

## Mindestwassertiefen für See- und Bachforellen Biologische Grundlagen und Empfehlungen

Expertenbericht im Auftrag des  
Bundesamtes für Umwelt BAFU

Oktober 2016

**FISCHWERK**

**WERNER DÖNNI**

FISCHBIOLOGIE • GEWÄSSERÖKOLOGIE • GEOINFORMATIK

**AquaPlus**

**AQUARIUS**

## Impressum

Auftraggeber	<p>Bundesamt für Umwelt (BAFU) Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).</p> <p><i>Kontaktperson</i> Andreas Knutti T 058 464 72 83 andreas.knutti@bafu.admin.ch</p>
Auftragnehmer	<p>Fischwerk Neustadtstrasse 7 6003 Luzern</p> <p><i>Kontaktperson</i> Werner Dönni T 041 210 20 15 werner.doenni@fischwerk.ch</p>
Autor	Werner Dönni (Fischwerk)
Mitarbeit	Lukas Boller (AquaPlus) Claudia Zaugg (Aquarius)
Auftragserteilung	18. Oktober 2012
Begleitung BAFU	Andreas Knutti Manfred Kummer Marc Baumgartner
Experten	Willy Müller (Fischereiinspektorat BE) Dimitri Jaquet (service des forêts, de la protection de la nature et du paysage GE) Marcel Michel (Amt für Jagd und Fischerei GR) Jean-Marc Weber (Service de la faune NE) Bruno Polli (Ufficio della caccia e della pesca TI) Frédéric Hofmann (Inspection de la pêche VD) Andreas Hertig (Fischerei- und Jagdverwaltung ZH) Armin Peter (EAWAG) Peter Rey (Hydra)
Disclaimer	Dieser Expertenbericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.
Zitiervorschlag	Dönni, W., Boller, L., Zaugg, C. 2016: Mindestwassertiefen für See- und Bachforellen – Biologische Grundlagen und Empfehlungen. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Um- welt: 42 S.
Titelseite	Seeforelle aus der Linth, 7.11.2012. © A. Zbinden, Jagd und Fischerei Kanton Glarus.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1 Stellenwert des Berichtes	5
1.2 Problemstellung und Auftrag	5
1.3 Vorgehen	6
<b>2 Biologische Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1 Zeit der Laichwanderung	7
2.2 Bedeutung von Hoch- und Niederwasser	8
2.3 Bedeutung der Wassertiefe	9
2.4 Andere Faktoren	10
<b>3 Die Mindestwassertiefe</b>	<b>11</b>
3.1 Symbole und Definitionen	11
3.2 Grundlagen	11
3.3 Empfehlungen	13
3.3.1 Vorgaben für die Mindestwassertiefen	13
3.3.2 Weitere Aspekte	15
<b>4 Herleitung der notwendigen Restwassermenge</b>	<b>16</b>
<b>5 Anwendungsablauf und Beispiel</b>	<b>19</b>
<b>6 Die Anwendung von Zeitfenstern</b>	<b>22</b>
6.1 Jahreszeit	22
6.2 Tageszeit	22
<b>7 Beispiele</b>	<b>22</b>
<b>8 Zitierte Literatur</b>	<b>23</b>
<b>Anhang</b>	<b>25</b>
A Expertenbefragung	26
B Mindestwassertiefe: Grundlagen	30
B.1 Mindestwassertiefe und Körperhöhe	30
B.2 Schwimmgeschwindigkeit	34
B.3 Maximaldistanz	34
C Mindestwassertiefe: Empfehlungen und Schwierigkeiten	36
C.1 Generell	36
C.2 Untiefen	36
C.3 Einzelfälle	37
C.4 Abweichende Mindestwassertiefe bei unbekannter Körperhöhe	37
C.5 Kumulativer Effekt	39
D Herleitung einer Referenzlänge für Seeforellen	40
E Restwasserstrecken mit Vorkommen von Seeforellen	42

## Zusammenfassung

Bei der Festlegung von **Mindestrestwassermengen** stellt sich die Frage nach der für die freie Fischwanderung erforderlichen **Wassertiefe**. Im Allgemeinen geht man ausgehend von den Erläuterungen zum Gewässerschutzgesetz von einer minimalen Wassertiefe von rund 20 cm aus. Gemäss der Wegleitung des Bundes sollen aber die ökologischen Ansprüche der vorhandenen Fischarten massgebend sein (Estoppey et al. 2000). In Bachforellengewässern werden denn auch von den Bewilligungsbehörden gewisse Unterschreitungen erlaubt. Kommen hingegen grosse Seeforellen vor, werden oftmals deutlich höhere Wassertiefen als 20 cm gefordert. Die Seeforelle ist stark gefährdet und eine national prioritäre Art mit grossem Handlungsbedarf. Sie ist insbesondere bei der Laichwanderung auf genügend tiefe Gewässer angewiesen, damit sie die Oberläufe der Seen erreichen und sich dort natürlich fortpflanzen kann. Dabei kommt der Bemessung der Restwasserabflüsse in kraftwerksbeeinflussten Gewässerabschnitten eine wichtige Rolle zu.

Der vorliegende Bericht führt aus, wie die erforderliche **Wassertiefe** in Restwasserstrecken für Forellen aufgrund von biologischen Kriterien bestimmt werden kann. Auf der Basis einer Literaturrecherche und von Expertengesprächen wurden die grundsätzlichen Ansprüche der Seeforelle und Bachforelle an die Wassertiefe für die Auf- und Abwärtswanderung gemäss dem heutigen Wissensstand zusammengetragen. Unter Beizug biometrischer Daten der beiden Arten wurden schliesslich Empfehlungen für die Berechnung der Mindestwassertiefe definiert. Für einzelne Aspekte bestehen jedoch keine biologischen Grundlagen. Für diese wurden pragmatische Ansätze formuliert.

Es werden grob drei mögliche Fälle bei der Herleitung der erforderlichen Wassertiefe unterschieden: Die **generelle Mindestwassertiefe**, die grundsätzlich auf der ganzen Restwasserstrecke vorhanden sein soll, beträgt das 2.5fache der Körperhöhe der grössten vorkommenden See- bzw. Bachforellen der betroffenen Populationen. In Anlehnung an die Botschaft zum Gewässerschutzgesetz und die heutige Praxis darf dabei eine Wassertiefe von 20 cm nicht unterschritten werden. Ausnahmen sind jedoch möglich: Unterschreitungen der generellen Mindestwassertiefe von 20 cm sind in eng begrenzten Abschnitten mit natürlichen Untiefen auf maximale Distanzen im Umfang vom 50fachen der Körperlänge der grössten vorkommenden Individuen möglich. Die Mindestwassertiefe in diesen **Untiefen** beträgt dabei mindestens das 2fache der Körperhöhe der grössten vorkommenden Fische. Diese minimale Tiefe darf nur in **Einzelfällen** in sehr flachen Stellen aufgrund der natürlichen Topografie oder nicht beseitigbaren Sohlenverbauungen auf einer Distanz von maximal 5 m unterschritten werden. Die Mindestwassertiefe beträgt dann das 1fache der Körperhöhe, aber mindestens 7 cm. Solche Einzelfälle stellen beispielsweise glatte flächige Sohlenverbauungen oder Felsrippen dar.

Die in der Schweiz angewandten Methoden zur Herleitung der **Mindestrestwassermenge** werden ebenfalls kurz beschrieben. Unter Abwägung der Vor- und Nachteile jeder Methode werden Empfehlungen zur Anwendung formuliert.

Der vorliegende Bericht ist in erster Linie eine ökologische Betrachtung bezüglich der Herleitung einer Mindestwassertiefe für die Wanderung von See- und Bachforellen. Er liefert wissenschaftliche Grundlagen zur Festlegung der Restwassermengen in Gewässern mit Vorkommen grosswüchsiger Forellen und kann prinzipiell auch auf andere grosswüchsigen Fischarten angewendet werden. Die Methodik zur Herleitung der erforderlichen Wassertiefe kam bereits in einzelnen Wasserkraftprojekten zur Anwendung und soll weiter etabliert werden. Die beschriebenen Methoden zur Herleitung der erforderlichen Restwassermenge werden bereits heute breit angewendet.

# 1 Einleitung

## 1.1 Stellenwert des Berichtes

Der vorliegende Bericht führt aus, wie die erforderliche Wassertiefe in Restwasserstrecken für Forellen aufgrund von biologischen Kriterien bestimmt werden kann. Dabei wird die biologische Notwendigkeit basierend auf wissenschaftlichen Grundlagen und der Expertise kantonaler Fischereifachstellen erläutert und zusammengefasst.

In den letzten Jahren hat sich die Situation bezüglich Erreichbarkeit von Laichgebieten für Forellen erfreulicherweise teilweise verbessert: Etliche Fischwanderhindernisse wurden mit fischgängigen Rampen oder Fischpässen ausgerüstet, wodurch die grosswüchsigen Forellen in verschiedenen Gewässersystemen zumindest einen Teil ihrer ursprünglichen Laichgebiete wieder erreichen könnten. Mit der Sanierung der Fischgängigkeit bei den sanierungsbedürftigen Kraftwerken gemäss den kantonalen strategischen Planungen werden weitere wertvolle Gewässerabschnitte für migrierende Forellen erschlossen. Daher muss bei der Festlegung der Restwassermengen vermehrt auf die Ansprüche der grosswüchsigen Forellen (insbesondere der Seeforelle) Rücksicht genommen werden, damit diese ihre Laichgebiete tatsächlich erreichen können. Den Erhaltungszustand von national prioritären Arten zu verbessern, ist ein zentrales Ziel der Strategie Biodiversität Schweiz. Dieses Ziel ist nur erreichbar, wenn sich die verschiedenen Forellenpopulationen natürlich fortpflanzen können.

Die vorliegende Publikation liefert wissenschaftliche Grundlagen zur Festlegung von Restwassermengen in Gewässern mit heutigem bzw. potenziellem Vorkommen von grosswüchsigen Forellen. Dieser Ansatz wurde bereits in einigen Wasserkraftprojekten angewendet und soll weiter etabliert werden.

## 1.2 Problemstellung und Auftrag

Im Rahmen der Festlegung der Mindestrestwassermenge gemäss Gewässerschutzgesetz muss unter anderem auch die für die freie Fischwanderung erforderliche Wassertiefe berücksichtigt werden. In der Botschaft zur Revision des Gewässerschutzgesetzes<sup>1</sup> wird diese Forderung konkretisiert. Demnach benötigen Fische für ihre Wanderungen in der Regel ganzjährig eine durchgehende Rinne von mindestens 20 cm Tiefe. Gemäss der Wegleitung des Bundes sind zusätzlich die ökologischen Ansprüche der vorhandenen Fischarten zu beachten (Estoppey 2000, S. 45). Bei grosswüchsigen Arten (Seeforelle, teilweise Bachforelle, Lachs, Barbe, Brachsmen usw.) könnte daher eine grössere Wassertiefe notwendig sein.

Seit der Inkraftsetzung der Restwasserregelung gemäss GSchG im Jahre 1991 hat sich die Situation für die Wanderung der Fische verändert. Der Ausbau der Wasserkraft hat deutlich zugenommen. Die Anlagen verfügen aber vermehrt über Fischaufstiegshilfen. Damit werden mancherorts Gewässerabschnitte für Fische nach Jahrzehnten wieder zugänglich (Beispiel Lavey, Rhône, Kanton Wallis). Die Sanierung der Fischwanderung bei den Kraftwerkenanlagen wird in den nächsten Jahren die Vernetzung weiter verbessern. Die Wanderung in Restwasserstrecken gewinnt somit zunehmend an Bedeutung. Wissenschaftliche Grundlagen zu den ökologischen Ansprüchen an die freie Fischwanderung gemäss Restwasserregelung, insbesondere für grosse Fische, sind daher erwünscht.

Aufgrund einer konkreten Anfrage des Kantons Glarus zur Seeforelle soll die von der Bach- und Seeforelle<sup>2</sup> benötigte Wassertiefe auf einer möglichst wissenschaftlichen Basis definiert werden. Zudem soll aufgezeigt werden, wie die dazu notwendige Abflussmenge hergeleitet werden kann.

<sup>1</sup> Botschaft vom 29. April 1987 zur Volksinitiative «zur Rettung unserer Gewässer» und zur Revision des Bundesgesetzes über den Schutz der Gewässer, S. 1133.

<sup>2</sup> Die Seeforelle ist gemäss der Roten Liste eine stark gefährdete Art. Zudem besteht eine mittlere nationale Priorität bezüglich der Erhaltung und Förderung und somit ein klarer Bedarf an gezielten Massnahmen. Die Bachforelle ist gemäss der Roten Liste eine potenziell gefährdete Art. Es besteht eine mässige nationale Priorität bezüglich der Erhaltung und Förderung sowie zumindest ein Bedarf an allgemeinen Habitatverbesserungen (BAFU 2011).

### 1.3 Vorgehen

In einer begrenzten **Literaturstudie** wurde eine Reihe von wissenschaftlichen Zeitschriften nach Stichworten wie «passage flow», «residual flow», «critical depth» usw. kombiniert mit den Stichworten «salmo» und «trout» durchsucht. Folgende Journals wurden gezielt durchforstet: Journal of Fish Biology, Transactions of the American Fisheries Society, North American Journal of Fisheries Management und Fisheries. Zudem wurde «graue Literatur» (Berichte, Gutachten usw.) aus dem englischen, deutschen und französischen Sprachraum gesucht. Schliesslich wurde eine eigene Datenbank mit etwa 70'000 Literaturzitate durchsucht. Zudem stellte uns ein französisches Ökobüro (IRAP, Annecy) Unterlagen zusammen, nach denen in Frankreich Restwasserabklärungen durchgeführt werden<sup>3</sup>.

Die Literaturstudie hat eine Reihe von Fragen ergeben, die einigen Fachleuten vorgelegt wurden. Aus den Erkenntnissen der Literaturstudie und den **Expertenbefragungen** wurde ein Modell erarbeitet, aus dem schliesslich Empfehlungen für die Mindestwassertiefe hergeleitet wurden.

16 Kantone<sup>4</sup> wurden 2012 nach umgesetzten oder geplanten Restwasserregimes mit starkem Bezug auf die Seeforelle (BL bzgl. Lachs) befragt. Von 14 Kantonen erhielten wir eine Antwort. 8 Kantone gaben zudem Auskunft zu den angewandten Methoden zur Herleitung der für die Fischwanderung notwendigen Restwassermenge. Die Umfrageergebnisse wurden aufgrund vieler eigener Erfahrungen bewertet. Darauf aufbauend wurden situationsbezogene Empfehlungen formuliert.

---

<sup>3</sup> Für den französischen Sprachraum gibt es offenbar kaum konkrete Anhaltspunkte zur notwendigen Wassertiefe. Im Allgemeinen wird lediglich auf die ökologischen Anforderungen verwiesen.

<sup>4</sup> BE, BL, GE, GL, GR, JU, NE, OW, SG, SZ, TI, TG, UR, VD, VS, ZH

## 2 Biologische Grundlagen

### 2.1 Zeit der Laichwanderung

Salmoniden führen grundsätzlich das ganze Jahr über Wanderungen zumindest auf kürzere Distanzen durch. Diese kleinräumigen Bewegungen sind im Allgemeinen mit einem Habitatwechsel verbunden. Da Salmoniden verschiedenste Habitate für ihre Entwicklung benötigen, ist die Möglichkeit für solche Kurzstanzwanderungen von grosser Bedeutung für das Überleben der Populationen.

Die Wanderung zu den Laichplätzen und zurück zu den Standplätzen erfolgt oft über grössere Distanzen. Bei der Seeforelle kann sie sogar mehr als 100 km betragen (z. B. im Alpenrhein). Der Zeitpunkt der Laichwanderung hängt von verschiedenen Faktoren ab und ist daher variabel (Gibbins et al. 2008, Abb. 1). Prinzipiell setzt sie um so früher ein, je grösser die Distanz zwischen den Nahrungshabitaten und dem Laichhabitat ist (Jonsson & Jonsson 2011, S. 271).

In der Basse Dranse (französischer Genferseezufluss) beginnt der Aufstieg der Seeforellen aus dem Genfersee aber bereits im Mai/Juni (Nachweis über Fischpasszählungen), obwohl die Distanz zu den Laichplätzen nur wenige Kilometer beträgt (Caudron 2010, Chasserieu & Caudron 2011). Auch der Einstieg in die Bodenseezuflüsse setzt bereits im Juni ein (pers. Mitt. P. Rey, Hydra). In Reichenau am Alpenrhein, 90 km oberhalb des Bodensees erscheinen die Frühaufsteiger im Juli/August. In den meisten Seeforellengewässern der Schweiz geht man aber davon aus, dass die frühesten Tiere erst im Spätsommer auftauchen. Die Hauptaufstiegszeiten liegen zwischen Oktober und Dezember (Abb. 1).

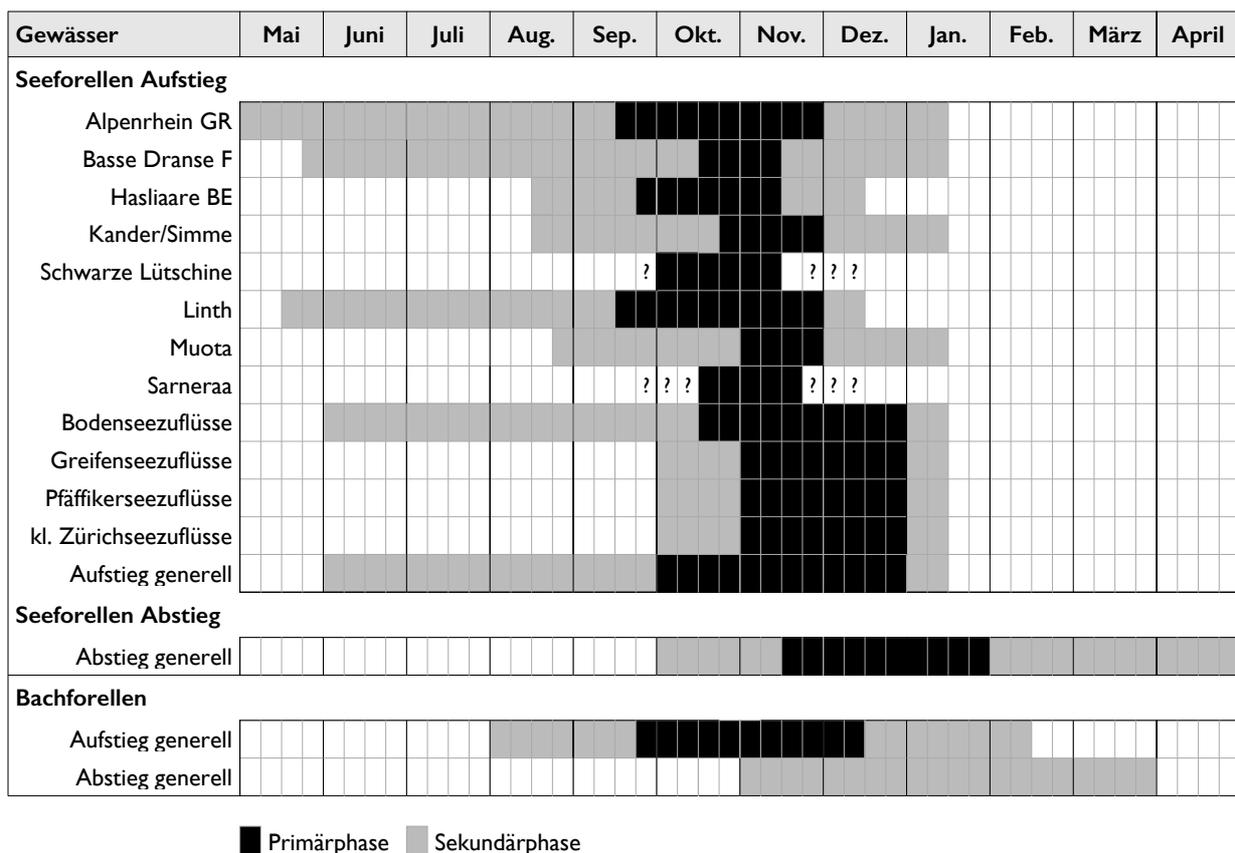


Abb. 1 Ungefähre Wanderperioden von See- und Bachforelle in einigen Fliessgewässern sowie daraus abgeleitete generalisierte Darstellung.

Datengrundlage: Fischereiinspektorat BE, Abteilung Jagd und Fischerei GL, Amt für Jagd und Fischerei GR, Fischerei- und Jagdverwaltung ZH, Caudron 2010, Chasserieu & Caudron 2011, Dönni & Beffa 2011, Dönni 2012, Hydra (P. Rey).

Prinzipiell wandern die verlaichten Fische ab, sobald der Wasserstand hoch genug ist. Je länger sie im Bereich der Laichplätze verweilen müssen, desto länger sind sie möglicherweise einer verstärkten Prädation und einem erhöhten Energieverbrauch<sup>1</sup> ausgesetzt (Jonsson & Jonsson 2011, S. 388 ff.). Es scheint dabei aber auch eine individuell Komponente zu geben. Möglicherweise wandern Spätaufsteiger später ab (Rustadbakken et al. 2006). Im Alpenrhein verbleibt maximal ein Drittel der Seeforellen in der Nähe der Laichplätze und wandert erst im Frühling ab (pers. Mitt. A. Peter). Details zu diesen Expertenaussagen finden sich in Anhang A.

Salmoniden sind während der Wanderung, insbesondere während der Abwanderung<sup>2</sup>, einer verstärkten Prädation ausgesetzt, insbesondere bei tiefen Wasserständen (Jonsson & Jonsson 2011, S. 274). Es gibt denn auch Beobachtungen, dass Salmoniden bei tiefem bzw. klarem Wasser hauptsächlich während der Dämmerung und der Nacht wandern. Bei höherem Abfluss und trübem Wasser finden aber auch Tageswanderungen statt (Rustadbakken et al. 2006). Im Alpenrhein wandern die Seeforellen bevorzugt während der Nacht (Mendez 2007).

## 2.2 Bedeutung von Hoch- und Niederwasser

Die Ansicht, dass ein **Hochwasser** oder zumindest eine deutliche Abflusszunahme ein wichtiger Auslöser für den Aufstieg der Salmoniden ist, ist weit verbreitet (z. B. Jonsson & Jonsson 2011, S. 277 ff., Expertenmeinungen Anhang A). In der wissenschaftlichen Literatur herrscht aber kein Konsens darüber. So werden Salmonidenwanderungen sowohl bei hohem als auch bei tiefem, bei steigendem als auch bei fallendem und bei konstantem als auch variablem Abfluss beschrieben (z. B. Dahl et al. 2004, Gibbins et al. 2008, Mendez 2007, Rustadbakken et al. 2006).

Auch in der Praxis gibt es unterschiedliche Erfahrungen. Beispielsweise wurden in einer Fischauftiegsanlage an der Töss nach jedem Hochwasser deutlich mehr Bachforellen beobachtet (Aquarius 2011). Für die Muota konnte dies bei Fischauftiegszählungen hingegen nicht belegt werden (Dönni & Beffa 2011). An der Dranse (französischer Genferseezufluss) begünstigt der regelmässige Schwall den Aufstieg der Seeforelle (Caudron 2010, Chasserieu & Caudron 2011). Im Alpenrhein sind hingegen die Wanderungsdistanzen bei Sunk am grössten (Mendez 2007). Höhere Abflüsse wirken sich offenbar vor allem in kleineren Gewässern günstig für die Wanderung aus (Jonsson & Jonsson 2011, S. 274).

Unbestritten scheint hingegen, dass sich die aufsteigenden Seeforellen vor dem Laichgewässer sammeln, wenn der Einstieg wegen tiefem Wasserstand nicht möglich ist, dass sie ein Hochwasser abwarten und dass dann ein Run einsetzt. Auch in den Laichgewässern selber wird oft beobachtet, dass sie vor einem Hindernis allenfalls mehrere Tage warten, um dann bei einem Hochwasser aufzusteigen.

Es ist derzeit also umstritten, welche Rolle Hochwasser als auslösender Faktor für die Aufwärtswanderung spielen. Gibbins et al. (2008, S. 217) gehen davon aus, dass der für die Laichwanderung genutzte Abfluss sich von von Jahr zu Jahr und von Gewässer zu Gewässer variiert.

**Niederwasser** können zu einer verzögerten Laichwanderung sowie zu einem grösseren Energieaufwand führen. Wenn die Fisch zu spät die Laichplätze erreichen, besteht die Gefahr, dass der optimale Zeitpunkt der Emergenz der Brütlinge im Frühling verpasst wird. Niederwasser erhöhen zudem den Fortpflanzungserfolg kleinerer Fische. Kleinere Weibchen produzieren aber weniger Eier (Gibbins et al. 2008, S. 199, Jonsson & Jonsson 2011, S. 274 ff., S. 504).

<sup>1</sup> Das kann sich u.a. durch eine verstärkte Verpilzung der geschwächten Tiere äussern, wie dies in den St. Gallischen Bodensee zuflüssen Goldach und Steinach festgestellt wurde (pers. Mitt. P. Rey, Hydra).

<sup>2</sup> Seeforellen sind während der Aufwanderung energiegeladen und hoch motiviert. Sie sind dann einem geringen Prädationsdruck ausgesetzt (zumindest dort, wo Grossraubtiere weitgehend fehlen). Nach dem Ablichten sind sie aber massiv geschwächt. Insbesondere wenn für die Abwanderung Kraftanstrengung zur Überwindung seichter Stellen nötig sind. Die Seeforellen sind dann einer verstärkten Prädation z. B. durch Krähe und Kleinsäuger ausgesetzt (pers. Mitt. P. Rey, Hydra).

Die Population kann somit aufgrund restriktiver Restwasserbedingungen abnehmen. Es ist daher wichtig, dass eine uneingeschränkte Wanderung, insbesondere auch der grossen Individuen, möglich ist. Die Mindestwassertiefe sollte sich daher an den grössten Individuen der Population orientieren. Die natürliche Abflusssituation muss immer mitberücksichtigt werden<sup>3</sup>.

### 2.3 Bedeutung der Wassertiefe

Die Abflussmenge und damit die Restwasserdotierung bestimmen die Wassertiefe, die den wandernden Fischen zur Verfügung steht<sup>4</sup>. Sämtliche einheimische Fischarten führen mehr oder weniger ausgeprägte Wanderungen durch. Bei der Bachforelle und insbesondere bei der Seeforelle ist die herbstliche Laichwanderung aufwärts zu den Laichplätzen besonders auffällig. Nach dem Laichen wandern die adulten Tiere zurück in ihre angestammten Lebensräume. Ausserhalb der Laichzeit gibt es eher kürzere Wanderung z. B. zwischen Unterstand und Nahrungshabitat.

Die häufigsten Wanderhindernisse in der Schweiz sind Querbauwerke (Schwellen, Sperren, Wehranlagen usw.). Daneben gibt es aber auch Bachabschnitte mit zeitweise zu geringen Abflüssen für die Fischwanderung. Neben den natürlicherweise auftretenden Niederwassern als Folge von langen Trockenperioden oder von Versickerungen führt die Wasserausleitung (meist durch hydroelektrische Nutzung oder landwirtschaftliche Bewässerung) zu künstlichen Niederwasserabflüssen.

Salmoniden müssen sich für die Wanderung, wie andere Fischarten auch, frei im Wasserkörper bewegen können. Zur Vermeidung von Verletzungen (Schürfungen, Schuppenverluste) ist ein Abstand von der Sohle notwendig. Um dem Prädationsdruck durch Räuber zu entgehen und um die Schwimmleistung nicht zu beeinträchtigen, benötigen sie zudem einen Abstand zur Wasseroberfläche. Damit wird auch gewährleistet, dass die Schwanzflosse vollständig unter Wasser ist, denn sie ist das primäre Antriebsorgan des Fisches (AG-FAH 2011)<sup>5</sup>.

Fische vermeiden somit nach Möglichkeit, dass ihre Rückenflosse aus dem Wasser ragt und der Körper im direkten Kontakt zur Sohle steht (Adam et al. 2014, S. 119 ff., BMLFUW 2012, S. 10 ff.). Zu seichte Gewässerabschnitte können deshalb zu einem erhöhtem Energieaufwand, zu einer höheren Mortalität und allenfalls zu einer Unterbrechung der Wanderung führen. Ist die Untiefe nicht allzu lang, kann sie auch mit einem riskanten und Energie zehrenden Sprint überwunden werden.

Untersuchungen von Sautner et al. (1984) am Ketalachs (*Oncorhynchus keta*) deuten darauf hin, dass die Mindestwassertiefe von der Länge der zu passierenden Strecke abhängt<sup>6</sup>. Schwevers et al. (2004) zeigten, dass Bachforellen als absolutes Minimum eine Wassertiefe von lediglich 7 cm für die Passage von Durchlässen (Verrohrungen) von bis zu 40 m Länge benötigen. Selbst über 50 cm lange Bachforellen passierten Abschnitte mit einer Wassertiefe von weniger als 10 cm. Zudem haben Untersuchungen im Bodenseeraum gezeigt, dass Seeforellen bis zu 100 m in einer Wassertiefe von wenigen Zentimetern absteigen können (pers. Mitt. P. Rey, Hydra).

In wie weit bei mehreren Untiefen in Folge die Mindestwassertiefe höher sein müsste (kumulativer Effekt), liess sich anhand der Literatur nicht beantworten. Es ist aber offensichtlich, dass für jede zu überwindende Untiefe zusätzliche Energie aufgewendet werden muss, die schlussendlich für die anstrengende Laichperiode und den anschliessenden Abstieg fehlt.

<sup>3</sup> Im Rahmen der Restwasseruntersuchungen wird festgestellt, in wie weit die Restwassersituation eine Verschärfung gegenüber dem hydrologisch unbeeinträchtigten Zustand bedeutet.

<sup>4</sup> Neben der Wandertiefe bestimmt die Abflussmenge auch das Angebot an Habitat, insbesondere auch an Laichhabitat für die Fische. Zudem hat sie über die benetzte Gewässerfläche einen grossen Einfluss auf das Nahrungsangebot.

<sup>5</sup> Unsere Messungen an 48 Seeforellen haben gezeigt, dass die Breite der natürlich ausgebreitete Schwanzflosse im Mittel etwa 2.6 cm grösser ist als die Körperhöhe. Bei 58 vermessenen Bachforellen war sie hingegen 1 cm kleiner.

<sup>6</sup> Beträgt die Streckenlänge <3 m ist eine Mindestwassertiefe von 13 cm nötig, bei 30–60 m sind es 17 cm.

## 2.4 Andere Faktoren

In der Literatur wird immer wieder darauf hingewiesen, dass neben der Wassertiefe auch die **Fliessgeschwindigkeit** für die Passage flussaufwärts von Bedeutung ist. Da es dabei primär um maximal tolerierbare Fliessgeschwindigkeiten geht, die für Salmoniden relativ hoch angesetzt werden ( $>1.5$  m/s), in Restwasserstrecken mit geringen Wassertiefen aber meist tiefe Fliessgeschwindigkeiten herrschen, wurde dieser Aspekt nicht weiter berücksichtigt.

In die Überlegungen zur Passage von Restwasserstrecken und zur Schwimmleistung von Fischen spielt auch die **Wassertemperatur** hinein (Anhang B.2), zumal sie durch die Ausleitung von Wasser oftmals verändert wird. Dieser Faktor wurde ebenfalls nicht untersucht<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Eine Beurteilung der Temperaturverhältnisse in der Restwasserstrecke inklusive Auswirkung auf die Fischfauna ist mit dem Modul Temperatur des Modulstufenkonzeptes möglich (Dübendorfer et al. 2011).

### 3 Die Mindestwassertiefe

#### 3.1 Symbole und Definitionen

L	Totallänge <sup>1</sup> des Fisches
L <sub>max</sub>	Totallänge der grössten vorhandenen Fische
H <sub>max</sub>	Körperhöhe (Rumpfhöhe ohne Rückenflosse) der grössten vorhandenen Fische
h <sub>min</sub>	Mindestwassertiefe
l <sub>max</sub>	maximal passierbare Streckenlänge

#### 3.2 Grundlagen

Für eine sichere und Energie sparende Wanderung ist ein ausreichend grosser Abstand zur Gewässer-  
sohle und zur Wasseroberfläche notwendig (Kap. 2.3). Die Mindestwassertiefe muss demnach deutlich  
grösser als die Körperhöhe der grössten zu erwartenden Fische sein. In der Schweiz stützt man sich  
oft auf die Empfehlungen aus dem Kanton St. Gallen, die von einer generellen Mindestwassertiefe von  
20 cm für die Bach- und von 30 cm für die Seeforelle ausgehen (Aquarius 2000)<sup>2</sup>. Für Forellengewässer,  
die auch im unbeeinflussten Zustand nicht durchwegs eine Wassertiefe von 20 cm aufweisen, wird  
eine spezifische Einschätzung der Durchwanderbarkeit vorort empfohlen.

In Deutschland und Österreich, teilweise auch in den USA, orientiert man sich weniger an fixen Was-  
sertiefen als an der Körperhöhe der grössten zu erwartenden Fischart. Adam et al. (2014, S. 119 ff.) for-  
dern im Rahmen ihrer Bemessungsvorschläge für Fischaufstiegshilfen eine generellen Mindestwasser-  
tiefe von der 2.5fachen Körperhöhe. Dem schliesst sich auch der Leitfaden für Fischaufstiegshilfen aus  
Österreich an (BMLFUW 2012, S. 32–33). Er fordert aber zusätzlich, dass eine Wassertiefe von 20 cm  
nicht unterschritten werden darf .

Da diese Kennwerte auch für Umgehungsgerinne gelten und in Anlehnung an die natürliche Gewäs-  
sercharakteristik definiert wurden, sind sie auch auf Restwasserstrecken anwendbar. In Baden-Würt-  
temberg lautet denn auch die Empfehlung, dass die generelle Mindestwassertiefe in Restwasserstre-  
cken die 2 bis 3fache Körperhöhe betragen soll (Dehus 2005).

In den USA wird oft auf die Arbeit von Thompson (1972) verwiesen, in der die minimal notwendige  
Wassertiefe für die Laichwanderung flussaufwärts mit 12 bzw. 18 cm für kleine und grosse Forellen  
sowie mit 24 cm für Grosssalmoniden angegeben wird. Diese Werte wurden anhand der 1fachen Kör-  
perhöhe definiert (Reiser et al. 2006).

Einige weitere Angaben finden sich in Tabelle 1 und weitere Einzelheiten in Anhang B.

<sup>1</sup> Länge des Fisches von der Schnautzenspitze bis zum Ende der natürlich ausgebreiteten Schwanzflosse

<sup>2</sup> Auf welcher Grundlage diese Werte basieren, liess sich nicht mehr eruieren. Vermutlich orientieren sie sich an der Körper-  
höhe der Fische.

**Tab. 1** Auswahl von Empfehlungen für Mindestwassertiefen für die freie Fischwanderung aus der gesichteten Literatur.  $H_{\max}$  = Körperhöhe der grössten Fische.

Staat	Gewässertyp	Fischart	Mindestwassertiefe	Quelle	
Schweiz	Restwasserstrecken	Bachforelle	20 cm	Aquarius 2000	
	Restwasserstrecken	Seeforelle	30 cm	Aquarius 2000	
Deutschland	Fischaufstiegshilfen	nicht spezifiziert	$2.5 \times H_{\max}$	Adam et al. 2014	
	Sohlgleiten	Bach-/Seeforelle	$1.5 \times H_{\max}$	Schneider 2009	
	Restwasserstrecken	nicht spezifiziert	$2-3 \times H_{\max}$	Dehus 2005	
	Restwasserstrecken (pessimale Profile)				
		Forellenregion	nicht spezifiziert	10–15 cm	TLUG (2009)
		Äschenregion	nicht spezifiziert	15–20 cm	TLUG (2009)
		Äschenregion	Grosssalmoniden	30 cm	TLUG (2009)
	Barbenregion	nicht spezifiziert	30 cm	TLUG (2009)	
	Brachsamenregion	nicht spezifiziert	40 cm	TLUG (2009)	
Österreich	Fischaufstiegshilfe	nicht spezifiziert	$2.5 \times H_{\max}$ (min. 20 cm)	BMLFUW 2012	
	Epirhithral (Gefälle >10%)	nicht spezifiziert	15 cm	QZV Ökologie OG (2010)	
	Epirhithral (Gefälle 3–10%)	nicht spezifiziert	20 cm	QZV Ökologie OG (2010)	
	Epirhithral (Gefälle <3%)	nicht spezifiziert	25 cm	QZV Ökologie OG (2010)	
	Meta-/Hyporhithral	nicht spezifiziert	30 cm	QZV Ökologie OG (2010)	
	Epipotamal	nicht spezifiziert	40 cm	QZV Ökologie OG (2010)	
Frankreich	Durchlass	Bachforelle	15 cm	Larinier et al. 1994	
	Durchlass	Lachs/Meerforelle	30 cm	Larinier et al. 1994	
USA	nicht spezifiziert	kleine Forellen	12 cm	Thompson 1972	
	nicht spezifiziert	grosse Forellen	18 cm	Thompson 1972	
	nicht spezifiziert	Grosssalmoniden	24 cm	Thompson 1972	
	Alaska	generell	nicht spezifiziert	$2.5 \times$ Schwanzflossenhöhe	Hotchkiss & Frei 2007
	Maine	generell	nicht spezifiziert	$1.5 \times H_{\max}$	Hotchkiss & Frei 2007
	California	generell	juvenile Salmoniden	15 cm	Hotchkiss & Frei 2007
			adulte Salmoniden	30 cm	Hotchkiss & Frei 2007

Die Definition der Mindestwassertiefe anhand der **Körperhöhe** wird den unterschiedlichen Fischbeständen gerechter als eine absolute Wassertiefe. Sie impliziert beispielsweise, dass ein Seeforellengewässer grössere Wassertiefen aufweisen muss, als ein benachbartes Gewässer, in das wegen eines natürlichen Aufstiegshindernisses keine Seeforellen einsteigen können. Dieses Vorgehen berücksichtigt aber auch, dass Bachforellen in alpinen und voralpinen Gewässern mit tieferen Wassertemperaturen aufgrund des geringeren Wachstums weniger gross werden als in Gewässern vergleichbarer Grösse in tieferen Lagen. Entsprechend geringere Mindestwassertiefen zur Gewährleistung der Fischwanderung können hier angesetzt werden.

Somit ist die Körperhöhe der vorkommenden Fischarten ein massgeblicher Parameter für die Berechnung der Mindestwassertiefe. Die Körperhöhe der Salmoniden im betroffenen Gewässer ist meistens nicht bekannt. Sie kann aber anhand der Totallänge der grössten Individuen geschätzt werden (Abb. 3)<sup>3</sup>. Gemäss den uns bekannten Daten kann die Körperhöhe von Seeforellen max. knapp 22 cm, diejenige von Bachforellen gut 16 cm erreichen (Anhang B.1).

<sup>3</sup> Zur Definition der «grössten» Fische vgl. Anhang D.

### 3.3 Empfehlungen

#### 3.3.1 Vorgaben für die Mindestwassertiefen

Es werden für drei Situationen in der Restwasserstrecke Mindestwassertiefen empfohlen (Abb. 2). Die Empfehlungen basieren auf den biologischen Minimalanforderungen der grössten zu erwartenden Bach- bzw. Seeforellen (Kap. 2). Sie sind als Richtwerte zu verstehen, von denen aufgrund der spezifischen Situation und mit entsprechender Begründung in begrenztem Masse abgewichen werden kann. Die Einzelheiten zur Herleitung der Empfehlungen finden sich in den Anhängen B und C.

- **Generell** muss eine durchgehende Rinne mit einer Mindestwassertiefe von der 2.5fachen Körperhöhe vorhanden sein, wobei eine Tiefe von 20 cm nicht unterschritten werden darf. Bei dieser Wassertiefe ist für Salmoniden eine Wanderung weitgehend ohne namhaften Energieaufwand möglich.
- **Untiefen** sind kürzere Abschnitte der Restwasserstrecke, in denen die generelle Mindestwassertiefe aufgrund der natürlichen Gerinnetopografie unterschritten wird (z. B. bei Schnellen). Sie müssen eine durchgehende Rinne mit einer Mindestwassertiefe von der 2fachen Körperhöhe aufweisen. Bei dieser Wassertiefe ist für Salmoniden eine Wanderung nur mit beträchtlichem Energieaufwand möglich. Die Länge der zu durchschwimmenden Rinne der Untiefe ist daher begrenzt.

Aus diesen Vorgaben ergeben sich die folgenden Empfehlungen:

- Die Maximallänge der Untiefe (bzw. der Unterschreitung der generellen Wassertiefe) entspricht dem Fünfzigfachen der Fischlänge:  $l_{\max} = 50 \times L_{\max}$ .
- Längere Untiefen sind nicht zulässig, d. h. es gilt dann die generelle Mindestwassertiefe.

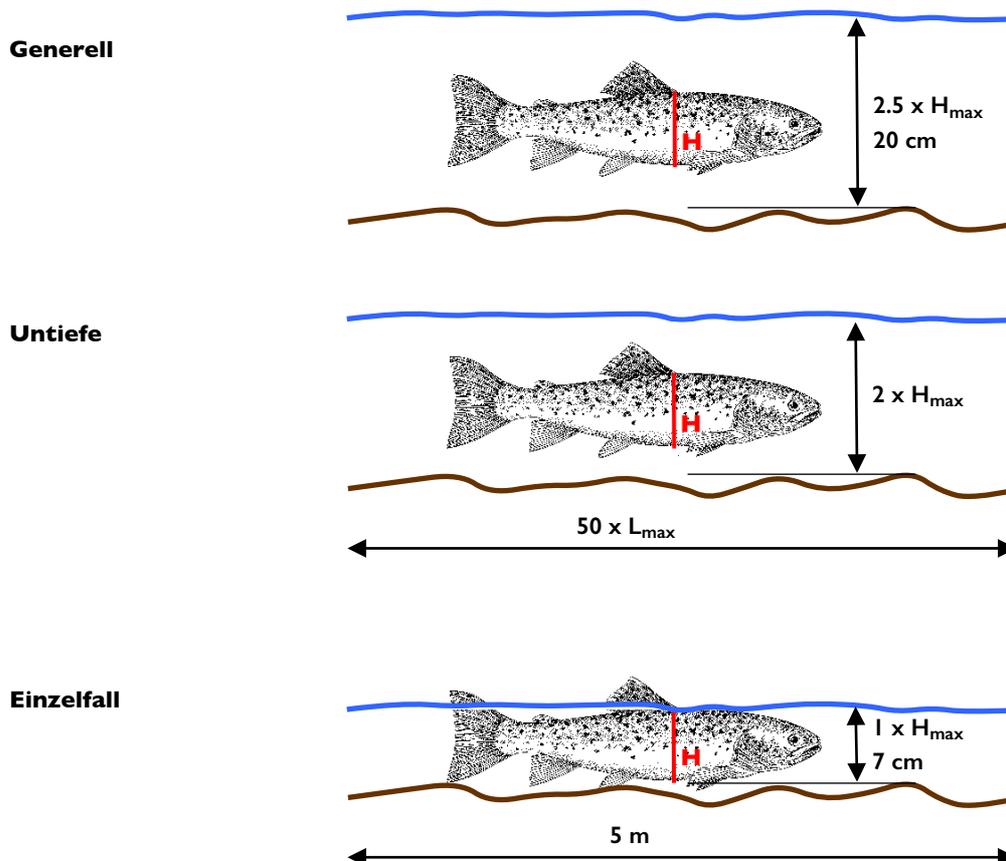
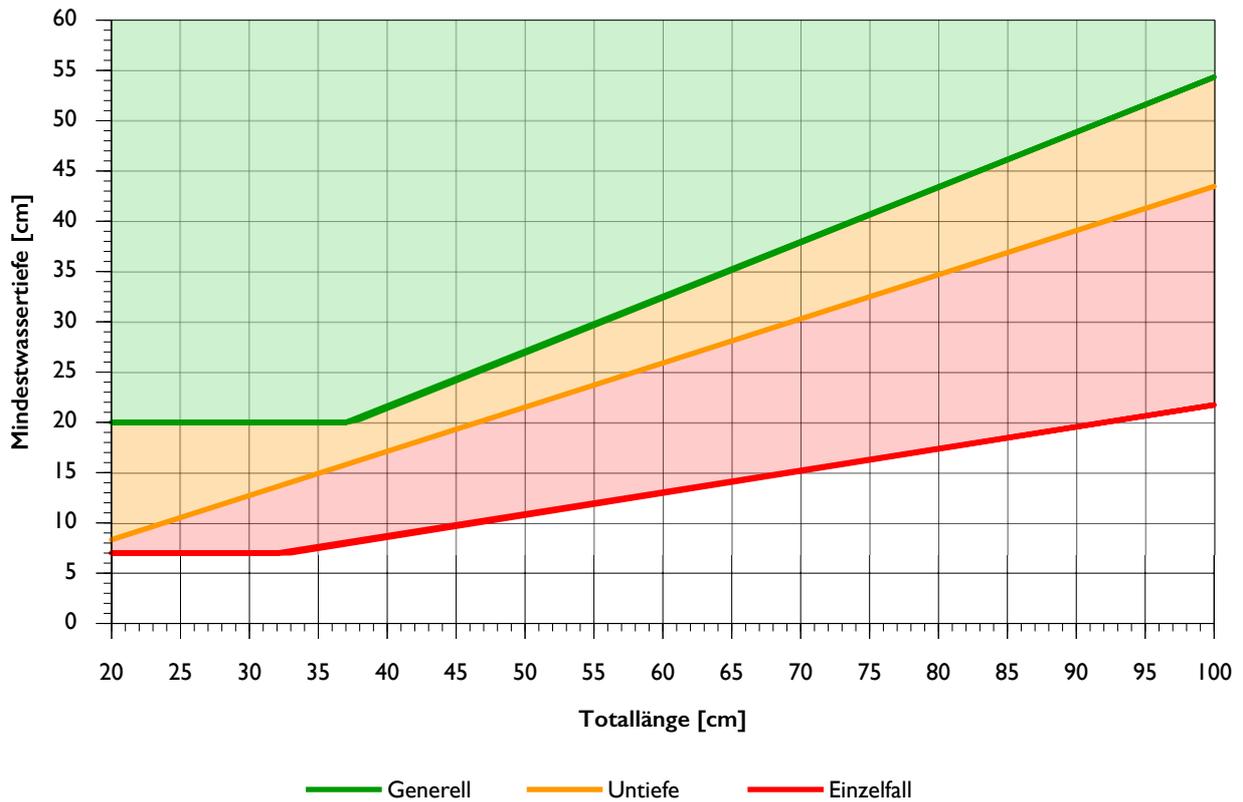


Abb. 2 Empfehlungen für die Mindestwassertiefen und die Maximallänge für die drei unterschiedenen Situationen in einer Restwasserstrecke. Grafik © B. Gysin, Hinterkappelen.



Totallänge [cm]	Körperhöhe [cm]	Mindestwassertiefe [cm]		
		Generell $2.5 \times H_{\max} / \text{min. } 20 \text{ cm}$ $l_{\max} = \infty$	Untiefe $2 \times H_{\max}$ $l_{\max} = 50 \times L_{\max}$	Einzelfall $1 \times H_{\max} / \text{min. } 7 \text{ cm}$ $l_{\max} = 5 \text{ m}$
20	4.2	20	8	7
25	5.3	20	11	7
30	6.4	20	13	7
35	7.5	20	15	7
40	8.6	21	17	9
45	9.7	24	19	10
50	10.8	27	22	11
55	11.9	30	24	12
60	12.9	32	26	13
65	14.0	35	28	14
70	15.1	38	30	15
75	16.2	41	32	16
80	17.3	43	35	17
85	18.4	46	37	18
90	19.5	49	39	20
95	20.6	52	41	21
100	21.7	54	43	22

Abb. 3 Empfohlene Mindestwassertiefen in Abhängigkeit der Totallänge der grössten vorkommenden See- oder Bachforellen und der Längstopografie der Restwasserstrecke. Die Berechnung der Körperhöhen aus den Totallängen erfolgt gemäss Anhang B.1.

- In **Einzelfällen** darf die Mindestwassertiefe lediglich das 1fache der Körperhöhe, aber mindesten 7 cm betragen. Die Länge dieser Hindernisse darf 5 m nicht überschreiten. Diese Ausnahmeregelung gilt z. B. für glatte flächige Sohlenverbauungen oder Felsrippen.

Die Mindestwassertiefe ergibt sich direkt aus der maximalen Körperhöhen der grössten Fische. Ist nur deren Totallänge bekannt, kann sie Abbildung 3 entnommen werden.

### 3.3.2 Weitere Aspekte

- In Trockenperioden kommt es auch unter **natürlichen Abflussverhältnissen** temporär zu tiefen Wasserständen, die die Passierbarkeit für Fische einschränken oder gänzlich verhindern. In wie weit deshalb von den vorgeschlagenen Mindestwassertiefen abgewichen werden darf, muss im Einzelfall beurteilt werden.
- Für längere Abschnitte mit **anstehendem Fels** muss die Mindestwassertiefe unter Berücksichtigung der natürlichen Verhältnisse spezifisch festgelegt werden.
- Die Auswirkungen des **kumulativen Effektes** von mehrfachen Unterschreitungen der generellen Mindestwassertiefe entlang einer Restwasserstrecke lassen sich nicht quantifizieren (Details vgl. Anhang C.5).

## 4 Herleitung der notwendigen Restwassermenge

Zur Gewährleistung der Fischwanderung in der Restwasserstrecke muss der minimal notwendige Abfluss definiert werden, der die benötigte Mindestwassertiefe entlang einer durchgehenden Rinne garantiert. Hierfür sind Feldaufnahmen notwendig, die in bezüglich der Wassertiefe kritischen Abschnitten durchgeführt werden. Oft sind dies naturnahe Abschnitte mit geringem Gefälle und aufgeweiteter Gerinne oder kanalisierte Abschnitte ohne Talwegbildung. Besonders kritische Abschnitte sind z. B. Stellen, wo der benetzte Teil des Gerinnes von einer Seite auf die andere wechselt.

Zur Herleitung der Mindestrestwassermenge werden in der Schweiz drei verschiedene Verfahren angewandt (Tab. 2). Die Auswahl des geeignetsten Verfahrens erfolgt situationsbezogen. Die **Genauigkeit** der erhobenen Datengrundlage ist bei sorgfältig durchgeführten Messungen bei allen drei Verfahren in etwa gleich gross, da im Prinzip dieselbe Art der Feldmessungen (Messung von Wassertiefen bzw. Sohlenhöhen) durchgeführt werden. Ein kleiner Stein oder eine kleine Vertiefung an der Messstelle – z. B. durch einen im bewegten Wasser nicht sichtbaren Tritt einer vorhergehenden Messung – kann lokal bereits zu einer Abweichung von mehreren Zentimetern führen. Solche Ungenauigkeiten wiegen umso schwerer je weniger Messpunkte erhoben werden.

Jedes der drei Verfahren hat seine **Vor- und Nachteile** und ist für bestimmte Bedingungen am besten geeignet (Tab. 2). Dotierversuche können im Allgemeinen nur bei bestehenden Wasserentnahmen mit einer ausreichend genauen Dotierreinrichtung durchgeführt werden. Gekoppelt mit Profilmessungen eignen sie sich vor allem in stark strukturierten Abschnitten, wo der Aufwand für den Aufbau eines hydraulischen Modells zu hoch wäre. Sind in solchen Strecken keine Dotierversuche möglich, müssen die Profilmessungen bei verschiedenen Niederwasserabflüssen gemacht werden. 2d-Modellierung eignen sich besonders bei wenig strukturierten Gewässern.

Sind kritische Abschnitte auch bei Niederwasser nicht wasserbar und sind Messungen von einem Boot oder Flugzeug aus nicht möglich, wird durch gutachterliche Einschätzung unter Verwendung des Vorsorgeprinzips eine grosszügige Restwassermenge festgelegt. Nach Umsetzung des Projekts soll die Restwassermenge überprüft und bei Bedarf angepasst werden.

Aus der Expertenbefragung ging hervor, dass **Querprofil**messungen in den meisten Kantonen angewandt werden (Anhang A). Sie haben gegenüber der Messung der Wassertiefen entlang von **Längsprofilen** den Vorteil, dass auch Aussagen zur benetzten Breite gemacht werden können. Querprofile liefern aber entlang der vom Fisch zu passierenden Rinne nur einen Messpunkt für die Wassertiefe. Folglich müssen in einem kritischen Abschnitt viele Querprofile vermessen werden. Längsprofile haben bezüglich der Durchgängigkeit eine bessere Aussagekraft, da sie auf deutlich mehr Messpunkten basieren.

Ein weiterer Nachteil der Querprofile liegt darin, dass sie exakt eingemessen bzw. markiert werden müssen, damit bei einem anderen Abfluss an genau derselben Stelle gemessen werden kann. Bei Längsprofilen ist ein Einmessen nicht nötig. Im Allgemeinen ist die tiefste Rinne gut erkennbar. Zudem kann sie sich bei unterschiedlichen Abflüssen verschieben.

Bei verbauten Gewässern mit verflachter Sohle gibt es oft keine klar erkennbare Rinne. Insbesondere in breiten Abschnitten kann es dann schwierig sein, jeweils die tiefste Stelle im Querschnitt zu finden. Dasselbe gilt für breite Gewässer mit mehreren parallel verlaufenden Rinnen, die zudem in Sackgassen münden können. Mit diesen Herausforderungen sind bei Restwasserabfluss aber auch die aufsteigenden Fische konfrontiert.

**Tab. 2 In der Schweiz übliche Verfahren zur Herleitung des Restwasserabflusses, der eine Mindestwassertiefe zur Gewährleistung der Fischwanderung garantiert.**

Verfahren	Prinzip	Was wird Im Feld gemessen?	Vorteile	Nachteile	Anwendungsempfehlung
Dotierversuche	Die Restwasserstrecke wird mit unterschiedlichen Abflüssen dortiert.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Messung der Wassertiefen entlang von Quer- und Längsprofilen in bzgl. der Wassertiefe kritischen Abschnitten</li> <li>• Abflussmessungen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technisch einfach durchzuführen und auszuwerten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Messungen nur während der Dotierversuche und Aussagen nur mit den dotierten Wassermengen möglich.</li> <li>• Je länger die Restwasserstrecke desto grösser der Zeitaufwand pro Dotierabfluss (Wartezeit bis sich Dotierabfluss eingestellt hat).</li> <li>• Messungen entlang der tiefsten Stelle im Querschnitt (Längsprofil) in breiten Abschnitten ohne ausgeprägtem Talweg schwierig.</li> <li>• Erfassung aller kritischen Stellen mit Querprofilen schwierig.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nur bei bestehenden Anlagen zur Wasserentnahme möglich.</li> <li>• Bei Dotierabflüssen watbar.</li> <li>• Sehr heterogene Gerinne mit vielen Steinblöcken, Totholz, Wasserpflanzen oder anderen Strukturen.</li> <li>• Stark verzweigtes Gerinne.</li> </ul>
Numerisch-hydraulisches 2d-Modell	Vermessung des Gerinneabschnittes bei tiefem Wasserstand und Aufbau eines Geländemodells. Erstellen eines numerisch-hydraulischen 2d-Modells, das die Berechnung von Wassertiefen, mittleren Fließgeschwindigkeiten und Strömungsrichtungen für einen beliebigen Abfluss und für einen beliebigen Punkt im Gerinne erlaubt.	Detaillierte Vermessung der Sohlenhöhe und des Böschungsfusses des gesamten Gerinnes mittels land- (Theodolit) oder luftgestützter (LIDAR) Verfahren. In bzgl. der Wassertiefe kritischen Abschnitten. Querprofilmessungen, Linienzahlanalysen, Abflussmessung zur Modellkalibrierung.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulation der Wassertiefen und mittleren Fließgeschwindigkeiten für jeden beliebigen Abfluss möglich. Dadurch zusätzliche Untersuchungen von Abflüssen jederzeit möglich.</li> <li>• Simulation der Wassertiefen und mittleren Fließgeschwindigkeiten im gesamten Abschnitt. Dadurch Berechnung von beliebigen Längsprofilen und der benetzten Fläche möglich.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vermessungsausrüstung und Modellierungssoftware teuer.</li> <li>• Vermessungsaufwand bei heterogenem Gerinne (hohe Anzahl Messpunkte) und bei unübersichtlichem Gelände (häufiges Verschieben des Theodoliten) gross.</li> <li>• Tendenziell Vermessung kürzerer Abschnitt, als bei den anderen Verfahren.</li> <li>• Vermessung, Modellaufbau und Simulationen müssen durch spezialisierte Firmen erfolgen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei Niederwasser watbar.</li> <li>• Wenig heterogene bis homogene Gerinne mit relativ monotoner kiesiger oder sandiger Sohle (nicht zu viele Steinblöcke und andere Kleinstrukturen).</li> </ul>
Erhebungen bei Niederwasserabflüssen	Die Messung der Wassertiefen erfolgt bei verschiedenen Niederwasserabflüssen und nach Möglichkeit bei einem Mittelwasserabfluss in repräsentativen bzw. kritischen Abschnitten.	Messung der Wassertiefen entlang von Quer- und Längsprofilen in bzgl. der Wassertiefe kritischen Abschnitten.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Messungen im Prinzip einfach durchzuführen und auszuwerten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zeitaufwändig, da das Gewässer bei verschiedene Niederwasserabflüsse im Bereich des künftigen Restwasserabflusses aufgesucht werden muss.</li> <li>• Oft liegt der Bereich des künftigen Restwasserabflusses derart tief, dass solche Niederabflüsse kaum auftreten.</li> <li>• Messungen entlang der tiefsten Stelle im Querschnitt (Längsprofil) in breiten Abschnitten ohne ausgeprägtem Talweg schwierig.</li> <li>• Genau Lage der Querprofile über längere Zeit muss gewährleistet sein.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niederwasserabflüsse im Bereich der geplanten Restwasserabflüsse.</li> <li>• Bei Niederwasser watbar.</li> </ul>

Ein numerisches hydraulisches **2d-Modell** hingegen liefert über die gesamte Gerinnebreite eine ausgezeichnete Grundlage, um Längsprofile entlang der tiefsten Stellen zu berechnen (Abb. 4). Zudem kann die benetzte Fläche in Abhängigkeit des Abflusses simuliert und visualisiert werden. 2d-Modelle werden in der Schweiz zunehmend für die Beantwortung von Restwasserfragen verwendet. Die Skepsis ist aber teilweise noch gross (Anhang A), obwohl sie z. B. im Flussbau seit Jahren breite Anwendung finden.

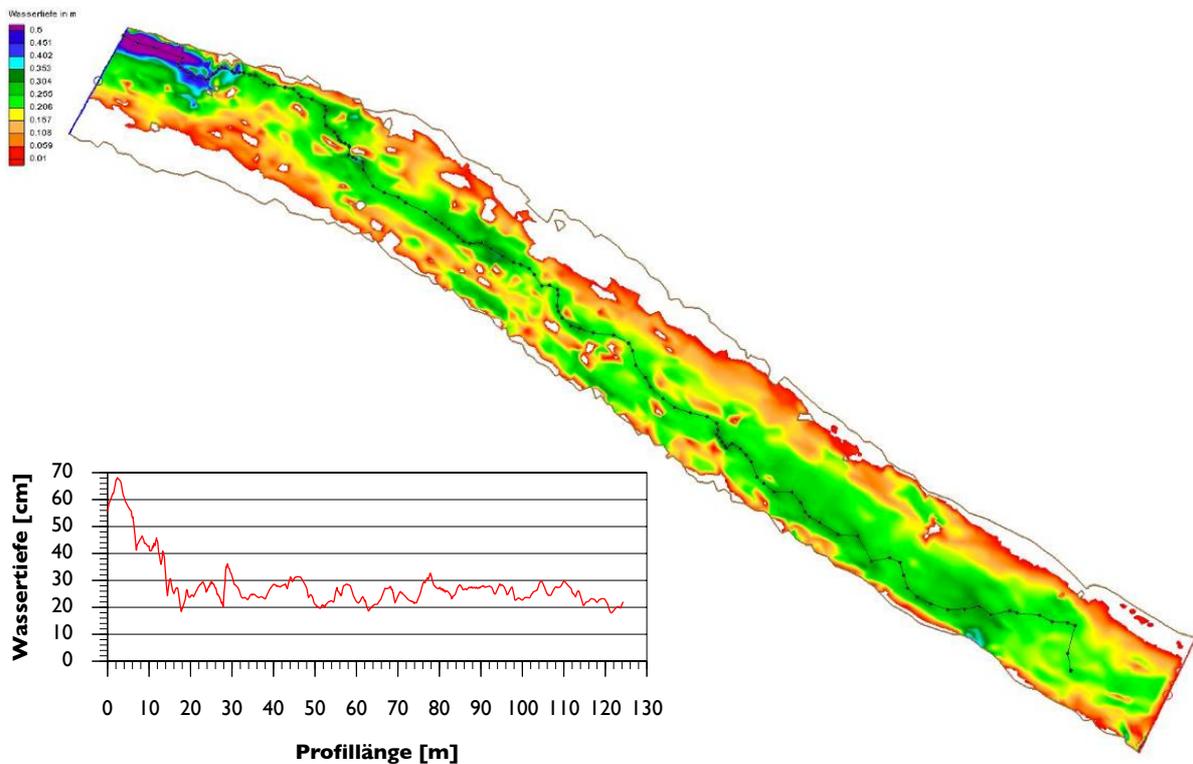


Abb. 4 2d-Simulation der Wassertiefen in einem Abschnitt der Simme (oben) und das zugehörige Längsprofil entlang der tiefsten Rinne (unten links). Der Verlauf des Längsprofils ist als schwarze Linie mit Punkten eingezeichnet (Daten IDREL SA, Baar).

Grundsätzlich erachten die befragten Experten die beschriebenen Verfahren als genügend. Vom Kanton Genf kam der Hinweis, dass nicht bloss Wassertiefen gemessen werden sollen, sondern, dass die Passierbarkeit direkt anhand von Markierungsversuchen zu überprüfen sei. Eine solche aufwändige **Erfolgskontrolle** ist für speziell wichtige Fischgewässer sicher angezeigt.

## 5 Anwendungsablauf und Beispiel

1. Im Rahmen einer **Elektrobefischung** werden die grössten gefangenen Salmoniden vermessen. Die Länge wird von der Schnautzenspitze bis zum Ende der natürlich ausgebreiteten Schwanzflosse (Totallänge) und die Körperhöhe vor dem Ansatz der Rückenfloss gemessen. Die Vermessung muss mit einer Genauigkeit von 1 mm erfolgen. Schätzungen reichen nicht aus.

Können keine Befischungen durchgeführt werden, so kann im Allgemeinen die Fischereiaufsicht aufgrund früherer Bestandeserhebungen und Laichfischfängen Auskunft über die Länge der grössten Forellen geben. Sollten keine Datenquellen vorhanden sein, kann evtl. auf die Angaben aus einem vergleichbaren Gewässer in der Nähe ausgewichen werden.

2. Auf der Basis der gemessenen maximalen Körperhöhe oder der maximalen Totallänge werden die generelle Mindestwassertiefe, diejenige für Untiefen und diejenige für Einzelfälle festgelegt (Abb. 2, Abb. 3). Für die gesamte Restwasserstrecke wird in Erfahrung gebracht, ob Einzelfälle im Sinne von Anhang C.3 vorkommen.
3. In kritischen Abschnitten der Restwasserstrecke wird die Wassertiefe entlang der tiefsten durchgehenden Rinne für verschiedene Abflüsse gemessen bzw. anhand eines hydraulischen Modells berechnet (Kap. 4).
4. In den resultierenden Längsprofilen werden die generelle Mindestwassertiefe und die Mindestwassertiefe für Untiefen eingezeichnet. Anzahl und Länge der Unterschreitungen dieser Werte werden für jeden Abfluss aufgelistet. Sind besonders kritische Stellen vorhanden, die als Einzelfälle gelten, wird zudem die minimale Wassertiefe für jeden Abfluss festgehalten.

Die Abbildungen 5 und 6 zeigen für ein Gewässers mit maximal 60 cm langen Seeforellen, wie die Längsprofile hinsichtlich der Einhaltung der Mindestwassertiefen ausgewertet werden könnten. Bei einem Abfluss von 700 l/s gibt es 2 Unterschreitungen der generellen Mindestwassertiefe von 34 cm (=Untiefen, 14.5 und 94.7 m lang). Die maximal tolerierbare Länge dieser Untiefen beträgt 30 m (50x60 cm). Zudem gibt es 17 Stellen, an denen die Mindestwassertiefe für Untiefen von 27 cm unterschritten wird. Folglich muss der Abfluss erhöht werden.

Bei 800 l/s verbessert sich die Situation nur unwesentlich. Erst bei 1000 l/s sind sämtliche Untiefen kürzer als 30 m. Es gibt aber nach wie vor 9 Stellen, an denen die Mindestwassertiefe für Untiefen unterschritten wird. Da dies nur in den definierten Einzelfällen erlaubt ist, muss die Abflussmenge weiter erhöht werden. Bei 1500 l/s gibt es zwar 14 Untiefen, deren Mindestwassertiefe von 27 cm ist aber überall erfüllt. Somit ist eine minimale Restwassermenge von 1500 l/s anzusetzen. Werden weitere Abflüsse zwischen 1000 l/s und 1500 l/s betrachtet, kann die Mindestrestwassermenge allenfalls noch reduziert werden.

Das beschriebene Verfahren liefert den rein rechnerischen Teil zur Herleitung der Mindestwassermenge hinsichtlich der freien Fischwanderung. In jedem Fall ist eine Plausibilisierung der Ergebnisse notwendig.

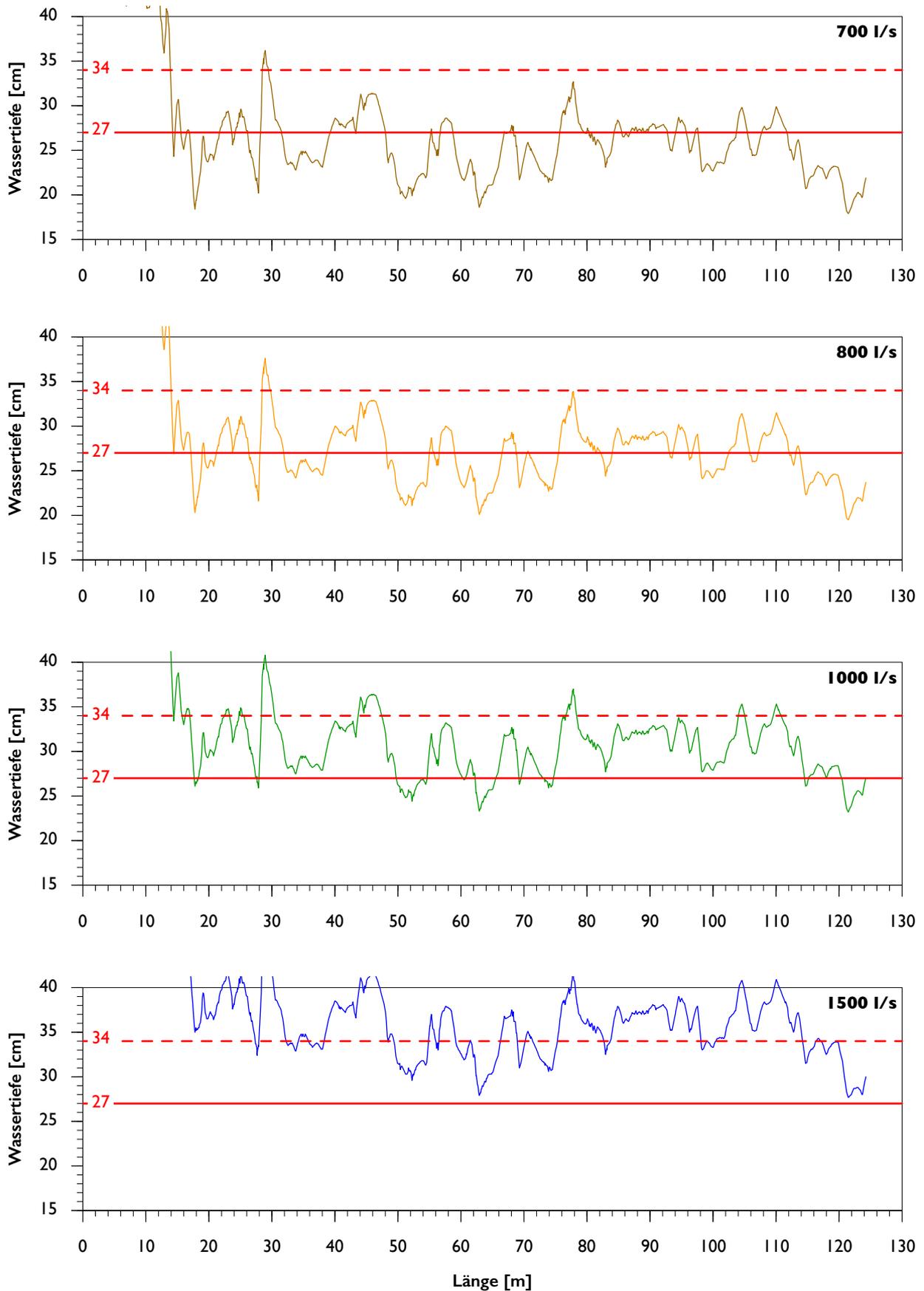
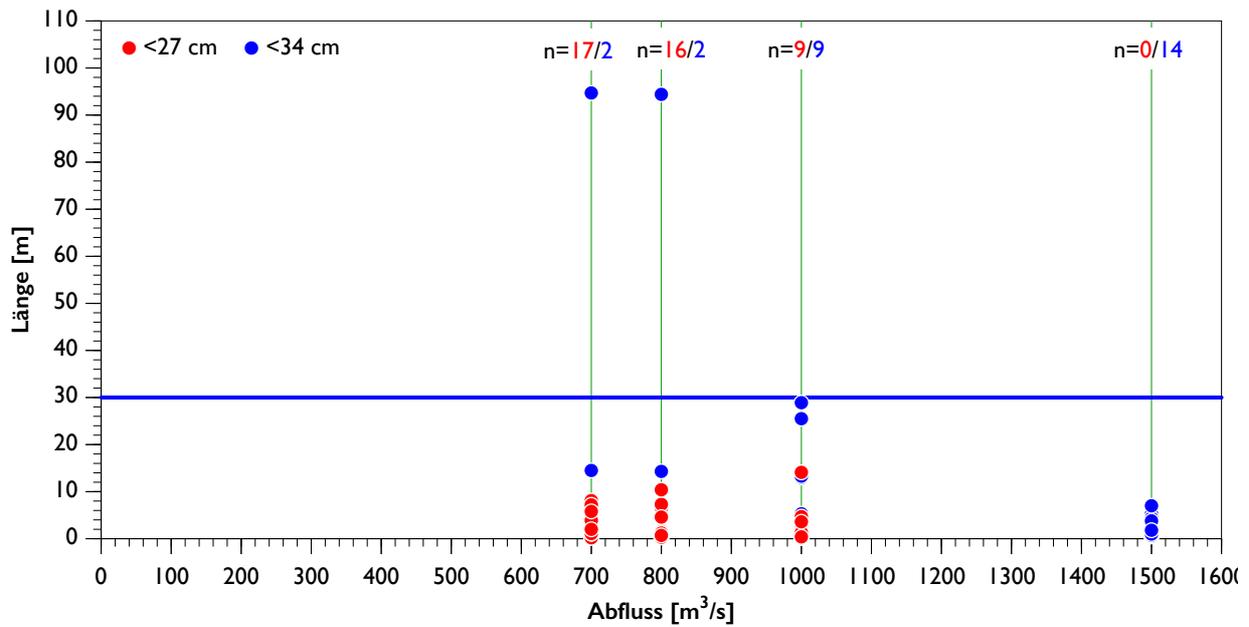


Abb. 5 Hypothetisches Beispiel: Wassertiefen entlang der tiefsten Rinne bei verschiedenen Abflüssen. Bezeichnung der generellen Mindestwassertiefe (34 cm) und der Mindestwassertiefe für Untiefen (27 cm) für die Seeforelle (maximale Totallänge = 60 cm).



**Abb. 6** Hypothetisches Beispiel: Häufigkeit und Länge der Unterschreitungen der generellen und der Mindestwassertiefe für Untiefen entlang der tiefsten Rinne für die untersuchten Abflüsse. Bezeichnung der maximalen Länge passierbarer Untiefen (blaue Linie).

Lesehilfe: Die Anforderungen an die freie Fischwanderung sind dann erfüllt, wenn kein roter Punkt auftritt und kein blauer Punkt über der blauen Linie liegt.

## 6 Die Anwendung von Zeitfenstern

### 6.1 Jahreszeit

Bei der Festlegung der Restwassermenge wird für die Laichzeit oft eine erhöhte Dotierung gefordert, damit die aufsteigenden Fische die Laichplätze erreichen und sie zwischen den Laichplätzen und den Unterständen wechseln können. Neben der eigentlichen Lachzeit sollte aber auch die Zeit der Aufwärts- und der Abwärtswanderung in die Überlegungen von saisonal unterschiedlichen Dotierungen einfließen. Insbesondere während der Abwanderung nach der Laichzeit sind die kraftlosen Fische auf eine ausreichend grosse Wassermenge angewiesen, um der Verletzung durch Prädatoren zu entgehen.

Aufgrund der Ausführungen in Kapitel 2.2 und weiterer Angaben wurde ein generalisierter Zeitplan für die Laichwanderperiode der See- und Bachforelle entworfen (Abb. 2). Es gilt dabei, die regionalen und jährlichen Unterschiede zu beachten. Grundsätzlich ist bei Seeforellen davon auszugehen, dass sie das ganze Jahr über wandern.

Zur Zeit fehlen die wissenschaftlichen Grundlagen, um eine allenfalls notwendigen Abflusspeak zur Auslösung der Aufwärtswanderung zu definieren (Kap. 2.2).

### 6.2 Tageszeit

Salmoniden sind während der Wanderung einem verstärkten Prädationsdruck ausgesetzt. Sie wandern daher bei klarem Wasser vermehrt in der Nacht und verbringen die Tage in einem Unterstand (Kap. 2.1). Der heutige Wissensstand über die tageszeitliche Wanderungsaktivität von Salmoniden erlaubt es aber kaum, ein tageszeitliches Abflussregime zu definieren, das den lokalen Gegebenheiten gerecht wird, eine erfolgreiche Fischwanderung garantieren kann und keine Schwall-Sunk ähnliche Situation hervorruft. Ein entsprechendes Dotierregime soll daher nur in Einzelfällen geprüft werden, z. B. wenn die notwendige Abflussmenge im Rahmen einer Restwassersanierung wirtschaftlich nicht tragbar ist und vom Kanton nicht entschädigt werden kann<sup>1</sup>.

## 7 Beispiele

Die Umfrage bei den Kantonen hat gezeigt, dass derzeit offenbar erst ein Restwasserregimes mit starkem Bezug zur Seeforelle umgesetzt ist (Muota SZ). Uns ist lediglich noch ein zweites noch nicht verfügbares Beispiel bekannt (Linth GL).

---

<sup>1</sup> An der Muota (SZ) wird derzeit ein solches Regime gefahren (Dönni & Beffa 2011). Der Erfolg für die Seeforellen ist zurzeit völlig ungewiss.

## 8 Zitierte Literatur

- 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. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), DWA-M 509, 334 S.
- Adam, B., Lehmann, B. (2011) Ethohydraulik. Grundlagen, Methoden, Erkenntnisse. Springer, Heidelberg, 351 S.
- AG-FAH (2011) Grundlagen für einen österreichischen Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen (FAHs). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 87 S.
- Aquarius (2000) Beurteilungshilfe für die Erhöhung der Restwassermenge nach Art. 31 Abs. 1 GSchG und aufgrund fischereilicher Aspekte nach Art. 32 Abs. 2 GSchG. Amt für Umweltschutz und Amt für Jagd und Fischerei des Kantons St. Gallen, 21 S.
- Aquarius (2011) Fischaufstiegshilfe KWKW Hard: Biologische Erfolgskontrolle, Kurzbericht im Auftrag der Gemeinschaft Hard AG, Winterthur.
- BAFU (2011) Liste der National Prioritären Arten. Arten mit nationaler Priorität für die Erhaltung und Förderung, Stand 2010. BUWAL, Umwelt-Vollzug 1103, 132 S.
- BMLFUW (2012) Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 102 S.
- Botschaft zur Revision des Gewässerschutzgesetzes BBI (1987) Bern. S. 1133.
- Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG) vom 24. Januar 1991 (Stand am 1. Januar 2011).
- Bundesgesetz über die Fischerei (BGF) vom 21. Juni 1991 (Stand am 1. August 2010).
- Caudron, A. (2010) Suivi annuel de la migration des géniteurs de truite lacustre au piège de Vongy sur la Basse Dranse, campagne 2009/2010 et comparaison avec la campagne 1999/2000. Rapport SHL 296.2010 / FDP74.10/06, 16 S.
- Chasserieau, C., Caudron, A. (2011) Suivi pluri-annuel de la population de truite lacustre sur la basse Dranse. Campagne 2010. Rapport SHL 303.2011 / FDP74./04.
- Dahl, J., Dannewitz, J., Karlsson, L., Petersson, E., Löf, A., Ragnarsson, B. (2004) The timing of spawning migration: implications of environmental variation, life history, and sex. *Canadian Journal of Zoology* 82, 1864-1870.
- Dehus, P. (2005) Anforderungsprofile von Indikator-Fischarten. In: LfU (Hrsg.) Mindestabflüsse in Ausleitungsstrecken – Grundlagen, Ermittlung und Beispiele. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Oberirdische Gewässer, *Gewässerökologie* 97, 125-153.
- Dönni (2012) Fischpass Kraftwerk Sarneraa. Aufstiegskontrolle 2010/2011 und Funktionsbewertung. Kraftwerk Sarneraa AG, 32 S.
- Dönni, W., Beffa, C. (2011) Fortpflanzungserfolg der Seeforelle in der Muota. Umsetzung der Massnahmen. Elektrizitätswerk des Bezirks Schwyz AG, 40 S.
- Dönni, W., Spalinger L., Knutti A. (2017) Erhaltung und Förderung der Wanderfische in der Schweiz – Zielarten, Einzugsgebiete, Aufgaben. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, 53 S.
- Dübendorfer, C., Moser, D., Kempfer, T., Egloff, L., Müller, V., Wanner, P., Kirchhofer, A., Baumann, P. (2011) Expertenbericht zu einem Modul Temperatur im Rahmen des Modul-Stufen-Konzepts. BAFU, 80 S.
- Ebel, G. (2013) Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbioologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie 4, 483 S.

- Estoppey, R., Kiefer, B., Kummer, M., Lagger, S., Aschwanden, H. (2000) Angemessene Restwassermengen – Wie können sie bestimmt werden? BUWAL, Vollzug Umwelt, 140 S.
- Gibbins, C., Shellberg, J., Moir, H., Soulsby, C. (2008) Hydrological influences on adult salmonid migration, spawning, and embryo survival. American Fisheries Society Symposium 65, 195-223.
- Hotchkiss, R. H., Frei, C. M. (2007) Design for fish passage at roadway-stream crossings: synthesis report. U.S. Department of Transportation FHWA-HIF-07-7033, 280 S.
- Jonsson, B., Jonsson, N. (2011) Ecology of Atlantic Salmon and Brown Trout – Habitat as a Template for Life Histories. Springer, Fish and Fisheries Series 33, 708 S.
- Katopodis, C., Gervais, R. (2016) Fish swimming performance database and analyses. DFO Canadian Science Advisory Secretariat Research Document 2016/002, 550 S.
- Larinier, M., Porcher, J. P., Travade, F., Gosset, C. (1994) Passes à poissons. Expertise, conception des ouvrages de franchissement. Conseil supérieur de la pêche, Paris, 336 S.
- Mendez, R. (2007) Laichwanderung der Seeforelle im Alpenrhein. Diplomarbeit ETH Zürich, 70 S.
- QZV Ökologie OG (2010) 99. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Festlegung des ökologischen Zustandes für Oberflächengewässer (Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer). Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, 60 S.
- Reiser, D. W., Huang, C.-M., Beck, S., Gagner, M., Jeanes, E. (2006) Defining flow windows for upstream passage of adult anadromous salmonids at cascades and falls. Transactions of the American Fisheries Society 135, 668-679.
- Rustadbakken, A., L'Abée-Lund, J. H., Arnekleiv, J. V., Kraabøl, M. (2004) Reproductive migration of brown trout in a small Norwegian river studied by telemetry. Journal of Fish Biology 64, 2-15.
- Sautner, J. S., Vining, L. J., Rundquist, L. A. (1984) An evaluation of passage conditions for adult salmon in sloughs and side channels of the middle Susitna River. Alaska Department of Fish and Game, 146 S.
- Schneider, J. (2009) Ökologische Vorgaben für Sohlgleiten. In: Naturnahe Sohlgleiten, DWA-Themen, S. 29-49.
- Schwevers, U., Schindehütte, K., Adam, B., Steinberg, L. (2004) Zur Passierbarkeit von Durchlässen für Fische. Untersuchungen in Forellenbächen. LÖBF-Mitteilungen , 37-43.
- Thompson, K. E. (1972) Determining streamflows for fish life. In: Proceedings of the Instream Flow Requirement Workshop. Pacific Northwest River Basins Commission, Portland, Oregon, S. 31-50.
- TLUG (2009) Fachliche Anforderungen zur Herstellung der Durchgängigkeit in Thüringer Fließgewässern. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie 13 S. + Anhang.

## Anhang

## A Expertenbefragung

Frage / Question	Antwort / Réponse
Welche Abflusstiefe verlangst du generell für Seeforellen?	<i>Experte A</i> >30-35 cm.
	<i>Experte B</i> L'idéal serait 50 cm au minimum (valeur empirique pour l'instant).
	<i>Experte C</i> 40 cm.
	<i>Experte D</i> 20 à 50 cm.
	<i>Experte E</i> Nous ne sommes pas confrontés avec des tronçon problématiques a cause des débits résiduels.
	<i>Experte F</i> 20 cm. Toutefois, au vu de l'hétérogénéité du lit de la rivière et de la difficulté de mesurer cette hauteur de manière objective, on transmet souvent une tranche 15-25 cm.
	<i>Experte G</i> An grösseren Gewässern halten wir uns generell an die 20 cm-Regelung.
	<i>Experte H</i> Wer weiss das schon. Laut DWA 2.5 mal die Körperhöhe. Ist vermutlich kein schlechter Wert.
	<i>Experte I</i> 2fach maximale Körperhöhe.
Welche Abflusstiefe verlangst du generell für Bachforellen?	<i>Experte A</i> >20 cm.
	<i>Experte B</i> 20–30 cm (valeur empirique pour l'instant).
	<i>Experte C</i> 20 cm als Grundsatz. In hochgelegene alpinen Gewässer, wo das Gros der Massfische bzw. Laichfische kaum mehr als 22 cm gross sind, kann Abweichend von der Regel auch ein Wanderkorridor festgelegt werden, welcher diese 20 cm unterschreitet. Dies wird oft auch im natürlichen Zustand vorgefunden.
	<i>Experte D</i> 20 à 30 cm.
	<i>Experte E</i> Ce qui aide le plus, c'est appréciation visuelle d'ensemble!
	<i>Experte F</i> Idem.
	<i>Experte G</i> An grösseren Gewässern halten wir uns generell an die 20 cm-Regelung.
	<i>Experte H</i> Dieselbe Regel, 2.5mal die Körperhöhe.
	<i>Experte I</i> 20–25 cm

Frage / Question	Antwort / Réponse
Sind Unterschreitungen der verlangten Wassertiefe auf kurze Distanzen (z. B. bei Riffels) zulässig?	<i>Experte A</i> Ja
	<i>Experte B</i> Oui.
	<i>Experte C</i> Ja. Nebst der oben geschilderten Ausnahme auch in Gewässern wo der Grundsatz 20 cm gefordert wird.
	<i>Experte D</i> Oui.
	<i>Experte E</i> Dans les torrents, la morphologie est toujours complexe et il est inévitable qu'il y aie des endroits ou des passages «a sauter».
	<i>Experte F</i> Oui, bien entendu en fonction de la morphologie du lit. Le kill critère doit être "assurer les déplacements de la faune piscicole toute l'année".
	<i>Experte G</i> Ich bin inoffiziell aufgrund von eigenen Beobachtungen der Überzeugung, dass über kurze Strecken – etwa bei Riffels - die Wassertiefe auch mal etwas seichter sein darf für die Forellenwanderung (7-15 cm). Dies jedoch generell zu quantifizieren (Länge, Tiefe) ist äusserst schwierig und auch heikel, da total situations- und gewässerspezifisch.
	<i>Experte H</i> Auf sehr kurze Distanzen vermutlich schon. Das kann ich aus eigenen Beobachtungen mit pazifischen Lachsen bestätigen, die auch recht untiefe Stellen durchschwimmen, wenn sie auf ihrem Laichzug nach oben schwimmen. Zirka 10 m lange Strecken mit nur zirka 1 Körperhöhe als Tiefe. Die Fische schaffen das, wenn sie wollen. Würde das aber nicht propagieren, sondern bei 2 mal Körperhöhe bleiben für sehr kurze Strecken 5-10 m.
	<i>Experte I</i> Ja auf kurze Distanzen zulässig. Nebst seichten Stellen sind aber auch natürliche Abstürze und Hindernisse genügend zu dotieren, damit ein Aufstieg möglichst energiesparend vollzogen werden kann. Hierbei ist der Hindernisstyp und die Ausprägung des Kolks entscheidend. Der Fisch muss genügend beschleunigen können und die Leiströmung darf nicht fallend sein (idealerweise im 45° Winkel).
Falls ja, auf maximal welche Streckenlänge, und bis auf welche Abflusstiefe?	<i>Experte A</i> Keine absoluten Werte, qualitative Einzelbeurteilung.
	<i>Experte B</i> 10 mètres au plus.
	<i>Experte C</i> Wir orientieren uns an der max. Sprintgeschwindigkeit für Bachforellen. Wir gehen davon aus, dass die Forelle kurze Abschnitte, die nicht der „idealen“ Wassertiefe von 20 cm für die Wandergeschwindigkeit (entspricht wohl der Dauergeschwindigkeit – gesteigerte Geschwindigkeit) entsprechen, unter Anwendung der Sprintgeschwindigkeit überwinden kann (man kann ja oft Forellen beobachten die mit halb aus dem Wasser ragenden Körper, seichte Schnellen überwinden). In Zahlen heisst dies, dass entlang des Wanderkorridors doch ab und zu seichtere Stellen als 20 cm vorhanden sein dürfen, welche unter Anwendung der Sprintgeschwindigkeit in rund 1-2 Sekunden durchwanderbar sind. Auf die Länge bezogen heisst dies etwa 10 – 20 Mal die Körperlänge der Forelle. Für ein Gewässer mit Forellen von 25 cm wären dies max. 2.5 bis 5 Meter. Bisher haben wir aber Ausnahmen <15 cm in Gewässern wo 20 cm Tiefe der Standard darstellt nie toleriert.
	<i>Experte D</i> Lacustre 30 cm sur 30 m, Fario 15 cm sur 10 m.
	<i>Experte F</i> Longueur non définie, profondeur = 15 cm (mais encore une fois, c'est très théorique!).

Frage / Question	Antwort / Réponse
	<p><i>Experte H</i> DWA fordert minimale Abflusstiefe von 20 cm oder eben 2.5mal die Körperhöhe oder für sehr kurze Strecken ist nur 2mal die Körperhöhe möglich. Sollte wenn möglich nicht unterschritten werden. Evtl. für sehr kurze Strecken kleiner 5 m wäre eine geringe Unterschreitung möglich, was dann aber mit DWA nicht zusammenpasst.</p> <p><i>Experte I</i> Kürze Distanzen mit weniger Wassertiefe als die Körperhöhe überwindbar, braucht aber Energie. Bei Seeforellen sollten mehr als 10 m nicht überschritten werden.</p>
Für welchen Zeitraum ist eine erhöhte Restwasserdotierung für Seeforellen nötig (Auf- und Abwrtswanderung)?	<p><i>Experte A</i> Ab Ende August – Ende Januar, keine Erhöhung der Dotierwassermenge für Abwanderung bisher.</p> <p><i>Experte B</i> Montaison: octobre – janvier</p> <p><i>Experte C</i> Gemäss unseren Erfahrungen in Reichenau mit den Bodensee-Seeforelle von Juli bis Dezember (Juli/August kommen die Frühaufsteiger ab September dann die ersten Spätaufsteiger mit Peak im Oktober/November). Absteigende Seeforellen sehen wir ab Dezember bis in den März hinein.</p> <p><i>Experte D</i> Septembre à décembre.</p> <p><i>Experte E</i> La montée des truites lacustre peut commencer assez tôt (juillet-aout) à dépendance de l'hydrologie. De règle depuis aout-septembre.</p> <p><i>Experte F</i> Montaison (août-déc.) = légère augmentation du débit de dotation, le débit est très fortement influencé par l'existence d'une passe à poissons et son dimensionnement. Avalaison = débit de dotation plus important, souvent liés à la nature des ouvrages de dévalaison, mais il est accepté (au cas par cas) que la dévalaison ne fonctionne pas en continu toute l'année --&gt; le suivi biologique permet d'ajuster les plages + importance des débits.</p> <p><i>Experte G</i> Hauptaufstiegszeit ist November/Dezember</p> <p><i>Experte H</i> Aufwanderungen nicht laichender Fische sind immer möglich. Laichwanderungen setzen bereits am Sommer ein (Juni-Juli) und dauern bis zirka Ende November. Abwanderungen von den Laichplätzen ab Mitte Oktober bis im Frühling möglich. Grosser Peak gleich nach dem Ablaihen, einige Fische (max. ein Drittel) verbleibt in der Nähe der Laichplätze bis im Frühling.</p> <p><i>Experte I</i> In grossen Gewässer das ganze Jahr über. In kleinen Gewässern von September bis Februar. Die Wassertiefe bzw. Dotierung während der Abwanderung wird vermutlich unterschätzt und zu wenig beachtet. Tiere sind nach dem Laichgeschäft oft sehr erschöpft und anfällig. Seichte Stellen können kaum mehr überwunden werden.</p>
Mit welchen methodischen Ansätzen wird in ihrem Kanton die Frage nach der ausreichenden Abflussmenge für die freie Fischwanderung untersucht (Querprofilmessungen, Längsprofilmessungen, 2D-Modellierungen, Kombinationen, andere?)	<p><i>Experte A</i> Dotierversuche, Profilmessungen, HEC-RAS</p> <p><i>Experte B</i> Aucune pour l'instant.</p> <p><i>Experte C</i> Alles was du oben erwähnst. Vermehrt aber 2D Modellierungen von Gewässerabschnitten mit „kritischen“ Abflusstiefen (Flachstrecken).</p> <p><i>Experte F</i> Le plus souvent: essais in situ avec lâchers de différents débits et mesures de hauteur sur profils en travers. Parfois, on a eu recours à des modélisation 2-3D, mais les résultats sont souvent décevants, car trop théoriques.</p>

Frage / Question	Antwort / Réponse
	<p><i>Experte D</i> Profils en travers répétés dans différents secteurs de sensibilités différentes et à différents débits. Cartographie du tronçon concerné selon les différents degré de sensibilité et pondération en fonction des résultats des mesures de profils.</p> <p><i>Experte E</i> Pas d'expériences.</p> <p><i>Experte G</i> Die erforderlichen Abflüsse müssen Gesuchsteller mittels Restwasserdotierversuchen ermitteln und belegen (bestehende Kraftwerke).</p> <p><i>Experte H</i> Ausgeklügelte Modelle bringen vermutlich wenig, weil es zu viele Unsicherheiten im Wissen gibt. Ein einfaches Modell basierend auf Querprofilmessungen ist vermutlich ausreichend.</p> <p><i>Experte I</i> Messung von Längsprofilen und/oder 2d-Abflussmodellierungen.</p>
Genügt dieses Vorgehen? Falls nein, welche Ansprüche bestehen an ein optimales Vorgehen?	<p><i>Experte A</i> Bisher ausreichend, Modellierung z.T. mit relativ grossen Unsicherheiten behaftet.</p> <p><i>Experte B</i> Non. Télémétrie pour les géniteurs et PiT-Tag pour la dévalaison de juvénils.</p> <p><i>Experte C</i> Wir sind mit diesen Grundsätzen und methodischen Verfahren bisher gut gefahren.</p> <p><i>Experte D</i> En général elles donnent satisfaction.</p> <p><i>Experte F</i> Je pense raisonnablement que la meilleure méthode consiste à tester les débits sur le terrain, par débit d'étiage. En outre, il pourrait être utile de disposer d'un protocole méthodologique que l'on ferait appliquer systématiquement sur tous les cours d'eau (par souci d'uniformisation des pratiques).</p>

## B Mindestwassertiefe: Grundlagen

### B.1 Mindestwassertiefe und Körperhöhe

Eine ungehinderte Fischwanderung ist dann möglich, wenn sie mit geringem Energie- und Zeitverlust sowie unter Nutzung idealer Deckungsverhältnisse erfolgen kann (Schneider 2009). Die **generelle Mindestwassertiefe** muss also so gross sein, dass der Fisch unter minimalem Energieaufwand die Restwasserstrecke in kürzester Zeit zurücklegen kann. Aufgrund der Ausführungen von Adam et al. 2014 (S. 120 ff.) ist hierfür eine Mindestwassertiefe vom 2.5fachen der Körperhöhe<sup>1</sup> nötig<sup>2</sup>.

Gemäss der heutigen Auslegung in der Schweiz beträgt die generelle Mindestwassertiefe 20 cm. Sie kommt meist auch in Bachforellengewässer zur Anwendung. In Seeforellengewässer hingegen werden oft grössere Wassertiefen verlangt (GR 40 cm, BE > 30–35 cm; Anhang A). Bachforellen können die Grösse von Seeforellen erreichen (z. B. in den Bodenseezuflüssen). In alpinen Bächen werden sie aber oftmals kaum grösser als 25 cm. Die Festlegung der Mindestwassertiefe anhand der taxonomischen Zugehörigkeit wird somit der lokalen Situation oft nicht gerecht. Die Körperhöhe ist hierfür das deutlich bessere Mass.

In hydrologisch unbeeinträchtigten Fliessgewässern gibt es oft kürzere Abschnitte (z. B. Riffle) mit Wassertiefen unter der generellen Mindestwassertiefe<sup>3</sup>. Diese **Untiefen**<sup>4</sup> werden mit erhöhter Schwimmgeschwindigkeit in einem Zug durchschwommen. Aber nur, wenn der zusätzliche Energieaufwand nicht unverhältnismässig ist, d. h. die Rückenflosse dabei nicht aus dem Wasser ragt und der Fisch die Gewässersohle nicht berührt. Für Salmoniden muss deshalb die Mindestwassertiefe das 2fache der Körperhöhe betragen (Adam et al. 2014, Schneider 2009). Vermutlich die meisten Kantone erlauben in Forellenbächen eine Unterschreitung der Wassertiefe von 20 cm auf kurze Distanzen (z. B. BE, GR, GL, LU, SG, SZ, VD). Eine Unterschreitung von 12–15 cm wird aber kaum toleriert.

Trifft die aufwärtswandernde Forelle auf eine Untiefe, die nur mit Bodenkontakt und aus dem Wasser ragender Rückenflosse zu bewältigen ist, wird sie im Allgemeinen die Wanderung unterbrechen und sie erst wieder bei höherem Abfluss fortsetzen. Bei hoher Motivation ist aber auch eine Passage unter Sprintgeschwindigkeit, entsprechend hohem Energieaufwand und anschliessend langer Ruhepause möglich.

<sup>1</sup> Gemeint ist die Körperhöhe vor dem Ansatz der Rückenflosse. Die Schwanzflossenhöhe im natürlich ausgebreiteten Zustand ist noch etwas höher als die Körperhöhe. Sie findet in der Literatur aber keine Verwendung.

<sup>2</sup> Schneider (2009) geht für Salmoniden von einer Mindestwassertiefe von nur der 2fachen Körperhöhe aus.

<sup>3</sup> Beispielsweise weisen viele Seeforellengewässer im Kanton Zürich natürliche Abflussverhältnisse auf, die bei Niederwasser keinen Einstieg aus dem See erlauben. Erst nach intensivem Regen bei erhöhtem Wasserstand setzt die Wanderung ein (pers. Mitt. A. Hertig, Fischerei- und Jagdverwaltung ZH).

<sup>4</sup> Definition gemäss Wikipedia: abgrenzbarer Bereich in einem Gewässer, der sich durch eine besonders geringe Wassertiefe auszeichnet.

Ungelöst!

**Welche Tiefe entspricht der dem Fisch verfügbaren Wassertiefe und wie misst man sie?**

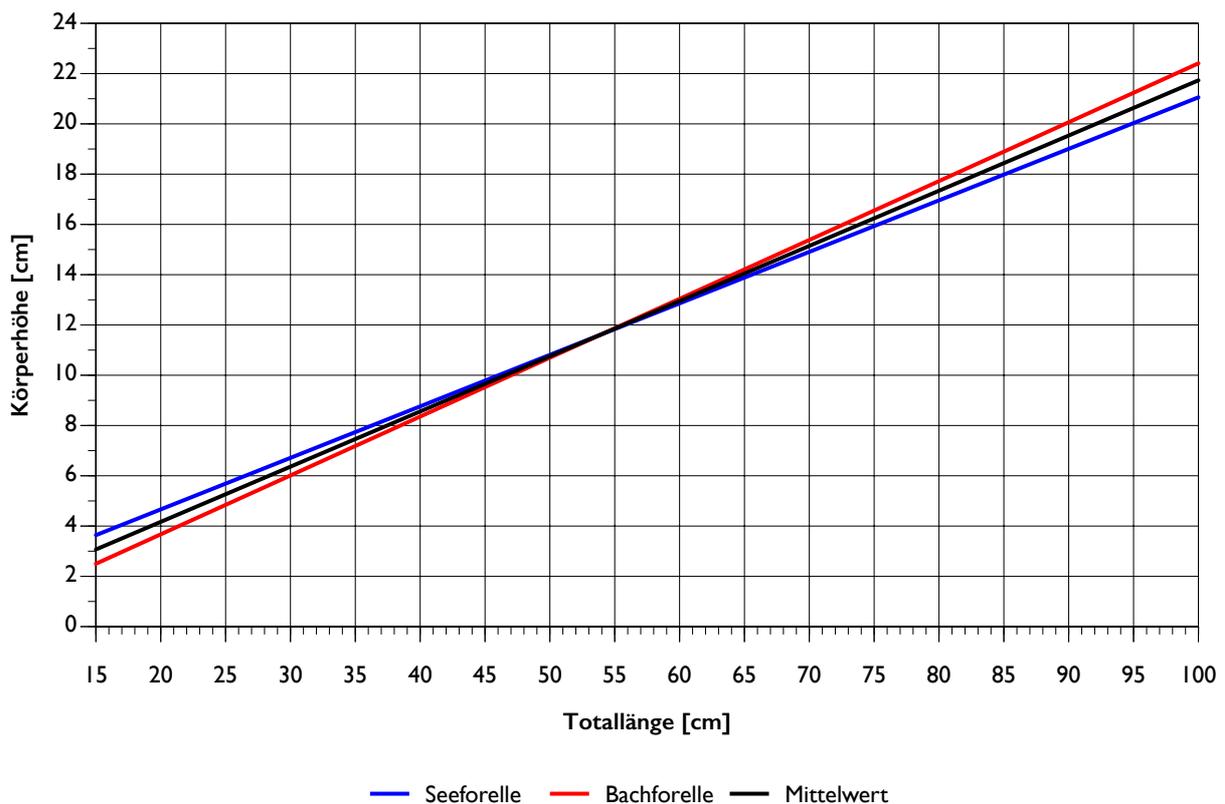
Adam et al. (2010, S. 97) definieren die Mindestwassertiefe als die minimal notwendige Wassertiefe oberhalb der Sohlenrauheit, also oberhalb der Steinspitzen. In Gewässern mit einer grobkörnigen Sohle würde dadurch aber eine unverhältnismässig geringe Wassertiefe resultieren. Die grösste Tiefe zwischen den Steinblöcken entspricht aber ebenfalls nicht der für den Fisch verwendbaren Wassertiefe. Diese liegt irgenwo dazwischen.

Misst man die Wassertiefe über einer grobkörnigen Sohle mit einem Messstock, wird man tendenziell den tiefsten Punkt zwischen den Steinen messen. Der Gewässerraum zwischen eng beieinander stehenden Steinen steht aber zumindest den grösseren Salmoniden nicht zur Verfügung. Die für den Fisch nutzbare Wassertiefe wird somit überschätzt. Eigentlich müsste der Messstock einen Querbalken von mindestens der Breite der grössten vorhandenen Fische aufweisen, um solche «Unebenheiten» auszugleichen.

Solche **Einzelfälle** können z. B. in Abschnitten mit einer glatten Sohle auftreten. Dies sind meist Verbauungen, z. B. zum Schutze einer querenden Leitung, unter einer Brücke oder bei einer Furt. Es kann sich aber auch um eine natürliche Felsrippe handeln. Oft kann sich auf diesen Abschnitten keine tiefere Rinne ausbilden. Das Wasser verteilt sich dann über die gesamte Breite und ist entsprechend seicht. Trotzdem können Forellen solche Stellen passieren, sofern die Wassertiefe so gross ist, dass der Fisch nicht auf die Seite kippt. Insofern reicht eine Mindestwassertiefe vom 1fachen der Körperhöhe aus<sup>5</sup>. Schwevers et al. (2004) konnten zeigen, dass Bachforellen verschiedener Grössen eine Mindestwassertiefe von 7 cm benötigen, um bachaufwärts schwimmen zu können.

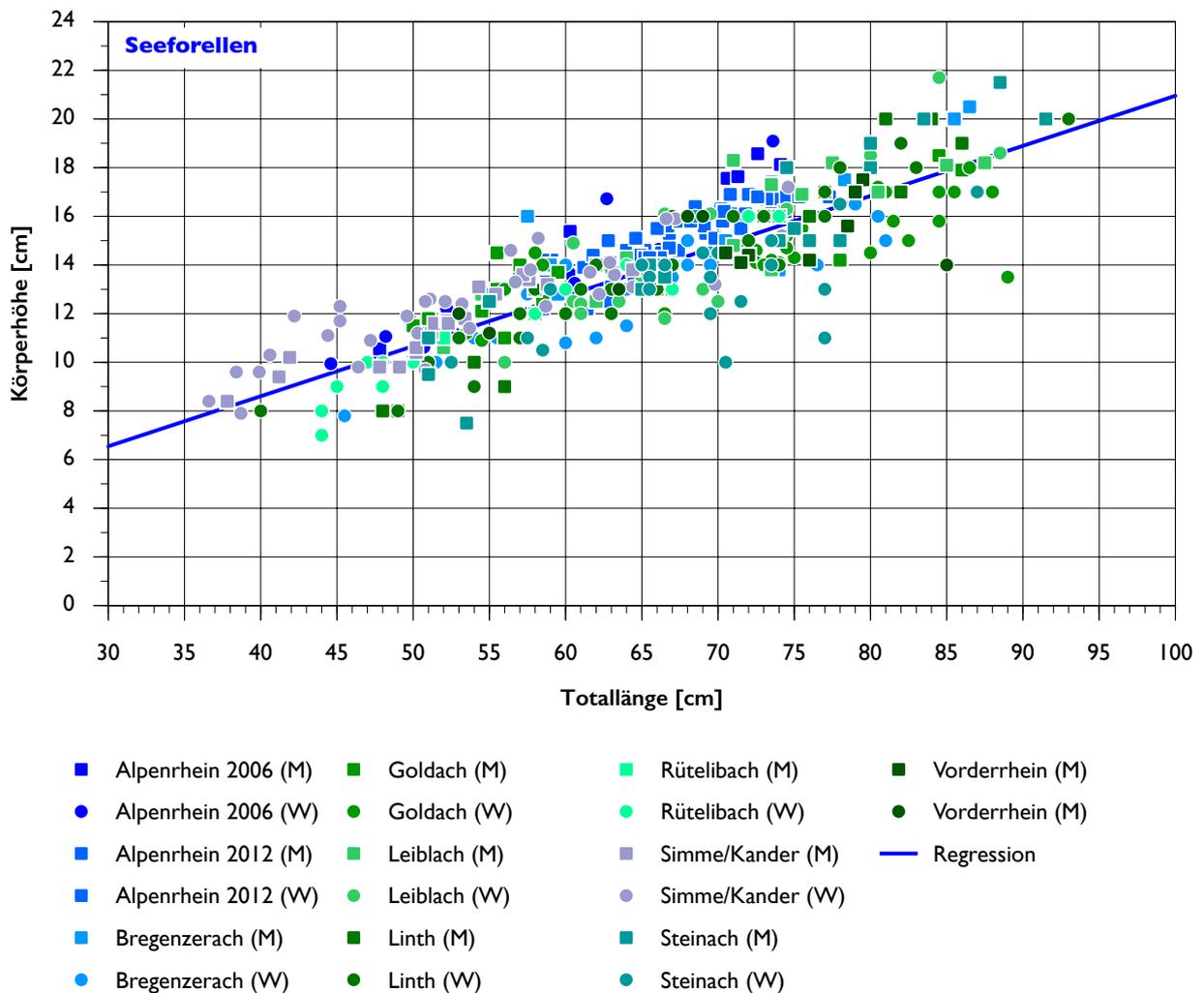
Die **Körperhöhen** der grössten vorkommenden Salmoniden sind im Allgemeinen nicht bekannt. Hingegen kennt man meistens die Totallängen oder kann sie zumindest schätzen. Für die Berechnung der Beziehung zwischen der Totallänge und der Körperhöhe von Seeforellen und Bachforellen wurden uns verschiedene Daten zur Verfügung gestellt (Abb. A2 und A3). Die Beziehungen konnten ausreichend genau mittels einer einfachen linearen Regression beschrieben werden. Die Regressionsgeraden für die beiden Taxa verlief sehr ähnlich (Abb. A1). Zur einfachen Anwendung wurde deshalb eine mittlere Regressionsgerade gerechnet. Sie erlaubt es, für jede beliebige Fischlänge die zugehörige mittlere Körperhöhe zu berechnen, unabhängig davon, ob es sich um eine See- oder Bachforelle handelt.

Die Streuung innerhalb der Taxa war aber beträchtlich. So variierte die Körperhöhe von 60 cm langen Seeforelle um 6 cm, die von 90 cm langen um 8 cm. Diese Streuung beschreibt primär die Variabilität innerhalb der einzelnen Populationen. Gewässerspezifische Unterschiede scheinen weniger von Bedeutung zu sein.



**Abb. A1** Beziehung zwischen Totallänge und Körperhöhe für die Seeforelle und die Bachforelle sowie für einen Mittelwert der beiden Taxa. Datengrundlage vgl. Abb. A2 und A3.

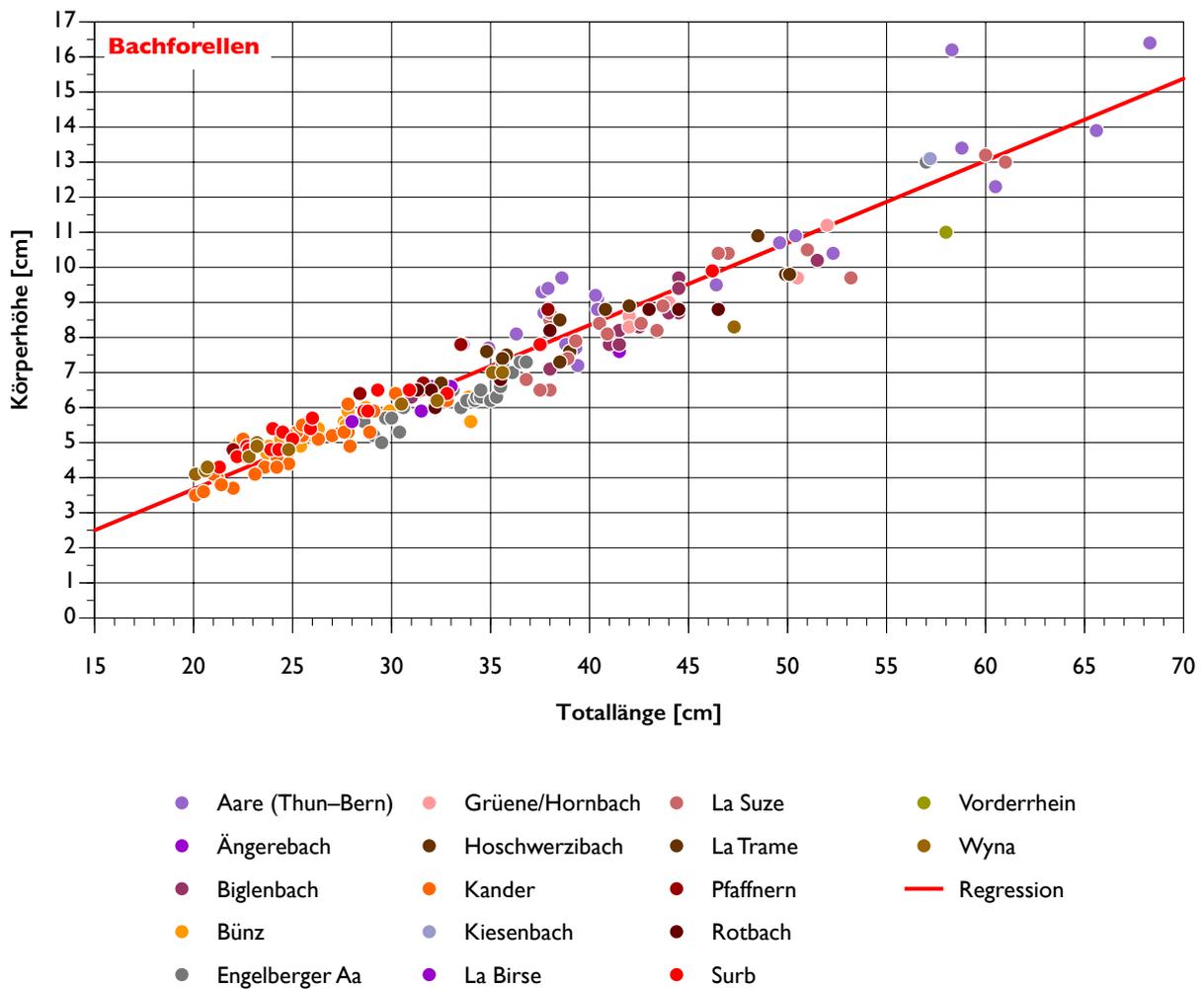
<sup>5</sup> In Baden-Württemberg gilt für solche Hindernisse eine Mindestwassertiefe vom 1fachen der Körperhöhe und eine maximale Hindernislänge von 2 m (Dehus 2005).



Gewässer	Kanton Land	Totallänge [cm]	Körperhöhe [cm]	N	Fangdatum	Datenquelle	Bemerkungen
Alpenrhein 2006 (M)	SG	47.8–74.1	10.6–18.6	8	17.8.-6.9.2006	Mendez 2007	aus Fotos gemessen
Alpenrhein 2006 (W)	SG	44.6–73.6	9.9–19.1	11	17.8.-6.9.2006	Mendez 2007	
Alpenrhein 2012 (M)	GR	50.8–73.8	11.4–16.7	9	19.-27.11.2012	Kanton GR	
Alpenrhein 2012 (W)	GR	58.5–77.3	12.2–17.4	47	3.10.-27.11.2012	Kanton GR	
Bregenzerach (M)	A	50.0–86.5	10.0–20.5	12	6.10./17.11.2012	Interreg IV	
Bregenzerach (W)	A	45.5–81.0	7.8–16.5	25	6.10./17.11.2012	Interreg IV	
Goldach (M)	SG	50.0–86.0	11.0–18.5	16	24.10./6.12.2012	Interreg IV	
Goldach (W)	SG	53.5–89.0	10.9–18.0	31	24.10./6.12.2012	Interreg IV	
Leiblach (M)	D	52.0–87.5	10.6–18.3	14	18.10./15.11.2012	Interreg IV	
Leiblach (W)	D	56.0–88.5	10.0–21.7	18	18.10./15.11.2012	Interreg IV	
Linth (M)	GL	48–86	8–20	14	18.10.-7.11.2012	Kanton GL	
Linth (W)	GL	40–93	8–20	35	20.10.-14.11.2012	Kanton GL	
Rütelibach (M)	GL	52	11	1	20.10.2012	Kanton GL	
Rütelibach (W)	GL	44–74	7–16	16	20.10.2012	Kanton GL	
Simme/Kander (M)	BE	37.8–64.4	8.4–13.8	19	7.-28.11.2012	Kanton BE	
Simme/Kander (W)	BE	36.6–74.6	7.9–17.2	34	7.-28.11.2012	Kanton BE	
Steinach (M)	SG	51.0–91.5	7.5–21.5	17	28.11.2012	Interreg IV	
Steinach (W)	SG	52.5–87.0	10.0–17.0	21	28.11.2012	Interreg IV	
Vorderrhein (M)	GR	70.5–79.5	14.1–17.5	7	25.10.-11.11.2012	Kanton GR	
Vorderrhein (W)	GR	53.0–85.0	11.2–16.0	6	20.10.-4.11.2012	Kanton GR	

Abb. A2 Totallänge und Körperhöhe von Seeforellen (n=363).

M=Männchen, W=Weibchen    Regressionsmodell:  $y = 0.2049x + 0.5651$      $R^2 = 0.7485$



Gewässer	Kanton Land	Totallänge [cm]	Körperhöhe [cm]	N	Fangdatum	Datenquelle
Aare (Thun-Bern)	BE	33.6-68.3	7.2-16.4	25	5.-8.11.2012	Kanton BE
Ängerebach	BE	41.5	7.6	1	19.11.2012	Kanton BE
Biglenbach	BE	31.0-51.5	6.3-10.2	11	9.11.2012	Kanton BE
Bünz	AG	22.3-34.0	4.6-6.3	21	27.9.2012	NAWA
Engelberger Aa	NW	28.6-57.0	5.0-13.0	22	5.9.-8.11..2012	Kanton NW
Gruene/Hornbach	BE	42-52	8.3-11.2	5	13.11.2012	Kanton BE
Hoschwerzibach	BE	39	7.6	1	19.11.2012	Kanton BE
Kander	BE	20.1-32.8	3.5-6.4	28	25.10.2012	NAWA
Kiesenbach	BE	57	13	1	20.11.2012	Kanton BE
La Birse	BE	28-33	5.6-6.6	4	17.11.2012	Kanton BE
La Suze	BE	36.8-61.0	6.5-13.2	18	9./22.11.2012	Kanton BE
La Trame	BE	32.5-50.1	6.7-10.9	11	2.11.2012	Kanton BE
Pfaffnern	AG	22.0-37.9	4.8-8.8	5	18.9.2012	NAWA
Rotbach	BE	31.3-46.5	6.0-8.8	8	8.11.2012	Kanton BE
Surb	AG	21.3-46.2	4.3-9.9	18	18.9.2012	NAWA
Vorderrhein	GR	58-71	11-21	2	20.10.2012	Kanton GR
Wyna	AG	20.1-47.3	4.1-8.3	12	27.9.2012	NAWA

Abb. A3 Totallänge und Körperhöhe von Bachforellen (n=193).

M=Männchen, W=Weibchen    Regressionsmodell:  $y = 0.2342x - 1.0129$      $R^2 = 0.9112$

## B.2 Schwimmggeschwindigkeit

Die Maximaldistanz, die ein Fisch ohne Erholungspause zurücklegen kann, hängt von seiner Schwimmggeschwindigkeit, gemessen in Anzahl Fischlängen (Totallängen) pro Sekunde, und seiner Ausdauer ab. Die Schwimmggeschwindigkeit nimmt mit der Grösse des Fisches zu. Mit zunehmender Fliessgeschwindigkeit reduziert sie sich. Mit zunehmender Wassertemperatur steigt sie hingegen an, wobei auch der Energieverbrauch ansteigt. Wird der optimale Temperaturbereich überschritten, sinkt die Schwimmggeschwindigkeit wieder. Generell nimmt sie mit der Zeit ab. Je schneller der Fisch schwimmt, desto stärker ist diese Abnahme. Daher ist die Zeitspanne, während der eine bestimmte Schwimmggeschwindigkeit aufrecht erhalten werden kann von Bedeutung.

Folgende Unterscheidung der Schwimmggeschwindigkeiten ist in der Literatur weit verbreitet (Adam & Lehmann 2011, S. 79 ff.)<sup>6</sup>:

- **Dauergeschwindigkeit:** Sie kann lange Zeit (>200 Minuten) ermüdungsfrei aufrecht erhalten werden. Mit dieser Geschwindigkeit werden Wanderungen über grössere Distanzen (z. B. Laichwanderung) zurückgelegt. Sie beträgt für Salmoniden maximal etwa 2 Totallängen pro Sekunde<sup>7</sup>.
- **Gesteigerte Geschwindigkeit:** Sie kann nur eine begrenzte Zeit (maximal etwa 200 Minuten) aufrecht erhalten werden und führt zu einer Ermüdung des Fisches. Mit dieser Geschwindigkeit werden längere Gewässerabschnitte mit anspruchsvolleren hydraulischen Bedingungen überwunden. Sie beträgt für Salmoniden etwa 4–5 Totallängen pro Sekunde.
- **Sprintgeschwindigkeit:** Sie kann nur sehr kurze Zeit (10–20 Sekunden) aufrecht erhalten werden. Sie führt zu einer derart starken Ermüdung des Fisches, dass er eine mehrstündige Erholungspause benötigt. Diese Geschwindigkeit wird primär für Fluchtreaktionen, den Beutefang und für die Überwindung von Stellen mit grossen Fliessgeschwindigkeiten benötigt. Sie ermöglicht es dem Fisch aber auch sehr kurze, besonders seichte Stellen zu passieren. Sie beträgt für Salmoniden bei optimaler Wassertemperatur (10–15 °C) etwa 10–12 Totallängen pro Sekunde.

In welcher Situation der Fisch welchen Schwimmmodus anwendet, hängt von verschiedenen Umweltfaktoren, der physischen Leistungsfähigkeit und von der Motivation des Fisches ab. Die maximale Schwimmleistung kann ein Fisch nur in einer ausreichend grossen Wassertiefe erbringen. Ist sie zu gering, wird die Wanderung mit erhöhter Schwimmggeschwindigkeit und damit erhöhtem Energieverbrauch fortgesetzt oder unterbrochen. Aufgrund der Ausführungen von Schneider (2009) kann man davon ausgehen, dass Hindernisse, die die ungehinderte Fischwanderung deutlich beeinträchtigen, mit der gesteigerten Geschwindigkeit passiert werden. Die Sprintgeschwindigkeit ist Situationen vorbehalten, in denen, ein grosses Risiko besteht, dass die Rückenflosse aus dem Wasser ragt und der Fisch Bodenkontakt hat. Folglich kann als vereinfachte Annahme die Wahl des Schwimmmodus' den für Restwasserstrecken relevanten Wassertiefen (Anhang B.1) zugeordnet werden:

- Dauergeschwindigkeit:  $\geq$ generelle Mindestwassertiefe bzw.  $\geq 2.5 \times$  Körperhöhe
- Gesteigerte Geschwindigkeit: Untiefen bzw.  $2 \times$  Körperhöhe
- Sprintgeschwindigkeit: Einzelfälle bzw.  $1 \times$  Körperhöhe

## B.3 Maximaldistanz

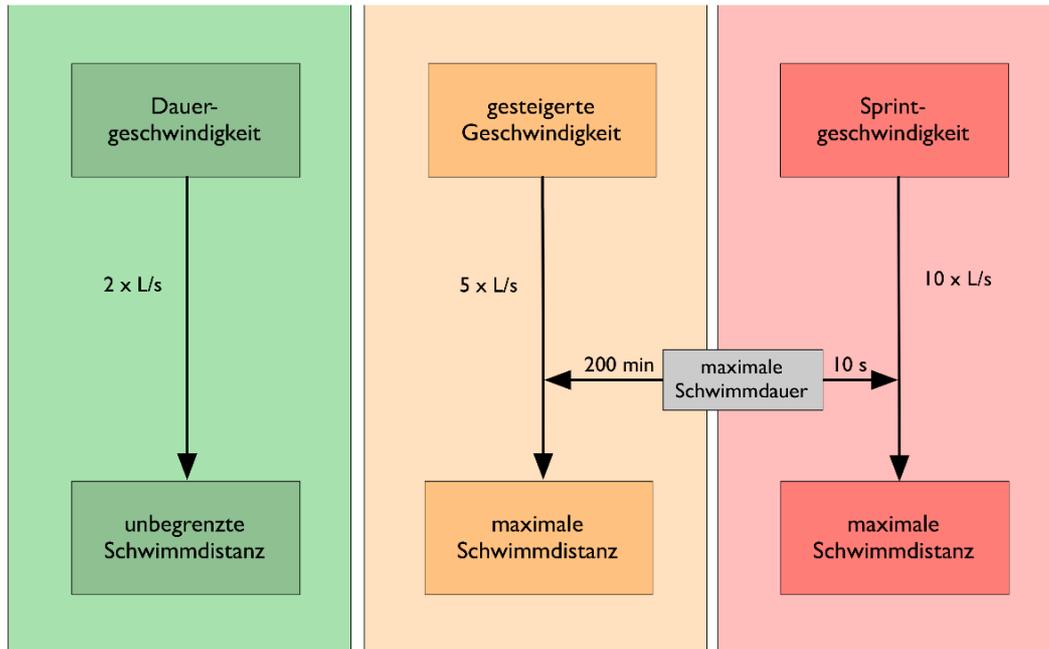
Neben der Wassertiefe und der Schwimmggeschwindigkeit muss als dritter Faktor die maximale Schwimmdistanz berücksichtigt werden. Aufgrund der Schwimmleistungen (Anhang B.2) ergeben sich für die gesteigerte Geschwindigkeit und für die Sprintgeschwindigkeit maximale Distanzen, die ohne Erholungspause überwindbar sind (Abb. A4).

<sup>6</sup> Eine gute Zusammenstellung zur Schwimmleistung findet sich in Ebel (2013, S. 165 ff.), basierend auf einer breiten Literaturrecherche.

<sup>7</sup> Neben den hier angegebenen Standardwerten für die Schwimmggeschwindigkeiten finden sich genauere, z. T. auch temperaturabhängige Berechnungen z. B. in Ebel 2013 (S. 170 ff.) und Katopodis & Gervais (2016).

Die Sprintgeschwindigkeit kommt an besonders kritischen Stellen zur Anwendung. Die in 10–20 Sekunden zurücklegbare Distanz ist aber kein adäquater Wert für die Maximallänge solcher Stellen. Der Energieverbrauch wäre viel zu hoch und die anschliessende Ruhepause viel zu lange. Zudem müssten geeignete Ruhehabitate (tiefe Kolke) vorhanden sein, damit der Prädationsdruck nicht massiv zunimmt. Folglich muss mit kürzeren Sprintzeiten gerechnet werden.

Im Kanton GR mutet man den Forellen Sprintzeiten von lediglich 1–2 Sekunden zu (Anhang A), was für eine 20 cm lange Bachforelle einer Distanz von 2–4 m entspricht. Dehus (2005) empfiehlt eine maximale Distanz von 2 m. Kritischen Stellen sind im Allgemeinen aber deutlich länger als 2 m. Geht man von einer zu überwindenden Distanz von 5 m aus würde das einer 20 cm langen Forelle eine Sprintzeit von 2.5 s abverlangen. Spätestens nach 4 solcher Sprints müsste sie eine längere Ruhepause einlegen.



<b>Totallänge</b> L [cm]	<b>Dauer-geschwindigkeit</b> $I_{\max} = \text{unbegrenzt}$ [m]	<b>gesteigerte Geschwindigkeit</b> $I_{\max} = 60'000 \times L$ [m]	<b>Sprint-geschwindigkeit</b> $I_{\max} = 100 \times L$ [m]
20	$\infty$	12'000	20
30	$\infty$	18'000	30
40	$\infty$	24'000	40
50	$\infty$	30'000	50
60	$\infty$	36'000	60
70	$\infty$	42'000	70
80	$\infty$	48'000	80
90	$\infty$	54'000	90
100	$\infty$	60'000	100

Abb. A4 Schwimmgeschwindigkeiten der Salmoniden und maximal überwindbare Distanzen ( $I_{\max}$ ) in Abhängigkeit von der Totallänge (L). Vereinfacht nach Pavlov 1989, in Adam & Lehmann (2011).

## C Mindestwassertiefe: Empfehlungen und Schwierigkeiten

Die Erläuterungen in Anhang B sind theoretischer Natur. Sie basieren primär auf Laborstudien und werden der komplexen exo- und endogenen Bedingungen, denen ein Fisch ausgesetzt ist, nur teilweise gerecht. Die nachfolgend formulierten Empfehlungen sind deshalb als pragmatischer Ansatz zu betrachten. Die resultierenden Mindestwassertiefen für das Datensample aus der Schweiz (Abb. A2 und A3) zeigt Abbildung A5.

### C.1 Generell

Die **Mindestwassertiefe** in einer durchgehende Rinne der Restwasserstrecke beträgt generell das 2.5fache der maximalen Körperhöhe. Diese hängt von der Totallänge der grössten Fische ab (Abb. A1)<sup>1</sup>. Es wird davon ausgegangen, dass die Salmoniden die Restwasserstrecke bei dieser Wassertiefe mit der Dauergeschwindigkeit passieren können. Sie kann quasi unbegrenzt aufrecht erhalten werden. Eine **Maximallänge** der Restwasserstrecke muss daher nicht definiert werden.

In Anlehnung an die heutige Auslegung der Fischwandertiefe in der Schweiz wird zusätzlich eine minimale Mindestwassertiefe von 20 cm gefordert, die nicht unterschritten werden darf.

### C.2 Untiefen

Untiefen sind kurze Abschnitte der Restwasserstrecke, in denen die generelle **Mindestwassertiefe** aufgrund der natürlichen Gerinnetopografie unterschritten wird (z. B. bei Schnellen), aber keine besonders kritische Situation vorliegt (Kap. C.3). Die Mindestwassertiefe in einer Untiefe entlang der durchgehenden Rinne beträgt das 2fache der maximalen Körperhöhe.

In Anlehnung an die heutige Praxis in einigen Kantonen (z. B. GR, NE und VD) könnte zusätzlich eine minimale Mindestwassertiefe von 15 cm gefordert werden, die nicht unterschritten werden darf. Da es hierfür keine biologische Begründung gibt, wird darauf verzichtet.

Es wird davon ausgegangen, dass Salmoniden Untiefen der 2fachen Körperhöhe nur mit erhöhtem Energieaufwand passieren können. Folglich muss eine **Maximallänge** für die Untiefe definiert werden. Wendet man das Modell der gesteigerter Schwimmgeschwindigkeit an dürften die Untiefen im Extremfall mehrere Kilometer lang sein (Abb. A4). Oftmals würde dann die gesamte Restwasserstrecke als Untiefe gelten, was keinen Sinn macht<sup>2</sup>. Die Anwendung der Sprintgeschwindigkeit ist ebenfalls unsinnig, da sie nur in extremen Situation angewendet wird (Anhang C.3). Vermutlich wird der Fisch die Untiefe mit einer Geschwindigkeit zwischen diesen beiden Modi passieren<sup>3</sup>.

Aus der Expertenbefragung geht hervor, dass je nach Kanton und Situation 5–30 m lange Untiefen toleriert werden. Konkrete Grundlagen, um die Maximallänge einer für Salmoniden passierbaren Untiefe zu definieren, sind aber nicht bekannt. Wir empfehlen daher einen pragmatischen Ansatz zu verfolgen. Im Sinne einer Faustregel soll die Maximallänge der Untiefe das 50fache der Totallänge der grössten vorkommenden Salmoniden betragen. Dieser Wert entspricht der Hälfte der mit Sprintgeschwindigkeit maximal zurücklegbaren Distanz (Abb. A4). Da die Fische die Untiefe aber deutlich langsamer durchschwimmen werden, besteht eine Energiereserve (z. B. für die Passage mehrerer Untiefen), bevor der Fisch eine längere Erholungspause einlegen muss.

<sup>1</sup> Zur Definition der «grössten» Fische vgl. Anhang D.

<sup>2</sup> Im Vergleich zur Situation bei natürlichem Abfluss kann eine Restwasserstrecke als lange Untiefe angesehen werden. Insofern müsste die Länge der Restwasserstrecke mit einer generellen Mindestwassertiefe vom 2fachen der Körperhöhe gemäss Abbildung 2 begrenzt werden. Dies würde aber zu einer massiven Beschneidung der Nutzungsansprüchen der Kraftwerkbetreiber führen.

<sup>3</sup> Übergangsbereiche zwischen den drei Schwimmmodi propagiert auch Schneider (2009) für Blockkrampen.

### C.3 Einzelfälle

An Stellen mit einer durchgehenden glatten Sohle (Sohlenverbauungen, Felsrippen) können sehr kurze Abschnitte mit ausgesprochen geringen Wassertiefe vorkommen. Das Wasser verteilt sich dann über die gesamte Breite. Eine **Mindestwassertiefe** vom 2fachen der Körperhöhe kann daher oft nur mit vergleichsweise grossen Abflussmengen erreicht werden. Für solche Einzelfälle gelten deshalb spezielle Anforderungen: Die **Maximallänge** des Hindernisses beträgt 5 m. Die Mindestwassertiefe beträgt das 1fache der Körperhöhe, aber mindestens 7 cm.

Einem längeren Gewässerabschnitt mit anstehendem Fels, der unter natürlichen Abflussbedingungen von Fischen durchschwommen wird, werden generalisierte Vorgaben zur Mindestwassertiefe kaum gerecht. Die Mindestwassertiefe muss hier unter Berücksichtigung der natürlichen Situation massgeschneidert definiert und im Restwasserbericht plausibel dargelegt werden.

### C.4 Abweichende Mindestwassertiefe bei unbekannter Körperhöhe

Die Mindestwassertiefe ergibt sich direkt aus der maximalen Körperhöhen der grössten Fische (Kap. C.1–C.3). Ist nur die Totallänge bekannt, kann sie geschätzt werden (Abb. 3, Abb. A1). Die Körperhöhe streut aber bei gleicher Totallänge um mehrere Zentimeter. Folglich weichen die Mindestwassertiefen basierend auf den berechneten von denen basierend auf den gemessenen maximalen Körperhöhen ab. Tabelle A1 zeigt die resultierenden Fehler für das Datensample aus der Schweiz.

Die Abweichung zur tatsächlich notwendigen Wassertiefe betragen bei der generellen Mindestwassertiefe meist zwischen 0 und 2 cm, kann aber bis zu 6 cm betragen. Eine Abhängigkeit von der gemessenen maximalen Körperhöhe oder der Totallänge besteht nicht. Die Abweichung ist mehrheitlich positiv, d. h. die Mindestwassertiefe würde eher zu hoch angesetzt.

#### Option

#### Zulässigkeit von Wassertiefen zwischen dem 1fachen und dem 2fachen der Körperhöhe

Die generelle Mindestwassertiefe kann auf kürzeren Abschnitten mit vorgegebener Maximallänge unterschritten werden (Untiefen). Die Mindestwassertiefe beträgt dann das 2fache der Körperhöhe.

Im Prinzip könnte man nun auch Unterschreitungen der Untiefen zulassen, z. B. auf einer Maximallänge vom 25fachen der Totallänge der grössten vorkommenden Salmoniden. Dieser Wert entspricht einem Viertel der mit Sprintgeschwindigkeit maximal zurücklegbaren Distanz (Abb. A4). Die Mindestwassertiefe könnte z. B. das 1.5fache der Körperhöhe betragen.

#### Ungelöst!

#### Strömungswechsel

Breite seichte Riffel bei langgezogenem Strömungswechsel sind oft ausgesprochen seicht. Die Wassertiefe lässt sich nur mit einer massiven Abflusserhöhung (oder baulichen Massnahmen) deutlich anheben.

Im Prinzip handelt es sich damit um einen weiteren Einzelfall gemäss Kapitel C.3. Solche Querströmungen sind aber weniger eindeutig zu definieren als eine Felsrippe oder eine glatte Rampe. Zudem beträgt ihre Länge im Allgemeinen deutlich mehr als 5 m.

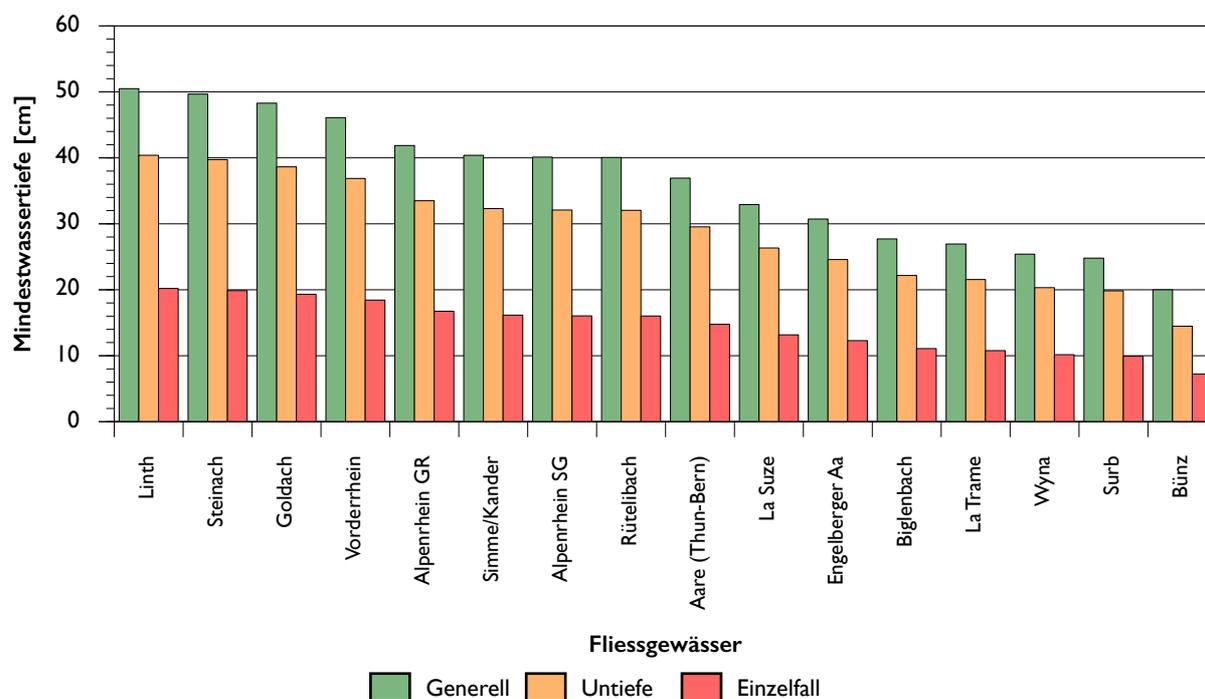


Abb. A5 Mindestwassertiefen für einige Schweizer Fließgewässer basierend auf den berechneten maximalen Körperhöhen. Datenset gemäss Abbildung A2 und A3 (nur n>10), sortiert nach der Mindestwassertiefe.

Tab. A1 Unterschiede in der Mindestwassertiefe basierend auf den berechneten gegenüber denen basierend auf den gemessenen maximalen Körperhöhen. Datenset gemäss Abbildung A2 und A3 (nur n>10), sortiert nach der berechneten maximalen Körperhöhe.

Gewässer	N	max. Totallänge [cm]	max. Körperhöhe [cm]			Differenz Mindestwassertiefe		
			gemessen	berechnet	Differenz	Generell	Untiefe	Ausnahmefall
Linth	49	93.0	20	20.2	0.2	0	0	0
Steinach	38	91.5	21.5	19.9	-1.6	-4	-3	-2
Goldach	47	89.0	18.5	19.3	0.8	2	2	1
Vorderrhein	13	85.0	17.5	18.4	0.9	2	2	1
Alpenrhein GR	56	77.3	17.4	16.7	-0.7	-2	-1	-1
Simme/Kander	53	74.6	17.2	16.2	-1.0	-3	-2	-1
Alpenrhein SG	19	74.1	19.1	16.0	0.0	0	0	0
Rütelibach	17	74.0	16	16.0	0.0	0	0	0
Aare (Thun-Bern)	25	68.3	16.4	14.8	-1.6	-4	-3	-2
La Suze	18	61.0	13.2	13.2	-0.0	-0	-0	-0
Engelberger Aa	22	57.0	13.0	12.3	-0.7	-2	-1	-1
Biglenbach	11	51.5	10.2	11.1	0.9	2	2	1
La Trame	11	50.1	10.9	10.8	-0.1	-0	-0	-0
Wyna	12	47.3	8.3	10.2	1.9	5	4	2
Surb	18	46.2	9.9	9.9	0.0	0	0	0
Bünz	21	34.0	6.3	7.2	0.9	2	2	1

## C.5 Kumulativer Effekt

Es wird davon ausgegangen, dass bei Einhaltung der generellen Mindestwassertiefe vom 2.5fachen der Körperhöhe bzw. von mindestens 20 cm die Restwasserstrecke mit der Dauergeschwindigkeit durchschwommen wird. Diese Schwimmgeschwindigkeit kann quasi unbegrenzt aufrecht erhalten werden. Die Anzahl aufeinander folgender Restwasserstrecken spielt daher für den Fisch keine Rolle.

Es wird aber angenommen, dass bei einer Unterschreitung der generellen Mindestwassertiefe (Untiefen, Einzelfälle) eine Schwimmgeschwindigkeit zur Anwendung kommt, die zu einer Ermüdung führt und im Extremfall eine mehrstündigen Ruhepause nach sich zieht. Muss der Fisch mehrere solche Stellen passieren, resultiert ein beträchtlicher Energieverlust. Unterbricht der Fisch die Wanderung und wartet auf einen höheren Abfluss, hat das oft einen grossen Zeitverlust zur Folge (Kap. 2.2). Beides fehlt dem Fisch schliesslich für die anstrengende Zeit der Fortpflanzung und die anschliessende Rückwanderung.

Eine Quantifizierung des kumulativen Effektes von mehrfachen Unterschreitungen der generellen Mindestwassertiefe ist gemäss dem heutigen Wissensstand nicht möglich. Folglich lässt sich auch keine abschliessende Aussage darüber machen, ob und um wie viel die Mindestwassertiefen in solchen Restwasserstrecken allenfalls anzuheben wäre.

## D Herleitung einer Referenzlänge für Seeforellen

Es stellt sich die Frage, welche Fischgrössen (Totallängen) für die Berechnung der Mindestwassertiefen herangezogen werden sollen. Falls dies nicht die absolut grössten Fische sein sollen, könnte es die Totallänge sein, die einem bestimmten Quantil entspricht.

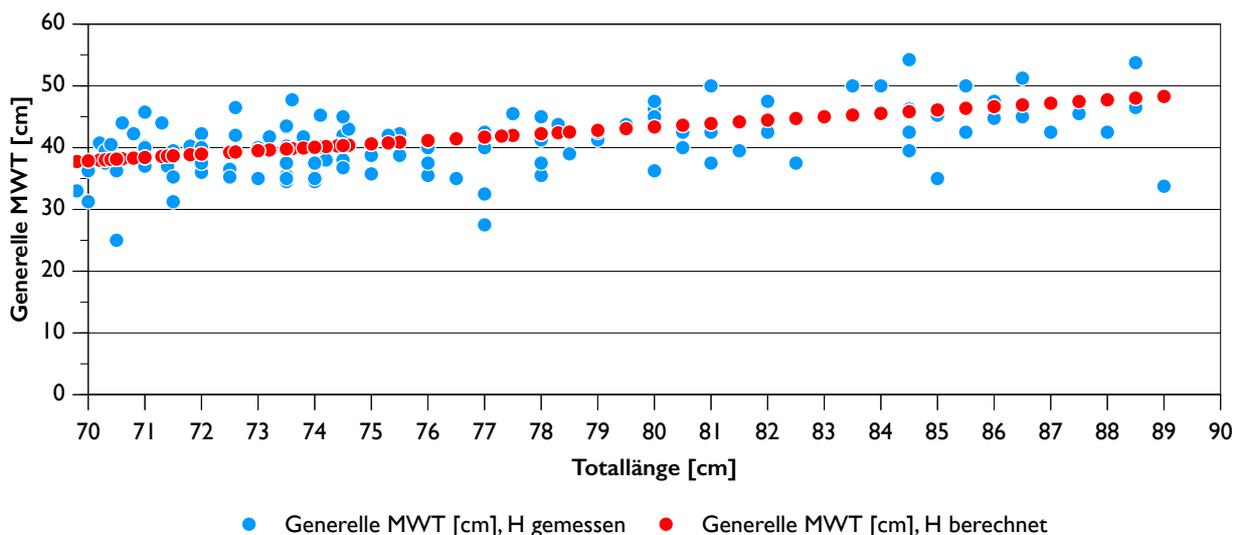
Bei der praktischen Anwendung besteht das Problem, dass die Stichprobe an Seeforellen, die durch eine elektrische Befischung oder durch den Laichfischfang zur Verfügung steht, oft zu klein ist, um eine verlässliche Aussage zur Häufigkeit der grossen Fische machen zu können. Es stellt sich daher die Frage, ob für Seeforellen eine Referenzlänge festgelegt werden soll, aus der sich dann eine feste Mindestwassertiefe ergibt, die für ein Einzugsgebiet oder für alle Seeforellengewässer als Richtwert gelten würde. Mit diesem Vorgehen könnten Unsicherheiten aufgrund ungenügender lokal erhobener Daten ausgeräumt werden. Die Tabelle A2 und die Abbildungen A6 und A7 liefern dazu Entscheidungshilfen.

Die Definition einer Referenzlänge für Bachforellen ist nicht sinnvoll, da diese je nach Gewässertyp unterschiedliche Maximalgrössen erreichen.

**Tab. A2** Quantile der Verteilung der Totallängen der Seeforellen (Abb. A7). Datenset gemäss Abbildung A2; zusätzlich wurden Seeforellen aus der Hasliaare berücksichtigt.

Beispiel: Das 90 %-Quantil für alle Seeforellengewässer entspricht einer Totallänge von 80 cm, d. h. 90 % der Fische der Stichprobe sind kleiner als 80 cm.

Gewässer	N	Quantil [Totallänge cm]				
		70 %	75 %	80 %	85 %	90 %
Bodenseezufl. o. Alpenrhein	168	74	76	78	81	85
Alpenrhein	80	71	71	72	73	75
Bodenseezufl. m. Alpenrhein	248	73	74	75	78	81
Simme/Kander	56	58	59	62	63	65
Hasliaare	20					
Linth	66	72	73	74	77	81
Alle	390	71	73	74	76	80



**Abb. A6** Generelle Mindestwassertiefen für die Seeforellen des Datensets gemäss Abbildung A2 mit Totallängen zwischen 70 und 90 cm (n=135). Die Mindestwassertiefen wurden auf der Basis der berechneten (rot) und der gemessenen (blau) Körperhöhen berechnet. Für erstere wurden zusätzlich Daten aus der Hasliaare berücksichtigt.

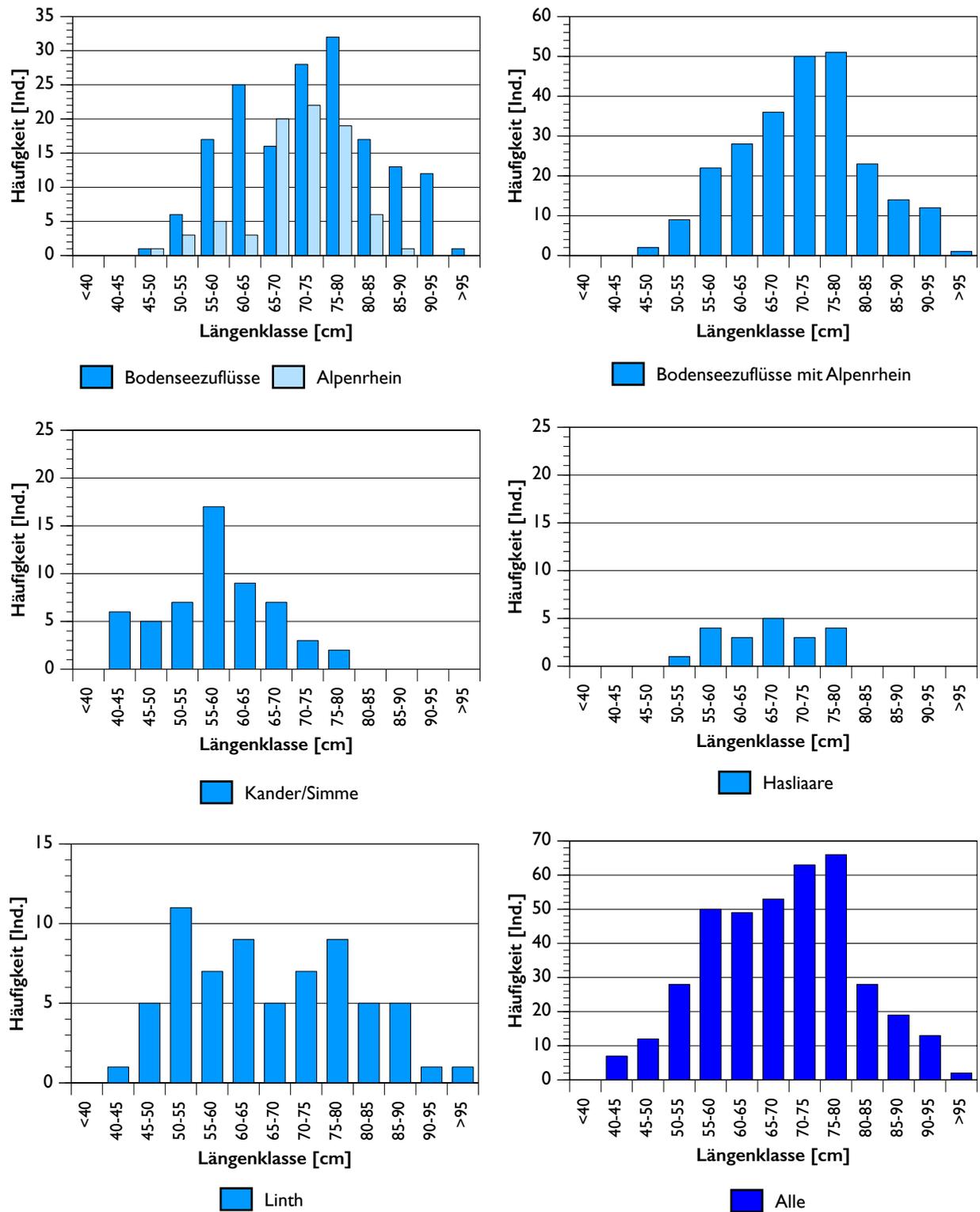


Abb. A7 Längen-Häufigkeitsverteilung der Seeforellen. Datenset gemäss Abbildung A2; zusätzlich wurden Seeforellen aus der Hasliare berücksichtigt.

## E Restwasserstrecken mit Vorkommen von Seeforellen

Die Karte zeigt die Restwasserstrecken der Schweiz sowie das heutige Vorkommen und potenzielle Vorkommen von Seeforellen in diesen Strecken (Dönni et al. 2017). Angegeben ist, ob die Seeforelle in einer Restwasserstrecke vorkommt oder nicht. Es ist aber nicht ersichtlich, ob sie in der ganzen Restwasserstrecke vorkommt. Beispiel Vispa (Kanton Wallis): Seeforellen kommen potenziell nur im untersten Abschnitt vor. Orange eingefärbt ist aber die gesamte Restwasserstrecke.

