

# Methodenvorschlag für die Bewertung der Fischgängigkeit an nicht kraftwerksbedingten Hindernissen in Bachforellengewässern

Andres Hagmayer, Lukas Boller

## Zusammenfassung

Das revidierte Gewässerschutzgesetz verlangt Hindernisse, welche die Fischgängigkeit in Schweizer Fliessgewässern wesentlich beeinträchtigen, zu sanieren. Deren Funktionalität soll anschliessend mit Wirkungskontrollen überprüft werden. Dazu haben sich Markierungsmethoden (z. B. mit Passive Integrated Transponder, PIT-Tags) als geeignetes Instrument bewährt. Obwohl solche Methoden immer häufiger bei Wirkungskontrollen zur Anwendung kommen, fehlen vielfach und insbesondere für nicht kraftwerksbedingte Hindernisse noch Standards für die Analyse und Bewertung der Daten. Hierzu wird ein Bewertungsvorschlag präsentiert und aufgezeigt, wie die Fischgängigkeit von Hindernissen in Abhängigkeit der Körperlänge berechnet und die Wirksamkeit von Sanierungsmassnahmen qualitativ beurteilt werden kann. Die Bewertungsmethodik berücksichtigt dabei die grössenabhängige Wiederdetektionsrate und lässt somit spezifische Aussagen für verschiedene Grössenklassen von Bachforellen zu. Einerseits können dadurch Grössenselektivitäten von Sanierungsmassnahmen erkannt und verschiedene Sanierungstypen miteinander verglichen werden. Andererseits können Grenzwerte für die Bachforelle bezüglich Absturzhöhen von Hindernissen, die für die Sicherstellung der Längsvernetzung erforderlich sind, abgeleitet werden. Für die Wiederherstellung der Fischgängigkeit im Rahmen der Revitalisierungsplanung bildet die vorliegende Bewertungsmethodik ein Hilfsmittel, um spezifische Sanierungsziele erreichen zu können.

## Résumé

La loi révisée sur la protection des eaux exige l'assainissement des obstacles qui entravent considérablement la migration des poissons dans les cours d'eau suisses. Leur fonctionnalité doit ensuite être vérifiée par des contrôles d'efficacité. À cet effet, les méthodes de marquage (par ex. avec Passive Integrated Transponder, PIT-Tags) se sont révélées être un instrument approprié. Bien que de telles méthodes soient de plus en plus souvent utilisées pour les contrôles d'efficacité, il manque encore des normes pour l'analyse et l'évaluation des données, notamment pour les obstacles non liés aux centrales. À cette fin, une proposition d'évaluation est présentée et montre comment le passage des obstacles par les poissons peut être calculé en fonction de la longueur du corps et comment évaluer qualitativement l'efficacité des mesures d'assainissement. La méthode d'évaluation tient compte du taux de détection dépendant de la taille et permet ainsi de tirer des conclusions spécifiques pour différentes classes de taille pour les truites de rivière. D'une part, cela permet d'identifier la sélectivité en termes de taille des mesures d'assainissement et de comparer différents types d'assainissement entre eux. D'autre part, il est possible de déduire des valeurs limites pour la truite de rivière concernant les hauteurs de chute des obstacles nécessaires afin d'assurer la connectivité longitudinale. Pour le rétablissement de la continuité piscicole dans le cadre de la planification de la revitalisation, la présente méthode d'évaluation constitue un outil permettant d'atteindre des objectifs d'assainissement spécifiques.

## 1. Einleitung

Das revidierte Gewässerschutzgesetz verlangt, die Fischgängigkeit in den Schweizer Fliessgewässern wiederherzustellen. Hindernisse, die diese wesentlich beeinträchtigen, müssen saniert und die Funktionalität solcher Massnahmen schliesslich mit Wirkungskontrollen geprüft werden. Bei wasserkraftbedingten Hindernissen wurde eine gesetzliche Sanierungsfrist bis 2030 gesetzt. Entsprechend wurden an Wasserkraftanlagen in den letzten Jahren viele Fischaufstiegs- und Fischabstiegsanlagen geplant und einige bereits umgesetzt. Auch Kontrollen zur Wirkung dieser Anlagen wurden schon durchgeführt. Hierzu dient ein Handbuch, welches einheitliche Standards für anzuwendende Methoden hinsichtlich der Wir-

kungskontrollen von Fischwanderhilfen in der Schweiz aufzeigt [1]. Obwohl solche Methoden immer häufiger bei Wirkungskontrollen zur Anwendung kommen, fehlen vielfach noch Standards für die Analyse und Bewertung der gesammelten Daten.

Insbesondere individuelle Markierungsmethoden (z. B. Telemetrie oder PIT-Tagging) generieren hochinformativ Daten hinsichtlich Bewegungs- und Aktivitätsmuster von Fischen. Solche Informationen erlauben es, längenspezifische Auf- und Abstiegswahrscheinlichkeiten zu berechnen, Grössenselektivitäten der Sanierungsmassnahmen zu erkennen sowie die Fischgängigkeit von Hindernissen ganzheitlich zu bewerten. Zwar werden derzeit vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) und der Wasseragenda 21 Auswertungsstandards entwickelt (z. B. für Zählbecken und

Reusen [2] oder PIT-Tagging [3]); diese beschränken sich aber derzeit auf Fischaufstiegshilfen bei Wasserkraftanlagen. Für die Überprüfung von (Revitalisierungs-)Massnahmen zur Wiederherstellung der Fischgängigkeit an nicht kraftwerksbedingten Hindernissen (z. B. Rampen, Schwellen usw.) fehlen solche Bewertungsmassstäbe weiterhin.

Im vorliegenden Beitrag wird ein Bewertungsvorschlag präsentiert und aufgezeigt, wie die Fischgängigkeit von Hindernissen in Abhängigkeit der Körperlänge berechnet und die Wirksamkeit von Sanierungsmassnahmen qualitativ beurteilt werden kann. Für deren Herleitung wurden PIT-Tag- und Fang-Wiederfang-Daten von Bachforellen bei unterschiedlichen Massnahmen-typen zur Wiederherstellung bzw. der Verbesserung der Fischgängigkeit an nicht

kraftwerksbedingten Hindernissen (Raugrinne mit Beckenstruktur, Blockrampe, Blockschwellen, diverse Schwellen und Abstürze) genutzt. Die Bewertungsmethodik berücksichtigt dabei die alters- bzw. grössenabhängige Wiederdetektionsrate und lässt somit spezifische Aussagen für verschiedene Grössenklassen von Bachforellen zu.

Im Hinblick auf rund 100 000 Hindernisse in der Schweiz [4], welche Fliessgewässer vorwiegend in der Forellenregion fragmentieren, ist die Beurteilung der Fischgängigkeit für Bachforellen von grosser Bedeutung. Verstärkt wird dies noch durch die Tatsache, dass Bachforellen in sehr vielen Fliessgewässern der Schweiz vorkommen [5]. Die längenspezifische Differenzierung erlaubt es, unterschiedliche Sanierungsziele zu erreichen bzw. überprüfen zu können. Besteht beispielsweise das Sanierungsziel in der Wiederherstellung der genetischen Längsvernetzung, muss insbesondere die Fischgängigkeit für geschlechtsreife Individuen gewährleistet sein. Da Sanierungsmassnahmen wie z. B. Schwellenumbauten häufig mit dem Verlust von grossen, tiefen Kolken in reinen Bachforellengewässern einhergehen, kann es ökologisch sinnvoll sein, in erster Linie die Fischgängigkeit für grössere Individuen sicherzustellen und gleichzeitig den Kolk als wichtiges Habitat zu erhalten. Hingegen steht die Fischgängigkeit für alle Grössenklassen im Vordergrund, wenn Nahrungshabitate, Wintereinstände oder wichtige Rückzugsräume erschlossen werden sollen. Gerade die Sicherstellung von kühleren Rückzugsmöglichkeiten gewinnt im Hinblick auf den fortschreitenden Klimawandel mit Niedrigwasser und Gewässererwärmung zusehends an Bedeutung (z. B. [6]).

## 2. Methodik

### 2.1 Translokationsexperimente

Um die Wirksamkeit von Sanierungsmassnahmen zu überprüfen, haben sich Trans-

lokationsexperimente in der Schweiz und weltweit als geeignetes Instrument bewährt (z. B. [7–10]). Dabei wird idealerweise oberhalb einer Sanierungsmassnahme eine Befischung durchgeführt. Im Anschluss an die Befischung werden die Fische entweder individuell (z. B. mit PIT-Tags) oder kollektiv (z. B. mit VIE-Tags) markiert (siehe Box) und im Unterwasser wieder ausgesetzt.

Werden Fische aktiv von ihrem bevorzugten Standort entfernt, haben sie die Tendenz, an ihren ursprünglichen Standort zurückzukehren. Ein solches Verhalten wird Mikrohoming genannt [11, 12]. Insbesondere adulte Bachforellen zeigen eine ausgeprägte Standorttreue. Nach einer Verdriftung (z. B. durch Hochwasser) werden Kompensationswanderungen durchgeführt, um an den ursprünglichen Standort zurückzukehren. Dieses Verhalten macht man sich für biologische Wirkungskontrollen zunutze, indem man Fische flussabwärts versetzt unter der Annahme, dass diese dadurch motiviert werden, in den gewohnten Gewässerbereich flussaufwärts zurückzukehren.

Erfolgreich über die Sanierungsmassnahme aufgestiegene Fische können entweder automatisch mit einem permanenten Antennendetektionssystem (z. B. bei Monitorings mit PIT-Tags) oder während erneuten Elektrobefischungen (z. B. bei Fang-Wiederfängen mit VIE-Tags) wiederdetektiert werden.

### 2.2 Berechnung der Fischgängigkeit

Für die Berechnung der Fischgängigkeit wird die Anzahl erfolgreich aufgestiegener Fische in Relation zur Anzahl markierter und translozierter Fische gesetzt. Mit anderen Worten, die Fischgängigkeit (Aufstiegsrate) variiert auf einer Skala von 0 (nicht fischgänglich) bis 1 (hindernisfrei).

Die Berechnung erfolgt entweder deskriptiv pro Grössenklasse von Fischen (z. B. 10/40 Individuen einer Grössenklasse konnten das Hindernis überwinden, d. h. die Fischgängigkeit entspricht einem Wert von 0,25) oder kontinuierlich über den gesamten Län-

Sogenannte PIT-Tags (Passive Integrated Transponder; Bild 1a, b) sind elektronische Marker, die in die Körperhöhle des betäubten Tieres eingesetzt werden und einen individuellen Code enthalten. Sobald ein markierter Fisch in die Reichweite einer Antenne gelangt, wird ein elektromagnetisches Feld erzeugt, das den PIT-Tag mit Strom versorgt und diesen dazu veranlasst, seinen individuellen Code auszusenden. Das mit der Antenne verbundene Lesegerät registriert den Code und zeichnet ihn auf. Damit kann der einzelne Fisch zeitlich und räumlich präzise identifiziert werden. Die Markierung mit VIE-Tags (Visible Implant Elastomer; Bild 1c) erfolgt durch die Injektion eines inertierten Farbstoffs unter die Haut. Durch verschiedene Kombinationen von Injektionsstellen und Farben kann dabei zwischen verschiedenen Untersuchungsgruppen unterschieden werden. Aufgrund der limitierten Anzahl von möglichen Kombinationen sind VIE-Tags aber für individuelle Markierungen ungeeignet. Markierte Gruppen können schliesslich während erneuten Elektrobefischungen (Wiederfängen) nachgewiesen werden.

genbereich der Fische mithilfe eines statistischen Modells. Letzteres setzt eine individuelle Markierung und die Wiederdetektion der Fische voraus. Anschliessend wird der individuelle Erfolg (1) bzw. Misserfolg (0) des Aufstiegs als Funktion der Körperlänge in einem generalisierten linearen Modell mit einer Binomialverteilung modelliert (z. B. im Statistikprogramm R [13]). Die Fischgängigkeit eines Hindernisses kann schliesslich für den gesamten Längenbereich der Fische prognostiziert werden.

### 2.3 Bewertung der Fischgängigkeit

Grundsätzlich gilt: Je höher die Aufstiegsrate (oder Wiederkehrrate) ist, desto besser wird



Bild 1: (a) Beispiele von HDX-PIT-Tags unterschiedlicher Grösse von links nach rechts: 32 mm, 23 mm, 12 mm. (b) PIT-Tag wird in die Körperhöhle des betäubten Tieres eingepflanzt. (c) Markierung einer Bachforelle mit einem VIE-Tag an der Rückenflosse. Quelle: <https://www.nmt.us>.

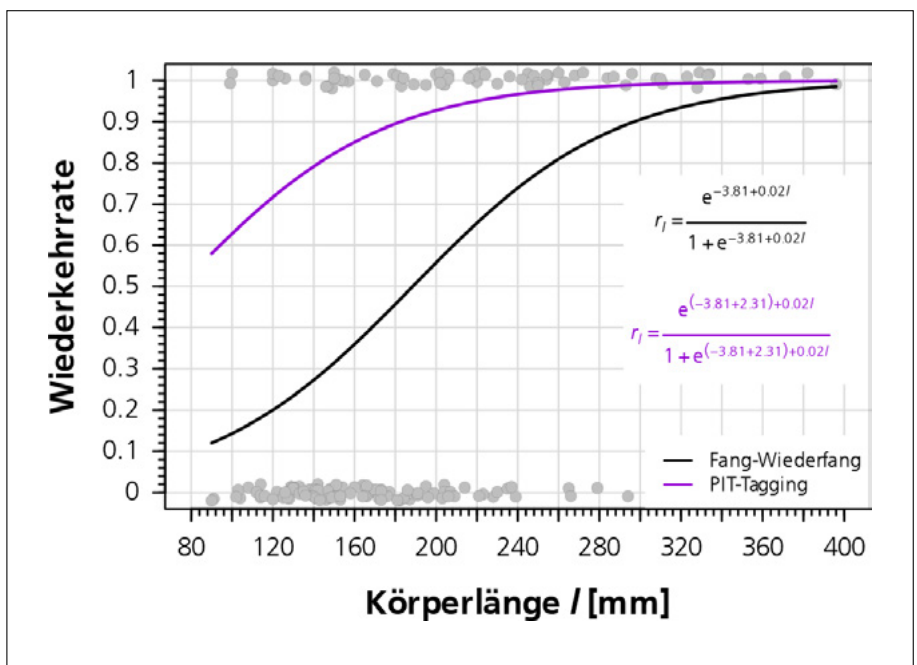
die Fischgängigkeit einer Aufwertungsmassnahme eingestuft. Die Wiederkehrrate ist jedoch nicht nur von der Fischgängigkeit der Massnahme abhängig, sondern auch von der Überlebens- und Detektionswahrscheinlichkeit der Fische [14]. Die Detektionswahrscheinlichkeit wird wiederum von der Methodik (z. B. Fang-Wiederfang mit VIE-Tags, PIT-Tagging und Antennendetektionssystem) oder anderen Faktoren wie einem Tag-Verlust, der Abwanderung oder der Wandermotivation beeinflusst. Da u. a. die Mortalität und auch die Wandermotivation während der Lebensdauer eines Fisches variiert [12, 15], muss die Beurteilung der Fischgängigkeit für verschiedene Längenklassen separat erfolgen.

Da geeignete allgemein gültige Bewertungsmaassstäbe bislang fehlen, wurde versucht diese Lücke zu schliessen. Dazu wurden zuerst gutachterlich Zielwerte für die Fischgängigkeit festgelegt: ≤10 Prozent («schlecht»), 11–25 Prozent («unbefriedigend»), 26–50 Prozent («mässig»), 51–75 Prozent («gut») und 76–100 Prozent («sehr gut»). Diese Zielwerte wurden schliesslich mit einem längenspezifischen «Korrekturfaktor» an die verschiedenen Längenklassen angepasst. Dieser Korrekturfaktor entspricht dabei der erwartbaren längenspezifischen Wiederkehrrate von Bachforellen, basierend auf den Daten einer 1-monatigen Studie mit Fang-Wiederfang (Bild 2, schwarze Kurve; [12]) und kann mit der folgenden Gleichung beschrieben werden:

$$r_l = \frac{e^{\alpha + \beta l}}{1 + e^{\alpha + \beta l}} \quad \text{Gl. 1}$$

$r_l$  entspricht dabei der Wiederkehrrate einer Bachforelle der Körperlänge  $l$ .  $\alpha$  ist eine Konstante und  $\beta$  beschreibt die Beziehung zwischen der Wiederkehrrate und der Körperlänge. Die Werte von  $\alpha$  und  $\beta$  sind in Bild 2 dargestellt.

Bei permanenten Monitorings (z. B. mittels PIT-Tagging und Antennendetektionssystem) ist die Wiederkehrrate aufgrund einer höheren Detektionswahrscheinlichkeit generell höher [16]. Deshalb wurde die Wiederkehrrate bei Translokationsexperimenten mit permanentem Monitoring indirekt von der Wiederkehrrate bei einem Fang-Wiederfang hergeleitet und die Gleichung 1 durch die Addition der Konstante  $\gamma$  angepasst (Gl. 2; Bild 2, violette Kurve). Die Addition von  $\gamma$  resultiert in einer im Durchschnitt 25 Prozent höheren Wiederkehrrate. Basierend auf Literaturangaben entspricht dies der durchschnittlich höheren Detektionswahrscheinlichkeit von Salmoniden bei permanenten



**Bild 2:** Längenspezifische Wiederkehrrate von Bachforellen bei Fang-Wiederfang (schwarz) und PIT-Tagging/Antennendetektionssystem (violett). Die Kurve für den Fang-Wiederfang basiert auf den Daten der Studie von [12]. Die Rohdaten (graue Punkte) zeigen, ob eine Bachforelle nach der Translokation an ihren Ursprungsort zurückgekehrt ist (1) oder nicht (0). Diese Kurve wurde schliesslich für ein PIT-Tagging/Antennendetektionssystem angepasst (vgl. Text).

Monitorings (über einen Zeitraum von mind. 1–2 Monaten) im Vergleich zu einem punktuellen Fang-Wiederfang [12, 17–29].

$$r_l = \frac{e^{(\alpha + \gamma) + \beta l}}{1 + e^{(\alpha + \gamma) + \beta l}} \quad \text{Gl. 2}$$

Der Korrekturfaktor (Skala 0–1) entspricht somit dem Anteil an markierten Fischen einer bestimmten Längenklasse, der den Untersuchungsperimeter nicht verlassen hat (z. B. durch Tod, Tag-Verlust oder Abwandern etc.) und der gleichzeitig motiviert war, an den Ursprungsort (d. h. Standort vor der Translokation) zurückzukehren. Der «korrigierte» Zielwert der Fischgängigkeit ergibt sich dann aus der Multiplikation des gutachterlich festgelegten Zielwerts mit dem Korrekturfaktor. Generell gilt, je kleiner die Längenklasse, desto weniger Individuen kommen aufgrund höherer Mortalitätsraten und insbesondere einer geringeren Wandermotivation für eine Rückkehr in Frage (bei jüngeren Stadien ist das Mikrohoming weniger stark ausgeprägt). Mit anderen Worten, je kleiner die Längenklasse ist, desto näher liegt der Korrekturfaktor bei 0 und umso grösser ist die Korrektur bzw. die Abweichung zwischen dem unkorrigierten und dem korrigierten Zielwert der Fischgängigkeit (Bild 3).

Die Bewertungskategorien, basierend auf den korrigierten Zielwerten für die Bachforelle, sind in Tabelle 1 aufgelistet. Beispiels-

weise wird angenommen, dass bei einem Fang-Wiederfang theoretisch nur durchschnittlich 17 Prozent der markierten Bachforellen der zweitkleinsten Längenklasse (d. h. 8–14 cm) erwartet werden dürfen. Bei den restlichen 83 Prozent wird davon ausgegangen, dass sie den Projektperimeter entweder verlassen haben (z. B. durch Abwandern, Tod, Tag-Verlust etc.), nicht motiviert waren aufzusteigen oder methodisch bedingt nicht wieder detektiert wurden. Demnach wird eine «gute» Wiederkehrrate (d. h. Fischgängigkeit) bereits bei 9 Prozent aufgestiegenen Fischen anstatt erst bei 50 Prozent erreicht ( $0,17 \cdot 0,5 = 0,09$ ).

## 2.4 Anwendung und Validierung der Bewertungsmethodik

Um die Bewertungsmethodik zu validieren, wurde die Fischgängigkeit von verschiedenen Sanierungsmassnahmen berechnet und mit der Methodik beurteilt.

Dazu wurden PIT-Tag- und Fang-Wiederfang-Daten von Bachforellen aus folgenden vier Wirkungskontrollen zur Überprüfung der Fischgängigkeit verwendet: Aabach (Wädenswil, ZH), Alp (Einsiedeln, SZ), Kathrinebächli (Ufhusen, LU) und Staldenbach (Pfäffikon, SZ). Diese wurden jeweils im Sommer/Herbst der Jahre 2020, 2021 und 2022 durchgeführt [17–20]. Es handelt sich dabei um Mittelland- und Voralpengewässer der Schweiz (Bild 4).



Fang-Wiederfang					
Bewertung	«schlecht»	«unbefriedigend»	«mässig»	«gut»	«sehr gut»
unkorrigiert	≤ 0,1	0,11–0,25	0,26–0,5	0,51–0,75	0,76–1
< 8	≤ 0,007	0,008–0,017	0,018–0,034	0,035–0,052	> 0,052
8–14	≤ 0,017	0,019–0,043	0,044–0,085	0,087–0,128	> 0,129
15–20	≤ 0,043	0,048–0,108	0,112–0,216	0,220–0,324	> 0,328
21–29	≤ 0,078	0,085–0,194	0,202–0,388	0,396–0,582	> 0,590
> 29	≤ 0,096	0,106–0,241	0,250–0,482	0,491–0,722	> 0,732

PIT-Tagging/Antennendetektionssystem					
Bewertung	«schlecht»	«unbefriedigend»	«mässig»	«gut»	«sehr gut»
unkorrigiert	≤ 0,1	0,11–0,25	0,26–0,5	0,51–0,75	0,76–1
< 8	≤ 0,043	0,047–0,107	0,112–0,215	0,219–0,322	> 0,326
8–14	≤ 0,067	0,074–0,168	0,175–0,337	0,344–0,506	> 0,512
15–20	≤ 0,089	0,097–0,221	0,230–0,442	0,451–0,664	> 0,673
21–29	≤ 0,097	0,107–0,243	0,253–0,486	0,496–0,729	> 0,739
> 29	≤ 0,100	0,110–0,249	0,259–0,498	0,508–0,747	> 0,757

Tabelle 1: «Korrigierte» Bewertungskategorien für fünf Längensklassen der Bachforelle.

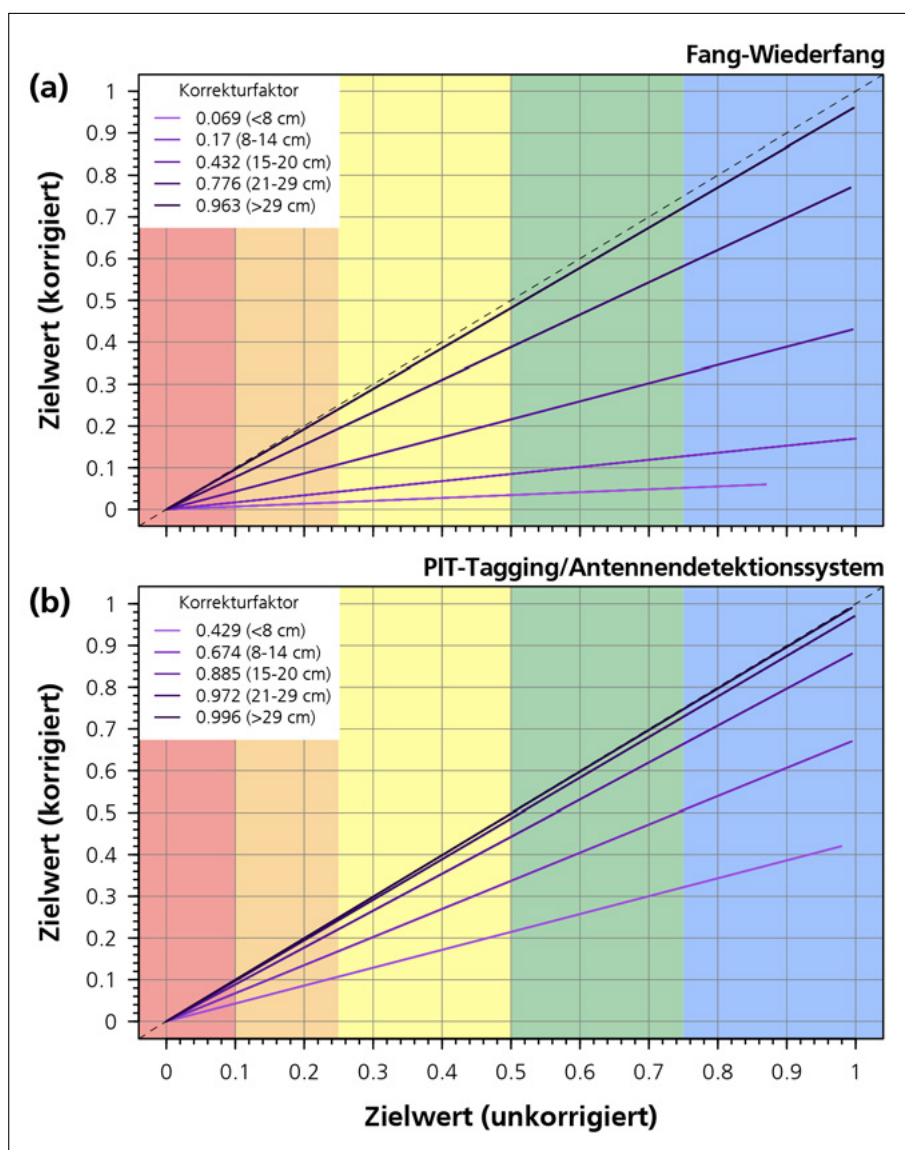


Bild 3: Zusammenhang zwischen den unkorrigierten (d. h. gutachterlich festgelegten) und korrigierten Zielwerten bei (a) einem Fang-Wiederfang und (b) einem PIT-Tagging/Antennendetektionssystem für fünf Längensklassen der Bachforelle. Rot: «schlecht», orange: «unbefriedigend», gelb: «mässig», grün: «gut», blau: «sehr gut». Der Korrekturfaktor entspricht der Steigung der Kurve.

Am Aabach und an der Alp wurde die Wirksamkeit der Sanierungsmassnahmen mittels PIT-Tagging und Antennendetektionssystem überprüft. An Kathrinebächli und Staldenbach erfolgten Fang-/Wiederfangversuche mit Farbpunktmarkierungen (Tatoo-farbe) bzw. VIE-Tags. Die Wiederfänge erfolgten jeweils zwei und neun Tage nach den Markierungen. Beim Kathrinebächli wurde das obere Ende des Untersuchungsperimeters mit einem Netz abgesperrt, um ein Entweichen von Fischen nach oben zu verhindern und damit die Wiederfangwahrscheinlichkeit zu erhöhen. Beim Staldenbach wurde das obere Ende nicht abgesperrt.

Im Rahmen der Wirkungskontrollen wurde die Fischgängigkeit von einem Rauge-rinne mit Beckenstruktur, einer Blockrampe und einer Rampe mit Blockschwellen sowie von diversen Schwellen und Abstürzen überprüft (Bild 5).

### 3. Fischgängigkeit verschiedener Sanierungstypen

#### 3.1 Schwellen und Abstürze

Wenig überraschend hing die Fischgängigkeit von Schwellen und Abstürzen stark von ihrer Absturzhöhe ab [17–20]. Während eine Schwelle mit einer Höhe von 25 cm (Bild 5, Schwelle<sup>a</sup>) bereits für Bachforellen ab 18 cm Körperlänge als «gut» bis «sehr gut» durchgängig bewertet werden konnte, war dies bei einer Schwelle von 60 cm Höhe (Bild 5, Schwelle<sup>b</sup>) erst für Bachforellen ab 30 cm Länge der Fall (Bild 6). Auch ein Absturz von 47 cm war vorwiegend für grössere Bachforellen durchgängig (Bild 7). Schwellen und Abstürze ab 25 cm Höhe sind somit stark grössenselektiv gegenüber kleinen Individuen und sollten in Bachforellengewässern möglichst vermieden werden.

#### 3.2 Blockrampen

Die untersuchte Blockrampe von ca. 15 m Länge konnte für alle Grössenklassen von Bachforellen als «sehr gut durchgängig» bewertet werden (Bild 6) [19]. Die Durchgängigkeit von Blockrampen setzt aber voraus, dass die fischökologischen Grenzwerte der Zielfischarten bezüglich Gefälle, Wassertiefen, Hydraulik, Rauigkeit usw. (z. B. [31–33]) in der Planung und der Umsetzung eingehalten werden. Bei Nichteinhaltung der Grenzwerte ist mit einer geringeren Fischgängigkeit zu rechnen, z. B. für kleinere Individuen bei zu hohem Gefälle oder für grössere Fische bei einer zu geringen Wassertiefe.

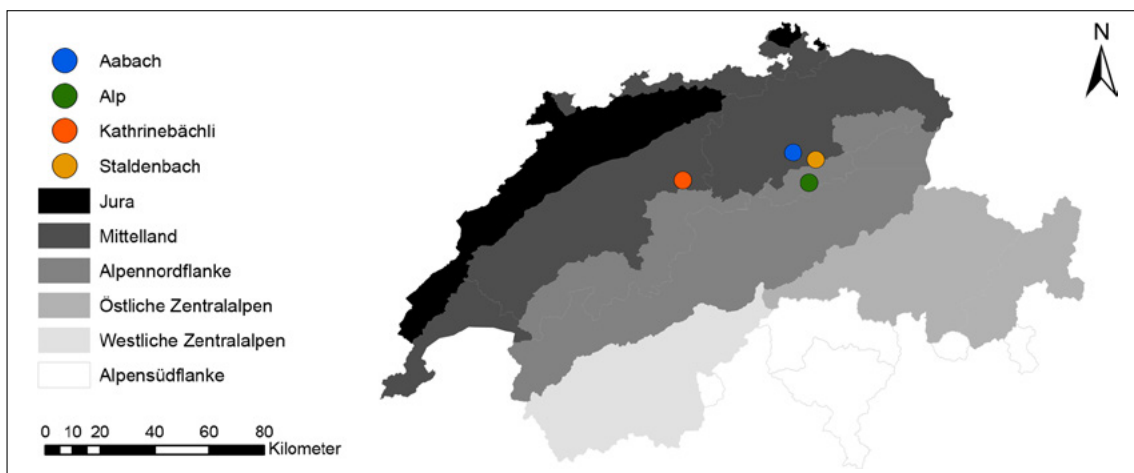


Bild 4: Biogeografische Regionen der Schweiz (data. geo.admin.ch) mit den Standorten der vier untersuchten Gewässern. [17–20].



Bild 5: Die vier Wirkungskontrollen zur Überprüfung der Fischgängigkeit an Aabach (Wädenswil, ZH), Alp (Einsiedeln, SZ), Kathrinebächli (Ufhusen, LU) und Staldenbach (Pfäffikon, SZ) untersuchten ein Raugerinne mit Beckenstruktur, eine Blockrampe, eine Rampe mit Blockschwellen sowie diverse Schwellen und Abstürze.

### 3.3 Raugerinne mit Beckenstruktur

Die Fischgängigkeit von Raugerinnen mit Beckenstruktur hängt von den jeweiligen Absturzhöhen der einzelnen Becken und auch von der Rampenlänge ab. Beim untersuchten Raugerinne von ca. 23 m Länge betrug die durchschnittliche Absturzhöhe 17 cm (max. 26 cm). Die Fischgängigkeit konnte bereits für Bachforellen ab 13 cm als «gut» eingestuft werden (Bild 6) [18]. Es ist aber anzunehmen, dass bei Raugerinnen mit Beckenstruktur wie bei Schwellen die Überwindbarkeit mit zunehmender Absturzhöhe stark abnimmt (vgl. 3.1).

### 3.4 Blockschwellen

Am Beispiel einer untersuchten Blockschwelle lässt sich zeigen, wie mit der Bewertungsmethodik auch eine Grössenselektivität gegenüber grossen Individuen erkannt werden kann. Für Fische zwischen 8 und 21 cm Körperlänge konnte sie als «gut», aber für grössere Fische zwischen 21 und 29 cm nur noch als «mässig» beurteilt werden (Bild 7), und dies, obwohl die Absturzhöhen der einzelnen Schwellen lediglich 25–30 cm betrugen [20]. Im beschriebenen Fall lag die Ursache aber nicht bei einer unzureichenden baulichen Dimensionierung (Absturzhöhen, Hydraulik), sondern kann vermutlich auf eine reduzierte Wandermotivation von grösseren Fischen zurückgeführt werden. Unterhalb der Blockschwelle befand sich ein relativ tiefer Kolk, der ein ideales Adulthabitat für Bachforellen darstellte. Einige umgesetzte Adulttiere bevorzugten diesen Standort offenbar gegenüber ihrem vorherigen Einstand, wo sie gefangen wurden, und wollten nicht wieder zurückwandern.

## 4. Schlussfolgerung

Die Resultate zeigen, dass mit Hilfe der hier vorgestellten Bewertungsmethodik die Wirk-



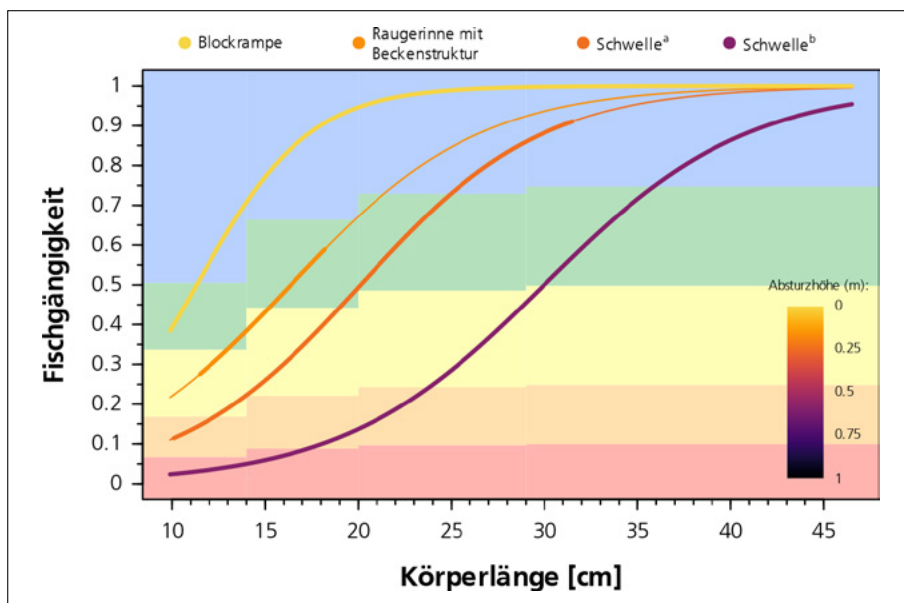


Bild 6: Fischgängigkeit von vier unterschiedlichen Typen und Höhen von Hindernissen am Aabach und an der Alp als Funktion der Körperlänge von Bachforellen. Die Kurven wurden mithilfe eines generalisierten linearen Modells (GLM) im Statistikprogramm R berechnet [13]. Die Bewertung der Fischgängigkeit erfolgte für vier Längenklassen ( $\leq 14$ , 15–20, 21–29,  $> 29$  cm): rot: «schlecht», orange: «unbefriedigend», gelb: «mässig», grün: «gut», blau: «sehr gut». Die dickeren Linienabschnitte beziehen sich auf die Bereiche mit verfügbaren Daten, während die dünneren Linien einer Extrapolation entsprechen. Die Farbe der Linien stellt die Absturzhöhe des jeweiligen Hindernisses dar. Lesebeispiel: Ein Fisch von 20 cm Länge kann im Durchschnitt mit einer Wahrscheinlichkeit von nur 14 Prozent eine Schwelle von 60 cm Absturzhöhe (Schwelle<sup>b</sup>) überwinden, aber mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 Prozent eine Blockrampe vom untersuchten Typ.

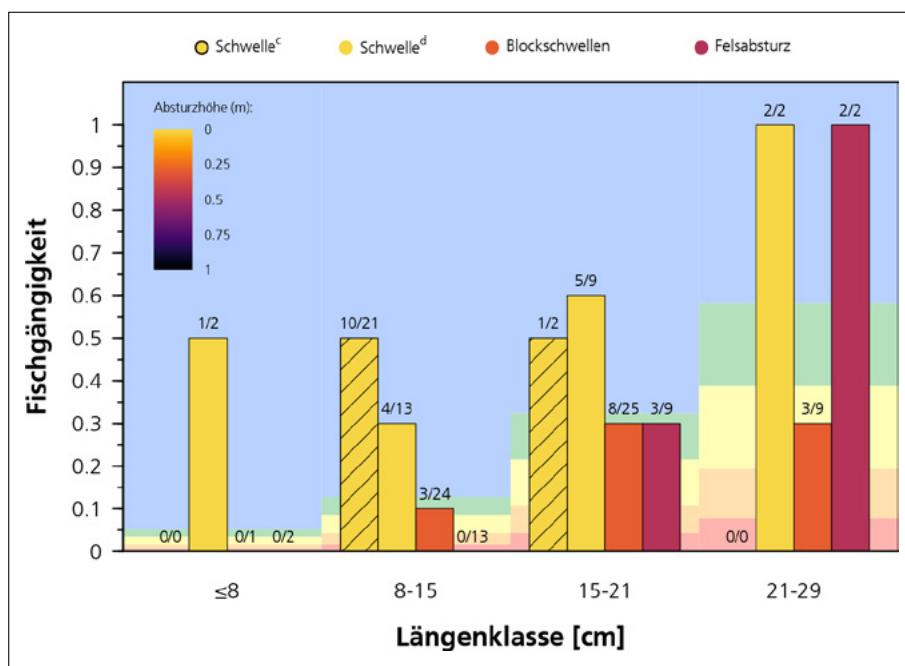


Bild 7: Fischgängigkeit von vier unterschiedlichen Typen und Höhen von Hindernissen am Kathrinebächli und Staldenbach in Abhängigkeit der Längenklasse von Bachforellen (neun Tage nach der Markierung). Die Bewertung der Durchgängigkeit erfolgte für vier Längenklassen ( $\leq 8$ , 8–15, 15–21, 21–29 cm): rot: «schlecht», orange: «unbefriedigend», gelb: «mässig», grün: «gut», blau: «sehr gut». Die Farbe der Balken entspricht der Absturzhöhe des jeweiligen Hindernisses. Lesebeispiel: Einen Felsabsturz von 47 cm zu überwinden, ist für einen Fisch von 15–21 cm Länge im Durchschnitt mit einer Wahrscheinlichkeit von 33 Prozent möglich, für einen Fisch von 21–29 cm mit einer Wahrscheinlichkeit von 100 Prozent.

samkeit von Sanierungsmassnahmen zur Verbesserung der Fischgängigkeit in Bachforellengewässern effizient und standardisiert geprüft werden kann. Einerseits können Grössenselektivitäten von Sanierungsmassnahmen leicht erkannt und verschiedene Sanierungstypen miteinander verglichen werden. Andererseits können Grenzwerte für die Bachforelle bezüglich Absturzhöhen von Hindernissen, die für das Erreichen spezifischer Sanierungsziele erforderlich sind (z.B. Sicherstellung des genetischen Austauschs oder die Gewährleistung der Durchgängigkeit für alle Grössenklassen), abgeleitet werden.

Schwellen oder Abstürze müssen nicht in jedem Fall von allen Grössenklassen der Bachforelle gleichermassen leicht überwunden werden können. Insbesondere dann nicht, wenn nur der rein genetische Austausch im Vordergrund steht. Schwelensanierungen zugunsten einer verbesserten Längsvernetzung in stark fragmentierten Bachforellengewässern gehen häufig zu Lasten von grossen, tiefen Kolken. Diese wichtigen Mangelhabitate stellen jedoch wertvolle Einstände für grosse Bachforellen dar und wirken als Rückzugsorte für Fische bei Niederwasser. Gerade im Hinblick auf den zunehmenden Klimawandel mit ausgeprägteren Trockenphasen gewinnt dieser Aspekt immer mehr an Bedeutung. Ausgehend von der vorliegenden Bewertungsmethodik lässt sich schliesslich ableiten, wie hoch die Absturzhöhe einer Schwelle noch sein darf, damit die Längsvernetzung in Abhängigkeit einer bestimmten Fischlänge genetisch noch «gut» funktioniert. Für die Revitalisierungsplanung zur Wiederherstellung der Fischgängigkeit an nicht kraftwerksbedingten Hindernissen bildet die vorliegende Bewertungsmethodik somit ein Hilfsmittel, um solche Fragen besser beantworten zu können.

Im Weiteren ist die Methodik gleichermassen auf PIT-Tag- und Fang-Wiederfang-Daten von Bachforellen anwendbar. Durch die Übertragung des gleichen Prinzips auf andere Gewässertypen, weitere Fischarten und zusätzliche Massnahmentypen lässt sich die Methodik beliebig erweitern.

## Quellen:

- [1] Zaugg, C., Boller, L., Dönni, W., Guthruf, J. (2017) Massnahmenumsetzung Sanierung Fischgängigkeit – Handbuch Wirkungskontrollen. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- [2] FishConsulting GmbH & blattfisch e. U. (2022) Erhebungs- und Bewertungsgrundlage für die Wirkungskontrolle von Fischaufstiegshilfen mit Zählbecken und Reusen – Bedienungsanleitung Excel-Tool. Tool «aus der Praxis für die Praxis» V1.0. Dübendorf. Herausgeber: Wasseragenda 21.
- [3] Kreienbühl et al. (in Bearbeitung) Methodenstandard für PIT-Tagging-Studien. Merkblatt «aus der Praxis – für die Praxis». Auftragnehmer: Ecqua GmbH. Auftraggeber: Wasseragenda 21, Dübendorf. v0.01.
- [4] Zeh-Weissmann, H., Könitzer, C., Bertiller, A. (2009) Strukturen der Fließgewässer in der Schweiz. Zustand von Sohle, Ufer und Umland (Ökomorphologie). Ergebnisse der ökomorphologischen Kartierung. Stand : April 2009. Umwelt-Zustand Nr. 0926. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- [5] Brodersen, J., Hellmann, J., Seehausen, O. (2023) Erhebung der Fischbiodiversität in Schweizer Fließgewässern – Progetto Fiumi Schlussbericht. Herausgeber: Eawag: Swiss Federal Institut of Aquatic Science and Technology, Kastanienbaum/Dübendorf.
- [6] AquaPlus (2022) Fischschutzmassnahmen bei Hitzeereignissen. Arbeitshilfe. Pilotprojekt F13 im Rahmen des Pilotprogrammes zur Anpassung an den Klimawandel. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. Bern.
- [7] Werner, S., Rey, P., Hesselschwerdt, J., Becker, A., Ortlepp, J., Dönni, W., Camenzind, M. (2014) Seeforelle – Arterhaltung in den Bodenseezuflüssen. Interreg IV-Projektbericht. Im Auftrag der Internationalen Bevollmächtigtenkonferenz für die Bodensee-Fischerei (IBKF), AG Wanderfische, Konstanz.
- [8] Hufgard, H., Adam, B., Schwevers, U. (2015) Ergebnisse des Aufstiegsmonitorings an Europas grösster Fischaufstiegsanlage in Geesthacht. Fachbeiträge Wasserbau und Wasserkraft – Korrespondenz Wasserwirtschaft 8, 27–35.
- [9] Schölzel, N., Wilmsmeier, L., Peter, A. (2020) Schlussbericht PIT-Tagging am KW Schiffmühle und Aue an der Limmat 2017–2020.
- [10] Halvorsen, M., Stabell, O. (1990) Homing behaviour of displaced stream-dwelling brown trout. *Animal Behaviour* 39, 1089–1097.
- [11] Harcup, M., Williams, R., Ellis, D. (1984) Movements of brown trout, *Salmo trutta* L., in the River Gwyddon, South Wales. *Journal of Fish Biology* 24, 415–426.
- [12] Camenzind, M. (2008) Standorttreue und Mikrohoming von Bachforelle (*Salmo trutta fario*) und Alet (*Leuciscus cephalus*) in Fließgewässern.
- [13] R Core Team (2022) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing.
- [14] Cooch, E., White, G. (2011) Program MARK: a gentle introduction.
- [15] Lobón-Cerviá, J., Budy, P., Mortensen, E. (2012) Patterns of natural mortality in stream-living brown trout (*Salmo trutta*). *Freshwater Biology* 57, 575–588.
- [16] Conner, M., Budy, P., Wilkison, R., Mills, M., Speas, D., Mackinnon, P., McKinstry, M. (2020) Estimating population abundance with a mixture of physical capture and PIT tag antenna detection data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 77, 1163–1171.
- [17] AquaPlus (2021) Kathrinebächli – Wirkungskontrolle Fischgängigkeit. Biologische Funktionskontrolle. Im Auftrag von B. Filliger. 16 S.
- [18] AquaPlus (2022) Erfolgskontrolle Aabach Wädenswil – Wiederherstellung der Vernetzung. Im Auftrag der Stadt Wädenswil. 24 S.
- [19] AquaPlus (2022) Erfolgskontrolle Schwellen Alp – Verbesserung der Fischgängigkeit an der Alp. 23 S.
- [20] AquaPlus (in. Vorb.) Hochwasserschutz Staldenbach – Erfolgskontrolle (Projekt-Zustand).
- [21] Banish, N., Burdick, S., Moyer, K. (2016) Efficiency of portable antennas for detecting passive integrated transponder tags in stream-dwelling salmonids. *PLoS ONE* 11, 1–10.
- [22] Cucherousset, J., Roussel, J.-M., Keeler, R., Cunjak, R., Stump, R. (2005) The use of two new portable 12-mm PIT tag detectors to track small fish in shallow streams. *North American Journal of Fisheries Management* 25, 270–274.
- [23] Cucherousset, J., Britton, J., Beaumont, W. C., Nyqvist, M., Sievers, K., Gozlan, R. (2010) Determining the effects of species, environmental conditions and tracking method on the detection efficiency of portable PIT telemetry. *Journal of Fish Biology* 76, 1039–1045.
- [24] Enders, E., Clarke, K., Pennell, C., Ollerhead, L., Scruton, D. (2007) Comparison between PIT and radio telemetry to evaluate winter habitat use and activity patterns of juvenile Atlantic salmon and brown trout. *Hydrobiologia* 582, 231–242.
- [25] Frank, B., Gimenez, O., Baret, P. (2012) Assessing brown trout (*Salmo trutta*) spawning movements with multistate capture-recapture models: a case study in a fully controlled Belgian brook. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 69, 1091–1104.
- [26] Korman, J., Yard, M., Walters, C., Coggins, L. (2009) Effects of fish size, habitat, flow, and density on capture probabilities of age-0 rainbow trout estimated from electrofishing at discrete sites in a large river. *Transactions of the American Fisheries Society* 138, 58–75.
- [27] Olsen, E., Vollestad, L. (2001) Estimates of survival of stream-dwelling brown trout using mark-recaptures. *Journal of Fish Biology* 59, 1622–1637.
- [28] Roussel, J.-M., Haro, A., Cunjak, R. (2000) Field test of a new method for tracking small fishes in shallow rivers using passive integrated transponder (PIT) technology. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57, 1326–1329.
- [29] Saboret, G., Dermond, P., Brodersen, J. (2021) Using PIT-tags and portable antennas for quantification of fish movement and survival in streams under different environmental conditions. *Journal of Fish Biology* 99, 581–595.
- [30] Weber, C., Scheuber, H., Nilsson, C., Alfredsen, K. (2016) Detection and apparent survival of PIT-tagged stream fish in winter. *Ecology and Evolution* 6, 2536–2547.
- [31] Weibel, D., Peter, A., Schleiss, A. (2012) Durchgängigkeit von Blockrampen. In Merkblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Bern. Umwelt-Wissen.
- [32] Adam, B., Bosse, R., Dumont, U., Göhl, C., Görlach, J., Heimerl, S., Kalusa, B., Krüger, F., Redeker, M., Schwevers, U., Sellheim, P. (2014) Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Merkblatt DWA-M 509. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- [33] Dönni, W., Beck, C., Mende, M., Ninck, L., Peter, A., Schölzel, N. (2022) Wiederherstellung der Fischwanderung. Gute Praxisbeispiele für Wasserkraftanlagen in der Schweiz. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2205.

## Autoren:

**Andres Hagmayer**, AquaPlus AG, Gotthardstrasse 30, 6300 Zug, andres.hagmayer@aquaplus.ch  
**Lukas Boller**, AquaPlus AG, Gotthardstrasse 30, CH-6300 Zug, lukas.boller@aquaplus.ch