Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 18.06.2015

Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken

Titel der VAW-Mitteilung: Leitrechen an Fischabstiegsanlagen: Hydraulik und fischbiologische Effizienz

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wasserkraft
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

VAR – Verband Aare-Rheinwerke, Rütistrasse 3A, CH-5401 Baden
swiss*electric* research, Seilerstrasse 3, CH3001 Bern
Bundesamt für Umwelt BAFU, 3003 Bern

Auftragnehmer:

ETH Zürich – Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)
Gloriastrasse 37/39
CH-8092 Zürich
www.vaw.ethz.ch

Autoren:

Carl Robert Kriewitz, VAW, kriewitz@vaw.baug.ethz.ch
Dr. Ismail Albayrak, VAW, albayrak@vaw.baug.ethz.ch
Prof. Dr. Robert Boes, VAW, boes@vaw.baug.ethz.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser
BFE-Programmleiter: Dr. Klaus Jorde
BFE-Vertragsnummer: SI/500642-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Querbauwerke in Fliessgewässern wie z.B. Flusskraftwerke können Wanderhindernisse für flussauf- oder -abwärts migrierende Fische darstellen. Aus diesem Grund werden bereits seit Jahrzehnten Anstrengungen unternommen, Wasserkraftwerke für Fische in beide Richtungen passierbar zu machen. Dieses Forschungsprojekt widmet sich der innovativen Weiterentwicklung vertikaler, schräg angeordneter Leitrechen, mit deren Hilfe stromabwärts migrierende Fische über Bypässe um grosse Wasserkraftwerke mit Ausbaudurchflüssen >100 m^3/s geführt werden sollen.

Grundlage der fischbiologischen Wirksamkeit von Leitrechen ist die schräge Orientierung von Rechenachse und Rechenstäben zur Anströmung. Diese Anordnung verursacht zum einen Störungen des Abflusses, die von Fischen gemieden werden sollen, und produziert zum anderen eine rechenparallele Leitströmung, die zur aktiven Verdriftung der Fische in einen Bypass führen kann.

Bisher unterscheidet man zwei Leitrechensysteme. *Louver* sind durch die orthogonale Ausrichtung der Rechenstäbe zur Anströmung charakterisiert, während bei *Bar Racks* der Winkel zwischen Rechenachse und Stab mit 90° vorgegeben ist. Untersuchungen zeigen, dass die Leiteffizienz der Systeme zunimmt, wenn spitze Einbauwinkel verwendet werden. In diesem Fall aber besitzen beide Leitrechensysteme ähnlich ungünstige hydraulische Eigenschaften, da bei *Bar Racks* die Schrägstellung der Rechenstäbe mit spitzem Rechenwinkel zunimmt.

Die vorliegende Arbeit basiert auf der Forschungsidee, durch die unabhängige Variation von Rechen- und Stabausrichtung Leitrechen so weiterzuentwickeln, dass ihr Einsatz an grossen Wasserkraftwerken wegen verbesserter hydraulischer Eigenschaften zu optimalen Ergebnissen führt und dabei zugleich die stromabwärts migrierenden Fische über Bypässe um diese Wasserkraftwerke geführt werden (Abb. 1). Dazu wurden bekannte und neu entworfene Leitrechenvarianten an drei physikalischen Modellen im Labor der VAW untersucht. Im ersten Schritt wurden die lokalen Energieverluste und Strömungsfelder in einem Detailmodell im Massstab 1:2 bestimmt. In ethohydraulischen Versuchen mit Lebendfischen erfolgte anschliessend die Überprüfung der Leitwirkung für typische mitteleuropäische Arten. Schliesslich wurden in einem Modell im Massstab 1:35 die Auswirkungen von Leitrechen auf den Kraftwerksbetrieb und die Turbinenanströmung analysiert.

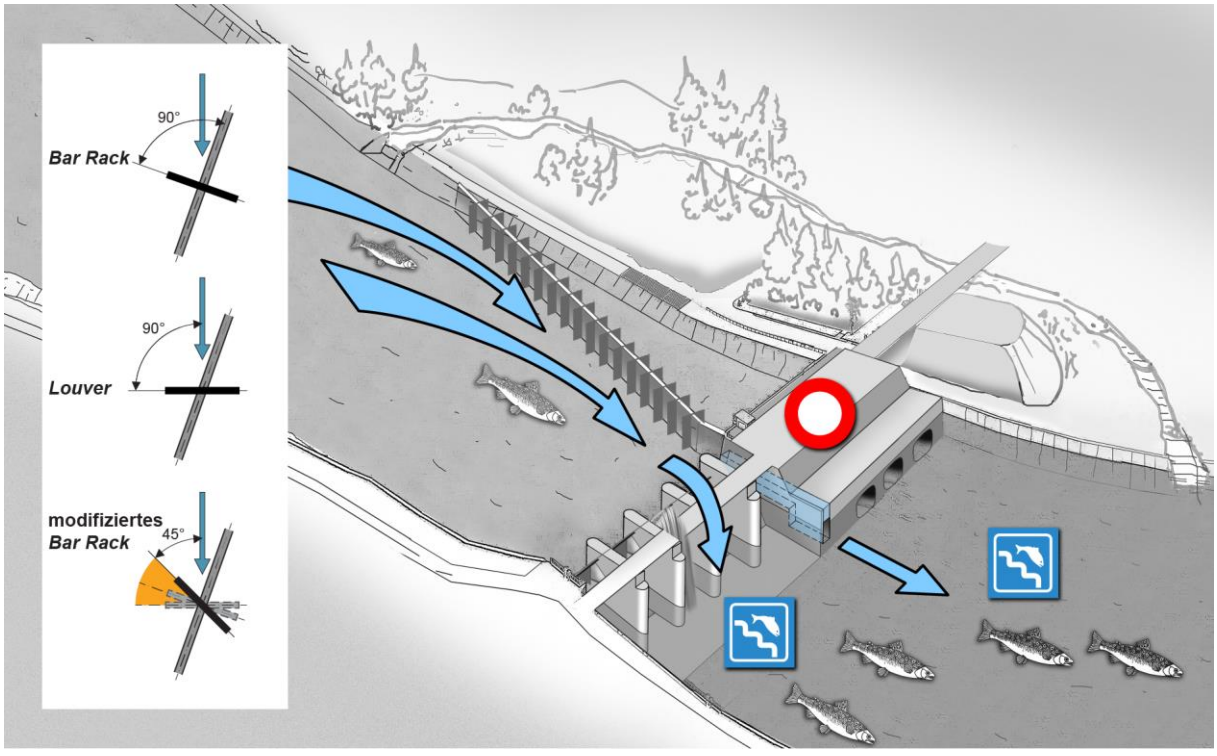

Abbildung 1: Projektidee mit Einsatz vertikaler Leitrechen und Detailansicht von *Louver*-, *Bar Rack*-und modifizierten *Bar Rack*-Systemen

Abstract

Man-made structures like hydro power plants (HPP) can hinder the up- and downstream migration of fish in river systems. Since decades research efforts are therefore being made to make HPPs passable for fish in both directions. This research project specifically is dedicated to the innovative advancement of oriented behavioural fish guidance screens to aid downstream fish migrating for a broad range of species at large HPPs with design discharges >100 m3/s for which only a limited number of highly specialized solutions exist yet. Basis of the biological effectiveness of fish guidance screens is both the oblique orientation of the screen axis and the screen slats in regard to the main flow direction. On the one hand this arrangement generates flow disturbances that are supposed to cause behavioural avoidance of fish and on the other hand a flow component parallel to the screen is produced, which can actively drift fish towards alternative bypass options.

To date two distinct oriented behavioural guidance screen systems are used. *Louvers* are characterized by slats which are set orthogonally to the main flow direction independent of the screen orientation, while *Bar Racks* feature slats that are always perpendicular to the screen axis (Abb. 1). Research results have shown that the guidance efficiency of such systems increases with decreasing screen angles. In this case, however, both screen variants possess similarly adverse hydraulic properties, because the slat inclination of *Bar Rack* systems increases to almost the same level as is present at *Louvers*. The present study is therefore based on the research idea to enhance guidance screen properties by independently varying the screen and the slat orientation. The goal is to identify configurations with hydraulic properties that are not prohibitive for the use at large HPPs while ethologically allowing for the safe and undelayed passage of a wide range of fish species.

For that reason established as well as newly designed guidance screen variants were tested at three physical models at the laboratory of VAW. In a first step the local hydraulic losses and the flow field near guidance screens were determined in a detailed model scaled 1:2. Subsequently, ethohydraulic tests scaled 1:1 with live fish were conducted to quantify the guidance efficiency for typical European fish species. Finally, a general HPP model with a scale of 1:35 was employed to analyse the impacts of guidance screens on power production and plant operation.

Ausgangslage

Rund 56% des Strombedarfs können in der Schweiz durch die erneuerbare und nachhaltige Produktion aus Wasserkraft gedeckt werden. Die grossen Niederdruck-WKA an Aare, Reuss, Limmat und Hochrhein steuern dazu wiederum ca. 25% bei. Sie sind damit ein wichtiges Standbein der Stromversorgung und werden auch in Zukunft ihre zentrale Stellung in der Schweizerischen Elektrizitätswirtschaft beibehalten (Pfammatter und Piot 2014). Dabei müssen sie sich aber neuen Herausforderungen im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung der Gesetzgebung stellen, die mit dem Inkrafttreten des revidierten Gewässerschutzgesetzes im Januar 2011 einen ambitionierten Plan zur Beseitigung der wesentlichen, durch den Menschen verursachten Gewässerbeeinträchtigungen innert 20 Jahren vorgibt.

Ein wichtiger Teilaspekt der Gewässersanierung umfasst die Wiederherstellung der Längsvernetzung von Fischhabitaten. Der für die Arterhaltung einiger mitteleuropäischer Fischarten wichtige Fischabstieg ist beim aktuellen Ausbaustandard der Anlagen beeinträchtigt. Fische passieren bei der Abwärtswanderung, der stärksten Lockströmung folgend, Flusskraftwerke via Turbinen, Grundablass oder Wehrüberfall und sind dabei einer Verletzungs- oder Tötungsgefahr ausgesetzt. Bekannt ist, dass die verschiedenen, heute an der Mehrzahl der Kraftwerksanlagen vorhandenen technischen Fischaufstiegshilfen oder naturnahen Umgehungsgerinne von Fischen nur in beschränktem Umfang zur Abwärtswanderung genutzt werden (Agostinho *et al.* 2007; Pelicice und Agostinho 2012). Insbesondere zum Schutz grosser Langstreckenwanderer besitzt daher die Implementierung von Fischschutzmassnahmen hohe Priorität.

Ziel der Arbeit

Die Projektierung von Fischschutzeinrichtungen bewegt sich im Spannungsfeld zwischen den Anforderungen, die einerseits durch die Energiestrategie 2050 und andererseits durch das revidierte Gewässerschutzgesetz (GSchG) gestellt werden. Es stehen sich dabei die intensivierte Nutzung des Wasserkraftpotentials und die geforderte Reduktion der negativen Auswirkungen der Wasserkraftnutzung gegenüber. Aus diesem Grund sollen Fischschutzeinrichtungen für den Einsatz an grossen Mittellandflusskraftwerken im Hinblick auf die schadlose Abwärtswanderung von Fischen eine Anzahl sehr weitreichender Anforderungen erfüllen:

- Schutz aller einheimischen Fischarten,
- Geringe Energieerzeugungsverluste und verhältnismässige Investitionskosten bei hoher Planungssicherheit,
- Einsatzsicherheit bei Geschiebe-, Schwemmholz- und Eisaufkommen.

Ziel des Forschungsprojektes war es, bauliche Massnahmen zum Fischabstieg zu prüfen und so weiterzuentwickeln, dass sie sowohl aus fischökologischer als auch betrieblicher Sicht erfolgreich und ökonomisch an grösseren Flusskraftwerken der Schweiz und Europas eingesetzt werden können. Im Zentrum des Forschungsinteresses standen dabei die Mittellandflusssysteme der Aare, Reuss, Limmat und des Hochrheins. Die Massnahmentypen müssen dabei folgende Anforderungen erfüllen:

- Umsetzbarkeit für Kraftwerke mit einem Ausbauwasserdurchfluss über 100 m^3/s,
- Gewährleistung des Schutzes typischer, einheimischer Fischarten,
- Erfüllen der besonderen betrieblichen Anforderungen erhöhten Schwemmholz- und Sedimentsaufkommens,
- Einsatz ohne Einschränkungen des Kraftwerksbetriebes möglich.

Vorgehen / Methode

Die Problematik des Fischabstiegs kann nicht einseitig durch rein biologische oder bautechnische Ansätze angegangen werden. Sie ist sowohl von der Fischfauna, als auch von den jeweiligen hydraulischen und morphologischen Besonderheiten in Kraftwerksnähe abhängig. Die vorliegende experimentelle Arbeit wurde deshalb in einem transdisziplinären Forschungsprojekt unter Einbindung von

Fachleuten aus Wasserwirtschaft, Wasserbau und Fischökologie umgesetzt. Dies ermöglicht den breiten Einsatz von Untersuchungsmethoden, beginnend mit hydraulischen Modellversuchen zur Erarbeitung der physikalischen Grundlagen von Fischschutzeinrichtungen und fortgesetzt durch ethohydraulische Versuche zur Qualifizierung und Quantifizierung der Fischleiteffizienz bei einheimischen Fischarten.

Das interdisziplinäre Forschungsprojekt hat u. a. zum Ziel, Kraftwerksbetreibern und Behörden Datengrundlagen bereitzustellen, die die Einrichtung fischökologisch wirksamer, betriebssicherer und hydraulisch optimierter Fischschutzeinrichtungen ermöglichen.

Die Erarbeitung aller Forschungsschwerpunkte erforderte Untersuchungen an mehreren physikalischen Modellen, da jede der Problemstellungen andere Anforderungen an die Modellgeometrie und -skalierung, die einzusetzende Messtechnik und die Wasserversorgung stellte. Der Forschungsbedarf im Zusammenhang mit vertikalen, schräg angeordneten Fischleitrechen konzentriert sich auf drei Forschungsschwerpunkte:

- Energieverluste und Strömungsmuster an Leitrechen,
- Fischschutzeffizienz im Hinblick auf typische, potamodrome Fischarten der Schweizer Mittellandflüsse,
- Auswirkungen auf den Kraftwerksbetrieb und die Energieproduktion grösserer Flusskraftwerke.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde ein weites Spektrum von Fischleitrechen auf ihre hydraulischen und fischbiologischen Eigenschaften untersucht. Dieses Spektrum beinhaltete sowohl bekannte Konfigurationen als auch solche, deren geometrische Eigenschaften zur Optimierung der Strömungsverhältnisse systematisch variiert wurden. Konkret wurde das Ziel verfolgt, modifizierte Leitrechen zu entwickeln, die bei gleichbleibender oder verbesserter Fischleiteffizienz geringere hydraulische Verluste oder Energieproduktionseinbussen an Flusskraftwerken verursachen.

Basierend auf der Durchführung hydraulischer und ethohydraulischer Versuche wurden an drei physikalischen Modellen die zur Lösung der oben formulierten Aufgabe notwendigen Erkenntnisse erarbeitet (Tab. 1):

(i) In einem Detailmodell (Abb. 2) erfolgte die Bestimmung der lokalen hydraulischen Energieverluste an geometrisch mit dem Skalierungsfaktor $\lambda = 2$ verkleinerten Leitrechen. Die Parameter (Abb. 3) wurden systematisch und in grossem Umfang variiert. Der so erhobene Datensatz bildete die Grundlage zur Entwicklung einer Gesamtverlustformel, mit der der Verlustbeiwert ξ_R in bestimmten Grenzen für beliebig modifizierbare Leitrechenkonfigurationen berechnet werden kann. Zudem wurden mittels PIV-Verfahren räumlich hoch aufgelöste Strömungsmusterkarten erstellt, die die mittleren Fliessgeschwindigkeiten, die Turbulenzintensitäten und Wirbelzellen in ebenen Horizontalschnitten der Zu- und Abströmung von Leitrechen charakterisieren.

(ii) In enger Zusammenarbeit mit den Biologen des Forschungspartners Eawag wurden Lebendfischversuche an einem ethohydraulischen Ausschnittmodell im Massstab 1:1 (Abb. 4) durchgeführt. Zum einen wurden das artspezifische Verhalten und zum anderen die Fischleiteffizienz untersucht. Diese Ergebnisse wurden mit Ergebnissen von Geschwindigkeitsmessungen im Modell verglichen.

(iii) An einem Gesamtmodell im Massstab 1:35 wurde ein typisches Mittelland-Flusskraftwerk nachgebildet (Abb. 5). Mittels Geschwindigkeitsmessungen und Strömungsvisualisierungen im unverbauten und durch Leitrechen modifizierten Zustand wurden die Auswirkungen auf die Energieproduktion und den Kraftwerksbetrieb bestimmt.

Tabelle 1: Bezeichnung, Funktion und geometrischer Massstab der Versuchsstände

Detailmodell M 1:1 & 1:2	Ethohydraulisches Modell M 1:1	Kraftwerksmodell M 1:35
Energieverluste für breites Parameterspektrum von Leitrechenkonfigurationen	Leiteffizienzbestimmung für einheimische Arten in Lebendfischversuchen	Einfluss von Leitrechen auf die Kraftwerksanströmung und Energieproduktion
Hochaufgelöste Beschreibung der Strömungscharakteristika	Ethologische Auswertung verschiedener Leitrechenkonfigurationen	Betriebliche Aspekte, z.B. Schwemmholz- und Sedimentverhalten, Hochwassersicherheit

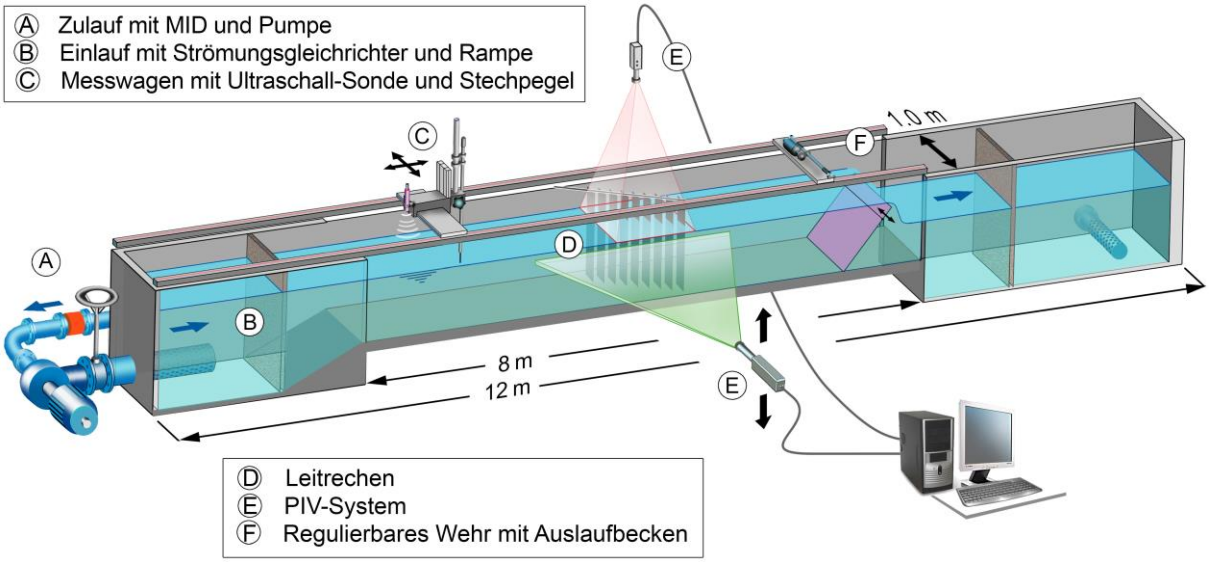

Abbildung 2: Prinzipskizze des Detailmodells mit Bezeichnung der wichtigsten Modellkomponenten und Messinstrumente

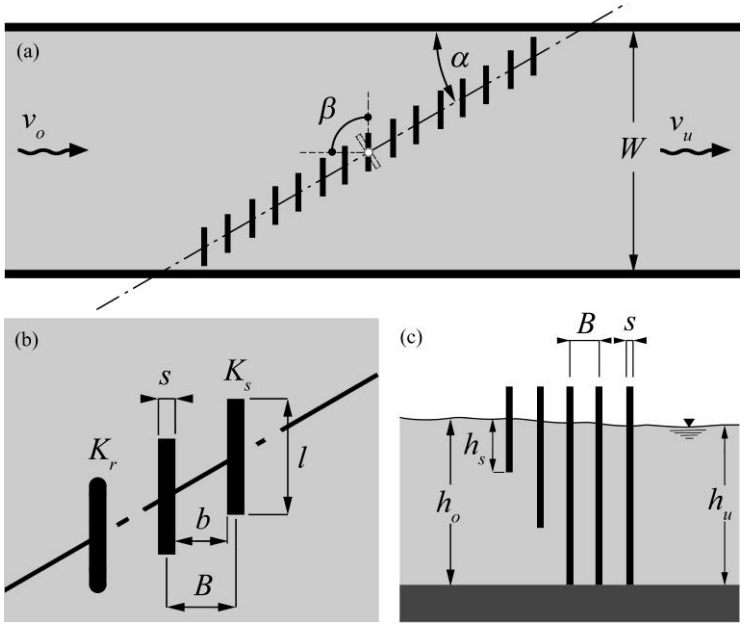

Abbildung 3: Geometrische und hydraulische Parameter der Leitrechenversuche

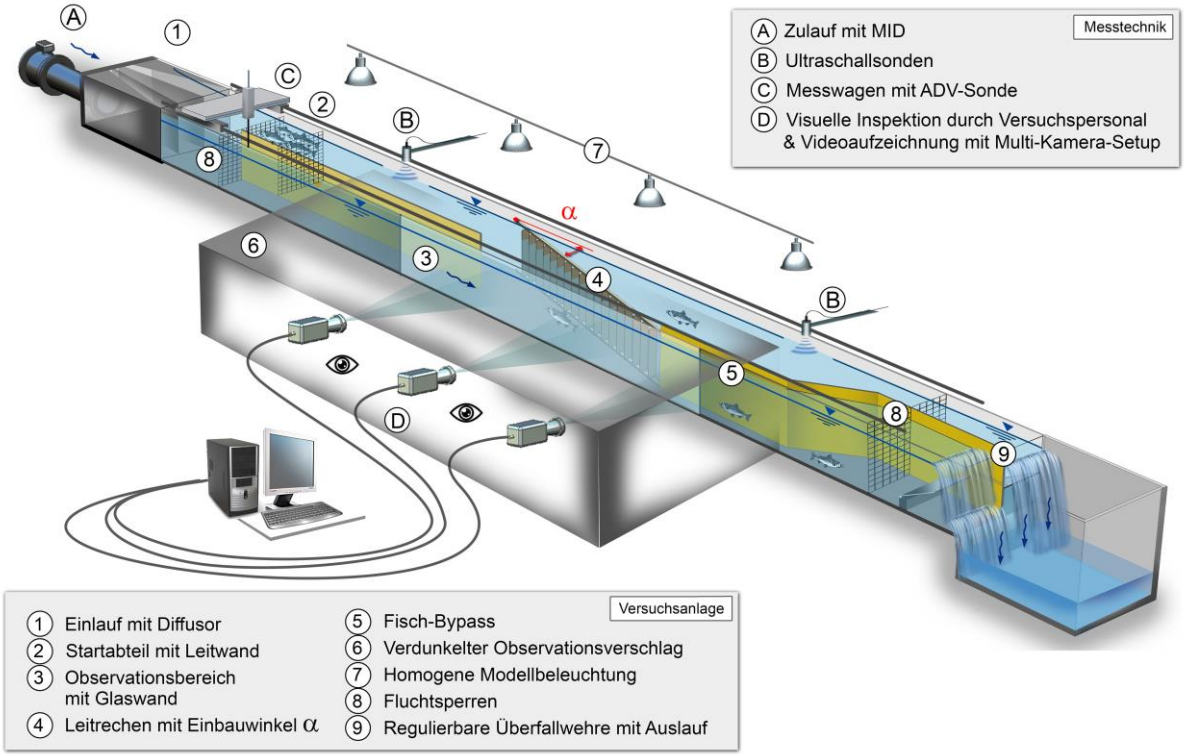

Abbildung 4: Prinzipskizze des ethohydraulischen Modells mit Bezeichnung der wichtigsten Modellkomponenten und Mess-instrumente

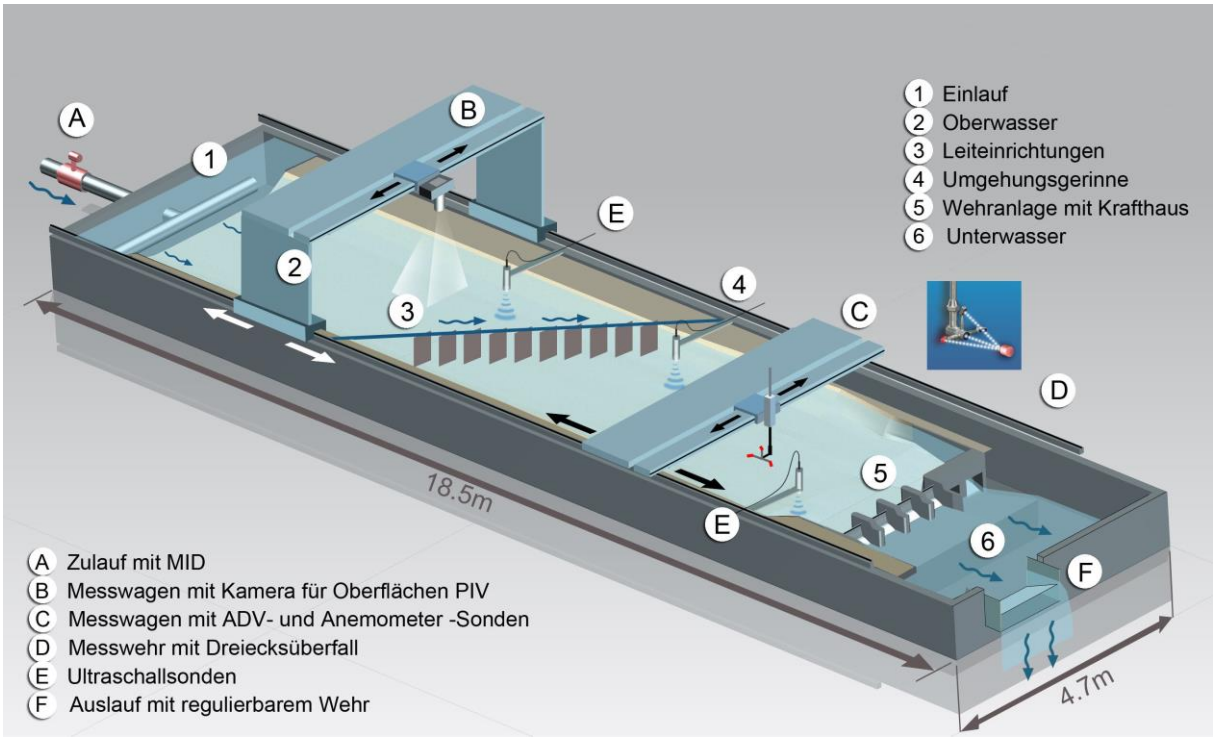

Abbildung 5: Prinzipskizze des Kraftwerksmodells

Ergebnisse / Erkenntnisse

Die wesentlichen Erkenntnisse der Untersuchungen werden nachfolgend - nach Themengebieten gegliedert - zusammengefasst.

Energieverluste und Strömungsfelder an Leitrechen

- Der lokale Energieverlust an Leitrechen lässt sich durch die Gesamtverlustformel beschreiben. Darin repräsentiert ξ_B den Basisverlustbeiwert der Hauptparameter Rechenwinkel α, Stabwinkel β und dimensionsloser Stababstand σ. Die Verlustfaktoren C_i berücksichtigen zusätzlich Einflüsse der Stabtiefe (C_L), der Eintauchtiefe (C_κ) und der Stabform (C_S).

$$\xi_R = \xi_B \cdot C_L \cdot C_\kappa \cdot C_S$$

- Die drei Hauptparameter beeinflussen die Energieverluste an Leitrechen massgebend. Ihr Einfluss auf den Basisverlustbeiwert ist durch einen neu entwickelte Berechnungsvorschlag gegeben.
  Der Einfluss von α und σ auf den Basisverlustbeiwert ξ_B ist von einer starken Wechselwirkung geprägt. Je spitzer der Rechenwinkel wird, umso geringeren Einfluss hat die Variation des Stababstandes. Im Fall der *Louver*-Konfiguration führt so bei $\alpha = 45°$ die Vervierfachung des axialen Stababstandes von $B = 6$ cm auf 24 cm ($\sigma = 0.17$ und 0.04) zu einer Abnahme des Basisverlustbeiwertes ξ_B um 90% während bei $\alpha = 15°$ ξ_B nur eine Abnahme um 50% erfährt. Nochmals deutlicher fällt der Vergleich beim *Bar Rack* mit $\beta = 45°$ aus. Im gleichen Szenario beträgt die Abnahme von ξ_B erst 78% und folgend ≈ 0%. Bei der Planung von spitzwinklig angeordneten Fischleitrechen ist also die Erhöhung des Stababstandes zur Minimierung des Verlustbeiwertes nicht zielführend.
  Demgegenüber führt eine Verringerung des Stabwinkels immer zur Abnahme von ξ_B. Es ist deshalb empfohlen, zur hydraulischen Optimierung β zu variieren.

$$\xi_B = 245\left[0.0275 + (\sigma - 0.0815)\left(\frac{\alpha}{90°}\right)\right]\left(\frac{\beta}{90°}\right)^{5\sigma^{0.44}}$$

- Die Verlustfaktoren C_i beschreiben das Leitrechenverhalten wie folgt:
  C_L: Modifikationen der Stabtiefe wirken sich signifikant nur bei Rechen mit weiten Stababständen und spitzen Rechenwinkeln aus.
  C_S: Der Einsatz abgerundeter Rechenstäbe führt erwartungskonform grundsätzlich zu einer Abnahme von ξ_R; ausgeprägt z.B. bei stumpfen Rechenwinkeln und weiten Stababständen um bis zu 20%. Allerdings wurde für die fischschutzrelevante Konfiguration mit spitzem Rechenwinkel ($\alpha = 15°$, $\sigma = 0.17$) eine Zunahme von ξ_R um 15% festgestellt.
  C_κ: Teileingetauchte Leitrechen verursachen selbstverständlich geringere Gesamtverluste, da sie den Abflussquerschnitt nur partiell verbauen. Die Quantität der Reduktion von ξ_R mit abnehmender Eintauchtiefe ist unabhängig vom Rechenwinkel und wird lediglich durch den Stababstand beeinflusst.
- Die Strömungsfelduntersuchungen lassen den Rückschluss zu, dass die an Leitrechen hervorgerufenen Energieverluste massgebend von den Strömungsbedingungen im Unterwasser beeinflusst sind. Dort kommt es in grossräumigen Rezirkulationszonen und den angrenzenden Scherschichten zur verstärkten turbulenten Energiedissipation.
- Generell wird die Strömung an Leitrechen im Rechenkeil beschleunigt und es treten bei allen Konfigurationen verschieden stark ausgeprägte, rechenparallele Leitströmungen auf. Die Geschwindigkeitszunahme ist für kleine α, grosse β und grosse σ stärker ausgeprägt. Der Beschleunigung der Strömung im Rechenkeil steht eine Verzögerung am Rechenkopf gegenüber.
- Aufgrund der beschriebenen Geschwindigkeitsgradienten in der Anströmung von Leitrechen kommt es mit Abnahme des Rechenwinkels zur Ausbildung einer räumlich klar begrenzten, vertikalen Scherzone zwischen der verzögerten Rechenkopfströmung und der beschleunigten Strömung in den Rechenkeil.
- Skalierungseffekte besitzen ein vernachlässigbaren Einfluss auf die Versuchsresultate am Detailmodell, wenn, wie spezifiziert, die Reynolds-Zahl im Versuch $R \geq 2\times10^5$ erreicht oder überschreitet.
- Fallhöhenverluste an Leitrechen variieren abhängig von der gewählten Konfiguration stark und können die Verluste herkömmlicher Einlaufrechen deutlich übersteigen. Zur Einordnung der Bandbreite sind in Abbildung 6 die Energieverlustbeiwerte aller Testkonfigurationen dargestellt

und einige wichtige Beispiele hervorgehoben. Ferner vermittelt die Abbildung einen optischen Eindruck von der Genauigkeit des neuen Berechnungsvorschlages. Es sind die berechneten Energieverlustbeiwerte $\xi_{R,K}$ auf der Abszisse und die gemessenen Energieverlustbeiwerte $\xi_{R,M}$ auf der Ordinate vergleichend dargestellt. Ja näher die Datenpunkte an der Diagrammdiagonalen liegen, umso genauer werden die Messergebnisse durch den Berechnungsvorschlag widergespiegelt. Im Mittel beträgt die Standardabweichung ca. 15% und kann damit als gering eingestuft werden.

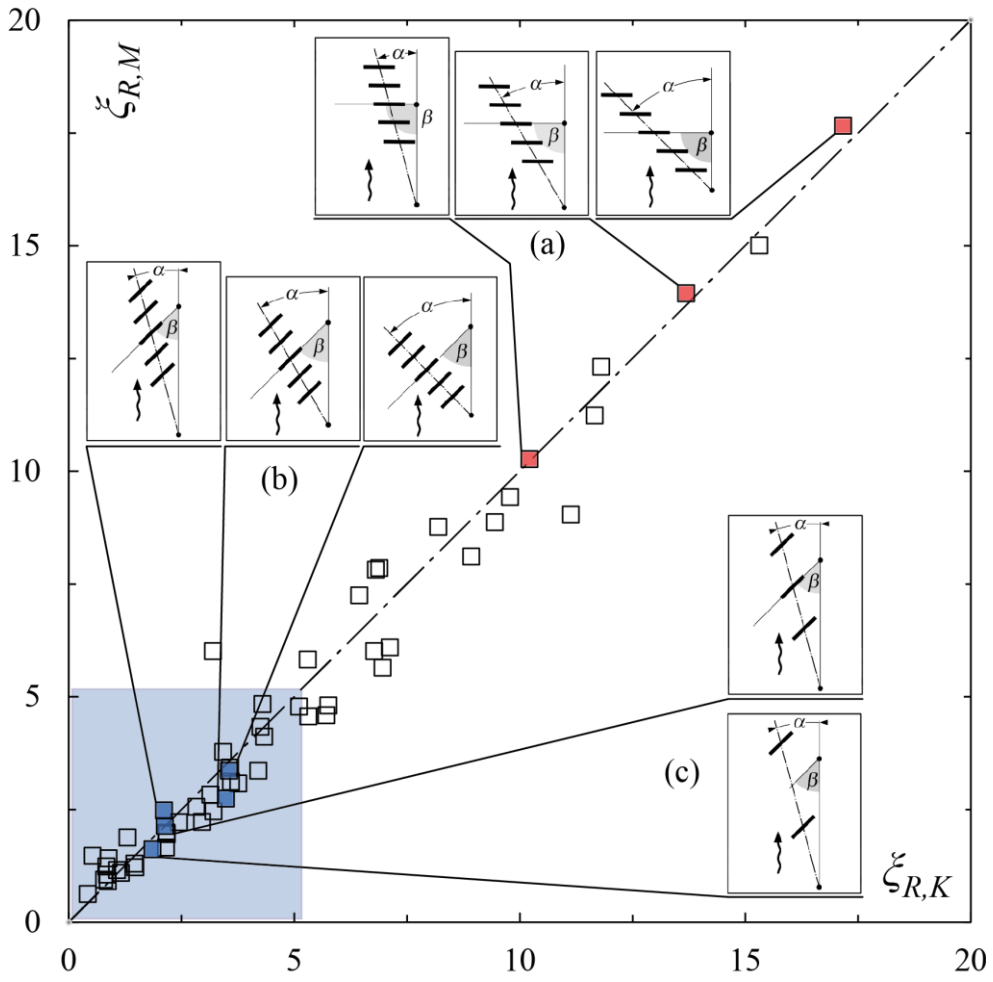

Abbildung 6: Ergebnisübersicht mit Auswahl wichtiger Leitrechenkonfigurationen: (a) Louver mit α = 15°, 30°, 45° bei B = 6 cm (σ = 0.17); (b) modifizierte Bar Racks analog zu (a); (c) modifizierte Bar Racks mit α = 15° und B = 12 cm und 24 cm (σ = 0.08 resp. 0.04); die blaue Zone repräsentiert (Kriewitz 2015 und Kriewitz et al. 2015)

Fischbiologische Effizienz von Leitrechen

- Im ethohydraulischen Modell wurden Leitrechen der *Louver*-Konfiguration mit dem Rechenwinkel α = 15°, dem Stabwinkel β = 90° und den lichten Stababständen b = 5cm und 11 cm sowie *Bar Rack*-Konfigurationen mit α = 15° und 30°, β = 45° und b = 5 cm und 11 cm und eine Kontroll-Konfiguration mit α = 30°, β = 0° und b = 5 cm untersucht. Die mittleren Fliessgeschwindigkeiten im Zulauf betrugen 0.3 m/s, 0.6 m/s oder 0.8 m/s. Es konnten spezifische und reproduzierbare Zusammenhänge zwischen den Rechenkonfigurationen und den Verhaltensmustern der Testfische abgeleitet werden.
- Die getesteten Fischarten zeigten zwei grundlegend unterschiedliche Verhaltensmuster bei der Annäherung an die Leitrechen. Während Barben, Bachforellen und Aale den direkten Kontakt zum Rechen suchten und diesen vorrangig mit der Schwanzflosse aktiv erkundeten, hielten Schneider und Äschen überwiegend Abstand zum Rechen (Abb. 7).

- Trotz der abweichenden Verhaltensmuster wurden keine grundlegenden qualitativen Unterschiede im Hinblick auf die beobachtete, fischleitende Wirkung der Rechen für verschiedene Arten festgestellt. Fische wurden generell signifikant schlechter mit Erhöhung des Stababstandes und moderat schlechter im Fall der *Louver*-Konfiguration, also mit erhöhtem Stabwinkel, geleitet. Die fischleitende Wirkung war nicht signifikant vom Rechenwinkel oder der Fliessgeschwindigkeit beeinflusst.
- Die Fischleiteffizienz (FLE) berücksichtigt als Versuchserfolg allein das Einschwimmen in den Bypass. Fische, die im Versuchszeitraum zwar erfolgreich vom Leitrechen zum Bypass geleitet wurden, aber nicht in diesen einschwammen, tragen nicht zur FLE bei. Wird nur die FLE betrachtet und nicht allein die beobachtete leitende Wirkung, verschlechtert sich die Beurteilung der *Louver*-Konfiguration deutlich. Hintergrund dafür sind die Strömungsverhältnisse am Bypass-Einlauf. Aufgrund der im Verhältnis zu den anderen Konfigurationen stärksten Zunahme der Fliessgeschwindigkeit am Rechenfuss des *Louvers*, mieden viele Individuen diesen Bereich oder wurden im Fall strukturliebender Arten vermehrt durch die Rechenstäbe in das Unterwasser gesogen.
- Generell stellte der Bypass-Einlauf bei der Abwanderung eine Schlüsselstelle dar. Zur Einstiegsverzögerung oder -verweigerung führten einerseits starke Transversalströmungen in Richtung Leitrechen, die im Fall des Louvers am stärksten ausgeprägt waren, aber auch die Strömungsverzögerung im Bypass, die insbesondere bei schwimmstarken Arten wie der Äsche zur Abnahme der FLE führten.
- Die höchsten FLE wurden im Modell mit *Bar Racks* unabhängig vom Rechenwinkel erzielt. Die FLE lagen im Bereich zwischen 72.7% und 100%. Äschen stellen eine Ausnahme dar. Nur 35% schwammen in den Bypass, allerdings wurde auch keine Rechenpassage registriert.
- In zusätzlichen Versuchen wurde die Wirkung einer 10 cm hohen Sohlleitwand (SL) untersucht. Sie führte generell zur Steigerung der FLE. Verantwortlich dafür waren zwei Gründe: Zum einen eliminierte die SL in Bodennähe die Transversalströmungen am Rechen und zum anderen führte sie ebenfalls bodennah zu einer Erhöhung der Fliessgeschwindigkeit im Bypass-Einlauf. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf Naturverhältnisse muss jedoch skeptisch betrachtet werden.
- In Versuchen mit einer Kontroll-Konfiguration, in der zwar der Rechen schräg angeordnet war, die Rechenstäbe aber eine parallel zur Strömung orientierte Position besassen, wurde der Einfluss der spezifischen hydraulischen Signatur von Leitrechen untersucht. Die Kontroll-Konfiguration führte nicht zur Teilumlenkung der Strömung und verursachte entsprechend keine Leitströmung in Richtung Bypass. Die strukturliebenden Barben wurden nicht geleitet und durchschwammen den Rechen meist ohne Zögern. Schneider hingegen nahmen auch die Rechenvariante als Hindernis war. Die in der Kontroll-Konfiguration festgestellte leitende Wirkung und die FLE wurden ohne Unterschied auch bei den *Bar Racks* festgestellt.

Um eine Einschätzung der artübergreifenden Wirksamkeit von Leitrechen zu ermöglichen, sind in Abbildung 8 die mittleren sowie minimalen und maximalen FLE , definiert als die Anzahl der Bypass-Nutzungen, aller jeweils getesteten Fischarten für die vier erfolgreichsten Leitrechenkonfigurationen dargestellt. Es handelt sich dabei um modifizierte *Bar Racks* mit den folgenden Parametern:

- K1: α = 15°, β = 45°, B = 6 cm, U_o = 0.6 m/s, ohne SL
  Testfischarten: Aal, Bachforelle, Barbe, Schneider
- K2: α = 15°, β = 45°, B = 6 cm, U_o = 0.6 m/s, mit SL
  Testfischarten: Aal, Bachforelle, Barbe
- K3: α = 30°, β = 45°, B = 6cm, U_o = 0.6 m/s, ohne SL
  Testfischarten: Äsche, Barbe, Schneider
- K4: α = 30°, β = 45°, B = 6cm, U_o = 0.6 m/s, mit SL
  Testfischarten: Aal, Äsche, Bachforelle, Barbe, Schneider

Die Abbildung verdeutlicht mehrere Aspekte. Es wird ersichtlich, dass die artübergreifende FLE deutlich vom Einsatz einer SL beeinflusst wird. Sowohl bei α = 15° als auch α = 30° werden damit mittlere FLE von mehr als 90% erreicht.

Der Vergleich der FLE beider Rechenwinkel zeigt beim Einsatz einer SL keine signifikanten Unterschiede, suggeriert aber für Leitrechen ohne SL einen deutlichen Vorteil der Variante mit α = 15°. Hintergrund für dieses Ergebnisses ist allerdings das stark differenzierte Verhalten von Äschen, die ausschliesslich an modifizierten Bar Racks mit α = 30° getestet wurden. Hier verweigerten sie bei der Konfiguration ohne SL den Einstieg in den Bypass. Anders als bei Schneidern ist dieses Verhalten nicht auf die Überschreitung ihrer Sprintgeschwindigkeiten zurückzuführen. Vielmehr mieden Äschen den Bypass-Einlauf selbst, in dem es zum Einbruch der Fliessgeschwindigkeit kam. Wie beschrieben wurden diese Bedingungen mit SL deutlich verbessert und resultierten in einer stark erhöhten FLE. Allerdings durchschwammen Äschen den Leitrechen bereits im Versuch ohne SL nicht und verblieben im Oberwasser. Es ist davon auszugehen, dass auch die FLE der modifizierten Bar Racks mit α=15° analog beeinflusst wäre und es somit zu einer Egalisierung der FLE käme. Ferner ist von grosser Bedeutung, dass bei optimierter Ausführung der Bypass-Einlaufbedingungen die Akzeptanz bei Äschen auch ohne den Einsatz einer SL gesteigert werden kann.

Die Auswertung der artübergreifenden FLE bestätigt das bereits artspezifisch formulierte, positive Ergebnis im Zusammenhang mit dem Einsatz von Leitrechen zum Fisch-schutz. Sollten sich die Laborergebnisse im Feld bestätigen lassen, bieten Leitrechen aktuell als einziger Massnahmentyp die Möglichkeit, eine breite Anzahl von Fischspezies an grossen WKA durch eine einzelne Fischschutzeinrichtung schonend in das Unterwasser abzuleiten.

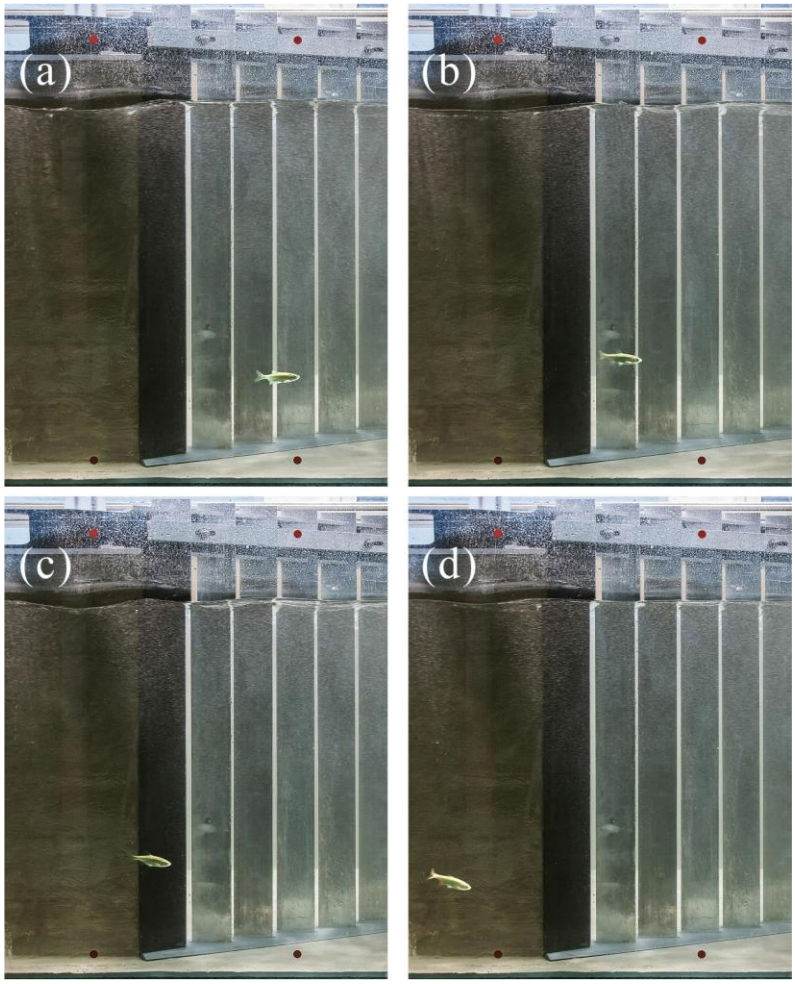

Abbildung 7: Schneider im Versuch mit Kontroll-Konfiguration (α = 30°, β = 30° und B = 6 cm) in zeitlicher Abfolge zwischen Bypass-Annäherung und Bypass-Eintritt (a) bis (d) bei U_o = 0.6 m/s

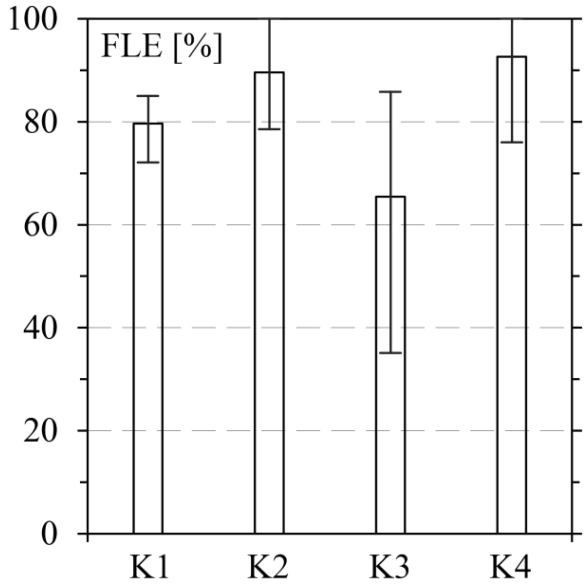

Abbildung 8: Durchschnittliche, artübergreifende FLE für die wichtigsten Leitrechenkonfigurationen K1 bis K4 mit Angabe der maximal und minimal erreichten, artübergreifenden FLE

Vom Forschungspartner Eawag wurde ein eigenständiger Projektbericht mit dem Fokus auf die ethohydraulischen Modellversuche verfasst (Flügel et al. (2015). Dieser ist unter http://www.aare-rheinwerke.ch/Projekt-Fischabstieg verfügbar.

Kraftwerksanströmung mit Leitrechen

- An einem Flusskraftwerk in Blockbauweise wurden Fischleitrechen mit einem im Kraftwerkstrennpfeiler angeordneten Bypass-System untersucht. Die Leitrechen beeinflussten die Kraftwerksanströmung signifikant. Oberstrom der Rechen führte die angestrebte Ausbildung einer Leitströmung und damit verbundene Teilumlenkung des Abflusses zur Erhöhung der Fliessgeschwindigkeiten am Trennpfeiler. Unterstrom verschlechterte sich die Strömungscharakteristik an den Turbineneinläufen.
- Die getesteten *Louver*-Konfigurationen zeigten Eigenschaften, die ihren Einsatz an Flusskraftwerken nicht empfehlen lassen (Abb. 9).
  Zunächst hatte die ausgeprägte Konzentration des Abflusses am Rechenfuss die Verschlechterung der Bypass-Anströmung zur Folge. Es traten dort orthogonal zu Rechenachse und Bypass-Öffnung orientierte Querströmungen mit $V_{max} \approx 2$ m/s auf. Solche Strömungsverhältnisse führen aber mit hoher Sicherheit zur Schädigung von Fischen am Leitrechen und reduzieren die Auffindbarkeit des Bypass-Einstieges.
  Des Weiteren ist eine signifikante Abnahme der Kraftwerkseffizienz zu erwarten. *Louver* verursachten lokale Fallhöhenverluste von 0.4 m und führten zur inhomogenen Anströmung der Turbinen. Am dem Rechenfuss benachbarten Turbineneinlauf traten überdies Rückströmungen auf.
- *Bar Rack*-Konfigurationen zeigten vergleichsweise gutmütige Charakteristiken. Sie beeinflussten die Wasserspiegellagen vor dem Kraftwerk so geringfügig, dass keine im Modell messbaren Fallhöhenverluste auftraten. Dennoch verschlechterten sie die Qualität der Kraftwerksanströmung.
  In dieser Konfiguration verbesserten sich weiterhin die Strömungsbedingungen am Rechenfuss und in der Nähe des Bypass-Einstieges, was aber das Auftreten von Querströmungen nicht verhinderte, die die Auffindbarkeit des Bypasses erschweren. Diese unterschritten allerdings mit $V_{max} \approx 0.8$ m/s die bei der *Louver*-Konfiguration aufgetretenen Querströmungen deutlich.
- Als hydraulische und fischbiologische Schlüsselstelle wurde die Rechenfuss- und Trennpfeilerströmung identifiziert. Hier brach die rechenparallele Leitströmung zusammen, da der Abfluss generell zum Kraftwerk und damit orthogonal zur Rechenachse orientiert war. Dadurch wird

auch die Auffindbarkeit des Bypasses erschwert, da die Lockströmung von der Trennpfeilerumströmung stark überlagert wurde.

- Schwemmholzuntersuchungen am Modell wiesen die Notwendigkeit eines aktiven Schwemmholzmanagements aus, um die grossräumige Verlegung der Leitrechen zu verhindern.

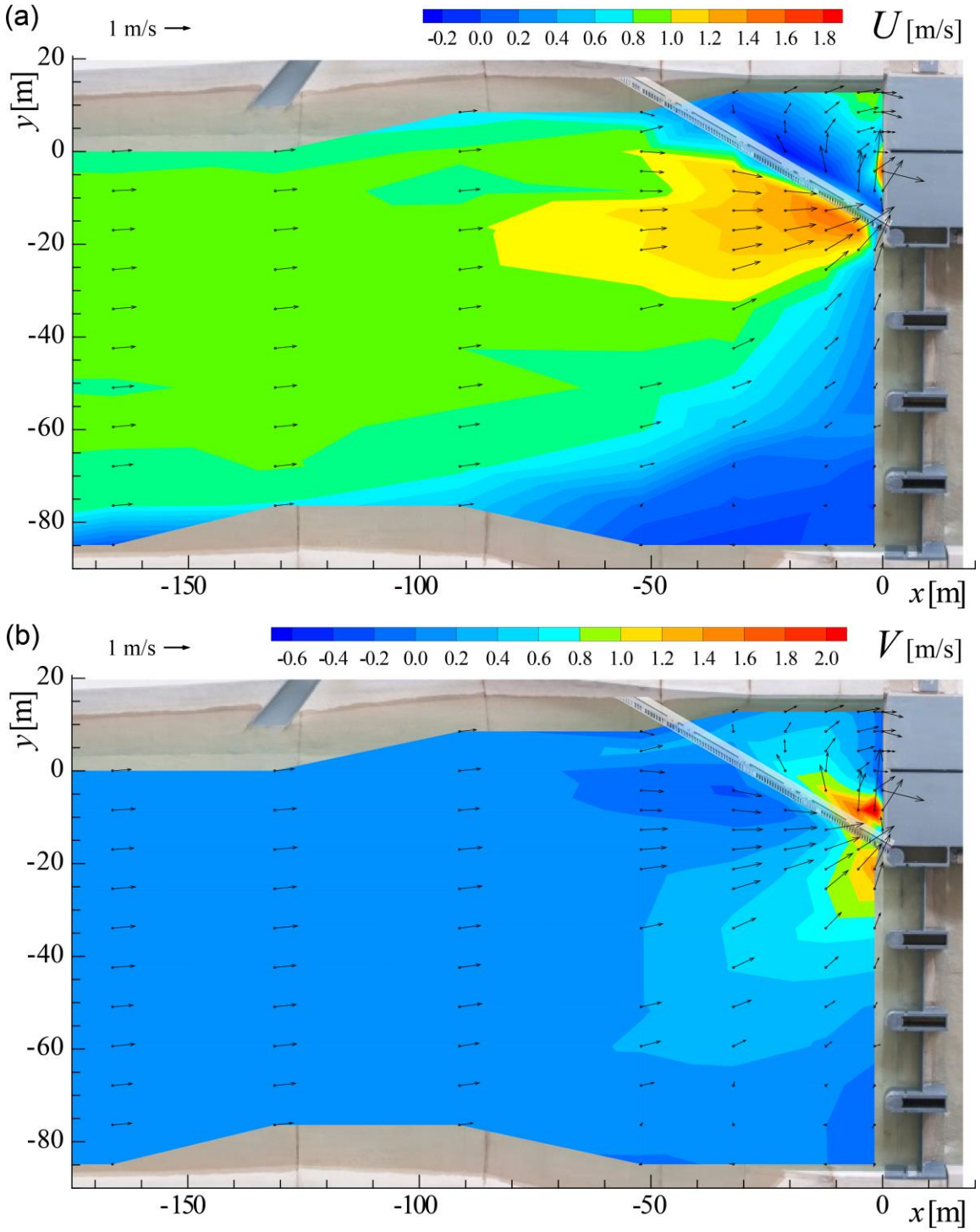

Abbildung 9: Grossräumige Kraftwerksanströmung des Leitrechens mit α = 30° und β = 90°, (a) Longitudinalgeschwindigkeit U, (b) Transversalgeschwindigkeit V mit Darstellung der Resultierenden U_r als Vektorpfeile

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Untersuchungen an drei physikalischen Modellen führten zur Erstellung eines umfassenden Datensatzes, der das Zusammenspiel von hydraulischen und fischbiologischen Aspekten von Fischleit-

rechensystemen widerspiegelt. Die vorliegende Arbeit stellt basierend darauf erstmals ein Werkzeug zur vollständigen hydraulischen Bemessung von Leitrechen mit freier Wahl der geometrischen Parameter zur Verfügung. Ferner beschreibt sie umfassend die mittleren und turbulenten Strömungscharakteristika von Leitrechen und bietet mit den zugrunde liegenden PIV-Vektordaten eine Benchmark-Basis für deren numerische Modellierung.

Die Arbeit muss dennoch als erster Schritt auf dem Weg zur fischbiologischen und ingenieurtechnischen Umsetzung gesehen werden, da die transdisziplinäre Spannweite der Problemstellung den Umfang eines dreijährigen Forschungsprojektes weit überschreitet.

Zusätzlich zu den bereits erarbeiteten Resultaten könnten die folgenden potentiellen Zielsetzungen zur Abrundung des Prozessverständnisses und zur Präzisierung und Erweiterung der Gesamtverlustformel führen:

- Die Untersuchung wies nach, dass die unabhängige Variation von Rechen- und Stabwinkel sowohl zur hydraulischen als auch fischbiologischen Optimierung von Leitrechen führt. Das Parameterspektrum deckte allerdings nur Stabwinkel im Bereich $45° \leq \beta \leq 90°$ ab. Rechenkonfigurationen mit weiter reduzierten Stabwinkeln würden mit Sicherheit zur Verbesserung der Kraftwerksanströmung und Senkung der hydraulischen Verluste führen. Ihre hydraulische Analyse, vor allem aber die Überprüfung ihrer fischbiologischen Wirkung und der resultierenden FLE unter vergleichbaren Laborbedingungen gehört zu den wichtigen noch offenen Fragestellungen, deren Klärung sich dringlich empfiehlt.
- Die Bypass-Anströmung stellte sowohl in den ethohydraulischen als auch gross-skaligen Versuchen eine kritische Schlüsselstelle dar. Es wurden der Einbruch der Leitströmung und die dominante Überlagerung der Bypass-Lockströmung nachgewiesen. Die kombinierte Optimierung der Rechenleitwirkung und der Strömungsverhältnisse am Bypass ist deshalb aufgrund ihrer Wechselwirkung zum Erreichen einer hohen Gesamtleiteffizienz von zentraler Bedeutung bei zukünftigen Forschungsarbeiten.
- Das Ziel der Korrelation von Fischverhalten und hydraulischer Charakteristik der Leitrechenströmung konnte nur teilweise erreicht werden. Grund dafür sind die komplexen Anforderungen an eine zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Dokumentation der Fischbewegungen im Modell, die derzeit noch nicht erfüllt werden konnten. Das machte eine exakte Auswertung und den folgenden Abgleich mit Strömungsdaten schwer und sogar teilweise unmöglich. Ein erster Schritt zur Lösung dieser Problematik wurde bereits mit der Entwicklung des *Fish-Tracking* Moduls an der VAW gegangen. Mit Hilfe dieser Software ist eine automatisierte Auswertung des Videomaterials und statistische Quantifizierung der Fischbewegung möglich. Die Forschungsarbeiten machten aber klar, dass die Weiterentwicklung des *Fish-Tracking* Moduls unerlässlich ist und zusätzlich auch das Messgerätespektrum bei der Durchführung ethohydraulischer Tests erweitert werden muss.
- In der Schweiz sind mehr als 60 Fischarten bekannt, von denen ein Grossteil einen Gefährdungsstatus besitzt. In der vorliegenden Untersuchung wurden fünf wichtige Vertreter dieser Arten untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass sich das typische Verhalten für bestimmte Fischarten kategorisieren lässt und es sollte somit möglich sein, die FLE verhaltensbiologisch verwandter Spezies abzuschätzen. Vor dem Hintergrund der notwendigen Schaffung einer weiten Akzeptanz für Fischleitrechen sowohl bei den Fachleuten als auch in der Öffentlichkeit sind allerdings Unsicherheiten bei der Abschätzung des Fischverhaltens durch zusätzliche ethohydraulische Untersuchungen mit einem erweiterten Artenspektrum unabdingbar. Diese sollten vorwiegend nachtaktive Tiere unter entsprechend angepassten Versuchsbedingungen einbeziehen.
- Zusätzliche, innovative Impulse könnte die Integrierung weiterer Verhaltensreize setzen. So könnten Leitrechen mit elektrischen Scheuchanlagen kombiniert werden.
- Die signifikante Erhöhung der Fliessgeschwindigkeiten am Rechenfuss, aber auch die systembedingt auftretenden Ablöseerscheinungen im Nachlauf der Rechenstäbe, sind als kritische Eingangsparameter zur Schwingungsanregung bekannt. Im Zusammenhang mit einer Prototypimplementierung ist die vertiefende Analyse des Schwingungsverhaltens dringend empfohlen.

Schlussbericht

Der vollständige Schlussbericht inklusive Bemessungsbeispiel liegt als VAW-Mitteilung Nr. 230 vor und kann unter http://www.vaw.ethz.ch/publications/ vaw_reports/2010-2019 heruntergeladen werden. Eine anwendungsorientierte Zusammenfassung ist zudem in der Fachzeitschrift „Wasser – Energie – Luft“ des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbands publiziert worden (Kriewitz et al. 2015).

Referenzen

Agostinho A. A., Marques E. E., Agostinho C. S., Almeida D. A. d., Oliveira R. J. d. und Melo J. R. B. d. (2007). Fish ladder of Lajeado Dam: migrations on one-way routes? *Neotropical Ichthyology* 5: 121-130.

Pelicice F. M. und Agostinho C. S. (2012). Deficient downstream passage through fish ladders: the case of Peixe Angical Dam, Tocantins River, Brazil. *Neotropical Ichthyolog* 10(4): 705-713.

Pfammatter R. und Piot M. (2014). Situation und Perspektiven der Schweizer Wasserkraft. *Wasser Energie Luft* 106(1): 1-11.

Aus dem Projekt hervorgegangene Publikationen

Konferenzbeiträge und Fachartikel

Albayrak, I., Kriewitz, C.R., Beck, C., Boes, R.M. (2015). Flow fields around fish guidance structures. *Proc. IAHR Congress 2015,* Delft – The Hague, the Netherlands (in press).

Albayrak, I., Tullis, B., Boes, R.M., Peter, A. (2015). Turbulent flow field around angled bar racks. *Proc. Fish Passage 2015, Groningen*, the Netherlands (in press).

Albayrak, I., Kriewitz, C.R., Boes, R.M. (2014). Downstream fish passage technologies: Experiences on the Columbia and Snake rivers. *Proc. Symposium „Wasserbau und Flussbau im Alpenraum“, VAW-Mitteilung 227* (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zürich: 261-271.

Bös, T., Egloff, N. &Peter, A. (2012). Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren, mitteleuropäischen Flusskraftwerken. *Zwischenbericht zum Literaturstudium der Eawag*, Kastanienbaum. 177 Seiten.

Flügel, D., Bös, T., & Peter, A. (2015). Forschungsprojekt: Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösserenmitteleuropäischen Flusskraftwerken - Ethohydraulische Untersuchungen zum Fischabstiegentlang eines vertikalen, schräg ausgerichteten Fischleitrechens. *Schlussbericht*, Eawag, Kastanienbaum, 106 Seiten.

Kriewitz, C.R., Albayrak, I., Flügel, D., Bös, T., Peter, A., Boes, R.M. (2015). Forschungsprojekt „Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken“. *Wasser, Energie, Luft* 107(1): 17-28.

Kriewitz, C.R. (2015). Leitrechen an Fischabstiegsanlagen: Hydraulik und fischbiologische Effizienz. *VAW-Mitteilung 230* (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zürich.

Kriewitz, C.R., Albayrak, I., Boes, R.M. (2014). Hydraulische Modellversuche zum Fischabstieg an grossen Flusskraftwerken (‘Hydraulic model investigation on downstream fish migration at large river hydro powerplants‘). *Proc. Symposium „Wasserbau und Flussbau im Alpenraum“*, *VAW-Mitteilungen 227* (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zürich: 273-282.

Kriewitz, C.R., Boes, R.M. & Albayrak, I. (2013). Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs. *Aqua viva* 55(5), 17-21.

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*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

Peer-Reviewed Journal Paper

Albayrak, I., Kriewitz C.R., Hager, W.H. & Boes, R.M. (2014). An experimental study on fish-friendly trashracks: part I & II - Discussion. *Jl. of Hydr. Research*: 52(1): 144-146.