

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Beck, Claudia; Meister, Julian; Albayrak, Ismail; Boes, Robert Hydraulik von Bypässen für den Fischabstieg

VAW Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

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

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108439>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Beck, Claudia; Meister, Julian; Albayrak, Ismail; Boes, Robert (2021): Hydraulik von Bypässen für den Fischabstieg. In: Boes, Robert (Hg.): Wasserbau-Symposium 2021. Wasserbau in Zeiten von Energiewende, Gewässerschutz und Klimawandel. Band 2. VAW Mitteilungen 263. Zürich: ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. S. 487-494.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: CC BY 4.0



Hydraulik von Bypässen für den Fischabstieg

Bypass hydraulics for fish downstream migration facilities

Claudia Beck, Julian Meister, Ismail Albayrak, Robert Boes

Kurzfassung

Schräg angeströmte Fischleitreechen mit horizontalen oder vertikalen Stäben können abwärts wandernde Fische vor der Turbinenpassage schützen und sie zu einem Bypass leiten. In Abhängigkeit der Fischgrösse wirken horizontale Leitreechen mit Stababständen von 10 ÷ 20 mm für einen nennenswerten Anteil der Fischfauna als physische Barriere, während vertikale Leitreechen (Louver, Bar Racks) mit Stababständen ≥ 25 mm als mechanische Verhaltensbarriere funktionieren.

Für eine hohe Fischleiteffizienz sind allerdings nicht nur die gute Schutzfunktion des Rechen und die Auffindbarkeit des Bypasses entscheidend. Die Strömungsbedingungen am Bypass-Einlauf sollen zu einer hohen Akzeptanz, das heisst einem raschen Einschwimmen der Fische führen. Verschiedene Feld- und Laborstudien weisen darauf hin, dass eine graduelle Geschwindigkeitszunahme in den Bypass hinein zu einer hohen Akzeptanz führt. Im ethohydraulischen Strömungskanal der VAW wurde daher die Hydraulik verschiedener Bypass-Geometrien untersucht. Zudem wurde das Schwimmverhalten verschiedener heimischer Fischarten an Fischleitreechen-Bypass-Systemen in ethohydraulischen Versuchen beobachtet. Der über die gesamte Fliesstiefe geöffnete Schacht-Bypass wurde rasch akzeptiert, wenn der Geschwindigkeitsgradient in den Bypass gering war. Im Gegensatz dazu führte ein Rohr-Bypass zu einem Aufstau mit geringen Fließgeschwindigkeiten und sehr hohen lokalen Beschleunigungen vor der Bypass-Öffnung, was zu einer Vermeidungsreaktion führen kann.

Abstract

Angled bar racks with horizontal or vertical bars can protect downstream migrating fish from turbine passage and guide them to a bypass. Depending on the fish size, horizontal bar racks with bar spacings of 10 ÷ 20 mm are a physical barrier for a big share of the fish fauna, while vertical bar racks such as louvers or angled bar racks with bar spacings ≥ 25 mm act as a mechanical behavioural barrier.

For a high fish guidance efficiency, however, not only high rack protection and guidance, but also the location and hydraulics of the bypass are decisive. The

flow conditions at the bypass inlet should lead to a high and fast bypass acceptance rate by approaching fish. Various field and laboratory studies indicate that a gradual velocity increase into the bypass leads to high acceptance. The hydraulics of different bypass geometries was therefore investigated in an etho-hydraulic flume at VAW. The swimming behaviour of various native fish species at bar rack bypass systems was observed in ethohydraulic experiments. The open channel bypass was quickly accepted by fish for mild velocity gradients at the inlet. In contrast, a pipe bypass led to backwater with low flow velocities and flow circulation above the pipe and very high local velocity gradients in front of the bypass opening, which might lead to an avoidance reaction.

1 Einleitung

Die Aufgabe des Bypass-Systems besteht darin, die Fische sicher zu sammeln, zu transportieren und flussabwärts des Wanderhindernisses unbeschädigt dem Fluss zurückzuführen. Die Ausführung des Bypasses ist daher ebenso wichtig wie die Konstruktion des Fischleitrechens selbst. Der Bypass muss dabei den Bedürfnissen und Gewohnheiten der vorhandenen Fischarten entsprechen. Ein optimales Bypass-Layout kann die Fischleiteffizienz signifikant erhöhen (z.B. Simmons, 2000). Der Bypass muss von allen Fischarten leicht gefunden, rasch akzeptiert und ohne allzu große Anstrengung, ohne Flucht und ohne Erschöpfung passiert werden können.

Die Geschwindigkeitszunahme am Bypass-Einlauf ist dabei eine entscheidende Bemessungsgröße. Für das Verhältnis der Bypass-Eintrittsgeschwindigkeit $U_{by,in}$ und der mittleren Anströmgeschwindigkeit U_o schlägt Ebel (2016) einen allgemeinen Bemessungswert für alle Zielarten von $U_{by,in}/U_o = 1.0 - 2.0$, USBR (2006) von $U_{by,in}/U_o = 1.0 - 1.5$ vor. Ducharme (1972) erreichte in einer Feldstudie mit schwimmstarken, atlantischen Lachsen die besten Resultate für $U_{by,in}/U_o \geq 1.5$. Ebenfalls für Lachse ist bekannt, dass sie räumliche Geschwindigkeitsgradienten (SVG, spatial velocity gradient) von 1 m/s/m bevorzugen (Enders *et al.*, 2012). Die absoluten Fließgeschwindigkeiten am Einlauf sollen zwischen $U_{by,in} = 0.3 - 1.5$ m/s liegen (Ebel, 2016). Hohe SVG oder abrupt abnehmende Fließgeschwindigkeiten direkt vor dem Bypass können eine zögernde Reaktion auslösen (Kriewitz, 2015; Albayrak *et al.*, 2020). Ebel (2016) empfiehlt daher einen regulierten, offenen Schacht-Bypass. Am Einlauf kann ein bewegliches Tor mit boden- und sohl-nahen Öffnungen vorgesehen werden, sodass der Bypass durchgehend dotiert und eine verzögerungsfreie Abwanderung möglich ist. In der Praxis gibt es allerdings viele Beispiele, wo das Bypass-Layout von der Empfehlung abweicht und daher oftmals von den Fischen nur ungenügend akzeptiert wird (z.B. Wagner *et al.*, 2019).

Für verschiedene potamodrome Fischarten gibt es allerdings keine konkreten Bemessungsvorschläge für die zulässige Geschwindigkeitszunahme in den Bypass oder die bevorzugten SVG. Das Ziel dieser Untersuchung war es daher, die Geschwindigkeitszunahme für verschiedene Anströmbedingungen und Bypass-Layouts zu untersuchen und mit den Beobachtungen des Schwimmverhaltens von Schneidern (*Alburnoides bipunctatus*) zu vergleichen.

2 Versuchsaufbau

Die ethohydraulischen 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) durchgeführt. Ein Rechen mit vertikalen, gebogenen Stäben (curved-bar rack, CBR; Beck *et al.*, 2019a,b) und einem lichten Stababstand von $s_b = 50$ mm wurde in der Mitte des Kanals mit einem horizontalen Winkel von $\alpha = 30^\circ$ zur Anströmung und mit einem anschliessenden, $w_{by} = 25$ cm breiten Bypass eingebaut (Abb. 1).

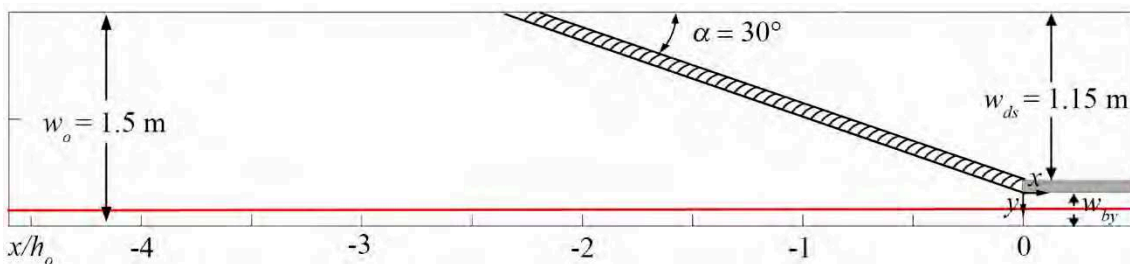


Abb. 1: Schematische Darstellung des Strömungskanals mit eingebautem CBR; die Geschwindigkeitsprofile wurden wandnah entlang der roten Linie gemessen

Das Bypass-Layout konnte modular umgebaut werden zu einem über die gesamte Wassertiefe geöffnetem Schacht-Bypass (L1, Abb. 2a), einem Schacht-Bypass mit einer flach zur Sohle geneigten, 2 m langen Rampe (L2, Abb. 2b), einem Bypass mit einem strömungsgünstig geformten Staubalken mit einer sohl- und einer bodennahen Öffnung (L3, Abb. 2c) und einem Rohr-Bypass (L4, Abb. 2d). Der Rohr-Bypass besteht aus einer 0.5 m langen Verjüngung von einem 0.25 x 0.25 m grossen, an der Sohle anschliessenden Rechteckquerschnitt am Einlauf auf ein 2.0 m langes Rohr mit 0.2 m Durchmesser. Oberhalb des Einlaufs ist der Bypass-Kanal mit einer senkrechten PVC-Platte abgedichtet.

Die Geschwindigkeitskomponenten in x-, y- und z-Richtung (U , V , W) wurden 125 mm über der Sohle ($z = 0.14 h_o$) mit einer ADV-Sonde gemessen, die an einer fahrbaren Traverse befestigt war. Die hier gezeigten Geschwindigkeitsprofile wurden entlang der in Abb. 1 rot gekennzeichneten Linie gemessen und die Geschwindigkeitsgradienten zu $SVG = \Delta U / \Delta x$ berechnet. Die Nullkoordinate liegt am Bypass-Einlauf.

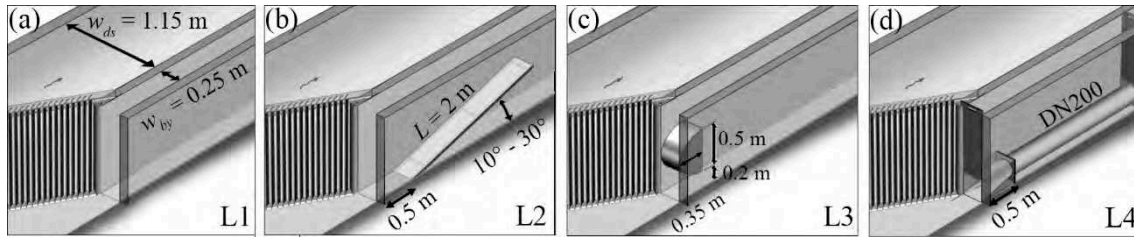


Abb. 2: Skizze des curved-bar rack (CBR) und der verschiedenen Bypass Layouts: (a) L1: über die gesamte Wassertiefe geöffneter Schacht-Bypass, (b) L2: Schacht-Bypass mit neigbarer Rampe, (c) L3: Schacht-Bypass mit Staubalken am Einlauf und (d) L4: Rohr-Bypass

Die ethohydraulischen Versuche mit Schneidern (*Alburnoides bipunctatus*, totale Länge = 10 cm, Standardabweichung $\sigma = 1$ cm) wurden für die mittleren Anströmgeschwindigkeiten $U_o = 0.5$ m/s und 0.7 m/s durchgeführt. Der Wasserspiegel im Zulauf des Rechen-Bypass-Systems war konstant bei $h_o = 0.9$ m. Die Durchflüsse im Bypass und im Kanal stromabwärts des Rechens konnten mit zwei separaten Klappen geregelt werden. Um den Durchfluss im Bypass Q_{by} zu bestimmen, wurde der Wasserspiegel im Bypass h_{by} mit einer Ultraschallsonde gemessen und die Formel nach Poleni angewendet. Die Lebendfisch-Versuche wurden mit fünf eingetauchten Kameras aufgenommen und anschliessend mit der an der VAW entwickelten 3D fish-tracking Software (Detert *et al.*, 2018) ausgewertet. Dabei wurde unterschieden zwischen Bypass-Passage, Rechen-Passage und Verweigerung, d.h. die Fische sind weder in den Bypass, noch durch den Rechen geschwommen. Fische, die nach einer Versuchsdauer von 30 Minuten nicht in den Einflussbereich des Rechens geschwommen sind ($x/h_o \leq -2.5$, Abb. 1), wurden von dieser Analyse ausgeschlossen.

3 Resultate

Abb. 3a zeigt die Geschwindigkeitsprofile der drei Schacht-Bypass Layouts (L1-L3). Die entsprechenden, räumlichen Geschwindigkeitsgradienten (SVG) sind in Abb. 3b dargestellt. Für L1 wurde das Geschwindigkeitsprofil bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten gemessen mit $Q_{by}/Q_o = 17 - 23\%$. Der offene Schacht-Bypass (L1) führt zu einer graduellen Geschwindigkeitszunahme vor dem Bypass ab $x/h_o \approx -2$ und einer stärkeren Zunahme direkt am Einlauf. Die Geschwindigkeitsprofile sind zwar fast deckungsgleich, aber Abb. 3b zeigt, dass der SVG_{max} mit geringerer Anströmgeschwindigkeit abnimmt, obwohl $U_{by,in}/U_o = 1.4$ gleich bleibt. Die geneigte Rampe erzeugt einen Rückstau (L2), sodass die Geschwindigkeitsgradienten abnehmen ($SVG_{max} = 0.4$ s⁻¹). Aufgrund des lokalen Druckabflusses entlang der sohnahen Öffnung des Staubalkens (L3), entstehen an diesem Bypass-Einlauf die höchsten Geschwindigkeitsgradienten mit $SVG_{max} = 1.2$ s⁻¹.

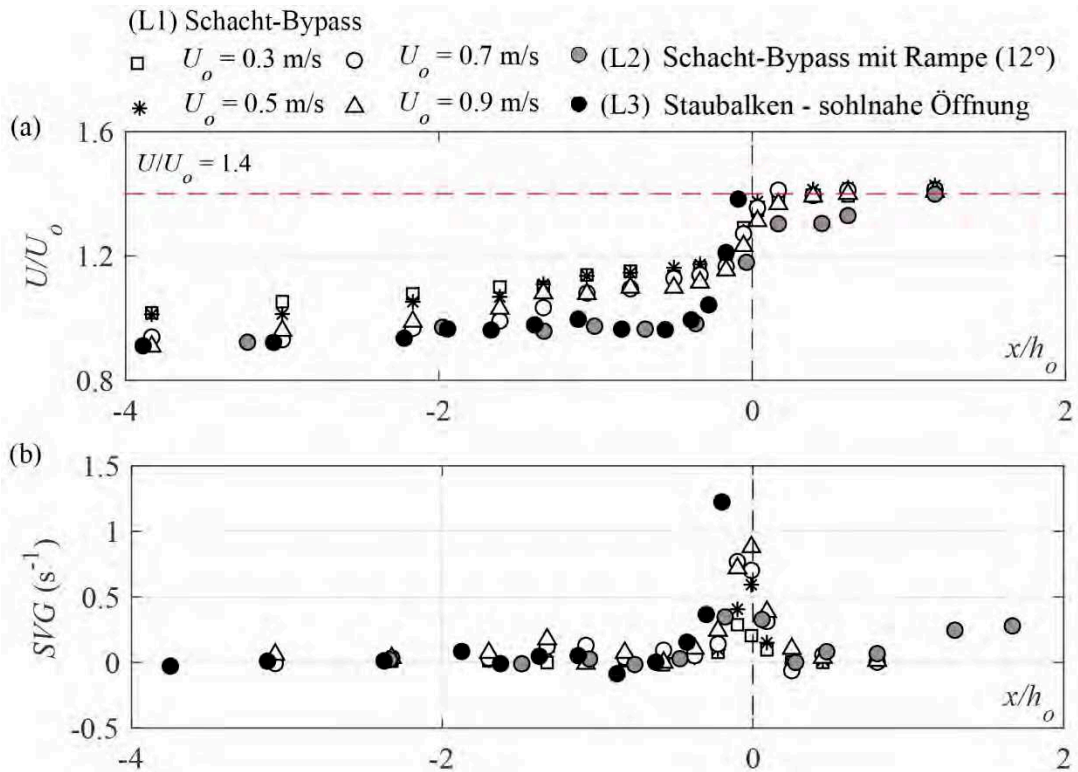


Abb. 3: (a) Geschwindigkeitsprofil U/U_o und (b) Geschwindigkeitsgradient SVG (s^{-1}) für die Bypass-Layouts (1)-(3); der Bypasseinlauf liegt bei $x/h_o = 0$

Die Konstruktion des Rohr-Bypasses (L4) führt zu einem Aufstau, einer lokalen Abnahme und einer anschliessenden sehr starken Zunahme der Fließgeschwindigkeiten direkt vor dem Einlauf (Abb. 4a). Um eine Geschwindigkeitsabnahme zu vermeiden, müsste Q_{by} weiter erhöht werden, was allerdings zu einem starken Anstieg des SVG am Bypass-Einlauf führen würde (Abb. 4b).

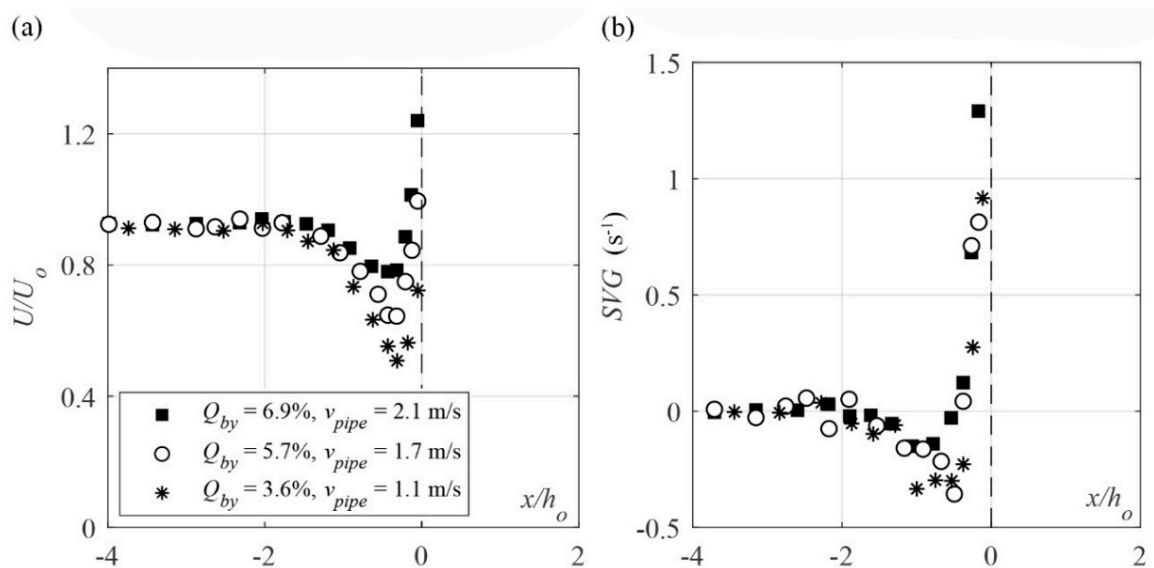


Abb. 4: (a) Geschwindigkeitsprofil U/U_o und (b) Geschwindigkeitsgradient SVG (s^{-1}) vor dem Rohr-Bypass (L4) für $U_o = 0.7$ m/s, gemessen für verschiedene Bypass-Durchflüsse

Aufgrund der ungünstigen Geschwindigkeitsprofile des Rohr-Bypasses wurden die Lebendfischversuche nur für die Bypass-Layouts (1)-(3) durchgeführt. In Abb. 5 sind die Anzahl Bypass-Passagen und Verweigerungen für die Versuche mit Schneidern dargestellt. Da keine Rechenpassagen beobachtet wurden, lag die Schutzwirkung des CBR-Bypass-Systems bei 100% für alle Lebendfisch-Versuche mit Schneidern. Selbst bei $U_o = 0.7$ m/s sind die Fische kontrolliert, positiv rheotaktisch an den Rechen geschwommen und zum Bypass geleitet worden. Der Vergleich der beiden Versuchsreihen mit dem Schachtbypass (L1a, L1b) zeigt, dass ein höherer SVG zu mehr Verweigerungen führte. Ausserdem brauchten die Schneider im Mittel mit 225 s bei L1b rund 2.5-Mal länger, bis sie den 7m langen Strömungskanal oberhalb des Bypasses durchschwammen und den Bypass akzeptierten, als bei L1a mit 90 s. Der Schacht-Bypass mit 12° geneigter Rampe (L2) führte zu vermehrten Verweigerungen. Für diese Konfiguration ($U_o = 0.5$ m/s, $U_{by,in}/U_o = 1.4$) wurde das Geschwindigkeitsprofil nicht vermessen, sodass SVG_{max} nicht bekannt ist. Es wurde allerdings beobachtet, dass die Fische nicht nur bei $x/h_o = 0$ zögern, sondern auch am Übergang zur Rampe bei $x/h_o = 0.56$ und auf der Rampe selbst. Hier wären daher detailliertere Geschwindigkeitsmessungen nötig, um das zögernde Verhalten abschliessend zu erklären. Aufgrund der hohen Geschwindigkeitsgradienten vor der sohnnahen Öffnung des Staubalkens (L3) für $U_{by,in}/U_o = 1.4$ (vgl. Abb. 3), wurde der Bypass so reguliert, dass $U_{by,in}/U_o = 1.0$ und $v_{by} = 0.75$ m/s an der engsten Stelle der sohnnahen Öffnung, sodass $v_{by}/U_o = 1.5$ und $SVG_{max} \approx 0.55$ s⁻¹. Alle Fische haben den Bypass akzeptiert (Abb. 5).

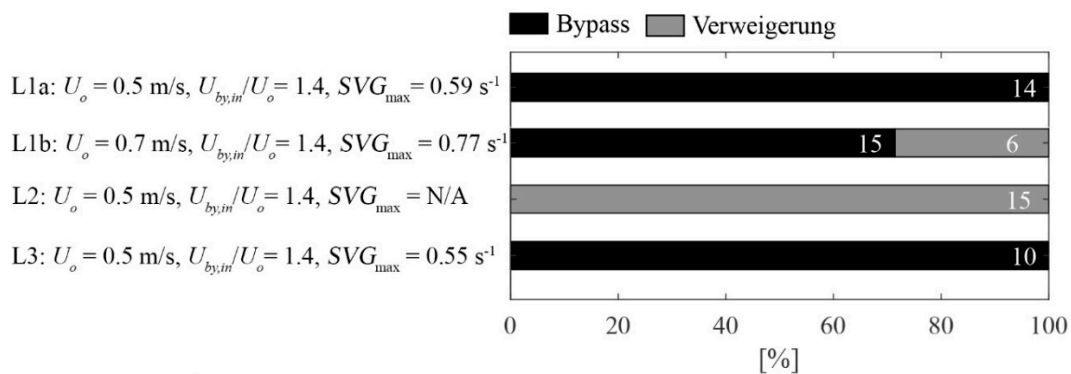


Abb. 5: Bypass-Passagen und Verweigerungen von Schneidern (absolute Anzahl Fische in weiss angegeben) bei $U_o = 0.5$ m/s, 0.7 m/s und verschiedenen Bypass-Layouts

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Resultate bestätigen, dass ein ungünstig gestalteter oder ungünstig regulierter Bypass zu mehr Verweigerungen bzw. einer verminderten Akzeptanz führen kann. Dies führt wiederum zu einer verzögerten Abwanderung und erhöht das

Risiko einer Rechenpassage. Aufgrund von begrenzten Platzverhältnissen im Labor konnten nicht alle Bypass-Layouts optimal reguliert werden. Die Lebendfisch-Versuche mit Schneidern zeigen, dass diese Fische sehr sensibel auf räumliche Geschwindigkeitsgradienten reagieren, wobei der Bypass bei $SVG \approx 0.6 \text{ s}^{-1}$ rasch akzeptiert wird. Die hohen Geschwindigkeitsgradienten am Einlauf des Rohr-Bypass können Fische vom Einschwimmen abschrecken. Ausserdem verstopft dieser Bypasstyp erfahrungsgemäss schnell mit Geschwemmsel oder Sedimenten und kann nur schwer wieder gereinigt werden. Um eine hohe Akzeptanz zu erreichen, müsste eine Einlauftrumpete so konstruiert sein, dass die Geschwindigkeitsgradienten klein bleiben. Um diese Erkenntnisse abschliessend zu bestätigen, sind detailliertere Geschwindigkeitsmessungen sinnvoll.

Der im ethohydraulischen Strömungskanal eingebaute Rechen bildet lediglich den unterstromigen Abschnitt eines Prototyp-Rechens ab. Demzufolge ist der relative Bypass-Durchfluss Q_{by}/Q_o im Labor deutlich höher als an einer Prototypanlage. Die für das Fischverhalten relevanten Parameter $U_{by,in}/U_o$ und SVG können aber im Labor prototypähnlich abgebildet und verglichen werden. Obwohl die meisten Empfehlungen zum Bypass-Durchfluss einen Prozentsatz der Ausbaumassmenge angeben, bestätigen die in diesem Beitrag gezeigten Resultate, dass der SVG vor dem Bypass der entscheidende Parameter für eine rasche Akzeptanz ist. Für Schneider war die Akzeptanz rascher bei geringem SVG , also bei geringerem Bypass-Durchfluss.

Der Vergleich mit den Empfehlungen für Salmonide zeigt, dass Schneider deutlich sensibler auf Geschwindigkeitsgradienten reagieren und geringere SVG bevorzugen. Weitere Versuche mit unterschiedlichen Fischarten könnten daher aufschlussreiche Erkenntnisse liefern, um die Empfehlungen für eine effektive Bypass-Gestaltung weiter zu optimieren.

Danksagung

Dieses Projekt wird durch das Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union mit der Förderungsvertragsnummer 727830, FIThydro, finanziert und ist Teil des Schweizerischen Forschungsprogramms *Swiss Competence Center for Energy Research – Supply of Electricity (SCCER-SoE)*.

Referenzen

Albayrak, I., Boes, R.M., Kriewitz, C.R., Peter, A., Tullis, B.P. (2020). Fish guidance structures: new head loss formula, hydraulics and fish guidance efficiencies. *Journal of Ecohydraulics*, <https://doi.org/10.1080/24705357.2019.1677181>.

- Beck, C., Albayrak, I., Meister, J., Boes, R.M. (2019a). Hydraulic performance of fish guidance structures with curved bars – Part 1: flow fields, *Journal of Hydraulic Research*, <https://doi.org/10.1080/00221686.2019.1671515>.
- Beck, C., Albayrak, I., Meister, J., Boes, R.M. (2019b). Hydraulic performance of fish guidance structures with curved bars – Part 2: head loss assessment, *Journal of Hydraulic Research*, <https://doi.org/10.1080/00221686.2019.1671516>.
- Detert, M., Schütz, C., Czerny, R. (2018). Development and Tests of a 3D Fish-Tracking Videometry System for an Experimental Flume, *River Flow 2018, E3S Web of Conferences* 40.
- Ducharme, L.J.A. (1972). An Application of Louver Deflectors for Guiding Atlantic Salmon (*Salmo salar*) Smolts From Power Turbines, *Fisheries Research Board of Canada*, 29(10), 1397-1404.
- Ebel, G. (2016). *Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbio-logische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung*. ISBN 9783540437130. 2. Auflage. Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, Halle (Saale).
- Enders, E., Gessel, M., Anderson, J., Williams, J. (2012). Effects of decelerating and accelerating flows on juvenile salmonid behavior, *Transactions of the American Fisheries Society* 141(2), 357-364.
- Kriewitz C.R. (2015). Leitrechen an Fischabstiegsanlagen – Hydraulik und fischbiologische Effizienz, *VAW-Mitteilung* 230 (R. Boes, ed.), ETH Zürich.
- Simmons, A. (2000). Effectiveness of a fish bypass with an angled bar rack at passing Atlantic salmon and steelhead trout smolts at the Lower Saranac Hydroelectric Project, *Advances in fish passage technology*, American Fisheries Society, 95-102.
- U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation (USBR) (2006). *Fish protection at water diversions – A guide for planning and designing fish exclusion facilities*, Denver, Colorado.
- Wagner, F., Körnig, J., Warth, P., Schmalz, W. (2019). Ergebnisse der Methodenkombination bei Untersuchungen eines Fischschutzsystems an einer WKA. *WasserWirtschaft* (2-3), 23-28.

Adressen der AutorInnen

Claudia Beck (korrespondierende Autorin)

Julian Meister, Dr. Ismail Albayrak, Prof. Dr. Robert Boes

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich

CH-8093 Zürich, Hönggerberggring 26

beck@vaw.baug.ethz.ch