

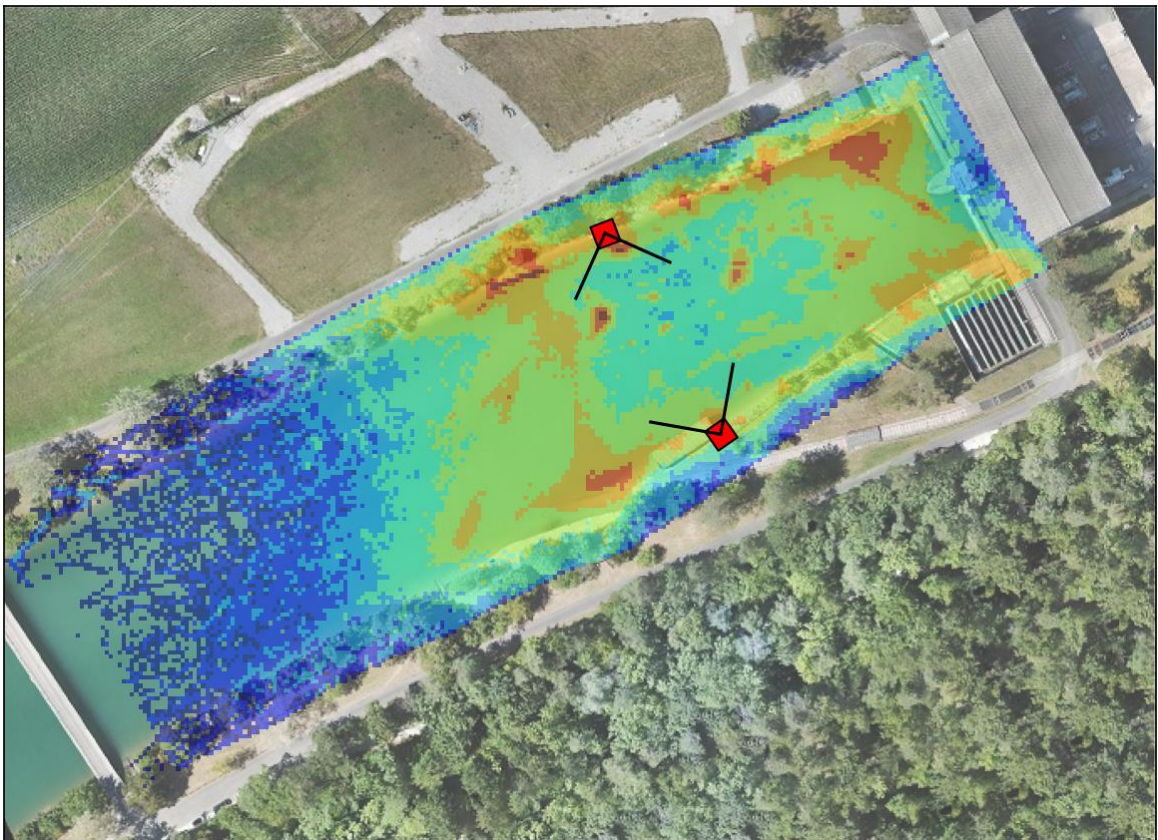
**Bericht**

Axpo Power AG und BKW Energie AG

Kraftwerke Wildegg-Brugg und Bannwil

Fischabstieg am Maschinenhaus

Synthesebericht der Fischabstiegs-Pilotprojekte des Verbands Aare-Rheinwerke (VAR)



Meister Julian Axpo Umwelt  
Sandra Krähenbühl BKW  
Alexander Schumann Axpo Umwelt  
Sabrina Jörg BKW

5. April 2024

Ref.-Nr. H 18597

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung	4
1. Einleitung und Veranlassung	6
2. Grundlagen Kraftwerke	7
2.1 Kraftwerk Wildegg-Brugg	7
2.2 Kraftwerk Bannwil	8
2.3 Wichtigste Erkenntnisse aus durchgeführten Untersuchungen	8
3. Alternativmassnahmen zu Leitreechen-Bypass-Systemen	15
3.1 Überblick verschiedener Massnahmentypen	15
3.2 Bypässe ohne Leitvorrichtung	16
3.3 Erhöhung der Barrierewirkung von konventionellen Einlaufreechen	17
3.4 Partiiell eingetauchte Feinreechen hinter Grobreechen	20
3.5 Luftblasenvorhänge	22
3.6 <i>BioAcoustic Fish Fence</i>	23
3.7 Seilreechen und Elektro-Seilreechen	25
3.8 Partielle Leitreechen	27
3.9 Wirbelbasierte Leitstrukturen: Forschungsprojekt <i>FishPath</i>	30
3.10 Tauchwände	30
3.11 Schädigungsarme Turbinen	31
3.12 IDA-Ansatz	36
3.13 Erhöhung Wehrabfluss bei hoher Abstiegsaktivität	37
3.14 Reduktion Teillastbetrieb	39
3.15 Eignung der Massnahmen an Pilotstandorten	40
4. Standortspezifische Beschreibung vielversprechender Massnahmen	41
4.1 Kraftwerke Wildegg-Brugg und Bannwil	42
4.2 Kraftwerk Wildegg-Brugg	43
4.3 Kraftwerk Bannwil	58
5. Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen	63
Literaturverzeichnis	65
Abbildungsverzeichnis	68

## Zusammenfassung

Das Kraftwerk Wildegg-Brugg (das KWWB) der KWWB Villnachern AG (die KWWB) und das Kraftwerk Bannwil (WKW BAN) der BKW AG sind nach den Bestimmungen des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) und Bundesgesetzes über die Fischerei (BGF) hinsichtlich Fischwanderung (Art. 9 und 10 BGF) sanierungspflichtig. Da es für so grosse Wasserkraftanlagen keinen etablierten Stand der Technik zur Wiederherstellung des sicheren Fischabstiegs gibt, wurde bei diesen beiden Kraftwerken unter der Dachherrschaft des Verbands Aare-Rheinwerke (VAR) ein Pilotprojekt gestartet. Dieses Pilotprojekt umfasst bei beiden Kraftwerken jeweils ein technisches Vorprojekt zu Leitrechen-Bypass-Systemen mit *Bar Racks* und jeweils eine Telemetrieuntersuchung. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden in den Berichten [1], [2], [3] und [4] veröffentlicht. Beim WKW BAN wurden zusätzlich sogenannte Sensorfisch-Versuche durchgeführt, bei welchen die Druckverläufe bei der Turbinen- und Wehrpassage gemessen wurden [5].

Im vorliegenden Synthesebericht werden die wichtigsten Erkenntnisse der genannten Untersuchungen zusammengefasst. Anschliessend werden zusätzlich insgesamt 13 aus der Literatur bekannte alternative Fischabstiegsmassnahmen zu Leitrechen-Bypass-Systemen beschrieben. Die vielversprechendsten Massnahmen für das KWWB und das WKW BAN werden zusätzlich detaillierter und standortspezifisch betrachtet.

Bei der beim KWWB mit akustischer Telemetrie durchgeführten Untersuchung wurde festgestellt, dass viele Fische für den Fischabstieg bei der Kraftwerkspassage zögern und in den Uferbereichen nach einem alternativen Abstiegskorridor suchen. Aufgrund dieser Beobachtung entstand die Idee, die Fische mit ufernahen Leitstrukturen, sogenannten partiellen Leitrechen, welche nicht den gesamten Kanalquerschnitt abdecken, zu einem Bypass zu leiten. Basierend auf den während der Telemetrieuntersuchung aufgezeichneten Schwimmpfaden wurden unterschiedliche Konfigurationen dieser partiellen Leitrechen mit einem Modell untersucht. Gemäss diesem Modell könnten je nach Konfiguration mit möglichst realistischen Annahmen bis zu 95% aller Alet und 87% aller Barben an einer Turbinenpassage gehindert werden (Schutzeffizienz) und bis zu 74% aller Alet und 48% aller Barben zu einem Bypass geleitet werden (Leiteffizienz). Partielle Leitrechen sind voraussichtlich sowohl im Bau als auch im Betrieb günstiger als über die gesamte Kanalbreite installierte Rechen. Somit wird aktuell davon ausgegangen, dass die partiellen Leitrechen das beste Nutzen-Kosten-Verhältnis aller im vorliegenden Bericht beschriebenen Massnahmen zum Fischabstieg aufweisen. Da Erfahrungen bezüglich des Betriebs und der Effizienz mit einem vergleichbaren System fehlen und noch viele Fragen offen sind, empfiehlt das Projektteam in einem nächsten Schritt die Planung eines temporären Testversuchs mit partiellen Leitrechen mit einem dazugehörigen Bypass.

Beim WKW BAN erscheint ein *BioAcoustic Fish Fence* (BAFF-System) mit einem anschliessenden Bypass eine mögliche alternative Fischabstiegsmassnahme zu einem Leitrechen-Bypass-System zu sein. Aufgrund der standortspezifischen Bedingungen beim WKW BAN, wie dem hohen Schwemmholzaufkommen und dem schwankenden Oberwasserpegel, wären bei einem Fischleitrechen im Gegensatz zu einem BAFF-System kostspielige Massnahmen notwendig. Zudem könnte der Bypass bei einem BAFF-System beim WKW BAN im Unterschied zu einem Fischleitrechen voraussichtlich am orografisch rechten Ufer gebaut werden, was u.a. aufgrund der Platzverhältnisse deutlich einfacher ist als am linken Ufer. Aus diesen Gründen wird aktuell von einem relativ hohen Nutzen-Kosten-Verhältnis des BAFF-Systems beim WKW BAN ausgegangen, auch wenn die Quantifizierung des Nutzens aktuell aufgrund fehlender Grundlagen schwierig ist. Da das BAFF-System noch nie bei einer vergleichbaren

Anlage als Fischabstiegsanlage für ein breites Artenspektrum eingesetzt wurde, empfiehlt das Projektteam das BAFF-System an einer kleineren Anlage zu testen, um Erfahrungen bezüglich der Leiteffizienz, des Betriebs und der Anfälligkeit auf Sedimentablagerungen zu sammeln. Ebenfalls könnte der Fischabstieg beim WKW BAN auch durch den Bau eines partiellen Leitrechens verbessert werden. Für die Abschätzung des Potenzials und die Planung eines partiellen Leitrechens müssten in einem nächsten Schritt jedoch weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um Informationen über die präferierten Aufenthaltsorte und das Schwimmverhalten von absteigenden Fischen im Staubereich des WKW BAN zu erhalten.

## 1. Einleitung und Veranlassung

Nach den Bestimmungen des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) und des Bundesgesetzes über die Fischerei (BGF) muss der Fischabstieg bis 2030 verbessert werden, soweit dies wirtschaftlich tragbar ist. Das übergeordnete biologische Ziel dieser Sanierung ist, dass absteigende Fische eines breiten Artenspektrums die Wasserkraftanlagen möglichst verzögerungs- und verletzungsfrei überwinden können. Zur Klärung offener Fragestellungen initiierte der Verband Aare-Rheinwerke (VAR) im Jahr 2011 das Forschungsprojekt «Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken». Dieses Forschungsprojekt wurde Anfang 2015 mit der Publikation der Dissertation einer möglichen Variante mittels «Leitrechen an Fischabstiegsanlagen – Hydraulik und fischbiologische Effizienz» (VAW-Mitteilung Nr. 230) und des zusammenfassenden Fachartikels «Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs» (Wasser Energie Luft, 107. Jahrgang, 2015, Heft 1, Seiten 17–28) abgeschlossen werden.

Das vom VAR gemeinsam mit den Bundesämtern BAFU und BFE sowie swisselectric research finanzierte Projekt hat interessante Resultate zu Leitrechen als mechanische Verhaltensbarrieren auf Stufe Labor hervorgebracht. Gleichzeitig sind aber viele neue Fragen aufgetaucht: einerseits zur technischen Umsetzbarkeit einer solchen Lösung bei grossen Flusskraftwerken und andererseits zum grossräumigen Wanderverhalten der Fische in unseren Gewässern. Eventuell gibt es noch weitere Fischabstiegsvarianten, die zielführender und kostengünstiger sind, wie z.B. sensorische Verhaltensbarrieren, das partielle Öffnen der Wehre, Drosselung der Turbinen oder eine Kombination davon. Die Grundlage für die Entwicklung von solchen Varianten bildet das Wissen zum Verhalten der Fische beim Abstieg. Aktuell besteht diesbezüglich ein grosses Wissensdefizit.

Die meisten Kraftwerke an der Aare haben eine Verfügung für die Sanierung des Fischabstiegs nach Art. 10 BGF erhalten, obwohl heute noch keine praktikable Lösung für Rechensysteme bei Kraftwerken mit einer Ausbauwassermenge grösser 100 m<sup>3</sup>/s vorliegt. Aus diesem Grund sah der VAR vor, an zwei für Aare und Rhein repräsentativen Kraftwerken, dem Kraftwerk Bannwil der BKW Energie AG [BKW] und dem Kraftwerk Wildegg Brugg der KWWB Villnachern AG [KWWB], konkrete Untersuchungen durchzuführen.

Im Dezember 2016 reichten die KWWB und die BKW je eine Pflichtenheftskizze für technische Vorprojekte von Leitrechen-Bypass-Systemen und für telemetrische Studien zur Untersuchung des Schwimm- und Wanderverhaltens potamodromer Fischarten beim BAFU ein. Anschliessend wurden die Pflichtenheftskizzen in der Begleitgruppe aus kantonalen Fachbehörden, Umweltschutzorganisationen und Forschungsanstalten verteilt sowie an einer gemeinsamen Sitzung am 28. Februar 2017 vorgestellt und besprochen. Alle Mitglieder der Begleitgruppe unterstützten das skizzierte Vorgehen.

Mit Schreiben vom 21. Dezember 2017 reichte Axpo für das Kraftwerk Wildegg-Brugg (das KWWB) je ein separates Pflichtenheft zum technischen Vorprojekt inkl. eines Syntheseberichts zu Alternativmassnahmen und zur verhaltensbiologischen Studie mittels akustischer Telemetrie inkl. Antrag für Entschädigung nach Art. 34 Energiegesetz (EnG) beim Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Landschaft und Gewässer des Kantons Aargau (BVUALG) ein. Die BKW reichte die beiden Pflichtenhefte für das technische Vorprojekt sowie für die radiotelemetrischen Untersuchungen am 20. resp. 19. Dezember 2017 beim Amt für Wasser und Abfall (AWA) des Kantons Bern ein. Mit Schreiben vom 14. Februar 2018 bzw. 23. Januar 2018

beurteilte das BVUALG bzw. das AWA die Pflichtenhefte der KWWB bzw. der BKW als zweckmässig für das Vorhaben und sie stellten den Antrag auf Gutheissung der Pflichtenhefte durch das BAFU. Schliesslich erliess das BAFU am 31. Oktober 2018 und am 30. November 2018 je eine Verfügung für das KWWB und für die BKW, in welchen auch die Kostenübernahme zugesichert wurde.

Die KWWB beauftragte die Axpo Power AG am 5. November 2018 mit der Durchführung der in den Pflichtenheften erwähnten Untersuchungen. Für die Ausarbeitung des technischen Vorprojekts beim WKW BAN beauftragte die BKW Energie AG Ende 2018 das Grid- & Hydro-Engineering der BKW. Der Projektstand und die entsprechenden Zwischenresultate wurden der Begleitgruppe an den Sitzungen vom 14. November 2019, 3. März 2021, 6. April 2022 und 27. Juni 2023 vorgestellt.

Der vorliegende Synthesebericht umfasst die wichtigsten Erkenntnisse der beim KWWB und WKW BAN durchgeführten Untersuchungen. Der Fokus dieses Berichts liegt auf alternativen Fischabstiegsmassnahmen zu Leitrechen-Bypass-Systemen, welche sowohl im Allgemeinen also auch standortspezifisch für das KWWB und WKW BAN betrachtet werden.

## 2. Grundlagen Kraftwerke

### 2.1 Kraftwerk Wildegg-Brugg

Das KWWB ist ein Ausleitkraftwerk mit einem rund 4.5 km langen Ausleitkanal und einer Restwasserstrecke (Abb. 2.1). Das Bruttogefälle beim Maschinenhaus (MH) beträgt bei einem Aareabfluss von  $430 \text{ m}^3/\text{s}$  rund 13.8 m. Beim Hauptkraftwerk sind zwei frontal angeströmte, vertikalachsige Kaplan-Turbinen mit einer Ausbauwassermenge von je  $210 \text{ m}^3/\text{s}$  installiert. Die Ausbauwassermenge des Dotierkraftwerks beträgt  $11.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Neben dem Hauptwehr sind in der Restwasserstrecke ein Dachwehr und ein Hilfwehr vorhanden. Die mittlere Anströmgeschwindigkeit vor dem Einlaufrechen beträgt beim Ausbaudurchfluss  $1.0 \text{ m/s}$  [6]. Während der Periode 2003–2022 wurde der Ausbaudurchfluss an durchschnittlich 60 Tagen im Jahr überschritten und das Überwasser entsprechend über das Wehr abgegeben. Weitere Details zum KWWB können dem Bericht des technischen Vorprojekts [1] entnommen werden.

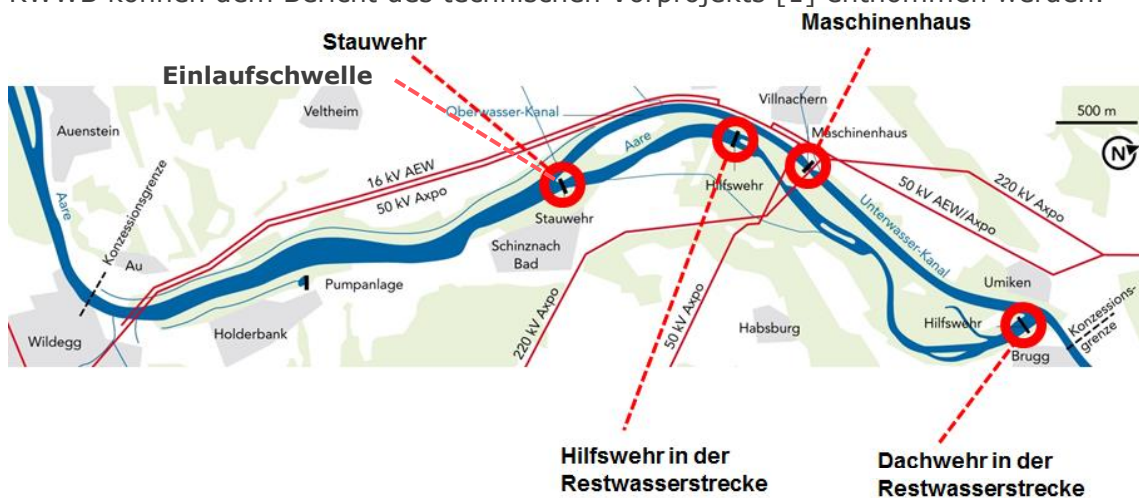


Abb. 2.1 Situation beim KWWB, Fließrichtung der Aare von links nach rechts (Quelle: Axpo).

## 2.2 Kraftwerk Bannwil

Das Blockwasserkraftwerk WKW BAN befindet sich an der Aare zwischen Wangen an der Aare und Aarwangen (Abb. 2.2). Die Zentrale befindet sich auf der orographisch linken Flussseite unmittelbar unterstrom einer Linkskurve auf der Kurveninnenseite der Aare. Das WKW BAN besitzt drei frontal angeordnete Kraftwerkseinläufe mit je einer Kaplan-Rohrturbine. Gesamthaft besitzt die Anlage eine Ausbauwassermenge von  $450 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $150 \text{ m}^3/\text{s}$  je Turbine) und nutzt ein Gefälle von 5.5 bis 8.5 m. Die angrenzende Wehranlage besitzt drei identische Wehrfelder, bestehend aus je einem Drucksegmentschütz mit einer Kapazität von  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  und einer Überfallklappe, die eine Kapazität von  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  aufweist. Gesamthaft ergibt sich eine Kapazität bei Normalstau von  $1'500 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $> \text{HQ}_{300}$ ), welche über die Wehranlage abgeführt werden kann. Die mittlere Anströmgeschwindigkeit vor dem Einlaufrechen beträgt bei Ausbaudurchfluss  $0.9 \text{ m/s}$  [6]. Während der Periode 2002–2021 wurde der Ausbaudurchfluss an durchschnittlich 39 Tagen im Jahr überschritten und das Überwasser entsprechend über das Wehr abgegeben. Dem technischen Bericht des Vorprojekts [3] lassen sich weitere Informationen entnehmen.



Abb. 2.2 Situation beim WKW BAN, Fließrichtung der Aare von links nach rechts (Quelle Karte: Swisstopo).

## 2.3 Wichtigste Erkenntnisse aus durchgeführten Untersuchungen

Im Rahmen des vom VAR initiierten Pilotprojekts zum Fischabstieg an grossen Wasserkraftanlagen wurden folgende Studien durchgeführt. Der Fokus der technischen Vorprojekte lag dabei auf Leitrechen-Bypass-Systemen mit *Bar Racks*.

- Technisches Vorprojekt beim KWWB [1]
- Akustische Telemetriestudie beim KWWB [2]
- Technisches Vorprojekt beim WKW BAN [3]
- Radiotelemetriestudie beim WKW BAN [4]
- Sensorfisch-Versuche beim WKW BAN [5]

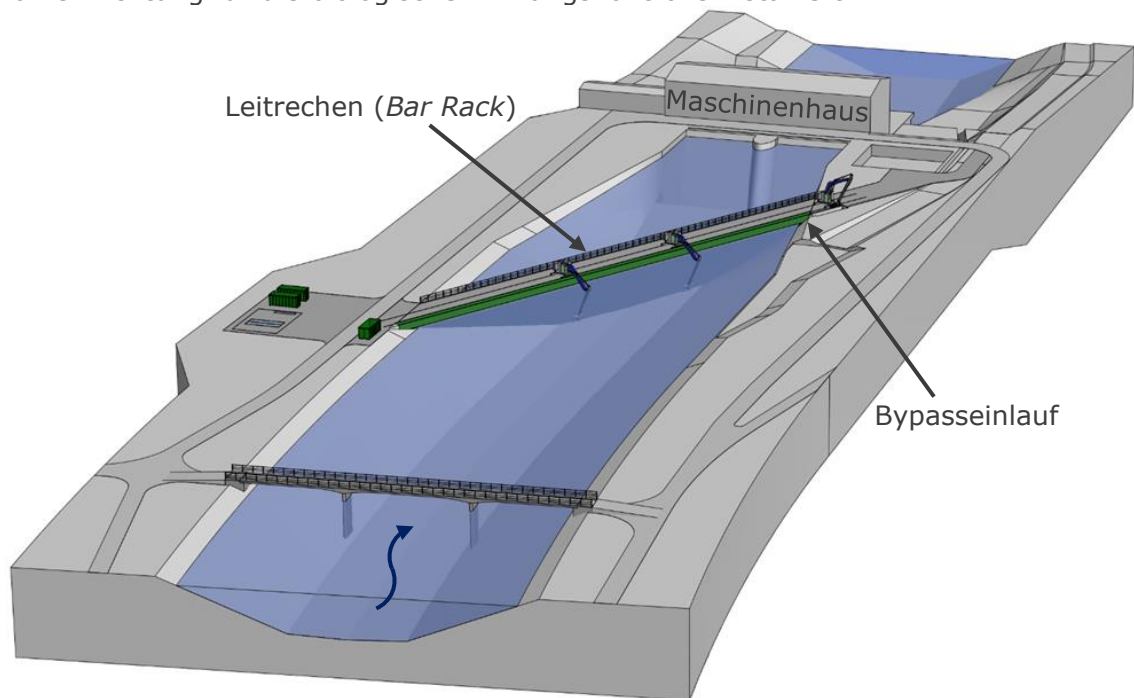
In den nachfolgenden Kapiteln werden die wichtigsten Erkenntnisse dieser Studien kurz zusammengefasst, welche für den vorliegenden Bericht relevant sind.

### 2.3.1 Technisches Vorprojekt beim KWWB

Im Rahmen des im Bericht [1] beschriebenen technischen Vorprojekts beim KWWB untersuchte die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH

Zürich (VAW) die Strömungsbedingungen im Oberwasserkanal des KWWB mittels eines numerischen 3D-Modells [6]. Durch die Prüfung von 16 verschiedenen potenziellen Linienführungen für einen Leitrechen wurde unter Berücksichtigung der lokalen Randbedingungen die aus fischbiologischer Sicht optimale Linienführung gewählt. Zudem wurden diverse Stabformen- und Stababstände, sowie mögliche Linienführungen für einen Bypass untersucht. Das technische Vorprojekt umfasst zudem unter anderem die Auslegung der Rechenbrücke und Rechenkonstruktion, die Planung des Bauverfahrens, die Auslegung der Rechenreinigungsmaschinen, die Plandarstellung des geplanten Leitrechen-Bypass-Systems, die Planung des Bauprogramms und eine Grobkostenschätzung.

Bei der im technischen Vorprojekt untersuchten Bestvariante handelt es sich um das in Abb. 2.3 dargestellte Leitrechen-Bypass-System mit einem *Bar Rack*. Der als mechanische Verhaltensbarriere konzipierte Rechen mit einem lichten Stababstand von 50 mm wird mit einem horizontalen Anströmwinkel von  $\alpha = 31^\circ$  zur Hauptstromrichtung vom orografisch linken zum rechten Ufer angeordnet. Der Leitrechen soll aus gekrümmten bzw. abgewinkelten, vertikal installierten Stäben gebaut werden. An der orographisch rechten Böschung wird eine Sohlleitwand vorgesehen, welche sohnahn orientierte Fische in Richtung Bypasseinlauf leitet. Der Bypassdurchfluss von 1 bis 2 m<sup>3</sup>/s wird durch eine Einlaufklappe reguliert, welcher eine Kaskade von Becken zur Energiedissipation folgt. Voraussichtlich beim ersten Absturz der Kaskade wird eine Zählleinrichtung für die biologische Wirkungskontrolle installiert.



**Abb. 2.3 3D-Modell des beim KWWB geplanten Leitrechen-Bypass-Systems.**

Im technischen Vorprojekt wurde aufgezeigt, dass das beschriebene Leitrechen-Bypass-System beim KWWB technisch realisierbar ist, aber noch Unsicherheiten bezüglich des Betriebs und der biologischen Wirkung vorhanden sind. Der Hauptgrund für diese Unsicherheiten ist, dass bisher weder im In- noch im Ausland vergleichbare Anlagen realisiert wurden und es sich beim geplanten Leitrechen-Bypass-System somit um eine Pilotanlage handeln würde.



Gemäss der im technischen Vorprojekt durchgeführten Kostenschätzung betragen die Investitionskosten für das Leitrechen-Bypass-System, welche sich aus den Planungskosten, den Baukosten, den Erlöseinbussen während der Bauphase und den Finanzierungskosten zusammensetzen, CHF 44.0 Mio. exkl. MWST. Die Gesamtkosten, welche neben den Investitionskosten die Erlöseinbussen während der Betriebsphase über 40 Jahre, die Kosten für die Wirkungskontrolle und die Betriebs-, Instandhaltungs- und Erneuerungskosten über 40 Jahre beinhalten, wurden beim KWWB auf CHF 72.3 Mio. exkl. MWST geschätzt (Kostengenauigkeit +/- 30%, ausser Strompreis; Preisbasis 2021).

### 2.3.2 Akustische Telemetriestudie beim KWWB

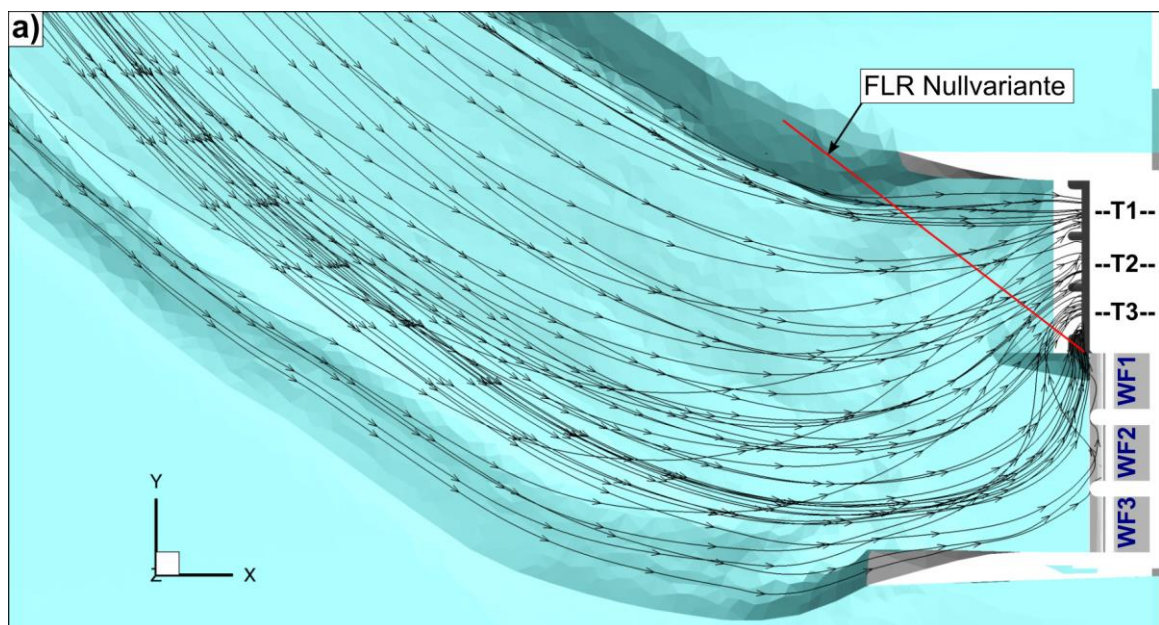
Im Rahmen der akustischen Telemetriestudie wurde vor dem MH des KWWB ein aus 16 Hydrophonen bestehendes akustisches Hydrophonnetz aufgebaut. Zudem wurden mehrere Aussenstationen ober- und unterstrom des KWWB installiert. Insgesamt wurden 699 Fische von 14 verschiedenen Fischarten mittels Zählvorrichtungen in Fischeaufstiegshilfen (FAH), Elektrofischerei und weiterer Fischbeschaffungsmethoden gefangen, markiert und im Oberwasserkanal des KWWB ausgesetzt. Die Hauptuntersuchungsperiode dauerte vom 19. Mai 2020 bis zum 24. Mai 2022. Die Haupterkenntnisse der akustischen Telemetrieuntersuchung sind:

- Die überwiegende Mehrheit der Fische nähert sich dem MH des KWWB mit positiver Rheotaxis, d.h. mit der Schwanzflosse voraus.
- Das MH wird von den Fischen als Hindernis wahrgenommen. Anstatt direkt abzustiegen, führen die meisten Fische intensive Suchbewegungen im Nahbereich des MH durch.
- Die erste Annäherung an das MH des KWWB erfolgt bei der Fischart Alet in Ufernähe, bei den Barben und anderen Fischarten wurde diese Präferenz jedoch nicht beobachtet.
- Die folgenden Suchbewegungen konzentrierten sich sowohl bei Alet als auch bei Barben auf die Uferbereiche.
- Alet bevorzugten generell strömungsberuhigte Bereiche, während sich Barben auch häufig in Bereichen mit hohen Fliessgeschwindigkeiten aufhielten.
- Während der Grossteil der Fische im Oberwasser verblieb, wird bei 79 Individuen von einer Turbinenpassage ausgegangen.
- Die Turbinen des KWWB dienten somit als Hauptabstiegskorridor. Die FAH wurde nur von einzelnen Fischen für den Abstieg genutzt. Weitere Abstiegskorridore sind beim MH des KWWB nicht vorhanden.
- Fischabstiege über das Wehr und die Restwasserstrecke des KWWB wurden nicht beobachtet. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass markierte Fische über das Wehr abstiegen, diese Abstiege aber methodisch bedingt nicht nachgewiesen werden konnten.
- Durch die Analyse vieler abiotischer Faktoren konnten diverse, teilweise fischart-spezifische Trends festgestellt werden. Die Streuung der beobachteten Zusammenhänge ist jedoch gross. Weder die stromabwärts gerichteten Fischbewegungen noch die Turbinenpassagen konzentrierten sich auf kurze Zeiträume.
- Durch die Erkenntnis, dass die Suchbewegungen primär ufernah stattfanden, konnte mit der Idee von ufernahen Leitstrukturen eine neue, für das KWWB vielversprechende, alternative Fischabstiegsmassnahme entwickelt werden.
- Aufgrund von externen Gewässereinflüssen wie Schwemmholtz- und Geschiebetransport ist es sehr herausfordernd, ein akustisches Telemetriesystem über mehrere Jahre hinweg in Schweizer Fliessgewässern zuverlässig zu betreiben. Dies ist insbesondere deshalb relevant, da diese externen Gewässereinflüsse in Schweizer Fliessgewässern u.a. aufgrund des vergleichsweise hohen Sohlgefälles sehr ausgeprägt sind.

Die während dieses Projekts gesammelten Erkenntnisse tragen zum besseren Verständnis des Schwimm- und Wanderverhaltens adulter potamodromer Fische bei, wobei diese Erkenntnisse für die zielgerichtete Planung alternativer Fischabstiegs-massnahmen unerlässlich sind.

### 2.3.3 Technisches Vorprojekt beim WKW BAN

Im Rahmen des technischen Vorprojekts wurden durch die VAW numerische Modellierungen zur Positionierung des Leitrechens durchgeführt [8]. Dabei hat sich herausgestellt, dass es sehr schwierig ist, Fischleitrecken bei Blockkraftwerken wie dem WKW BAN so anzuordnen, dass diese aus fischbiologischer Sicht gut angeströmt werden. Dies ist jedoch notwendig, um hohe Leiteffizienzen zu erreichen. Ein Fischleitrecken könnte, wie in Abb. 2.4 gezeigt, vom orografisch linken Ufer zum Trennpfeiler zwischen dem Wehr und den Turbinen angeordnet werden. Beim WKW BAN sind die Wehrfelder an rund 323 Tagen pro Jahr geschlossen. Während dieser Tage entsteht eine zur Wehrachse parallele Strömung in Richtung der Turbineneinläufe. Dadurch wird der in Abb. 2.4 gezeigte Rechen im rechten Bereich nahezu rechtwinklig angeströmt, was zu einer schlechten Leitwirkung führt. Dies kann nur durch die Verlängerung des Trennpfeilers ins Oberwasser verhindert werden.



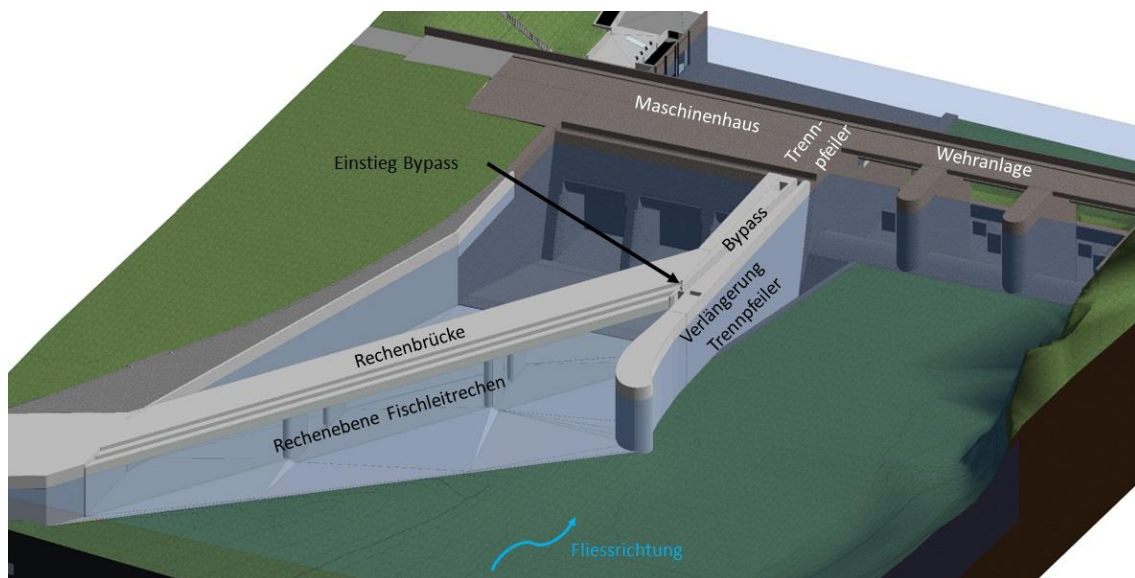
**Abb. 2.4 Anströmsituation eines möglichen Leitrechens beim WKW BAN bei geschlossenen Wehrfeldern (Quelle: [8]).**

Mit dem numerischen Modell wurden verschiedene Anordnungen von Leitrecken hinsichtlich Anströmbedingungen und Fischleitwirkung untersucht. Viele Varianten mussten aufgrund der ungünstigen Anströmung verworfen werden. Schlussendlich konnten jedoch durch die Implementierung baulicher Anpassungen im numerischen Modell zwei vielversprechende Leitreckenvarianten gefunden werden.

Diese beiden Leitreckenvarianten wurden in einem Variantenvergleich einander gegenübergestellt. Das technische Vorprojekt hat gezeigt, dass beide Varianten technisch machbar sind, jedoch grosse bauliche Anpassungen gegenüber dem Ist-Zustand notwendig sind. Prinzipiell wird bei beiden Varianten von einer hohen Fischleitwirkung ausgegangen, auch wenn die Anströmbedingungen bei beiden Varianten in gewissen Rechenabschnitten nicht optimal sind. In diesem Variantenvergleich

hat sich die Variante vom orografisch linken zum rechten Ufer mit einem Bypass durch den Trennpfeiler als Bestvariante herausgestellt. Gründe hierfür waren die geringeren Anströmgeschwindigkeiten des Leitrechens, die kleineren räumlichen Konflikte mit bestehenden Anlageteilen sowie insbesondere die günstigere Ausrichtung des Leitrechens hinsichtlich der Rechenreinigung sowie die besseren Platzverhältnisse uferseitig zum Abtransport des Schwemmguts.

Bei der im technischen Vorprojekt beim WKW BAN beschriebenen Bestvariante (vgl. Abb. 2.5) handelt es sich um ein Leitrechen-Bypass-System mit einem *Bar Rack*, mit der Stabform f-CBR und einem lichten Stababstand von 50 mm. Der vertikale Rechen wird in der Horizontalen mit einem Winkel von 35° zu den Turbinenachsen angeordnet. Der Rechen ist insgesamt 100 m lang und wird in drei Rechenfelder mit Breiten von jeweils 33 m und Höhen von 7.80 bis 9.80 m unterteilt. Der bestehende Trennpfeiler zwischen MH und Wehr wird bis zum Anschlusspunkt des Leitrechens um rund 35 m verlängert. Um die Anströmung auf die Rechenebene zu verbessern, muss der Trennpfeiler um weitere etwa 30 m über die Rechenebene hinaus ins Oberwasser verlängert, leicht abgewinkelt und ausgerundet werden. Die Rechenreinigung wird über die befahrbare Wehrbrücke mittels zwei Bagger-Rechenreinigungsmaschinen sichergestellt. Das Schwemmgut kann durch mitgeführte Mulden uferseitig abtransportiert werden. Der Bypass hat drei Einstiegsöffnungen in unterschiedlichen Wassertiefen. Der Abfluss im Bypass wird über ein Dachwehr gesteuert, durch welches der Abfluss im Bypass trotz abgesenktem Staupegel konstant bei ca. 4.5 m<sup>3</sup>/s gehalten werden kann, was rund 1% des Ausbauwasserdurchfluss entspricht. Der Bypass kann durch den bestehenden Trennpfeiler mit einer leichten Krümmung ins Unterwasser des linken Wehrfeldes geführt werden.



**Abb. 2.5 3D-Visualisierung der vorgeschlagenen Bestvariante eines Leitrechen-Bypass-Systems am WKW BAN.**

Im technischen Vorprojekt konnte die technische Machbarkeit eines Leitrechen-Bypass-Systems beim WKW BAN nachgewiesen werden. Bezüglich der biologischen Wirkung sowie Betreibbarkeit der Anlage bestehen jedoch noch Unsicherheiten, da bisher keine vergleichbaren Anlagen realisiert wurden.

Die Investitionskosten (Baukosten, Produktionseinbussen während Bauzeit, Honorare, allg. Kosten, Bauherrenleistungen und Finanzierungskosten) belaufen sich auf

rund CHF 68 Mio. exkl. MWST. Die Gesamtkosten, welche Produktionseinbussen sowie Betriebs-, Instandhaltungs- und Erneuerungskosten über 40 Jahre sowie eine Grobkostenschätzung für die Wirkungskontrolle beinhalten, werden auf rund CHF 102 Mio. exkl. MWST geschätzt (Kostengenauigkeit +/- 30%, ausser Erlöseinbussen).

#### 2.3.4 Radiotelemetrische Untersuchung beim WKW BAN

Zwischen dem 17. Dezember 2019 und 31. März 2021 wurde beim WKW BAN durch die FishConsulting GmbH eine radiotelemetrische Untersuchung durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden 292 Barben markiert und deren Wanderverhalten analysiert. Die ausführlichen Resultate können dem Abschlussbericht dieser Studie [4] entnommen werden. Nachfolgend werden die wichtigsten, aber nicht immer abschliessenden Erkenntnisse aufgelistet:

- Das Kraftwerk wurde von den Barben als Hindernis wahrgenommen. Nur rund die Hälfte der sich an das Kraftwerk annähernden Barben stieg auch tatsächlich über das Kraftwerk ins Unterwasser ab. Der Median der Aufenthaltszeit im Nahbereich des Kraftwerks betrug über 100 Minuten. Annäherungen ohne Abstieg dauerten tendenziell länger als Annäherungen mit einer anschliessenden Kraftwerkspassage.
- Der Grossteil der über das Kraftwerk abgestiegenen Barben nutzte eine der Turbinen als Abstiegskorridor. Viele Barben stiegen innerhalb weniger Tage, nachdem sie oberstrom des WKW BAN in der Aare ausgesetzt wurden, über das Kraftwerk ab. Die Abstiegszeitpunkte waren daher stark vom Aussetzzeitpunkt abhängig. In den Tagen nach den Aussetzzeitpunkten führte die Aare meistens wenig Wasser, sodass das Wehr häufig nicht als Abstiegskorridor zur Verfügung stand.
- Barben näherten sich dem WKW BAN vorzugsweise in der Nacht sowie während der Abend- und Morgenstunden und stiegen auch während dieser Zeiträume vermehrt ab. Es konnten keine klaren saisonalen Trends festgestellt werden. Tendenziell wurde im Frühling und im Herbst jedoch eine etwas höhere Wanderaktivität beobachtet als im Sommer und Winter.
- Die Mehrheit der validen Signale liess auf eine Annäherung im oberen Bereich der Wassersäule und einen Abstieg oberhalb der Turbinenachse schliessen. Methodisch bedingt konnte jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass Barben unterhalb der Turbinenachse abstiegen und deren Signale nicht empfangen werden konnte. Methodisch bedingt konnten die ermittelten Schwimmtiefen zudem keinem genauen Aufenthaltsort zugeordnet werden. Aus diesen Gründen wird davon ausgegangen, dass Barben bei der Abwanderung beim WKW BAN die gesamte Wassersäule nutzten.
- Die Überlebensrate der über die Turbinen abgestiegenen Barben betrug zwischen 69% (63/91 Barben) und 96% (87/91 Barben). Eine genauere Ermittlung der Überlebensrate war nicht möglich, da bei 24 Barben nicht festgestellt werden konnte, ob sie die Turbinenpassage überlebten. Vier Barben starben hingegen mit grosser Wahrscheinlichkeit.
- Insgesamt stiegen nur 4 Barben über das Wehr ab. Davon überlebten zwei Barben mit Sicherheit, während bezüglich der anderen beiden Barben keine Aussagen getroffen werden konnten.
- Rund ein Drittel der markierten Barben fielen während des Untersuchungszeitraumes wahrscheinlich Prädatoren zum Opfer.

#### 2.3.5 Sensorfisch-Versuch beim WKW BAN

Für die durchgeführten Sensorfischuntersuchungen [5] wurden 14 cm lange BDS (*Barotrauma Detection System*) Sensoren verwendet. Insgesamt wurden die Sensoren den Turbinen 116 Mal in unterschiedlichen Höhen zugegeben, wobei sowohl Teillast- als auch Vollastbedingungen untersucht wurden. Zudem wurden 94 Versuche

durchgeführt, bei welchen die Wehrpassage unter und über das Wehr (Schütz oder Klappe) untersucht wurde. Anhand von vier physikalischen Parametern konnte abgeschätzt werden, ob die Überlebenswahrscheinlichkeit einer Turbinen- oder Wehrpassage bei den entsprechenden Bedingungen grösser oder kleiner als 90% ist. Dafür wurden Schwellenwerte für die physikalischen Parameter anhand von Literaturwerten der vorkommenden Arten berücksichtigt (siehe [5]). Die wichtigsten Resultate sind:

- Bei einer Turbinenpassage im Vollastbetrieb ist das Verletzungsrisiko aufgrund der vorherrschenden Druckbedingungen und -änderungen höher als im Teillastbetrieb.
- Bezüglich der kollisionsbedingten Schädigung wurden bei Teillastbedingungen tendenziell mehr Kollisionsereignisse beobachtet. Der Unterschied ist jedoch klein und es gibt Unsicherheiten aufgrund verlorengegangener Sensoren.
- Sowohl für die Turbinen- als auch für die Wehrpassage wird von einer Überlebenswahrscheinlichkeit von über 90% ausgegangen. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Mortalitätsrate bei der Wehrpassage unter den untersuchten Betriebsbedingungen geringer ist als bei der Turbinenpassage. Eine genauere Quantifizierung der Überlebenswahrscheinlichkeit war jedoch methodisch bedingt nicht möglich.

2.3.6 Zusammenfassende Erkenntnisse der bisherigen Untersuchungen  
Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Leitrechen-Bypass-Systeme mit *Bar Racks* sowohl beim KWWB als auch beim WKW BAN technisch machbar sind. Die Realisierung und der Betrieb wären jedoch mit erheblichen Kosten verbunden. Aufgrund von fehlenden Betriebserfahrungen mit vergleichbaren Leitrechen-Bypass-Systemen kann nicht abschliessend beurteilt werden, ob diese Systeme reibungslos betrieben werden können. Zudem wurden mit diesen Systemen noch kaum Erfahrungswerte zur Leiteffizienz im Freiland gesammelt, insbesondere in grösseren Flüssen mit einem breiten Fischartenspektrum. Die bisher mit *Bar Racks* und Louver gesammelten Erfahrungen beschränken sich grösstenteils auf Nordamerika und die Abwanderung von Lachssmolts. Ein Beispiel hierfür ist ein beim *Holyoke Canal* des *Connecticut Rivers* installierter Louver. Erfahrungen aus der Schweiz werden von der bereits realisierten Pilotanlage beim Kraftwerk Herrentöbeli erwartet, wobei die Bedingungen bei diesem Kraftwerk nicht mit dem KWWB und WKW BAN vergleichbar sind. Durch den Bau von Leitrechen-Bypass-Systemen mit *Bar Racks* beim KWWB oder WKW BAN könnte der Fischabstieg voraussichtlich wesentlich verbessert werden. Es würde sich dabei jedoch um Pilotanlagen mit relativ grossen Unsicherheiten bezüglich des Betriebs und der Leiteffizienz handeln.

Durch die verhaltensbiologischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass absteigende Fische das KWWB und WKW BAN als Hindernis wahrnehmen. Beim KWWB wurde zudem beobachtet, dass die Fische zumindest bei diesem Kraftwerk nach alternativen Abstiegskorridoren suchen. Nach längeren Suchbewegungen entschied sich der Grossteil der markierten Fische entweder für einen Verbleib im Oberwasser oder einen Abstieg durch die Turbinen, während nur wenige Fische über die FAH abstiegen. Beim KWWB wurde festgestellt, dass sich die Suchbewegungen auf die Uferbereiche konzentrieren. Mit den verhaltensbiologischen Untersuchungen konnte zudem diverse Zusammenhänge zwischen dem Fischverhalten und abiotischen Faktoren aufgezeigt werden. Obwohl die Streuung dieser Zusammenhänge gross war, deuten die Untersuchungen nicht darauf hin, dass sich die Abwanderung adulter potamodromer Fische mehrerer Arten auf kurze Zeiträume konzentriert.

### 3. Alternativmassnahmen zu Leitrechen-Bypass-Systemen

#### 3.1 Überblick verschiedener Massnahmentypen

Zu Beginn des vom VAR im Jahr 2011 initiierten Forschungsprojekts «Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken» wurde ein sehr umfangreiches Literaturstudium zu Fischschutz- und -abstiegsmassnahmen durchgeführt [9][10]. Alle in der Literatur beschriebenen Massnahmen wurden bezüglich eines möglichen Einsatzes an Schweizer Mittellandflüssen geprüft. Das Fazit dieses Literaturstudium war, dass für den Einsatz an Schweizer Mittellandflüssen v.a. *Louver*- und *Bar Rack*-Systeme vielversprechend sind. Ausschlaggebend dafür waren folgende Annahmen:

- Potenziell gute Leitwirkung für ein breites Fischartenspektrum
- Im Vergleich zu physischen Barrieren (Feinrechen) geringere Investitionskosten
- Aufgrund des verhältnismässig grossen Stababstands betrieblich vorteilhaft gegenüber Feinrechen

Im beschriebenen Literaturstudium wurde auch erwähnt, dass hybride Systeme, bei welchen unterschiedliche Fischschutzkonzepte miteinander kombiniert werden, erfolgsversprechend sind. Diese wurden aber nicht im Detail untersucht und beschrieben. Da die durchgeführten technischen Vorprojekte beim KWWB und WKW BAN zeigten, dass Leitrechen-Bypass-Systeme bei grossen Flusskraftwerken sowohl im Bau als auch im Betrieb teuer sind, werden in diesem Bericht die wichtigsten alternativen Massnahmen inklusiver hybrider Systeme erneut beschrieben.

Abb. 3.1 gibt einen Überblick über alle im erwähnten Literaturstudium untersuchten Massnahmen. Da die in diesem Bericht getroffenen Aussagen zu einem überwiegenden Teil auch noch heute zutreffen, wird in vorliegendem Synthesebericht auf eine detaillierte Beschreibung aller Massnahmen verzichtet. Stattdessen wird nur auf ausgewählte Alternativmassnahmen eingegangen, welche entweder in den letzten Jahren entwickelt bzw. weiterentwickelt wurden oder sich potenziell für den Einsatz bei grossen Schweizer Mittellandflüssen eignen. Zudem wird auch auf konkrete Praxisbeispiele eingegangen, bei welchen der Fischschutz an grossen Wasserkraftanlagen mit alternativen Fischabstiegsmassnahmen zu Leitrechen-Bypass-Systemen umgesetzt wurde.

Fischschutztechnologien an Kraftwerkseinläufen	Konzept	Massnahmentyp	Beispielmassnahme	
	Abschirmung und Umleitung	Physische Barrieren	Mechanische Verhaltensbarrieren	Feinrechen
Submerged Bar Screens				
Submerged Rotating Screens				
Eicher-Rechen				
Trommelrechen				
Wedge-Wire-Screen				
Abspernetze				
Sensorische Verhaltensbarrieren	Sammelsysteme	Leitrechen ( <i>Louver, Bar Racks</i> )		
		Grobrechen		
Plattenrechen				
Tauchwände				
Bodenleitwände				
Licht (Stroboskop oder Quecksilber)	oberflächennahe Sammelrinnen			
niederfrequenter Schall	umlaufende Trogrechen			
Popper	Fischpumpen			
Elektrizität	<i>Trap and truck</i>			
Luft-/Wasserstrahlvorhänge				
Durchleitung	Fischschonende Turbinen	Alden-Turbine		
	Fischschonendes Anlagenmanagement	Voith - <i>Minimum Gap Runner</i>		
		Alstom - Fischschonende Kaplan-turbine		
		Frühwarnsysteme		
		Wehröffnungen		
		Kein Teillastbetrieb		

Abb. 3.1 Überblick verschiedener Konzepte und Massnahmen für den Fischabstieg [9][10].

### 3.2 Bypässe ohne Leitvorrichtung

Der Grossteil der europäischen Wasserkraftanlagen wurde in einer Zeit gebaut, in welcher dem Fischabstieg noch kaum eine bzw. keine grosse Bedeutung beigemessen wurde. Als der Fischabstieg an Bedeutung gewann, wurde zuerst versucht, den Fischabstieg mit verhältnismässig kostengünstigen Massnahmen zu verbessern. Der Fokus lag dabei auf dem Bau von Bypässen ohne Leitvorrichtung. Das Ziel dieser Massnahmen war, dass Fische vor einer Passage des bestehenden Grobrechens zögern, nach einem alternativen Korridor suchen und dann über den Bypass absteigen. Erst nachdem sich herausstellte, dass auch mit Bypässen ohne Leitvorrichtung trotzdem noch viele Fische über die Turbinen absteigen, wurden vermehrt Leitrechen-Bypass-Systeme eingesetzt.

In Frankreich wurden hauptsächlich oberflächennahe Bypässe für Lachssmolts gebaut. Die Bypasseffizienz, d.h. der Anteil an Fischen, welcher über den Bypass abstieg, variierte sehr stark zwischen den verschiedenen Kraftwerken. Bei günstigen hydraulischen Bedingungen variierte die Bypasseffizienz zwischen 55% und 85%, während sie bei ungünstigen Bedingungen nur 10–20% betrug [11][12]. Die

Bypasseffizienz war dabei einerseits von der Barrierewirkung der konventionellen Einlaufrechen und andererseits von den Fliessgeschwindigkeiten oberstrom des Turbineneinlaufs abhängig [12]. Wichtige Einflussfaktoren auf die Barrierewirkung der konventionellen Einlaufrechen waren dabei der Stababstand und die Schräganströmung [12]. Die Schräganströmung führte dabei – ähnlich wie bei einem *Louver* oder einem *Bar Rack* – zu einer verstärkten verhaltensbedingten Barrierewirkung. Zu hohe Fliessgeschwindigkeiten oberstrom des Einlaufrechens führen dazu, dass Fische nicht lange genug vor dem Einlaufrechen nach einem alternativen Abstiegskorridor suchen können und somit gezwungen sind, früher oder später über die Turbinen abzustiegen. Die erwähnten unterschiedlichen Bypasseffizienzen wurden auch auf die unterschiedlichen Bypassdurchflüsse zurückgeführt. Basierend auf in Frankreich gesammelten Erfahrungswerten empfahl Larinier (1998) [11] Bypässe mit Abflüssen zwischen 2% und mehr als 5% des Turbinendurchflusses zu beaufschlagen. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass diese Empfehlung basierend auf Kraftwerken mit relativ geringen Ausbaudurchflüssen von  $Q_A \leq 85 \text{ m}^3/\text{s}$  abgegeben wurde. Die Empfehlung der relativen Bypassbeaufschlagung von 2–5% wurde später von einigen Autoren übernommen und teilweise auch ohne weitergehende Begründungen und Untersuchungen auf grössere Wasserkraftanlagen übertragen. In Deutschland wurde die Erfahrung gesammelt, dass Bypässe ohne Leitvorrichtung neben traditionellen Einlaufrechen häufig nur schlecht funktionieren [13]. Beispielsweise wurde ein 2 m hoher und 0.8 m breiter Bypass beim Kraftwerk Kostheim am Main mit einem Ausbaudurchfluss von  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  weder von Aalen noch von anderen Fischarten als Fischabstiegskorridor angenommen [14]. Generell ist es sehr schwierig, die Erfahrungen der verschiedenen Anlagen miteinander zu vergleichen, da die Effizienz von sehr vielen standortspezifischen Faktoren abhängt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Bypässe ohne Leitvorrichtung häufiger angenommen werden, wenn die Barrierewirkung des Einlaufrechens erhöht wird. Auf diese Möglichkeit wird in Kapitel 3.3 genauer eingegangen.

#### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Basierend auf den erwähnten Literaturangaben wird nicht davon ausgegangen, dass sich Bypässe ohne Leitvorrichtung für das KWWB oder WKW BAN als Fischabstiegs-massnahme eignen. Aufgrund der ufernahen Suchbewegungen beim KWWB ist es jedoch möglich, dass ein Teil der Fische einen solchen Bypass zufällig finden würde.

### **3.3 Erhöhung der Barrierewirkung von konventionellen Einlaufrechen**

#### 3.3.1 Allgemeine Überlegungen

In Kapitel 3.2 wurde gezeigt, dass bei der Installation von Bypässen ohne Leitvorrichtung gemäss Literatur von einer geringen Effizienz ausgegangen werden muss. Da die Installation und der Betrieb von Leitvorrichtungen wie Fischleitrechen aufwändig und teuer sind, kann versucht werden, die Barrierewirkung bestehender Einlaufrechen zu erhöhen. Fische würden dadurch vermehrt oder länger vom Einlaufrechen abgehalten werden, was wiederum die Wahrscheinlichkeit einer Bypasspassage erhöht. In den nachfolgenden Kapiteln werden verschiedene Möglichkeiten zur Erhöhung der Barrierewirkung von konventionellen Einlaufrechen beschrieben.

#### 3.3.2 Reduktion des lichten Stababstands

Vor der Entwicklung von Leitrechen-Bypass-Systemen wurde bei einigen Kraftwerken versucht, Fische durch die Reduktion des lichten Stababstands von bestehenden Einlaufrechen an einer Turbinenpassage zu hindern. Dies ist jedoch nur bei sehr tiefen Anströmgeschwindigkeiten sinnvoll, da anderenfalls Fische an den Rechen gedrückt werden können (engl. *fish impingement*). Bei hohen Anströmgeschwindigkeiten können sich diese häufig nicht mehr vom Rechen wegbewegen, wodurch die Fische



verenden oder von der Rechenreinigungsmaschine verletzt werden. Dies wurde beispielsweise beim Kraftwerk Kostheim mit einem traditionell angeordneten Einlaufrechen mit einem lichten Stababstand von 20 mm beobachtet [14]. Beim KWWB und WKW BAN und bei den meisten anderen grossen Schweizer Flusskraftwerken beträgt die mittlere Anströmgeschwindigkeit in der Ebene der bestehenden Einlaufrechen ungefähr 1 m/s [6]. Ein weiterer Nachteil der Reduzierung des Stababstands ist, dass diese zu deutlich höheren Einlaufverlusten und damit zu nennenswerten Produktionseinbussen führen würde. Die Reduktion des lichten Stababstands bestehender Einlaufrechen sollte nur in Betracht gezogen werden, wenn die Anströmgeschwindigkeit geringer ist als die Dauerschwimmgeschwindigkeit der vorhandenen Fischfauna. Diese muss unter Berücksichtigung der Wassertemperatur, Totallänge der vorhandenen Fischfauna und standort- bzw. artspezifischer Parameter für jedes Kraftwerk ermittelt werden. Als grober Richtwert wird jedoch häufig von einer massgebenden Dauerschwimmgeschwindigkeit von 0.5 m/s ausgegangen.

#### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Aufgrund der hohen Anströmgeschwindigkeiten beim KWWB, WKW BAN und den meisten anderen grossen Schweizer Flusskraftwerken ist die Reduktion des lichten Stababstands der bestehenden Einlaufrechen keine zielführende Fischschutzmassnahme.

#### 3.3.3 Elektrifizierung von Einlaufrechen

Über die Elektrifizierung von bestehenden Einlaufrechen ist noch relativ wenig bekannt. Dies liegt unter anderem daran, dass elektrische Barrieren gemäss Literaturangaben nur bei tiefen Anströmgeschwindigkeiten wirksam sind [15], während die Anströmgeschwindigkeiten bei vielen bestehenden Einlaufrechen bei Ausbaudurchfluss im Bereich von 1 m/s liegen. Es gibt mehrere Möglichkeiten, wie Einlaufrechen elektrifiziert werden können. Da kleine Änderungen am elektrischen Feld grosse Auswirkungen auf das Fischverhalten haben können, ist es schwierig, allgemein gültige Aussagen zu treffen. Nachfolgend werden jedoch zwei neuere Studien kurz zusammengefasst, in denen elektrifizierte Einlaufrechen untersucht wurden.

Haug et al. (2022) [16] elektrifizierten in einem Freiland-Versuchsgerinne mit einer Anströmgeschwindigkeit von  $v_A = 0.23$  m/s einen Einlaufrechen. Dabei wurden an der Vorderseite der Rechenstäbe abwechselnd Anoden und Kathoden angebracht. Der Abstand zwischen den Elektroden variierte dabei je nach Versuchskonfiguration. Alle Versuche wurden mit 80 V gepulstem Gleichstrom durchgeführt. Mit diesem Versuchsaufbau konnten bis zu 96% der Fische, welche sich dem elektrifizierten Einlaufrechen näherten, geschützt werden. Ohne Elektrifizierung lag dieser Prozentsatz bei dem Rechen mit einem lichten Stababstand von 30 mm bei 62%.

Moldenhauer-Roth et al. (2023) [17] untersuchten elektrifizierte Einlaufrechen in einem Laborversuch, wobei der Rechen als Kathode und unterstrom angeordnete Stäbe als Anode fungierten. Der Rechen wurde mit 44 V gepulstem Gleichstrom (Pulslänge 2 ms, Frequenz 10 Hz) elektrifiziert. Für Alet betrug die Fischschutzeffizienz für eine Anströmgeschwindigkeit von  $v_A = 0.15$  m/s 78% und für  $v_A = 0.60$  m/s 95%. Für Aale wurde für  $v_A = 0.30$  m/s eine Fischschutzeffizienz von 92% ermittelt und für  $v_A = 0.6$  m/s 76%. Da der getestete Rechen einen lichten Stababstand von 90 mm aufwies und kein Bypass vorhanden war, wurde die Schutzrate ohne Elektrifizierung zu 0% angenommen. Interessant ist dabei unter anderem, dass Alet entgegen der weit verbreiteten Meinung, dass elektrische Barrieren v.a. bei tiefen Fließgeschwindigkeiten gut funktionieren, bei  $v_A = 0.60$  m/s besser geschützt wurden als bei  $v_A = 0.15$  m/s. Dies kann dadurch erklärt werden, dass sich Fische bei einem

Überschreiten des 0.3-Fachen der kritischen Schwimmggeschwindigkeit rheotaktisch positiv ausrichten [18]. Bei der erhöhten Anströmgeschwindigkeit näherten sich Alet somit immer mit positiver Rheotaxis an den Rechen an und flüchteten bei Wahrnehmung des elektrischen Feldes gegen die Fliessrichtung. Bei tieferen Fliessgeschwindigkeiten näherten sich Alet dem Rechen mit unterschiedlich Orientierungen und flüchteten bei Wahrnehmung des elektrischen Feldes teilweise auch durch den Rechen. Im Unterschied dazu kann die geringere Schutzrate für Aale bei einer Anströmgeschwindigkeit von  $v_A = 0.6 \text{ m/s}$  dadurch erklärt werden, dass sich Aale nur erschwert vom Rechen lösen konnten, nachdem sie an den Rechen gedrückt wurden. Bei diesen Versuchen wurde die kritische Schwimmggeschwindigkeit der getesteten Individuen bereits annähernd erreicht.

Versuche mit elektrifizierten Einlaufrechen mit Fliessgeschwindigkeiten über  $1 \text{ m/s}$ , wie diese typischerweise bei grossen Schweizer Flusskraftwerken auftreten, sind dem Projektteam nicht bekannt. Ähnlich wie bei der in Kapitel 3.2 beschriebenen Reduktion des Stababstands muss jedoch davon ausgegangen werden, dass zumindest ein Teil der Fische bei hohen Fliessgeschwindigkeiten mit der Zeit erschöpft wird und somit früher oder später gezwungenermassen durch das elektrische Feld und somit auch die Turbinen absteigen muss. Diese Problematik kann gegebenenfalls durch die schräge Anordnung eines elektrifizierten Rechens reduziert werden, sodass die Normalkomponente der Anströmgeschwindigkeit  $v_n \leq 0.5 \text{ m/s}$  beträgt. Durch eine solche Anordnung kann zwar keine mit einem physischen Schrägrechen vergleichbare Leitwirkung mit einem Winkel  $\leq 30^\circ$  zur Anströmrichtung erwartet werden, jedoch eine Verbesserung des Fischschutzes, da den Fischen die Möglichkeit gegeben wird, einen alternativen Abstiegskorridor zu suchen. Hierbei würde es sich jedoch nicht mehr um die Elektrifizierung eines bestehenden Einlaufrechens handeln, sondern um den Neubau eines Rechens.

Bei Elektrifizierung eines Einlaufrechens müssen sowohl die Langlebigkeit der Installation gegenüber Korrosion als auch die Personen- und Fischsicherheit beachtet werden. Alle in diesem Bericht beschriebenen Versuche wurden mit gepulstem Gleichstrom durchgeführt, da sich gepulster Gleichstrom in Studien zur Elektrofischung in Bezug auf Fischverletzungen als weniger problematisch herausgestellt hat als Wechselstrom [19]. Jedoch zeigen auch mehrere Laborversuche [20][21], dass auch mit gepulstem Gleichstrom Fischverletzungen nicht gänzlich ausgeschlossen werden können. Bei der Verwendung von Gleichstrom fliesst Strom immer in dieselbe Richtung, was zu Korrosionserscheinungen an den Anoden führt. Dies kann durch die Verwendung von pulsiertem Wechselstrom vermieden oder zumindest stark reduziert werden. Die Auswirkungen auf die Fischreaktion und das Verletzungsrisiko wurden bisher jedoch noch nicht systematisch untersucht und können daher nach heutigem Stand des Wissens (noch) nicht empfohlen werden.

Bei Verwendung von gepulstem Gleichstrom ist nur eine Elektrodenanordnung praxistauglich, bei welcher die korrosionsgefährdeten Bauteile keine strukturelle Funktion haben und mit wenig Aufwand gewartet und ersetzt werden können. Unter Verwendung von gepulstem Gleichstrom ist somit das von Haug et al. (2022) [16] getestete System nicht praxistauglich. Sofern das von Moldenhauer-Roth et al. (2023) [17] untersuchte System an einem Pilotstandort so gebaut werden kann, dass die Anoden leicht ersetzt werden können, der Betrieb wartungsarm ist und die Normalgeschwindigkeit zum Rechen  $v_n \leq 0.5 \text{ m/s}$  beträgt, ist diese Elektrifizierung jedoch insbesondere für Aale ein vielversprechender Ansatz. Sofern sich gepulster Wechselstrom als sicher erweist, lässt sich ein mit Gleichstrom elektrifizierter Rechen umrüsten. In Bezug auf die Personensicherheit kann für Gleichstrom bei den von Moldenhauer-Roth et al. (2023) [17] verwendeten Pulslängen und angewandten

Spannungen davon ausgegangen werden, dass das elektrische Feld für Menschen nicht gefährlich ist. Dies insbesondere deshalb, weil sich das Feld hinter dem Rechen ausbreitet und ein Mensch somit nicht in der Lage ist, eine Anode und Kathode gleichzeitig zu berühren. Allerdings können durch die Elektrifizierung Muskelkrämpfe hervorgerufen werden bzw. können sich Personen nicht am Rechen festhalten. Dies kann das Todesrisiko durch Ertrinken vergrössern. Daher ist nicht klar, ob ein elektrifizierter Rechen an einem stark frequentierten Fluss wie der Aare umgesetzt werden kann. In jedem Fall müssten die Risiken sehr detailliert evaluiert werden und ein entsprechendes Sicherheitskonzept erarbeitet werden.

#### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Eine Elektrifizierung der bestehenden Einlaufrechen beim KWWB und WKW BAN ist aus Sicht des Projektteams nicht denkbar, bevor die offenen Fragen bezüglich des Verletzungsrisikos von Fischen, der Korrosion und der Personensicherheit geklärt sind. Mit heutigem Kenntnisstand wird die Elektrifizierung der bestehenden Einlaufrechen des KWWB und WKW BAN aufgrund der hohen Anströmgeschwindigkeiten auch aus biologischer Sicht als keine zielführende Fischschutzmassnahme für ein breites Artenspektrum erachtet. Theoretisch wäre der Neubau eines schräg angeordneten elektrifizierten Rechens möglich. Gemäss aktuellem Wissensstand wird aber nicht davon ausgegangen, dass damit der Grossteil der Fische gezielt zu einem Bypass geleitet werden könnte. Zudem wäre ein solcher Rechen voraussichtlich auch teuer oder sogar ähnlich teuer wie ein *Bar Rack*.

#### 3.3.4 Kombination mit weiteren sensorischen Reizen

Generell ist bekannt, dass sensorische Barrieren Fische primär bei geringen Fließgeschwindigkeiten von einer Passage abhalten [15]. Zudem werden unterschiedliche Reize wie Schall und Licht von verschiedenen Fischarten sehr unterschiedlich wahrgenommen [13]. Da die Anströmgeschwindigkeiten beim KWWB und WKW BAN relativ hoch sind und ein breites Artenspektrum geschützt werden soll, sind sensorische Reize daher für die Sicherstellung des Fischschutzes auf den ersten Blick ungeeignet.

Es wäre jedoch denkbar, die Barrierewirkung der bestehenden Einlaufrechen mit sensorischen Reizen zu erhöhen und somit auch die Wahrscheinlichkeit, dass Fische den Bypasseinstieg finden. Aktuell sind allerdings keine solchen Barrieren bekannt. Es gibt Firmen wie die *Fish Guidance Systems Ltd*, welche sensorisch Barrieren wie akustische und lichtbasierte Barriersysteme anbietet. Gegebenenfalls könnten bestehende Systeme für die vorgeschlagene Anwendung adaptiert werden.

#### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Gegebenenfalls könnte die Barrierewirkung der Einlaufrechen des KWWB und WKW BAN mit sensorischen Reizen wie Licht und Schall erhöht werden. Da jedoch kein solches System kommerziell erhältlich ist, wären intensive Forschungsarbeit und umfangreiche Wirkungskontrollen unerlässlich, falls dieser Ansatz weiterverfolgt werden sollte.

### **3.4 Partiiell eingetauchte Feinrechen hinter Grobrechen**

Mit partiell eingetauchten Feinrechen hinter Grobrechen sind die sogenannten *Submersible traveling screens and extended submersible bar screens* gemeint, welche in diesem Kapitel genauer beschrieben werden.

Traditionell hat der Fischabstieg in den USA einen sehr hohen Stellenwert. Auch wenn der Fokus primär auf der Abwanderung von Lachssmolts liegt, ist es sehr spannend und lehrreich, die Entwicklung des Fischabstiegs in den USA zu verfolgen. Im

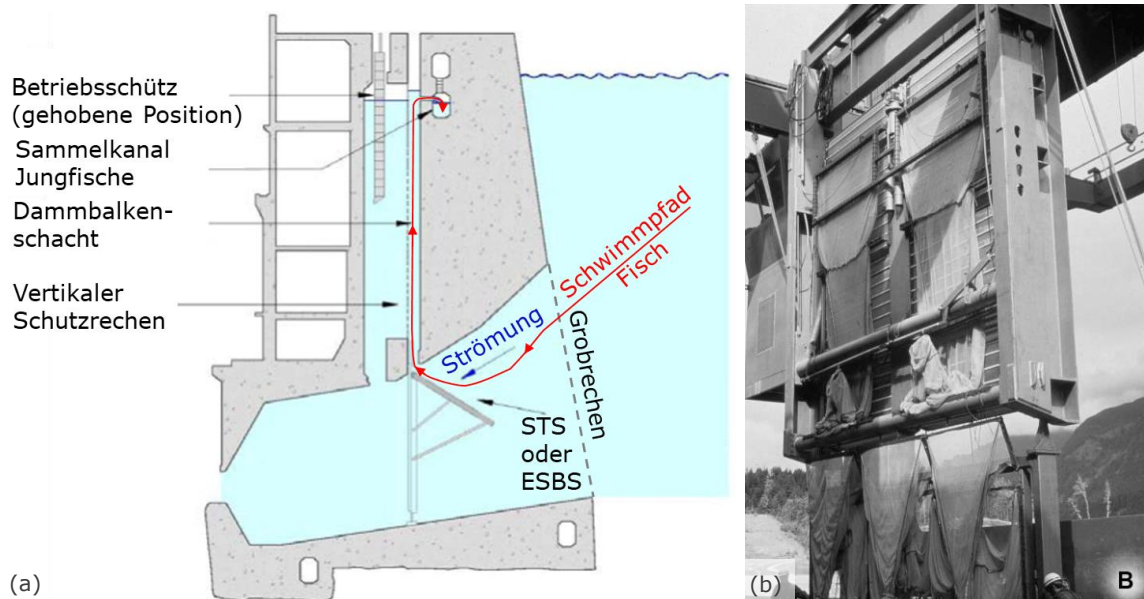
Jahr 2022 wurde vom *National Marine Fisheries Service* eine neue Bemessungsempfehlung zur Fischwanderung veröffentlicht, welche einen guten Überblick über den Fischabstieg in den USA gibt [23]. In dieser Bemessungsempfehlung werden sehr strikte Vorgaben für Fischabstiegsanlagen gemacht. Beispielsweise soll die Normalkomponente der Anströmung eines Leitrechens einen Grenzwert von 0.10 m/s nicht übersteigen, wenn der Rechen so lange ist, dass ein Fisch länger als 60 s benötigt, um entlang des Rechens zu schwimmen. Ausserdem soll der lichte Stababstand von Fischleitrechens maximal 1.75 mm betragen. In der Bemessungsempfehlung wird jedoch auch hervorgehoben, dass es sich bei diesen Grenzwerten nur um Empfehlungen handelt, welche unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten angepasst werden können.

Im Anhang G der Bemessungsempfehlung [23] wird klargestellt, dass die Bemessungsempfehlungen des Hauptdokuments bei grossen Wasserfassungen oder Wasserkraftanlagen nicht angewandt werden können. Stattdessen werden verschiedene Fischabstiegsanlagen am Columbia und Snake River beschrieben, welche als Beispielanlagen für den Fischabstieg an grossen Wasserkraftanlagen in den USA dienen. Im Columbia und Snake River wurden zwei verschiedene Typen von Fischabstiegsanlagen installiert. Die sogenannten *submersible traveling screens* (STS) und die *extended submersible bar screens* (ESBS). Bei beiden Systemen handelt es sich um Leitvorrichtungen, welche über den Dammbalkenschacht unterstrom des Grobrechens installiert werden und oberflächennah abwandernde Fische Richtung Wasseroberfläche leiten (Abb. 3.2a). Durch einen vertikalen Schutzrechen wird verhindert, dass Fische über den Schacht des Betriebsschützes zu den Turbinen gelangen. Nahe der Wasseroberfläche befindet sich ein Sammelkanal, an welchen ein Bypass anschliesst.

Beim STS handelt es sich um ein kontinuierliches Band aus einem gewobenen Nylonnetz (Abb. 3.2b). Der STS rotiert wie eine Rolltreppe im Kreis, sodass verklaustes Geschwemmsel an der Unterseite in Richtung Turbinen abgespült wird. Dadurch benötigen STS keine Rechenreinigungsmaschine.

ESBS funktionieren vom Prinzip her sehr ähnlich wie STS, sie sind jedoch rund doppelt so lang. ESBS bestehen typischerweise aus *wedge-wire* Stäben und müssen daher mit einer Rechenreinigungsmaschine gereinigt werden. Für weitere Details zu STS und ESBS wird auf die entsprechende Fachliteratur wie [23] und [24] verwiesen.

Gemäss der amerikanischen Bemessungsempfehlung [23] darf die Normalkomponente der Anströmgeschwindigkeit einen Grenzwert von 0.84 m/s nicht übersteigen. Sowohl beim STS als auch beim ESBS handelt es sich um Feinstrechen. Die Maschenweite von STS beträgt typischerweise 2.40 mm und der lichte Stababstand von ESBS 1.75 mm.



**Abb. 3.2** (a) Schematische Darstellung des Turbineneinlaufs am «Lower Granite Dam» (nach [23]) und (b) ein Foto eines gehobenen STS, an welchem auch für die Wirkungskontrolle befestigte Netze zu sehen sind.

#### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Wie aus Abb. 3.2a ersichtlich, konnten die Leitvorrichtungen STS und ESBS bei den Kraftwerken am Columbia und Snake River nur nachgerüstet werden, da die Kraftwerke mit grossen Dambalkenschächten unterstrom der Grobrechen gebaut wurden. Solche Dambalkenschächte sind weder beim KWWB noch beim WKW BAN vorhanden, sodass eine Nachrüstung mit STS oder ESBS nicht möglich ist. Zudem muss erwähnt werden, dass diese beiden Leitvorrichtungen primär für die Abwanderung von oberflächennah wandernden Lachssmolts entwickelt wurden und unklar ist, bis zu welchem Grad die Leitvorrichtungen auch von anderen Fischarten angenommen werden. Zu beachten ist ausserdem, dass es sich bei diesen Leitvorrichtungen um sehr teure und unterhaltsintensive Bauwerke handelt. Zudem führen STS und ESBS zu beträchtlichen Produktionsverlusten, weshalb diese teilweise nur saisonal während der Smolt-Abwanderungsperiode eingesetzt werden [10].

### **3.5 Luftblasenvorhänge**

Bei Luftblasenvorhängen handelt es sich um sensorische Barrieren, welche schon in den 1980er Jahren zum Fischschutz eingesetzt wurden [15]. In DWA (2004) [15] werden jedoch einige Laborversuche und Wirkungskontrollen beschrieben, bei welchen sich Fische nur kurzzeitig von Luftblasenvorhängen von einer Passage abhalten liessen oder diese generell nicht gut funktionierten. Es wurde dann das Fazit gezogen, dass sich Luftblasenvorhänge nicht für den Fischschutz bei Wasserkraftanlagen eignen [15]. Dem gegenüber stehen neuere Untersuchungen mit erfolgsversprechenden Resultaten, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Leander et al. (2021) [25] untersuchte sowohl im Labor als auch im Freiland, wie gut flussabwärts wandernde Lachssmolts mit Luftblasenvorhängen geleitet werden können. Schlussendlich wurde das Fazit gezogen, dass Lachssmolts mit Luftblasenvorhängen unter Tags effizient geleitet werden können. In der Nacht funktionierte der Luftblasenvorhang jedoch nicht gut, was darauf hindeutet, dass die visuelle Wahrnehmung einen entscheidenden Einfluss auf die Barrierewirkung hat. Bei dem von Leander et al. (2021) [25] beschriebenen Freilandversuch wurde ein 50 m langer

Luftblasenvorhang in dem schwedischen Fluss Ume älv installiert, welcher einen mittleren Abfluss von  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  aufweist. Durch den Luftblasenvorhang wurde jedoch nicht der gesamte Flussquerschnitt abgedeckt. Die Fließgeschwindigkeit betrug  $0.27 \text{ m/s}$ . Mittels einer akustischen Telemetriestudie konnte gezeigt werden, dass 90% der markierte Lachssmolts, welche in den Nahbereich des Luftblasenvorhangs schwammen, von diesem an einer Passage gehindert wurden. Bei dieser Anlage wurde versucht, die Fische mithilfe des Luftblasenvorhangs in die FAH zu leiten. Dabei wurde festgestellt, dass die Lachse zwar effizient in Richtung der FAH geleitet wurden, die meisten Fische diese jedoch nicht für den Abstieg nutzten. Diese Resultate deuten darauf hin, dass Luftblasenvorhänge nur in Kombination mit einem gut positionierten und dimensionierten Bypass als Fischabstiegsmaßnahme geeignet sind. Dass Luftblasenvorhängen zumindest in gewissen früheren Studien eine schlechte Barrierewirkung bescheinigt wurde, führen Leander et al. (2021) [25] u.a. darauf zurück, dass in vielen Fällen kein geeigneter Abstiegskorridor wie ein Bypass zur Verfügung stand.

Neben der Studie von Leander et al. (2021) [25] gibt es noch weitere neuere Untersuchungen, welche Luftblasenvorhänge eine relativ hohe Barrierewirkung bescheinigen. Beispielsweise zeigte Martin et al. (2021) [26] in einer Laborstudie, dass Luftblasenvorhänge bei Karpfen eine Meidereaktion auslösen, insbesondere wenn diese mit einer schallbasierten Barriere kombiniert werden.

#### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Beim KWWB und WKW BAN soll ein breites Artenspektrum geschützt bzw. zu einem Bypass geleitet werden. Da Luftblasenvorhänge artspezifisch wirken, wird aktuell nicht davon ausgegangen, dass nur mit einem Luftblasenvorhang in Kombination mit einem Bypass hohe Effizienzen erreicht werden können. Gegebenenfalls ist dies aber durch die Kombination eines Luftblasenvorhangs mit anderen sensorischen Barrieren möglich, wie dies im nachfolgenden Kapitel beschrieben wird.

### **3.6 BioAcoustic Fish Fence**

Beim *BioAcoustic Fish Fence* (BAFF) handelt es sich um eine sensorische Verhaltensbarriere, welche von der Firma *Fish Guidance Systems Ltd* vertrieben wird. Beim BAFF-System wird ein Luftblasenvorhang mit akustischen Signalen und optional zusätzlich mit Stroboskoplampen kombiniert. Da verschiedene Fischarten sehr unterschiedlich auf sensorische Reize reagieren, ist die Kombination der verschiedenen Reize insbesondere dann interessant, wenn ein breites Artenspektrum geschützt werden soll. Das BAFF-System wird in vorgefertigten Elementen geliefert und kann dann am Gewässergrund fixiert werden (Abb. 3.3).



**Abb. 3.3** Bild vom Einbau eines BAFF-Elements beim *Barkley Dam* in den USA (Quelle: [27]).

In den letzten Jahren wurde das BAFF-System an mehreren Anlagen für unterschiedliche Anwendungszwecke erfolgreich eingesetzt. Das BAFF-System kann wie beispielsweise beim *Barkley Dam* in den USA als Einschwimmsperre verwendet werden (Abb. 3.3). Dadurch soll verhindert werden, dass invasive asiatische Karpfenarten über die Schiffsschleuse ins Oberwasser des Kraftwerks gelangen. Erste Resultate eines laufenden Forschungsprojekts haben gezeigt, dass 94.7% der nicht translozierten und 76.8% der translozierten Fische am Einschwimmen in die Schiffsschleuse gehindert werden konnten [28].

Das BAFF-System wird jedoch auch genutzt, um abwandernde Lachssmolts zu leiten. Ein Beispiel ist die sogenannte *Georgiana Slough* in Kalifornien. An der entsprechenden Stelle verzweigt sich der Fluss Sacramento. Ziel des Projekts war es, möglichst viele abwandernde Lachssmolts in einen Flussarm zu leiten, in welchem die Lachse bei der weiteren Wanderung eine hohe Überlebenswahrscheinlichkeit haben. Das BAFF-System wurde mit einem Winkel von  $24^\circ$  zur Strömung angeordnet, sodass die maximale Normalkomponente der Anströmgeschwindigkeit  $0.25 \text{ m/s}$  betrug [29]. Die Effizienz des Systems wurde mittels einer akustischen Telemetriestudie untersucht, bei welcher 1'500 Lachssmolts (*Oncorhynchus tshawytscha*) markiert wurden [29]. Das eingeschaltete BAFF-System wurde von nur 7.7% der absteigenden Lachssmolts passiert, während es bei den Referenzversuchen mit ausgeschaltetem BAFF-System mit 22.3% rund 3 Mal so viele Lachssmolts waren [29]. Bei diesen Versuchen wurde auch festgestellt, dass die Leitwirkung des BAFF-Systems mit zunehmendem Abfluss abnahm. Grund dafür waren wahrscheinlich die höheren Fließgeschwindigkeiten, welche es den Lachssmolts erschwerte, gegen die Normalkomponente des BAFF-Systems anzuschwimmen [29].

Gemäss Literaturangaben funktionieren sensorische Verhaltensbarrieren wie das BAFF-System nur bei niedrigen Fließgeschwindigkeiten [30]. Beispielsweise wird in DWA (2004) [30], ohne Verweis auf weitere Quellen, angegeben, dass das BAFF-System nur effektiv ist, wenn auch lokal Fließgeschwindigkeiten von  $0.5 \text{ m/s}$  nicht überschritten werden. Gemäss der Firma *Fish Guidance Systems Ltd* ist für die Effizienz des BAFF-Systems jedoch nicht die Anströmgeschwindigkeit, sondern die Normalkomponente der Anströmgeschwindigkeit entscheidend. Durch eine starke Schrägstellung des BAFF-Systems kann dieses gemäss Herstellerangaben somit auch bei höheren Fließgeschwindigkeiten erfolgreich eingesetzt werden.

### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Die kurz zusammengefassten Studien zeigen, dass mit dem BAFF-System sowohl das Schwimmverhalten von Cypriniden als auch von Salmoniden beeinflusst werden kann. Auch wenn mit dem BAFF-System kein absoluter Schutz erreicht werden kann, könnte dieses System eine verhältnismässig kostengünstige Alternative für den Fischabstieg an grossen Wasserkraftanlagen wie dem KWWB und WKW BAN darstellen. Zu beachten ist dabei jedoch, dass – wie bei Leitrechen-Bypass-Systemen – auch beim BAFF-System ein geeigneter Abstiegskorridor wie beispielsweise ein Bypass benötigt wird.

### **3.7 Seilrechen und Elektro-Seilrechen**

Beim Seilrechen handelt es sich um ein Leitsystem, bei welchem horizontal gespannte Stahlseile – ähnlich wie bei Horizontalrechen bzw. *Bar Racks* – schräg zur Strömung angeordnet werden. Fische sollen dann entlang des Seilrechens zum stromabwärts liegenden Rechen- bzw. Seilende geleitet werden, wo sich ein Bypass für den Fischabstieg befindet. Die Schutzwirkung des Seilrechens wurde in Laborversuchen mit Lebendfischen untersucht. Diese Versuche haben gezeigt, dass 10–20 cm lange Fische mit einem Seilrechen mit einem lichten Stababstand von 20 mm nicht zuverlässig geschützt werden können [31]. Demgegenüber wurden mit einem lichten Stababstand von 10 mm nur noch vereinzelte Rechenpassagen beobachtet [31]. Ein solch geringer lichter Stababstand ist jedoch aufgrund der grossen hydraulischen Verluste und betrieblichen Herausforderungen gerade bei grossen Wasserkraftanlagen nicht praktikabel.

Beim Elektro-Seilrechen handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Seilrechens, welcher von der HyFish GmbH unter dem Begriff *Flexible FishProtector* vertrieben wird. Dabei werden die einzelnen Stahlseile mit Gleichstrompulsen und zukünftig gegebenenfalls mit Wechselstrompulsen elektrifiziert, um die Barrierewirkung des Seilrechens zu erhöhen. Aufgrund der Kombination einer mechanischen Verhaltensbarriere (Seilrechen) mit einer sensorischen Verhaltensbarriere (Elektrifizierung) handelt es sich beim Elektro-Seilrechen um eine hybride Barriere.

Weder der Seilrechen noch der Elektro-Seilrechen sind mit einer Rechenreinigungsmaschine ausgestattet. Stattdessen werden die Seile im Hochwasserfall auf die Gewässersohle abgelegt, sodass anfallendes Geschwemmsel zum dahinterliegenden Einlaufrechen transportiert wird. Dies führt dazu, dass der Seilrechen und der Elektro-Seilrechen während Hochwasserereignissen nicht als Fischschutzmassnahme wirken.

### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Der Seilrechen wird für das KWWB und WKW BAN insbesondere deshalb als nicht zielführend erachtet, da aufgrund des geringen Seilabstands und der fehlenden Rechenreinigungsmaschine von grossen betrieblichen Problemen ausgegangen wird.

#### 3.7.1 Vorteile des Elektro-Seilrechens

Mit dem Elektro-Seilrechen konnten selbst mit einem relativ grossen lichten Stababstand von 60 mm bei Versuchen in einem Freilandlabor hohe Schutzeffizienzen nachgewiesen werden [32]. Der im Vergleich zum Seilrechen deutlich grössere Stababstand führt zu deutlich geringeren hydraulischen Verlusten. Zudem wird die Verklauungswahrscheinlichkeit von Geschwemmsel reduziert, was wiederum den Betrieb erleichtert. Der Elektro-Seilrechen kann ohne zusätzliche Stützstrukturen Längen von bis zu 100 m überspannen [32]. Dadurch eignet sich der Elektro-Seilrechen prinzipiell auch für den Einsatz bei grossen Wasserkraftanlagen wie dem KWWB und dem



WKW BAN. Zudem wird davon ausgegangen, dass ein Elektro-Seilrechen deutlich günstiger wäre als beispielsweise ein *Bar Rack*.

### 3.7.2 Nachteile des Elektro-Seilrechens

Den genannten Vorteilen steht eine Reihe an Nachteilen gegenüber. Dazu gehören fehlende Betriebserfahrungen an grösseren Wasserkraftanlagen, der fehlende Fischschutz während Hochwasserereignissen, offene Fragen zur Personensicherheit, die unklare Leitwirkung, potenzielle Fischverletzungen und Herausforderungen mit der Korrosion. Diese Nachteile werden im Folgenden detaillierter beschrieben.

Bisher wurde der Elektro-Seilrechen bzw. der *Flexible FishProtector* erst an einer Wasserkraftanlage installiert. Dabei handelt es sich um die Wasserkraftanlage Leinau an der Wertach in Bayern mit einem Ausbaudurchfluss von 14 m<sup>3</sup>/s. Gemäss HyFish konnte an dieser Anlage gute Betriebserfahrungen gesammelt werden. Diese lassen sich jedoch nur bedingt auf grosse Wasserkraftanlagen im Mittelland übertragen, bei welchen die Ausbaumassmenge mehrere hundert m<sup>3</sup>/s beträgt. Zudem werden in der Aare Wurzelstöcke und ganze Baumstämme transportiert, welche sich voraussichtlich in den Seilen verkeilen. Im Hochwasserfall können die Seile des Elektro-Seilrechens zwar abgelegt werden, um ein Verklausen mit Geschwemmsel zu verhindern. Zu beachten ist dabei aber, dass in der Aare auch unabhängig von einem grossen Hochwasserereignis Wurzelstöcke und ganze Baumstämme transportiert werden. Ob diese Wurzelstöcke und Baumstämme durch das Lösen und erneute Spannen der Drahtseile tatsächlich wieder gelöst werden können, ist aktuell nicht klar. Es gibt daher grosse Bedenken, ob mit einem Elektro-Seilrechen an einer grossen Wasserkraftanlage in der Schweiz ein reibungsfreier Betrieb mit verhältnismässigem Unterhaltsaufwand möglich ist.

Um betriebliche Probleme zu reduzieren, müssen die Seile des Elektro-Seilrechens im Hochwasserfall abgelegt werden. Während dieser Phasen würde mit dem Elektro-Seilrechen kein Fischschutz/-abstieg zur Verfügung stehen. Wie häufig die Seile des Elektro-Seilrechens bei einem Einsatz in der Aare abgelegt werden müssten, kann mit dem aktuellen Wissensstand nicht beantwortet werden. Alternativ könnte ein vorgelagerter Grobrechen gebaut werden, was jedoch zu hohen Kosten und gegebenenfalls zu einer gewissen Barrierewirkung für auf- und absteigende Fische führen würde.

Ein sehr wichtiger Aspekt ist die Personensicherheit. Bisher konnte nicht nachgewiesen werden, dass der Elektro-Seilrechen für Personen ungefährlich ist. Bis dieser Nachweis nicht erbracht wird oder ein System entwickelt wird, welches den Strom des Elektro-Seilrechens abstellt, sobald sich eine Person dem Rechen nähert, ist es mehr als fraglich, ob ein Elektro-Seilrechen an einem gut zugänglichen Ort wie der Aare bewilligungsfähig ist. Ungeklärt sind zudem Haftungsfragen, falls Personen durch den Elektro-Seilrechen zu Schaden kommen sollten. Aus diesem Grund eignet sich der Elektro-Seilrechen aktuell primär für schlecht zugängliche Orte wie Kühlwasserfassungen oder in höheren Lagen, wo das Wasser sehr kalt ist und entsprechend keine Badende erwartet werden.

Die bisher veröffentlichten Resultate der Fischversuche mit dem Elektro-Seilrechen mit gepulstem Gleichstrom zeigen, dass der Elektro-Seilrechen nur von wenigen Fischen passiert wird. Beispielsweise passierten in den von Tutzer et. al (2019) [32] veröffentlichten Versuchen nur 1–5% aller Versuchsfische den Elektro-Seilrechen mit einem Anströmwinkel von 40°, einem lichten Seilabstand von 60 mm und einer elektrischen Feldausdehnung von rund 25 cm. Gleichzeitig stiegen jedoch auch nur rund 7% der Fische erfolgreich über den Bypass ab [32]. Die restlichen Fische

schwammen entweder nicht in die Nähe des Elektro-Seilrechen oder wurden durch den Elektro-Seilrechen wieder ins Oberwasser geschleucht. Dass nur so wenige Fische in den Bypass schwammen, kann mehrere Gründe haben. Es ist möglich, dass es sich dabei um Modelleffekte handelt, d.h. um Effekte, welche in einem grösseren Massstab nicht auftreten. Es ist aber auch möglich, dass die Fische den Bypass aufgrund der ungünstigen Strömungsbedingungen am Bypasseinlauf nicht annahmen oder dass die Fische durch den Elektro-Seilrechen nur ins Oberwasser geschleucht, aber nicht in Richtung Bypass geleitet wurden. Welcher dieser Gründe zutrifft bzw. bis zu welchem Grad die einzelnen Gründe zutreffen, kann mit der aktuell vorhandenen Datengrundlage nicht beurteilt werden. Es sind jedoch noch keine Publikationen bekannt, in welchen gezeigt wird, dass der Elektro-Seilrechen Fische nicht nur schützt, sondern auch effizient zu einem Bypass leitet. Wenn davon ausgegangen wird, dass der Elektro-Seilrechen Fische wie ein Horizontalrechen oder *Bar Rack* leitet, sollte die Parallelkomponente der Anströmgeschwindigkeit die Normalkomponente übersteigen. Das technische Vorprojekt beim WKW BAN [3] hat gezeigt, dass dies bei bestehenden Blockkraftwerken bzw. Buchtenkraftwerken nur mit aufwändigen baulichen Massnahmen wie einem langen Trennpfeiler möglich ist.

Wie bereits in Kapitel 3.3.3 erwähnt, können bei elektrischen Barrieren selbst mit verhältnismässig niedrigen Spannungen Fischverletzungen auftreten. Ob es bei elektrischen Barrieren zu Fischverletzungen kommt, hängt von vielen Faktoren, wie dem genauen Aufbau des elektrischen Feldes und den Spannungsgradienten, ab. Bisher wurden keine durch Elektro-Seilrechen bedingte Fischschäden dokumentiert. Dass der Elektro-Seilrechen für alle Altersstadien und Fischarten unschädlich ist, konnte bisher jedoch auch nur bedingt nachgewiesen werden. Im Feld kann ein solcher Nachweis in den meisten Fällen nicht bzw. nicht mit verhältnismässigem Aufwand erbracht werden. Dabei ist es wichtig zu berücksichtigen, dass aus der Elektrofischerei bekannt ist, dass Strom im Wasser innere Verletzungen verursachen kann, welche äusserlich nicht sichtbar sind [19].

Die Elektrifizierung der Stahlseile beschleunigt die Korrosion. Bei mit gepulstem Gleichstrom betriebenen Elektro-Seilrechen müssen die Stahlseile deshalb regelmässig ersetzt werden, was zu wiederkehrenden Kosten führt. Wie häufig die Stahlseile ersetzt werden müssen und welchen Kosten dadurch verursacht werden, ist sehr standortspezifisch und kann somit nicht allgemein beantwortet werden. Die Korrosion könnte durch den Einsatz von Wechselstrom vermieden oder zumindest stark reduziert werden. Diesbezüglich sind jedoch noch kaum Erfahrungen zum Fischverhalten und zu möglichen Fischverletzungen vorhanden. Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, ist aus der Elektrofischerei bekannt, dass das Verletzungsrisiko für Fische bei Wechselstrom generell grösser ist als bei Gleichstrom.

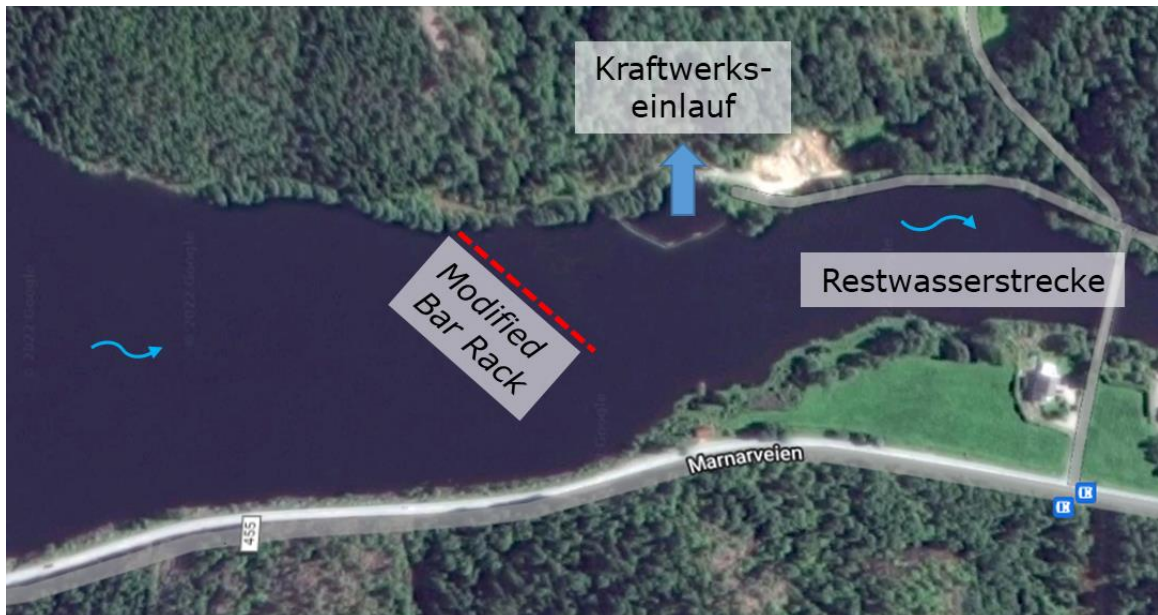
#### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Elektro-Seilrechen einige Vorteile mit sich bringt. Aufgrund der aufgeführten Nachteile, insbesondere den Problemen mit der Personensicherheit, dem Betrieb inklusive Korrosion und auch der unklaren Leitwirkung für Fische, wird der Einsatz eines Elektro-Seilrechen bei grossen Flusskraftwerken im Schweizer Mittelland wie dem KWWB und WKW BAN mit heutigem Kenntnisstand nicht empfohlen.

### **3.8 Partielle Leitrechen**

Mit partiellen Leitrechen sind Leitrechen gemeint, welche nicht den gesamten Gewässerquerschnitt abdecken. Diese Art von Rechen wird im Folgenden anhand des Beispiels beim Kraftwerk Laudal beschrieben.

Beim Kraftwerk Laudal handelt es sich um ein norwegisches Ausleitkraftwerk am Fluss Mandal mit zwei Francisturbinen, einem Ausbaudurchfluss von  $110 \text{ m}^3/\text{s}$ , einer maximalen Leistung von 29.13 MW und einer mittleren Jahresproduktion von 146 GWh [33]. Im Jahr 2021 wurde beim Kraftwerk Laudal ein partieller *Modified Bar Rack* (MBR) installiert. Damit ist ein MBR gemeint, welcher nicht die gesamte Querschnittsfläche abdeckt. Da bisher zu diesem MBR noch keine detaillierten Informationen veröffentlicht wurden, beruht folgender Abschnitt auf den Folien und persönlichen Notizen der *FishPath* Fachtagung vom 28. April 2022. Abb. 3.4 gibt einen Überblick über die Situation beim Kraftwerk Laudal, bei welchem der Kraftwerkseinlauf und die Position des MBR zu sehen sind. Das Absperrbauwerk mit einem Wehr befindet sich rund 500 m unterstrom des Kraftwerkseinlaufs, sodass dieses in Abb. 3.4 nicht abgebildet ist. Der MBR ist 85 m lang, 1.5 m tief eingetaucht und hat einen lichten Stababstand von 50 mm. Der MBR kann daher in zweierlei Hinsicht als «partiell» bezeichnet werden. Einerseits deckt er nicht die gesamte Flussbreite ab und andererseits auch nicht die gesamte Wassertiefe.



**Abb. 3.4** Situation beim Kraftwerkseinlauf des Kraftwerks Laudal in Norwegen mit Fließrichtung von links nach rechts (Quelle Hintergrundbild: Google Maps).

Abb. 3.5 zeigt die schwimmende Konstruktion des MBR, wobei die orographisch rechten Rechenfelder gerade angehoben sind. Dies kann periodisch durchgeführt werden, um verklaustertes Geschwemmsel zu lösen, wodurch keine Rechenreinigungsmaschine benötigt wird.



Foto: Steis Mek. Verksted As

**Abb. 3.5** Blick gegen die Fliessrichtung auf den *Modified Bar Rack* beim Einlauf des Kraftwerks Laudal [34].

Der MBR beim Kraftwerk Laudal wurde ausschliesslich für den Schutz von Lachssmolts entwickelt, welche in vielen Gewässern bekannterweise primär oberflächennah abwandern. Ziel des MBR ist es, Lachssmolts in Richtung des orographisch rechten Ufers zu leiten. Dadurch wird verhindert, dass die Lachssmolts in den Triebwasserstollen gelangen. Stattdessen können sie über die Restwasserstrecke und das Wehr absteigen, sodass kein Bypass benötigt wird. Damit dieses System funktioniert, wird während der Smolt-Abwanderungsperiode, welche typischerweise 2–4 Wochen dauert, rund die Hälfte des Abflusses über das Wehr abgegeben. Auch der MBR selbst ist nur während der Smolt-Abwanderungsperiode in Betrieb. Wenn der MBR nicht benötigt wird, wird dieser parallel zum Ufer geschwenkt, sodass die Strömung nur geringfügig beeinflusst wird und kein zusätzlicher Wartungsaufwand entsteht. Erste Resultate deuten darauf hin, dass der Rechen gut funktioniert und der Grossteil der Smolts über die Restwasserstrecke und das Wehr abwandert. Mittels akustischer Telemetrie konnte jedoch aufgezeigt werden, dass einige Smolts unter dem MBR hindurchschwimmen. Um die Leitwirkung weiter zu verbessern, soll der MBR daher verlängert werden, sodass eine grössere Wassertiefe abgedeckt wird.

Während der partielle MBR für den Schutz von abwandernden Lachssmolts beim Kraftwerk Laudal eine gute Lösung ist, kann das System aus diversen Gründen nicht oder nur sehr bedingt auf den Fischabstieg an Schweizer Mittellandflüssen übertragen werden. Der Hauptgrund dafür ist, dass der Fokus beim Kraftwerk Laudal lediglich auf der Smoltabwanderung liegt, während in der Schweiz möglichst alle Fischarten und Altersstadien geschützt werden sollen. Der Fokus auf die Smoltabwanderung führt dazu, dass der Fischabstieg nur während weniger Wochen im Jahr und nur für oberflächennah abwandernde Fische sichergestellt werden muss. Die akustische Telemetrieuntersuchung beim KWWB hat gezeigt, dass es zwar durchaus Phasen bzw. Bedingungen gab, bei welchen vermehrt Fischbewegungen registriert wurden, jedoch auch, dass beinahe zu allen Tages- und Jahreszeiten Fischbewegungen registriert wurden. Grundsätzlich muss daher ohne weitere Erkenntnisse davon ausgegangen werden, dass Fische in Schweizer Mittellandflüssen grundsätzlich über das ganze Jahr hinweg verteilt abwandern, auch wenn es Phasen mit vermehrter bzw. reduzierter

Abwanderungsaktivität gibt. Sollte ein mit dem MBR beim Kraftwerk Laudal vergleichbares System das ganze Jahr über in Betrieb sein, würde dies zu hohen Produktionsverlusten führen. Diese Verluste resultieren einerseits durch die Rechenverluste (Gefällsverluste) und andererseits durch Wasserverluste durch die Dotation eines Bypasses oder der Restwasserstrecke. Hinzu kommt, dass in Schweizer Mittellandflüssen auch bodennah wandernde Fische geschützt werden sollen. Zudem ist aktuell unklar, ob eine mit dem beim Kraftwerk Laudal vergleichbare Rechenkonstruktion an Flüssen wie der Aare mit entsprechend hohen Abflüssen und Geschwemmselaufkommen mit verhältnismässigem Wartungsaufwand betrieben werden kann. Je nach standortspezifischen Randbedingungen kann es sinnvoll sein partielle Leitrechen mit Sohlleitwänden und/oder Tauchleitwänden zu kombinieren, um die Leitwirkung für sohlennah bzw. oberflächennah abwandernden Fische zu verbessern.

#### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Partielle Leitrechen scheinen eine vielversprechende Massnahme zu sein, um den Fischabstieg bei grossen Flusskraftwerken wie dem KWWB und WKW BAN mit verhältnismässigen Kosten zu verbessern. Für eine zielgerichtete Umsetzung muss jedoch bekannt sein, auf welche Bereiche sich die Abwanderung und Suchbewegungen der Fische konzentrieren.

### **3.9 Wirbelbasierte Leitstrukturen: Forschungsprojekt *FishPath***

Bei *FishPath* handelt es sich um ein 2021 gestartetes Forschungsprojekt zum Fischabstieg, welches an der *FishPath* Fachtagung vom 28. April 2022 an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich vorgestellt wurde. Dieses Forschungsprojekt wird durch die VAW in Zusammenarbeit mit dem *Norwegian Institute for Nature Research (NINA)*, dem *Norwegian University of Science and Technology (NTNU)* und weiteren Partnern bearbeitet. Ziel ist es, mit Einbauten im Gewässer Wirbel zu erzeugen, welche Fische zu einem Bypass leiten, wobei der Fokus auf Salmoniden und Aalen liegt. Vorteile eines solchen Systems wären, dass im Gegensatz zu einem Leitrechen deutlich grössere Abstände zwischen den Rechenstäben bzw. den Einbauten möglich wären, was einerseits die Kosten senkt und andererseits die betrieblichen Herausforderungen reduziert.

#### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Ob sich wirbelbasierte Leitstrukturen für den Einsatz an grossen Flusskraftwerken wie dem KWWB und WKW BAN eignen, kann zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht gesagt werden. Voraussichtlich 2025–2026 sollen Bemessungsempfehlungen für solche wirbelbasierte Leitsysteme veröffentlicht werden. Erst dann wird eine genauere Beurteilung dieses Systems möglich sein. Die grössten Herausforderungen werden jedoch sein, dass ein breites Artenspektrum bei variablen Abflussbedingungen effizient geleitet wird und gleichzeitig ein unterhaltsarmer Betrieb mit geringen Produktionseinbussen durch Gefällsverluste und Bypassdotierung möglich ist.

### **3.10 Tauchwände**

Bei Tauchwänden handelt es sich um mobile oder fix installierte Wände bzw. Elemente, welche nur den oberen Teil der Wassersäule abdecken. Kommerziell werden Tauchwände v.a. dafür eingesetzt, um Geschwemmsel von kritischen Bereichen wie Einläufen abzuhalten. Vereinzelt werden schräg angeordnete Tauchwände jedoch auch eingesetzt, um oberflächennah absteigende Fische zu einem Bypass zu leiten.

Das bekannteste Beispiel einer solchen Tauchwand ist die von Odeh und Orvis (1998) [35] beschriebene Tauchwand beim Kraftwerk *Bellow Falls* am *Connecticut River*. Diese Tauchwand wurde mit einem horizontalen Anströmwinkel von rund 40° angeordnet und deckt die obere Hälfte der 9 m tiefen Wassersäule ab. Bei einer Wirkungskontrolle wurde nachgewiesen, dass mit dieser Tauchwand 84% der Lachssmolts zu einem alternativen Abstiegskorridor geleitet werden konnten. 10% der Lachssmolts schwammen unter der Tauchwand hindurch, nutzten dann jedoch einen hinter der Tauchwand gelegenen Hilfsbypass, während 6% der Lachssmolts über die Turbinen abstiegen [35]. In Europa werden Tauchwände für den Fischabstieg v.a. in Schweden eingesetzt, wobei auch hier der Fokus auf dem Schutz von Salmonidensmolts liegt [13].

Klar ist, dass sich Tauchwände v.a. für den Schutz und die Leitung von oberflächennah abwandernden Fischen eignen. Generell ist noch relativ wenig darüber bekannt, welche Wassertiefen potamodrome Fische beim Abstieg primär nutzen. Die Resultate der Radiotelemetrieuntersuchung beim WKW BAN [4] legen jedoch nahe, dass zumindest Barben bei der Annäherung an das WKW einen grossen Teil der Wassersäule nutzten. Aus der Literatur ist zudem bekannt, dass gewisse Arten eher sohnah, andere Arten eher oberflächennah abwandern, während bei wieder anderen Arten bisher keine deutliche Präferenz bekannt ist [18]. Aufgrund der im Ausland gesammelten Erfahrungen und beschriebenen Literatur, müsste eine Tauchwand beim KWWB und WKW BAN somit voraussichtlich einen grossen Teil der Wassersäule abdecken, damit ein wesentlicher Teil der absteigenden Fische geleitet werden kann. Nicht zuletzt aufgrund der hohen Fliessgeschwindigkeiten, welche bei den meisten grossen Schweizer Flusskraftwerken vorherrschen, würden somit durch solche Tauchwände hohe Produktionsverluste entstehen.

#### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Mobile Tauchwände wären insbesondere dann interessant, wenn die Zielfischarten überwiegend oberflächennah und primär zu einem konzentrierten Zeitpunkt während des Jahres absteigen. Dann könnten die mobilen Tauchwände nur während der Hauptwanderzeiträume installiert werden. Dies ist in gewissen Ländern der Fall, wo sich Bemühungen bezüglich des Fischabstiegs primär auf Lachssmolts konzentrieren. Im Gegensatz dazu soll in der Schweiz ein breites Artenspektrum geschützt werden. Sowohl Literaturangaben als auch die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Telemetriestudien zeigen, dass adulte potamodrome Fische nicht nur oberflächennah und nicht während kurzer, konzentrierter Zeiträume absteigen. Aus den genannten Gründen werden sowohl fix installierte Tauchwände als auch mobile Tauchwände als nicht zielführend erachtet, um den Fischabstieg bei Schweizer Flusskraftwerken wie dem KWWB und WKW BAN für ein breites Artenspektrum wesentlich zu verbessern.

### **3.11 Schädigungsarme Turbinen**

#### 3.11.1 Konventionelle schädigungsarme Turbinen

Konventionelle fischschonende Turbinen zeichnen sich durch ein relativ geringes Verletzungsrisiko für absteigende Fische aus. Dies wird primär durch folgende Einflussfaktoren bestimmt [10]:

- Abgerundete, möglichst grossflächige Schaufelkanten
- Glättung der Oberfläche aller Anlagenteile
- Geringes Spaltmass
- Grosse Turbine
- Geringe Drehzahl
- Geringe Anzahl Laufradschaufeln

Speziell für den schonenden Fischabstieg entwickelte Turbinen, wie beispielsweise die Alden-Turbine, benötigen häufig mehr Platz als herkömmliche Kaplan-Turbinen. Bei gleichem Ausbaudurchfluss ist eine Alden-Turbine beispielsweise rund 1.5 Mal so breit wie eine Kaplan-Turbine [10]. Zudem können Alden-Turbinen nicht reguliert werden, was zu geringen Wirkungsgraden im Teillastbetrieb führt. Aus diesem Grund ist ein Einsatz einer solchen Turbine nur bei Neubauprojekten an gewissen Standorten denkbar.

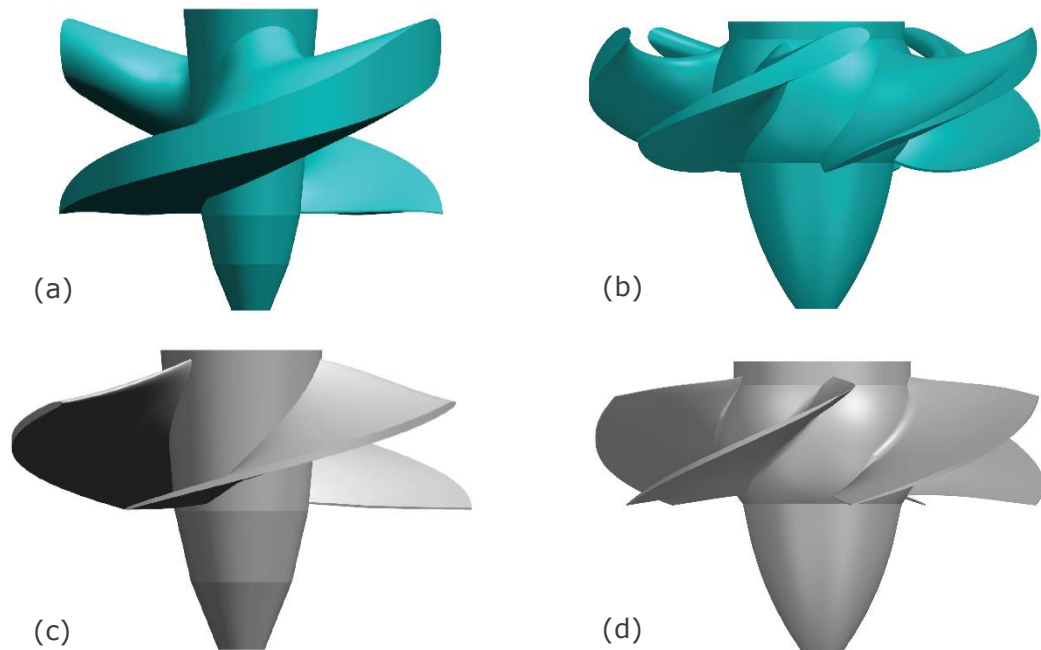
Da bei der Turbinenwahl in der Schweiz schon in den letzten Jahrzehnten darauf geachtet wurde, dass die Turbinen möglichst schädigungsarm sind, sind die Schaufelkanten bestehender Turbinen und die Oberfläche der Anlagenteile häufig bereits abgerundet. Aufgrund von Wirkungsgradoptimierungen wurde in der Schweiz auch häufig auf ein geringes Spaltmass geachtet. Somit ist diesbezüglich nur ein geringes Verbesserungspotenzial vorhanden. Die Installation einer grösseren Turbine bei einem bestehenden Kraftwerk wäre mit aufwändigen und kostspieligen Umbauarbeiten verbunden, sodass diesbezüglich in den meisten Fällen nur wenig Spielraum vorhanden ist.

#### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Wenn die Turbinen eines bestehenden Kraftwerks ersetzt werden, haben die Drehzahl und die Anzahl der Laufradschaufeln somit vielfach den grössten Einfluss darauf wie schädigungsarm die Turbinen sind. Das Optimierungspotenzial ist sehr kraftwerksspezifisch, da dies einerseits stark von der zu ersetzenden Turbine abhängt und andererseits auch von kraftwerksspezifischen Randbedingungen wie der Fallhöhe, dem Durchfluss, dem Generator und der Ausgestaltung des Einlaufbereichs. Beim KWWB und WKW BAN mit ihren grossen Kaplanturbinen (vertikalachsige Kaplanturbine beim KWWB bzw. Kaplan-Rohrturbine beim WKW BAN) wird von einem relativ geringen Optimierungspotenzial durch konventionelle schädigungsarme Turbinen ausgegangen.

#### 3.11.2 *Restoration Hydro Turbine* (RHT)

Die in Kapitel 3.11.1 beschriebenen konventionellen schädigungsarme Turbinen haben gemeinsam, dass die Gesamtüberlebensrate primär durch die Reduzierung des Kollisionsrisikos der Fische mit den Laufradschaufeln erhöht wird. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei den sogenannten *Restoration Hydro Turbines* (RH-Turbinen) des Herstellers Natel Energy mit Stand 2023 um einen neuartigen Turbinentyp, bei welchem die Laufradschaufeln so konstruiert werden, dass das Verletzungsrisiko bei einer Kollision der Fische mit den Laufradschaufeln gering ist. Ein weiterer grosser Vorteil der RH-Turbinen ist, dass diese gemäss dem Hersteller im Gegensatz zu vielen konventionellen schädigungsarme Turbinen bei bestehenden Kraftwerken mit Kaplan-Turbinen relativ einfach nachgerüstet werden können. Es gibt sowohl RH-Turbinen mit fixen als auch mit verstellbaren Laufradschaufeln. Abb. 3.6a,b zeigen RH-Turbinen mit fixen bzw. verstellbaren Laufradschaufeln und Abb. 3.6c,d vergleichbare konventionelle Turbinen. Der Mechanismus zum Verstellen der Laufradschaufeln von RH-Turbinen entspricht dabei weitgehend dem Mechanismus von Kaplan-Turbinen. Durch die kugelförmige Nabe kann der Öffnungswinkel der Laufradschaufeln verändert werden, ohne dass zwischen den Laufradschaufeln und der Nabe Spalten entstehen.



**Abb. 3.6 Modell einer RH-Turbine (a) mit fixen Laufradschaufeln und (b) mit verstellbaren Laufradschaufeln im Vergleich zu (c) und (d) konventionellen Turbinen (Quelle: Natel Energy).**

Ein Vergleich von Abb. 3.6a,b mit Abb. 3.6c,d zeigt, dass die Laufradschaufeln der RH-Turbine deutlich dicker sind als die der konventionellen Turbinen. Zudem ist die Vorderkante der RH-Turbinen abgeschrägt. Diese beiden Faktoren, welche nachfolgend noch genauer beschrieben werden, führen gemäss Natel Energy dazu, dass die RH-Turbinen schädigungsarm sind.

Der Einfluss der Dicke der Laufradschaufeln auf die Überlebenswahrscheinlichkeit wurde von Amaral et al. (2020) [36] im Labor untersucht. Das Hauptfazit dieser Untersuchung ist, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit bei einer Kollision vor allem vom Verhältnis der Fischlänge zur Dicke der Vorderkante der Laufradschaufeln abhängt. Insbesondere zur Erhöhung der Überlebenswahrscheinlichkeit grösserer Fische werden somit sehr dicke Laufradschaufeln benötigt. Die bereits erwähnte Abschrägung der Vorderkante der Laufradschaufel führt dazu, dass sich die Normalgeschwindigkeit, mit welcher ein Fisch mit der Laufrad-Vorderkante kollidiert, reduziert. Auch dieser Aspekt wurde von Amaral et al. (2020) [36] beschrieben.

Natel Energy gibt die Überlebensrate für über RH-Turbinen absteigende Fische mit 98–100% an [37][38]. Diese Angaben beruhen im Wesentlichen auf zwei Untersuchungen, welche nachfolgend kurz beschrieben werden. Berücksichtigt werden muss dabei, dass mit RH-Turbinen primär die mechanischen Schäden durch Kollision von Fischen mit den Laufradschaufeln verhindert bzw. reduziert werden können. Weitere Schadensmechanismen, wie beispielsweise durch Druckdifferenzen und Scherkräfte, können hingegen nicht oder nur bedingt verhindert werden. Da der Grossteil der Fischverletzungen bei den meisten Kraftwerken im Schweizer Mittelland mutmasslich mechanisch bedingt ist, könnten sich RH-Turbinen für diese Kraftwerke eignen. Für Hochdruckanlagen, bei welchen auch die druckbedingten Schäden hoch sind, eignen sich RH-Turbinen hingegen nicht.



Watsen et al. (2022) [37] untersuchten in einem Laborversuch eine RH-Turbine mit einem Aussendurchmesser von 55 cm, einer Nenndrehzahl von 667 Umdrehungen pro Minute und einer Druckhöhe von 10 m. Insgesamt wurden der Turbine 131 amerikanische Aale (*Anguilla rostrata*) mit einer Länge zwischen 33.9 und 65.5 cm zugegeben. Durch ein transparentes Turbinengehäuse konnten die Turbinenpassagen beobachtet werden. Zudem wurden die Aale jeweils vor und nach der Turbinenpassage, sowie 48 Stunden nach der Turbinenpassage auf Verletzungen untersucht. 37 Individuen wurden zudem mittels eines Röntgengeräts auf innere Verletzungen untersucht. Das Hauptresultat dieser Studie ist, dass auch 48 Stunden nach der Turbinenpassage weder grössere äussere noch innerliche Verletzungen auftraten. Die Überlebensrate der Aale betrug somit 100%. Besonders hervorgehoben muss bei dieser Studie, dass es sich um eine kleine, sehr schnell drehende Turbine handelte. Beim Einsatz einer RH-Turbine bei einem grösseren Kraftwerk wäre die Kollisionswahrscheinlichkeit geringer. Diesbezüglich handelt es sich hierbei somit um eine konservative Untersuchung.

Watsen et al. (2023) [38] untersuchten die Turbinenpassage von juvenilen Maifischen (*Alosa pseudoharengus*) bei dem kleinen Wasserkraftwerk *Freedom Falls Mill* im US-Bundesstaat Maine (Abb. 3.7). Die Bruttofallhöhe des Kraftwerks beträgt  $H_{Br} = 7.5$  m, der Ausbaudurchfluss  $Q_A = 0.8$  m<sup>3</sup>/s und die maximale Leistung 35 kW. Der Durchmesser der RH-Turbine beträgt 55 cm und die Nenndrehzahl 543 Umdrehungen pro Minute. Der Turbine wurden jeweils aus 140–170 Individuen bestehende Gruppen juveniler Maifische zugegeben, welche mit einer speziellen Vorrichtung beim Turbinenauslauf wieder gefangen wurden. Die beobachteten Überlebensraten wurden dabei mit den Überlebensraten von Kontrollgruppen korrigiert, um handlings- und hälterungsbedingte Verletzungen zu berücksichtigen. Die so ermittelten korrigierten Überlebensrate betrug direkt nach der Turbinenpassage  $98.2\% \pm 2.0\%$ , wobei die Genauigkeitsangabe dem 95% Konfidenzintervall entspricht. Die korrigierte Überlebensrate 48 Stunden nach der Turbinenpassage betrug  $100\% \pm 6.6\%$ . Dass die 48 Stunden nach der Turbinenpassage beobachtete Überlebensrate höher ist als die direkt nach der Turbinenpassage ermittelte Überlebensrate liegt daran, dass in einer Kontrollgruppe während der 48 Stunden dauernden Hälterungsperiode mehr Individuen starben, als bei den über die Turbinen abgestiegenen Individuen.

Einer der grössten Vorteile der RH-Turbinen ist, dass diese gemäss Natel Energy bei bestehenden Laufwasserkraftwerken mit Kaplan-Turbinen relativ einfach nachgerüstet werden können. D.h., dass bei einem Turbinenersatz der Grossteil der elektromechanischen Ausrüstung, wie beispielsweise der Generator, die Stütz- und Leitschaukeln und das Saugrohr, weitergenutzt werden können. Im Idealfall muss nur das Laufrad selbst ersetzt werden, wobei dies für jedes Kraftwerk individuell untersucht werden muss.

Bezüglich des Wirkungsgrads gibt Natel Energy an, dass dieser vergleichbar mit Kaplan-Turbinen ist. Ob diese Aussage tatsächlich zutrifft, kann nur durch die Ausarbeitung konkreter Projekte überprüft werden. Auch der Wirkungsgrad ist jedoch sehr kraftwerksspezifisch, sodass allgemein gültige Aussagen schwierig sind. Klar ist jedoch, dass der Wirkungsgrad der RH-Turbinen ohne verstellbare Laufradschaufeln im Teillastbetrieb deutlich schlechter ist als von doppelt regulierten Kaplan-Turbinen. Bis Mitte 2023 vertrieb Natel Energy nur RH-Turbinen mit fixen Laufradschaufeln (Abb. 3.6a). Neuerdings plant Natel Energy auch RH-Turbinen mit verstellbaren Laufradschaufeln, auch wenn gemäss dem Kenntnisstand des Projektteams bisher noch keine dieser Turbinen realisiert wurde. Abb. 3.7 gibt einen Überblick über alle Kraftwerksprojekte mit RH-Turbinen, welche sich im August 2023 in Betrieb bzw. offiziell in Planung befanden.



**Abb. 3.7** Überblick über Standorte, an welchen sich im August 2023 RH-Turbinen in Betrieb oder offiziell in Planung befanden (Quelle: nach [39]).

Aus Abb. 3.7 wird ersichtlich, dass bisher erst an drei Standorten RH-Turbinen in Betrieb genommen wurden, wovon sich zwei Standorte in den USA und einer in Österreich befinden. Bei Letzterem handelt es sich um das Kleinwasserkraftwerk Sauerbrunn mit einer Leistung von 15 kW und einer Fallhöhe von 1.9 m. Das Kraftwerk *Freedom Falls Mill* wurde bereits im Zusammenhang mit den juvenilen Maifischen beschrieben. Beim dritten Kraftwerk handelt es sich um das *Monroe Drop Hydro Projekt*. Dieses im US-Bundesstaat Oregon gelegene Kleinwasserkraftwerk hat eine Leistung von 300 kW und eine Fallhöhe von 5 m. Dieser Überblick zeigt, dass bisher zwar einzelne RH-Turbinen installiert wurden, jedoch nur bei sehr kleinen Kraftwerken. Von den in Abb. 3.7 gezeigten Standorten, an welchen sich RH-Turbinen in Planung befinden, ist vor allem der Standort *Red River Lock & Dam* im US-Bundesstaat Louisiana interessant. Dort sollen mehrere RH-Turbinen mit einer Leistung von jeweils 20 bzw. 30 MW installiert werden, was in etwa der Leistung der Turbinen beim KWWB entspricht. Die Inbetriebnahme der ersten dieser Turbinen ist bereits für das Jahr 2024 geplant.

Aufgrund der standortspezifischen Randbedingungen muss eine RHT für jeden Standort entwickelt bzw. optimiert werden. Um die baulichen und finanziellen Auswirkungen eines Ersatzes einer Kaplan-Turbine durch eine RH-Turbine besser abschätzen zu können, beauftragte Axpo Natel Energy im Juli 2023 mit einer Machbarkeitsstudie für eine RH-Turbine beim Kraftwerk Eglisau. Die Wahl für diese Studie fiel auf das Kraftwerk Eglisau, da dieses Kraftwerk mit sieben baugleichen Kaplan-Turbinen mit einem Ausbaudurchfluss von jeweils rund  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  ausgestattet ist. Da die RH-Turbine bisher erst bei sehr kleinen Kraftwerken eingesetzt wurde, wird es als zielführend erachtet, die RH-Turbinen zuerst bei einer mittelgrossen Turbine zu testen, bevor sie bei Kraftwerken mit Abflüssen von deutlich über  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  pro Turbine eingesetzt wird. Ein weiterer Vorteil ist, dass in Eglisau im Rahmen eines Pilotprojekts nur eine Kaplan-Turbine durch eine RH-Turbine ersetzt werden könnte. Die Machbarkeitsstudie beim Kraftwerk Eglisau umfasst sowohl RH-Turbinen mit fixen als auch mit verstellbaren Laufradschaufeln. Sollte sich die RH-Turbine sowohl aus betrieblicher als

auch aus fischökologischer Sicht bewähren, könnten anschliessend weitere Turbinen ersetzt werden, solange diese Massnahme als verhältnismässig beurteilt wird und über den nationalen Netzzuschlagsfonds entschädigt wird. Aufgrund der fehlenden Erfahrungen mit RH-Turbinen und weil die Kosten stark von den standortspezifischen Randbedingungen abhängen, kann aktuell noch keine belastbare Kostenschätzung gemacht werden. Diesbezüglich wird die Machbarkeitsstudie beim Kraftwerk Eglisau erste Erkenntnisse liefern. Auch wenn die in der Machbarkeitsstudie beim Kraftwerk Eglisau ermittelten Wirkungsgrade mit grossen Unsicherheiten verbunden sind, legt die Machbarkeitsstudie nahe, dass ein reiner Laufradersatz einer Kaplan-Turbine durch eine RH-Turbine beim Kraftwerk Eglisau zu Wirkungsgradeinbussen von 1.5–7.0% führen würde. Eine genauere Quantifizierung der Wirkungsgradeinbussen ist nur mittels hydraulischer Modellversuche möglich. Bei der Betrachtung eines längeren Zeitraums von 40 Jahren handelt es sich bei den Erlöseinbussen für das Kraftwerk Eglisau um die grösste Kostenposition.

#### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Bei RH-Turbinen handelt es sich um einen vielversprechenden Ansatz zur Verbesserung des Fischabstiegs an grossen Flusskraftwerken wie dem KWWB und dem WKW BAN. Es fehlen jedoch noch Erfahrungen bezüglich des generellen Betriebs und bezüglich des Wirkungsgrads, insbesondere im Teillastbetrieb. Zudem bestehen noch Wissenslücken bezüglich des Verletzungsrisikos heimischer Fischarten. Weitere Informationen zu RH-Turbinen können den Publikationen [36], [37] und [38] entnommen werden.

#### **3.12 IDA-Ansatz**

Beim sogenannte IDA-Ansatz, welcher als Abkürzung für die Bezeichnung *Induzierte Drift Anwendung* steht, handelt es sich um einen an der Versuchsanstalt Oberrach entwickelten Fischschutzansatz. Ziel dieses Ansatzes ist es, das Fischverhalten durch ein elektrisches Feld so zu beeinflussen, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit von über die Turbinen absteigenden Fischen erhöht wird.

Gemäss Geiger und Cuchet (2021) [40] ist die Überlebenswahrscheinlichkeit von über die Turbinen absteigenden Fischen am grössten, wenn diese die Turbine in der Nähe der Nabe passieren. Zudem ist gemäss Geiger und Cuchet (2021) [40] die Überlebensrate höher, wenn Fische mit zufälliger Orientierung passiv durch die Turbine absteigen, als wenn sich diese rheotaktisch positiv ausrichten und versuchen gegen die Strömung anzuschwimmen. Dies kann durch die längere Dauer der Turbinenpassage und dem damit einhergehenden erhöhten Kollisionsrisiko mit den Laufradschaufeln erklärt werden, wenn die Fische versuchen, gegen die Strömung anzuschwimmen.

Beim IDA-Ansatz werden beim Turbineneinlauf Elektroden angebracht, durch welche ein elektrisches Feld entsteht. Ziel dieses elektrischen Feldes ist es, dass Fische die Turbine im Nahbereich der Nabe passieren und dass die Fische durch das elektrische Feld soweit beeinflusst werden, dass sie nicht mit positiver Rheotaxis gegen die Strömung schwimmen. Gemäss dem Kenntnisstand des Projektteams wurde bisher noch kein Kraftwerk mit dem IDA-Ansatz ausgerüstet. Das Konzept wurde bisher nur in einem Freilandlabor der Versuchsanstalt Oberrach untersucht. Unklar ist auch, welche Auswirkungen das elektrische Feld auf die Turbinen und andere Bauteile hat. Ohne vertiefte Abklärungen und weiterführende Informationen zu diesem System, wie beispielsweise zu den angesetzten Spannungen und der genauen Elektrodenanordnung, können die Auswirkungen auf die Turbinen und andere Bauteile nicht abgeschätzt werden. Ob sich das elektrische Feld negativ auf die unterschiedlichen Bauteile

auswirkt, hängt auch von den Materialien bzw. Materialkombinationen der Turbinenbauteile ab, sodass allgemein gültige und standortübergreifende Aussagen schwierig sind.

#### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Aus Sicht des Projektteams sind bezüglich des IDA-Ansatzes noch viele Fragen offen. Ergänzend zu den bereits erwähnten Punkten kann es zu Haftungsproblemen kommen, falls die Elektrifizierung nachweislich zu Beschädigungen von Anlagebauteilen führen sollte. Aus biologischer Sicht ist unklar, ob der IDA-Ansatz nicht zu einem erhöhten Prädationsrisiko im Unterwasser führt. Dem Projektteam stehen aktuell zu wenige Informationen zur Verfügung, um das Potenzial des IDA-Ansatzes zuverlässig einschätzen zu können. Sollte dieser Ansatz als aussichtsreich eingestuft werden, empfiehlt das Projektteam, Tests an einer kleineren Wasserkraftanlage durchzuführen, um Erfahrungen zu sammeln. Ein Test bei einer grossen Wasserkraftanlage wie dem KWWB oder WKW BAN macht aus Sicht des Projektteams erst Sinn, wenn die Untersuchungen bei kleineren Wasserkraftanlagen positiv ausfallen. Dies betrifft sowohl den Betrieb als auch die Auswirkungen auf Fische. Klar ist jedoch, dass die Überlebensraten mit dem IDA-Ansatz nur bis zu einem gewissen Grad erhöht werden können. Die Sicherstellung eines verletzungsfreien Abstiegs für den Grossteil der abwandernden Fische kann mit diesem Ansatz hingegen voraussichtlich nicht erreicht werden. Für weitere Informationen zum IDA-Ansatz wird auf die Publikation von Geiger und Cuchet (2021) [40] verwiesen.

### **3.13 Erhöhung Wehrabfluss bei hoher Abstiegsaktivität**

Bei der Erhöhung des Wehrabflusses bei hoher Abstiegsaktivität handelt es sich um eine betriebliche Massnahme. Das Ziel dieses Ansatzes ist es, dass möglichst viele Fische über das Wehr absteigen, da der Abstieg über das Wehr in der Regel mit einem geringeren Verletzungsrisiko behaftet ist als der Abstieg über die Turbinen. Der Nachteil dieser Massnahme ist, dass durch den erhöhten Wehrabfluss bei Kraftwerken Produktionseinbussen entstehen, welche insbesondere von der Fallhöhe und der Dauer der Massnahme abhängig sind.

Die Erhöhung des Wehrabflusses bei hoher Abstiegsaktivität ist vor allem dann eine interessante Massnahme, wenn in einem Gewässer ausgeprägte Abwanderungsspeaks stattfinden, welche gut prognostiziert bzw. quantifiziert werden können. Dies ist in der Regel v.a. bei diadromen Arten wie dem Lachs und dem Aal der Fall. Im Gegensatz dazu ist bezüglich des Abwanderverhaltens von potamodromen Fischarten noch wenig bekannt. Die Wirkungskontrollen der Fischabstiegsanlagen beim Kleinwasserkraftwerk Stropfel und beim Dotierkraftwerk Rüchlig haben zwar gezeigt, dass vor allem im Herbst viele kleine Cypriniden absteigen [41][22]. Bezüglich der Korrelation abiotischer Faktoren mit dem Abwanderverhalten adulter potamodromer Arten konnten bei beiden während dieses Projekts durchgeführten Telemetriestudien [2][4] zwar Trends festgestellt werden, wobei die Streuung jeweils gross war. Ähnliche Feststellungen finden sich auch in der Literatur [18]. Aufgrund dieser Erkenntnisse wird nicht davon ausgegangen, dass sich die Abwanderung adulter potamodromer Fische mehrerer Arten auf kurze Zeiträume konzentriert.

Anstatt die Fischabstiegsaktivität aufgrund von abiotischen Faktoren abzuschätzen, könnte das Fischaufkommen auch in Echtzeit erfasst werden. Bisher gab es hierfür jedoch kaum praktisch einsetzbare Technologien. In den letzten Jahren entwickelte sich die Technologie der sogenannten *Live Imaging Sonare* allerdings stetig weiter, sodass heute kostengünstige Sonargeräte verfügbar sind, mit welchen Fische in Echtzeit beobachtet werden können. Inwieweit die Fischaktivität mit diesen neuen

Sonargeräten automatisiert erfasst werden kann, wird aktuell im Rahmen eines laufenden Pilotprojekts beim Kleinwasserkraftwerk Stropfel der Axpo Kleinwasserkraft AG getestet [42]. Es kann zwar jetzt schon gesagt werden, dass dies prinzipiell möglich ist, jedoch nicht ohne Einschränkungen. Zu diesen Einschränkungen zählt, dass mit dem Sonar insbesondere bei grösseren Kraftwerken nur ein Teil des gesamten Kraftwerkseinlaufs beobachtet werden kann, dass kleinere Fische je nach Umweltbedingungen (z.B. bei hoher Trübung) kaum oder nicht erkennbar sind und dass es je nach Strömungsbedingungen schwierig ist, Geschwemmsel von Fischen zu unterscheiden. Es ist jedoch möglich, dass die Fischaktivität bei gewissen Kraftwerken zukünftig mittels *Live Imaging Sonaren* automatisiert abgeschätzt werden kann. Wie viel diese Technologie für betriebliche Massnahmen bringt, hängt insbesondere davon ab, wie stark sich die Abwanderung der Zielfischarten im entsprechenden Gewässer auf kurze Zeiträume konzentriert. *Live Imaging Sonaren* könnten auch dafür eingesetzt werden, um diese Fragestellung zu beantworten [42].

Ob sich die Erhöhung des Wehrabflusses während hoher Abstiegsaktivität als Fischabstiegsmassnahme eignet, hängt auch vom Bautyp des Kraftwerks ab. Bei Ausleitkraftwerken mit einem langen Oberwasserkanal – wie dem KWWB – ist diese Massnahme generell nicht geeignet. Es müsste nämlich eine sehr grosse Wassermenge abgegeben werden, damit sich möglichst viele Fische schon bei der Abzweigung zwischen dem Oberwasserkanal und der Restwasserstrecke für einen Abstieg über das Wehr entscheiden. Fische, welche in den Oberwasserkanal einschwimmen und vor den Turbinen nach einem alternativen Abstiegskorridor suchen, können den zusätzlichen Wehrüberfall hingegen nicht wahrnehmen, sodass die Erhöhung des Wehrüberfalls für diese Fische wirkungslos ist. Hinzu kommt, dass die Erhöhung des Wehrabflusses zu künstlichen Hochwasserereignissen in der Restwasserstrecke führen würde, durch welche potenziell die Fischfauna in der Restwasserstrecke geschädigt wird. Bei Blockkraftwerken – wie dem WKW BAN – befinden sich die Wehrfelder hingegen in unmittelbarer Nähe zu den Turbinen. Wenn absteigende Fische in diesem Fall bei der Turbinenpassage zögern und nach einem alternativen Korridor suchen, ist es naheliegender, dass sie den zusätzlichen Wehrüberfall wahrnehmen und entsprechend über das Wehr absteigen.

Die Kosten für die Erhöhung des Wehrabflusses hängen einerseits von kraftwerksspezifischen Parametern, insbesondere der Fallhöhe und dem Wirkungsgrad, und andererseits von der Dauer und des abzugebenden Abflusses ab. Somit kann keine allgemeingültige Zahl für die Kosten dieser Massnahme angegeben werden. Nachfolgend wird jedoch aufgezeigt, wie diese Kosten abgeschätzt werden können. Gemäss Giesecke et al. (2014) [43] kann die Elektrizitätsproduktion von mittelgrossen Wasserkraftwerken mit folgender Gleichung abgeschätzt werden.

$$E = 0.0085 \cdot Q \cdot h_f \cdot t$$

E = Elektrizitätsproduktion [MWh]

Q = Abfluss [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$h_f$  = Fallhöhe [m]

t = Dauer [h]

### Rechenbeispiel

Wenn bei einem Kraftwerk mit einer Fallhöhe von  $h_f = 10$  m für eine Dauer von  $t = 4$  Wochen = 672 h pro Jahr ein Abfluss von  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$  für den Fischabstieg abgegeben werden soll, führt dies zu jährlichen Produktionsverlusten von  $E = 5'712$  MWh. Bei einem Strompreis von 56 CHF/MWh bzw. 100 CHF/MWh entspricht dies jährlichen Erlöseinbussen von rund CHF 320'000 bzw. CHF 571'000.

Neben den Erlöseinbussen ergeben sich auch grosse energiepolitische Konsequenzen, wenn eine Vielzahl an Wasserkraftwerken zur selben Zeit stark gedrosselt wird. Vor Umsetzung dieser Massnahme müssten die Folgen für die heimische Energieversorgung und Netzstabilität vertieft abgeklärt werden.

#### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Die Erhöhung des Wehrabflusses bei hoher Abstiegsaktivität ist aufgrund der Kraftwerksanordnung beim KWWB nicht zielführend. Die Anwendung beim WKW BAN ist eher denkbar. Eine effiziente Umsetzung ist jedoch nur möglich, wenn das Abwanderungsverhalten gut vorausgesagt oder in Echtzeit beobachtet werden kann und zudem konzentrierte Abwanderungsspeaks auftreten. Zudem muss zuvor geklärt werden, wie hoch die Verletzungsraten bei der Wehrpassage sind.

### **3.14 Reduktion Teillastbetrieb**

Der Wirkungsgrad von Turbinen hängt unter anderem von der Beaufschlagung ab, wobei der Wirkungsgrad von Kaplan- und Francisturbinen typischerweise bei einer Beaufschlagung von 60–95% des Ausbaudurchflusses maximal ist [43]. Der maximale Wirkungsgrad wird erreicht, wenn möglichst geringe Turbulenzen auftreten und die Laufradschaufeln weit geöffnet sind. Diese Faktoren kommen auch den Fischen zugute, sodass generell von einer verhältnismässig hohen Überlebensrate ausgegangen wird, wenn die Turbinen wirkungsgradoptimiert betrieben werden. Im Teillastbetrieb werden Kaplan-Turbinen typischerweise mit unveränderter Drehzahl aber einem geringeren Öffnungswinkel der Laufradschaufeln betrieben. Dies führt zu kleineren Öffnungen zwischen den Laufradschaufeln und somit einem erhöhten Kollisionsrisiko für abwandernde Fische, wodurch sich die Überlebensrate reduziert. Bei den Sensorfisch-Versuchen beim WKW BAN [5] wurde dieses erhöhte Kollisionsrisiko im Teillastbetrieb beobachtet, auch wenn das Kollisionsrisiko selbst im Teillastbetrieb relativ gering war. Die Sensorfisch-Versuche zeigten jedoch, dass das druckbedingte Schädigungsrisiko beim WKW BAN im Volllastbetrieb höher ist als im Teillastbetrieb, was ein Argument gegen diese Massnahme darstellt. Wie hoch das kollisionsbedingte und druckbedingte Verletzungsrisiko beim WKW BAN effektiv ist, konnte mit den Sensorfisch-Versuchen jedoch nicht ermittelt werden. Somit kann nicht abschliessend beurteilt werden, ob bzw. wie viel höher die Überlebensrate beim WKW BAN im Volllastbetrieb als im Teillastbetrieb ist. Eine pauschale Beantwortung dieser Fragestellung ist auch schwierig, da diese art- und grössenspezifisch ist.

Bei Laufwasserkraftwerken bestimmt das Wasserdargebot primär, ob Turbinen im Teil- oder Volllastbetrieb betrieben werden. In gewissen Konstellationen, d.h. insbesondere bei Kraftwerken mit vielen Turbinen, kann es jedoch betriebliche Optimierungsmöglichkeiten geben. Damit ist gemeint, dass bei einem bestimmten Wasserdargebot beispielsweise eine Turbine mit Volllast betrieben werden kann, anstelle des Betriebs von zwei Turbinen mit Teillast. Die Reduktion des Teillastbetriebs ist eine Massnahme, welche relativ schnell und mit verhältnismässig geringen Investitionskosten umgesetzt werden kann. Je nach Kraftwerk müssen hierbei jedoch einige Randbedingungen berücksichtigt werden. In den meisten Fällen wird aber von einem relativ geringen Optimierungspotenzial ausgegangen, da die Turbinen im Ist-Zustand wirkungsgradoptimiert betrieben werden und der Teillastbetrieb somit in vielen Fällen bereits reduziert wird. Das Optimierungspotenzial der Reduktion des Teillastbetriebs ist sehr kraftwerksspezifisch und kann auch zwischen unterschiedlichen Jahren stark variieren. Das Optimierungspotenzial kann durch die Berechnung der Überlebensraten von über die Turbinen absteigenden Fischen berechnet werden, wobei die hierfür bekannten Modell nur die kollisionsbedingten und nicht die druckbasierten Schäden berücksichtigen. Generell kann gesagt werden, dass die Überlebensrate von über die

Turbinen absteigenden Fischen durch die Reduktion des Teillastbetriebs in den meisten Fällen – wenn überhaupt – nur geringfügig erhöht werden kann. Die Wiederherstellung des sicheren Fischabstiegs für einen Grossteil der abwandernden Fische kann mit dieser Massnahme hingegen nicht erreicht werden.

#### Fazit für das KWWB und WKW BAN

Es wird davon ausgegangen, dass die Überlebensraten beim KWWB und WKW BAN durch die Reduktion des Teillastbetrieb nur geringfügig erhöht werden können und dass es sich somit dabei um keine Massnahme handelt, mit welcher dem Grossteil der abwandernden Fischen ein sicherer Abstieg ermöglicht werden kann.

### **3.15 Eignung der Massnahmen an Pilotstandorten**

In den Kapiteln 3.1–3.14 wurden unterschiedliche Alternativmassnahmen vorgestellt und auf mögliche Anwendungen beim KWWB und WKW BAN eingegangen. In Tab. 3.1 wird die Bewertung der unterschiedlichen Massnahmen bezüglich einer Anwendung beim KWWB und WKW BAN zusammengefasst. Es wurde versucht, die in Tab. 3.1 gezeigte Bewertung möglichst ganzheitlich durchzuführen, d.h. es wurden neben den Kosten und dem voraussichtlichen Nutzen auch noch weitere Aspekte wie die Personensicherheit und betriebliche Aspekte berücksichtigt. Bei vielen Massnahmen ist jedoch aufgrund von fehlenden Erfahrungen sowohl die Abschätzung der Kosten als auch des Nutzens schwierig. Es ist somit möglich, dass diese Bewertung aufgrund neuer Erkenntnisse zukünftig angepasst werden muss. In Tab. 3.1 wurde zwischen einer negativen, neutralen und positiven Bewertung unterschieden:

- Negative Bewertung: Es wird von einem schlechten Nutzen-Kosten-Verhältnis ausgegangen oder die Massnahme wird aus anderen Gründen als ungeeignet eingeschätzt (z.B. Personensicherheit, betriebliche Aspekte).
- Neutrale Bewertung: Es wird von einem mittleren Nutzen-Kosten-Verhältnis ausgegangen oder die Idee ist zwar im Grundsatz vielversprechend, es ist jedoch noch kein kommerzielles System verfügbar und es bestehen erhebliche Wissensdefizite bezüglich der Effizienz.
- Positive Bewertung: Diese Massnahmen werden als vielversprechend erachtet und es ist möglich, dass diese Massnahmen im Vergleich zu Leitrechen-Bypass-Systemen ein besseres Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweisen. Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass diese Massnahmen auch unter Berücksichtigung weiterer Aspekte wie der Personensicherheit und betrieblichen Aspekten realisierbar sind. Eine positive Bewertung bedeutet nicht automatisch, dass diese Massnahme ein gutes Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweist, da für viele Massnahmen wichtige Grundlagen zur Berechnung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses fehlen. Massnahmen mit einer positiven Bewertung werden jedoch als vielversprechend erachtet und somit in Kapitel 4 genauer betrachtet.

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

**Tab. 3.1 Bewertung unterschiedlicher Alternativmassnahmen zu Leitrechen-Bypass-Systemen für den Fischabstieg beim KWWB und WKW BAN; - negative, o neutrale und + positive Bewertung; \*Bewertung der Eignung nur in Kombination mit einem oder mehreren Bypässen**

#### 4. Standortsspezifische Beschreibung vielversprechender Massnahmen

In Kapitel 3 wurden diverse alternative Massnahmen zur Verbesserung des Fischabstiegs an Schweizer Mittellandflüssen anhand von Literaturangaben und Praxisbeispielen beschrieben. Alle vielversprechenden Massnahmen, d.h. Massnahmen mit einer positiven und neutralen Bewertung in Tab. 3.1, werden in diesem Kapitel kraftwerksspezifisch genauer beschrieben. In Kapitel 4.1 wird dabei auf Massnahmen eingegangen, für welche die Rahmenbedingungen beim KWWB und WKW BAN ähnlich sind. In Kapitel 4.2 werden die vielversprechendsten standortsspezifischen Massnahmen für das KWWB und in Kapitel 4.3 für das WKW BAN beschrieben. Zudem wird versucht, den Nutzen und die Kosten dieser Massnahmen grob abzuschätzen, wobei diese Abschätzung nur auf hoher Flughöhe erfolgt.



## 4.1 Kraftwerke Wildegg-Brugg und Bannwil

### 4.1.1 Erhöhung Barrierewirkung Einlaufrechen

In Kapitel 3.3 wurde beschrieben, dass die Barrierewirkung von bestehenden Einlaufrechen auf unterschiedliche Arten erhöht werden kann. Es wurde auch erläutert, warum eine Erhöhung der Barrierewirkung durch die Verringerung des lichten Stababstands und die Elektrifizierung des bestehenden Einlaufrechens beim KWWB und WKW BAN nicht zielführend sind. Die Erhöhung der Barrierewirkung mit weiteren sensorischen Reizen wie Licht und Schall wäre hingegen denkbar.

Prinzipiell ist dem Projektteam, wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben, kein kommerzielles System bekannt, mit welchem die bestehenden Einlaufrechen des KWWB und WKW BAN mit anderen sensorischen Reizen als Strom nachgerüstet werden könnten und mit welchem Fische nachweislich an der Rechenpassage gehindert werden. Die Idee, dass ein solches System beim KWWB und WKW BAN zumindest teilweise funktionieren könnte, entstand während der Telemetriestudien. In diesen Studien wurde gezeigt, dass die meisten Fische bei den Turbineneinläufen zögern, bevor sie über eine der Turbinen absteigen. Somit gibt es offensichtlich mindestens einen Faktor, welcher die Fische stört und zumindest für eine gewisse Zeit an der Turbinenpassage hindert. Ob es sich bei diesem Faktor um den Einlaufrechen selbst, hydraulische Signaturen oder akustische Störgeräusche handelt, kann aktuell nicht gesagt werden. Durch die Kombination dieses Störfaktors mit einer zusätzlichen sensorischen Barriere, könnte es sein, dass Fische dadurch zumindest vorübergehend oder im Idealfall ganz an einer Turbinenpassage gehindert werden. Durch den Bau eines Bypasses könnte den Fischen ein alternativer Abstiegskorridor zur Verfügung gestellt werden, auch wenn die Fische nicht dahin geleitet werden würden, sondern den Bypass nur durch Suchbewegungen finden würden.

Beim KWWB und WKW BAN könnte ein solches System gegebenenfalls während der Turbinenrevision im Schutz der Dammbalken installiert werden. Basierend auf Literaturangaben mit anderen sensorischen Barrieren werden die Chancen, dass damit ein breites Artenspektrum nachhaltig geschützt werden kann, als eher gering eingeschätzt. Falls diese Variante beim KWWB oder dem WKW BAN dennoch weiterverfolgt werden sollte, wäre dies aus Sicht des Projektteams nur im Rahmen eines temporären Pilotversuchs mit einer umfassenden Wirkungskontrolle zielführend.

### 4.1.2 *Restoration Hydro Turbine* (RHT)

Wie in Kapitel 3.11.2 beschrieben, wurden RH-Turbinen bisher erst bei kleinen Kraftwerken und ohne verstellbare Laufradschaufeln umgesetzt. Somit ist aktuell noch nicht klar, ob die bestehenden Kaplan-Turbinen beim KWWB oder WKW BAN durch RH-Turbinen ersetzt werden können, bzw. dass mit RH-Turbinen ein zuverlässiger und reibungsloser Betrieb ohne grosse Produktionseinbussen möglich ist. Zudem ist auch nicht klar, ob das Verletzungsrisiko auch für heimische potamodrome Arten so gering ist wie für die bisher getesteten diadromen Arten (Kapitel 3.11.2). Dies müsste zuerst in Laborversuchen und anschliessend im Feld bei einer Pilotanlage untersucht werden.

Klar ist, dass der Einsatz von RH-Turbinen ohne verstellbare Laufradschaufeln beim KWWB und WKW BAN nicht zielführend ist, bzw. zu sehr hohen Produktionseinbussen führen würde. Dies liegt v.a. daran, dass das KWWB nur zwei Turbinen und das WKW BAN drei Turbinen hat, welche entsprechend häufig im Teillastbetrieb betrieben werden. Wie in Kapitel 3.11.2 erwähnt, ist der Wirkungsgrad von RH-Turbinen mit fixen Laufradschaufeln im Teillastbetrieb deutlich schlechter als von Kaplan-Turbinen.

Der Einsatz von RH-Turbinen mit verstellbaren Laufradschaufeln wäre hingegen denkbar und stellt aus Sicht des Projektteams durchaus einen möglichen Sanierungsansatz für den Fischabstieg dar. Da bisher jedoch noch keine Betriebsverfahren mit RH-Turbinen mit beweglichen Laufradschaufeln und mit grossen RH-Turbinen im Allgemeinen vorliegen, empfiehlt das Projektteam, diese Turbinen zuerst bei einem kleineren Kraftwerk zu testen. Der Vorteil eines Tests bei einem kleineren Kraftwerk ist, dass die Kosten im Allgemeinen und die Produktionseinbussen bei etwaigen Problemen geringer sind. Zudem wäre es beim KWWB und WKW BAN aufgrund der Kraftwerksgrösse kaum möglich, bzw. sehr aufwändig, die Verletzungen von über die Turbinen absteigenden Fischen im Feld zu quantifizieren. Dies wäre zwar auch bei kleineren Kraftwerken eine grosse Herausforderung, jedoch wäre dies deutlich realistischer als beim KWWB oder WKW BAN. Sollten sich die RH-Turbinen sowohl aus betrieblicher als auch aus fischbiologischer Sicht bewähren, könnten diese stufenweise bei grösseren Kraftwerken eingesetzt werden.

Aus den genannten Gründen empfiehlt das Projektteam RH-Turbinen beim KWWB und WKW BAN erst als Fischabstiegsmassnahme in Betracht zu ziehen, wenn sowohl Betriebserfahrungen als auch Informationen bezüglich des Verletzungsrisikos potamodromer Fischarten bei vergleichbaren Turbinen vorliegen. Antworten auf diese Fragen sollte das bereits in Kapitel 3.11.2 erwähnte Projekt beim Kraftwerk Eglisau liefern, falls dieses nach der Machbarkeitsstudie weiterverfolgt wird.

## 4.2 Kraftwerk Wildegg-Brugg

### 4.2.1 *BioAcoustic Fish Fence* in Kombination mit einem Bypass

Theoretisch könnte versucht werden, den Fischabstieg beim KWWB mittels eines BAFF-Systems in Kombination mit einem Bypass zu verbessern. In diesem Kapitel wird kurz beschrieben, wie ein solches BAFF-System beim KWWB aussehen könnte und welche weiteren Schritte das Projektteam empfiehlt.

Gemäss dem technischen Vorprojekt [1] beträgt die mittels der Kontinuitätsgleichung für den Volllastbetrieb berechnete Anströmgeschwindigkeit beim KWWB  $v_a = 1.24$  m/s. Um die in Kapitel 3.6 angegebene Normalkomponente der Anströmgeschwindigkeit  $v_n = 0.25$  m/s einhalten zu können, müsste das BAFF-System somit mit einem sehr flachen horizontalen Anströmwinkel von rund  $11.5^\circ$  installiert werden. Dadurch würde das BAFF-System 300 m lang werden, was fast der dreifachen Länge des im technischen Vorprojekts geplanten *Bar Racks* entspricht. Bei diesen Berechnungen handelt es sich nur um eine grobe Abschätzung. Sollte ein BAFF-System beim KWWB weiterverfolgt werden, könnte die Linienführung mit mehreren Knicken auf das Geschwindigkeitsfeld abgestimmt werden. Doch schon diese vereinfachte Berechnung zeigt, dass ein BAFF-System beim KWWB sehr lang werden würde. Das BAFF-System müsste mit einem Bypass kombiniert werden, welcher weitgehend aus dem technischen Vorprojekt übernommen werden könnte. Beim KWWB müsste das BAFF-System vorzugsweise vom orografisch linken zum rechten Ufer angeordnet werden. Gründe hierfür sind, dass die Realisierung eines Bypasses auf der orografisch rechten Seite deutlich einfacher machbar ist, und dass sich die aktuelle, wie auch die Stand 2023 geplante neue FAH am orographisch rechten Ufer befindet. Somit würde das BAFF-System bei dieser Anordnung aufsteigende Fische nicht bei ihrer Weiterwanderung stören.

Dem Projektteam ist kein Kraftwerk bekannt, bei welchem ein mit dem Einsatz beim KWWB vergleichbares BAFF-System als Fischabstiegsanlage für potamodrome Arten realisiert wurde. Trotz der in Kapitel 3.6 beschriebenen positiven Resultate neuerer Studien, mangelt es bei diesem System noch an Erfahrungen, insbesondere bezüglich

des Betriebs in Schweizer Gewässern und bezüglich der Leitwirkung von absteigenden potamodromen Arten. Daher kann der Nutzen aktuell nicht quantifiziert werden. Zudem eignet sich das KWVB aufgrund der Kraftwerksgrösse und aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeiten nur bedingt für Tests mit einem BAFF-System. Sollte das BAFF-System im Allgemeinen als zielführende Massnahme eingeschätzt werden, empfiehlt das Projektteam diese Technologie zuerst bei einem kleineren Kraftwerk zu testen, da dies mit deutlich geringeren Kosten möglich und die Durchführung der Wirkungskontrolle einfacher wäre. Sollte sich das BAFF-System bei kleineren Kraftwerken sowohl aus betrieblicher als auch aus fischbiologischer Sicht bewähren, könnte dieses im nächsten Schritt bei grösseren Kraftwerken installiert werden.

#### 4.2.2 Partielle Leitrechen

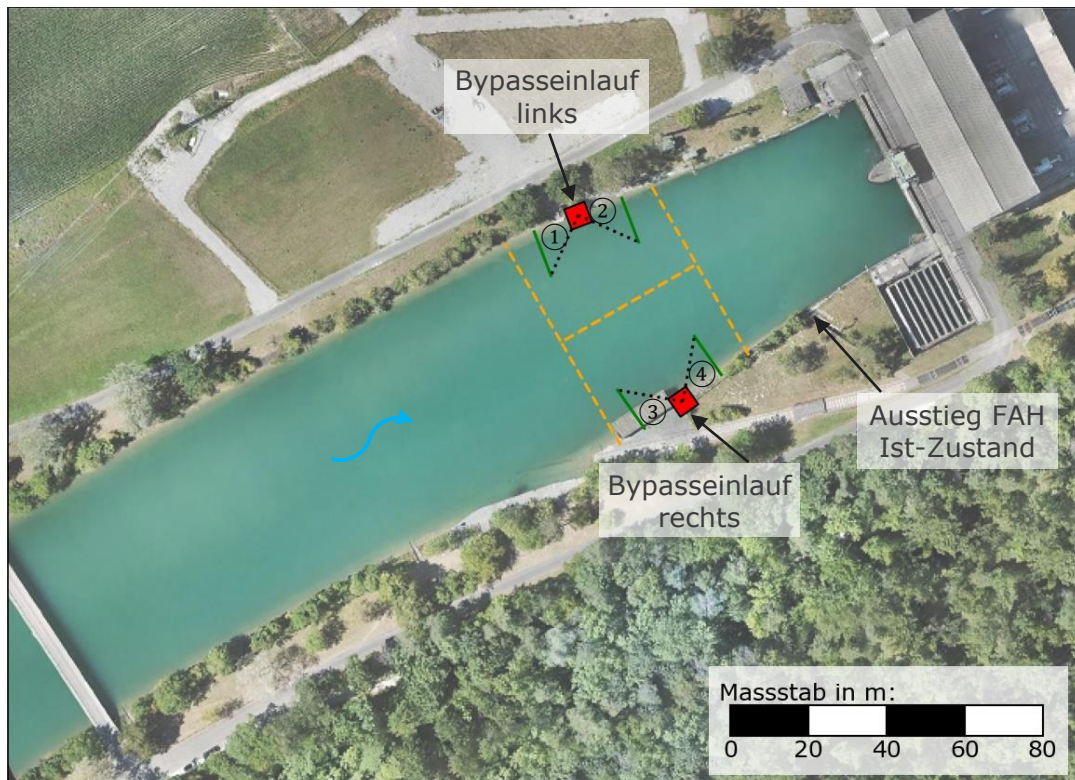
Partielle Leitrechen, d.h. Leitrechen, welche nicht den gesamten Gewässerquerschnitt abdecken, werden auch schon bei anderen Kraftwerken für den Fischabstieg eingesetzt. Ein Beispiel dafür ist das in Kapitel 3.8 beschriebene Kraftwerk Laudal in Norwegen. In diesem Kapitel werden partielle Leitrechen beschrieben, welche nicht die gesamte Gewässerbreite, jedoch die gesamte Wassertiefe abdecken. Somit kann bei diesen Rechen auch von ufernahen Leistrukturen gesprochen werden. Die Idee, Fische beim KWVB mittels partieller Leitrechen zu einem Bypass zu leiten, entstand bereits während der Analyse der Daten der akustischen Telemetriestudie. Gemäss dem akustischen Telemetriebericht [2] fanden rund 40% der Suchbewegungen der Alet in den linken 10% des Kanals statt und rund 30% in den rechten 10% des Kanals statt. Bei den Barben betragen diese Prozentsätze 50% (links) bzw. 5% (rechts). Interessant ist zudem, dass sich Alet schon bei der ersten Annäherung auf die Uferbereiche konzentrierten, während sich Barben vermehrt auch in der Kanalmitte dem Kraftwerk näherten. Um den Nutzen dieser partiellen Leitrechen besser abschätzen zu können und um die Anordnung zu optimieren, wurde ein Modell entwickelt, welches auf den Schwimmpfaden der akustischen Telemetriestudie beruht und in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben wird.

##### 4.2.2.1 Annahmen und Modellaufbau

Das Hauptziel des in diesem Kapitel beschriebenen Modells ist es, die partiellen Leitrechen so anzuordnen, dass das Nutzen-Kosten-Verhältnis möglichst hoch ist. Es handelt sich dabei um ein Optimierungsproblem, da längere Rechen voraussichtlich zwar generell zu einer besseren Leiteffizienz, aber auch höheren Investitions- und Betriebskosten sowie Produktionsverlusten führen. Dieses Modell unterliegt diversen Annahmen, welche nachfolgend beschrieben werden. Da das Modell die Realität nur teilweise abbildet und mit Unsicherheiten behaftet ist, müssen die Ergebnisse entsprechend vorsichtig interpretiert werden. Das Modell eignet sich jedoch sehr gut, um unterschiedliche Rechenkonfigurationen miteinander zu vergleichen.

Abb. 4.1 zeigt den turbinennahen Teil des Oberwasserkanals des KWVB, auf welchen sich auch die akustische Telemetriestudie fokussierte. Die roten Quadrate an beiden Ufern deuten Bypasseinläufe an. Die schwarz gestrichelten Linien zeigen mögliche partielle Leitrechen, welche von ① bis ④ durchnummeriert sind. Die Rechen ① und ③ sind dabei gegen die Fließrichtung geneigt, um stromabwärts schwimmende Fische in Richtung des entsprechenden Bypasses zu leiten. Im Gegensatz dazu sind die Rechen ② und ④ so ausgerichtet, dass entlang des Ufers stromaufwärts schwimmende Fische zum Bypass geleitet werden. Prinzipiell können mit dem Modell vier Rechen gemeinsam analysiert werden. Es können aber auch beispielsweise nur die linken oder nur die gegen die Fließrichtung ausgerichteten Rechen betrachtet werden, um den Nutzen der unterschiedlichen Rechen besser abschätzen zu können. Bei den nachfolgend beschriebenen grünen und orange strichlierten Linien handelt es sich nicht um konstruktive Elemente, sondern um Hilfslinien, welche für die

Auswertung genutzt wurden. Die grünen Linien in Abb. 4.1 verbinden jeweils das wasserseitige Rechenende mit dem Ufer. Diese Linien müssen für die Rechen ① und ③ in Fließrichtung und für die Rechen ② und ④ gegen die Fließrichtung gekreuzt werden, damit ein Fisch erfolgreich zu einem Bypass geleitet werden kann. Die mit orange strichlierten Linien umrandeten Bereiche deuten den Nahbereich der Rechen an. Diese Linien befinden sich im Uferbereich jeweils rund 20 m unter- bzw. oberstrom der Bypasseinläufe und verlaufen bis zur Kanalmitte. Diese Bereiche wurden für die Beurteilung mehrere Abstiegsversuche genutzt.



**Abb. 4.1** Eine der mit dem Modell untersuchte Anordnung der partiellen Leitreechen beim KWWB mit vier jeweils 17 m langen Rechen und zwei Bypässen (Quelle: Axpo).

In den nachfolgenden Schritten wird beschrieben, welche Positionen und Parameter im Rahmen dieses Projekts untersucht wurden bzw. welchen Annahmen das Modell unterliegt.

#### Schritt 1: Position des Bypasses

Aus den im akustischen Telemetriebericht gezeigten Heatmaps wird ersichtlich, dass die Suchbewegungen in den gesamten, durch das Hydrophonnetz beim MH des KWWB abgedeckten Uferbereichen, stattfanden. Während dieses Projekts wurde nur eine linksufrige und eine rechtsufrige Bypassposition untersucht. Die Bypässe wurden dabei generell möglichst nahe beim Turbineneinlauf positioniert, um für Fische attraktiv zu sein, welche im Nahbereich der Turbinen nach einem geeigneten Abstiegs-korridor suchen. Die Böschungsneigung des überwiegend trapezförmigen Oberwasserkanals des KWWB beträgt grösstenteils 1:2.5. Bei der in Abb. 4.1 gezeigten Bypassposition beträgt die Böschungsneigung noch rund 1:2. Von dort aus geht die Böschung vom Trapezprofil kontinuierlich zu einem Rechteckprofil über. Im Trapezprofil ist die Wassertiefe im ufernahen Bereich geringer als im Rechteckprofil. Dadurch ist die Installation und der Betrieb eines Rechens in diesem Bereich günstiger und es ist

auch einfacher, Fische zu einer definierten Bypassöffnung zu leiten. Aus diesen Gründen wird aktuell davon ausgegangen, dass die in Abb. 4.1 gezeigten Bypässe gut positioniert sind. In Abb. 4.1 befindet sich der Ausstieg aus der FAH unterstrom des Bypasses (Abb. 4.1). Über die FAH aufsteigende Fische würden bei der Weiterwanderung somit durch den Rechen und den Bypass gestört werden. Die FAH beim KWWB wird jedoch erneuert, sodass sich der Ausstieg aus der FAH zukünftig oberstrom des Bypasses befindet.

#### Schritt 2: Rechenwinkel

Bei dieser Auswertung wurde vereinfachend von einem im Grundriss betrachteten Winkel zu den Kanalwänden, und somit auch zur Hauptströmung, von  $45^\circ$  ausgegangen. Dieser Winkel kann in einer späteren Projektphase optimiert werden.

#### Schritt 3: Rechenlänge

Im Rahmen dieses Projekts wurden 8.5 m und 17 m lange Rechen untersucht, wobei in Abb. 4.1 die 17 m langen Rechen dargestellt sind. Rechtwinklig zum Ufer gemessen ragen diese Rechen 6 m bzw. 12 m in den Oberwasserkanal hinein.

#### Schritt 4: Annahme zur Leitwirkung

Für die Berechnung der Fischabstiegseffizienz muss eine Annahme für die Leitwirkung getroffen werden, wenn ein Fisch in den Nahbereich des Rechens schwimmt. In diesem Fall wurde von einer Leitwirkung von 100%, 80% und 60% ausgegangen, falls ein Fisch in Richtung der Leitwirkung des Rechens in den Nahbereich der Rechen schwamm. Dies wurde so definiert, dass ein Fisch die grünen Linien in Abb. 4.1 bei den Rechen ① und ③ in Fließrichtung und bei den Rechen ② und ④ gegen die Fließrichtung kreuzte. Die grünen Linien wurden in der Berechnung dabei landseitig verlängert, um ungenaue Schwimmpfade berücksichtigen zu können. Bei den Berechnungen mit einer Leitwirkung von 60% bzw. 80% wurden mit einer Monte Carlo Simulation pro untersuchter Konfiguration 500 Berechnungen durchgeführt. Die in diesem Bericht angegebenen Werte entsprechen jeweils dem Mittelwert aller Simulationen des entsprechenden Szenarios. Es wurde überprüft, dass die Ergebnisse der Monte Carlo Simulation konvergieren und die mathematisch bedingte Abweichung vernachlässigbar ist.

#### Schritt 5: Annahme bei mehreren Abstiegsversuchen

Die Berechnungen basieren auf den im Rahmen der akustischen Telemetriestudie aufgezeichneten Schwimmpfaden im Ist-Zustand. Teilweise kommt es vor, dass Fische die fiktiven Rechen mehrmals hintereinander kreuzen. Das Verhalten dieser Fische wäre im Fall von bereits installierten Rechen jedoch anders gewesen. Aus diesem Grund wurde bei Fischen, welche gemäss der Simulation durch den Rechen schwammen, erst wieder von einem neuen Abstiegsversuch ausgegangen, wenn die Fische den orange strichlierten Bereich seitlich oder in bzw. gegen die Fließrichtung verliessen und dann, wie im Schritt 4 beschrieben, wieder über die grünen Linien schwammen. Wie bei den grünen Linien wurde auch der orange strichlierte Bereich landseitig verlängert, um ungenauen Schwimmpfaden Rechnung zu tragen.

##### 4.2.2.2 Auswertung

Für die Analysen wurden alle im Rahmen der akustischen Telemetriestudie ermittelten Schwimmpfade verwendet. Dabei handelt es sich um die Schwimmpfade von 172 Alet, 137 Barben und 30 Fische anderer Arten. Jeder der Fische, von welchem ein Schwimmpfad aufgezeichnet wurde, wurde dabei in eine der folgenden Kategorien eingeteilt.

### Keine Annäherung

Von Fischen, welche dieser Kategorie zugeordnet wurden, ist zwar ein Schwimmpfad vorhanden, diese Fische schwammen jedoch auch im Ist-Zustand nicht in den Nahbereich eines im Modell platzierten Rechen. Dies bedeutet, dass sie nicht in den orange strichlierten Bereich in Abb. 4.1 schwammen. Da bezüglich des Verhaltens dieser Fische keine Aussage getroffen werden kann und da diese Fische aller Voraussicht nach nicht abstiegswillig waren, wurden diese Fische bei den nachfolgenden Analysen nicht berücksichtigt. Insgesamt näherten sich 294 der 339 Fische mit einem Schwimmpfad an die im Rahmen dieses Berichts untersuchten Rechen an, sodass die nachfolgende Datenanalyse auf den Schwimmpfaden dieser 294 Fische basiert.

### Bypasspassage

Diese Fische kreuzten den Rechen ① und ③ in Fließrichtung oder den Rechen ② und ④ gegen die Fließrichtung und wurden unter Berücksichtigung der entsprechenden Leitwirkung, welche bei den unterschiedlichen Simulationen mit Zufallszahlen in der Monte Carlo Simulation berücksichtigt wurde, in den Bypass geleitet.

### Turbinenpassage

Diese Fische stiegen nicht über den Bypass ab. Zudem hört der Schwimmpfad dieser Fische unterstrom der Bypässe auf.

### Verbleib Oberwasser

Diese Fische stiegen nicht über den Bypass ab. Zudem hört der Schwimmpfad dieser Fische oberstrom der Bypässe auf.

Basierend auf der Einteilung der Fische in die beschriebenen vier Kategorien wurden die Leit- und Schutzeffizienzen gemäss nachfolgenden Gleichungen berechnet. Diese Definitionen beruhen auf der Fachliteratur wie z.B. [20] und [21]. Die Leiteffizienz gibt dabei an, wie viele Fische in den Bypass geleitet werden und die Schutzeffizienz, wie viele Fische vor einer Turbinenpassage geschützt werden können. Da auch im Ist-Zustand viele Fische unbeschadet über die Turbinen absteigen können, darf die Schutzeffizienz nicht mit einer Verletzungs- oder Mortalitätsrate gleichgesetzt werden.

$$\text{Leiteffizienz [\%]} = \frac{\text{Bypasspassagen}}{\text{Bypasspassagen} + \text{Turbinenpassagen} + \text{Verbleib Oberwasser}}$$

$$\text{Schutzeffizienz [\%]} = \frac{\text{Bypasspassagen} + \text{Verbleib Oberwasser}}{\text{Bypasspassagen} + \text{Turbinenpassagen} + \text{Verbleib Oberwasser}}$$

Das primäre Ziel der partiellen Leitrechen mit einem Bypass ist, dass Fische verletzungsfrei ins Unterwasser absteigen können. Ein Teil der Fische kann aber voraussichtlich nicht in Richtung Bypass geleitet werden, sondern wird durch den Rechen nur geschützt und verbleibt im Oberwasser. Für diese Fische können immerhin turbinenbedingte Verletzungen verhindert werden. Diesen unterschiedlichen Schutzziele kann mit der Unterscheidung zwischen der Leit- und Schutzeffizienz Rechnung getragen werden.

Im Ist-Zustand ohne Rechen verblieb ein Teil der sich an das Kraftwerk annähernden Fische im Oberwasser, während ein Teil dieser Fische über die Turbinen abstieg. Um

einen Vergleich mit den Rechenkonfigurationen zu ermöglichen, wurde die Schutzeffizienz auch für dieses Referenzszenario berechnet. Die Berechnung einer Leiteffizienz ist für den Ist-Zustand nicht möglich, da in diesem Fall kein Bypass vorhanden ist und entsprechend keine Bypasspassagen vorkommen können.

#### 4.2.2.3 Resultate und Diskussion

In Tab. 4.1 sind die berechneten Leit- und Schutzeffizienzen für alle Fischarten, Alet und Barben zusammengefasst, wobei jeweils auch die entsprechenden Annahmen bzw. das Szenario aufgeführt ist. Tab. 4.1 enthält dabei alle Resultate unter der Annahme einer Leitwirkung von 80%, da dies als ein durchaus realistischer Wert betrachtet wird. Im Anhang 1 sind zudem die Resultate mit einer Leitwirkung von 60% bzw. 100% aufgeführt. In der Spalte «Alle» wurden, unabhängig von der Fischart, alle während der akustischen Telemetriestudie ermittelten Schwimmpfade berücksichtigt. Informationen zur Artzusammensetzung können dem akustischen Telemetriebericht [2] entnommen werden.

Rechen	Annahmen / Szenario		Schutzeffizienz [%]			Leiteffizienz [%]		
	Länge [m]	Leitwirkung [%]	Alle	Alet	Barben	Alle	Alet	Barben
	Referenzszenario Ist-Zustand		80	84	74	-	-	-
①②③④	8.5	80	89	95	85	54	66	38
①②	8.5	80	89	94	84	41	53	27
③④	8.5	80	86	93	81	42	60	23
①	8.5	80	88	93	84	33	41	25
②	8.5	80	87	93	81	28	44	12
③	8.5	80	86	92	81	37	51	21
④	8.5	80	84	91	77	25	43	5
①②③④	17	80	91	95	87	62	74	48
①②	17	80	90	95	86	52	66	36
③④	17	80	89	95	84	50	67	30
①	17	80	88	93	84	36	40	31
②	17	80	88	93	84	39	59	17
③	17	80	87	93	83	41	53	27
④	17	80	86	93	79	35	59	11

**Tab. 4.1 Zusammenfassung der berechneten artspezifischen Leit- und Schutzeffizienzen für verschiedene Konfigurationen partieller Leitrechen unter der Annahme einer Leitwirkung von 80%.**

Aus Tab. 4.1 wird ersichtlich, dass die berechnete Schutzeffizienz mit rund 80% auch im Ist-Zustand relativ hoch ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein Teil der Fische, welche während der akustischen Telemetrieuntersuchung vor dem MH des KWWB detektiert wurden, wahrscheinlich gar nicht absteigen wollte und nur zufällig vor dem KWWB auftauchte. Andererseits ist die hohe Schutzeffizienz im Ist-Zustand wahrscheinlich auch darauf zurückzuführen, dass ein Teil der Fische durch den bestehenden Einlaufrechen oder andere Faktoren von einer Turbinenpassage abgehalten wurde. Die effektive Verbesserung durch eine Rechenkonfiguration kann durch die

Berechnung der Differenz zwischen der Schutzeffizienz der entsprechenden Rechenkonfiguration und der Schutzeffizienz im Ist-Zustand ermittelt werden.

Tab. 4.1 zeigt, dass insbesondere die Leiteffizienzen je nach Fischart und Konfiguration stark variieren. Allen Konfigurationen ist jedoch gemeinsam, dass die berechneten Effizienzen für Alet höher sind als diejenigen für Barben. Dies ist auf die ausgeprägten, ufernahen Suchbewegungen der Alet zurückzuführen, welche in der akustischen Telemetriestudie ausführlich beschrieben wurden. Klar ist auch, dass die Schutz- und Leiteffizienzen für die 17 m langen Rechen höher sind als für die 8.5 m langen Rechen und dass die Schutz- und Leiteffizienzen höher sind, je mehr Rechen im Modell berücksichtigt wurden.

Ein Vergleich der Konfigurationen mit jeweils nur einem Rechen zeigt, dass je nach Fischart und Rechenlänge unterschiedliche Rechenpositionen zu den höchsten Leiteffizienzen führen. Generell kann jedoch gesagt werden, dass gegen die Fließrichtung geneigte Rechen (① und ③) für Barben zu einer höheren Leitwirkung führen als in Fließrichtung geneigte Rechen (② und ④). Bei Alet trifft dies nicht zu, bzw. ist es von der Rechenlänge abhängig.

Werden die beiden orografisch linksufrigen Rechen (① und ②) mit den beiden rechtsufrigen Rechen (③ und ④) verglichen, zeigt sich, dass die Leiteffizienzen der linken Rechen für Barben und die rechten Rechen für Alet etwas höher sind.

Bezüglich der Rechenlänge kann festgehalten werden, dass auch mit den 8.5 m langen Rechen relativ viele Alet geschützt bzw. geleitet werden können. Bei Barben sind die berechneten Leiteffizienzen für viele Konfigurationen mit den 8.5 m langen Rechen deutlich geringer als mit den 17 m langen Rechen.

Die in Tab. 4.1 gezeigten Resultate basieren auf einer Leitwirkung von 80%. Die Sensitivität dieses Parameters wurde durch die Berechnung der Effizienzen der gleichen Konfigurationen mit einer Leitwirkung von 60% und 100% untersucht. Die Resultate sind in Tab. 5.1 im Anhang 1 aufgeführt. Daraus wird ersichtlich, dass die Annahme der Leitwirkung einen relativ geringen Einfluss auf die Schutzeffizienz hat, was auf ein robustes Resultat hindeutet. Auf die Leiteffizienzen wirkt sich die Annahme der Leitwirkung jedoch stärker aus.

Mit der in Tab. 4.1 gezeigten Maximalkonfiguration, d.h. mit allen vier untersuchten Rechen mit einer Länge von jeweils 17 m, könnten gemäss dem Modell 95% aller Alet und 87% aller Barben geschützt werden. Die Leitwirkung von Alet beträgt gemäss dem Modell 74% und diejenige von Barben 48%. Bei der Interpretation dieser Resultate muss berücksichtigt werden, dass auch mit einem über den gesamten Kanalquerschnitt installierten *Bar Rack* keine hundertprozentige Schutz- und Leitwirkung erreicht werden könnte. Eine genaue Quantifizierung der Schutz- und Leitwirkung eines *Bar Racks* dieser Grössenordnung ist aktuell nur bedingt möglich, da noch keine vergleichbaren Anlagen realisiert wurden. Im technischen Vorprojekt [1] wird jedoch auf die im Labor untersuchte artspezifischen Schutz- und Leiteffizienzen von *Curved-Bar Racks* (CBR) eingegangen. Je nach Konfiguration ist es sogar denkbar, dass mit an beiden Ufern installierten partiellen Leitrechen höhere Schutz- und Leiteffizienzen erreicht werden können als mit über die gesamte Kanalbreite installierten *Bar Racks*. Dies insbesondere deshalb, da davon ausgegangen wird, dass das Risiko einer Rechenpassage bei physisch durchlässigen Rechen steigt, je länger ein Fisch entlang eines Rechens geleitet werden muss. Ein entlang des orografisch linken Ufers schwimmender Fisch müsste mit dem im technischen Vorprojekt geplanten *Bar Rack* entlang des 108 m langen Rechens bis zum rechtsufrig gelegenen Bypass geleitet werden.



Mit dem partiellen Leitrechen müsste derselbe Fisch nur wenige Meter entlang des Rechens zum orografisch linken Bypass geleitet werden.

Die Resultate in Tab. 4.1 zeigen aber auch, dass die berechneten Leiteffizienzen insbesondere für Barben für viele Rechenkonfigurationen tief sind. Für andere Fischarten als Alet und Barben können aufgrund der geringen Stichprobengrösse in der akustischen Telemetrieuntersuchung keine Aussagen getroffen werden. Somit kann zum aktuellen Zeitpunkt nicht abschliessend beurteilt werden, bis zu welchem Grad mit partiellen Leitrechen beim KWWB der sichere Fischabstieg für ein breites Fischartenspektrum und unterschiedliche Lebensstadien ermöglicht werden kann. Unklar ist zudem, ob entlang der Ufer aufsteigende Fische, wie im Modell berücksichtigt, in die Bypässe einschwimmen oder ob diese Fische in Richtung Kanalmitte ausweichen.

#### 4.2.2.4 Überlegungen für eine mögliche Umsetzung

In den Kapiteln 4.2.2.1–4.2.2.3 wurde vor allem auf die optimale Positionierung partieller Leitrechen und auf den potenziellen Nutzen eingegangen. Auch bezüglich der Umsetzung von partiellen Leitrechen inklusive eines Bypasses wurden schon erste Überlegungen angestellt. Diese ersten Überlegungen werden in diesem Kapitel kurz beschrieben, wobei diese vor einer Umsetzung in einem separaten Projekt detaillierter ausgearbeitet werden müssten. Ob die nachfolgend beschriebenen Ideen auch tatsächlich so umgesetzt werden können, kann aktuell noch nicht beurteilt werden, da dies insbesondere auch von bautechnischen Aspekten und den Kosten abhängt, welche erst in einer etwaigen nächsten Projektphase betrachtet werden.

An erster Stelle muss erwähnt werden, dass es sich insbesondere bei den in Fliessrichtung geneigten partiellen Leitrechen um ein neuartiges Konzept handelt, welches gemäss dem Kenntnisstand des Projektteams bisher bei keinem Kraftwerk umgesetzt wurde. Auch bezüglich der gegen die Fliessrichtung geneigten Rechen ist dem Projektteam kein Projekt bekannt, bei welchem partielle Leitrechen mit anschliessendem Bypass in einem trapezförmigen Oberwasserkanal installiert wurden. Somit würde es sich bei einem solchen Projekt auf jeden Fall um ein Pilotprojekt handeln, bei welchem der Erfolg trotz sorgfältiger Planung mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet ist. Aus diesem Grund wird empfohlen, dass vor der permanenten Installation von partiellen Leitrechen mit Bypässen beim KWWB ein temporärer Pilotversuch durchgeführt wird, bei welchem mobile Rechen und ein kostengünstiger Bypass umgesetzt werden. Bei der Planung dieses temporären Pilotversuchs könnten in einem ersten Schritt weitere Bypass- und Rechenkonfigurationen untersucht werden, um das Nutzen-Kosten-Verhältnis möglichst weiter erhöhen zu können. Basierend auf den in Kapitel 4.2.2.3 gezeigten Resultaten wäre es naheliegend, diesen Versuch mit den beiden linksufrig angeordneten Rechen durchzuführen.

Die Stabform und der Stababstand könnten vom technischen Vorprojekt des *Bar Racks* [1] übernommen werden. In diesem Fall würden vertikale Stäbe eingesetzt werden, welche entweder gekrümmt (CBR) oder abgewinkelt sind. Auch der lichte Stababstand von 50 mm könnte aus dem technischen Vorprojekt übernommen werden. Zumindest während der Testversuche könnten die Leitrechen gegebenenfalls, ähnlich wie der in Kapitel 3.8 beschriebene Rechen beim Kraftwerk Laudal, an einer schwimmenden Konstruktion befestigt werden. Ob sich eine schwimmende Konstruktion auch für einen permanenten Betrieb eignet, muss in einer späteren Phase geklärt werden. Wie im technischen Vorprojekt vorgeschlagen, könnte im Böschungsbereich unterhalb des Rechens eine rund 30–40 cm hohe Sohlleitwand installiert werden, um die Leitwirkung für sohlnah wandernde Fische zu verbessern. Denkbar wäre hierbei eine mit der Kanalwand verschraubte Stahlkonstruktion. Gegebenenfalls

könnte diese Stahlkonstruktion auch genutzt werden, um die einzelnen Rechenstäbe abzustützen.

Das technische Vorprojekt des *Bar Racks* hat gezeigt, dass die Rechenreinigung und die Geschwemmselentsorgung beim KWWB aufwändig und teuer sind. Um diese Kosten bei den partiellen Leitrechen so gering wie möglich zu halten, wird aktuell davon ausgegangen, dass für die Testversuche keine automatisierte Rechenreinigungsmaschine benötigt wird. Bei einer etwaigen permanenten Installation könnten auf der Rechenbrücke Antriebe vorgesehen werden, mit welchen die Rechenstäbe vertikal nach oben aus dem Wasser hinausgefahren werden können. Durch eine fix installierte Harke, welche zwischen die Rechenstäbe greift, könnte verklaustes Geschwemmsel beim Hochfahren der Rechenstäbe automatisch abgestreift werden. Im Idealfall kann diese Konstruktion so gebaut werden, dass der Grossteil des Geschwemmsels im Oberwasserkanal verbleibt, durch die Strömung in Richtung des Turbineneinlaufs transportiert wird und dort mit der bestehenden Rechenreinigungsmaschine beim Einlaufrechen entnommen werden kann.

Prinzipiell könnte der Bypass entsprechend dem im technischen Vorprojekt geplanten Bypass umgesetzt werden. Die Realisierung eines so grossen Bypasses ist jedoch mit hohen Kosten verbunden. Dies fällt umso mehr ins Gewicht, wenn sowohl linksufrig als auch rechtsufrig ein Bypass gebaut werden soll. Hinzu kommt, dass eine linksufrige Bypassführung aufgrund der im technischen Vorprojekt erwähnten Gründe teurer wäre als rechtsufrig. Daher wird für etwaige temporäre Versuche empfohlen, dass kein mit dem Unterwasser verbundener Bypass gebaut wird. Stattdessen könnten die Fische über einen Überfall, welcher dem Bypasseinlauf entspricht, in ein Zählbecken oder eine Zählreuse gelangen. Der Überfall soll dabei so konzipiert werden, dass dieser dem *point of no return* entspricht, sodass über den Überfall abgestiegene Fische nicht zurück in den Oberwasserkanal schwimmen können. Damit der temporäre Bypass nicht überläuft, müsste das Wasser in den Oberwasserkanal zurückgepumpt werden, wobei mit einer speziellen Vorrichtung sichergestellt werden müsste, dass keine Fische von der Pumpe angesaugt werden. Durch periodische Entleerungen könnte die Funktionstüchtigkeit des Systems überprüft werden. Falls das Zurückpumpen des Wassers zu keinen Fischverletzungen führt, könnte dieses Konzept auch zumindest teilweise für den permanenten Betrieb übernommen werden. In diesem Fall könnte ein Teil des Wassers zurückgepumpt werden, während ein Teil des Wassers über einen Bypass ins Unterwasser geführt wird, um einen kontinuierlichen und möglichst verzögerungsfreien Abstieg zu ermöglichen. Im Vergleich zum im technischen Vorprojekt beschriebenen Bypass könnten somit einerseits die Produktionsverluste minimiert werden, andererseits jedoch auch die Baukosten, da der Bypass durch das Zurückpumpen des Wassers deutlich kleiner gebaut werden könnte.

#### 4.2.3 Bypässe ohne Leitstruktur

Gemäss Kapitel 3.2 wird basierend auf Literaturangaben nicht davon ausgegangen, dass Bypässe ohne Leitstrukturen von vielen Fischen für den Abstieg genutzt werden würden. Die in der akustischen Telemetriestudie gemachte Beobachtung, dass sich die Suchbewegungen vieler Fische auf die ufernahen Bereiche konzentrieren, legt jedoch die Vermutung nahe, dass zumindest ein Teil dieser Fische über einen Bypass ohne Leitstrukturen abgestiegen wäre. Um die potenziellen Erfolgchancen von Bypässen ohne Leitstrukturen beim KWWB besser abschätzen zu können, wurde das in Kapitel 4.2.2 beschriebene Modell wie folgt modifiziert:

- Es werden keine Rechen implementiert, sondern nur Bypässe.

- Der Einflussbereich des Bypasses ist wasserseitig 1 m x 1 m gross. Landseitig wurde dieser Einflussbereich zur Berücksichtigung ungenauer Schwimmpfade verlängert.
- Anstelle der Leitwirkung wurde die Wahrscheinlichkeit der Bypassannahme eingeführt. Beträgt diese 100%, wird davon ausgegangen, dass alle Fische, welche in den Einflussbereich des Bypasses schwimmen, erfolgreich über den Bypass absteigen. Die unterschiedlichen Bypasskonfigurationen wurden auch mit Wahrscheinlichkeiten der Bypassannahme von 60% und 80% untersucht, wobei hierfür für jede Konfiguration eine Monte Carlo Simulation mit 500 Berechnungen durchgeführt wurde.

In Tab. 4.2 sind die Ergebnisse der Modellrechnungen von Bypässen ohne Leitvorrichtungen zusammengefasst. Zur besseren Vergleichbarkeit der Resultate mit den Resultaten der partiellen Leitrechen wurden die in Kapitel 4.2.2.2 eingeführten Definitionen der Leit- und Schutzeffizienz übernommen, auch wenn aufgrund des nicht Vorhandenseins eines Rechens strenggenommen weder eine Leit- noch eine Schutzwirkung entsteht. Der Bypassdurchfluss beeinflusst das Geschwindigkeitsfeld nur lokal, sodass der Einfluss auf das grossräumige Geschwindigkeitsfeld vernachlässigbar ist. Fische, welche mehrere Meter entfernt vom Bypass daran vorbei schwimmen, würden einen Bypass ohne Leitvorrichtungen somit voraussichtlich nicht wahrnehmen. Bei über den Bypass absteigenden Fischen wird somit davon ausgegangen, dass sie den Bypass durch die ufernahen Suchbewegungen zufällig finden.

Annahmen / Szenario			Schutzeffizienz [%]			Leiteffizienz [%]		
Bypass links	Bypass rechts	Wahrscheinlichk. Annahme [%]	Alle	Alet	Barben	Alle	Alet	Barben
		Referenzszenario Ist-Zustand	80	84	74	-	-	-
Ja	Ja	60	86	92	82	30	46	14
Ja	Ja	80	87	92	83	35	53	17
Ja	Ja	100	88	94	84	43	65	21
Ja	Nein	60	86	92	82	22	32	12
Ja	Nein	80	87	93	83	26	37	15
Ja	Nein	100	88	94	84	32	46	18
Nein	Ja	60	83	90	78	20	37	5
Nein	Ja	80	84	91	79	24	43	6
Nein	Ja	100	84	92	79	30	53	7

**Tab. 4.2 Zusammenfassung der berechneten artspezifischen Leit- und Schutzeffizienzen für unterschiedliche Konfigurationen von Bypässen ohne Leitvorrichtung.**

Das in Tab. 4.2 gezeigte Referenzszenario im Ist-Zustand wurde bereits in Kapitel 4.2.2.3 beschrieben. Aus Tab. 4.2 wird ersichtlich, dass die Schutz- und Leiteffizienzen von Alet – wie bei der Berechnung der partiellen Leitrechen – für alle untersuchten Konfiguration höher sind als für Barben. Ein rechtsufrig installierter Bypass erhöht die Schutzeffizienz im Vergleich zum Referenzszenario für Alet nur minimal und für Barben gar nicht. Im Gegensatz dazu könnte die Schutzeffizienz mit einem linksufrig installierten Bypass sowohl für Alet als auch für Barben gering verbessert werden. Durch eine Kombination des linken und rechten Bypasses könnten die

Schutzeffizienzen zwar noch etwas erhöht werden, die Verbesserung ist jedoch insbesondere für Barben marginal.

Selbst durch die Kombination des linken und rechten Bypasses würden unter den getroffenen Annahmen nur 14–21% der Barben, aber immerhin 46–65% der Alet einen dieser Bypässe für den Abstieg nutzen. Daraus lässt sich schliessen, dass Bypässe ohne Leitvorrichtung beim KWWB für Barben voraussichtlich kaum geeignet sind. Für Alet könnte diese Massnahme jedoch ein durchaus gutes Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweisen. Ein Vergleich der Resultate von Tab. 4.2 mit Tab. 4.1 zeigt aber auch, dass die Schutz- und Leiteffizienzen durch die Kombination der Bypässe mit partiellen Leitrechen deutlich höher ist als mit Bypässen ohne Leitvorrichtungen.

Da von anderen Fischarten als Alet und Barben aus der akustischen Telemetriestudie nur wenige Schwimmpfade vorhanden sind, können für diese Arten keine Aussagen bezüglich der Effizienzen gemacht werden. Beim KWWB soll der Fischabstieg für ein möglichst breites Artenspektrum verbessert werden. Mit aktuellem Kenntnisstand muss davon ausgegangen werden, dass sich auch weitere Fischarten ähnlich wie Barben verhalten und Bypässe ohne Leitvorrichtung den Abstieg für diese Arten entsprechend nur geringfügig verbessern würden. Aus diesen Gründen geht das Projektteam mit dem aktuellen Kenntnisstand nicht davon aus, dass es sich bei Bypässen ohne Leitvorrichtung für das KWWB um eine zufriedenstellende Fischabstiegslösung für ein breites Artenspektrum handelt. Sollte jedoch – wie in Kapitel 4.2.2.4 empfohlen – ein temporärer Pilotversuch mit partiellen Leitrechen durchgeführt werden, könnte im Rahmen dieser Untersuchung auch der Bypass ohne Leitrechen untersucht werden. Damit könnten einerseits weitere Erkenntnisse zu Bypässen ohne Leitvorrichtungen gewonnen werden. Andererseits könnten diese Versuche auch als Referenz zur Quantifizierung der Leitwirkung der partiellen Leitrechen dienen.

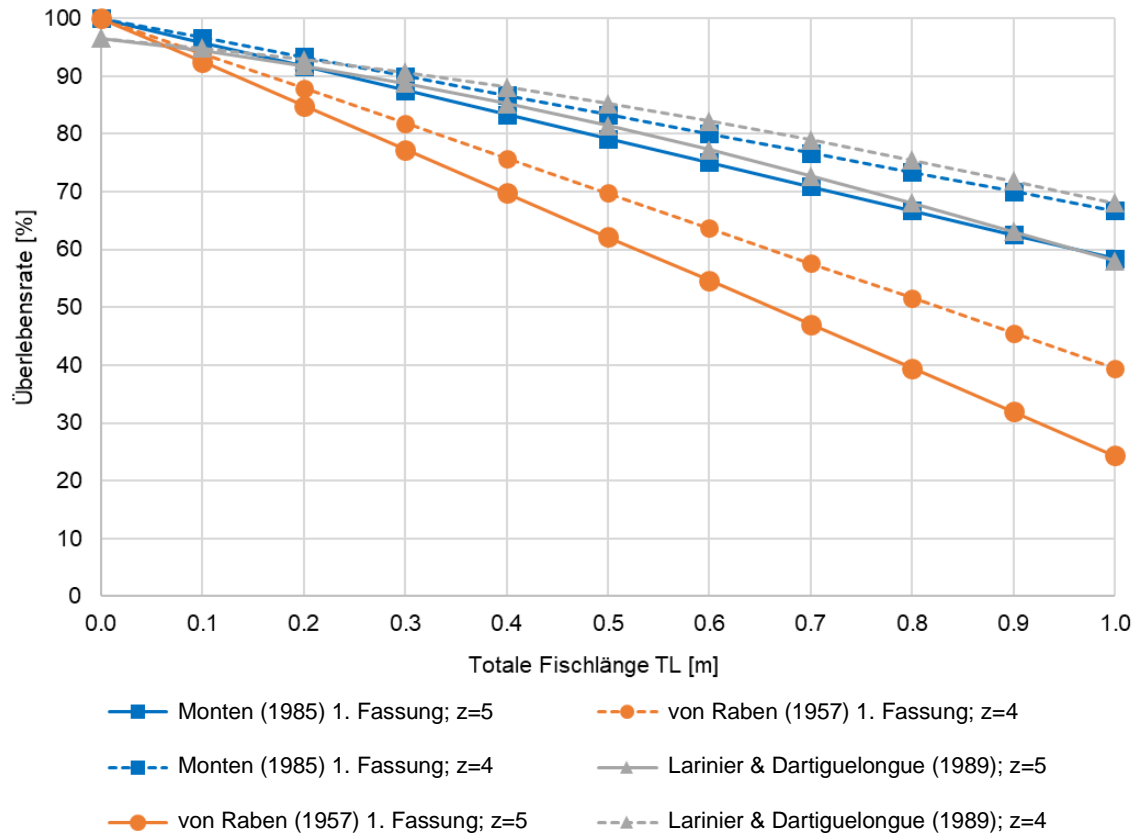
#### 4.2.4 Einsatz konventioneller schädigungsarmer Turbinen

Wie in Kapitel 3.11 beschrieben, beschränkt sich das Optimierungspotenzial bestehender Schweizer Kraftwerke bezüglich des Einsatzes von schädigungsarmen Turbinen in vielen Fällen auf die Optimierung der Anzahl Laufradschaufeln und die Drehzahl. Bei einem etwaigen Turbinenersatz beim KWWB muss berücksichtigt werden, dass die Konzession des Kraftwerks bereits 2033 ausläuft und dass bis zum Konzessionsende voraussichtlich keine grösseren Instandhaltungs- oder Ersatzmassnahmen an den Turbinen des Hauptkraftwerks durchgeführt werden.

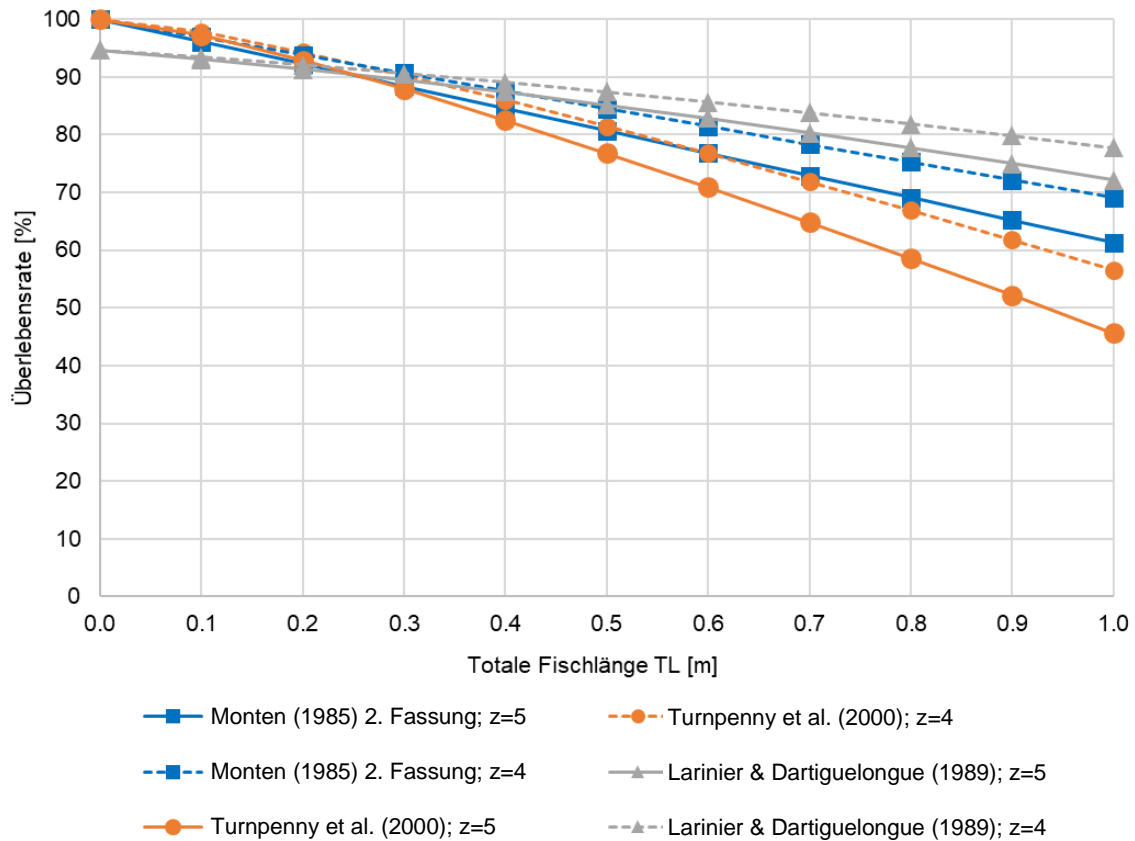
Die beiden baugleichen Kaplan-Turbinen des KWWB haben jeweils 5 Laufradschaufeln und werden mit einer Drehzahl von 115.4 Umdrehungen pro Minute betrieben. Aufgrund der geringen Drehzahl ist diesbezüglich kaum Verbesserungspotenzial vorhanden. Erste Vorabklärungen haben gezeigt, dass es bei einem Turbinenersatz technisch wahrscheinlich möglich wäre, die Anzahl der Laufradschaufeln von 5 auf 4 zu reduzieren. In diesem Fall müssten zwar neben dem Laufrad voraussichtlich noch weitere Turbinenbauteile ersetzt werden, es wären jedoch keine oder nur geringfügige Anpassungen im Einlaufbereich notwendig und der bestehende Generator könnte verwendet werden. Letzteres ist jedoch nur möglich, wenn die Drehzahl unverändert bleibt. Die Reduktion der Anzahl Laufradschaufeln hätte jedoch auch negative Auswirkungen, welche im letzten Absatz dieses Kapitels beschrieben werden.

Abb. 4.2 und Abb. 4.3 zeigen die mit gängigen Modellen berechneten artunspezifischen und salmonidenspezifischen Überlebensraten in Abhängigkeit der totalen Fischlänge TL. Die Anzahl der Laufradschaufeln  $z = 5$  entspricht der aktuell installierten Turbine und  $z = 4$  einer fiktiven Ersatzturbine mit einer reduzierten Anzahl an

Laufwadschaufeln. Alle anderen Parameter wurden unverändert von der bestehenden Turbine übernommen.



**Abb. 4.2** Mit artunspezifischen Modellen berechnete Überlebensraten bei der Turbinenpassage des KWWB; Anzahl der Laufwadschaufeln  $z = 5$  entspricht der aktuell installierten Turbine und  $z = 4$  einer fiktiven Ersatzturbine.



**Abb. 4.3** Mit salmonidenspezifischen Modellen berechnete Überlebensraten bei der Turbinenpassage des KWWB; Anzahl der Laufradschaufeln  $z = 5$  entspricht der aktuell installierten Turbine und  $z = 4$  einer fiktiven Ersatzturbine.

Aus Abb. 4.2 und Abb. 4.3 wird ersichtlich, dass die Überlebensraten bei allen Modellen und für alle Fischlängen mit weniger Laufradschaufeln höher sind. Das effektive berechnete Verbesserungspotenzial ist zwar modellabhängig. Es kann jedoch gesagt werden, dass die Reduktion der Laufradschaufeln v.a. bei grösseren Fischen zu deutlich höheren Überlebensraten führt, während das Verbesserungspotenzial für kleine Fische mit  $TL < 0.20$  m sehr gering ist.

Der Komplettersatz beider Turbinen beim KWWB wäre mit Kosten in der Grössenordnung von CHF 40 Mio. verbunden. Bei einem reinen Laufradersatz inkl. einer Revision wird mit rund der Hälfte dieser Kosten gerechnet. Die Reduktion der Anzahl Laufradschaufeln würde zudem voraussichtlich zu Wirkungsgradeinbussen und somit Produktionseinbussen führen, welche jedoch ohne detaillierte Planung nicht quantifiziert werden können. Aufgrund der hohen Kosten und des relativ geringen Verbesserungspotenzials wird daher nicht damit gerechnet, dass der Einbau von konventionellen schädigungsarmen Turbinen beim KWWB ein gutes Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweist. Interessant wäre der Einsatz von konventionellen schädigungsarmen Turbinen v.a. dann, wenn die Turbinen aufgrund von Beschädigungen oder altersbedingten Abnutzungserscheinungen sowieso ersetzt werden müssten, was jedoch aktuell beim KWWB nicht absehbar ist.

#### 4.2.5 Reduktion des Teillastbetriebs

Beim KWWB sind zwei Kaplan-Turbinen installiert, welche teilweise zeitgleich mit Teillast betrieben werden. Zur Berechnung des Optimierungspotenzials müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden. Der theoretische maximale Durchfluss pro

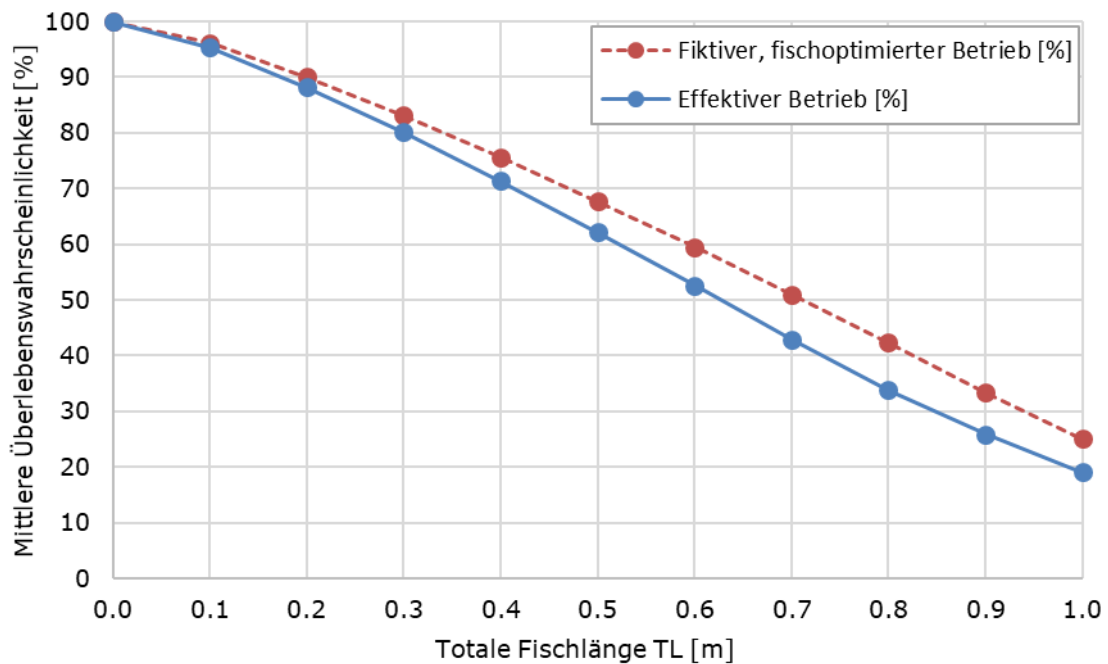
Turbine beträgt  $210 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dieser theoretische Wert kann jedoch nicht immer erreicht werden, da der Turbinendurchfluss beispielsweise von der Bruttofallhöhe abhängt. In vielen Fällen können mit einer Turbine nur  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  verarbeitet werden. Die Umstellung des Betriebs von zwei auf eine Turbine dauert rund 15–30 Minuten. Die Umstellung kann beim KWWB nicht über einen Onlinezugriff, sondern nur durch Personal vor Ort durchgeführt werden.

Generell ist der Betriebszustand der Turbinen beim KWWB primär vom Zufluss abhängig. Somit ist der Spielraum für betriebliche Optimierungsmöglichkeiten relativ gering. Im Ist-Zustand werden die Turbinen primär wirkungsgradoptimiert betrieben, wodurch der Teillastbetrieb in vielen Fällen automatisch möglichst reduziert wird. Der Hauptgrund, warum teilweise beide Turbinen zeitgleich mit Teillast betrieben werden, obwohl der Ausbaudurchfluss einer Turbine nicht überschritten wird, sind Sicherheitsüberlegungen. Wenn eine der beiden Turbinen ausfällt, kann der Grossteil des Wassers mit der anderen Turbine verarbeitet werden, ohne dass dies zu grossen Umlagerungen in der Restwasserstrecke führt. Da das KWWB am Wochenende nicht besetzt ist und der Wechsel von einer auf zwei Turbinen Personal vor Ort erfordert, wird im Ist-Zustand bereits am Freitag entschieden, ob für das entsprechende Wochenende nur eine oder beide Turbinen in Betrieb genommen werden. Aus diesem Grund kommt es beim KWWB hauptsächlich am Wochenende vor, dass beide Turbinen mit Teillast betrieben werden, obwohl der Ausbaudurchfluss einer Turbine nicht überschritten wird.

Die Überlebensraten bei der Turbinenpassage wurden mit dem im technischen Vorprojekt [1] beschriebenen salmonidenspezifischen physikalischen Modellansatz von Turnpenny et al. (2000) berechnet, da mit diesem Ansatz auch der Teillastbetrieb berücksichtigt werden kann. Im Folgenden werden die Überlebensraten mit den effektiven Betriebsdaten des Zeitraums vom 01. Januar 2021 bis zum 30. Juni 2022 berechnet und mit einem fiktiven, für Fische optimierten, Turbinenbetrieb verglichen. In diesem fiktiven Szenario wurden folgende Annahmen getroffen:

- Pro Turbine können maximal  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  verarbeitet werden.
- Bei einem Zufluss im Oberwasserkanal unter  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  wird nur eine Turbine betrieben.
- Bei der Bildung des zeitlichen Mittelwerts wurde davon ausgegangen, dass zu jedem Zeitschritt gleich viele Fische absteigen.
- Bei der Bildung des Mittelwerts der beiden Turbinen wurde davon ausgegangen, dass sich Fische proportional zum Abfluss aufteilen. D.h. wenn eine Turbine mit Vollast betrieben wird, wird davon ausgegangen, dass alle Fische über diese Turbine absteigen. Wenn beide Turbinen mit 50% beaufschlagt werden, wird davon ausgegangen, dass jeweils 50% der Fische über die linke und 50% der Fische über die rechte Turbine absteigen.

Bei diesem fiktiven Szenario werden keine anderen Randbedingungen wie die Wirkungsgradoptimierung, Betriebssicherheit, Revisionszyklen oder Personalverfügbarkeit berücksichtigt (Kapitel 3.14). D.h. es handelt sich hierbei um das theoretische und nicht um das tatsächlich realisierbare Potenzial. In Abb. 4.4 werden die mit den effektiven Betriebsdaten und fiktiven, fischoptimierten Betriebsdaten ermittelten Überlebenswahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Fischlängen gegenübergestellt.



**Abb. 4.4 Vergleich der mit dem salmonidenspezifischen Modell von Turnpenny et al. (2000) berechneten mittleren Überlebenswahrscheinlichkeiten für den effektiven Betrieb und einen fiktiven, fischoptimierten Betrieb für die Daten des Zeitraums 01.01.2021 bis 30.06.2022.**

Aus Abb. 4.4 wird ersichtlich, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit durch die beschriebene Reduktion des Teillastbetriebs theoretisch in Abhängigkeit der Fischgrösse um mehrere Prozent erhöht werden kann. Das absolute Optimierungspotenzial, d.h. die Differenz der Überlebenswahrscheinlichkeiten des fiktiven, fischoptimierten und des effektiven Betriebs, nimmt dabei bis zu einer gewissen Fischgrösse kontinuierlich zu. Für Fische mit TL = 0.10 m beträgt das absolute Optimierungspotenzial gemäss Abb. 4.4 0.8%, das Maximum von 8.4% wird für Fische mit TL = 0.80 m erreicht und für Fische mit TL = 1.00 m beträgt das absolute Optimierungspotenzial 6%.

Klar ist, dass es sich bei der Reduktion des Teillastbetriebs nicht um eine Fischabstiegsmassnahme handelt, mit welcher dem Grossteil der Fische ein sicherer Abstieg ermöglicht wird. Stattdessen handelt es sich für die Fische nur um eine kleine Optimierungsmassnahme. Der Hauptvorteil dieser Massnahme ist aber, dass sie zumindest bei gewissen Kraftwerken voraussichtlich relativ schnell und ohne baulichen Aufwand umgesetzt werden könnte. Es muss jedoch erwähnt werden, dass die in diesem Bericht gemachten Abschätzungen grossen Unsicherheiten unterliegen. So berücksichtigt beispielsweise das verwendete Berechnungsmodell nur kollisionsbedingte Schäden, während die Sensorfisch-Versuche beim WKW BAN [5] zeigten, dass die Druckbedingungen in den Turbinen im Vollastbetrieb potenziell gefährlicher sind als im Teillastbetrieb. Insbesondere zur Schädigung von potamodromen Fischarten im Teillastbetrieb sind in der Literatur kaum Informationen verfügbar, welche jedoch für eine genaue und wissenschaftlich fundierte Abschätzung des Optimierungspotenzial benötigt werden. Nicht abgeschätzt wurde im Rahmen dieser Untersuchung, mit welchen Kosten die Optimierung des Turbinenbetriebs verbunden wäre. Sollte diese Massnahme weiterverfolgt werden, empfiehlt das Projektteam eine vertiefte und detaillierte Untersuchung in einem separaten Projekt. Die Wissenslücke bezüglich der Überlebenswahrscheinlichkeiten potamodromer Arten könnte aber voraussichtlich nur mit umfangreichen und aufwändigen Versuchen geschlossen werden. Aus den



genannten Gründen und insbesondere aufgrund des im Vergleich zu anderen Massnahmen relativ geringen Verbesserungspotenzials, empfiehlt das Projektteam beim KWVB die Prüfung anderer Fischabstiegsmassnahmen.

#### 4.2.6 Zusammenfassende Empfehlungen Wildegg-Brugg

In den Kapiteln 4.1.1, 4.1.2 und 4.2.1–4.2.5 wurden insgesamt sieben verschiedene alternative Fischabstiegsmassnahmen für das KWVB beschrieben. Für die Erhöhung der Barrierewirkung mit anderen sensorischen Reizen als Strom ist noch kein kommerzielles System erhältlich und die Wirkung ist unklar. Beim BAFF-System und RH-Turbinen wird empfohlen, dass diese zuerst bei anderen, kleineren Anlagen getestet werden, um Erfahrungen bezüglich des Betriebs und der Auswirkungen auf Fische zu sammeln. Der Einbau konventioneller schädigungsarmer Turbinen ist relativ teuer, während das Verbesserungspotenzial vergleichsweise gering ist. Ebenfalls gering ist das Verbesserungspotenzial bei der Reduktion des Teillastbetriebs.

Aus Sicht des Projektteams handelt es sich bei den partiellen Leitrechen für das KWVB um die vielversprechendste Massnahme, bei welcher – basierend auf den aktuell vorhandenen Grundlagen – vom höchsten Nutzen-Kosten-Verhältnis aller betrachteten Massnahmen und von einem hohen absoluten Nutzen ausgegangen wird. Das Projektteam empfiehlt, im nächsten Schritt mit der Planung eines temporären Pilotversuchs von partiellen Leitrechen mit einem anschliessenden Bypass zu starten. Im Rahmen dieses Pilotversuchs könnten einerseits Erfahrungen zur fischbiologischen Wirkung dieser Teilrechen und andererseits auch bezüglich des Baus und Betriebs gesammelt werden. Im Rahmen dieses Pilotversuchs könnte auch der Bypass ohne Leitrechen untersucht werden, auch wenn aktuell nicht davon ausgegangen wird, dass mit dieser Massnahme einem breiten Artenspektrum ein sicherer Fischabstieg ermöglicht werden kann. Trotz dieser Empfehlung für einen Pilotversuch muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass bezüglich der Anwendung von partiellen Leitrechen noch viele Fragen offen sind und dass basierend auf den Schwimmpfaden aus der akustischen Telemetrieuntersuchung davon ausgegangen werden muss, dass die Schutz- und Leiteffizienz für Barben deutlich schlechter ist als für Alet.

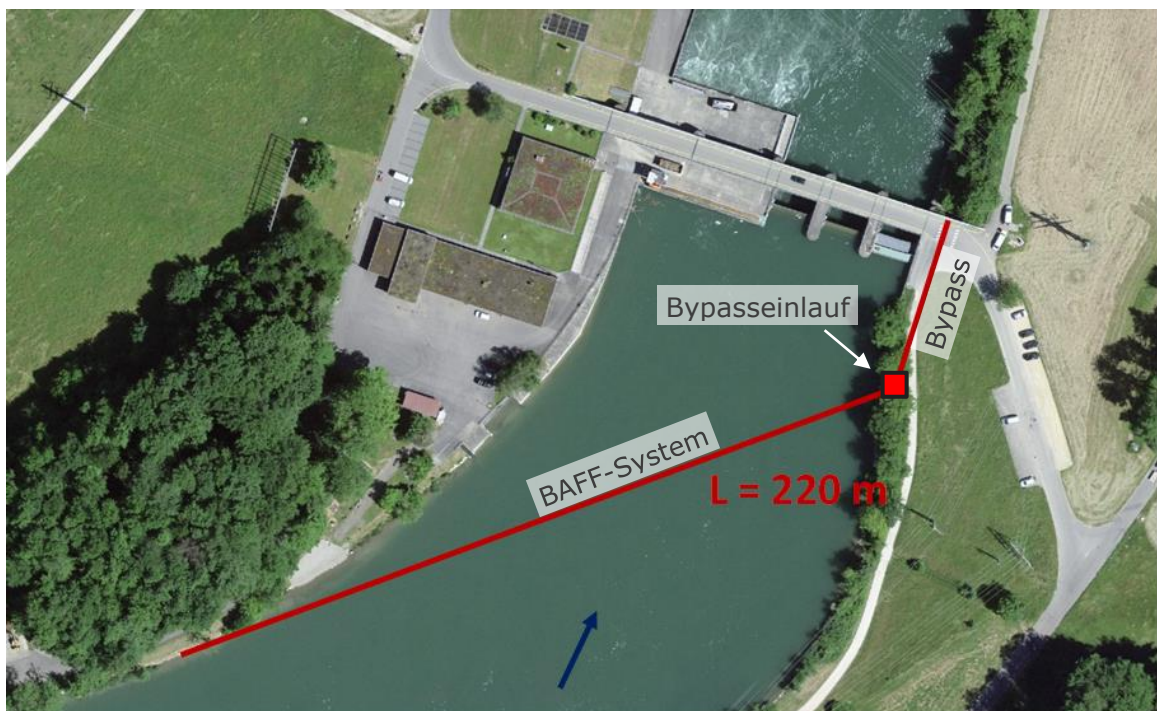
### 4.3 Kraftwerk Bannwil

#### 4.3.1 *BioAcoustic Fish Fence* in Kombination mit einem Bypass

Im technischen Bericht des Vorprojekts für den Fischabstieg beim WKW BAN [3] wird auf das hohe Schwemmgutvorkommen eingegangen, welches eine grosse Herausforderung für den Betrieb eines möglichen Leitrechen-Bypass-Systems darstellt. Diese standortspezifischen Bedingungen würden mit einem in Kapitel 3.6 beschriebenen BAFF-System voraussichtlich weniger stark ins Gewicht fallen, da das Geschwemmseil wie im Ist-Zustand zum bestehenden Einlaufrechen transportiert werden würde. Dort könnte es mit dem bestehenden Rechenreinigungssystem entnommen, bzw. über das Wehr abgeleitet werden. Bei einer wie in Abb. 4.5 gezeigten Installation des BAFF-Systems über die gesamte Aarebreite, könnte der Bypass auf der orografisch rechten Uferseite angeordnet werden. Aufgrund der besseren Platzverhältnisse und weniger stark ausgeprägten Konflikten mit bestehenden Anlagenteilen, wäre dies deutlich einfacher und kostengünstiger als am linken Ufer.

Abb. 4.5 zeigt eine erste mögliche Anordnung eines BAFF-Systems, welches rund 220 m lang ist. Aus den numerischen Untersuchungen der VAW ist bekannt, dass die Fliessgeschwindigkeiten entlang dieser Linienführung maximal rund 0.80 m/s betragen. Das in Kapitel 3.6 beschriebene BAFF-System wurde so angeordnet, dass die maximale Normalkomponente der Anströmgeschwindigkeit 0.25 m/s nicht übersteigt. Um beim WKW BAN eine maximale Normalkomponente der Anströmgeschwindigkeit

0.25 m/s einzuhalten, müsste das BAFF-System mit einem horizontalen Anströmwinkel von rund  $18^\circ$  angeordnet werden. Diese Anordnung des BAFF-Systems müsste jedoch in einer etwaigen nächsten Projektphase unter Berücksichtigung des genauen Geschwindigkeitsfelds optimiert werden. Der Einstieg in den Bypass wurde in Abb. 4.5 bewusst rund 35 m oberstrom der Wehrachse angeordnet, um der Querströmung bei geschlossenen Wehrfeldern (siehe Abb. 4.5) auszuweichen. Ausserdem liegt die geplante Anordnung des Systems am Rande oder ausserhalb der Kurvenablagerung von Sedimenten, wobei dieser Aspekt in einer etwaigen nächsten Projektphase im Detail geprüft werden müsste.



**Abb. 4.5** Mögliche Anordnung eines BAFF-Systems mit einem Bypass beim WKW BAN (Quelle Orthofoto: Swisstopo).

Aufgrund der fehlenden Erfahrungen mit einem BAFF-System in Schweizer Fließgewässern können aktuell kaum Aussagen bezüglich der Wirksamkeit der Barriere, dem anfallenden Betriebs- und Unterhaltsaufwand und der Lebensdauer getroffen werden. Die Sohle des Stauraums Bannwil ist unbefestigt und insbesondere in der Innenkurve lagern sich grössere Mengen an Schwebstoffen ab. Diese werden bei Hochwasserereignissen teilweise remobilisiert, was zu ständigen Veränderungen der Sohlenlagen führt. Auch diese Aspekte müssen bei der detaillierteren Planung in einer etwaigen späteren Projektphase berücksichtigt werden.

Es wird davon ausgegangen, dass ein BAFF-System beim WKW BAN technisch machbar ist und die Investitionskosten im Vergleich zu einem Leitrechen-Bypass-System deutlich geringer sind. Somit handelt es sich beim BAFF-System um eine mögliche alternative Fischabstiegsmassnahme für das WKW BAN. Insbesondere bezüglich der Effizienz für ein breites potamodromes Artenspektrum ist jedoch noch wenig bekannt. Zudem stellt sich die Frage, ob sich die Fische mit dem BAFF-System über die lange Distanz bis zum Bypasseinlauf leiten lassen. Eine Abschätzung des Nutzens ist nach aktuellen Kenntnissen schwierig. Aus diesem Grund empfiehlt das Projektteam einen temporären Testversuch mit einem BAFF-System bei einer kleinen Wasserkraftanlage, wie dem Kleinwasserkraftwerk Stropfel der Axpo Kleinwasserkraft AG.

Dies hat den Vorteil, dass die Investitionskosten geringer sind und eine Wirkungskontrolle einfacher durchgeführt werden kann. Alternativ wäre es gegebenenfalls möglich, das BAFF-System beim WKW BAN im Rahmen eines temporären Pilotversuchs nur über einen Teilbereich des gesamten Gewässerquerschnitts zu installieren. Dadurch könnte das Verhalten der Fische im Nahbereich der Barriere unter den vorherrschenden Bedingungen, insbesondere den eher hohen Fließgeschwindigkeiten und dem Feststofftransport und den damit verbundenen Sohlenveränderungen, untersucht werden.

#### 4.3.2 Partielle Leitrechen

Methodisch bedingt konnten mit der radiotelemetrischen Studie beim WKW BAN [4] im Unterschied zur akustischen Telemetriestudie beim KWWB [2] keine Schwimmpfade ermittelt werden. Es wurde jedoch festgestellt, dass Barben das WKW BAN als Hindernis wahrnehmen und vor einer Turbinenpassage zögern. Somit liegt die Vermutung nahe, dass die Fische vor der Turbinenpassage des WKW BAN, wie beim KWWB, nach alternativen Abstiegskorridoren suchen. Um das Potenzial von partiellen Leitrechen mit einem anschließenden Bypass für das WKW BAN abschätzen zu können, müsste untersucht werden, wo die Fische beim WKW BAN vermehrt nach alternativen Abstiegskorridoren suchen. Es ist möglich, dass viele Fische der Hauptströmung folgen, vor dem Einlaufrechen zögern und beim Trennpfeiler vor dem linken Wehrfeld nach einem Abstiegskorridor suchen. Denkbar ist jedoch auch, dass sich die Suchbewegungen wie beim KWWB auf die Uferbereiche, im Fall des WKW BAN wahrscheinlich insbesondere auf den orographisch linken Uferbereich, konzentrieren.

Es gibt nicht viele Technologien, mit welchen das Schwimmverhalten von Fischen in einem so grossen Fluss wie der Aare beobachtet werden kann. In den letzten Jahren haben sich sogenannte «Live Imaging Sonare» stark weiterentwickelt, sodass sich diese unter Berücksichtigung einiger Einschränkung grundsätzlich für die Beobachtung des Schwimmverhaltens von Fischen vor Kraftwerkseinläufen eignen [42]. Da die Anwendung dieser Sonargeräte sehr standortspezifisch ist, wird empfohlen, das Potenzial dieser Technologie beim WKW BAN in einem kurzen Feldversuch zu überprüfen. Bei erfolgreichen Tests könnte versucht werden, mittels dieser Sonargeräte die präferierten Aufenthaltsorte bzw. diejenigen Orte zu lokalisieren, an welchen Fische beim WKW BAN vermehrt nach alternativen Abstiegskorridoren suchen. Im Gegensatz zu einer akustischen Telemetrieuntersuchung ist eine Sonaruntersuchung deutlich kostengünstiger. Zudem können nicht nur die markierten Fische, sondern nahezu die gesamte natürliche Fischfauna beobachtet werden. Bedeutende Einschränkung der Sonargeräte sind hingegen, dass nur ein begrenzter Bereich beobachtet werden kann, Fischarten in den meisten Fällen nicht voneinander unterschieden werden können, die Unterscheidung zwischen Fischen und Geschwemmsel aufgrund des variablen Geschwindigkeitsfeldes insbesondere bei Blockkraftwerken herausfordernd ist und individuenbasierte Analysen nicht möglich sind, sobald ein Individuum den Blickkegel des Sonars verlässt [42].

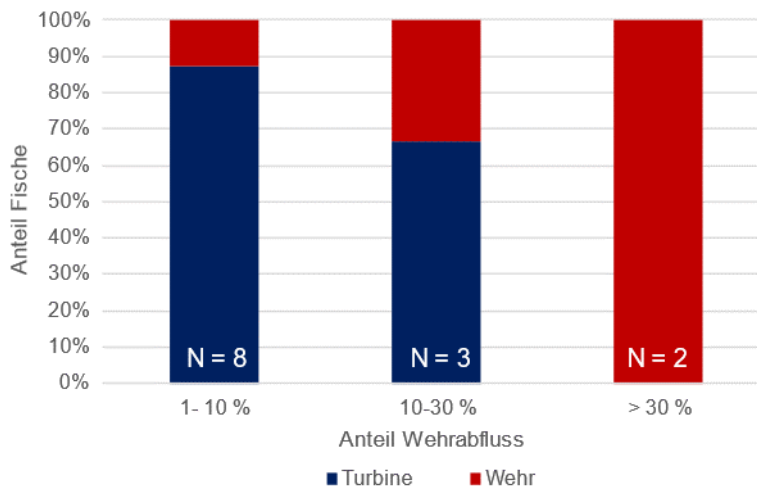
#### 4.3.3 Erhöhung Wehrabfluss bei hoher Abstiegsaktivität

Basierend auf den radiotelemetrischen Untersuchungen beim WKW BAN [4] wurde versucht, die Hauptabwanderungszeiträume zu definieren. Um methodisch bedingte Einflüsse soweit wie möglich ausschliessen zu können, wurden Abstiege kurz nach Aussetzen der Fische, von dieser Analyse ausgeschlossen. Beachtet werden muss auch, dass diese Hauptabwanderungszeiträume nur für Barben ermittelt wurden. Die akustische Telemetrieuntersuchung beim KWWB hat gezeigt, dass es bei der Abwanderung zumindest zwischen Alet und Barben deutliche Unterschiede gibt. Inwiefern die Resultate der Barben auf andere Arten übertragen werden können, ist somit unklar. Die Hauptabwanderungszeiträume wurden wie folgt definiert:

- Frühling: 01.04–31.05 im Zeitfenster zwischen 19:30 und 06:30 Uhr
- Herbst: 01.10–30.11 im Zeitfenster zwischen 17:30 und 07:00 Uhr

Es wurde davon ausgegangen, dass während dieser Zeiträume ein Wehrabfluss von 25 m<sup>3</sup>/s abgegeben wird. Während der letzten 5 Jahre betrug der durchschnittliche Gesamtabfluss der Aare beim WKW BAN in der Frühlingsperiode 277 m<sup>3</sup>/s und in der Herbstperiode 200 m<sup>3</sup>/s. Unter diesen Bedingungen entspricht der gewählte Wehrabfluss von 25 m<sup>3</sup>/s somit ungefähr 9% des Gesamtabflusses in der Frühlingsperiode und 12.5% in der Herbstperiode. Ob dieser Wehrabfluss ausreicht, um zumindest einen Teil der Fische von der Turbinenpassage abzuhalten und zu einer Wehrpassage zu bewegen, kann jedoch ohne weitergehende Untersuchungen nicht beantwortet werden. Der Wehrabfluss muss auf jeden Fall hoch genug sein, damit Fische die Strömung in Richtung des Wehrs wahrnehmen können. Zudem muss sichergestellt werden, dass sich die Fische beim Abstieg über das Wehr nicht verletzen. Gemäss den durchgeführten Sensorfischversuchen [5] kann bei einem Wehrabfluss von 25 m<sup>3</sup>/s von sicheren Abstiegsbedingungen ausgegangen werden. Unter diesen Annahmen betragen die mit Hilfe des Energiegleichwerts für die Maschinen des WKW BAN (= 0.0166 kWh/m<sup>3</sup>) und einem Preis von 5.6 Rp./kWh berechneten wöchentlichen bzw. jährlichen Erlöseinbussen CHF 2'365 bzw. CHF 123'000.<sup>1</sup>

In den radiotelemetrischen Untersuchungen stiegen insgesamt 13 Fische während Phasen mit Wehrüberfall ab, wovon zwei Fische das unterströmte Drucksegment-schütz und zwei Fische die überströmte Wehrklappe für den Abstieg nutzten. In Abb. 4.6 ist der Anteil des Wehrabflusses am gesamten Aareabfluss dargestellt. Zudem wird angegeben, wie viele Fische welchen Korridor nutzten. Die Variable N gibt an, auf wie vielen Fischen die jeweilige Analyse basiert.



**Abb. 4.6 Analyse der Abstiegskorridore der beim WKW BAN während Wehrabfluss abgestiegenen Barben.**

Bei einem Wehrabfluss von unter 10% des Aareabflusses stieg nur eine Barbe über das Wehr ab. Bei höheren Wehrabflüssen nutzten prozentual gesehen zwar mehr Fische das Wehr als Abstiegskorridor, diese Aussage ist jedoch aufgrund des sehr geringen Stichprobenumfangs nicht aussagekräftig.

<sup>1</sup> Gemäss BFE Preisszenario vom 1. Mai 2021 als Mittelwert der Jahre 2030–2045 für den Strompreis «Mittel» Base mit einem Wechselkurs von EUR/CHF = 1.10.

Angesichts dessen, dass die Wanderzeiten nur für Barben bestimmt werden konnten und das Abwanderverhalten anderer Fischarten nicht bekannt ist, wären für eine effiziente Umsetzung der Erhöhung des Wehrabflusses als Fischabstiegsmassnahme weitere Untersuchungen notwendig. Mit den aktuell vorhandenen Grundlagen wird jedoch davon ausgegangen, dass sich die Abwanderungszeiträume eines breiten potamodromen Arten- und Grössenspektrums nicht auf kurze Zeiträume konzentriert. Zudem wird aktuell davon ausgegangen, dass ein Wehrabfluss von 25 m<sup>3</sup>/s nur von einem kleinen Teil der Fische für den Abstieg genutzt werden würde. Durch die Kombination dieser Faktoren könnte der Fischabstieg mit dieser Massnahme voraussichtlich nur für einen grossen Teil der Fische verbessert werden, wenn deutlich höhere Erlöseinbussen in Kauf genommen werden würden. Sollte diese Massnahme weiterverfolgt werden, empfiehlt das Projektteam ein in Kapitel 4.3.2 beschriebenes «Live Imaging Sonar» beim WKW BAN zu testen. Damit könnte gegebenenfalls einerseits untersucht werden, ob beim WKW BAN im Jahresverlauf konzentrierte Abwanderungsspeaks auftreten und andererseits könnte diese Technologie eventuell als Frühwarnsystem für betriebliche Massnahmen genutzt werden. Mit dem aktuellen Wissensstand wird jedoch nicht davon ausgegangen, dass die Erhöhung des Wehrabflusses bei hoher Abstiegsaktivität ein hohes Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweist, so dass das Projektteam die Umsetzung dieser Massnahme ohne weitergehende Untersuchungen nicht empfiehlt. Weitergehende Untersuchungen mit einem «Live Imaging Sonar» werden hingegen als sinnvoll erachtet und würden auch der etwaigen Planung von in Kapitel 4.3.2 beschriebenen partiellen Leitrechen zugutekommen.

#### 4.3.4 Reduktion des Teillastbetriebs

In Kapitel 5.14 wurde beschrieben, dass sich das Kollisionsrisiko für abwandernde Fische im Teillastbetrieb erhöht. Demgegenüber haben die durchgeführten Sensorfischversuchen gezeigt, dass das druckbasierte Verletzungsrisiko beim WKW BAN im Volllastbetrieb höher ist als im Teillastbetrieb. Ob bzw. wie stark die Überlebensrate beim WKW BAN durch die Reduktion des Teillastbetriebs erhöht werden könnte, kann somit aktuell kaum abgeschätzt werden und ist voraussichtlich sehr artspezifisch. Zudem wird das WKW BAN aus Gründen der Wirkungsgradoptimierung wenn möglich primär im Volllastbetrieb oder nahe des Volllastbetriebs betrieben. Somit wird das Potenzial der Reduktion des Teillastbetriebs beim WKW BAN als gering eingeschätzt und das Projektteam empfiehlt diese Variante nicht zur Weiterverfolgung.

#### 4.3.5 Zusammenfassende Empfehlungen Bannwil

In den Kapiteln 4.1.1, 4.1.2 und 4.3.1–4.3.4 wurden insgesamt sechs mögliche alternative Massnahmen zum Fischabstieg beim WKW BAN beschrieben. Wie in den Empfehlungen beim KWWB, wird auch beim WKW BAN davon ausgegangen, dass Bypässe ohne Leitstrukturen nur von wenigen Fischen für den Abstieg genutzt werden würden und dass konventionelle schädigungsarmen Turbinen ein schlechtes Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweisen. Für die Erhöhung der Barrierewirkung mit anderen sensorischen Reizen als Strom ist noch kein kommerzielles System erhältlich und die Wirkung ist unklar. Bezüglich RH-Turbinen wird empfohlen, zuerst bei einer kleineren Anlage Erfahrungen zu sammeln.

Das BAFF-System könnte sich hingegen für die Verbesserung des Fischabstiegs beim WKW BAN eignen, da dieses voraussichtlich mit den standortspezifischen Randbedingungen vereinbar ist. Dazu gehört u.a. die Anordnung als Blockkraftwerk, das hohe Schwemmholzaufkommen, der schwankende Oberwasserpegel und das hohe Schwebstoffaufkommen. Aufgrund der fehlenden Erfahrungen bezüglich des Baus, Betriebs und der biologischen Wirkung wird jedoch empfohlen, das BAFF-System vor einer Installation beim WKW BAN bei einem kleineren Kraftwerk zu testen um dessen

Leitfähigkeit im Feld zu testen. Zur Überprüfung der Funktionalität unter den lokalen Gegebenheiten in Bannwil, insbesondere den hohen Schwebstofffrachten, scheint eine Pilotuntersuchung unvermeidbar. Beispielsweise könnte ein Teilelement installiert werden, um erste Betriebserfahrungen zu sammeln und Einwirkungen der Umwelteinflüsse abzuschätzen.

Als Alternative zum BAFF-System wäre es auch denkbar, den Fischabstieg beim WKW BAN mit partiellen Leitrechen und einem Bypass zu verbessern. Das Potenzial von partiellen Leitrechen beim WKW BAN kann jedoch erst abgeschätzt werden, wenn mehr über das Schwimmverhalten der Fische im Oberwasser des WKW BAN bekannt ist. Gegebenenfalls könnte diese Wissenslücke mit einem Sonargerät zumindest teilweise geschlossen werden.

## 5. Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen

In diesem Bericht wurden die relevanten Grundlagen zu den Kraftwerken Wildegg-Brugg und Bannwil und die wichtigsten Erkenntnisse aus den bei diesen Kraftwerken durchgeführten technischen Vorprojekten zu Leitrechen-Bypass-Systemen mit *Bar Racks* und verhaltensbiologischen Studie zusammengefasst. Anschliessend wurden 13 alternative Fischabstiegsmassnahmen beschrieben. Diese Massnahmen wurden bezüglich eines Einsatzes bei den Kraftwerken Wildegg-Brugg und Bannwil bewertet. Die vielversprechendsten Alternativmassnahmen wurden standortspezifisch sowohl für das Kraftwerk Wildegg-Brugg, als auch das Kraftwerk Bannwil beschrieben.

Für das Kraftwerk Wildegg-Brugg wurden insgesamt sieben verschiedene Alternativmassnahmen standortspezifisch betrachtet. Aus Sicht des Projektteams handelt es sich bei den partiellen Leitrechen für das KWWB um die mit Abstand vielversprechendste Alternativmassnahme, bei welcher – basierend auf den aktuell vorhandenen Grundlagen – vom höchsten Nutzen-Kosten-Verhältnis aller betrachteten Alternativmassnahmen und von einem hohen absoluten Nutzen ausgegangen wird. Das Projektteam empfiehlt, im nächsten Schritt entweder die Planung des im technischen Vorprojekt beschriebenen Leitrechen-Bypass-Systems fortzusetzen oder mit der Planung eines temporären Pilotversuchs von partiellen Leitrechen mit einem anschließenden Bypass zu starten, auch wenn bezüglich der Effizienz eines solchen Systems noch viele Fragen offen sind. Die Entscheidung, welche dieser Varianten weiterverfolgt werden soll, obliegt den Behörden.

Sollte sich ein Leitrechen-Bypass-System am Kraftwerk Bannwil als nicht verhältnismässig herausstellen, könnte das BAFF-System in Kombination mit einem Bypass in Frage kommen. Da insbesondere bezüglich des Betriebs in Flüssen mit hohen Feinsedimentfrachten und der Anwendung des BAFF-Systems als Fischabstiegsmassnahme für ein breites, potamodromes Artenspektrum wenig bekannt ist, werden vor einer vollumfänglichen Realisierung beim Kraftwerk Bannwil Feldversuche bei einem kleineren Kraftwerk sowie eine Pilotuntersuchung beim Kraftwerk Bannwil empfohlen. Parallel dazu empfiehlt das Projektteam, das Schwimmverhalten der Fische im Oberwasser des Kraftwerks Bannwil mit einem Sonargerät genauer zu untersuchen. Mit dieser Studie soll versucht werden, präferierte Aufenthaltsorte absteigender Fische zu lokalisieren. Diese Informationen werden benötigt, um das Potenzial von partiellen Leitrechen beim Kraftwerk Bannwil abschätzen zu können.

Einige der in diesem Pilotprojekt gewonnenen Erkenntnisse können auch auf andere Flusskraftwerke übertragen werden. Beispielsweise kann davon ausgegangen werden, dass Leitrechen-Bypass-Systeme mit *Bar Racks* auch bei anderen grossen

Kanalkraftwerken und Blockkraftwerken machbar, aber teuer sind. Zudem ist klar, dass das Fischabstiegsverhalten zumindest teilweise standortspezifisch ist und dass viele Fischabstiegsmassnahmen aufgrund der standortspezifischen Randbedingungen nicht bei allen Kraftwerken machbar bzw. zielführend sind. Wie bezüglich des Fischabstiegs bei grossen Flusskraftwerken weiter vorgegangen wird, muss durch die Behörden entschieden werden. Als Entscheidungshilfe wird im Jahr 2024 in einem Zusatzauftrag des BAFU zu vorliegendem Pilotprojekt für jede der in diesem Bericht beschriebenen Alternativmassnahme eine Empfehlung zum möglichen weiteren Vorgehen abgegeben.

## Literaturverzeichnis

- [1] Axpo (2024). Kraftwerk Wildegg-Brugg – Sanierung Geschiebehaushalt und Wiederherstellung Fischwanderung. Teilprojekt F: Fischabstieg am Maschinenhaus. Technisches Vorprojekt. H 17748.
- [2] Axpo und FishConsulting (2024). Kraftwerk Wildegg-Brugg – Sanierung Geschiebehaushalt und Wiederherstellung Fischwanderung. Teilprojekt F: Fischabstieg am Maschinenhaus. Verhaltensbiologische Untersuchungen mittels akustischer Telemetrie. H 18596.
- [3] BKW (2024). Sanierung Fischgängigkeit, Fischabstieg. 1017 WKW Bannwil. Technisches Vorprojekt eines vertikalen Fischleitrechens vom Typ Bar-Rack.
- [4] Peter, A., Schölzel, N. und Wilmsmeier, L. (2023). Radiotelemetrische Untersuchungen zum Fischabstieg am Kraftwerk Bannwil. Studie im Auftrag der BKW Energie AG. 110 Seiten.
- [5] Tuhtan, J.A. und Toming, G. (2023). Sensormessungen der Wehrpassage in Über- und Unterströmung sowie der Turbinenpassage am Wasserkraftwerk Bannwil, September 2021, Universität Tallinn.
- [6] Meusburger, H. (2002). Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken, VAW-Mitteilung 179 (H.-E. Minor, Hrsg.), VAW, ETH Zürich.
- [7] VAW (2020). Fischleitrechen Kraftwerk Wildegg-Brugg, Numerische Modelluntersuchung, VAW-Bericht 4390, ETH Zürich; H 17857.
- [8] VAW (2022). Fischleitrechen Wasserkraftwerk Bannwil, Numerische Modelluntersuchung, VAW-Bericht 4413, ETH Zürich.
- [9] Kriewitz-Byun, C.R. (2015). Leitrechen an Fischabstiegsanlagen: Hydraulik und fischbiologische Effizienz. VAW-Mitteilung 230 (R. Boes, Hrsg.), VAW, ETH Zürich.
- [10] Kriewitz, C.R., Albayrak, I. und Boes, R.M. (2012). Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken – Zwischenbericht zum Literatur- und Massnahmenstudium.
- [11] Larinier, M. (1998). Kap. 10: Upstream and downstream fish passage experience in France: 127–145. In: M. Jungwirth; S. Schmutz; S. Weiss (eds.) Fish migration and fish bypasses. ISBN 0852382537. Fishing News Books, Oxford, UK.
- [12] Larinier, M. und Travade, F. (2002). Downstream migration: problems and facilities. Bull. Fr. Pêche Piscic., (364 suppl.): 181–207.
- [13] Schwevers, U. und Adam, B. (2020). Fish protection technologies and fish ways for downstream migration. ISBN 9783030192419. 1. Ausgabe. Springer, Cham, Schweiz.
- [14] Schneider, J., Hübner, D. und Korte, E. (2012). Funktionskontrolle der Fischaufstiegs- und Fischabstiegshilfen sowie Erfassung der Mortalität bei Turbindurchgang an der Wasserkraftanlage am Main.
- [15] DWA (2004). Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen — Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. ISBN 3934063915. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ATV-DVWK, heute DWA).
- [16] Haug, J., Auer, S., Frees, C., Brinkmeier, B., Tutzer, R., Hayes, D.S. und Aufleger, M. (2022). Retrofitting of Existing Bar Racks with Electrodes for Fish



- Protection—An Experimental Study Assessing the Effectiveness for a Pilot Site. *Water*: 14, 850.
- [17] Moldenhauer-Roth, A., Selz, O.M., Albayrak, I. und Boes, R.M. (2023). Retrofitting Trash Racks with Electricity to Protect Downstream Moving Fish. 40<sup>th</sup>. IAHR World Congress, Wien, Österreich.
- [18] Ebel, G. (2016). *Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, 2. Auflage.*
- [19] Snyder, D.E. (2003). Invited overview: conclusions from a review of electrofishing and its harmful effects on fish. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 13: 445–453.
- [20] 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.
- [21] Meister, J. (2020). Fish protection and guidance at water intakes with horizontal bar rack bypass systems. VAW-Mitteilung 258 (R. Boes, Hrsg.), VAW, ETH Zürich.
- [22] Axpo und Aquarius (2018). *Kleinwasserkraftwerk Stroppele (Axpo Kleinwasserkraft AG) – Wirkungskontrolle Fischabstieg am Horizontalrechen mit Bypass.*
- [23] NMFS (2022). *NOAA Fisheries West Coast Region Anadromous Salmonid Passage Design Manual*, National Marine Fisheries Service (NMFS), Portland, Oregon.
- [24] Williams, J.G. und Gessel, M.H. (2018). A History of Research to Develop Guidance Systems to Divert Juvenile Salmonids, *Oncorhynchus spp.*, from Turbines at Federal Hydroelectric Dams on the Mainstem Columbia and Snake Rivers, U.S.A. *Marine Fisheries Review*, 80(2): 30–66.
- [25] Leander, J., Klaminder, J., Hellström, G. und Jonsson, M. (2021). Bubble barriers to guide downstream migrating Atlantic salmon (*Salmo salar*): An evaluation using acoustic telemetry. *Ecological Engineering*.
- [26] Martin, N.F., Leighton, T.G., White, P.R. und Kemp, P.S. (2021). The response of common carp (*Cyprinus carpio*) to insonified bubble curtains. *The Journal of the Acoustical Society of America* 150.
- [27] Onlinezugriff <https://www.flickr.com/photos/nashvillecorps/48882057252/in/album-72157710050493202/>, aufgerufen am 06.10.2023.
- [28] Onlinezugriff <https://fgs.world/news/baff-at-barkley-lock-continues-to-show-impressive-results-in-preventing-invasive-carp-movement/>, aufgerufen am 06.10.2023.
- [29] Perry, R.W., Romine, J.G., Adams, N.S., Blake, A.R., Burau, J.R., Johnston, S.V. und Liedtke, T.L. (2012). Using a non-physical behavioural barrier to alter migration routing of juvenile chinook salmon in the Sacramento–San Joaquin river delta. *River Research and Applications*, 30: 192–203.
- [30] DWA (2004). *Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA, früher ATV-DVWK).*

- [31] Böttcher, H., Zeiringer, B., Brinkmeier, B. und Aufleger, M. (2019). Verhaltensuntersuchungen zum Fischschutz und Fischabstieg am Seilrechen. *Wasserwirtschaft*, 109(2-3): 29-35.
- [32] Tutzer, R., Brinkmeier, B., Böttcher, H. und Aufleger, M. (2019). Der Elektro-Seilrechen als integrales Fischschutzkonzept. *Wasserwirtschaft*, 109(2-3): 36-40.
- [33] Fjeldstad, H.-P., Alfredsen, K. und Boissy, T. (2014). Optimising Atlantic salmon smolt survival by use of hydropower simulation modelling in a regulated river. *Fisheries Management and Ecology*, 21: 22-31.
- [34] Onlinezugriff <https://storymaps.arcgis.com/stories/f9e8c4ff1c8849fb874176adbb17fb0b>, aufgerufen am 06.10.2023.
- [35] Odeh, M. und Orvis, C. (1998). Kap. 21: Downstream fish passage design considerations and developments at hydroelectric projects in the north-east USA: 267-280. In: M. Jungwirth; S. Schmutz; S. Weiss (eds.) *Fish migration and fish bypasses*. ISBN 0852382537. Fishing News Books, Oxford, UK.
- [36] Amaral, S., Watson, S., Schneider, A., Rackovan, J. und Baumgartner, A. (2020). Improving survival: injury and mortality of fish struck by blades with slanted, blunt leading edges, *Journal of Ecohydraulics*, 5:2, 175-183.
- [37] Watson, S., Schneider, A., Santen, L., Deters, K.A., Mueller, R., Pflugrath, B., Stephenson, J. und Deng, Z.D. (2022). Safe passage of American eels through a novel hydropower turbine, *Transactions of the American Fisheries Society*, 151, 71-1.
- [38] Watson, S., Schneider, A., Gardner, L., Apell, B., Thompson, P., Cadman, G., Gagnon, I., Frese, C. und Wechsler, J. (2023). Juvenile Alewife Passage through a Compact Hydropower Turbine Designed for Fish Safety, *North American Journal of Fisheries Management*, 43: 465-475.
- [39] Onlinezugriff <https://www.natelenergy.com/references>, aufgerufen am 06.10.2023.
- [40] Geiger, F. und Cuchet, M. (2021): Fischschäden in Wasserkraftturbinen bewerten und begrenzen. In: Boes, Robert (Hg.): *Wasserbau-Symposium 2021. Wasserbau in Zeiten von Energiewende, Gewässerschutz und Klimawandel*. VAW Mitteilungen 263 (R. Boes, Hrsg.). VAW, ETH Zürich: 529-537.
- [41] Axpo und WFN (2020). Kraftwerk Rüchlig AG – Fischabstieg Dotierkraftwerk: Wirkungskontrolle Fischabstieg am Horizontalrechen mit Bypass.
- [42] Axpo (2023). Kleinwasserkraftwerk Stoppel (Axpo Kleinwasserkraft AG) – Pilotprojekt zur Echtzeitsteuerung von Bypässen. Phase 1: Experimentierphase. H 18146.
- [43] Giesecke, J., Heimerl, S. und Mosonyi, E. (2014). *Wasserkraftanlagen – Planung, Bau und Betrieb*. ISBN 9783642538704. 6. Ausgabe. Springer, Berlin, Deutschland.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Situation beim KWWB, Fliessrichtung der Aare von links nach rechts (Quelle: Axpo). ....	7
Abb. 2.2	Situation beim WKW BAN, Fliessrichtung der Aare von links nach rechts (Quelle Karte: Swisstopo).....	8
Abb. 2.3	3D-Modell des beim KWWB geplanten Leitreechen-Bypass-Systems. ....	9
Abb. 2.4	Anströmsituation eines möglichen Leitreechens beim WKW BAN bei geschlossenen Wehrfeldern (Quelle: [8]). ....	11
Abb. 2.5	3D-Visualisierung der vorgeschlagenen Bestvariante eines Leitreechen-Bypass-Systems am WKW BAN. ....	12
Abb. 3.1	Überblick verschiedener Konzepte und Massnahmen für den Fischabstieg [9][10]. ....	16
Abb. 3.2	(a) Schematische Darstellung des Turbineneinlaufs am « <i>Lower Granite Dam</i> » (nach [23]) und (b) ein Foto eines gehobenen STS, an welchem auch für die Wirkungskontrolle befestigte Netze zu sehen sind. ....	22
Abb. 3.3	Bild vom Einbau eines BAFF-Elements beim <i>Barkley Dam</i> in den USA (Quelle: [27]). ....	24
Abb. 3.4	Situation beim Kraftwerkseinlauf des Kraftwerks Laudal in Norwegen mit Fliessrichtung von links nach rechts (Quelle Hintergrundbild: Google Maps). ....	28
Abb. 3.5	Blick gegen die Fliessrichtung auf den <i>Modified Bar Rack</i> beim Einlauf des Kraftwerks Laudal [34]. ....	29
Abb. 3.6	Modell einer RH-Turbine (a) mit fixen Laufradschaufeln und (b) mit verstellbaren Laufradschaufeln im Vergleich zu (c) und (d) konventionellen Turbinen (Quelle: Natel Energy). ....	33
Abb. 3.7	Überblick über Standorte, an welchen sich im August 2023 RH-Turbinen in Betrieb oder offiziell in Planung befanden (Quelle: nach [39]). ....	35
Abb. 4.1	Eine der mit dem Modell untersuchte Anordnung der partiellen Leitreechen beim KWWB mit vier jeweils 17 m langen Rechen und zwei Bypässen (Quelle: Axpo). ....	45
Abb. 4.2	Mit artunspezifischen Modellen berechnete Überlebensraten bei der Turbinenpassage des KWWB; Anzahl der Laufradschaufeln $z = 5$ entspricht der aktuell installierten Turbine und $z = 4$ einer fiktiven Ersatzturbine. ....	54
Abb. 4.3	Mit salmonidenspezifischen Modellen berechnete Überlebensraten bei der Turbinenpassage des KWWB; Anzahl der Laufradschaufeln $z = 5$ entspricht der aktuell installierten Turbine und $z = 4$ einer fiktiven Ersatzturbine. ....	55
Abb. 4.4	Vergleich der mit dem salmonidenspezifischen Modell von Turnpenny et al. (2000) berechneten mittleren	

	Überlebenswahrscheinlichkeiten für den effektiven Betrieb und einen fiktiven, fischoptimierten Betrieb für die Daten des Zeitraums 01.01.2021 bis 30.06.2022. ....	57
Abb. 4.5	Mögliche Anordnung eines BAFF-Systems mit einem Bypass beim WKW BAN (Quelle Orthofoto: Swisstopo). ....	59
Abb. 4.6	Analyse der Abstiegskorridore der beim WKW BAN während Wehrabfluss abgestiegenen Barben. ....	61

## Anhang 1 Zusätzliche Ergebnisse der Leitreechenberechnung

Rechen	Annahmen / Szenario		Schutzeffizienz [%]			Leiteffizienz [%]		
	Länge [m]	Leitwirkung [%]	Alle	Alet	Barben	Alle	Alet	Barben
	Referenzszenario Ist-Zustand		80	84	74	-	-	-
①②③④	8.5	60	89	94	84	48	61	33
①②	8.5	60	88	93	84	36	47	24
③④	8.5	60	86	93	80	37	55	19
①	8.5	60	87	92	83	29	35	21
②	8.5	60	86	92	81	25	38	10
③	8.5	60	85	91	80	32	46	17
④	8.5	60	83	90	77	21	37	4
①②③④	17	60	90	95	86	56	69	42
①②	17	60	89	94	85	45	59	31
③④	17	60	88	94	83	44	62	26
①	17	60	87	93	83	31	35	25
②	17	60	87	92	83	34	52	14
③	17	60	86	92	82	36	47	23
④	17	60	85	92	79	30	51	9
①②③④	8.5	100	91	97	86	67	83	47
①②	8.5	100	90	96	86	50	65	33
③④	8.5	100	88	96	81	52	74	28
①	8.5	100	89	94	86	41	50	31
②	8.5	100	88	94	82	35	54	14
③	8.5	100	87	94	81	45	63	26
④	8.5	100	84	93	77	30	54	6
①②③④	17	100	93	97	90	77	92	59
①②	17	100	92	96	88	64	82	44
③④	17	100	91	97	86	62	84	37
①	17	100	90	95	86	45	50	38
②	17	100	90	94	86	49	74	21
③	17	100	89	95	84	51	66	33
④	17	100	87	95	80	43	73	13

**Tab. 5.1** Zusammenfassung der berechneten artspezifischen Leit- und Schutzeffizienzen für verschiedene Konfigurationen partieller Leitreechen beim Kraftwerk Wildegg-Brugg unter der Annahme einer Leitwirkung von 60% und 100%.