

Fischabstieg mittels Leitrechen – aktueller Forschungsstand

Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen sind in jüngerer Zeit in Mitteleuropa vermehrt im Rahmen der Wiederherstellung der Durchgängigkeit an Fließgewässern in den Fokus gerückt. Mit horizontalen Leitrechen wurden bereits gute Erfahrungen bezüglich der Fischleitung an kleinen bis mittleren Kraftwerken gemacht. Neue Forschungserkenntnisse zu vertikalen Leitrechen mittels ethohydraulischer Modellversuche deuten darauf hin, dass diese eine Alternative zu den horizontalen Leitrechen sein können und das Potenzial haben, auch an grossen Kraftwerksanlagen installiert zu werden. Der Artikel stellt die wichtigsten Erkenntnisse des aktuellen Standes der Forschung an der VAW und Eawag vor.
von Robert M. Boes, Ismail Albayrak, Carl Robert Kriewitz und Armin Peter



Zur Wiederherstellung der Durchgängigkeit von Wasserkraftwerken für die Fischfauna spielen der Schutz und die Leitung abwandernder Fische eine wesentliche Rolle (Ebel et al. 2015). Vor diesem Hintergrund beauftragte der Verband Aare Rheinwerke (VAR) die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit der Eawag mit einem Forschungsprojekt zur Entwicklung von Fischschutzsystemen für den Einsatz an grossen Mittellandflüssen (Kriewitz et al. 2013). Eine breit angelegte Analyse des *state-of-the-art* ergab, dass vertikale Leitrechen (engl. *louver* oder *bar racks*) einen vielversprechenden Massnahmentyp zum Schutz der Fischfauna an grossen Wasserkraftanlagen mit Ausbaublüssen $Q_d > 80 \text{ m}^3/\text{s}$ darstellen (Kriewitz et al. 2012, 2013). Diese werden insbesondere in Nordamerika eingesetzt und ermöglichen es, ein breites Spektrum abwärts wandernder Zielarten in das Unterwasser zu leiten. Al-

lerdings bewirken sie markante Energieerzeugungsverluste und es existierten bislang keine gesicherten Erkenntnisse zur Verhältnismässigkeit der Investitionskosten und zum Verhalten bei erhöhtem Geschiebe-, Schwemmholz- und Eisaufkommen. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden deshalb mittels physikalischer Modelle Leitrechensysteme weiterentwickelt und optimiert. Die Erkenntnisse aus dem kürzlich abgeschlossenen Forschungsprojekt (Kriewitz 2015) sowie einer weiteren jüngeren Studie (Goll & Koch 2015) zu den neu entwickelten, modifizierten vertikalen Leitrechen (engl. *modified bar racks*), die über hydraulisch und fischbiologisch verbesserte Eigenschaften verfügen, werden hier vorgestellt.

Leitrechen zum Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen

Leitrechen stellen einen Massnahmentyp zum Abschirmen und Umleiten von Fischen aus den Gefahrenbereichen von Wasserkraftanlagen dar. Sie zählen zu den mechanischen Verhaltensbarrieren, die die Abstossungs- und Fluchtreaktion von Fischen ausnutzen, physisch aber – zumindest für einen Teil der Fischfauna – durchgängig sind (EPRI & Dominion Millstone Laboratories 2001; Dumont 2011; Ebel 2013). Die Anordnung alternativer Abwanderungskorridore, wie etwa Bypässe oder geöffnete Wehrfelder, ist ergänzend zum Leitrechen zwingend erforderlich.

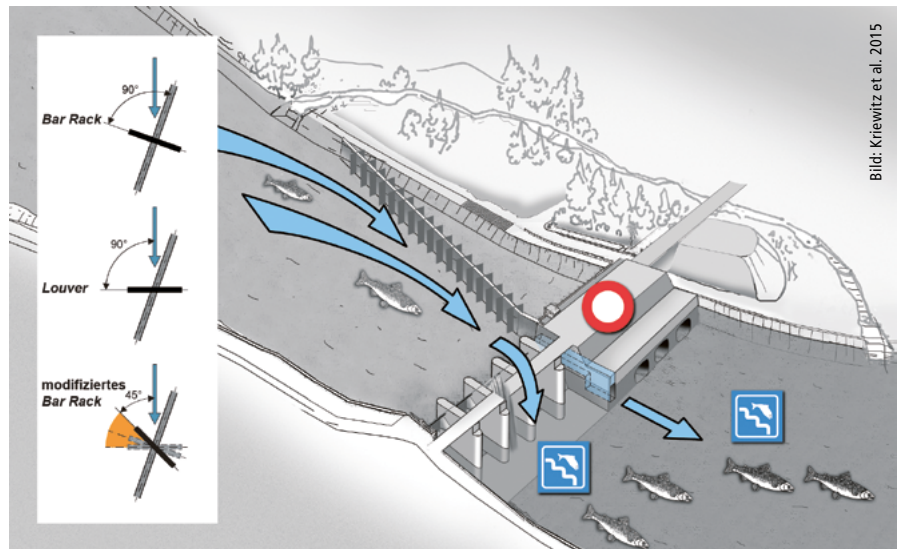
Derzeit stellen *horizontale* Leitrechen für Wasserkraftanlagen mit $Q_d < 90 \text{ m}^3/\text{s}$ den Stand der Technik des Fischschutzes und Fischabstieges dar (Ebel et al. 2015). Diese wirken infolge ihrer geringen lichten Stabweiten von in der Regel $b = 10$ bis 20 Mil-

limeter für die meisten Fische als physisch undurchlässige Barrieren. Bei starkem Geschwemmsel- und Laubaufkommen, die an Flüssen des voralpinen und alpinen Raums vor allem bei Hochwassern und im Herbst regelmässig auftreten, bestehen jedoch Zweifel bezüglich der dann unvermeidlichen, deutlich zunehmenden Rechenverlegungen, welche zu verstärkten hydraulischen Rechen- und folglich auch Produktionsverlusten führen können.

Vertikale Leitrechen in Form von *modified bar racks* mit lichten Stabweiten $b \geq 50$ Millimeter weisen deutlich geringere Rechenverlegungsgrade auf und stellen daher auch für kleinere und mittlere Kraftwerke mit $Q_d < 100 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Alternative zu horizontalen Leitrechensystemen dar. In einer systematischen Untersuchung von Fischabstiegsvarianten für ein geplantes Limmatkraftwerk mit $Q_d = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ wurden horizontale und vertikale Leitrechen in Bezug auf ihre konstruktive Bemessung, Errichtungskosten, Energie-Erzeugungsverluste des Kraftwerks (inkl. Berücksichtigung der Bypass-Dotierung) und Fischleiteffizienz verglichen (Goll & Koch 2015). Trotz der geringeren Fischleiteffizienz von *modified bar racks* scheinen diese auch für Kraftwerke, an denen horizontale Rechen mit kleineren Stabweiten einsetzbar sind, durchaus interessant. Dies insbesondere wegen der zu erwartenden kleineren Rechenverlegungen und geringeren hydraulischen Rechenverluste.

Modifizierte vertikale Leitrechen als mechanische Verhaltensbarriere

Die schräge Orientierung von Rechenachse und Rechenstäben zur Anströmung (vgl. Abb. 1) ist die Grundlage der fishbiologischen Wirksamkeit von vertikalen Leitrechen. Diese Anordnung verursacht zum einen Störungen des Abflusses, die von Fischen gemieden werden, und pro-

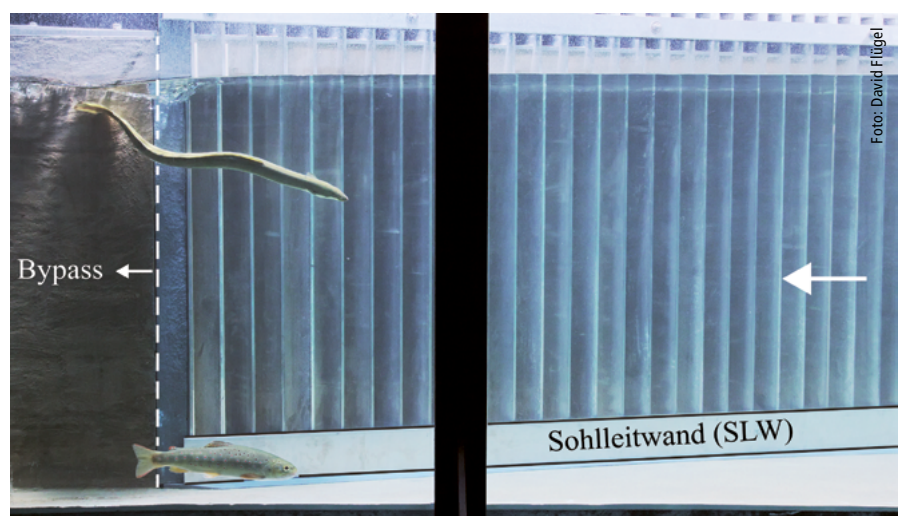


▲ Abbildung 1: Projektidee mit Einsatz vertikaler Leitrechen und Detailansicht von louver-, bar rack- und modified bar rack-Systemen (Kriewitz et al. 2015).

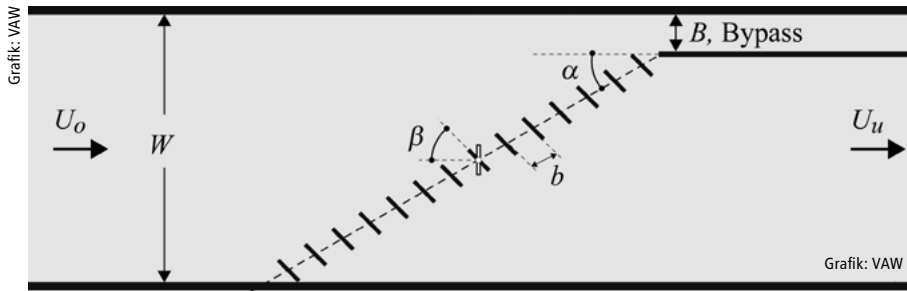
duziert zum anderen eine rechenparallele Leitströmung, die zur aktiven Verdriftung der Fische in einen Bypass führen soll. Bisher unterscheidet man zwei vertikale Leitrechensysteme. *Louver* sind durch die orthogonale Ausrichtung der Rechenstäbe zur Anströmung charakterisiert, während bei *bar racks* der Winkel zwischen Rechenachse und Stab mit 90° vorgegeben ist. Frühere experimentelle Untersuchungen zeigten, dass die Fischleiteffizienz der Systeme zunimmt, wenn spitze Einbauwinkel zwischen Rechenachse und Ufer

verwendet werden (Amaral 2003; Amaral et al. 2003). Dann besitzen beide Leitrechensysteme aber ähnlich ungünstige hydraulische Eigenschaften, da bei *bar racks* die Schrägstellung der Rechenstäbe mit spitzem Rechenwinkel zunimmt.

Die VAW-Forschungsidee (Kriewitz 2015) basierte darauf, durch die unabhängige Variation von Rechen- und Stabausrichtung Leitrechen so weiterzuentwickeln, dass ihr Einsatz an grossen Wasserkraftwerken wegen verbesserter hydraulischer



▲ Abbildung 2: Ethohydraulisches Modell eines *modified bar racks* mit Sohlleitwand, Bypasseingang (links) sowie Aal und Bachforelle; Fließrichtung von rechts nach links.



▲ Abbildung 3: Geometrische und hydraulische Parameter vertikaler Leitreechen-Bypass-Systeme, hier ein *modified bar rack*.

Eigenschaften zu optimalen Ergebnissen führt und dabei zugleich die stromabwärts migrierenden Fische über Bypässe in das Unterwasser geführt werden. Solche *modified bar rack*-Systeme besitzen stets eine geringere Ausrichtung der Rechenstäbe zur Hauptströmungsrichtung als die beiden klassischen Varianten (vgl. Abb. 1).

Fischleiteffizienz von *modified bar racks*

Zur Bestimmung der Fischleiteffizienz vertikaler Leitreechen wurden im VAW-Labor

Untersuchungen mit Lebendfischen – Barbe, Schneider, Äsche, Aal und Bachforelle – an einem ethohydraulischen Modell durchgeführt (vgl. Abb. 2). Die Ethohydraulik widmet sich der Untersuchung der aquatischen Fauna im Wechselspiel mit wasserbaulichen Anlagen unter Laborbedingungen. Dabei werden parallel Aspekte der Ethologie (Verhaltensforschung) und der Hydraulik (Strömungslehre) analysiert (Adam & Lehmann 2011, Adam & Appelhoff 2015). Ziel ethohydraulischer Forschung ist die Untersuchung der Reaktionen etwa von Fischen auf wasserbauliche Anlagen und die durch sie erzeugten hydraulischen Situationen unter definierten Laborbedingungen. Die Fischleiteffizienz wurde in den VAW-Versuchen als das prozentuale Auffinden des Bypasses durch die jeweils untersuchte Fischart definiert (Flügel et al. 2015, Kriewitz 2015). Die Videodokumentation «Downstream» zu den Versuchen am ethohydraulischen Modell ist unter www.youtube.com/watch?v=Y8WSRQWA8DY verfügbar.

Für die meisten getesteten Fischarten konnten trotz der stark unterschiedlichen Verhaltensmuster Rechenkonfigurationen identifiziert werden, die eine hohe bis sehr hohe Fischleiteffizienz hervorrufen. Es sind dies *modified bar racks* mit Rechenwinkeln von $\alpha = 15^\circ$ und 30° sowie Stabwinkeln von $\beta = 45^\circ$ und einem lichten Stababstand von $b = 50$ Millimeter. Es wurden jeweils scharfkantige rechteckförmige Rechenprofile mit Stabdicken von 10 Millimetern verwendet (vgl. Abb. 3). Diese *modified bar*

racks erreichten die höchsten Fischleiteffizienzen für alle getesteten Arten. Zwischen 72 und 100 Prozent der Versuchsfische konnten mit Ausnahme der Äschen bei diesen Konfigurationen in den Bypass gelenkt werden. Die Anordnung einer Sohlleitwand führte, analog zu den Erfahrungen an horizontalen Leitreechen (Ebel 2013), zu einer weiteren Steigerung der Fischleiteffizienz auf Werte zwischen 76 und 100 Prozent für alle getesteten Arten. Die vier erfolgreichsten Leitreechenkonfigurationen K1 bis K4 waren:

- K1: $\alpha = 15^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $b = 50$ mm, mittlere Anströmgeschwindigkeit $U_o = 0.6$ m/s, ohne Sohlleitwand; Testfischarten: Aal, Bachforelle, Barbe, Schneider
- K2: $\alpha = 15^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $b = 50$ mm, $U_o = 0.6$ m/s, mit Sohlleitwand, Testfischarten: Aal, Bachforelle, Barbe
- K3: $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $b = 50$ mm, $U_o = 0.6$ m/s, ohne Sohlleitwand, Testfischarten: Äsche, Barbe, Schneider
- K4: $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $b = 50$ mm, $U_o = 0.6$ m/s, mit Sohlleitwand, Testfischarten: Aal, Äsche, Bachforelle, Barbe, Schneider

In *Abbildung 4* werden die über alle untersuchten Fischarten gemittelten sowie die minimale und maximale Fischleiteffizienz dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die artübergreifende Fischleiteffizienz deutlich vom Einsatz einer Sohlleitwand beeinflusst wird. Sowohl bei $\alpha = 15^\circ$ als auch $\alpha = 30^\circ$ werden damit mittlere Fischleiteffizienzen von mindestens 90 Prozent erreicht (Konfigurationen K2 und K4). Die minimale Fischleiteffizienz beträgt immer noch rund 75–80 Prozent. Der Vergleich der Fischleiteffizienzen der beiden Rechenwinkel bei K2 und K4 zeigt aber keine signifikanten Unterschiede. Für Leitreechen ohne Sohlleitwand wie bei K1 und K3 wird hingegen ein deutlicher Vorteil der Konfiguration K1 mit $\alpha = 15^\circ$ sugge-

Prof. Dr. Robert M. Boes,
Dr. Ismail Albayrak

Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie (VAW)
ETH Zürich, 8093 Zürich
boes@vaw.baug.ethz.ch
albayrak@vaw.baug.ethz.ch

Dr. Carl Robert Kriewitz
BKW Energie AG, Engineering
Hydro & Infrastructure
Viktoriaplatz 2, 3013 Bern
(ehemals VAW)
robert.kriewitz@bkw.ch

Dr. Armin Peter
Peter FishConsulting
Aarauerstr. 55, 4600 Olten
(ehemals Eawag, Fischökologie und
Evolution, Kastanienbaum)
apeter@fishconsulting.ch
armin.peter@eawag.ch

riert. Hintergrund für dieses Ergebnis ist allerdings das stark differenzierte Verhalten der Äschen, die ausschliesslich an *modified bar racks* mit $\alpha = 30^\circ$ getestet wurden (K3 und K4). Hier verweigerten 65 Prozent der Individuen bei der Konfiguration K3 ohne Sohllleitwand den Einstieg in den Bypass. Anders als bei der Kleinfischart Schneider ist dieses Verhalten nicht auf die Überschreitung ihrer Sprintgeschwindigkeiten zurückzuführen. Vielmehr mieden Äschen den Bypass-Einlauf selbst, in welchem es zum Einbruch der Fließgeschwindigkeit kam. Diese Bedingungen wurden mit Sohllleitwand (K4) deutlich verbessert und resultierten in einer stark erhöhten Fischleiteffizienz – 96 Prozent der Individuen schwammen in den Bypass ein. Es ist davon auszugehen, dass auch die Fischleiteffizienz der *modified bar racks* mit $\alpha = 15^\circ$ (K1) analog beeinflusst würde und es somit zu einer Egalisierung der Fischleiteffizienz von K1 und K3 käme. Ferner ist von grosser Bedeutung, dass bei optimierter Ausführung der Bypass-Einlaufbedingungen, welche im vorliegenden Projekt nicht variiert wurden, die Akzeptanz der Äschen auch ohne den Einsatz einer Sohllleitwand gesteigert werden kann (Kriewitz 2015).

Zusammenfassend hat sich die Konfiguration K2 sowohl aus Sicht der Energiever-

luste (siehe Kriewitz et al. 2015) als auch der Fischleiteffizienz als vorteilhaft herausgestellt. Unter Berücksichtigung des deutlich kürzeren und damit kostengünstigeren Leitreechenbauwerks bei einem stumpferen Rechenwinkel von $\alpha = 30^\circ$ sollte aber auch die Konfiguration K4 bei Variantenuntersuchungen in die engere Wahl einbezogen werden.

Ausblick

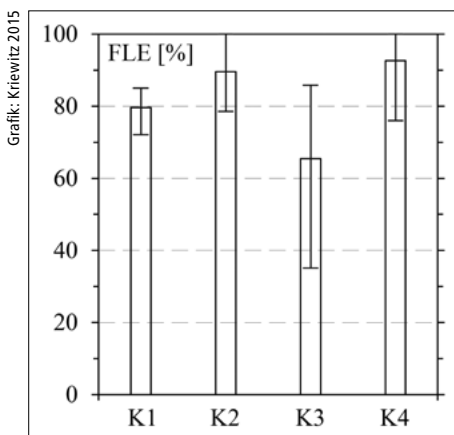
Zur Optimierung des Gesamtsystems Leitreechen-Bypass sollten weitere Grundlagerversuche unter kontrollierten Laborbedingungen vor allem zur Bypass-Gestaltung, aber auch zur Optimierung der Fischleiteffizienz, der hydraulischen Verluste und nicht zuletzt der Geschwemmseleproblematik durchgeführt werden. Erst ein fischbiologisch funktionierender Bypass ohne zu grosse Geschwindigkeitsgradienten ermöglicht es den bis dorthin geleiteten Fischen, erfolgreich ins Unterwasser abzusteigen. Zudem wird eine neuerliche Zusammenarbeit von VAR, VAW und den Bundesämtern für Umwelt (Bafu) und für Energie (BFE) angestrebt, um möglichst bald Versuche unter realen Bedingungen an einer Pilotanlage durchzuführen.

Danksagung

Unser besonderer Dank gilt dem VAR, swisselectric research, Bafu und BFE für die finanzielle Unterstützung. Das Forschungsprojekt wurde eng begleitet durch die Unterkommission Fischabstieg mit Vertretern der VAR-Mitgliederwerke sowie durch eine Begleitgruppe mit Vertretern von Behörden und Verbänden, jeweils unter der Leitung von Jochen Ulrich, Energiedienst AG. Die stets konstruktive und offene Zusammenarbeit mit diesen wird ebenfalls herzlich verdankt. Der Beitrag der Studenten Stephan Golz und Christof Koch im Rahmen ihrer Projektarbeit sei zudem dankend erwähnt. ♠

Literatur

↳ www.aquaviva.ch/wissen/zeitschrift



▲ Abbildung 4: Durchschnittliche, minimale und maximale artübergreifende Fischleiteffizienz für die Leitreechenkonfigurationen K1 bis K4.



Robert Boes

Prof. Dr., ist Professor für Wasserbau an der ETH Zürich und Direktor der dortigen Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW). Er ist Vorstandsmitglied des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbands sowie des Schweizerischen Talsperrenkomitees.



Ismail Albayrak

Dr., promovierte auf dem Gebiet der Umwelt-Hydraulik an der EPF Lausanne. Er arbeitet seit 2011 als Wissenschaftler und Dozent an der VAW, wo er in diverse wissenschaftliche und praxisbezogene Wasserkraft- und Wasserbauprojekte involviert ist.



Carl Robert Kriewitz

Dr., ist Bauingenieur und war als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der VAW tätig, unter anderem zur Untersuchung und Weiterentwicklung der technischen Fischschutzmassnahmen. Seit April 2015 begleitet er bei der BKW Energie AG die Sanierung von Wasserkraftanlagen nach Gewässerschutzgesetz.



Armin Peter

Dr., ist Biologe und Fischökologe. Er forschte an der Eawag auf dem Gebiet der Fischökologie und unterrichtete an der ETH Zürich gewässer- und fischökologische Themen. Er ist Inhaber des Büros Peter FishConsulting.

Literatur

- Adam, B. & Appelhoff, D. (2015): Ethohydraulik – Die Kunst aufsteigende Fische am Kraftwerk abzuholen. *Wasser-Wirtschaft* 105(7/8): 33–38.
- Adam, B. & Lehmann, B. (2011): Ethohydraulik – Grundlagen, Methoden und Erkenntnisse. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Deutschland.
- Amaral, S. V. (2003): The use of angled bar racks and louvers for guiding fish at FERC-licensed projects. FERC Fish Passage Workshop, Holden, USA.
- Amaral, S. V., Winchell, F. C., McMahon, B. J. & Dixon, D. (2003): Evaluation of angled bar racks and louvers for guiding silver phase American eels. *American Fisheries Society, Symposium* 33: 367–376.
- Dumont, U. (2011): Wasserkraft, Fischschutz und Fischabstieg. Ökologische Durchlässigkeit in Fließgewässern, Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (LUGV), Lebus, Deutschland.
- Ebel, G., Gluch, A. & Kehl, M. (2015): Einsatz des Leitrechen-Bypass-Systems nach Ebel, Gluch & Kehl an Wasserkraftanlagen – Grundlagen, Erfahrungen und Perspektiven. *WasserWirtschaft* 105(7/8): 44–50.
- Ebel, G. (2013): Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, Halle (Saale), Deutschland.
- EPRI & Dominion Millstone Laboratories (2001): Evaluation of angled bar racks and louvers for guiding fish at water intakes. Palo Alto, CA and Waterford, CT, USA. Report 1005193: 106 S.
- Flügel, D., Bös, T. & Peter, A. (2015): Untersuchungen zum Fischabstieg entlang eines vertikalen, schräg ausgerichteten Fischleitrechens an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken - Ethohydraulische Untersuchungen in einem Versuchsgerinne, Eawag, Kastanienbaum, Schweiz, www.swv.ch/Portrait/Verbandsgruppen/Aare-Rheinwerke/Projekt-Fischabstieg.
- Goll, S. & Koch, C. (2015): Hydraulisch-konstruktive Bemessung von Fischleitrechen an grossen Wasserkraftwerken. Projektarbeit, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich: unveröffentlicht.
- Kriewitz, C. R. (2015): Leitrechen an Fischabstiegsanlagen - Hydraulik und fischbiologische Effizienz, VAW-Mitteilung 230 (R. Boes, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, www.swv.ch/Portrait/Verbandsgruppen/Aare-Rheinwerke/Projekt-Fischabstieg.
- Kriewitz, C. R., Albayrak, I. & Boes, R. M. (2015): Forschungsprojekt «Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken», *Wasser, Energie, Luft* 107(1): 17–28, www.swv.ch/Portrait/Verbandsgruppen/Aare-Rheinwerke/Projekt-Fischabstieg.
- Kriewitz, C. R., Albayrak, I. & Boes, R. M. (2013): Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs, *aqua viva* 55(5): 17–21.
- Kriewitz, C. R., Albayrak, I. & Boes, R. M. (2012): Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken – Zwischenbericht zum Literatur- und Massnahmenstudium, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, www.swv.ch/Portrait/Verbandsgruppen/Aare-Rheinwerke/Projekt-Fischabstieg.
- Meusburger, H. (2002): Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken, VAW-Mitteilung 179 (H.-E. Minor, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.