

Passage stromabwärts schwimmender Fische an einem Bypass-Einlauf mit bodennaher Öffnung

Maximilian Kastinger, Ismail Albayrak, Luiz G. M. Silva und Robert Boes

Zusammenfassung

Infolge gesetzlicher Grundlagen (EU-Wasserrahmenrichtlinie, Schweizer Gewässerschutzgesetz) haben der Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen (WKA) in den letzten Jahren in Mitteleuropa stark an Bedeutung gewonnen. In der Schweiz müssen bis 2030 an rund 700 WKA Fischabstiegsanlagen saniert oder neu errichtet werden (Baumgartner *et al.*, 2020). Fischleitrechen (FLR) mit anschließendem Bypass-System (BS) sind für viele Fischarten ein wirkungsvolles System für die sichere Passage stromabwärts. Für eine hohe Akzeptanz des BS ist unter anderem ein ausreichender Bypass-Durchfluss erforderlich, welcher jedoch bei WKA in der Regel für die Stromproduktion verloren geht. Daher wird zur Regulierung des Bypass-Durchflusses häufig eine vertikalachsige Klappe mit lokalen Öffnungen beim Bypass-Einlauf installiert. Durch die räumliche Konzentration des Durchflusses kommt es jedoch in diesen Öffnungen zu hohen Fließgeschwindigkeiten und Geschwindigkeitsgradienten, die zu Vermeidungsreaktionen bei sich nähernden Fischen führen können. Um die Akzeptanz einer bodennahen Bypass-Einlauföffnungen zu untersuchen, wurden ethohydraulische Laborversuche mit Bachforellen (*Salmo trutta*) und Barben (*Barbus barbus*) durchgeführt. Messungen der Geschwindigkeitsfelder bestätigten die starke Beschleunigung der Strömung unmittelbar vor und in der Einlauföffnung, welche bei beiden Fischarten häufig zu einem Vermeidungsverhalten führte. Barben zeigten dabei im Vergleich zu Bachforellen eine größere Sensibilität gegenüber hoher Geschwindigkeitsgradienten. Die maximale Bypass-Passage-Effizienz betrug für Bachforellen 59 % und für Barben 52 %. Diese wurde für Bachforellen bei einer Anströmgeschwindigkeit von $U_0 = 0.4$ m/s erreicht, während Barben für $U_0 = 0.3$ m/s die höchste Bypass-Akzeptanz aufwiesen. Die Versuchsergebnisse verdeutlichen, dass Bypass-Einlaufklappen zur Regulierung des Durchflusses die Bypass-Akzeptanz und somit die Fischleiteffizienz des gesamten FLR-BS beeinträchtigen können. Um die Gestaltung des Bypass-Einlaufs zu optimieren und dessen Akzeptanz zu verbessern, sind weitere ethohydraulische Untersuchungen erforderlich.

1 Einleitung

Wasserkraftanlagen (WKA) und andere Barrieren unterbrechen die Längsvernetzung in Flüssen und behindern unter anderem die Fischwanderung stromabwärts. Bei der Passage durch Turbinen oder Wehranlagen können Fische schwer oder sogar tödlich verletzt werden (Coutant & Whitney, 2000; Brown *et al.*, 2014). Derartige Mortalitätsereignisse sind weltweit dokumentiert und stellen eine große Bedrohung für die Fischbestände dar. Für viele Arten sind Fischleitrechen (FLR) mit anschließendem Bypass-System (BS) eine wirksame Lösung für die sichere Passage stromabwärts (Larinier & Travade, 2002; Lehmann *et al.*, 2016; Albayrak *et al.*, 2020; Beck *et al.*, 2020; Meister *et al.*, 2022; Tutzer *et al.*, 2022). Während der FLR die Fische am Eindringen in die nachgeordneten Turbinen hindert und sie zum Bypass-Einlauf leitet, besteht die Funktion des BS darin, die Fische durch bzw. um die Barriere zu leiten und ihnen einen sicheren Abstieg in das Unterwasser zu ermöglichen (Abb. 1). Effektive BS gewährleisten eine schnelle Auffindbarkeit und Akzeptanz des Bypass-Einlaufs sowie eine kontinuierliche und ungefährliche Passage des Bypasses.

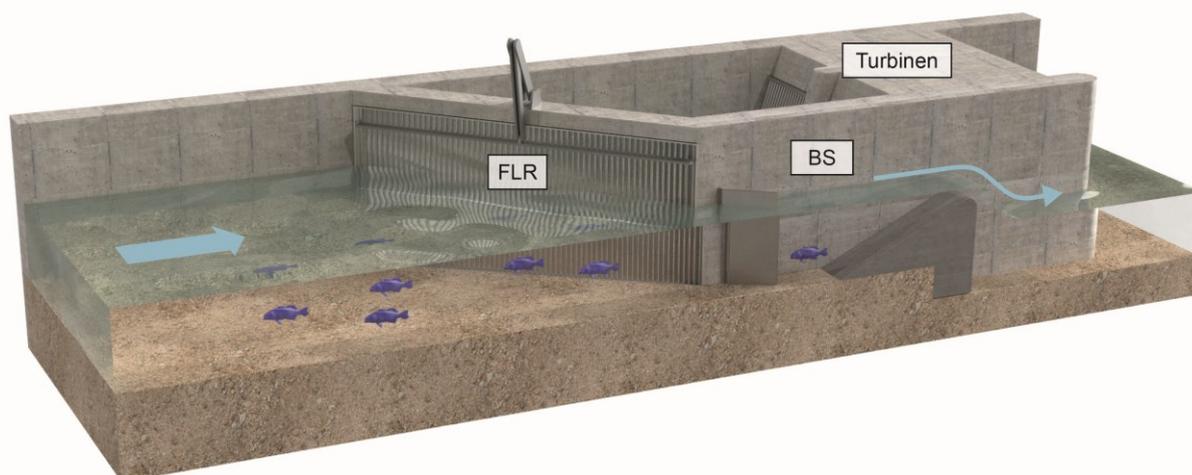


Abb. 1 Schematische Darstellung eines Fischleitsystems bestehend aus Fischleitrechen (FLR) und Bypass-System (BS) (Visualisierung: Beck, 2020).

Bisherige Untersuchungen mit verschiedenen Fischarten zeigten, dass eine kontinuierliche Zunahme der Fließgeschwindigkeit in den Bypass zu einer erhöhten Akzeptanz führt. Zu hohe Geschwindigkeitsgradienten oder abrupt abnehmende Fließgeschwindigkeiten direkt vor dem Bypass können hingegen eine Vermeidungsreaktion auslösen (Haro *et al.*, 1998; Enders *et al.*, 2012; Albayrak *et al.*, 2020; Beck *et al.*, 2020; Meister *et al.*, 2022). Für die Gestaltung von BS sind verschiedene internationale Richtlinien verfügbar (USBR, 2006; Courret & Larinier, 2008; Ebel, 2018; NMFS, 2022; Dönni *et al.*, 2022). So empfiehlt beispielsweise Ebel (2018) für das Verhältnis der mittleren Bypass-Einlaufgeschwindigkeit $U_{by,in}$ und der mittleren Anströmgeschwindigkeit U_o für alle Fischarten $1.0 \leq U_{by,in}/U_o \leq 2.0$. Die mittlere Bypass-Einlaufgeschwindigkeit $U_{by,in}$ sollte je nach Fischart Werte zwischen 0.3 und 1.5 m/s nicht überschreiten (Ebel, 2018).

Um den Bypass-Durchfluss zu regulieren, kann beim Bypass-Einlauf eine vertikalachsige Klappe zur Begrenzung des durchströmten Querschnitts installiert werden. Die verbleibende Öffnung kann sich über die gesamte Wassertiefe erstrecken (Abb. 1), oder in mehrere Teilöffnungen gegliedert sein. Durch die räumliche Konzentration des Durchflusses kommt es jedoch in den Öffnungen zu hohen absoluten Fließgeschwindigkeiten $U_{by,in}$ und Geschwindigkeitsverhältnissen $U_{by,in}/U_o$, welche die oben genannten Empfehlungen deutlich übersteigen können. Zudem treten um die Öffnungen hohe räumliche Geschwindigkeitsgradienten (Spatial Velocity Gradient, SVG) auf. Enders *et al.* (2009) untersuchten für Königslachssmolts die Akzeptanz einer Barriere mit bodennaher Öffnung bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten und stellten eine Vermeidungsreaktion ab einem SVG von etwa 1 m/s/m fest. Kemp *et al.* (2005) verglichen für Smolts verschiedener Pazifischer Lachsfischarten die Akzeptanz eines offenen Kanals und eines Kanals mit seitlicher Verengung am Einlauf. Die Verengung resultierte in einer stärkeren Beschleunigung der Strömung, welche zu einem höheren Anteil an Verweigerungen führte.

In der Praxis werden bei WKA zur Reduktion des Bypass-Durchflusses und somit zur Verringerung von Produktionsverlusten immer häufiger Bypass-Einlauffore mit lokalen Öffnungen installiert. Jedoch deuten die bisherigen Untersuchungen mit vorwiegend Lachssmolts darauf hin, dass es dadurch zu Vermeidungsreaktionen bei sich nähernden Fischen und somit einer Beeinträchtigung der Effizienz des FLR-BS kommen kann. Ziel dieser Studie war es daher, die Strömungsverhältnisse oberstrom eines FLR-BS mit einem Bypass-Einlauffor mit bodennaher Öffnung für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten zu ermitteln und die Passage des Bypass-Einlaufs für Bachforellen (*Salmo trutta*) und Barben (*Barbus barbus*) zu untersuchen.

2 Versuchsaufbau und Methodik

Die Versuche wurden in einem 30 m langen, 1.5 m breiten und 1.2 m tiefen Strömungskanal an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich durchgeführt. Das physikalische Modell umfasste einen FLR mit vertikalen fischbauchförmig gekrümmten Stäben (foil-shaped Curved Bar Rack, f-CBR) mit einem horizontalen Anströmwinkel von 30° und einem lichten Stababstand von 50 mm. Am unterstrom gelegenen Ende des f-CBR wurde ein Bypass-Einlaufftor ($B \times H = 0.7 \times 1.0$ m) mit einer bodennahen Öffnung ($B \times H = 0.18 \times 0.25$ m) installiert (Abb. 2). Da der Fokus dieser Untersuchung auf dem Bypass-Einlauf lag, wurde vor die Stabzwischenräume des f-CBR ein Netz gespannt und somit eine Fischschutzeffizienz von 100 % angenommen.

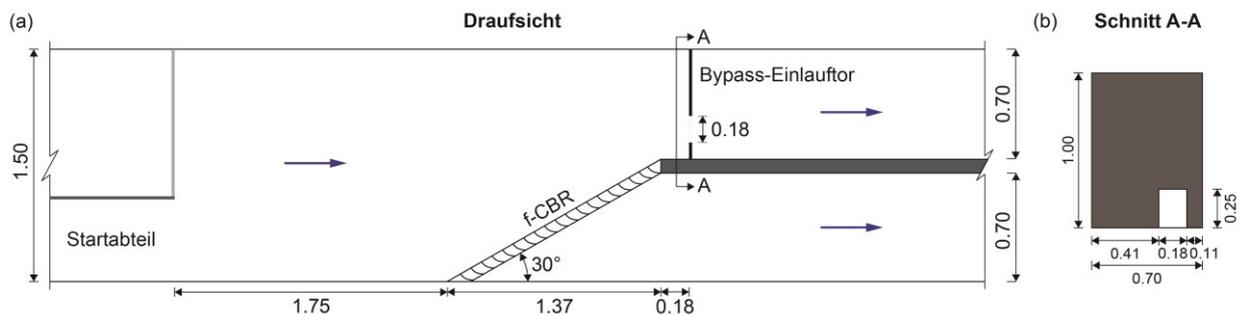


Abb. 2 (a) Draufsicht des physikalischen Modells mit Startabteil, Fischleitrechen (f-CBR) und Bypass-Einlaufftor und (b) Ansicht des Bypass-Einlaufftors mit bodennaher Öffnung.

Die Versuche wurden bei drei verschiedenen Abflüssen und daraus resultierenden mittleren Anströmgeschwindigkeiten $U_o = 0.3, 0.4$ und 0.5 m/s durchgeführt. Bei allen Versuchen wurde die Wassertiefe im Zulauf mit $h_o = 0.9$ m und im Bypass unterstrom des Einlaufftors mit $h_{by} = 0.5$ m konstant gehalten. Die mittlere Fließgeschwindigkeit innerhalb der bodennahen Bypass-Einlauföffnung betrug $U_{by,in} = 2.0$ m/s. Daraus resultierten hohe Fließgeschwindigkeitsverhältnisse von $U_{by,in}/U_o = 4.0$ bis 6.7 . Zur Bestimmung der Strömungsfelder wurden die Geschwindigkeitskomponenten u, v und w in $x-, y-$ und z -Richtung mit einem Ultraschall-Doppler-Geschwindigkeitsmessgerät (Acoustic Doppler Velocimeter, ADV) in einem engmaschigen Raster gemessen. Zusätzlich wurde die mittlere Geschwindigkeitskomponente u innerhalb der Bypass-Öffnung mit einem Messflügel bestimmt.

Die ethohydraulischen Versuche wurden mit wilden Bachforellen (*Salmo trutta*, Gesamtanzahl $n_{tot} = 55$, mittlere Totallänge $TL_m = 176$ mm, Standardabweichung $\sigma_{TL} = 24$ mm) und Barben (*Barbus barbus*, $n_{tot} = 48$, $TL_m = 158$ mm, $\sigma_{TL} = 47$ mm) durchgeführt. Für jede der Fischarten und Anströmgeschwindigkeiten wurden die Versuche achtmal mit Gruppen von jeweils drei Fischen wiederholt. Die Reihenfolge der Versuche wurde randomisiert. Individuen wurden maximal dreimal für Versuche verwendet. Vor jedem Versuch konnten sich die Fische 15 Minuten lang an die Anströmbedingungen und Wassertemperatur im geschlossenen Startabteil (Abb. 2) gewöhnen. Nach dieser Akklimatisationszeit wurde das Startabteil geöffnet und die Fische konnten frei im Versuchsaufbau schwimmen. Die maximale Versuchsdauer wurde auf 45 Minuten begrenzt. Das Verhalten der Fische wurde durch visuelle Beobachtung und Videokameras aufgezeichnet, die vor und hinter dem Bypass-Einlaufftor installiert waren. Für die Auswertung der Versuchsergebnisse wurde für jeden Fisch zwischen Bypass-Passage und Bypass-Verweigerung unter-

schieden. Eine Bypass-Passage wurde als Durchschwimmen der Bypass-Öffnung definiert. Passierte ein Fisch innerhalb der Versuchsdauer die Öffnung nicht, wurde dies als Bypass-Verweigerung betrachtet. Die Bypass-Passage-Effizienz (BPE) wurde durch Gl. [1] definiert.

$$\text{BPE} = \frac{N_{\text{by}}}{N_{\text{by}} + N_{\text{verw}}} \quad [1]$$

Dabei ist N_{by} die totale Anzahl Bypass-Passagen und N_{verw} die totale Anzahl Verweigerungen je Fischart und Anströmgeschwindigkeit. Fische, die innerhalb der Versuchsdauer nicht mit dem FLR-BS interagierten, d.h. im Startabteil blieben oder sich ausschließlich oberhalb des f-CBR aufhielten, wurden von der Datenauswertung ausgeschlossen.

Die ermittelten BPE für die untersuchten Fischarten und Anströmgeschwindigkeiten wurden untereinander auf signifikante Unterschiede überprüft. Für die statistische Auswertung wurden paarweise Chi-Quadrat (χ^2) Tests mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ durchgeführt.

3 Resultate

3.1 Strömungsfelder

Abb. 3 zeigt die Fließfelder der longitudinalen Geschwindigkeitskomponente u mit Stromlinien und Geschwindigkeitsvektoren für die mittlere Anströmgeschwindigkeit $U_o = 0.4$ m/s. In Abb. 3a ist ein Horizontalschnitt bei $z = 0.045$ m über der Kanalsohle dargestellt. Die Anströmbedingungen sind homogen mit annähernd parallelen Stromlinien. Die Krümmung der Stromlinien und damit die transversalen Geschwindigkeitskomponenten v nehmen gegen Ende des f-CBR zu. In der linken Ecke vor dem Bypass-Einlaufftor befindet sich eine Rezirkulationszone mit negativen longitudinalen Geschwindigkeitskomponenten u . Oberstrom des Bypass-Einlaufftors sind die Stromlinien und Geschwindigkeitsvektoren in Richtung der Öffnung orientiert. Es ist eine Aufteilung der Strömung zwischen f-CBR und Bypass erkennbar. Unmittelbar vor der Bypass-Öffnung nimmt die longitudinale Fließgeschwindigkeit stark zu (hoher Geschwindigkeitsgradient), mit einem Maximum von 2.0 m/s in der Öffnung. Abb. 3b zeigt den entsprechenden Vertikalschnitt entlang der Achse der Bypass-Öffnung bei $y = 1.0$ m. Die Stromlinien und Geschwindigkeitsvektoren sind im Anströmbereich annähernd horizontal ausgerichtet und im Nahbereich des Bypass-Einlaufftors in Richtung der bodennahen Öffnung orientiert. Wie in Abb. 3a ist der hohe Geschwindigkeitsgradient vor und in der Bypass-Öffnung erkennbar.

3.2 Ethohydraulische Versuche

Beide Fischarten zeigten im Nahbereich der Bypass-Öffnung häufig Vermeidungsreaktionen gegenüber den hohen Geschwindigkeitsgradienten und absoluten Fließgeschwindigkeiten. Diese umfassten einen plötzlichen Anstieg der Schlagfrequenz der Schwanzflosse sowie das anschließende Aufsuchen von Bereichen mit geringeren Fließgeschwindigkeiten. Die Passage der Bypass-Öffnung erfolgte in der Regel mit positiver Rheotaxis (Orientierung mit Kopf entgegen der Strömung). Vor allem bei kleineren Individuen war das Durchschwimmen der Bypass-Öffnung häufig unkontrolliert, sobald der Fisch in den Bereich hoher Fließgeschwindigkeiten gelangte.

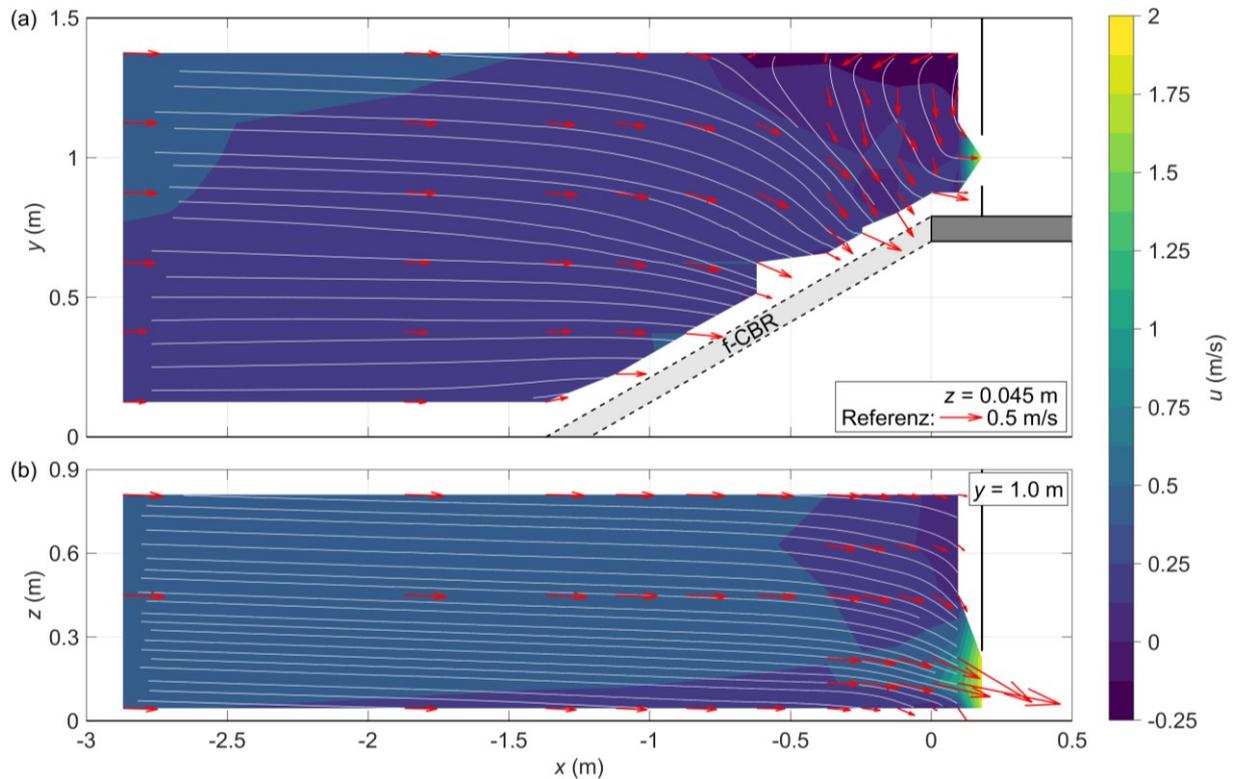


Abb. 3 Fließfelder der longitudinalen Geschwindigkeitskomponente u mit Stromlinien und Geschwindigkeitsvektoren für $U_o = 0.4 \text{ m/s}$ im (a) Horizontal- und (b) Vertikalschnitt.

In Abb. 4 sind für beide Fischarten und sämtliche Anströmgeschwindigkeiten U_o die totale Anzahl Bypass-Passagen und Verweigerungen sowie die Bypass-Passage-Effizienz (BPE) dargestellt. Für die Bachforelle beträgt die höchste BPE 59 % bei $U_o = 0.4 \text{ m/s}$ sowie die tiefste BPE 45 % bei $U_o = 0.3 \text{ m/s}$. Jedoch sind die Unterschiede in der BPE nicht signifikant ($\chi^2 = 0.820$, $p = 0.365$). Für die Barbe ist die höchste BPE von 52 % bei $U_o = 0.3 \text{ m/s}$ deutlich größer als die BPE von 27 % bei $U_o = 0.4 \text{ m/s}$ und 30 % bei $U_o = 0.5 \text{ m/s}$. Der größte Unterschied in der BPE zwischen $U_o = 0.3 \text{ m/s}$ und $U_o = 0.4 \text{ m/s}$ ist jedoch wiederum nicht signifikant ($\chi^2 = 2.905$, $p = 0.088$). Bei $U_o = 0.4 \text{ m/s}$ weist die Bachforelle eine signifikant höhere BPE als die Barbe auf ($\chi^2 = 4.539$, $p = 0.033$). Für $U_o = 0.3 \text{ m/s}$ ($\chi^2 = 0.203$, $p = 0.652$) und $U_o = 0.5 \text{ m/s}$ ($\chi^2 = 2.706$, $p = 0.100$) ist zwischen den beiden Fischarten kein signifikanter Unterschied vorhanden.

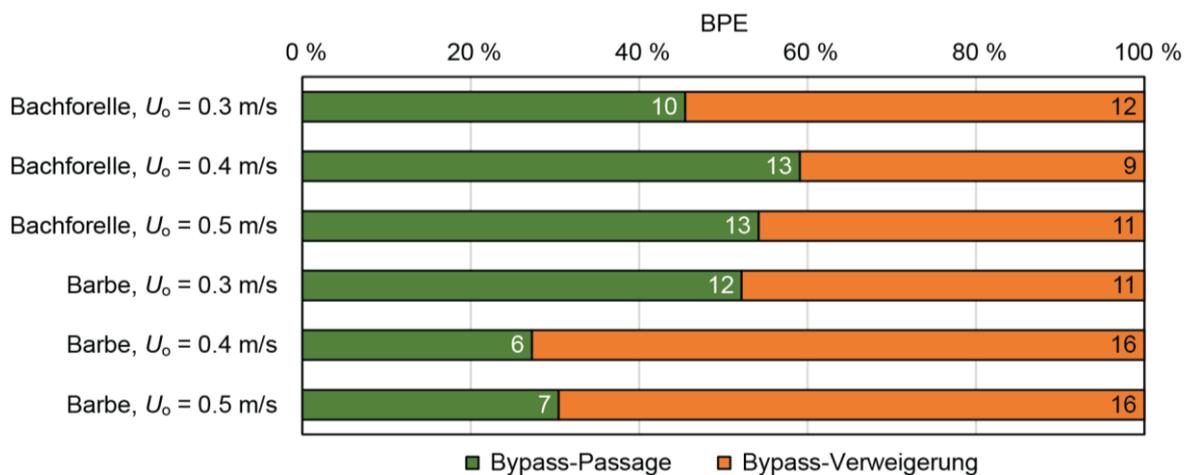


Abb. 4 Absolute Anzahl der Bypass-Passagen und Verweigerungen sowie die Bypass-Passage-Effizienz (BPE) für die untersuchten Fischarten und Anströmgeschwindigkeiten U_o .

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Versuchsergebnisse verdeutlichen das Vermeidungsverhalten von Bachforellen und Barben gegenüber hohen Geschwindigkeitsgradienten und absoluten Fließgeschwindigkeiten bei Bypass-Einlaufforen mit bodennaher Öffnung. Auch wenn die Unterschiede in der Bypass-Passage-Effizienz (BPE) in der Regel nicht signifikant waren, können doch artspezifische Schlüsse gezogen werden. Bei beiden Fischarten handelt es sich grundsätzlich um strömungsliebende, starke Schwimmer. Die Bachforelle zeigte für alle Anströmgeschwindigkeiten eine ähnliche BPE, während die Barbe hinsichtlich der Bypass-Akzeptanz eine ausgeprägtere Vermeidung gegenüber Anströmgeschwindigkeit von $U_o = 0.4$ und 0.5 m/s aufwies. Dieser artspezifische Unterschied könnte darin begründet liegen, dass Barben sensibler und schneller auf hohe absolute Fließgeschwindigkeiten und Geschwindigkeitsgradienten reagieren und diese folglich früher vermeiden. Bachforellen weisen hingegen diesbezüglich möglicherweise eine geringere Sensibilität auf, wodurch es unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit häufiger zu einer unkontrollierten Passage der Bypass-Öffnung kam.

Beck *et al.* (2020) untersuchten ein ähnliches FLR-BS, bestehend aus einem CBR mit einem horizontalen Anströmwinkel von 30° und einem lichten Stababstand von 50 mm mit anschließendem Schacht-Bypass ohne Einlaufftor. In diesen Versuchen war auch eine Passage des CBR möglich, welche nachfolgend ebenfalls als Bypass-Verweigerung betrachtet wird. Bachforellen wiesen für $U_o = 0.3$ m/s und $U_{by,in}/U_o = 1.2$ eine BPE von 81 % auf. Für $U_o = 0.5$ m/s resultierte für $U_{by,in}/U_o = 1.2$ eine BPE von 56 % und für $U_{by,in}/U_o = 1.4$ eine BPE von 46 %. Für Barben lag bei $U_o = 0.5$ m/s die BPE für $U_{by,in}/U_o = 1.2$ bei 86 % und für $U_{by,in}/U_o = 1.4$ bei 74 %. Im Vergleich dazu sind die BPE von zwischen 27 % und 59 % in der vorliegenden Untersuchung eher gering. Zudem wurde eine Passage des Fischleitrechens durch ein Netz verhindert, um den Fischen bewusst nur die Bypass-Passage zu ermöglichen und statistisch aussagekräftigere Zahlen zum Verhalten am Bypass-Einlauf zu erhalten. Erwartungsgemäß hätte auch ein gewisser Anteil der Fische den f-CBR passiert, was eine weitere Abnahme der Fischleiteffizienz des Gesamtsystems bedeuten würde. Der Vergleich mit Beck *et al.* (2020) verdeutlicht insbesondere für Barben den negativen Effekt hoher Geschwindigkeitsverhältnisse $U_{by,in}/U_o$ von 4.0 bis 6.7 auf die Akzeptanz des Bypass-Einlaufs.

Für die Implementierung von effizienten FLR-BS ist die Gestaltung des Bypass-Einlaufs folglich von großer Bedeutung. Obwohl bei WKA immer häufiger Bypass-Einlauffore mit lokalen Öffnungen installiert werden, zeigen die vorliegenden Resultate, dass die Leiteffizienz des gesamten Fischabstiegssystems auf Grund von Vermeidungsreaktionen an der Bypass-Einlauföffnung beeinträchtigt werden kann. Folglich ist eine genauere Quantifizierung des Fischverhaltens gegenüber verschiedener Bypass-Bauformen erforderlich, statt Bypass-Systeme an WKA ausschließlich auf Grund hydraulischer Parameter zu dimensionieren. Es sind daher weitere Laboruntersuchung zur Optimierung des Bypass-Einlaufs geplant, um eine höhere Bypass-Passage-Effizienz zu erreichen. Darüber hinaus sind biologische Wirkungskontrollen an bereits realisierten Bypass-Systemen mit solchen Einlaufforen erforderlich, um die Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf Prototypen zu überprüfen.

Danksagung

Diese Untersuchung wurde im Rahmen des Projekts „HydroLEAP - Modernizing the Swiss Hydropower Fleet for a Successful Energy Strategy 2050“ durchgeführt, welches durch das Schweizer Bundesamt für Energie (BFE) finanziert wird (Vertragsnummer SI/502106-01).

Literatur

- Albayrak, I.; Boes, R.M.; Kriewitz-Byun, C.R.; Peter, A.; Tullis, B.P. (2020). Fish guidance structures: hydraulic performance and fish guidance efficiencies. *Journal of Ecohydraulics*, 5(2), 113–131.
- Baumgartner, M.; Huber Gysi, M.; Lundsgaard-Hansen, L.; Nitsche, M. (2020). Renaturierung der Schweizer Gewässer: Stand ökologische Sanierung Wasserkraft 2018. Bundesamt für Umwelt (BAFU) – Abteilung Wasser, Ittigen, Schweiz.
- Beck, C. (2020). Fish protection and fish guidance using innovative curved-bar rack bypass systems. In R. Boes (Ed.), *VAW-Mitteilungen 257*. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Schweiz.
- Beck, C.; Albayrak, I.; Meister, J.; Peter, A.; Selz, O.M.; Leuch, C.; Vetsch, D.F.; Boes, R.M. (2020). Swimming behavior of downstream moving fish at innovative curved-bar rack bypass systems for fish protection at water intakes. *Water*, 12(11), 3244.
- Brown, R.S.; Colotelo, A.H.; Pflugrath, B.D.; Boys, C.A.; Baumgartner, L.J.; Deng, Z.D.; Silva, L.G.M.; Brauner, C.J.; Mallen-Cooper, M.; Phonekhampong, O.; Thorncraft, G.; Singhanouvong, D. (2014). Understanding Barotrauma in Fish Passing Hydro Structures: A Global Strategy for Sustainable Development of Water Resources. *Fisheries*, 39(3), 108–122.
- Courret, D.; Larinier, M. (2008). Guide pour la conception de prises d'eau ichtyocompatibles pour les petites centrales hydroélectriques (Rapport GHAAPPE RA.08.04). Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), Frankreich.
- Coutant, C.C.; Whitney, R.R. (2000). Fish Behavior in Relation to Passage through Hydropower Turbines: A Review. *Transactions of the American Fisheries Society*, 129(2), 351–380.
- Dönni, W.; Beck, C.; Mende, M.; Ninck, L.; Peter, A.; Schölzel, N.; Baumann Y Carmona, A. (2022). Wiederherstellung der Fischwanderung: Gute Praxisbeispiele für Wasserkraftanlagen in der Schweiz (Umwelt-Wissen Nr. 2205). Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, Schweiz.
- Ebel, G. (2018). Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen - Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbioökologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung (3. Ausgabe). Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, Halle (Saale), Deutschland.
- Enders, E.C.; Gessel, M.H.; Williams, J.G. (2009). Development of successful fish passage structures for downstream migrants requires knowledge of their behavioural response to accelerating flow. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 66(12), 2109–2117.
- Enders, E.C.; Gessel, M.H.; Anderson, J.J.; Williams, J.G. (2012). Effects of decelerating and accelerating flows on juvenile salmonid behavior. *Transactions of the American Fisheries Society*, 141(2), 357-364.
- Haro, A.; Odeh, M.; Noreika, J.; Castro-Santos, T. (1998). Effect of Water Acceleration on Downstream Migratory Behavior and Passage of Atlantic Salmon Smolts and Juvenile American Shad at Surface Bypasses. *Transactions of the American Fisheries Society*, 127, 118–127.
- Kemp, P.S.; Gessel, M.H.; Williams, J.G. (2005). Fine-scale behavioral responses of Pacific salmonid smolts as they encounter divergence and acceleration of flow. *Transactions of the American Fisheries Society*, 134(2), 390–398.
- Larinier, M.; Travade, F. (2002). Downstream migration: problems and facilities. *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*, 364, 181–207.

- Lehmann, B.; Adam, B.; Engler, O.; Hecht, V.; Schneider, K. (2016). Ethohydraulische Untersuchungen zur Verbesserung des Fischschutzes an Wasserkraftanlagen (Naturschutz und Biologische Vielfalt Heft 151). Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn - Bad Godesberg, Deutschland.
- Meister, J.; Selz, O.M.; Beck, C.; Peter, A.; Albayrak, I.; Boes, R.M. (2022). Protection and guidance of downstream moving fish with horizontal bar rack bypass systems. *Ecological Engineering*, 178, 106584.
- NMFS (2022). NOAA Fisheries West Coast Region Anadromous Salmonid Passage Design Manual. National Marine Fisheries Service (NMFS) West Coast Region, Portland, USA.
- Tutzer, R.; Röck, S.; Walde, J.; Haug, J.; Brinkmeier, B.; Aufleger, M.; Unfer, G.; Führer, S.; Zeiringer, B. (2022). A Physical and Behavioral Barrier for Enhancing Fish Downstream Migration at Hydropower Dams: The Flexible FishProtector. *Water*, 14(3), 378.
- USBR (2006). Fish Protection at Water Diversions - A Guide for Planning and Designing Fish Exclusion Facilities. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation (USBR), Denver, USA.

Anschrift der Verfasser

Maximilian Kastinger, Dr. Ismail Albayrak, Prof. Dr. Robert Boes
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich
Hönggerberggring 26, CH-8093 Zürich
kastinger@vaw.baug.ethz.ch, albayrak@vaw.baug.ethz.ch, boes@vaw.baug.ethz.ch

Dr. Luiz G. M. Silva
Institut für Umweltingenieurwissenschaften (IfU), ETH Zürich
Stefano-Frascini-Platz 5, CH-8093 Zürich
lumartins@ethz.ch