



# Orientierende Unterlagen zur Wasserbaubewilligung

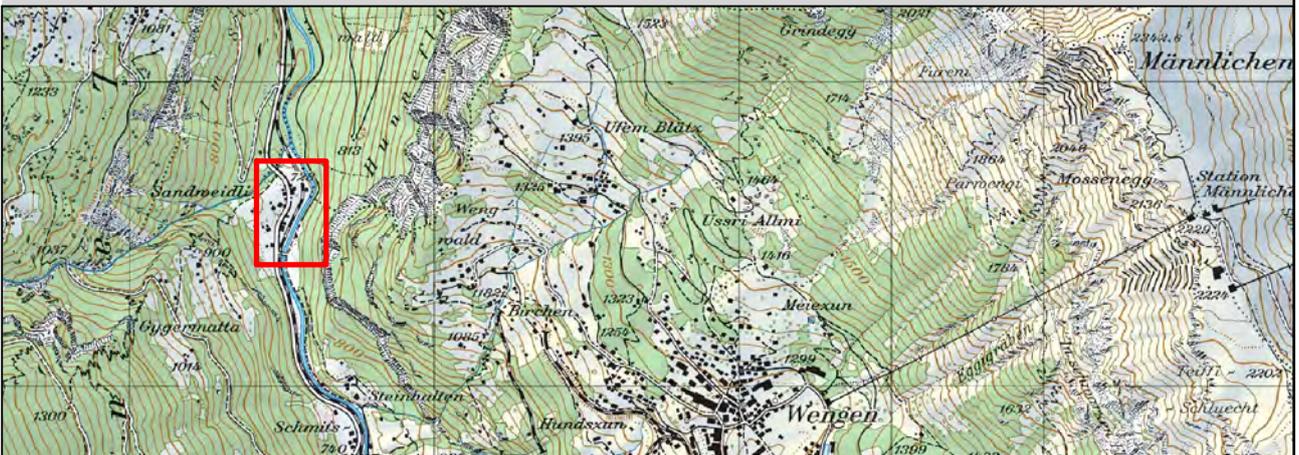
## Beilage 2.6

Gewässer	Weisse Lütshine	Gewässer-Nr.	502
Gemeinden	Lauterbrunnen	Projekt-Nr.	3184
Erfüllungspflichtiger	Schwellenkorporation Lauterbrunnen	Plan-Nr.	
Projekt vom	August 2018	Format	A4
Revidiert			

Unterlage

## Gutachten Ethohydraulik

# Hochwasserschutz und Längsvernetzung Sperrre Sandweidli



Projektverfasser



Mätzener & Wyss  
Bauingenieure AG

Florastrasse 5 | 3800 Interlaken | 033 826 10 10 | mw-ing.ch



Flussbau AG SAH  
dipl. Ing. ETH/SIA flussbau.ch



# Können aufsteigende Seeforellen eine Riegelabfolge (Transversensystem) in der Weissen Lutschine überwinden?

Etho-hydraulische Überlegungen anhand eines physikalischen Modells an der Technischen Hochschule Rapperswil



Bericht April 2017

Auftraggeber: Renaturierungsfonds des Kantons Bern



Dr. J. Guthruf-Seiler  
Dr. K. Guthruf-Seiler  
Hängertstrasse 13 G  
3114 Wichtrach

Büro für Gewässerökologie  
und Wassertechnik

**FISCHWERK**

**WERNER DÖNNI**

FISCHBIOLOGIE • GEWÄSSERÖKOLOGIE • GEOINFORMATIK

NEUSTADTSTRASSE 7, 6003 LUZERN

T 041 210 20 15

INFO@FISCHWERK.CH

WWW.FISCHWERK.CH



## Impressum

**Autoren:** Joachim Guthruf, Aquatica GmbH  
Werner Dönni, Fischwerk

**Fachliche Begleitung:** Willy Müller, Fischereiinspektorat des Kantons Bern

**Auftraggeber:** Renaturierungsfonds des Kantons Bern

### Zitiervorschlag:

GUTHRUF, J.; DÖNNI, W. (2017): Können aufsteigende Seeforellen eine Riegelabfolge (Traversensystem) in der Lütschine überwinden? Etho-hydraulische Überlegungen anhand eines hydraulischen Modells an der technischen Hochschule Rapperswil. – Bericht Aquatica, Fischwerk, Auftrag: Renaturierungsfonds des Kantons Bern: 24 S.

Titelbild: oben: Ausschnitt aus dem physikalischen Modell, Technische Hochschule Rapperswil, Foto: S. Gysin.

unten: Seeforelle, Foto Fischereiinspektorat des Kantons Bern.

## 1. Inhaltsverzeichnis

<b>1. Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>3. Einleitung</b> .....	<b>5</b>
3.1. Fragestellungen aus fischökologischer Sicht.....	5
<b>4. Datengrundlagen</b> .....	<b>5</b>
4.1. Etho-Hydraulische Randbedingungen .....	5
4.2. Abflussdaten .....	6
4.3. Temperaturdaten.....	6
4.4. Messgrößen und Grenzen der Messung im Modell .....	7
4.5. Berechnungen der Schwimmgeschwindigkeit.....	9
<b>5. Diskussion der Einzelparameter</b> .....	<b>11</b>
5.1. Anforderungen an minimale Wassertiefe zwischen den Riegeln .....	11
5.2. Minimale Wassertiefe bei der Passage der Querriegel .....	11
5.3. Schwimmende Überwindung der Querriegel (Fließgeschwindigkeit).....	12
5.3.1. Passierbarkeit bei tiefen Wassertemperaturen .....	13
5.3.2. Passierbarkeit bei mittleren Wassertemperaturen .....	13
5.3.3. Passierbarkeit bei hohen Wassertemperaturen .....	13
5.4. Überspringen der Riegel .....	14
5.5. Passierbarkeit des Traversensystems .....	14
5.5.1. Können die Seeforellen das Traversensystem ohne Ruhepause überwinden? .....	14
5.5.2. Können sich die Seeforellen in den Zwischenstrecken ausruhen.....	15
<b>6. Zusammenfassung der Resultate</b> .....	<b>18</b>
6.1. Beurteilung gemäss Katopodis & Gervais (2016) .....	18
6.1.1. Warmes Wasser (7.8°C, 90%-Perzentil) .....	18
6.1.2. Durchschnittstemperatur, 6.0° C .....	19
6.1.3. Kaltes Wasser (2.6 °C, 10%-Perzentil) .....	19
6.2. Beurteilung gemäss Ebel (2013) .....	20
6.2.1. Warmes Wasser (7.8°C, 90%-Perzentil) .....	20
6.2.2. Durchschnittstemperatur Seeforellen-Laichwanderung (Sep - Dez), 6.0° C.....	21
6.2.3. Kaltes Wasser (2.6 °C, 10%-Perzentil) .....	21
<b>7. Fazit</b> .....	<b>22</b>
<b>8. Literaturverzeichnis</b> .....	<b>24</b>

### 3. Einleitung

Die Seeforelle (*Salmo trutta* forma lacustris) ist auf Wanderungen zwischen dem See (Nahrungshabitat) und Fließgewässer (Laichhabitat, Jungfischhabitat) angewiesen. Die Unterbrechung dieser Laichwanderungen ist eine der Hauptursachen dafür, dass die Seeforelle in der Verordnung zum Bundesgesetz über die Fischerei (Stand 1.5.2017) schweizweit unter den stark gefährdeten Fischarten aufgeführt ist.

Die Lütschine ist eines der wichtigsten Laichgewässer für Seeforellen im Kanton Bern. In der Weissen Lütschine liegen wichtige Laichgebiete in der Talebene von Lauterbrunnen. Im Gebiet Sandweidli stehen auf einer Länge von etwa 120 m für Fische unpassierbare Betonsperren, die aber dank eines Vertikalschlitzpasses von den Fischen umgangen werden können.

Beim Hochwasser vom 10.10.2011 wurden das rechte Ufer unterhalb der hohen Sperre und der Vertikalschlitzpass schwer beschädigt. Die Schäden an den Verbauungen wurden wiederholt repariert. Der Fischpass wurde provisorisch mit Holz wiederinstandgesetzt und begrenzt auf die Dauer der Laichwanderung der Seeforelle in Betrieb genommen.

Mittel- bis langfristig muss die Lütschine im betreffenden Abschnitt neu verbaut werden. In physikalischen Modellversuchen an der Technischen Hochschule Rapperswil (HSR) erwies sich der Ersatz der Betonsperren durch eine Riegelabfolge (Traversensystem) als die beste Lösung aus Sicht der Stabilität und des Hochwasserschutzes.

#### 3.1. Fragestellungen aus fischökologischer Sicht

Aufgabe der vorliegenden Studie ist die Beurteilung, ob die im Modell getestete Bestvariante für die Riegelabfolge für Seeforellen passierbar ist. Im Detail sind folgende Fragen zu beantworten:

- Ist die Riegelabfolge bei den während der Laichwanderung der Seeforelle herrschenden Abflüssen und Wassertemperaturen für Seeforellen zwischen 30 und 90 cm Länge passierbar?
- Ist das Durchschwimmen der Engstellen im Bereich der Querriegel oder das Überspringen dieser Riegel die bessere Lösung für die Seeforellen?

### 4. Datengrundlagen

#### 4.1. Etho-Hydraulische Randbedingungen

Seeforellen im Einzugsgebiet des Brienersees decken einen sehr grossen Längenbereich von 30 bis 90 cm ab, wobei die meisten Tiere zwischen 60 und 70 cm messen. Für die Passierbarkeit der Riegelabfolge ist deshalb sowohl die minimale Wassertiefe in den Engstellen oder an seichten Stellen zwischen den Riegeln als auch die maximale Fließgeschwindigkeit in den Engstellen massgebend.

Während kleine Seeforellen auch seichte Stellen problemlos passieren können, sind für sie die hohen Fließgeschwindigkeiten in den Engstellen im Bereich der Riegel limitierend. Zudem können bei geringer Strukturierung der Riegelabfolge die Fließgeschwindigkeiten in den Abschnitten zwischen den Riegeln die Schwelle der Dauergeschwindigkeit<sup>1</sup> überschreiten.

---

<sup>1</sup> Geschwindigkeit, mit der ein Fisch dauerhaft schwimmen kann, ohne zu ermüden (Kap. 4.5).

## Können aufsteigende Seeforellen eine Riegelabfolge in der Weissen Lütschine überwinden?

Bei den grossen, Seeforellen mit Körperhöhen bis zu 20 cm stellt die Überwindung der hohen Fliessgeschwindigkeiten in den Engstellen meist kein Problem dar. Limitierend können hingegen die Untiefen im Bereich der Riegel und in den Strecken zwischen den Riegeln sein.

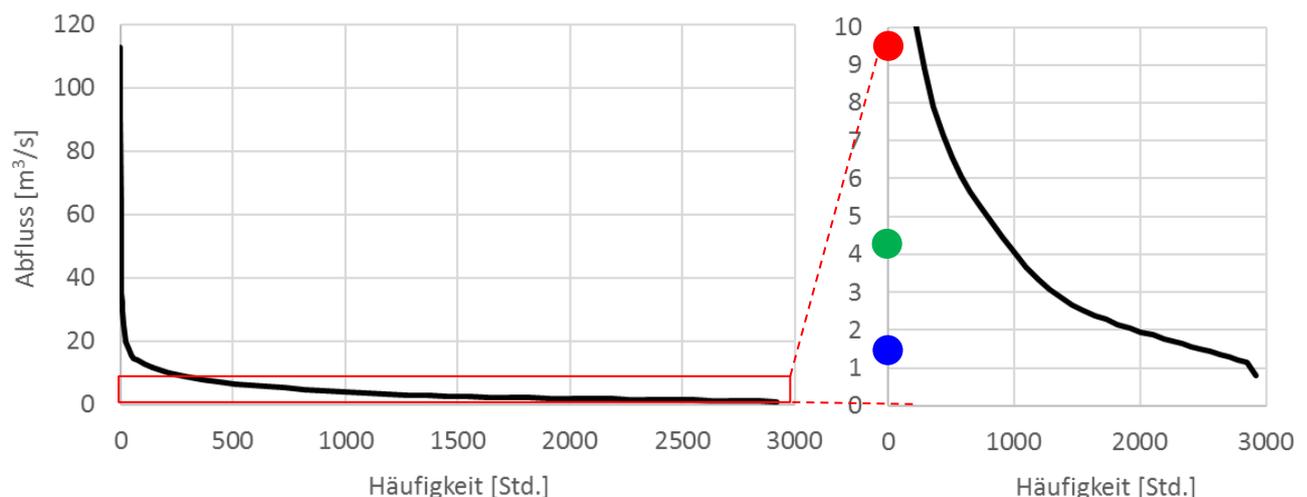
### 4.2. Abflussdaten

Der Abfluss der Lütschine wird an zwei Stellen im Gebiet gemessen:

- **Vereinigte Lütschine Gsteig** (BAFU Station 2109) rund 4 km oberhalb der Mündung in den Brienersee, 7.25 km unterhalb Sandweidli.
- **Weisse Lütschine Zweilütschinen** (BAFU Station 2200) rund 300 m oberhalb der Vereinigung der Weissen und Schwarzen Lütschine, 2.15 km unterhalb Sandweidli.

Massgebend für die Beurteilung der Passierbarkeit der Riegelabfolge für Seeforellen sind die Abflussmessungen der Weissen Lütschine bei Zweilütschinen.

Der Abfluss ist massgebend für die Fliessgeschwindigkeit und für die Wassertiefe in der Riegelabfolge. Deshalb wurde der Abfluss der Weissen Lütschine in Zweilütschinen für die Zeit der Laichwanderungen der Seeforelle analysiert. Es wurden drei massgebenden Abflüsse berechnet (Abb. 1), für die am Modell an der Hochschule Rapperswil Messungen vorgenommen wurden.



**Abb. 1** Abfluss-Dauerkurve der Weissen Lütschine, Zweilütschinen (Messstelle Nr. 2200) während der Laichwanderung der Seeforelle (September – Dezember) über die Jahre 2003–2016. Daten BAFU.

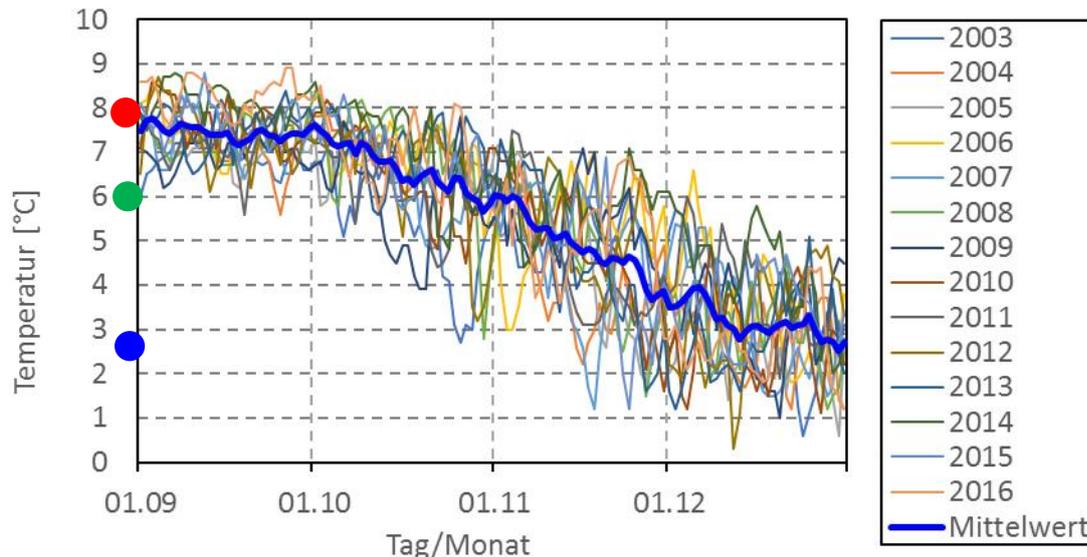
Rechte Grafik: Detail-Ausschnitt 0 – 10 m<sup>3</sup>/s mit den massgebenden Abflüssen:

- 10% Perzentil, 1.4 m<sup>3</sup>/s; ●
- Mittelwert, 4.3 m<sup>3</sup>/s; ●
- 90% Perzentil, 9.6 m<sup>3</sup>/s. ●

### 4.3. Temperaturdaten

Die Wassertemperatur wird lediglich in Gsteig an der Vereinigten Lütschine gemessen. Die Messwerte dieser Messstation werden als massgebend für die Beurteilung der Passierbarkeit der Riegelabfolge für Seeforellen betrachtet.

Die Temperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf die Überwindbarkeit von Hindernissen durch Fische, da die Leistungsfähigkeit und damit die Schwimmggeschwindigkeit der wechselwarmen Tiere in einem bestimmten Temperaturbereich ein Optimum hat. Das Temperaturoptimum der Bach- und Seeforelle liegt bei etwa 15 °C (KÜTTEL et al. 2002). Wegen des erheblichen Gletschereinflusses liegen die Wassertemperaturen der Lütschine aber weit unter dem Temperaturoptimum der Seeforelle. Die Analyse der Wassertemperatur beschränkt sich wiederum auf den Zeitraum der Laichwanderung der Seeforelle. Es wurden drei massgebende statistische Kenngrössen berechnet (Abb. 2).



**Abb. 2** Temperaturganglinien der Tagesmittelwerte in der Lütschine bei Gsteig (Messstelle Nr. 2109) während der Laichwanderung der Seeforelle (September bis Dezember) in den Jahren – 2016 sowie der Mittelwert über diese Periode. Daten, BAFU.

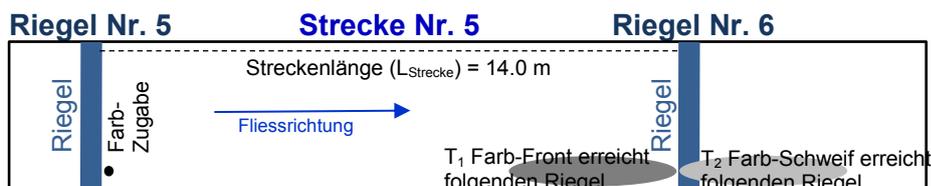
Statistische Kenngrössen:

- 10% Perzentil, 2.6 °C; ●
- Mittelwert, 6.0 °C; ●
- 90% Perzentil, 7.8 °C. ●

#### 4.4. Messgrössen und Grenzen der Messung im Modell

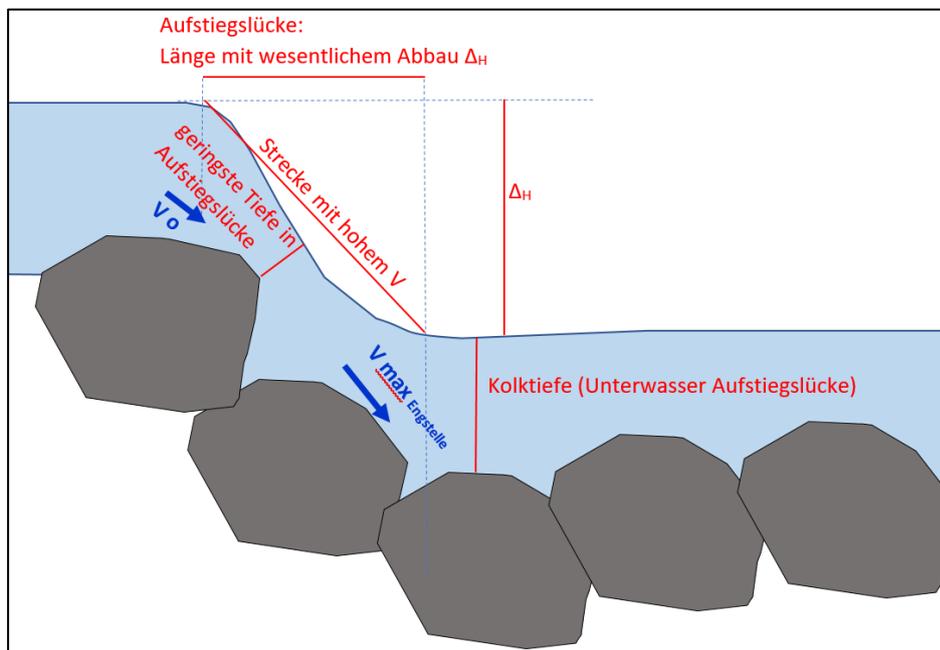
Die Messungen wurden am physikalische Modell der Riegelabfolge im Massstab 1:30 der Technischen Hochschule Rapperswil durchgeführt.

Für die Analyse der Passierbarkeit der Riegelabfolge sind mehrere Messgrössen von Bedeutung. Sie wurden im Modell an der Technischen Hochschule Rapperswil für insgesamt 6 Querriegel gemessen und in den realen Massstab umgerechnet. Für die Messung der Fliessgeschwindigkeiten in den Bereichen ausserhalb der Hauptströmung zwischen den Riegeln wurde das Wasser zwecks Visualisierung eingefärbt (Abb. 3).



**Abb. 3** Messungen in den Strecken zwischen den Riegeln im physikalischen Modell

- Messungen im Bereich zwischen den Riegeln (Abb. 3)
  - Minimaltiefe im Talweg der Zwischenstrecken
  - Fließgeschwindigkeit zwischen den Riegeln, Ausgangspunkt (Zugabe des Farbtropfens): Bereich ausserhalb der Hauptströmung
    - $V1 = L_{\text{Strecke}} / T1$
    - $V2 = L_{\text{Strecke}} / T2$
- Messungen im Riegelbereich (Abb. 4)
  - Kolkentiefe,
  - Absturzhöhe ( $\Delta_H$ )
  - Streckenlänge mit wesentlichem Abbau des  $\Delta_H$
  - Minimaltiefe in den Engstellen,
  - Maximale Fließgeschwindigkeit in den Engstellen ( $V_{\text{max Engstelle}}$ ),
  - Fließgeschwindigkeit am oberen Ende der Engstellen ( $V_0$ ),
  - mittlere Fließgeschwindigkeit in den Engstellen ( $(V_{\text{max Engstelle}} + V_0)/2$ )



**Abb. 4** Schema der in den Engstellen des Modells der Technischen Hochschule Rapperswil erhobenen Messgrößen.

Aus der Höhe des Absturzes ( $\Delta_H$ ) und der Streckenlänge mit wesentlichem Abbau des  $\Delta_H$  konnte die Länge der Strecke mit hohen Fließgeschwindigkeiten berechnet werden:

$$\text{Strecke mit hohem } V = \sqrt{(\Delta_H^2 + \text{Länge mit wesentlichem Abbau } \Delta_H^2)}$$

Das Modell wurde primär gebaut, um die Stabilität der Riegelabfolge bei grossen Abflüssen zu untersuchen. Die Messungen für die Beurteilung der Passierbarkeit der Seeforelle wurden aber bei geringen Abflüssen durchgeführt, bei den damit verbundenen geringen Abflusstiefen kann die Modellähnlichkeit nicht mehr 1:1 übertragen werden. Zum einen ist zu beachten, dass im Modell nur Korngrößen bis 0.25 mm abgebildet werden können, was in der Natur einem Korndurchmesser von 7.5 cm entspricht. Somit fehlen die Feianteile im Modell. Zum anderen werden Messungen auf Grund der kleinen Abflusstiefen durch die Oberflächenspannung beeinflusst.

Aus diesem Grund konnten die Fliessgeschwindigkeiten am oberen Ende der Engstellen ( $V_0$ ) im Modell nur beim höchsten und damit auch dem für Seeforellen kritischsten massgebenden Abfluss von  $9.6 \text{ m}^3/\text{s}$  gemessen werden.

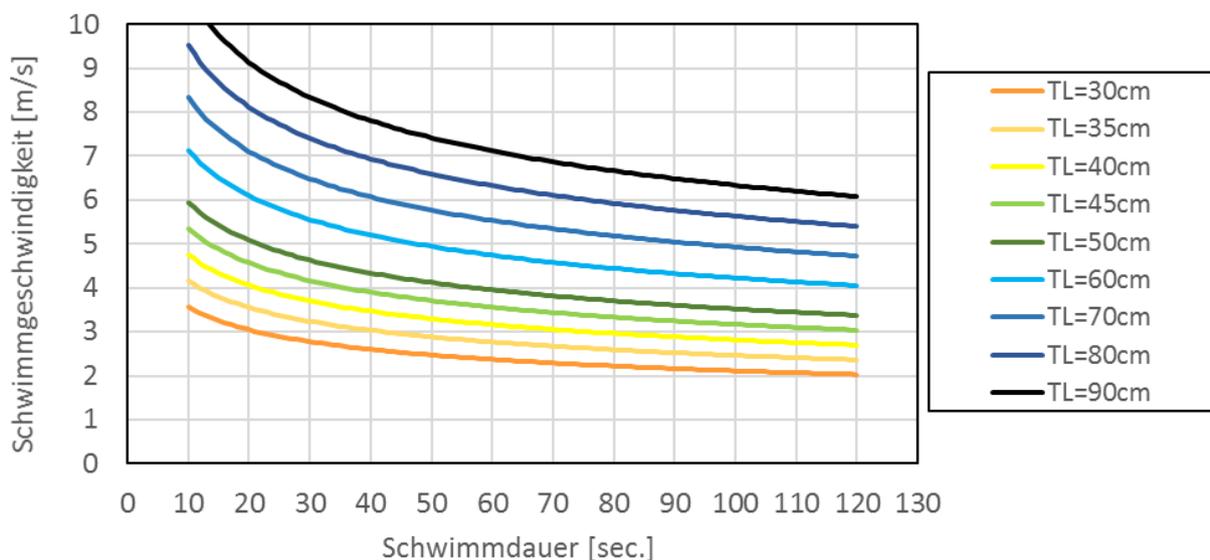
#### 4.5. Berechnungen der Schwimgeschwindigkeit

Hinsichtlich der Schwimgeschwindigkeit der Fische lassen sich drei Schwimmlevel unterscheiden:

- **Dauergeschwindigkeit** (sustained speed): Geschwindigkeit, die dauerhaft bzw. über 30 Minuten aufrechterhalten werden kann (KATOPODIS & GERVAIS 2016)<sup>2</sup>. Adulte Bachforellen können dauerhaft Geschwindigkeiten von  $0.6 - 1.3 \text{ m/s}$  aufrechterhalten (ADAM et al. 2014).
- **gesteigerte Schwimgeschwindigkeit** (prolonged speed): Darunter fallen Schwimgeschwindigkeiten, die 20 Sekunden bis 30 Minuten aufrechterhalten werden können (KATOPODIS & GERVAIS 2016)<sup>3</sup>. Sie beträgt für Salmoniden maximal etwa 5 Fischlängen/s (ADAM et al. 2014). Umgerechnet auf die Längen der in der vorliegenden Studie behandelten Fische ergibt das Schwimgeschwindigkeiten von  $1.5 - 4.5 \text{ m/s}$ .
- **Sprint-Geschwindigkeit** (burst speed): Geschwindigkeiten, die nicht mehr als 20 Sekunden (KATOPODIS & GERVAIS 2016) aufrechterhalten werden können.

Je höher die Schwimgeschwindigkeit eines Fisches ist, desto weniger lange kann er diese aufrechterhalten, bis die Erschöpfung eintritt (KATOPODIS & GERVAIS 2016; Abb. 5).

Als Basis für die Berechnung der Schwimgeschwindigkeit in Körperlängen pro Sekunde dienten die Angaben in KATOPODIS & GERVAIS (2016). Durch Multiplikation mit der Körperlänge konnte die absolute Schwimgeschwindigkeit für unterschiedlich grosse Seeforellen berechnet werden (siehe Abb. 5).



**Abb. 5** Beziehung zwischen der Schwimgeschwindigkeit und der Dauer, während der die Schwimgeschwindigkeit maximal aufrechterhalten werden kann für unterschiedlich lange Seeforellen. Grundlage: KATOPODIS & GERVAIS (2016).

<sup>2</sup> Adam et al. (2014) und EBEL (2013) geben eine Grenze von 200 Minuten an.

<sup>3</sup> Adam et al. (2014) setzen die untere Grenze bei 10 Sekunden an.

## Können aufsteigende Seeforellen eine Riegelabfolge in der Weissen Lütschine überwinden?

Die Schwimmgeschwindigkeit der wechselwarmen Fische ist stark abhängig von der Wassertemperatur (LARINIER et al. 2002). Bei warmem Wasser können die Fische bedeutend schneller schwimmen als bei kaltem. Aus diesem Grund wird die Schwimmgeschwindigkeit im Folgenden immer für die verschiedenen Wassertemperaturen beurteilt. Da die Beziehung zwischen der Wassertemperatur und der Schwimmgeschwindigkeit linear ist und da die Referenztemperatur der Arbeit von KATOPODIS & GERVAIS (2016) bekannt ist (11.4 °C), konnte eine Umrechnung auf die in Kapitel 4.3 aufgeführten statistischen Temperatur-Kenngrößen (10% Perzentil, Mittelwert, 90% Perzentil) vorgenommen werden (Achsenabschnitt = 0).

Die Dauer, die die Fische für die Passage eines Querriegels benötigen, wurde wie folgt berechnet:

$$\text{Dauer} = \text{Länge der Strecke mit hohem } V / (IV_{\text{Schwimm}} - IV_{\text{Engstelle}})$$

$IV_{\text{Engstelle}}$  = Betrag der Fließgeschwindigkeit in der Engstelle (Mittelwert  $V_{\text{max}}$ ,  $V_0$ )

$IV_{\text{Schwimm}}$  = Betrag der Sprintgeschwindigkeit der Seeforellen, max. 10 s ( $=T_A$ )

Die Passage wurde als unmöglich beurteilt, wenn:

- $IV_{\text{Engstelle}} \geq IV_{\text{Schwimm}}$
- die Dauer zur Überwindung der Stufe  $> T_A$

## 5. Diskussion der Einzelparameter

### 5.1. Anforderungen an minimale Wassertiefe zwischen den Riegeln

Wir gehen davon aus, dass die Passage der Strecke zwischen den Querriegeln mittels Dauergeschwindigkeit oder gesteigerter Schwimmggeschwindigkeit überwunden wird. Aus ethohydraulischen Überlegungen ist hierfür eine Wassertiefe von mindestens 2 Körperhöhen notwendig (ADAM et al. 2014). Die Berechnung der Körperhöhe aus der Totallänge richtet sich nach den Angaben in DÖNNI et al. (2017).

**Tab. 1 Minimale Wassertiefe [cm] in den Strecken zwischen den Querriegeln bei den massgebenden Abflüssen. Rote Zellen: nicht bzw. nur mittels erhöhtem Energieaufwand passierbar für die entsprechende Längensklasse der Seeforellen. TL = Totallänge.**

KH = Körperhöhe [cm]	6.4	7.5	8.6	9.7	10.8	12.9	15.1	17.3	19.5		
Mindestwassertiefe [m] = 2*KH	12.8	15.0	17.2	19.4	21.6	25.8	30.2	34.6	39.0		
1.4 m <sup>3</sup> /s	Strecke-Nr.	TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm	
	2	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	
	3	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	
	4	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	
	6	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	
	7	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	
	8	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	
	4.3 m <sup>3</sup> /s	Strecke-Nr.	TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm
		2	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0
		3	58.5	58.5	58.5	58.5	58.5	58.5	58.5	58.5	58.5
4		45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	
6		78.0	78.0	78.0	78.0	78.0	78.0	78.0	78.0	78.0	
7		45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	
8		63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	
9.6 m <sup>3</sup> /s	Strecke-Nr.	TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm	
	2	96.0	96.0	96.0	96.0	96.0	96.0	96.0	96.0	96.0	
	3	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0	
	4	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	
	6	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	
	7	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	
	8	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	

Die Wassertiefe ist bei geringem Abfluss (1.4 m<sup>3</sup>/s) in der Strecke 4 für Seeforellen ab 50 cm Länge limitierend. Strecke 6 ist für Seeforellen ab 80 cm Länge und Strecke Nr. 7 für Tiere ab 60 cm Länge nicht mehr passierbar. Ab 4.3 m<sup>3</sup>/s (Mittelwert) können alle Seeforellen die Zwischenstrecken passieren (Tab. 1).

Da tiefe Abflüsse während der Laichwanderung regelmässig auftreten, wäre eine morphologische Ausgestaltung der Zwischenstrecken als Niederwasserrinne positiv für die Passierbarkeit zu werten. Da die Morphologie der Strecken zwischen den Riegeln der Geschiebedynamik unterworfen ist und sich nach jedem Hochwasser verändert (pers. Mitteilung T. Berchtold, Flussbau AG), sind die Möglichkeiten einer Verbesserung sehr begrenzt.

### 5.2. Minimale Wassertiefe bei der Passage der Querriegel

Wir gehen davon aus, dass die Querriegel mit Sprintgeschwindigkeit überwunden werden, da die hohen Fliessgeschwindigkeiten in den Lücken der Querriegel mit gesteigerter Geschwindigkeit nur ausnahmsweise zu überwinden sind. Aus ethohydraulischen Überlegungen ist hierfür eine Wassertiefe von mindestens einer Körperhöhe notwendig (ADAM et al. 2014).

Je nach Beschaffenheit der Riegel ist die Wassertiefe sehr unterschiedlich. Sie ist aber lediglich in der Strecke Nr. 3 bei geringem Abfluss (1.4 m<sup>3</sup>/s) für Seeforellen ≥ 90 cm Länge limitierend. Durch eine geeignete Ausgestaltung kann erreicht werden, dass alle Querriegel auch bei geringem Abfluss für alle Seeforellen passierbar sind (Tab. 2).

**Tab. 2 Wassertiefe [cm] in den Lücken der betrachteten Querriegel bei den massgebenden Abflüssen. Rote Zellen: nicht passierbar für die entsprechende Längenklasse der Seeforellen. TL = Totallänge, KH = Körperhöhe. Berechnungen gemäss KATOPODIS & GERVAIS (2016).**

Mindestwassertiefe [m] = KH		6.4	7.5	8.6	9.7	10.8	12.9	15.1	17.3	19.5	
1.4 m <sup>3</sup> /s	Riegel-Nr.	TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm	
	2	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
	3	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
	4	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0
	6	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0
	7	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0
	8	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0
4.3 m <sup>3</sup> /s	Riegel-Nr.	TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm	
	2	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
	3	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0
	4	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0
	6	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0
	7	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0
	8	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0
9.6 m <sup>3</sup> /s	Riegel-Nr.	TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm	
	2	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0
	3	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0
	4	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0
	6	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0
	7	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0
	8	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0

### 5.3. Schwimmende Überwindung der Querriegel (Fließgeschwindigkeit)

Querriegel werden von den Fischen schwimmend überwunden, sofern sich der Wasserstrahl nicht vom Untergrund ablöst (ADAM et al. 2014)<sup>4</sup>.

Da die Wassertiefe gemäss Kapitel 5.2 nur in Ausnahmefällen limitierend ist, ist der entscheidende Faktor die Schwimmgeschwindigkeit der Fische. Die zu überwindenden Fließgeschwindigkeiten in den Lücken der Querriegel nehmen mit dem Abfluss zu. Deshalb können bei hohem Abfluss nur grosse und starke Fische aufsteigen.

Aus methodischen Gründen konnten die Messungen am Modell nur bei 9.6 m<sup>3</sup>/s, dem höchsten der drei massgebenden Abflüsse durchgeführt werden (siehe Kapitel 4.4). Dieser entspricht einem Abfluss, der während der Laichwanderung der Seeforelle an einem von zehn Tagen erreicht oder überschritten wird.

<sup>4</sup> Beim Sprung können Fische den optimalen Absprungort, die Sprungrichtung und das ideale Timing des Sprungs kaum abschätzen. Deshalb sind oft viele Versuche nötig, die mit einem Zeitverlust, massiv erhöhtem Energieverbrauch und einem erhöhten Verletzungsrisiko verbunden sind. Die schwimmende Überwindung des Querriegels ist deshalb die bessere und die zu favorisierende Lösung.

### 5.3.1. Passierbarkeit bei tiefen Wassertemperaturen

Eine Kombination aus einem Abfluss von 9.6 m<sup>3</sup>/s und einer niedrigen Wassertemperatur von 2.6 °C stellt eine sehr schwierige Voraussetzung für aufsteigende Seeforellen dar, da die Fliessgeschwindigkeiten hoch und die Schwimmggeschwindigkeiten der wechselwarmen Seeforellen eingeschränkt sind. Diese Kombination kommt nur sehr selten vor: theoretisch an einem von 100 Tagen.

Sämtliche Querriegel sind nur für 60 cm lange und grössere Seeforellen passierbar (Tab. 3). Die Unterschiede zwischen den Querriegeln zeigen aber, dass je nach Ausgestaltung der Lücken die meisten Riegel bereits für kleinere Seeforellen passierbar sind: Riegel Nr. 4 können Seeforellen ab 45 cm Länge überwinden, die meisten der Riegel (Nr. 2, 3, 7, 8) sind bereits für 50 cm lange Seeforellen überwindbar.

### 5.3.2. Passierbarkeit bei mittleren Wassertemperaturen

Im Vergleich zur Situation bei 2.6°C können bei mittlerer Wassertemperatur während der Laichwanderung (6.0°C) auch kleinere Seeforellen die Querriegel überwinden: Sämtliche Riegel sind bereits für Seeforellen ab 40 cm passierbar. Die Ausgestaltung der Lücken spielt bei dieser Wassertemperatur eine weniger wichtige Rolle als bei kaltem Wasser: Riegel Nr. 4 stellt selbst für 35 cm lange Forellen kein Hindernis dar (Tab. 3).

**Tab. 3 Aufstiegsdauer [s] durch die Lücken in den betrachteten Querriegeln bei einem Abfluss von 9.6 m<sup>3</sup>/s für die massgebenden Wassertemperaturen. Rote Zellen: nicht passierbar bei der Sprintgeschwindigkeit (T<sub>A</sub> = 10 s) der entsprechenden Längenklasse (TL) der Seeforellen ( $IV_{Engstelle} \geq IV_{Sprint}$  (ausgedrückt als ∞) oder Aufstiegsdauer > 10 s). Berechnungen gemäss KATOPODIS & GERVAIS (2016). Umrechnung auf verschiedene Temperaturen: LARINIER et al. (2002).**

Abfluss: 9.6m <sup>3</sup> /s (90%-Perzentil)		Riegel	TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm	
Sprintgeschwindigkeit (10 sec.)		Nr.	1.862	2.173	2.483	2.794	3.104	3.725	4.346	4.966	5.587	
Temperatur = 2.6 °C (10%-Perzentil)	2	∞	∞	∞	∞	9.3	2.0	1.1	0.8	0.6		
	3	∞	∞	∞	6936.3	5.5	1.8	1.1	0.8	0.6		
	4	∞	∞	∞	9.0	4.2	2.0	1.3	1.0	0.8		
	6	∞	∞	∞	∞	22.6	2.9	1.6	1.1	0.8		
Temperatur = 6.0 °C (Mittelwert)	7	∞	∞	∞	∞	5.5	1.7	1.0	0.7	0.6		
	8	∞	∞	∞	∞	6.8	2.1	1.3	0.9	0.7		
	Sprintgeschwindigkeit (10 sec.)		Nr.	2.433	2.838	3.243	3.649	4.054	4.865	5.676	6.487	7.298
	2	∞	∞	5.2	2.3	1.4	0.8	0.6	0.5	0.4		
Temperatur = 7.8 °C (90%-Perzentil)	3	∞	38.2	3.8	2.0	1.4	0.8	0.6	0.5	0.4		
	4	∞	7.7	3.4	2.2	1.6	1.0	0.8	0.6	0.5		
	6	∞	∞	9.0	3.3	2.0	1.1	0.8	0.6	0.5		
	7	∞	90.3	3.7	1.9	1.3	0.8	0.5	0.4	0.3		
Temperatur = 7.8 °C (90%-Perzentil)	8	∞	111.7	4.6	2.3	1.6	0.9	0.7	0.5	0.4		
	Sprintgeschwindigkeit (10 sec.)		Nr.	2.871	3.349	3.828	4.306	4.785	5.742	6.699	7.656	8.613
	2	∞	3.9	1.8	1.2	0.9	0.6	0.4	0.3	0.3		
	3	22.0	3.1	1.6	1.1	0.9	0.6	0.4	0.4	0.3		
Temperatur = 7.8 °C (90%-Perzentil)	4	7.0	3.0	1.9	1.4	1.1	0.8	0.6	0.5	0.4		
	6	∞	6.1	2.5	1.6	1.2	0.8	0.6	0.4	0.4		
	7	31.1	2.9	1.5	1.0	0.8	0.5	0.4	0.3	0.3		
	8	38.5	3.6	1.9	1.3	1.0	0.7	0.5	0.4	0.3		

### 5.3.3. Passierbarkeit bei hohen Wassertemperaturen

Bei einer Wassertemperatur von 7.8 °C sind sämtliche Querriegel für Seeforellen ab 35 cm Länge überwindbar, wobei Lücken mit geeigneter Ausgestaltung (wie Riegel Nr. 4 und 7) bereits von 30 cm langen Seeforellen überwunden werden können (Tab. 3).



Die Möglichkeit zur Passage mit gesteigerten Schwimmgeschwindigkeit, die deutlich länger aufrechterhalten werden kann, ist nur für grosse und kräftige Seeforellen unter idealen Temperaturbedingungen möglich (Tab. 5):

**Tab. 5 Aufstiegsdauer [s] durch die 14 Querriegeln bei einem Abfluss von 9.6 m<sup>3</sup>/s für die massgebenden Wassertemperaturen. Rote Zellen: nicht passierbar bei der gesteigerten Schwimmgeschwindigkeit ( $T_A = 120$  s) der entsprechenden Längenklasse (TL) der Seeforellen ( $IV_{Engstellen} \geq IV_{gesteigert}$  (ausgedrückt als  $\infty$ ) oder Aufstiegsdauer > 120 s). Berechnungen gemäss KATOPODIS & GERVAIS (2016), Berechnung für die massgebenden Temperaturen gemäss LARINIER et al. (2002).**

9.6 m <sup>3</sup> /s			TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm
2.6 °C	Streckenlänge [m]	mittlere V	1.057	1.233	1.409	1.585	1.761	2.114	2.466	2.818	3.171
(10%-Temp.-Perzentil)	26.44	2.82	$\infty$	12400.8	74.6						
6.0 °C			1.380	1.611	1.841	2.071	2.301	2.761	3.221	3.681	4.141
(Mittelwert)	26.44	2.82	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	65.3	30.6	19.9
7.8 °C			1.629	1.901	2.172	2.444	2.715	3.258	3.801	4.344	4.887
(90%-Temp.-Perzentil)	26.44	2.82	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	59.8	26.8	17.3	12.8

- Bei kaltem Wasser schaffen lediglich grosse Seeforellen ab 90 cm Länge theoretisch den Aufstieg ohne Ruhepause über das gesamte Traversensystem. Bei kleineren Seeforellen tritt vorher die Erschöpfung ein.
- Bei mittlerer Wassertemperatur (6.0 °C) ist das Traversensystem theoretisch für Seeforellen ab 70 cm Länge ohne Ruhepause passierbar.
- Bei hoher Wassertemperatur (7.8 °C) können Seeforellen ab 60 cm Länge theoretisch das Traversensystem ohne Ruhepause für überwinden. (Tab. 5).

Es ist anzumerken, dass es sich hierbei um theoretische Werte handelt, basierend auf teilweise schwierig durchzuführenden Messungen am physikalischen Modell. Sie setzen voraus, dass die Seeforellen keine Zeit verlieren bei der Suche der optimalen Aufstiegsroute und die Querriegel beim ersten Versuch bewältigen. Unter Berücksichtigung aller erwähnten Erschwernisse dürften die weitaus meisten Seeforellen das gesamte Traversensystem nur dann bewältigen können, wenn sie Ruhephasen einlegen können.

**Die Seeforellen sind deshalb auf Ruhezeiten mit stark reduzierter Fliessgeschwindigkeit angewiesen.**

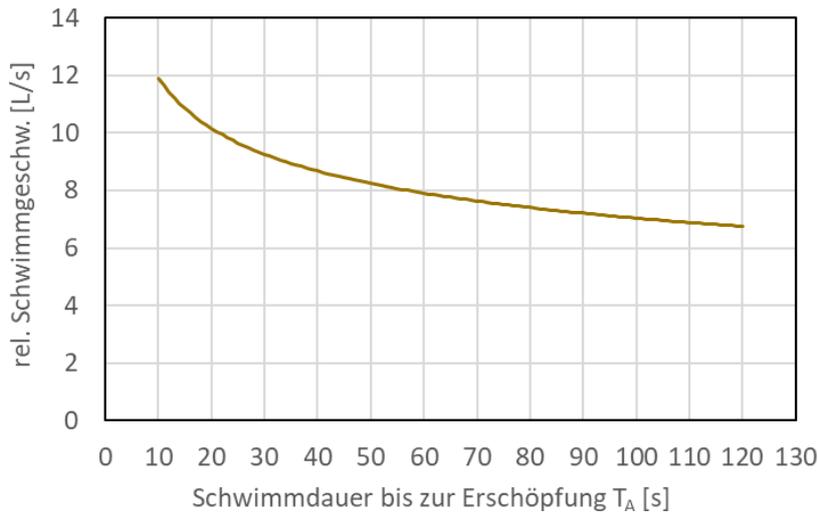
### 5.5.2. Können sich die Seeforellen in den Zwischenstrecken ausruhen

Wird die Grenze der Dauergeschwindigkeit (Kapitel 4.5) überschritten, ermüden die Fische und die Erschöpfung tritt ein. Je höher die Schwimmgeschwindigkeit ist, desto kürzer ist die Dauer bis zur Erschöpfung (Abb. 6) und desto länger dauert die Erholungsphase.

Da die Fliessgeschwindigkeit innerhalb der Zwischenstrecken wegen der oft geringen Tiefen im Modell nicht mit dem Messflügel gemessen werden konnte, wurde die Fliessgeschwindigkeit durch Farb-Zugabe in strömungsberuhigte Zonen direkt unterhalb des Riegels gemessen.

Eine erste Zeit T1 wurde gestoppt, wenn die Front des Farbtropfens den nächstunteren Riegel erreichte. Die entsprechende Fliessgeschwindigkeit wurde durch Division der Länge der Strecke zwischen 2 Riegeln (14 m) durch die erste Zeit T1 für jede Stufe getrennt ermittelt und als «V1» bezeichnet. Eine zweite Zeit T2 wurde gestoppt, wenn der Schweif der Farbe den folgenden Riegel passierte, d. h. die Stufe nicht mehr eingefärbt war. Die durch Division der Länge der Strecke zwischen 2 Riegeln (14 m) durch T2 ermittelte Fliessgeschwindigkeit wurde ebenfalls für alle Stufen separat berechnet und als «V2» bezeichnet (Abb. 3).

Können aufsteigende Seeforellen eine Riegelabfolge in der Weissen Lütschine überwinden?



**Abb. 6** Abhängigkeit zwischen der relativen Schwimmggeschwindigkeit von Forellen in Fischlängen pro Sekunde (L/s) und der Dauer  $T_A$ , während der diese Geschwindigkeit aufrechterhalten werden kann, für eine Wassertemperatur von 11.4 °C (KATOPODIS & GERVAIS 2016).

**a) bei kaltem Wasser (2.6°C)**

Seeforellen können sich selbst bei der ungünstigsten Kombination (höhere Fließgeschwindigkeit «V1», kaltes Wasser) bei den meisten massgebenden Abflüssen in der Strömung halten, ohne zu ermüden. Lediglich bei hohem Abfluss (9.6 m<sup>3</sup>/s) liegen die Fließgeschwindigkeiten in drei von 6 Strecken für Seeforellen mit Längen bis 45 cm ausserhalb des Bereichs der Dauergeschwindigkeit (Tab. 6).

**Tab. 6** Können sich die Seeforellen bei kaltem Wasser (2.6°C) in den Strecken zwischen den Riegeln bei der höheren Fließgeschwindigkeit «V1» (siehe Text oben) in der Strömung halten, ohne zu ermüden (Dauergeschwindigkeit)?

Dauerschwimmggeschwindigkeit 30 min. [m/s]	0.900	1.017	1.130	1.241	1.349	1.559	1.762	1.960	2.152	
Temperatur: 2.6°C (10%-Perzentil)	Strecke Nr.	TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm
Abfluss von 1.4 m <sup>3</sup> /s	2	ja								
	3	ja								
	4	ja								
	6	ja								
	7	ja								
	8	ja								
Abfluss 4.3 m <sup>3</sup> /s	2	ja								
	3	ja								
	4	ja								
	6	ja								
	7	ja								
	8	ja								
Abfluss 9.6 m <sup>3</sup> /s	2	ja								
	3	ja								
	4	nein	nein	nein	nein	ja	ja	ja	ja	ja
	6	nein	nein	nein	nein	ja	ja	ja	ja	ja
	7	nein	nein	nein	nein	ja	ja	ja	ja	ja
	8	ja								

**b) bei durchschnittlicher Wassertemperatur (6.0°C) und warmem Wasser (7.8°C)**

Bei durchschnittlichen und hohen Wassertemperaturen können die Seeforellen schneller schwimmen als bei kaltem Wasser und alle Tiere ab 35 cm Länge können sich in sämtlichen Strecken in der Strömung halten, ohne zu ermüden. Kleinere Seeforellen finden in drei von

## Können aufsteigende Seeforellen eine Riegelabfolge in der Weissen Lutschine überwinden?

sechs Strecken (Nr. 2, 3, 8) strömungsberuhigte Zonen, die ihnen ein Ausruhen ermöglichen (Tab. 7).

**Tab. 7 Können sich die Seeforellen bei mittlerer (6.0°C) und hoher Wassertemperatur (7.8°C) in den Strecken zwischen den Riegeln an stellen mit höherer Fließgeschwindigkeit «V1» (siehe Text oben) in der Strömung halten, ohne zu ermüden (Dauergeschwindigkeit)? Bei geringem (1.4 m<sup>3</sup>/s) und mittlerem Abfluss (4.3 m<sup>3</sup>/s) sind in sämtlichen Strecken für Seeforellen aller Längsklassen Ruhezeiten vorhanden.**

Dauerschwimmgeschwindigkeit 30 min. [m/s]		1.138	1.286	1.430	1.570	1.707	1.973	2.230	2.479	2.722	
Temperatur: 6.0°C (Mittelwert)	Strecke Nr.	TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm	
Abfluss 9.6 m <sup>3</sup> /s	2	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
	3	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
	4	nein	ja								
	6	nein	ja								
	7	nein	ja								
	8	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
	Dauerschwimmgeschwindigkeit 30 min. [m/s]		1.225	1.385	1.540	1.690	1.838	2.124	2.401	2.669	2.931
	Temperatur: 7.8°C (90%-Perzentil)	Strecke Nr.	TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm
Abfluss 9.6 m <sup>3</sup> /s	2	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
	3	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
	4	nein	ja								
	6	nein	ja								
	7	nein	ja								
	8	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	

Dieses Ergebnis erscheint auf den ersten Blick sehr positiv. Berücksichtigt man aber, dass die Obergrenze der Dauerschwimmgeschwindigkeit von Salmoniden je nach Literatur deutlich tiefer eingeschätzt wird<sup>5</sup>, so ist die Beurteilung, ob sich die Fischer erholen können, mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Schwimmggeschwindigkeiten in Laborversuchen ermittelt wurden und folglich nicht 1:1 auf Fließgewässer wie die Lutschine übertragbar sind.

Es kommt hinzu, dass nicht alle Zonen mit geeigneter geringer Fließgeschwindigkeit auch für ruhende Seeforellen geeignet sind. Zusätzlich zur Strömungsberuhigung muss eine Mindesttiefe von 48 cm (2.5 x Körperhöhe) gewährleistet sein und die räumliche Ausdehnung der Stelle mindestens 12.5 m<sup>2</sup> betragen BAUMANN et al. (2012).

**Obwohl die Berechnungen gemäss EBEL (2013) darauf hindeuten, dass Seeforellen sich in den Strecken zwischen den Riegeln ausruhen können, bestehen Unsicherheiten. Es wird deshalb empfohlen, das Traversensystem durch bauliche Anpassungen zu optimieren, dass Ruhezeiten für Seeforellen entstehen.**

Wertvolle Ruhezeiten können geschaffen werden, indem pro Querriegel ein höherer Block eingebaut wird, der erst bei Abflüssen über 10 m<sup>3</sup>/s überströmt wird und auf diese Weise den Fischen Strömungsschatten bietet. Der grosse Vorteil dieser Anpassung liegt darin, dass die strömungsberuhigte Stelle dort zu liegen kommt, wo das Wasser am tiefsten ist. Derartige Optimierungen sind insbesondere deshalb ins Auge zu fassen, da sie sich weder negativ auf die Stabilität der Verbauung auswirken (pers. Mitt. T. Berchtold) noch kostenrelevant sind.

<sup>5</sup> Einer Faustregel zufolge liegen die Werte zwischen 0.6 und 1.3 m/s (ADAM et al. 2014).

## 6. Zusammenfassung der Resultate

Die nachfolgenden Einschätzungen zur Passierbarkeit der Riegelabfolge für Seeforellen beziehen sich nur auf die Zeit der Laichwanderung zwischen September und Dezember.

### 6.1. Beurteilung gemäss Katopodis & Gervais (2016)

Unter der Voraussetzung, dass den Fischen innerhalb der Riegelabfolge ausreichend Ruhemöglichkeiten zur Verfügung stehen, sieht die Passierbarkeit nach der Beurteilung gemäss KATOPODIS & GERVAIS (2016) wie folgt aus (Tab. 8):

**Tab. 8 Passierbarkeit für Seeforellen unterschiedlicher Länge hinsichtlich der Wassertiefe und der Fliessgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Wassertemperaturen. Grün: passierbar, rot: nicht passierbar, schraffiert: passierbar bei Optimierung der Lücken. Berechnungen gemäss KATOPODIS & GERVAIS (2016), Umrechnung für massgebende Temperaturen gemäss LARINIER et al. (2002).**

7.8 °C (90%-Temp.-Perzentil)		TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm
1.4m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel									
	Tiefe Überwindung Strecke									
	V Überwindung Querriegel	Beurteilung nicht möglich, da Fliessgeschwindigkeit im Modell nicht messbar								
4.3m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel									
	Tiefe Überwindung Strecke									
	V Überwindung Querriegel	Beurteilung nicht möglich, da Fliessgeschwindigkeit im Modell nicht messbar								
9.6m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel									
	Tiefe Überwindung Strecke									
	V Überwindung Querriegel									
6.0 °C (Temp.-Mittelwert)		TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm
1.4m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel									
	Tiefe Überwindung Strecke									
	V Überwindung Querriegel	Beurteilung nicht möglich, da Fliessgeschwindigkeit im Modell nicht messbar								
4.3m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel									
	Tiefe Überwindung Strecke									
	V Überwindung Querriegel	Beurteilung nicht möglich, da Fliessgeschwindigkeit im Modell nicht messbar								
9.6m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel									
	Tiefe Überwindung Strecke									
	V Überwindung Querriegel									
2.6 °C (10%-Temp.-Perzentil)		TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm
1.4m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel									
	Tiefe Überwindung Strecke									
	V Überwindung Querriegel	Beurteilung nicht möglich, da Fliessgeschwindigkeit im Modell nicht messbar								
4.3m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel									
	Tiefe Überwindung Strecke									
	V Überwindung Querriegel	Beurteilung nicht möglich, da Fliessgeschwindigkeit im Modell nicht messbar								
9.6m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel									
	Tiefe Überwindung Strecke									
	V Überwindung Querriegel									

#### 6.1.1. Warmes Wasser (7.8°C, 90%-Perzentil)

- Bei geringem Abfluss (1.4 m<sup>3</sup>/s) können bis 45 cm lange Seeforellen aufsteigen, grössere scheitern an den Untiefen der Zwischenstrecken. Die Passage der Lücken in den Riegeln dürfte nur den 30 cm langen Seeforellen Schwierigkeiten bereiten<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Ob kleinere Forellen aufsteigen können, kann Mangels Messungen der Fliessgeschwindigkeit nicht beurteilt werden.

- Bei mittlerem Abfluss (4.3 m<sup>3</sup>/s) können alle Seeforellen ab 35 cm sicher aufsteigen<sup>7</sup>.
- Bei hohem Abfluss (9.6 m<sup>3</sup>/s) können alle Seeforellen ab 35 cm aufsteigen, kleinere Tiere scheitern an den Fliessgeschwindigkeiten in den Lücken der Querriegel. Durch Optimierung der Lücken können Forellen ab 30 cm Länge aufsteigen.

#### **6.1.2. Durchschnittstemperatur, 6.0° C**

- Bei geringem Abfluss (1.4 m<sup>3</sup>/s) werden über 45 cm lange Seeforellen durch Untiefen in den Zwischenstrecken am Aufsteigen gehindert. Die kleinsten Seeforellen, die den Aufstieg sicher schaffen, sind 40 cm lang<sup>7</sup>.
- Bei mittlerem Abfluss (4.3 m<sup>3</sup>/s) gibt es keine Einschränkung für grosse Seeforellen durch Untiefen. Kleine Seeforellen ab 40 cm Länge können sicher aufsteigen<sup>7</sup>.
- Bei hohem Abfluss (9.6 m<sup>3</sup>/s) können alle Seeforellen ab 40 cm aufsteigen, kleinere Tiere scheitern an den Fliessgeschwindigkeiten in den Querriegeln. Durch Optimierung der Lücken in den Querriegeln kann die Mindestgrösse der Forellen, die den Aufstieg schaffen, auf 35 cm gesenkt werden.

#### **6.1.3. Kaltes Wasser (2.6 °C, 10%-Perzentil)**

- Bei geringem Abfluss (1.4 m<sup>3</sup>/s) ist die Strecke für Seeforellen nicht passierbar, unabhängig von deren Grösse. Grosse Tiere werden durch die Untiefen in den Zwischenstrecken und kleine durch die hohen Fliessgeschwindigkeiten im Bereich der Querriegel am Aufstieg gehindert<sup>7</sup>. Eine Optimierung der Lücken in den Riegeln ermöglicht 45 cm langen Seeforellen den Aufstieg<sup>7</sup>.
- Bei mittlerem Abfluss (4.3 m<sup>3</sup>/s) können Seeforellen ab 60 cm sicher aufsteigen<sup>7</sup>. Durch eine Optimierung der Lücken in den Querriegeln kann die Mindestgrösse der aufsteigenden Seeforellen auf 45 cm gesenkt werden<sup>7</sup>.
- Bei hohem Abfluss (9.6 m<sup>3</sup>/s) können Seeforellen ab 60 cm Länge aufsteigen, kleinere Tiere können die Querriegel nicht überwinden, da ihre Schwimmggeschwindigkeit beim kalten Wasser zu gering ist. Durch eine Optimierung der Lücken in den Querriegeln nach Vorbild von Riegel Nr. 4 (Kapitel 5.3.1) können zusätzlich 45 – 50 cm lange Seeforellen aufsteigen.

Durch den Einbau einer Niederwasserrinne könnten theoretisch auch bei geringem Abfluss 50 bis 90 cm lange Seeforellen die Strecken zwischen den Riegeln durchschwimmen. Effektiv ist die Beschaffenheit der Sohle in den Zwischenstrecken der Geschiebedynamik unterworfen und verändert sich nach jedem Hochwasser. Die Möglichkeiten der Gestaltung einer Niederwasserrinne sind deshalb sehr begrenzt.

---

<sup>7</sup> Ob kleinere Forellen aufsteigen können, kann Mangels Messungen der Fliessgeschwindigkeit nicht beurteilt werden.

## 6.2. Beurteilung gemäss EBEL (2013)

Neben dem verwendeten Modell für die Schwimmggeschwindigkeit von KATOPODIS & GERVAIS (2016) gibt es weitere Modelle. Im deutschsprachigen Raum ist vor allem dasjenige nach EBEL (2013) bekannt. Dieses Modell schätzt die Schwimmggeschwindigkeit der Fische niedriger ein. Folglich führt es hinsichtlich der Passierbarkeit der Querriegel für Seeforellen zu einem deutlich schlechteren Ergebnis (Tab. 8):

**Tab. 9 Passierbarkeit für Seeforellen unterschiedlicher Länge hinsichtlich der Wassertiefe und der Fliessgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Wassertemperaturen. Grün: passierbar, rot: nicht passierbar, schraffiert: passierbar bei Optimierung der Lücken. Berechnungen gemäss EBEL (2013).**

7.8 °C (90%-Temp.-Perzentil)		TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm
1.4m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Schraffiert
	Tiefe Überwindung Strecke	Grün	Grün	Grün	Grün	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
	V Überwindung Querriegel	Beurteilung nicht möglich, da Fliessgeschwindigkeit im Modell nicht messbar								
4.3m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	Tiefe Überwindung Strecke	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	V Überwindung Querriegel	Beurteilung nicht möglich, da Fliessgeschwindigkeit im Modell nicht messbar								
9.6m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	Tiefe Überwindung Strecke	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	Überwindung Querriegel	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Schraffiert	Grün	Grün	Grün
6.0 °C (Temp.-Mittelwert)		TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm
1.4m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Schraffiert
	Tiefe Überwindung Strecke	Grün	Grün	Grün	Grün	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
	V Überwindung Querriegel	Beurteilung nicht möglich, da Fliessgeschwindigkeit im Modell nicht messbar								
4.3m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	Tiefe Überwindung Strecke	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	V Überwindung Querriegel	Beurteilung nicht möglich, da Fliessgeschwindigkeit im Modell nicht messbar								
9.6m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	Tiefe Überwindung Strecke	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	V Überwindung Querriegel	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Schraffiert	Grün	Grün	Grün
2.6 °C (10%-Temp.-Perzentil)		TL=30cm	TL=35cm	TL=40cm	TL=45cm	TL=50cm	TL=60cm	TL=70cm	TL=80cm	TL=90cm
1.4m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Schraffiert
	Tiefe Überwindung Strecke	Grün	Grün	Grün	Grün	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
	V Überwindung Querriegel	Beurteilung nicht möglich, da Fliessgeschwindigkeit im Modell nicht messbar								
4.3m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	Tiefe Überwindung Strecke	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	V Überwindung Querriegel	Beurteilung nicht möglich, da Fliessgeschwindigkeit im Modell nicht messbar								
9.6m <sup>3</sup> /s	Tiefe Überwindung Querriegel	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	Tiefe Überwindung Strecke	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	V Überwindung Querriegel	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Schraffiert	Schraffiert	Schraffiert

### 6.2.1. Warmes Wasser (7.8°C, 90%-Perzentil)

- Bei geringem Abfluss (1.4 m<sup>3</sup>/s) ist die Strecke für Seeforellen ab 50 cm Länge nicht passierbar<sup>8</sup>.
- Bei mittlerem Abfluss (4.3 m<sup>3</sup>/s) können alle Seeforellen ab 70 cm sicher aufsteigen<sup>8</sup>. Optimierungen an den Lücken ermöglichen zusätzlich 50 - 60 cm langen Seeforellen die Passage<sup>8</sup>.
- Bei hohem Abfluss (9.6 m<sup>3</sup>/s) können alle Seeforellen ab 70 cm aufsteigen, kleinere Tiere scheitern an den Fliessgeschwindigkeiten in den Lücken der Querriegel. Eine Optimierung dieser Lücken ermöglicht zusätzlich 50 - 60 cm langen Seeforellen die Passage.

<sup>8</sup> Ob ev. bis 45 cm lange Forellen aufsteigen können, kann Mangels Messungen der Fliessgeschwindigkeit nicht beurteilt werden.

### **6.2.2. Durchschnittstemperatur Seeforellen-Laichwanderung (Sep - Dez), 6.0° C**

- Bei geringem Abfluss (1.4 m<sup>3</sup>/s) ist die Strecke für Seeforellen ab 50 cm Länge nicht passierbar, da sie an den Untiefen der Zwischenstrecken scheitern<sup>7</sup>.
- Bei mittlerem Abfluss (4.3 m<sup>3</sup>/s) können alle Seeforellen ab 70 cm sicher aufsteigen<sup>7</sup>. Durch die Optimierung der Lücken in den Querriegeln kann die Mindestgrösse der Fische, die das Hindernis überwinden, auf 60 cm gesenkt werden<sup>7</sup>.
- Bei hohem Abfluss (9.6 m<sup>3</sup>/s) können Seeforellen ab 70 cm sicher aufsteigen. Kleinere Seeforellen scheitern an den hohen Fliessgeschwindigkeiten in den Lücken der Querriegel. Bei einer Optimierung der Lücken in den Querriegeln können bereits Seeforellen ab 60 cm Länge die Strecke passieren.

### **6.2.3. Kaltes Wasser (2.6 °C, 10%-Perzentil)**

- Bei geringem Abfluss ist die Strecke für Seeforellen aller Grössen unpassierbar. Grosse Fische scheitern an den Untiefen zwischen den Riegeln, kleine an den hohen Fliessgeschwindigkeiten im Bereich der Querriegel. Die Schwimmggeschwindigkeit der Seeforellen ist wegen der niedrigen Temperatur zu sehr reduziert.
- Bei mittlerem Abfluss schaffen mit Sicherheit 90 cm lange Seeforellen den Aufstieg<sup>9</sup>. Durch die Optimierung der Lücken in den Querriegeln verbessert sich die Situation, so dass Seeforellen ab 70 cm Länge sicher aufsteigen können<sup>5</sup>.
- Bei hohem Abfluss (9.6 m<sup>3</sup>/s) können Seeforellen ab 90 cm Länge die Riegel überwinden. Durch die Optimierung der Lücken in den Querriegeln verbessert sich die Situation, so dass Seeforellen ab 70 cm Länge sicher aufsteigen können.

Durch den Einbau einer Niederwasserrinne könnten theoretisch auch bei geringem Abfluss 50 bis 90 cm lange Seeforellen die Strecken zwischen den Riegeln durchschwimmen. Effektiv ist die Beschaffenheit der Sohle in den Zwischenstrecken der Geschiebedynamik unterworfen und verändert sich nach jedem Hochwasser. Die Möglichkeiten der Gestaltung einer Niederwasserrinne sind deshalb sehr begrenzt.

---

<sup>9</sup> Ob kleinere Forellen aufsteigen können, kann Mangels Messungen nicht beurteilt werden.

## 7. Fazit

Die Querriegel unterschieden sich erheblich hinsichtlich der Fließgeschwindigkeit in den Lücken. Wird das Modell 1:1 umgesetzt, limitiert der schlechteste aller Querriegel die Passierbarkeit der ganzen Strecke. Durch die Optimierung der «schlechten» Querriegel (z. B. Nr. 6 (Abb. 7) nach dem Vorbild des «besten» Querriegels Nr. 4 (Abb. 8) lässt sich die Passierbarkeit für Seeforellen deutlich verbessern, unabhängig vom Abfluss und der Wassertemperatur.



**Abb. 7** Für die Messungen ausgewählte Lücke in Querriegel Nr. 6. Die Fließgeschwindigkeiten waren hoch und relativ ungünstig für den Fischeaufstieg.



**Abb. 8** Für die Messungen ausgewählte Lücke in Querriegel Nr. 4. Die Fließgeschwindigkeiten waren sehr gering und optimal für den Fischeaufstieg.

Während die Passierbarkeit der Querriegel relativ einfach beurteilt werden konnte, bestehen grössere Unsicherheiten bei der Beurteilung der Durchschwimmbarkeit des gesamten Traversensystems, da die physikalische Beschreibung der Strecken zwischen den Riegeln weitaus komplexer und die Erholungszeit der Fische kaum abzuschätzen ist. Zudem ist das Suchverhalten der Seeforellen nach der optimalen Aufstiegsroute und die Anzahl erfolgloser Versuche, einen Riegel zu überwinden, völlig unbekannt.

Die Ergebnisse implizieren, dass lokal Zonen mit Fliessgeschwindigkeiten verfügbar sind, die den Fischen das Ausruhen ermöglichen. Allerdings konnte am Modell nicht beurteilt werden, ob die hinsichtlich der Fliessgeschwindigkeit als Ruhezone geeigneten Flächen auch hinsichtlich ihrer Tiefe und räumlichen Ausdehnung als Ruhezone für Seeforellen geeignet sind.

Es ist deshalb empfehlenswert, diesen Unsicherheiten eine gewisse Sicherheit entgegenzusetzen. Dies kann durch relativ geringfügige Anpassungen erreicht werden:

Es wird empfohlen, Strukturen einzubauen, welche bis zu einem Abfluss von 10 m<sup>3</sup>/s Strömungsschatten schaffen, in dem sich die wandernden Seeforellen ausruhen können. Im Optimalfall geschieht dies durch den Einbau eines grösseren Blocks in jeden Querriegel, so dass die strömungsberuhigte Zone im Kolk unterhalb des Querriegels zu liegen kommt.

Die Passierbarkeit der Riegelabfolge (Traversensystem) für aufsteigende Seeforellen ist schwierig zu beurteilen, da die Literaturangaben zu den Schwimmggeschwindigkeiten stark divergieren. Während das Bauwerk bei Beurteilung gemäss KATOPODIS & GERVAIS (2016)<sup>10</sup> bei hohem Abfluss- und optimalen Temperaturbedingungen bereits für Seeforellen ab 40 cm passierbar ist, können Seeforellen nach der Beurteilung gemäss EBEL (2013)<sup>11</sup> bei gleichen Abfluss- und Temperaturbedingungen erst mit Längen ab 70 cm aufsteigen.

Auch die Tatsache, dass die Beurteilung der Passierbarkeit auf Laborversuchen basiert und neben den im Modell gemessenen Parametern weitere Eigenschaften der Lücken (Rauigkeit des Grundes, Verklausungen etc.) massgebend für die Durchwanderbarkeit sind, sollte mit Hilfe einer Erfolgskontrolle geprüft werden, ob Seeforellen die Riegelabfolge effektiv passieren können.

Der Vergleich der verschiedenen Querriegel und Zwischenstrecken zeigte, dass bezüglich der Passierbarkeit der Querriegel, aber auch hinsichtlich von Ruhezone in den Zwischenstrecken grosse Unterschiede bestehen. Durch die bauliche Ausführung des Projekts kann folglich sehr positiv auf die Überwindbarkeit eingewirkt werden, sei es durch den Einbau von Blöcken, die Strömungsschatten und Ruhezone spenden, sei es durch die Ausgestaltung der Lücken in den Querriegeln. Wir empfehlen deshalb eine ökologische Begleitung bei der Projektierung sowie beim Bau.

---

<sup>10</sup> Das univariate Modell wurde mit Daten von Forellen (*Salmo trutta*) gefittet, die Anpassung an die massgebenden Temperaturen wurde nachträglich vorgenommen gemäss LARINIER et al. (2002).

<sup>11</sup> Das multivariate Modell, das Temperatur, Fischlänge und Schwimmdauer umfasst, wurde mit Daten von rheophilen Fischarten gefittet.

## 8. Literaturverzeichnis

- AMMANN, T. (2006). Der Einfluss von Barrieren auf die Verteilung von Fischen in kleinen Bächen, Fallstudien im Suhrental. – Diplomarbeit EAWAG / ETH Zürich, Fachrichtung Ökologie und Evolution: 73 S.
- ADAM, B.; BOSSE, R.; DUMONT, U.; GÖHL, C.; GÖRLACH, J.; HEIMERL, S.; KALUSA, B.; KRÜGER, F.; REDEKER, M.; SCHWEVERS, U.; SELLHEIM, P. (2014): Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. - Merkblatt DWA M 509: 334 S.
- BAUMANN, P., KIRCHHOFER, A., SCHÄLCHLI, U. (2012) Sanierung Schwall/Sunk – Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. BAFU, Umwelt-Vollzug 1203, 126 S.
- BMLFUW (2012): Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen (FAH`s). Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien: 102 S.
- DÖNNI, W., BOLLER, L., ZAUGG, C. 2016): Freie Fischwanderung nach Art. 31 Abs. 2 Bst. d GSchG. Mindestwassertiefen für See- und Bachforellen – Biologische Grundlagen und Empfehlungen. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt: 42 S.
- EBEL, G. (2013): Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen - Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. - Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel: 483 S.
- KATOPODIS, C.; GERVAIS, R. (2016): Fish swimming performance database and analyses, - Research document 2016/002 Canadian Science Advisory Secretariat (CSAS), Katopodis Ecohydraulics Ltd., Auftrag: Fisheries and Oceans Canada, Central and Arctic Region: 550 S.
- LARINIER, M.; TRAVADE, F.; PORCHER, J.P. (2002): Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. - Bull. Fr. Pêche Piscic., 364 suppl.: 208 S.
- REISER, D. W.; PEACOCK R. T. (1985). A Technique for assessing upstream Fish passage problems at small scale hydropower developments: 423-432.