. Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen

Das Projektteam schätzt Leitrechen-Bypass-Systeme mit *Bar Racks*, den *BioAcoustic Fish Fence* (BAFF-System), partielle Leitrechen und die *Restoration Hydro Turbine* (RHT) bezüglich des Nutzen-Kosten-Verhältnisses mit aktuellem Kenntnisstand als die vielversprechendsten Fischabstiegsmassnahmen für grosse Schweizer Flusskraftwerke ein. Es wird empfohlen, diese vier Massnahmen in konkreten Projekten zu untersuchen. Für sieben weitere Massnahmen werden weitere Abklärungen benötigt, bevor das Projektteam die Planung eines konkreten Projekts empfiehlt. Weitere neun Massnahmen werden aus diversen Gründen nicht zur Weiterverfolgung empfohlen. Bei einem zeitnahen Start und positiven Verlauf von Pilotprojekten, könnten die Resultate von temporären Pilotprojekten frühestens ca. 2030 und von permanent installierten Anlagen ca. 2035 vorliegen.

Insbesondere aufgrund der schwierigen Übertragbarkeit empfiehlt das Projektteam aktuell keine weiteren Telemetriestudien im Ist-Zustand mit dem Hauptziel durchzuführen, verallgemeinerbare und für die Planung von Fischabstiegsanlagen praxisrelevante Erkenntnisse zum Abstiegsverhalten potamodromer Arten zu erhalten. Stattdessen wird empfohlen, diese Ressourcen in die Realisierung von Pilotprojekten von Fischabstiegsmassnahmen mit umfassenden Wirkungskontrollen zu investieren. Es wird jedoch nicht von Telemetriestudien im Ist-Zustand abgeraten, falls der Fokus dieser Projekte auf der Beantwortung standortspezifischer Fragestellungen liegt.

Im Rahmen dieses Projekts wurden auch Parameter aufgelistet, welche für die Beurteilung von betrieblichen Massnahmen benötigt werden. Insbesondere aufgrund der unklaren biologischen Wirkung, den voraussichtlich sehr hohen Kosten und den negativen energiepolitischen Auswirkungen, empfiehlt das Projektteam jedoch nicht die temporäre Erhöhung des Wehrabflusses als betriebliche Fischabstiegsmassnahme weiterzuverfolgen. Die Reduktion des Teillastbetriebs, falls betrieblich möglich, wird aufgrund des geringen biologischen Verbesserungspotenzials nicht zur Weiterverfolgung empfohlen.

In vorliegendem Bericht wurden im Auftrag des BAFU fehlende fachliche Grundlagen zusammengestellt, welche für die Ausarbeitung einer Strategie zum Vorgehen bezüglich des Fischabstiegs bei grossen Schweizer Flusskraftwerken benötigt werden. Basierend auf diesem Bericht und weiteren Grundlagen möchte das BAFU in Zusammenarbeit mit einer Projektgruppe eine solche Strategie ausarbeiten.

## Literaturverzeichnis

- [1] Kriewitz-Byun, C.R. (2015). Leitrechen an Fischabstiegsanlagen: Hydraulik und fischbiologische Effizienz. VAW-Mitteilung 230 (R. Boes, Hrsg.), VAW, ETH Zürich.
- [2] Kriewitz-Byun, C.R., Albayrak, I., Flügel, D., Bös, T., Peter, A. und Boes, R. (2015). Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken. Wasser, Energie, Luft (WEL), 107. Jahrgang, Heft 1.
- [3] Axpo und BKW (2024). Kraftwerke Wildegg-Brugg und Bannwil. Synthesebericht der Fischabstiegs-Pilotprojekte des Verbands Aare-Rheinkraftwerke (VAR). H 18597.
- [4] Ebel, G. (2024). Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung, Qualitätssicherung, Praxisbeispiele. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, 4. Auflage.
- [5] Meusbürger, H. (2002). Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken, VAW-Mitteilung 179 (H.-E. Minor, Hrsg.), VAW, ETH Zürich.
- [6] Axpo und FishConsulting (2024). Kraftwerk Wildegg-Brugg – Sanierung Geschiebehalt und Wiederherstellung Fischwanderung. Teilprojekt F: Fischabstieg am Maschinenhaus. Verhaltensbiologische Untersuchungen mittels akustischer Telemetrie. H 18596.
- [7] Axpo (2024). Kraftwerk Wildegg-Brugg – Sanierung Geschiebehalt und Wiederherstellung Fischwanderung. Teilprojekt F: Fischabstieg am Maschinenhaus. Technisches Vorprojekt. H 17748.
- [8] BKW (2024). Sanierung Fischgängigkeit, Fischabstieg. 1017 WKW Bannwil. Technisches Vorprojekt eines vertikalen Fischleitrechens vom Typ Bar-Rack.
- [9] Natel Energy Holdings (2023). 0265A - HPP Eglisau RHT Retrofit Feasibility Study. Technischer Bericht.
- [10] Axpo (2024). Kraftwerk Eglisau der Kraftwerk Eglisau-Glattfelden AG – Machbarkeitsstudie einer Restoration Hydro Turbine als Fischabstiegsmassnahme. H 18693.
- [11] Geiger, F., Cuchet, M. und Rutschmann, P. (2020). Zur Verringerung von Fischschäden in Turbinen mittels Verhaltensbeeinflussung. Wasserwirtschaft 12.
- [12] Beck, C. (2020). Fish protection and fish guidance at water intakes using innovative curved-bar rack bypass systems. VAW-Mitteilung 257 (R. Boes, Hrsg.), VAW, ETH Zürich.
- [13] Beck, C., Albayrak, I., Meister, J., Leuch, C., Vetsch, D., Peter, A. und Boes, R. (2021). Curved-Bar-Rack-Bypass-Systeme für den Fischschutz an Wasserkraftanlagen und Wasserfassungen. Wasserwirtschaft 9–10.
- [14] Peter, A., Schölzel, N. und Wilmsmeier, L. (2023). Radiotelemetrische Untersuchungen zum Fischabstieg am Kraftwerk Bannwil. Studie im Auftrag der BKW Energie AG. 110 Seiten.
- [15] Axpo und Aquarius (2018). Kleinwasserkraftwerk Stroppel (Axpo Kleinwasserkraft AG) – Wirkungskontrolle Fischabstieg am Horizontalrechen mit Bypass.

- [16] Axpo und WFN (2020). Kraftwerk Rüchlig AG – Fischabstieg Dotierkraftwerk: Wirkungskontrolle Fischabstieg am Horizontalrechen mit Bypass.
- [17] Axpo (2023). Kleinwasserkraftwerk Stroppele der Axpo Kleinwasserkraft AG. Pilotprojekt zur Echtzeitsteuerung von Bypässen – Phase 1: Experimentierphase.
- [18] Tuhtan, J.A. und Toming, G. (2023). Sensormessungen der Wehrpassage in Über- und Unterströmung sowie der Turbinenpassage am Wasserkraftwerk Bannwil, September 2021, Universität Tallinn.
- [19] Schwevers, U., Adam, B. und Engler, O. (2011). Befunde zur Aalabwanderung 2008/09 – Erarbeitung und Praxiserprobung eines Maßnahmenplans zur ökologisch verträglichen Wasserkraftnutzung an der Mittelweser. Technischer Bericht 75, Institut für angewandte Ökologie.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Möglicher Terminplan für das RHT-Pilotprojekt beim Kraftwerk Eglisau [10].	30
Abb. 3.2	Grobterminplan für die Durchführung von temporären Testversuchen mit partiellen Leitrechen beim Kraftwerk Wildeg-Brugg.	30
Abb. 5.1	Wahrscheinlichkeit der Nutzung der bestehenden Abstiegskorridore beim Kleinwasserkraftwerk Windisch unter der Annahme, dass sich Fische beim Abstieg proportional zum Abfluss aufteilen (Datengrundlage: BAFU Messstelle Reuss-Mellingen 1935–2018).	39
Abb. 5.2	Dauerlinien der prozentualen Abflussanteile der für den Fischabstieg relevanten Korridore beim Kraftwerk Eglisau: Maschinenhaus, Stauwehr, FAH inkl. Schiffsschleuse.	39
Abb. 6.1	Hauptabwanderungszeiträume ausgewählter Fischarten gemäss Ebel (2024) [4].	42

## Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Überblick über die im Synthesebericht [3] beschriebenen Fischabstiegsmassnahmen; * i.d.R. wird für den sicheren Fischabstieg zusätzlich zur Leitvorrichtung ein Bypass benötigt.	8
Tab. 3.2	Zusammenfassung der Empfehlungen zum weiteren Vorgehen diverser Fischabstiegsmassnahmen; <b>rot</b> : nicht weiterverfolgen, <b>orange</b> : aktuell kein konkretes Projekt empfohlen, da weitere Abklärungen nötig sind; <b>grün</b> : Massnahme soll in einem konkreten Projekt weiterverfolgt werden.	24
Tab. 3.3	Bewertung der empfohlenen Fischabstiegsmassnahmen aus fischbiologischer Sicht; <b>3</b> gute Funktionstüchtigkeit erwartet, <b>2</b> mittlere Funktionstüchtigkeit erwartet oder kaum Informationen vorhanden, <b>1</b> geringe Funktionstüchtigkeit erwartet.	25
Tab. 3.4	Grobkostenschätzung des temporären Testversuchs und der permanent installierten partiellen Leitrechen beim KWWB. Alle Angaben in CHF exkl. MWST; <sup>1</sup> zwei Rechen und ein Bypass an einem Ufer, <sup>2</sup> jeweils zwei Rechen und ein Bypass am linken und rechten Ufer.	28
Tab. 3.5	Schätzung der Gesamtkosten der Installation einer RH-Turbine bzw. von sieben RH-Turbinen beim KWE; <sup>1</sup> enthält Währungsrisiko CHF/USD; <sup>2</sup> es wird von einem reinen Laufradersatz ausgegangen, der Ersatz weiterer Komponenten (z.B. Lager, Hydraulikaggregat) wurde nicht berücksichtigt; <sup>3</sup> Annahme eines primär konstruktionsbedingten Mehraufwands bei Realisierung 1 Turbine	

und Annahme, dass 7 Turbinen nur umgerüstet werden, wenn sich herausstellt, dass kein konstruktionsbedingter Mehraufwand resultiert; <sup>4</sup> Annahmen Strompreise und Wirkungsgrade gemäss [10]; <sup>5</sup> ohne Berücksichtigung Lizenzgebühren Natel Energy. ....29

Tab. 4.1

Einschätzung, welche verallgemeinerbaren fischbiologischen Erkenntnisse für unterschiedliche Fischabstiegsmassnahmen besonders relevant sind; ■ sehr wichtige Information für die Planung, ■ ggf. wichtige Informationen für die Planung, ■ weniger relevante Informationen für die Planung; <sup>1</sup> bei der Bewertung wurde davon ausgegangen, dass die Barriere über die gesamte Gewässerbreite bzw. Breite der Turbineneinläufe installiert wird; <sup>2</sup> bei der Bewertung wurde davon ausgegangen, dass die Barriere über die gesamte Wassersäule installiert wird.....34