Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 25.11.2014

Schonender Fischabstieg an grossen Kraftwerken, Teil II

Auftraggeber:

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

Kofinanzierung:

Bundesamt für Umwelt BAFU, 3003 Bern

Auftragnehmer:

Eawag Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology
Seestrasse 79
CH-6047 Kastaneinbaum
www.eawag.ch

Autoren:

Armin Peter, Eawag armin.peter@eawag.ch
David Flügel, Eawag

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser
BFE-Programmleiter: Dr. Klaus Jorde
BFE-Vertragsnummer: SI/5000642-02

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

Zusammenfassung

Das neue Gewässerschutzgesetz fordert die Wiederherstellung der Fischgängigkeit bis im Jahre 2030. Davon sind auch die Kraftwerke betroffen. Die grossen Probleme bezüglich Fischwanderung bei Kraftwerken liegen bei der Abwanderung. Die Herausforderung bei Abstiegsvorrichtungen liegt darin, die Tiere möglichst schnell und sicher um eine Barriere flussabwärts zu leiten. Um diesbezüglich dringendes Wissen zu erhalten, wurde dieses Projekt ins Leben gerufen (Projektinitiant VAR Verband Aare-Rheinwerke). In diesem Gemeinschaftsprojekt ist an der VAW (ETH Zürich, Hönggerberg) ein Strömungskanal gebaut worden, in dem ethohydraulische Versuche zur Fischabwanderung an Kraftwerken durchgeführt wurden. Es wurden verschiedene Konfigurationen von Verhaltensbarrieren in Bezug auf ihre Effektivität getestet: Louvers und Bar Racks mit Rechenstababständen von 5 resp. 11 cm. Das ethohydraulische Modell bestand aus einem Versuchskanal mit einer Länge von 30 m, einer Breite von 1.8 m. Die Wassertiefe betrug 90 cm, die verwendeten Fliessgeschwindigkeiten 30 resp. 60 cm/s.
Es wurden fünf verschiedene Fischarten eingesetzt: Barben, Schneider, Aal, Bachforelle und Äsche. Es wurden Konfigurationen identifiziert, welche eine hohe Leiteffizienz für die Fische aufwiesen. Besonders mit Bar Racks mit einem Rechenstababstand von 5 cm und einer Gesamtausrichtung des Leitrechens von 15° oder 30° gelang es, einen grossen Anteil der Fische (> 70 % der Barben, Schneider, Bachforellen und Aale) in den Bypass zu lenken. Für die Äsche war die Leiteffizienz jedoch gering (35 %). Mit der Verwendung eines Bodenbleches liess sich die Leiteffizienz auch für Äschen deutlich steigern (> 95 % schwammen in den Bypass), jedoch ebenfalls verbesserte sich die Leiteffizienz nochmals für die andern vier Fischarten.
Für das weitere Vorgehen sind zusätzlich Versuche empfohlen (Veränderungen im Versuchsaufbau) und das Durchführen von Nachtversuchen. Wenn die noch offenen Fragen geklärt sind, sollte möglichst bald ein Versuch zum Fischabstieg an einem Pilotkraftwerk durchgeführt werden. Damit lässt sich dann auch die Übertragbarkeit der Laboruntersuchungen auf die reale Situation überprüfen.

Summary

The new law of protection of water claims the re-establishment of fish migration until 2030. This applies also to hydropower plants. The big problems concerning fish migration and hydropower plants are related to downstream migration. The challenge of downstream migration facilities is to lead fishes quickly and safe around a barrier. In order to acquire consolidated knowledge this project was started (initiated by VAR Verband Aare-Rheinwerke). In this joint project an artificial flume was constructed at VAW (ETH Zurich, Hönggerberg). The goal was to carry out downstream migration studies (ethohydraulic studies) at hydropower facilities. Different configuration of behavioral barriers were tested for their effectiveness: Louvers and bar racks with slat spacing of 5 respectively 11 cm. The ethohydraulic model consisted of a flume which was 30 m long, 1.8 m wide. The water depth was 90 cm. The used flow velocities were 30 respectively 60 cm/s.
Five different fish species were studied: barbel, spirlin, eel, brown trout and grayling. Different configurations were identified which had a high guiding efficiency for fishes. Mainly with bar racks with a slat spacing of 5 cm and an orientation of 15° or 30° a big proportion of the fishes were guided into the bypass (>70 % of barbel, spirlin, brown trout and eel). However for grayling the guiding efficiency was low (35 %). In use of a bottom overlay the guiding efficiency was distinctly increased. This is mainly true for grayling (> 95 % used the bypass). However also for the other four fish species the guiding efficiency increased again.
For the future procedure additional studies are recommended (changes in the flume design) and testing the fish at night. When open questions are clarified a study on fish downstream migration at a pilot hydropower plant should be carried out. Thereby the transferability to the real situation could be examined.

Ausgangslage

Das neue Gewässerschutzgesetz (Inkrafttretung 2011) fordert die Wiederherstellung der Fischgängigkeit. Davon sind auch Kraftwerksanlagen betroffen, die eine Fischwanderung flussaufwärts und –abwärts sicherstellen müssen. Die Kantone sind aufgefordert, bis 2014 die Fischgängigkeit zu planen und bis im Jahre 2030 wiederherzustellen. Grosse Probleme und Wissenslücken liegen vor allem beim Fischabstieg an grossen Kraftwerken.

Die Herausforderung bei Abstiegsvorrichtungen liegt darin, die Tiere möglichst schnell und ermüdungsfrei um eine Barriere flussabwärts zu leiten. Idealerweise sollten Schutzvorrichtungen ausserdem für die gesamte Fischartengemeinschaft eines Gewässers wirksam sein. Hierfür sind Kenntnisse bezüglich Reizwahrnehmung, Präferenzen für Strömungsbedingungen sowie Faktoren, die Meidereaktionen auslösen, von grundlegender Bedeutung.

Fehlendes Wissen über das Verhalten abwandernder Fische, schränkt die Entwicklung funktionsfähiger und effektiver Abstiegsvorrichtungen ein. Für eine Vielzahl von Arten fehlt noch Grundlagenwissen, besonders über das Verhalten von abwandernden Fischen. Wichtig ist ausserdem das Verständnis von Reaktionsweisen gegenüber unterschiedlichen Stimuli. Wie wirken sich Geschwindigkeitsgradienten, Lichtverhältnisse und in Bezug auf Schwarmverhalten auch unterschiedliche Dimensionierungen auf die Funktionsfähigkeit von Leitstrukturen und Bypässen aus? Und wie beeinflussen sich diese Faktoren gegenseitig?

Zur Klärung dieser Fragestellungen eignet sich die Anwendung der Ethohydraulik. Sie ist eine Transdisziplin, welche die Ethologie (griech.: vergleichende Verhaltensforschung) und die Hydraulik (griech.: Lehre vom Strömungsverhalten von Flüssigkeiten) verbindet. Die dabei durchgeführten Verhaltensbeobachtungen im Strömungskanal ermöglichen, Fischverhalten unter reproduzierbaren Laborbedingungen, gleichzeitig aber auch unter natürlichen Randbedingungen zu untersuchen, so dass die Tiere ein auf natürliche Verhältnisse übertragbares Verhalten zeigen. Dabei lassen sich Reaktionen gegenüber ganz spezifischen hydraulischen Reizen erforschen und kausale Reiz-Reaktions-Muster bestimmen. Ausserdem erlauben sie die Ableitung von Bemessungsgrundlagen für die Planung und den Bau funktionsfähiger Anlagen. In diesem Zusammenhang führte die Eawag zusammen mit der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), dem Verband der Aare-Rheinwerke (VAR), der Swisselectric Research, dem Bundesamt für Energie (BfE) sowie dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) ethohydraulische Modellversuche durch, um das Verhalten einheimischer Fischarten an Fischschutzvorrichtungen zu untersuchen. Das Projekt war in zwei Teile gegliedert und in diesem Bericht wird hauptsächlich auf den 2. Teil eingegangen.

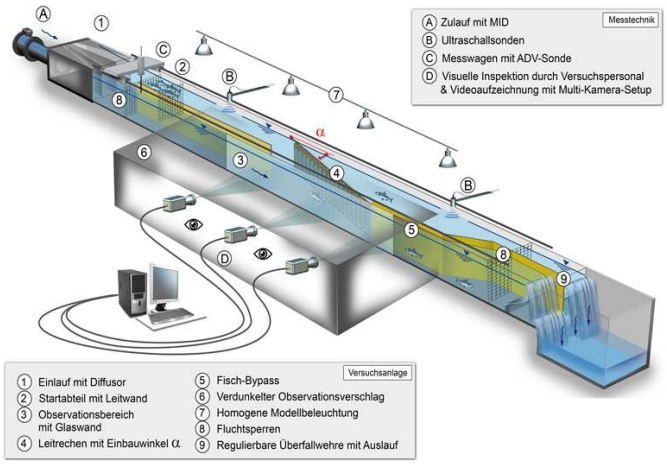
Ziel der Arbeit

Um dringend notwendiges Wissen über funktionsfähige und effektive Abwanderhilfen, auch bei grösseren Wasserkraftwerken, und das Verhalten abwandernder heimischer Fischarten zu erhalten und um Kraftwerksbetreibern fundierte Ratschläge geben zu können, wurde dieses Projekt ins Leben gerufen. In diesem Gemeinschaftsprojekt ist an der VAW (ETH Hönggerberg) ein Strömungskanal gebaut worden, in dem ethohydraulische Versuche durchgeführt und wichtige, grundlegende Daten gesammelt werden können.
Louver und Bar Racks werden vor allem im nordamerikanischen Raum für die Abwanderung der Fische eingesetzt. Forschungsergebnisse liegen für die dort wichtigsten Zielfischarten Lachs, Forelle, Stör und Maifisch vor. Es kann nicht von einer Übertragbarkeit dieser Dimensionierungsgrundlagen auf die Bedürfnisse unserer heimischen potamodromen und katadromen Fischarten ausgegangen werden. Zielarten der Untersuchungen waren daher Barben, Schneider, Bachforellen, Äschen und Aale.
Im Rahmen dieses Projektes wurden verschiedene Konfigurationen der Verhaltensbarrieren in Bezug auf Ihre Effektivität, Fische stromabwärts in einen Bypass zu leiten, untersucht. Die untersuchten, schräg im Kanalquerschnitt angeordneten Strukturen waren bezüglich der Parameter Einbauwinkel, Stababstand, Stabausrichtung variabel. Um die Leitwirkung zu bestimmen, wurde das Fischverhalten gegenüber den unterschiedlichen Konfigurationen bei definierten Fliessgeschwindigkeiten analysiert. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, eine bestmögliche Konfiguration der getesteten Leiteinrichtun-

gen auf die untersuchten Fischarten zu bestimmen und Abwanderhilfen auch bei grösseren Wasserkraftwerken besser auf die Bedürfnisse der einheimischen Fischarten auszurichten.

Vorgehen/Methode

Der Versuchsstand besteht aus einer Rinne, die sowohl über die messtechnische Ausrüstung zur Bestimmung der hydraulischen Parameter verfügt, als auch über die zur Durchführung von Tierversuchen nötigen Einbau. Der Versuchskanal ist ca. 30 m lang, 1,8 m breit und 1,4 m hoch. Dabei ist der Abflussquerschnitt 1,5 m breit und 0,9 m tief. Der Zufluss ist stufenlos von 0 bis 1200 l/s regelbar. Dies entspricht einer resultierenden mittleren Fliessgeschwindigkeit bis 0,8 m/s.



Ansicht des Versuchsstandes.
Bild: VAW Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 2014.

Oberstrom des Leitrechens ist ein 0,5 m breites und 1 m langes Startabteil angeordnet. Die Probanden werden jeweils 10 Minuten vor Versuchsbeginn in das Abteil gegeben, um ihnen eine Adaption an die Strömungsverhältnisse der jeweiligen Versuchskonfiguration zu ermöglichen. Das Startabteil befindet sich 1 m unterhalb des Diffusors und wird über das Ziehen eines Gitters geöffnet. Daran schliesst sich eine Leitwand an, die die Fische entlang der dem Bypass abgewandten Gerinneseite bis kurz vor (1,5 m) den Leitrechen führt. Dadurch soll eine Interaktion mit der Rechenstruktur gewährleistet werden.
Der Leitrechen besteht aus 1 cm breiten, 10 cm tiefen und 115 cm hohen Aluminiumflachprofilen. Um die Verletzungsgefahr bei einer möglichen Rechenpassage zu minimieren, sind die Kanten der Rechenstäbe abgerundet.
Über eine Länge von 9 m wird die Modell-Aussenmauer von einer gläsernen Aussenwand unterbrochen, die die Beobachtung der Tiere sowohl Oberstrom, als auch entlang des Rechens, sowie im Bypass-Einstieg erlaubt. Dieser Observationsbereich ist ausserhalb des Modells mit einer verdunkelten Observationskammer umbaut, die mögliche störende Einflüsse auf das Fischverhalten minimieren soll. Innerhalb der Observationskammer befinden sich drei Videokameras zur Aufnahme der Versuche. Von dort wird das Fischverhalten ausserdem über Schriftprotokolle dokumentiert. Unmittelbar an das Ende des Leitrechens schliesst der 20 cm breite Bypass an. Am Modellauslauf ist er mit einer stufenlos regulierbaren Überfallklappe ausgestattet. Zusammen mit einer weiteren Überfallklappe am Auslauf des Hauptgerinnes lassen sich unterschiedliche Abfluss- und Geschwindigkeitsverhältnisse in den beiden Teilgerinnen einstellen.
Im Modell werden diverse fest installierte und mobile Schutzgitter eingesetzt. An Ein- und Auslauf verhindern sie, dass die Probanden in den Wasserkreislauf gelangen. Nach Versuchsabschluss erleichtern sie ein zügiges Abfangen der Probanden durch das Absperren von Teilbereichen.1000 W Strahler leuchten den Kanal gleichbleibend gleichmässig über die gesamte Kanallänge aus. Derart wurden vergleichbare Versuchsverhältnisse für alle Testzeiträume realisiert und unerwünschte, tageszeitabhängige Schattenbildung verhindert.

Am Boden kann an den Leitrechen ein Leitblech angebracht werden. Dieses ist 10 cm hoch und wird direkt am Boden vor dem Rechen über die gesamte Länge angebracht

Leitrechen mit installiertem Leitblech.
Gesamtwinkel des Rechens α=30°, Stabausrichtung β=45°, Stababstand b=5cm (VAW 2014).

Versuchsfische
Mittels Elektrobefischung wurden die Versuchsfische in umfangreichen Abfischungs-kampagnen aus der Suhre (LU), der Thur (TG), der Birs (BE) und dem Mühlitalbach (LU) entnommen. Nach den Befischungen wurde den Tieren eine dreitägige Ruhephase und Adaptionszeit an die Hälterungsbedingungen gewährt.
Über einen sukzessiven Wasseraustausch über mehrere Stunden erfolgte die Adaption an die Wassertemperatur in der Hälterung. Die Hälterung bestand aus drei je 2000 l Rundstrombecken mit Teilverdunklung, die im Durchfluss mit dem Wasser aus dem Versuchsstand beschickt wurden, um einen Temperaturunterschied zwischen Hälterungs- und Modellwasser zu vermeiden. Die Becken waren, für Notfälle und für eine Kühlung, zusätzlich mit einem Anschluss an die Frischwasserversorgung ausgestattet. Ausserdem wurden sie belüftet und mit Filterpumpen ausgerüstet. Um Verunreinigungen im Wasserkreislauf zu verhindern, wurde auf das Füttern der Tiere verzichtet. Alle Probanden wurden wieder in ihre jeweiligen Flüsse ausgesetzt, wobei ihnen auch hierbei eine mehrstündige Adaptionszeit gewährt wurde. Eine Kontrolle der Hälterungseinrichtung sowie der Wasserparameter (Temperatur, pH-Wert, Sauerstoffgehalt) erfolgte täglich.

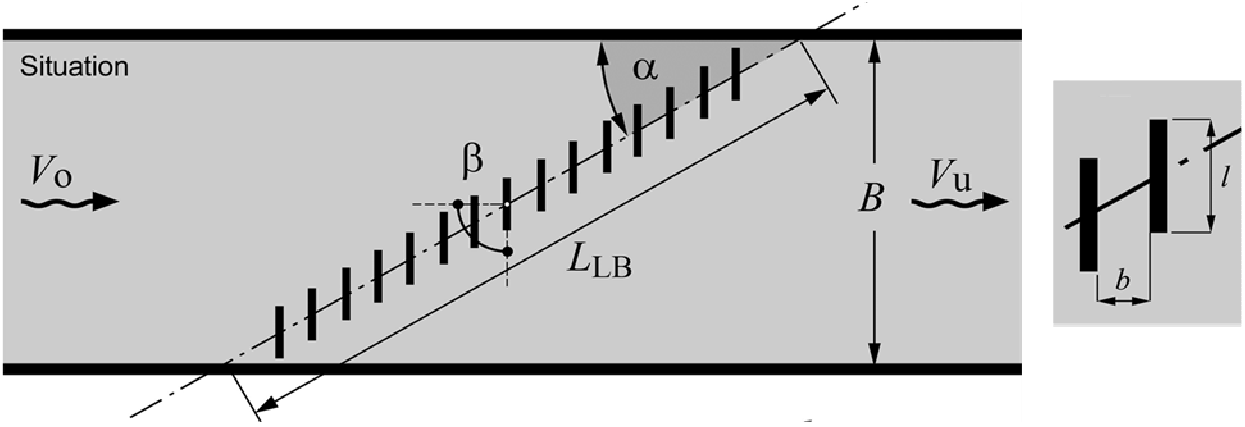
Verhaltensbeobachtung und Dokumentation
Die durchgeführten Experimente wurden mit Hilfe von Schriftprotokollen, graphischen Aufzeichnungen sowie Videoaufnahmen dokumentiert. Mit Hilfe einer Stoppuhr erfassten Beobachter alle auftretenden Verhaltensweisen chronologisch. In graphischen Aufzeichnungen wurden grossräumige Schwimmwege skizziert, was das Zuordnen des Auftretens bestimmter Verhaltensweisen an bestimmte Bereiche des Versuchsstandes erleichtert. Die Videoaufnahmen erlangen vor allem in Hinblick der Zuhilfenahme bei schwierigen Versuchsabläufen und bei einer zu einem späteren Zeitpunkt potentiell möglichen, rechnergestützten Auswertung mittels Objekterkennung an Bedeutung.

Versuchsdurchführung
Alle Fische wurden vor dem Start eines Versuches für 10 min in das Startabteil eingesetzt (welches durch ein ziehbares Gitter vom Kanal getrennt wurde).

Schneider wurden als Einzelfische getestet. Je Konfiguration wurden 20 Einzelversuche durchgeführt. Um mögliche Lerneffekte zu erfassen, wurden je zehn Probanden eingesetzt, die das erste Mal im Modell waren, sowie je zehn Probanden, die bereits einmal im Versuch waren, seit dem ersten Einsatz jedoch mindestens einen Ruhetag hatten.
Barben wurden in Dreiergruppen getestet. Je Konfiguration wurden acht Einzelversuche durchgeführt. Je vier Versuche erfolgten mit Fischen, die das erste Mal eingesetzt wurden, in je vier Versuchen kamen Tiere zum Einsatz, die bereits einmal im Versuch waren, seither jedoch mindestens einen Ruhetag hatten.
Äschen wurden in Dreiergruppen getestet. Je Konfiguration wurden acht Einzelversuche durchgeführt. Je vier Versuche erfolgten mit Fischen, die das erste Mal eingesetzt wurden, in je vier Versuchen kamen Tiere zum Einsatz, die bereits einmal im Versuch waren, seither jedoch mindestens einen Ruhetag hatten.
Bachforellen wurden ebenso in Dreiergruppen getestet. Je Konfiguration wurden acht Einzelversuche durchgeführt. Je vier Versuche erfolgten mit Fischen, die das erste Mal eingesetzt wurden, in je vier Versuchen kamen Tiere zum Einsatz, die bereits einmal im Versuch waren, seither jedoch mindestens einen Ruhetag hatten.
Für die Aale musste bei 0,6m/s in das Startabteil eine solide Plastikplatte gegen das Gitter gegeben werden um die Strömungsgeschwindigkeit vor der Platte zu verringern. In Testversuchen sind einige Aale gegen das Gitter gedrückt worden und konnten sich aus eigener Kraft nicht mehr von diesem Lösen. Die Plastikplatte wurde zusammen mit dem Gitter bei Versuchsbeginn aus dem Wasser gehoben. Aale wurden in Zweiergruppen getestet. Je Konfiguration wurden zehn Einzelversuche durchgeführt. Je fünf Versuche erfolgten mit Fischen, die das erste Mal eingesetzt wurden, in je fünf Versuchen kamen Tiere zum Einsatz, die bereits einmal im Versuch waren, seither jedoch mindestens einen Ruhetag hatten.
Mit der Durchführung der Versuche wurde am Morgen begonnen, stets nach der gleichen Prozedur. Am Kanal wurde der entsprechende Durchfluss eingestellt (400 l/s, 800 l/s, 1‘000l/s) und über die Überfallklappen am Auslauf eine Fliesstiefe von 0,9 m eingestellt. Für den resultierenden stationären Strömungszustand wurden die Fliessgeschwindigkeiten im Einlauf, dem Bypasseinstieg sowie im vorderen Drittel des Leitrechens gemessen. Die Wassertemperatur, der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit wurde während der gesamten Versuchsdauer im Kanal und in allen Hälterungsbecken bestimmt.

Versuchszeitraum
Die Versuche wurden in zwei Versuchsreihen durchgeführt. Die erste Versuchsreihe fand von Oktober 2013 bis Dezember 2013 statt. Die zweite Versuchsreihe wurde von Mai 2014 bis Juli 2014 durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe wurden Versuche mit Barben und Schneidern aus der Suhre durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse der ersten Versuchsreihe wurden in der zweiten, die besten Konfigurationen weiter getestet und mit einem Leitblech durchgeführt. Zudem wurden Bachforellen, Aale und Äschen mit diesen Konfigurationen getestet und ein Kontrollversuch mit Barben und Schneidern durchgeführt, bei dem die Stabausrichtung 0° betrug.

Versuchsvariablen
Die Ausführung der Rechen erfolgte variabel bezüglich der Rechenausrichtung α (15°, 30°), der Stabausrichtung β (90°, 45°) sowie der Stababstände b (5 cm, 11 cm). Die entsprechenden Konfigurationen wurden bei drei Fliessgeschwindigkeiten V_0 (0,3 m/s, 0,6 m/s, 0,8 m/s) bzw. drei Abflüssen (400 l/s, 800 l/s, 1000 l/s) getestet. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die Versuchsparameter.



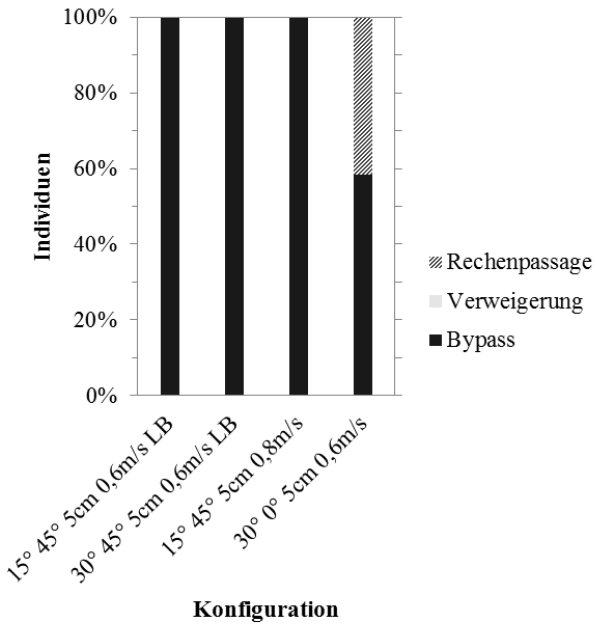
Grafik des Versuchsaufbaues.
α = Rechenausrichtung, β = Stabausrichtung, b = Stababstand, V_0 = Fliessgeschwindigkeit am Einlauf, L_{LB} = Länge des Leitbleches, B = Breite des Kanales, l = Länge der Rechenstäbe. Bild: VAW Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 2014.

Konfiguration	Rechen-ausrichtung α [°]	Stab-ausrichtung β [°]	Stab-abstand b [cm]	Fliess-geschwindigkeit v_0 [m/s]	Leitblech (LB)
15° 90° 5cm 0,3m/s	15	90 (Louver)	5	0,3	
15° 90° 5cm 0,6m/s	15	90 (Louver)	5	0,6	
15° 90° 11cm 0,3m/s	15	90 (Louver)	11	0,3	
15° 90° 11cm 0,6m/s	15	90 (Louver)	11	0,6	
15° 45° 5cm 0,3m/s	15	45 (Bar Rack)	5	0,3	
15° 45° 5cm 0,6m/s	15	45 (Bar Rack)	5	0,6	
15° 45° 11cm 0,3m/s	15	45 (Bar Rack)	11	0,3	
15° 45° 11cm 0,6m/s	15	45 (Bar Rack)	11	0,6	
15° 45° 5cm 0,8m/s	15	45 (Bar Rack)	5	0,8	
15° 45° 5cm 0,6m/s LB	15	45 (Bar Rack)	5	0,6	LB
30° 45° 5cm 0,3m/s	30	45 (Bar Rack)	5	0,3	
30° 45° 5cm 0,6m/s	30	45 (Bar Rack)	5	0,6	
30° 45° 5cm 0,6m/s LB	30	45 (Bar Rack)	5	0,6	LB
30° 0° 5cm 0,6m/s	30	0 (Kontrolle)	5	0,6	

Versuchsvariablen.
Diese Parameter wurden in den Versuchen verändert und ergeben zusammen die Bezeichnung der Konfiguration.

Ergebnisse

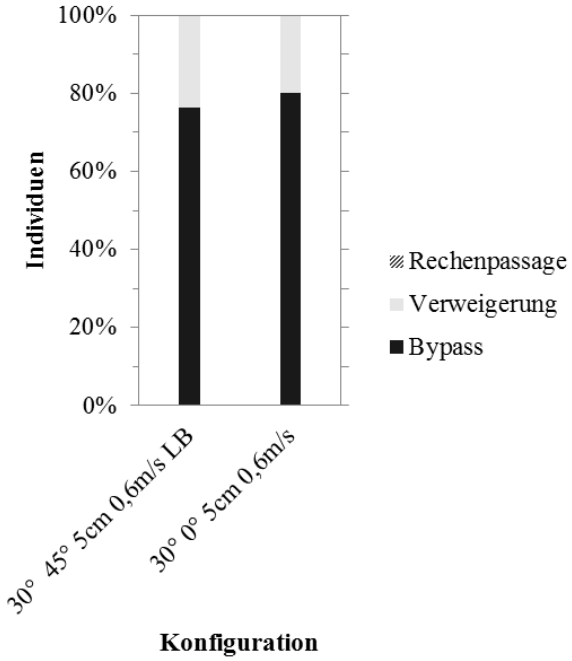
Barben



Alle mit Barben getesteten Konfigurationen, der zweiten Versuchsreihe.
Verweigerung nach 30min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage. Konfigurationen mit den Parametern Rechenausrichtung 30°, Stabausrichtung 45° (Bar Rack) und 0° (Kontrolle), Stababstand 5cm, Fliessgeschwindigkeit 0,6 m/s und 0,8m/s, mit und ohne Leitblech (LB).

Die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) der Versuche mit Barben, der ersten und zweiten Versuchsreihe zusammengenommen, sind abhängig von der verwendeten Konfiguration (χ^2 = 96,967 mit p = 4,$^{07e-10}$, signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtums-wahrscheinlichkeit). Durch die Installation eines Leitbleches schwammen 100% der Barben in den Bypass ein. Nicht den Grafiken zu entnehmen ist, dass alle Barben, die am Rechen und nicht am Fenster entlang abgewandert sind, direkten Kontakt mit dem Leitblech hatten und flüssig durch die Längsströmung daran entlang in den Bypass geleitet wurden. Sie kamen nicht mehr mit dem Rechen in Kontakt, ein Anstossen der Schwanzflossen an die Rechenstäbe kam nicht mehr vor. Einige Barben liessen sich am Leitblech entlang etwas nach oben treiben, gelangten dort kurzzeitig in eine Querströmung, in Richtung „durch den Rechen hindurch“. Alle Barben reagierten darauf, in dem sie sofort wieder zum Boden abtauchten, hin zum Leitblech und zur Strömung, die an diesem entlang in Richtung Bypass geführt hat.
Zahlenmässig gibt es keinen Unterschied zwischen der Konfiguration 30° 45° 5cm 0,6m/s, die in der ersten Versuchsreihe getestet wurde und derselben mit Leitblech. In beiden sind 100% der Barben in den Bypass eingeleitet worden. Jedoch gelangten die Barben mit Leitblech sehr viel störungsfreier, flüssiger, ohne ein Anstossen der Schwanzflossen an die Rechenstäbe, in den Bypass.
Der Versuch, die Konfiguration 15° 45° 5cm mit noch höherer Fliessgeschwindigkeit (0,8m/s) zu testen, ergab für die Barben 100% Einschwimmen in den Bypass. Bei dieser höheren Fliessgeschwindigkeit waren die Strömungsverhältnisse entlang des Rechens besser als für 0,6 m/s bzw. 0,3 m/s. Die Strömungsgeschwindigkeit nahm dabei optimal, entlang des Rechens zu, bis in den Bypass hinein, wo dann die höchsten Geschwindigkeiten gemessen wurden. Dies liess sich für die niedrigereren Geschwindigkeiten nicht so optimal einstellen. Dies hat zwar keine Auswirkung auf die direkte Leitwirkung des Rechens und die Parameter, die in diesen Versuchen getestet wurden, jedoch auf die Bereitschaft der Fische, in den Bypass einzuschwimmen.
Die Kontrollversuche mit den Barben und einer Stabausrichtung von 0° ergaben, dass 41,7% der Barben den Rechen durchschwammen.

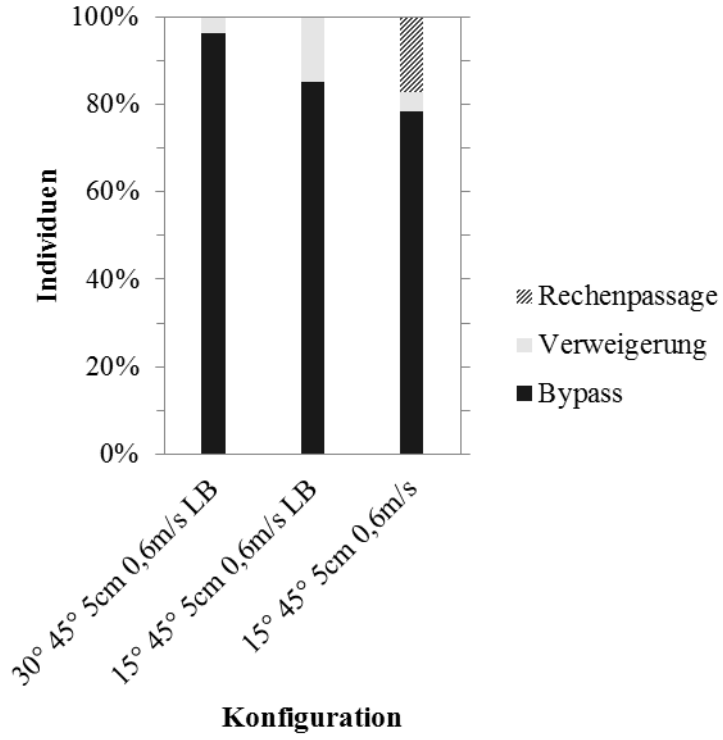
Schneider



Alle mit Schneidern getesteten Konfigurationen, der zweiten Versuchsreihe.
Verweigerung nach 30min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage. Konfigurationen mit den Parametern Rechenausrichtung 30°, Stabausrichtung 45° (Bar Rack) und 0° (Kontrolle), Stababstand 5cm und Fliessgeschwindigkeit 0,6 m/s.

Die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) der Versuche mit Schneidern, der ersten und zweiten Versuchsreihe zusammengenommen, sind abhängig von der verwendeten Konfiguration (χ^2 = 100,4696 mit p = 2,47e^{-11}, signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).
Auch Schneider sind fast immer solnah abgewandert, deshalb hatte das Leitblech auf sie die gleiche Wirkung wie auf die Barben. Besonders eine Längsströmung entlang des Leitbleches bis in den Bypass hinein, hat auch den Schneidern die Abwanderung erheblich erleichtert. Direkt vor dem Leitblech gibt es keine Querströmung mehr und dort sind auch die Schneider in fast allen Versuchen abgewandert. In diesem Versuch mit Leitblech hat es keine Schneider gegeben, die den Rechen passiert haben, jedoch noch immer Schneider, die innerhalb von 30min weder den Bypass noch den Rechen passierten.
Der Kontrollversuch, mit 0° Stabausrichtung, hatte auf die Schneider eine deutlich andere Auswirkung als auf Barben. Kein Schneider passierte den Rechen, es wurden noch mehr Fische in den Bypass eingeleitet wie mit Leitblech, denn die Verweigerer-Rate ist etwas geringer.

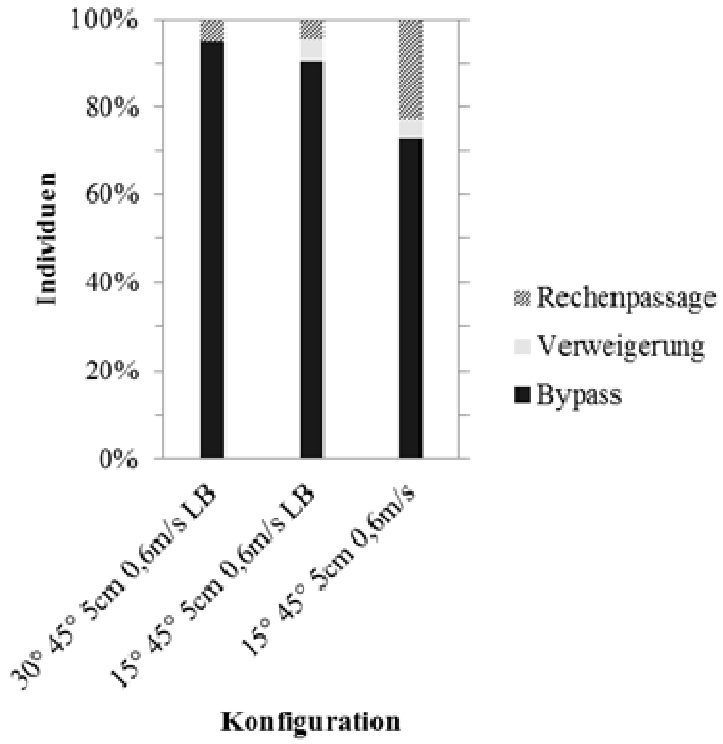
Bachforellen



Alle mit Bachforellen getesteten Konfigurationen, der zweiten Versuchsreihe.
Verweigerung nach 30min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage. Konfigurationen mit den Parametern Rechenausrichtung 30° und 15°, Stabausrichtung 45° (Bar Rack), Stababstand 5cm und Fliessgeschwindigkeit 0,6 m/s.

Für die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) der Versuche mit Bachforellen, ist kein Zusammenhang zu der verwendeten Konfiguration ermittelt worden ($\chi^2 = 0{,}8816$ mit $p = 0{,}3475$, nicht signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit). Aufgrund der geringen Fallzahlen ist es nicht möglich die unterschiedlichen Anzahlen von Bypass, Verweigerung und Rechenpassage auf die Konfiguration zurückzuführen.
Bachforellen wurden zunächst mit der Konfiguration 15° 45° 5cm 0,6m/s getestet. Bei dieser Konfiguration passierten 17,4% der Bachforellen der Rechen. Auch die Bachforellen wanderten fast immer solnah ab und hatten direkten Kontakt mit dem Boden, dem Rechen oder dem Fenster. Sie nutzten dabei ihre Brustflossen um sich, fast ohne Aktivität, auf dem Boden niederzulassen. In diesem Verhalten gleichen sie sehr den Barben, deshalb lag die Vermutung nahe, dass auch bei Bachforellen ein Leitblech den Kontakt zum Rechen und der Strömung durch den Rechen, verhindern würde.
Mit dem Leitblech passierten keine Bachforellen den Rechen. Sie hatten schnell direkten Kontakt zum Leitblech und glitten an diesem entlang in den Bypass. Die gleiche Konfiguration mit 30° Rechenausrichtung hatte mit den Bachforellen annähernd dasselbe Ergebnis. Keine Rechenpassagen und etwas weniger Verweigerer.

Aale



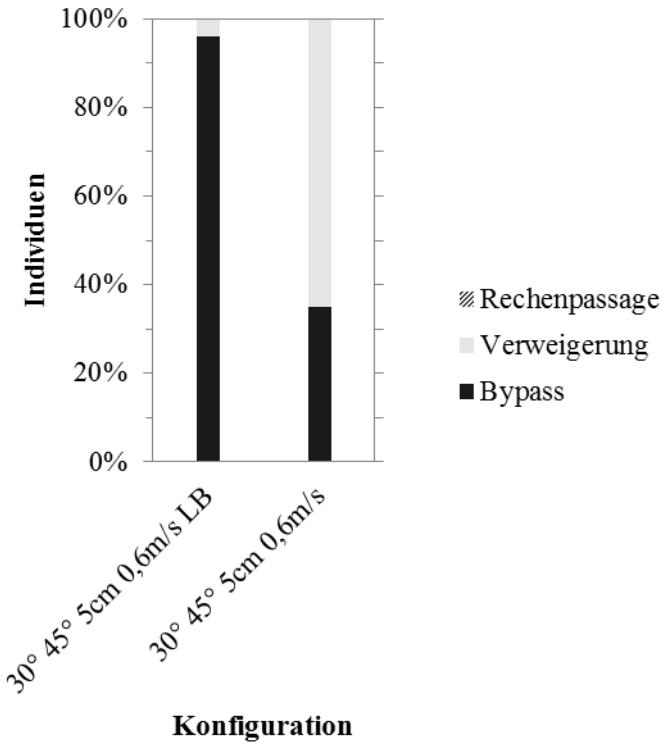
Alle mit Aalen getesteten Konfigurationen, der zweiten Versuchsreihe.
Verweigerung nach 30min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage. Konfigurationen mit den Parametern Rechenausrichtung 30° und 15°, Stabausrichtung 45° (Bar Rack), Stababstand 5cm, Fliessgeschwindigkeit 0,6m/s, mit und ohne Leitblech (LB).

Ohne Leitblech, mit 15° Rechenausrichtung, 45° Stabausrichtung, 5 cm Stababstand und 0,6m/s, passierten Aalen 23% der Aale den Rechen. Auch die Aale befanden sich fast immer solnah, liessen sich dabei zumeist, ohne Aktivität, abtreiben. Teils mit dem Schwanz voran, oft auch zu einem Kreis geschlungen, dabei also mit dem Schwanz und dem Kopf voran. Bei Kontakt mit dem Rechen, reagierten die Aale oft schlagartig, fluchtartig, mit schnellem Stromausfwärtsschwimmen oder mit einer Passage der Rechens.
Da der Grossteil der Aale direkt über dem Grund abtrieb, erleichtert auch hier das Leitblech die Abwanderung. Kamen die Aale mit dem Leitblech anstatt dem Rechen in Kontakt, liessen sich sich daran entlang in den Bypass treiben. Die Rechenpassagen sanken so auf 5%, bei beiden Rechenausrichtungen. Diese 5% trieben nicht solnah ab, kamen über dem Leitblech mit dem Rechen in Kontakt und zeigten das gleiche Verhalten wie ohne Leitblech. Bei den Aalen ist dementsprechend ausschlaggebend wie viele Aale solnah abwandern und durch ein Leitblech effektiv vom Rechen ferngehalten werden.
Für die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) der Versuche mit Aalen, ist keine Abhängigkeit von der verwendeten Konfiguration ermittelt worden ($\chi^2 = 0{,}9294$ mit $p = 0{,}6283$, nicht signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit). Aufgrund der geringen Fallzahlen ist es nicht möglich die unterschiedlichen Anzahlen von Bypass, Verweigerung und Rechenpassage auf die Konfiguration zurückzuführen.

Äschen

Für die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) der Versuche mit Äschen, ist keine Abhängigkeit von der verwendeten Konfiguration ermittelt worden (χ^2 = - mit p = -, Test nicht möglich). Auch hier ist es, Aufgrund der geringen Fallzahlen, nicht möglich die unterschiedlichen Anzahlen von Bypass, Verweigerung und Rechenpassage auf die Konfiguration zurückzuführen.

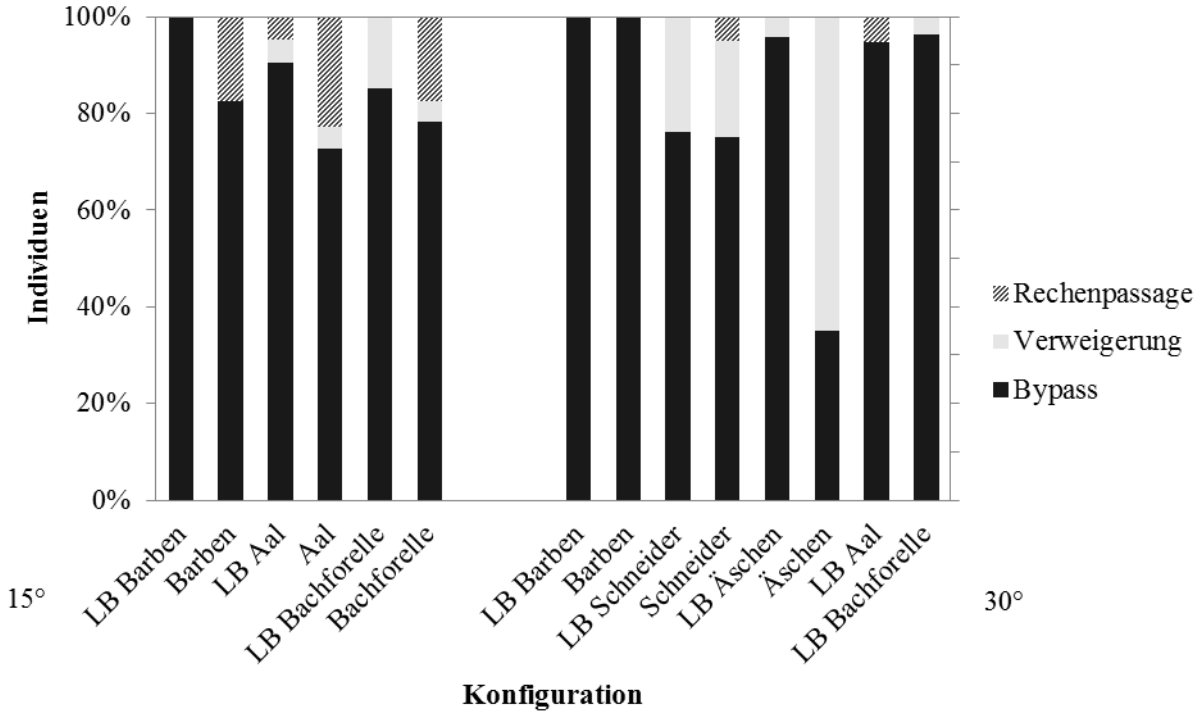
Die Äschen wurden nur bei einer Konfiguration, mit und ohne Leitblech getestet. Sowohl mit, wie auch ohne Leitblech sind keine Rechenpassagen ermittelt worden. Jedoch hielten sich viele Äschen ohne Leitblech direkt vor dem Bypass und dort direkt vor den letzten Rechenstäben, mit geringer Aktivität in der Strömung und zeigten kein Interesse in den Bypass einzuschwimmen. Die Äschen hielten sich hauptsächlich solnah, ohne sich dabei auf dem Boden abzusetzen. Sie hatten immer eine Schwimmbewegung und vermieden den direkten Kontakt mit Strukturen. Mit Leitblechist eine Strömung am Boden, in den Bypass hinein und entlang des Leitblech entstanden. Dies zeigt wie wichtig der Aufbau des Bypasses in Kombination mit dem verwendeten Rechen ist. Nur durch eine optimale Strömungsausrichtung, direkt in den Bypass hinein, haben die Äschen Interesse gezeigt in diesen einzuschwimmen. Dieses Ergebnis zeigt, dass auch mit gegebener Leitwirkung des Rechens, ein ungünstiger Aufbau des Bypasses ein Einschwimmen verhindern kann.



Alle mit Äschen getesteten Konfigurationen, der zweiten Versuchsreihe.

Verweigerung nach 30min ohne Bypass-Einstieg oder Rechenpassage. Konfigurationen mit den Parametern Rechenausrichtung 30°, Stabausrichtung 45° (Bar Rack), Stababstand 5cm und Fliessgeschwindigkeit 0,6 m/s, mit und ohne Leitblech.

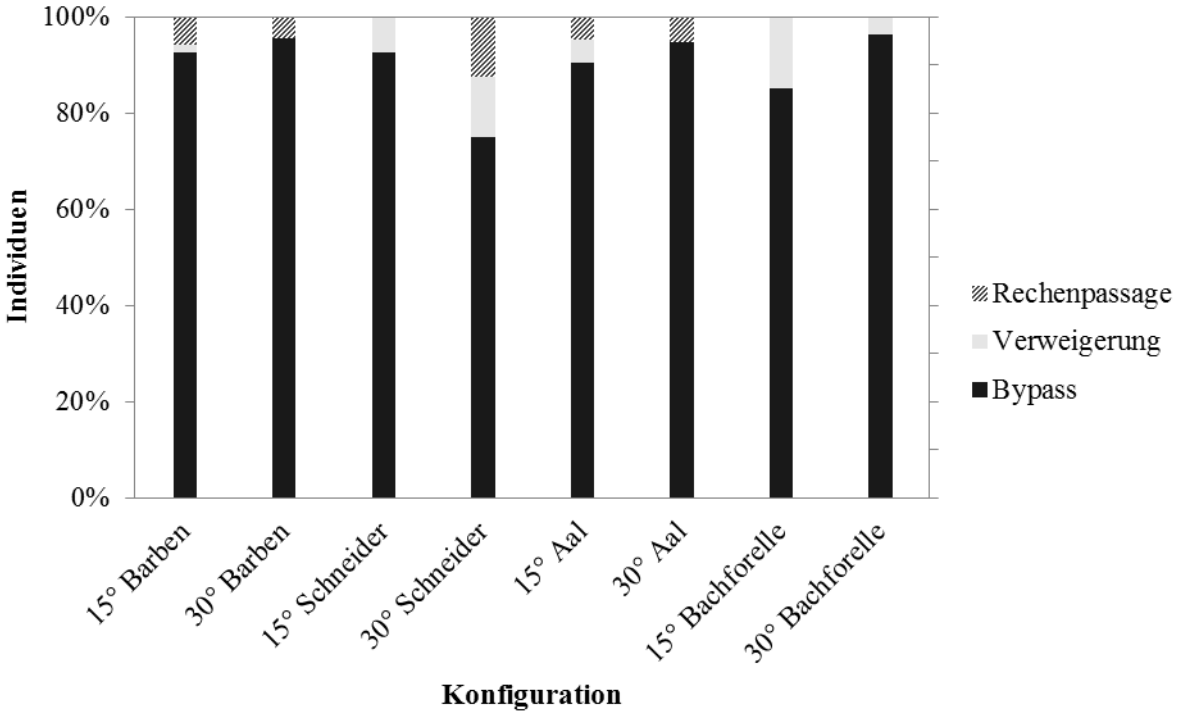
Leitblech



Darstellung aller Versuche mit und ohne Leitblech.
Alle Konfigurationen bei 45° Stabausrichtung, 5 cm Stababstand und 0,6 m/s Fliessgeschwindigkeit. Im linken Block alle Konfigurationen mit 15° Rechenausrichtung, im rechten alle mit 30°. Aal und Bachforelle wurde bei 30° Rechenausrichtung nicht ohne Leitblech getestet.

Bei Barben, Forellen und Äschen sind die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) abhängig von der Installation eines Leitbleches (Barben: $\chi^2 = 18{,}4747$ mit $p = 0{,}0005$, Cramer's V = 0,2387, Effektstärke = schwach; Forellen: $\chi^2 = 10{,}1793$ mit $p = 0{,}0064$, Cramer's V = 0,3635, Effektstärke = mittel; Äschen: $\chi^2 = 15{,}9107$ mit $p = 6{,}64e^{-5}$, Cramer's V = 0,6503, Effektstärke = mittel; signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtums-wahrscheinlichkeit).
Für Schneider und Aale ist für die Testergebnisse kein Zusammenhang zum Einsatz eines Leitbleches ermittelt worden (Schneider: $\chi^2 = 4{,}3407$ mit $p = 0{,}1214$, Cramer's V = 0,1333, Effektstärke = schwach; Aale: $\chi^2 = 14{,}7839$ mit $p = 0{,}1044$, Cramer's V = 0,2777, Effektstärke = schwach; nicht signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).
Für alle Fischarten zusammensind die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) abhängig von der Installation eines Leitbleches (: $\chi^2 = 48{,}1747$ mit $p = 3{,}459e^{-11}$, signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).
Für alle getesteten Fischarten ergaben sich weniger Rechenpassagen und mehr Bypass-Einstiege wenn ein Leitblech installiert wurde. Da alle Fischarten fast immer solnah abwanderten kamen sie nur mit dem Leitblech und nicht mehr mit den Rechenstäben in Kontakt. Nur Aale haben sich auch in höheren Wasserschichten abtreiben lassen und hatten dann oberhalb des Leitbleches mit dem Rechen Kontakt.

Rechenausrichtung



Darstellung ausgewählter Versuche mit 15° und 30° Rechenausrichtung.
Für Barben und Schneider wurden die Konfigurationen 15°/30° 45° 5cm 0,3m/s, 15°/30° 45° 5cm 0,6m/s und zudem nur für Barben 15°/30° 45° 5cm 0,6m/s LB zusammengefasst. Für Aale und Bachforellen sind hier nur die Konfigurationen 15°/30° 45° 5cm 0,6m/s LB gegenübergestellt.

Für Barben und Schneidersind die Testergebnisse (Bypass, Verweigerung, Rechenpassage) abhängig von der Rechenausrichtung (Barben: χ^2 = 8,1814 mit p = 0,01199,Cramer's V = 0,1589, Effektstärke = schwach; Schneider: χ^2 = 7,152 mit p = 0,03398, Cramer's V = 01712, Effektstärke = schwach; signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit).
Für Aale, Forellen und Äschen ist für die Testergebnisse kein Zusammenhang zur Rechenausrichtung ermittelt worden (Aale: χ^2 = 2,0396 mit p = 0,3603, Cramer's V = 0,1813, Effektstärke = schwach; Forellen: χ^2 = 3,4638 mit p = 0,2219, Cramer's V = 0,2120, Effektstärke = schwach; Äschen: χ^2 = - mit p = -, Cramer's V = -, Effektstärke = -; nicht signifikant nach gängiger Konvention, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit). Äschen wurden nur bei 30° Rechenausrichtung untersucht. Für Aale und Forellen sind die Fallzahlen sehr gering.
Die Rechenausrichtung führte für alle Fischarten, ausser Schneider, zu mehr Bypass-Einstiegen. Bei Schneidern führte, im Vergleich dieser Konfigurationen, eine Rechenausrichtung von 30° zu weniger Bypass-Einstiegen.

Diskussion

Die Diskussion bezieht sich ebenfalls auf Experimente, welche in der ersten Phase (Winter 2013) durchgeführt wurden.
Diese Evaluation von Bar Racks und Louvern stellt wertvolle Informationen zur Leistungsfähigkeit dieser Leitstrukturen, Fische in einen Bypass einzuleiten und sie am Passieren eines Rechens zu hindern, zur Verfügung. Wichtige Versuchsparameter, die diese Leistungsfähigkeit beeinflusst haben, waren die Stabausrichtung, der Stababstand, die Verwendung eines Leitbleches, die Fischart und die Fliessgeschwindigkeit. Die statistische Auswertung der Daten unterstützt folgende Aussagen:

- Die Leiteffizienz für Barben und Schneider war höher bei 5 cm Stababstand als bei 11 cm.
- Die Leiteffizient für Barben und Schneider war höher für das Bar Rack (45° Stabausrichtung) als für den Louver (90° Stabausrichtung).
- Bei den Schneidern hatte eine Erhöhung der Fliessgeschwindigkeit eine höhere Verweigerungs-Rate zur Folge. Eine Erhöhung der Fliessgeschwindigkeit stand für Barben in keinem Zusammenhang zum Versuchsergebnis.
- Der Leitrechen hatte auf Schneider eine Scheuchwirkung (Verweigerungs-Rate), die durch eine höhere Fliessgeschwindigkeit und eine Erhöhung der Stabausrichtung von 45° (Bar Rack) auf 90° (Louver) anstieg.
- Die Rechenausrichtung hatte keinen signifikanten Effekt auf das Versuchsergebnis.
- Die Verwendung eines Leitbleches führte zu mehr Bypass-Einstiegen, weniger Verweigerern und weniger Rechenpassagen.
- Die Versuche mit 15° bzw. 30° Rechenausrichtung, 45° Stabausrichtung, 5 cm Stababstand und 0,6 m/s Fliessgeschwindigkeit hatten bei allen weiteren getesteten Fischarten (Bachforellen, Aale, Äschen) eine sehr hohe Leitwirkung. In Kombination mit dem Leitblech lagen die Bypass-Passagen dabei bei allen Fischarten, ausser dem Schneider über 94%. Bei den Scheidern lagen dabei noch 24% Verweigerer, jedoch keine Rechenpassagen vor.
- Eine Stabausrichtung von 0° als Kontrolle hatte auf Schneider eine andere Auswirkung als auf Barben. Schneider wurden mit leicht höherer Effizienz in den Bypass geleitet bzw. an einer Rechenpassage gehindert, als bei einer Ausrichtung von 45°. Bei Barben sank die Leiteffizienz von 100% auf unter 50%.

Rechenausrichtung

Unsere Analyse verschiedener Parameter für Leitstrukturen demonstriert, dass das Bar Rack mit 15° bzw. 30° Rechenausrichtung und mit Leitblech, die besten und vergleichbare Ergebnisse für alle untersuchten Fischarten ergab. Auch andere Untersuchungen konnten hohe Leiteffizienzen für Rechenausrichtungen zwischen 15° und 30° eruieren (Ducharme 1972, Stira & Robinson 1997, Normandeau Associates 1999, Kynard & Horgan 2001). Für eine noch stärker geneigte Rechenausrichtung von 45° hatte Amaral (2001) jedoch eine schlechtere Leiteffizienz gegenüber 15° Rechenausrichtungen festgestellt.
In dieser Untersuchung ist im Vergleich aller Konfigurationen, eine bessere Leitwirkung für 30° Rechenausrichtung ermittelt worden. Die Berechnung der Multivariaten Regression schätzt dabei - für alle Fischarten zusammen - keinen signifikanten Einfluss der Rechenausrichtung auf das Versuchsergebnis. Im Vergleich ausgewählter Konfigurationen ergab sich eine geringere Leitwirkung für Schneider, eine bessere für alle anderen Fischarten, bei 30° Rechenausrichtung. Während aber der Chi-Quadrat-Test nur allgemein die dort verglichenen Konfigurationen analysiert, untersucht das glm alle Variablen gleichzeitig. Deshalb ist trotz der Ergebnisse der Chi-Quadrat-Tests und der Darstellung der Interaktionen davon auszugehen, dass die Rechenausrichtung keinen signifikanten Effekt auf den Bypass-Einstieg hat.
In der Praxis ist bei einem Leitrechen mit 15° Rechenausrichtung mit höheren Kosten beim Bau und mit höheren Verlusten bei der Energiegewinnung zu rechnen als bei einem Leitrechen mit 30° Rechenausrichtung. Da nach diesen Ergebnissen der Leitrechen mit 30° Rechenausrichtung keine schlechtere Leitwirkung erzielte, stellt er innerhalb dieses Versuchsaufbaues die bisher beste Lösung dar.

Stabausrichtung

Während Amaral (2001) keinen Unterschied zwischen Louver und Bar Rack feststellen konnte, war in dieser Untersuchung die Stabausrichtung ein ausschlaggebender Faktor, der zu einer geringerer Leiteffizienz (Louver) führte. Bei Vergleichen von Bar Racks muss jedoch umsichtig vorgegangen werden,

denn ein Bar Rack wie es hier verwendet wurde, ist bisher noch nicht untersucht worden. Meist bezeichnet man einen Louver (45° Rechenausrichtung, 90° Stabausrichtung) welcher mit geringerer Rechenausrichtung eingebaut wird, als Bar Rack. So ergeben sich beispielsweise Stabausrichtungen von 75°. In diesem Versuch waren diese Parameter jedoch unabhängig voneinander veränderbar. Ein Bar Rack, wie in dieser Untersuchung verwendet wurde, mit 30° oder 15° Rechenausrichtung und 45° Stabausrichtung ist völlig neuartig und nicht direkt mit Bar Racks aus anderen Untersuchungen vergleichbar.
Weitere Untersuchungen zur Optimierung der Strömungsverhältnisse vor dem Bypass sollten durchgeführt werden, um den Einstieg in diesen zu erleichtern, die Scheuchwirkung, vor allem auf Schneider, zu reduzieren und somit den Anteil an Verweigerern zu vermindern.

Stababstand

Eine Erhöhung des Stababstandes hatte, sowohl bei Barben, wie auch bei Schneidern, eine geringere Leiteffizienz zur Folge. Andere Untersuchungen haben gezeigt, dass grössere Stababstände, wie die hier untersuchten (bis zu 30cm), für einige Fischarten akzeptabel sein können (Ducharme 1972), nicht jedoch für die hier untersuchten Fischarten.

Kontrolle

Es wurden Kontrollversuche mit 0° Stabausrichtung durchgeführt um zu ermitteln, ob die Umleitung der Strömungsrichtung durch die Stabausrichtung ausschlaggebend war (30° 0° 5cm 0,6m/s). Barben hatten, wenn sie entlang des Rechens abwanderten, sofort Kontakt mit den Rechenstäben und liessen sich schnell hindurch gleiten. Schneider haben sich auch bei dieser Stabausrichtung von den Rechenstäben fern gehalten, dabei wanderten mehr Schneider in den Bypass ein als bei der gleichen Konfiguration mit 45° Stabausrichtung. Für die Schneider schienen die Rechenstäbe eine ausgeprägte Barriere darzustellen. Sie haben jeglichen Kontakt mit Strukturen gemieden, trotz 5 cm Stababstand, der für die Schneider mehr als ausreichend war um hindurch zu schwimmen. Für die Schneider schienen schon geringe Turbulenzen bereits fernhaltende Wirkung zu erzeugen, stärkere Turbulenzen dann bereits ein weiträumiges Meiden dieser Bereiche.
Die Versuche mit den Schneidern legten nahe, dass Strukturen eine Barriere-Wirkung auf sie ausüben, wobei schon leichte Turbulenzen ausgereicht haben, um sie fernzuhalten. Dies könnte auf die Art und Weise zurückzuführen sein, wie Schneider sich im Wasser bewegen. Sie waren ständig aktiv, hatten nie Kontakt zu Strukturen, legten sich nie auf den Boden. Für sie könnte die Enge zwischen zwei Rechenstäben und die dort auftretenden Turbulenzen, selbst bei einer Ausrichtung von 0°, sehr abschreckend gewirkt haben, da sie dort ihre Bewegungsfreiheit verloren hätten. Für Barben, Bachforellen oder Aale scheint der umgekehrte Fall zu stimmen. Sie suchten den Kontakt, legten sich auf den Boden oder lehnten sich gegen die Rechenstäbe und liessen sich von der Strömung dagegen drücken. Dies könnte die Ergebnisse der 0°-Kontrolle erklären. Die Schneider haben sich trotz sehr geringer Turbulenzen von den Rechenstäben fern gehalten. Sie schienen eher noch die gleichmässigere Strömung vor dieser Konfiguration zu bevorzugen. Möglicherweise hat die Umlenkung der Strömung um 45° (Bar Rack) schon zu viele Turbulenzen für die kleinen Schneider erzeugt und direkt vor dem Bypass konnten sie sich diesen Turbulenzen, aufgrund der geringen Breite des Kanales, nicht fernhalten. Ganz anders die Barben.

Fliessgeschwindigkeit

Eine Erhöhung der Fliessgeschwindigkeit führte, im Gegensatz zu den Untersuchungen von Amaral (2001), für Barben nicht zu einer Abnahme der Leiteffizienz. Eine Erhöhung der Fliessgeschwindigkeit auf 0,8 m/s hatte auf Barben einen positiven Effekt (100% Bypass-Einschwimmer). Für Schneider hatte eine Erhöhung der Fliessgeschwindigkeit von 0,3 m/s auf 0,6 m/s eine Erhöhung der Rate an Verweigerern zur Folge.
Das Strömungsverhältnis entlang des Rechens, bis in den Bypass hinein, konnte bei der Konfiguration 15° 45° 5cm 0,8m/s besser eingestellt werden als bei den niedrigeren Geschwindigkeiten. Die Barben reagierten darauf, indem sie schneller Abwanderten, sich mehr von dem Rechen ferngehalten haben und schneller und flüssiger in den Bypass einschwammen. Der Bereich direkt vor dem Bypass schien hier eine sehr grosse Rolle zu spielen. Im Bereich des letzten Drittels des Rechens, vor dem Bypass, erhöhten sich die Strömungs-Geschwindigkeiten enorm. Dies ist die Auswirkung der Verengung vor dem Bypass, durch den geneigten Rechen. Am höchsten wird die Geschwindigkeit ca. 30cm vor dem

Bypass, während sie direkt am Bypass-Anfang dann wieder stark abnimmt Es konnte bei allen Fischarten ein, mehr oder weniger stark ausgeprägtes, Abbremsen direkt vor dem Bypass beobachtet werden. An dieser Stelle fanden dann auch vermehrt Wechsel des Höhenhorizontes statt und die Fische waren an dieser Stelle besonders stark der Querströmung „durch den Rechen hindurch“ ausgesetzt (die an dieser Stelle, der letzten Rechenstäbe, am stärksten ist). Bei 0,8m/s (15° 45° 5cm 0,8m/s) jedoch konnten die Strömungsverhältnisse so eingestellt werden, dass die Strömung konstant entlang des Rechens zunahm, bis in den Bypass hinein. Dies war deutlich daran zu sehen, dass die Barben schnell und ohne Abzubremsen direkt in den Bypass einwanderten.

Leitblech

Direkt vor dem Leitblech, direkt über dem Boden, wurde eine Strömung erzeugt, die entlang des Leitbleches bis direkt in den Bypass führt. Eine geringere seitliche Strömung, gefolgt von vermindertem Abbremsen am Bypass-Einstieg ermöglichte eine deutlich erleichterte, flüssigere Einwanderung in den Bypass. Sehr deutlich war dies bei den Versuchen mit Äschen zu sehen. Die Konfiguration 30° 45° 5cm 0,6m/s wurde hier mit und ohne Leitblech untersucht. Mit Leitblech wanderten die Äschen direkt über dem Boden schnell und flüssig in den Bypass ein. Ohne Leitblech verharrten sie, 45 min lang, bis der Versuch abgebrochen wurde, direkt vor dem Bypass bzw. den letzten Rechenstäben.

Bypass-Design

Das Verhältnis zwischen seitlicher Strömungskomponente und der Strömungskomponente direkt in den Bypass hinein, scheint ein ausschlaggebende Faktor zu sein. Eine Veränderung des Bypasses wurde in diesem Projekt nicht untersucht. Es ist jedoch anzunehmen, dass schon geringe Veränderungen in dem Gesamtaufbau auschlaggebend sind, unabhängig der alleinigen Leitwirkung des Rechens. Ducharme (1972) hat für Smolts (atlantischer Lachs) gezeigt, dass das Verhältnis von Anströmgeschwindigkeit zur Geschwindigkeit im Einlauf des Bypasses ausschlaggebend sein kann. Bei gleicher Louver-Konfiguration wurden erheblich schlechtere Leitwirkungen ermittelt, wenn das genannte Verhältnis nicht optimal eingestellt war. Durch Umbauten am Bypass ist, in seiner Untersuchung, die Leiteffizienz von 57% (1967) auf über 80% (1971) gestiegen.

Aale

Wie in dieser Untersuchung hat auch Amaral (2001) für amerikanische Aale eine sehr hohe Leitwirkung (FGE > 90%) mit Louver und Bar Racks bei 45° und 15° Rechenausrichtung und mit installiertem Leitblech ermittelt. Im Gegensatz dazu wurde in einer Untersuchung von Adams und Schwevers (1997) mit europäischen Aalen, keine Leitwirkung bei 90° und 15° Bar Racks (20 mm Stababstand) und 15° Louvern (10 cm Stababstand) ermittelt. Adams und Schwevers (1997) führen an, dass Aale sich schon ab 0,5 m/s nicht mehr von Leitstrukturen lösen konnte. In dieser Untersuchung konnten sich Aale bei 0,6 m/s Fliessgeschwindigkeit nicht mehr von dem engmaschigen Gitter im Startabteil lösen. Wurde ein Aal mit seinem ganzen Körper gegen das Gitter gepresst war die Angriffsfläche so gross, dass er sich nicht mehr lösen konnte. Kam ein Aal jedoch mit den hier untersuchten Leitrechen in Kontakt war es ihm möglich, sich zu lösen. Dies ist auf den grossen Stababstand zurückzuführen, der es den Aalen ermöglicht, sich von den Stäben zu lösen auch wenn er dagegen gedrückt wird.

Schlussfolgerungen/Ausblick

Beleuchtung

Die Versuche wurden hier alle bei Tag von morgens 8:00 bis abends 17:00 durchgeführt. Dabei wurde, um gleichbleibende Laborbedingungen herzustellen, auf eine gleichmässige und gleichbleibend helle Ausleuchtung des Kanals geachtet.
Es ist anzunehmen, dass sich die Fische bei Dunkelheit oder trübem Wasser anders verhalten könnten (Kemp & Williams 2009, Vowles & Kemp 2012). Der Erfolg des hier eingesetzten Leitbleches hängt stark davon ab auf welcher Wassertiefe die Fische abwandern. Denkbar wäre, dass sich viele Fischarten bei Dunkelheit oder in trübem Wasser weiter oben in der Wassersäule befinden, wodurch der Effekt des Leitbleches vermindert wird. Es ist auch möglich, dass sich die Leiteffizienz des Rechens verändern würde, wenn es dunkler oder das Wasser trüber wäre. Die Fische könnten sich dann

weniger auf die visuelle Wahrnehmung verlassen und müssten sich fast ausschliesslich auf andere Wahrnehmungsformen (hydrodynamische Sensoren) verlassen. Keynard und Horgan (2001) haben festgestellt, dass Störe vermehrten Kontakt zu Rechenstrukturen bei geringerer Lichtintensität hatten.

Anzahl Fische pro Versuch

Der Vorteil unserer Versuchsdurchführung mit 1-3 Fischen war die gute Beobachtbarkeit des Verhaltens jedes einzelnen Fisches und keine Beeinflussung durch Betäubung und Markierung. Testet man mit mehr als 3 Fische, lassen sich einzelne Fische nicht mehr unterscheiden. In den Versuchen mit Schwärmen hat sich gezeigt, dass diese nicht zusammengeblieben sind, sondern dass sich einzelne Fische oder Gruppen abgespaltet haben, in den Bypass einwanderten, aus diesem wieder heraus geschwommen sind und sich wieder der Gruppe angeschlossen haben. Deshalb liessen sich in diesem Versuchsaufbau keine grösseren Fischgruppen auswerten.
Für künftige Untersuchen wird empfohlen, neben Einzelfischen vermehrt Fischschwärme zu verwenden. Für eine sichere Erkennung müssen die Individuen dann allerdings markiert werden (z.B. PIT tagging). Zusätzlich sind für diese Anwendungen entsprechende Veränderungen am Kanal nötig.

Fliessgeschwindigkeit und Tiefen

Weiter Versuche mit Strömungsgeschwindigkeiten von 0,9m/s bis 1,5m/s sind sinnvoll, da derartige Geschwindigkeiten typischerweise auch vor grösseren Kraftwerken auftreten können. Ebenfalls wäre es wünschenswert, mit deutlich höheren Wassertiefen zu arbeiten. Eine grössere Wassertiefe bedingt jedoch eine Abnahme bei den Fliessgeschwindigkeiten.

Versuchszeitraum

Die Aussagekraft der durchgeführten Versuche ist von der Motivation und Aktivität der Probanden abhängig. Die Aktivität von Fischen unterliegt Jahres- und tageszeitlichen Schwankungen. Während Wanderzeiträumen (beispielsweise für die Reproduktion, Nahrungssuche, Aufsuchen von Winterhabitaten) ist eine höhere Aktivität zu erwarten. Bei niedrigen Wassertemperaturen < 5°C ist mit geringerer Aktivität zu rechnen. Künftige Untersuchungen könnten noch gezielter in den Monaten mit erhöhter Wanderungsaktivität durchgeführt werden.

Veränderungen am Versuchsaufbau

Um mehr Fische auf einmal oder Versuche bei schlechter Sicht durchführen zu können, müsste der Versuchsaufbau erweitert werden. Denkbar wäre alle Fische zu markieren (PIT Tags) und den Kanal am Bypass bzw. hinter dem Rechen mit entsprechenden Antennen auszurüsten. Dabei muss eine Betäubung der Fische in Kauf genommen werden.
Eine andere Möglichkeit ist, hinter dem Rechen bzw. dem Bypass eine Fangeinrichtung (Reuse) zu installieren, so dass die Fische nicht wieder aufwärts wandern können, nachdem sie diese Strukturen passiert haben. Dabei ist jedoch zu beachten, dass alle Installationen im Bypass oder hinter dem Rechen die Strömungssituation und das Verhalten des Fisches beeinflussen können.
Für künftige Untersuchungen wird empfohlen, unterschiedliche Bypass Konstruktionen zu evaluieren. Denn durch Änderungen im Design des Bypasses kann die Abwanderung noch deutlich erleichtert und die Leiteffizienz weiter optimiert werden (Ducharme 1972).

Notwendigkeit weiterer Versuche

Es hat sich gezeigt, dass die Versuche mit den Bar Racks zu einer hohen Leiteffizienz für Fische führen können. Allerdings sind vor einem realen Einsatz an einem Kraftwerk noch diverse weitere Schritte nötig. Zum einen betrifft es die technischen Rahmenbedingungen am Kraftwerk selber (Kriewitz in Vorbereitung), sowie die Probleme, dass die Lockströmung von der Trennpfeilerumströmung stark

überlagert wird. Im Weiteren sind Lösungen beim Schwemmholzmanagement zu entwickeln.
Künftige Untersuchungen mit Rechenkonfigurationen mit weiter reduzierten Stabwinkeln sind nicht nur fischbiologisch, sondern ganz speziell aus der Sicht einer verbesserten Kraftwerkanströmung von Interesse. Zudem sind die Strömungsverhältnisse am Bypass äusserst wichtig und weitere Bypass-Konfigurationen sind zu untersuchen.
Die Untersuchungen an den fünf ausgewählten Fischarten sind auf weitere wichtige einheimische Fischarten auszudehnen, so dass sich das Verhalten der einheimischen Fische umfassender beurteilen lässt. Wichtige Grundlagen sind nun bereits erarbeitet und zusätzliche Untersuchungen sollten das Verhalten der Fische bei Nacht einschliessen.
Neben den künftigen Laborstudien ist jedoch daran zu arbeiten, möglichst rasch und in paralleler Weise Erfahrungen mit Bar Racks an einem Pilotkraftwerk zu sammeln.

Referenzen

Adams, N.S. & Schwevers, D.U. 1997. Behavioral surveys of eels (*Anguilla anguilla*) migrating downstream under laboratory conditions. Institute of Applied Ecology, Neustader Weg 25, 36320 Kirtorf-Wahlen, Deutschland.

Amaral, S., Cain, S., Black, J. & McMahon, B. 2001. Evaluation of Angled Bar Racks and Louvers for Guiding Fish at Water Intakes*, EPRI, PaloAlto, and Dominion Millstone Laboratories, Waterford, CT: 2001. 1005193.*

Ducharme, L.J.A. 1972. An application of louver deflectors for guiding Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts from power turbines. Journal of the Fisheries Research Board of Canada **29**: 1397-1404.

Kriewitz, C.R. In Vorbereitung. Leitrechen an Fischabstiegsanalagen. Hydraulik und fischbiologische Effizienz. Dissertation ETH und VAW Zürich.

Kynard, B. & Horgan, M. 2001. Guidance of yearling shortnose and pallid sturgeon using vertical bar rack and louver arrays. *North American Journal of Fisheries Management* **21**: 561-570.

Kemp, P.S. & Williams, J.G. 2009. Illumination influences the ability of migrating juvenile salmonids to pass a submerged experimental weir. Ecology of Freshwater Fish **18**: 297-304.

Normandeau Associates, 1999. Evaluation of Downstream Passage Facilities for Atlantic Salmon (*Salmo salar*) Smolts at the Gardners Falls Hydroelectric Project, Deerfield River, Buckland, Massachusetts. Angefertigt für: Northeast Utilities Service Company. R-18178.000.

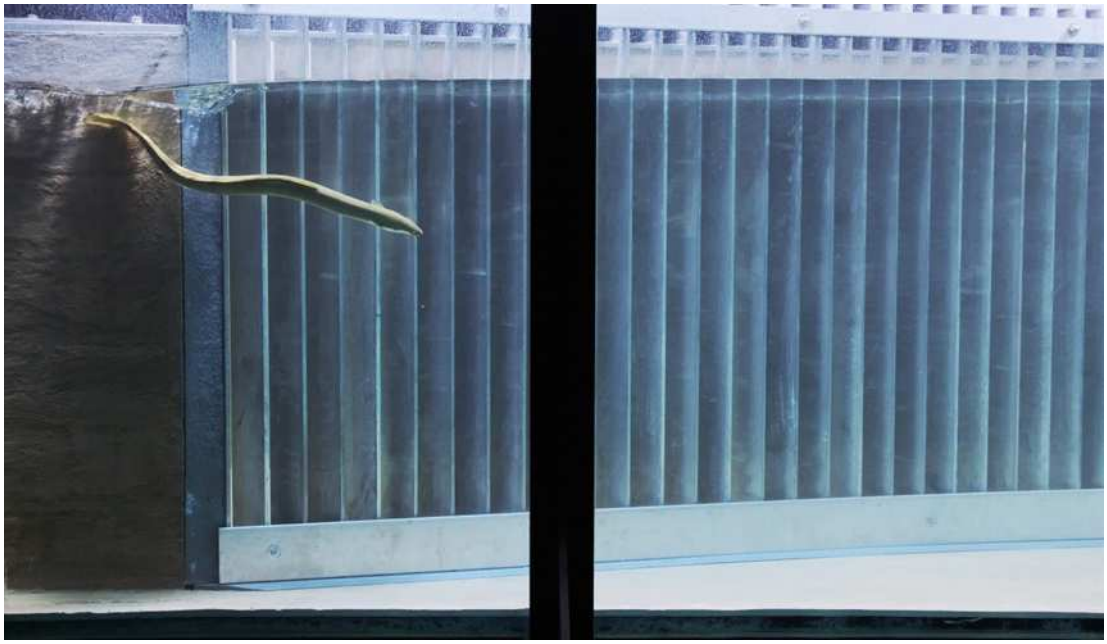
Stira, R.J. & Robinson, D.A. 1997. Effectiveness of a louver bypass system for downstream passage of Atlantic Salmon smolts and juvenile clupeids in the Holyoke Canal, Connecticut River, Holyoke, Massachusetts. Fish Passage Workshop*.* Milwaukee, Wisconsin.

Vowles, A.S. & Kemp, P.S. 2012. Effects of light on the behaviour of brown trout (*Salmo trutta*) encountering accelerating flow: Application to downstream fish passage. Southampton. Ecological Engineering **47:** 247– 253.

Fotos

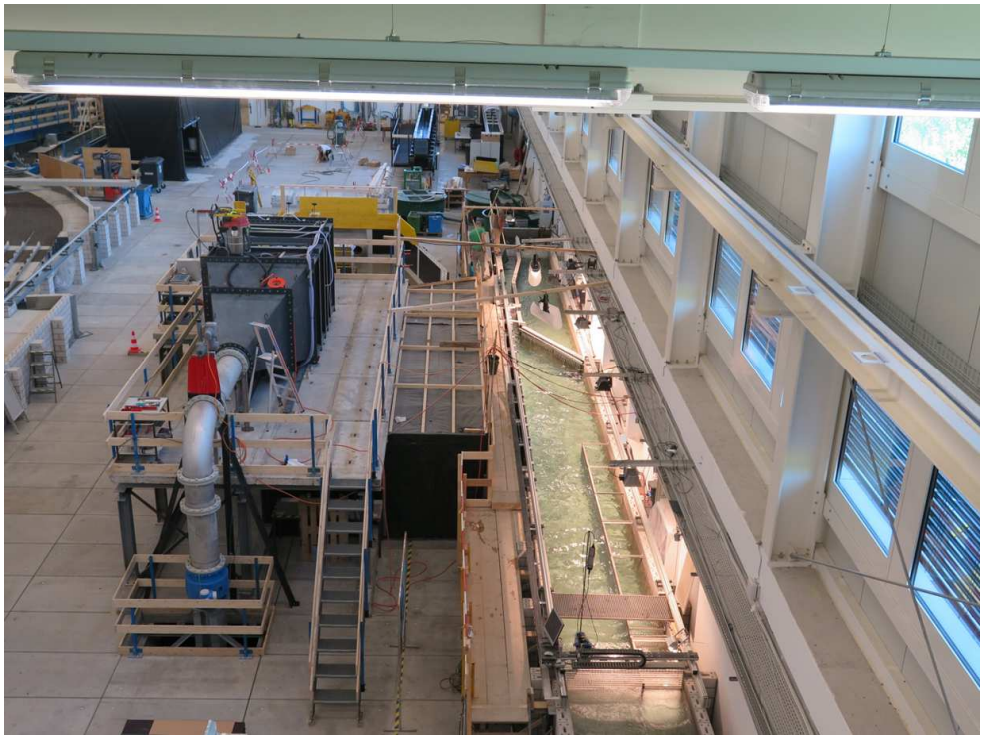
Fische im Strömungskanal vor Leitrechen

Bachforelle



Aal

Barben

Äsche

Strömungskanal