
Charakterisierung der Laichgrubenareale und der Eingrabungstiefe der Eier bei Bachforellen (*Salmo trutta fario*)



Masterarbeit von Francesco Polli

Departement Umweltsystemwissenschaften (D-USYS), ETH Zürich

Eawag, Kastanienbaum

2012

Betreuung: Dr. Armin Peter
Fischökologie und Evolution, Eawag
6047 Kastanienbaum

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

eawag
aquatic research ○○○

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde untersucht, welche Habitats Bachforellen (*Salmo trutta fario*) für die Reproduktion nutzen und wie sich die Eingrabungstiefe von Bachforelleneiern in Flüssen mit unterschiedlichen Charakteristiken unterscheiden.

Dazu wurden 214 Bachforellenlaichgruben in zehn unterschiedlichen Flüssen der Schweiz empirisch untersucht. Die Laichgrubenstruktur und Mikrohabitatparameter (Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit über der Flusssohle und Substratgrösse) wurden erhoben und die Eingrabungstiefe der Eier in jeder Laichgrube gemessen. In 172 der untersuchten Laichgruben (80.4 %) wurden Eier gefunden.

Aus der Analyse der Laichgruben geht hervor, dass die Bachforellen ihre Laichgruben am häufigsten in Wassertiefen zwischen 10 - 20 cm graben. Dabei sind die Fließgeschwindigkeiten oft in einer Spannweite zwischen 0.2 - 0.3 m/s. Die dominante Substratkategorie in den Laichgruben ist der grobkörnige Kies (\varnothing 16 - 32 mm). Die Eingrabungstiefe der Eier variiert von Fluss zu Fluss. Im Durchschnitt beträgt sie 10.1 cm - dieser Wert stimmt gut mit den Resultaten von anderen Studien überein.

In zwei Flüssen wurde zusätzlich die Beziehung zwischen der Länge der laichenden Weibchen und der Eingrabungstiefe der Eier untersucht: In beiden Fällen konnte keine Beziehung festgestellt werden.

Die untersuchten Flüsse wurden anhand des Abflussverhaltens während des Winters in „stabile“ oder „instabile Gewässer“ eingeteilt. In instabilen Flüssen besteht eine grössere Wahrscheinlichkeit für Ereignisse mit grosser Geschiebebewegung, bei denen Laichgruben beeinträchtigt werden können. Darum wurde überprüft, ob sich die Bachforellen in instabilen Flüssen mittels veränderter Laichstrategie (tiefere Eingrabung der Eier) angepasst haben.

Gemäss der Einteilung in stabile/instabile Flüsse wurde ein Vergleich der Eingrabungstiefe der Eier und der Mikrohabitatparameter der Laichgruben durchgeführt.

In instabilen Flüssen graben die Bachforellen ihre Laichgruben in einem breiteren Wassertiefenspektrum als in stabilen Flüssen. Die am meisten genutzten Wassertiefen sind aber in beiden Gruppen zwischen 10 - 20 cm. Die Fließgeschwindigkeiten liegen bei 0.2 - 0.3 m/s in instabilen Flüssen und bei 0.3 - 0.4 m/s in stabilen Flüssen. Die dominante Substratkategorie in den Laichgruben beider Flussgruppen ist der grobkörnige Kies (\varnothing 16-32 mm).

Zwischen beiden Flussgruppen wurde für die Eingrabungstiefe der Eier kein signifikanter Unterschied festgestellt. Im Durchschnitt beträgt die Eingrabungstiefe der Eier 10.4 cm in instabilen Flüssen und 9.6 cm in stabilen Flüssen.

Inhaltverzeichnis

1	EINLEITUNG	2
1.1	LAICHAKTIVITÄT DER BACHFORELLEN	2
1.1.1	Die Bachforelle	2
1.1.2	Lebenszyklus	3
1.1.3	Struktur des Laichgrubenareals	4
1.1.4	Probleme für Laichgruben	6
1.2	EINFÜHRUNG IN DIE UNTERSUCHUNGEN	7
1.2.1	Motivation der Arbeit	7
1.2.2	Ziel der Arbeit	7
2	METHODEN	9
2.1	UNTERSUCHUNGSGEBIET	9
2.1.1	Wahl der Flüsse	9
2.2	ANALYSE DER LAICHGRUBEN UND EINGRABUNGSTIEFE DER EIER	16
2.2.1	Kartierung	16
2.2.2	Messungen der charakteristischen Grösse der Laichgruben	17
2.2.3	Untersuchung der Eingrabungstiefe der Eier	19
2.2.4	Statistische Analysen	20
2.3	ANALYSE DER LAICHGRUBEN UND EINGRABUNGSTIEFE DER EIER IN INSTABILEN UND STABILEN FLÜSSEN	21
2.3.1	Kriterien für die Einteilung in instabile und stabile Flüsse	21
2.3.2	Vergleich der Charakteristika der Laichgruben und der Eingrabungstiefe der Eier zwischen instabilen und stabilen Flüssen	22
2.3.3	Statistische Analysen für den Vergleich von instabilen und stabilen Flüssen	23
3	RESULTATE	24
3.1	ANALYSE DER LAICHGRUBEN UND EINGRABUNGSTIEFE DER EIER	24
3.1.1	Messungen der charakteristischen Grösse der Laichgruben	24
3.1.2	Untersuchung der Eingrabungstiefe der Eier	29
3.2	ANALYSE DER LAICHGRUBEN UND EINGRABUNGSTIEFE DER EIER IN INSTABILEN UND STABILEN FLÜSSEN	34
3.2.1	Einteilung in instabile und stabile Flüsse	34
3.2.2	Vergleich der Charakteristika der Laichgruben und der Eingrabungstiefe der Eier zwischen instabilen und stabilen Flüssen	35
4	DISKUSSION	42
4.1	DISKUSSION DER METHODEN	42
4.1.1	Wahl der Flüsse	42
4.1.2	Analyse der Laichgruben und Eingrabungstiefen der Eier	42
4.1.2.1	Messungen der charakteristischen Grösse der Laichgruben	42
4.1.2.2	Untersuchung der Eingrabungstiefe der Eier	42

4.1.3	<i>Analyse der Laichgruben und Eingrabungstiefen der Eier in instabilen und stabilen Flüssen</i> ..	43
4.1.3.1	Einteilung in instabile und stabile Flüsse.....	43
4.2	DISKUSSION RESULTATE	44
4.2.1	<i>Analyse der Laichgruben und Eingrabungstiefe der Eier</i>	44
4.2.1.1	Messungen der charakteristischen Grösse der Laichgruben.....	44
4.2.1.2	Untersuchung der Eingrabungstiefe der Eier.....	48
4.2.2	<i>Analyse der Laichgruben und Eingrabungstiefen der Eier in instabilen und stabilen Flüssen</i>	50
4.2.2.1	Einteilung in instabile und stabile Flüsse.....	50
4.2.2.2	Vergleich der Charakteristika der Laichgruben und der Eingrabungstiefen der Eier zwischen instabilen und stabilen Flüssen	51
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	54
6	DANKSAGUNG	57
7	LITERATURVERZEICHNIS	58

1 Einleitung

1.1 Laichaktivität der Bachforellen

1.1.1 Die Bachforelle

Die Forelle (*Salmo trutta*) ist eine weit verbreitete Fischart (Abb. 1). Aus ihrem natürlichen Ausbreitungsgebiet in Europa wurde sie praktisch in der ganzen Welt künstlich akklimatisiert. Sie hat im Verlauf der Evolution durch morphologische, physiologische und ökologische Variationen verschiedene Formen entwickelt.

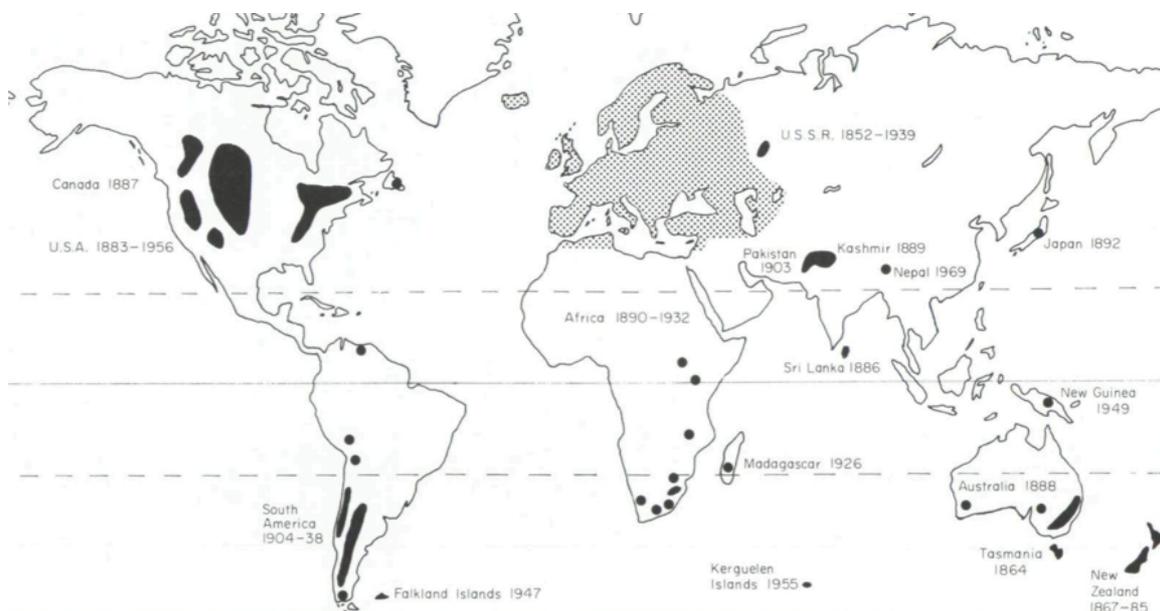


Abb. 1: Weltverbreitung der Forelle (*Salmo trutta*).
Schraffierte Fläche: natives Gebiet. Schwarze Flächen: Eingeführt. Aus Elliott (1989).

In der Schweiz existieren, gemäss Anhang 1 der Verordnung zum Bundesgesetz über die Fischerei¹, sechs einheimische Forellenformen: Die ausgestorbene Meerforelle (*Salmo trutta trutta*), die Truite zébrée (*Salmo trutta rhodanensis*), die Trota adriatica (*Salmo trutta cenerinus*), für welche die Datenlage noch ungenügend ist, die Trota marmorata (*Salmo trutta marmoratus*), welche vom Aussterben bedroht ist, die ebenfalls stark gefährdete Seeforelle (*Salmo trutta lacustris*) und die Bachforelle (*Salmo trutta fario*) (Abb. 2), die potenziell gefährdet ist.

¹ VBGF, 923.01, vom 24. November 1993 (Stand am 1. Juni 2011).



Abb. 2: Bachforelle aus der Fluss Ticino.

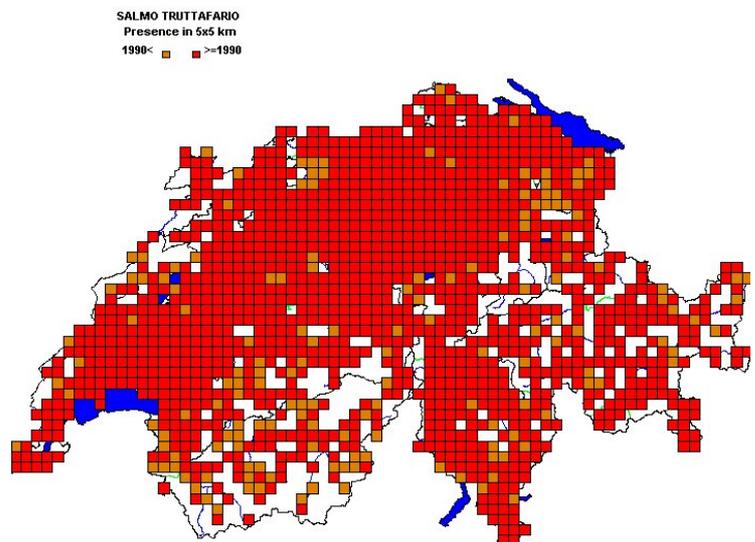
Diese Einteilung basiert auf der rezenten Revision von Kottelat & Freyhof (2007), welche sich hauptsächlich auf die geografischen Abgrenzungen stützt. Da aber besonders im vergangenen Jahrhundert regelmässig Fischmaterial von Region zu Region ausgetauscht wurde, muss man davon ausgehen, dass es eine weitgehende Vermischung des Genpools der verschiedenen Arten stattgefunden hat (z. B. Largiadèr *et al.*, 1996; Dagani, 2010).

Die Bachforelle ist die weitverbreitetste Art in der Schweiz (Abb. 3). Ihre Lebensweise gilt als resident.

1.1.2 Lebenszyklus

Vor der Paarung graben die Weibchen (Rogner) mit kräftigen Schlägen der Schwanzflosse eine Grube (auf englisch: *pit*) ins Kies. Der Bau der Laichgrube wird nur durch die Weibchen ausgeführt. Die Männchen (Milchner) kämpfen um die Weibchen. In der Regel vertreibt der dominante Milchner (Alphamännchen) seine Konkurrenten, die sich ebenfalls an der Fortpflanzung mit dem Weibchen beteiligen wollen (Jonsson & Jonsson, 2011).

Bei der Paarung nähern sich Rogner und Milchner einander und während das Weibchen die Eier in die gegrabene Grube ablegt, gibt das Männchen seine Spermien ins



Copyright CSCF, 09.04.2012, Base cartographique: OFS, OFT

Abb. 3: Verbreitung der Bachforelle in der Schweiz (Quelle: Schweizerisches Zentrum für kartografische Erfassung der Fauna (CSCF), Neuchâtel und Zaugg *et al.*, 2003).

Wasser ab. Die Eier werden befruchtet. Oft gelingt es einigen konkurrierenden Männchen, an der Paarung teilzunehmen und einen Teil der abgegebenen Eier zu befruchten.

Nach der Eiabgabe bewegt sich das Weibchen stromaufwärts und beginnt die Eier zuzudecken, indem es eine neue Grube schlägt. Das dabei ausgegrabene Kiesmaterial bedeckt dann die soeben abgelegten Eier in der Grube und es entsteht eine Aufschüttung (auf englisch: *Tail*) mit Kies. In der Regel legt das Weibchen nicht alle seine Eier auf einmal, sondern in mehreren Paketen ab. Während den verschiedenen Paarungsphasen bewegt es sich auf dem Laichareal bachaufwärts und gibt die Eier so in verschiedene Nester (Ottaway *et al.*, 1981; Crisp & Carling, 1989; Armstrong *et al.*, 2003; Barlaup *et al.*, 2008; Jonsson & Jonsson, 2011).

Die resultierende Struktur bei abgeschlossener Laichaktivität heisst Laichgrubenareal und wird durch die Grube und die Aufschüttung gebildet (Abb. 4).

Die Eier und die Dottersackbrütlinge bleiben in der Regel für 3-4 Monate im Kies eingegraben, in Abhängigkeit der Wassertemperatur (es wird zirka mit $440 \text{ Tagesgraden}^2$ gerechnet) (Elliott, 1994; Peter, 2011). Die Inkubationszeit wird ebenfalls durch den Sauerstoffgehalt und die Menge der Feinsedimente bestimmt (Elliott, 1984; Elliott, 1994; DeVries, 1997; Armstrong *et al.*, 2003). Nach dem Schlüpfen verbleiben die Dottersackbrütlinge nochmals einige Wochen im Kiesbett. Kurz vor der Resorption des Dottersacks emergieren die Fischchen und verlassen das Kiesbett (Elliott, 1994).

1.1.3 Struktur des Laichgrubenareals

In Abbildung 4 ist die klassische Struktur des Laichgrubenareals (auch Laichgrube genannt) dargestellt.

Ein abgeschlossenes Laichgrubenareal hat von oben gesehen (Planaufsicht) in der Regel etwa die Form einer Ellipse (Abb. 4, unten). Im vorderen Teil liegt die Grube die oft eine rundliche Form besitzt. Der hintere Teil der Ellipse ist die Aufschüttung. Der Punkt wo die Grube endet und die Aufschüttung beginnt, ist die Übergangszone (auf englisch: *middle*).

Die seitliche Ansicht des Laichgrubenareals zeigt einen wellenförmigen Ablauf der Oberfläche. Der tiefste Punkt im Laichgrubenareal ist in der Grube. Die Aufschüttung zeigt sich als kleiner Kieshügel. Die Eierpakete liegen unter dem aufgeschütteten Kies, aber, wie Grost *et al.* (1991) zeigten, kann man Eier entlang des ganzen Laichgrubenareals finden.

² Ein Tagesgrad bedeutet 1°C während ein Tag (Leitritz, 1980). Beispielsweise schlüpfen Bachforellen Eier bei einer Wassertemperatur von 10°C nach 42 Tage, so haben sie folglich 420 Tagesgrade benötigt.

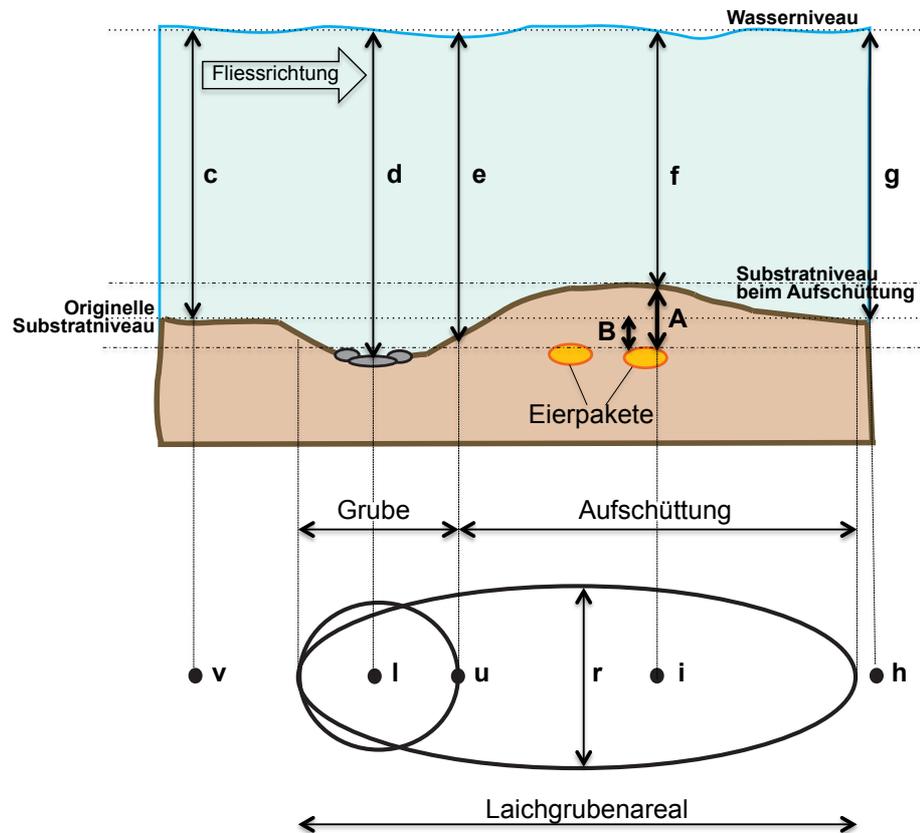


Abb. 4: Struktur eines Laichgrubenareals (Modifiziert aus Crisp & Carling, 1989)

Oben: Ansicht von der Seite mit c = Wassertiefe beim Originalsubstrat, d = Wassertiefe bei der Grube, e = Wassertiefe beim Übergangsbereich, f = Wassertiefe bei der Aufschüttung, g = Wassertiefe hinter dem Laichgrubenareal, A = Eier-Eingrabungstiefe A (EETA) und B = Eier-Eingrabungstiefe B (EETB).

Unten: Schematische Planansicht des Laichgrubenareals mit v = Punkt vor dem Laichgrubenareal (beim Originalsubstrat), l = Zentrum der Grube, u = Punkt im Übergangsbereich, i = Punkt auf der Aufschüttung, h = Punkt hinter dem Laichgrubenareal und r = maximale Breite des Laichgrubenareals.

Die Tiefe im Kies, in welcher die Eier eingraben sind, wird Eier-Eingrabungstiefe genannt. In der Literatur existieren mehrere Studien, welche die Eingrabungstiefe der Eier von Salmoniden untersuchten (DeVries, 1997). Nicht immer sind die Studien mit vergleichbaren Methoden durchgeführt und oft wird die Eingrabungstiefe unterschiedlich gemessen. Einige Autoren messen die Eingrabungstiefe auf der oberen Grenze des Eierpaketes, während andere in der Mitte oder sogar an der unteren Grenze des Eierpaketes messen. Es werden unterschiedliche Referenzniveaus für die Eingrabungstiefen verwendet. Die Eier-Eingrabungstiefe bezogen auf das Substratniveau der Aufschüttung wird Eier-Eingrabungstiefe A (EETA) genannt. Diejenige, bezogen auf das ursprüngliche Niveau des Substrats (Originalsubstrat) vor der Laichaktivität wird mit Eier-Eingrabungstiefe B (EETB) bezeichnet (siehe Abb. 4). Vor und hinter dem Laichgrubenareal besitzt das ungestörte Substratniveau eine unterschiedliche Tiefe.

1.1.4 Probleme für Laichgruben

Wie in DeVries (1997) aufgeführt wird, können folgende Faktoren die Überlebensrate der Embryonen während der Eientwicklung im Kiesbett beeinflussen: Infiltration und Ablagerung von feinen Sedimentpartikeln, Veränderungen der Wasserqualität, die Überlaichung (auf englisch: *Superimposition*) der Laichgrubenareale durch andere Rogner, mechanische Störungen durch Menschen, wachsende Säugetiere und auch Auswaschungen der Eier durch Geschiebebewegungen bei Hochwasserereignissen. Besonders grosse Geschiebebewegungsereignisse während der Inkubationszeit können zu einer erhöhten Mortalität führen und somit das Jungfischaufkommen stark beeinflussen. Deshalb hat die Eingrabungstiefe der Eier eine wichtige Bedeutung, da sie sich direkt auf die Überlebensrate der Eier auswirken kann.

In Flüssen, die im Winter ein instabiles Abflussregime aufweisen (im folgenden auch als „instabile Flüsse“ bezeichnet), erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für eine Geschiebebewegung. Im Allgemeinen findet man solche Flüsse eher im Flachland, da der Grund für Instabilität meistens der fehlende Schneespeichereffekt ist: Das bedeutet, dass auch während den Wintermonaten Niederschläge die Abflussmengen stark erhöhen können. Die erhöhte Wahrscheinlichkeit der Geschiebebewegung erhöht gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit, dass die Erosionstiefe (auf englisch: *scour depth*) die Eingrabungstiefe der Eierpakete erreicht. In diesem Falle kann das Laichgrubenareal zerstört werden. In stabilen Flüssen hingegen ist die Wahrscheinlichkeit, dass während den Wintermonaten relevanter Geschiebetransport stattfindet, sehr klein.

1.2 Einführung in die Untersuchungen

1.2.1 Motivation der Arbeit

Die Arbeit von Riedl & Peter (eingereicht) beschreibt die Hauptcharakteristik der Laichaktivität der Bachforellen in alpinen und voralpinen Flüssen der Schweiz. Hauptsächlich wurden in dieser Studie die Habitatsnutzung und die Eingrabungstiefe der Eier charakterisiert. Die Resultate zeigen, dass die Bachforellen in den untersuchten Flüssen ihre Eier in einem begrenzten Bereich zwischen 1 und 16 cm unter dem Aufschüttungskies eingraben (Mittelwert = 5.8 cm für EETA), was in vergleich mit der bestehenden Literatur als gering einzustufen ist. Diese Resultate wurden mit einer lokalen Anpassungsfähigkeit der Bachforellen an die spezifischen Habitatsbedingungen dieser Flüsse erklärt. Die Übertragbarkeit solcher Studien ist regional eingeschränkt (Riedl & Peter, eingereicht; Armstrong *et al.*, 2003).

Wie von Riedl & Peter (eingereicht) gezeigt, ergibt sich das besondere Interesse für diese Kenngrößen durch die unterschiedlichen Zukunftsszenarien des Klimawandels. In den alpinen Regionen wird für die Flüsse eine Veränderung der Abflussmuster vorhergesagt³ (Burkhardt-Holm, 2009; Schädler & Weingartner, 2010). Es ist erwiesen, dass sich solche Änderungen auf den Geschiebehaushalt auswirken und somit eine Gefährdung der Laichgruben verursachen werden⁴.

Aus diesem Grunde wurde die vorliegende Studie durchgeführt.

1.2.2 Ziel der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, zusätzliche Daten über die Nutzung der Habitate bei der Reproduktion der Bachforelle zu sammeln und die Eier-Eingrabungstiefe für ein breiteres Spektrum von Flüssen zu messen. Mittels empirischer Beobachtungen werden die Laichgruben analysiert. In zehn unterschiedlichen Flüssen der Schweiz sollen die Eingrabungstiefen der Eier festgestellt werden. Die Flüsse sollen sich in ihrem Abflussverhalten während des Winters in „stabile oder instabile Gewässer“ einteilen lassen.

³ Siehe www.bafu.admin.ch/wasser/01444/01991/10443/index.html?lang=de

⁴ Siehe www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/wildbaeche/projekte/sedriver/index_DE

Durch diese Beobachtungen sollen folgende Hypothesen untersucht werden:

Nullhypothese H1: Die Eingrabungstiefe der Eier ist in allen untersuchten Gewässern gleich.

Im Weiteren wird abgeklärt, ob die Eingrabungstiefe der Eier von der Körperlänge der Weibchen abhängt.

Nullhypothese H2: Die Eingrabungstiefe der Eier hängt nicht von der Körperlänge der ablaichenden Weibchen ab.

Zudem wird abgeklärt, ob die Eingrabungstiefe der Eier durch die Wassertiefe bei der Grube abschätzbar ist.

Nullhypothese H3: Es besteht keine Beziehung zwischen der Wassertiefe bei der Grube (Messgrösse **d** in Abb. 4) und dem gemessenen Wasserstand bei den Eierpaketen (Messgrösse **f+A** in Abb. 4).

Neben der Eingrabungstiefe wird auch die Habitatsbenützung der ablaichenden Fische untersucht.

Nullhypothese H4: Die Habitatsbenützung zwischen den Gewässern unterscheidet sich nicht.

Nullhypothese H5: Es gibt keine Unterschiede bei der Eingrabungstiefe zwischen abflussstabilen und -instabilen Flüssen.

Nullhypothese H6: Die Fische in den abflussstabilen und -instabilen Flüssen haben dieselben Ansprüche an ihre Habitate.

2 Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst das nord-alpine Mittelland, die Zentralschweiz, die Alpensüdseite und die Ost-Schweiz (Abb. 5)

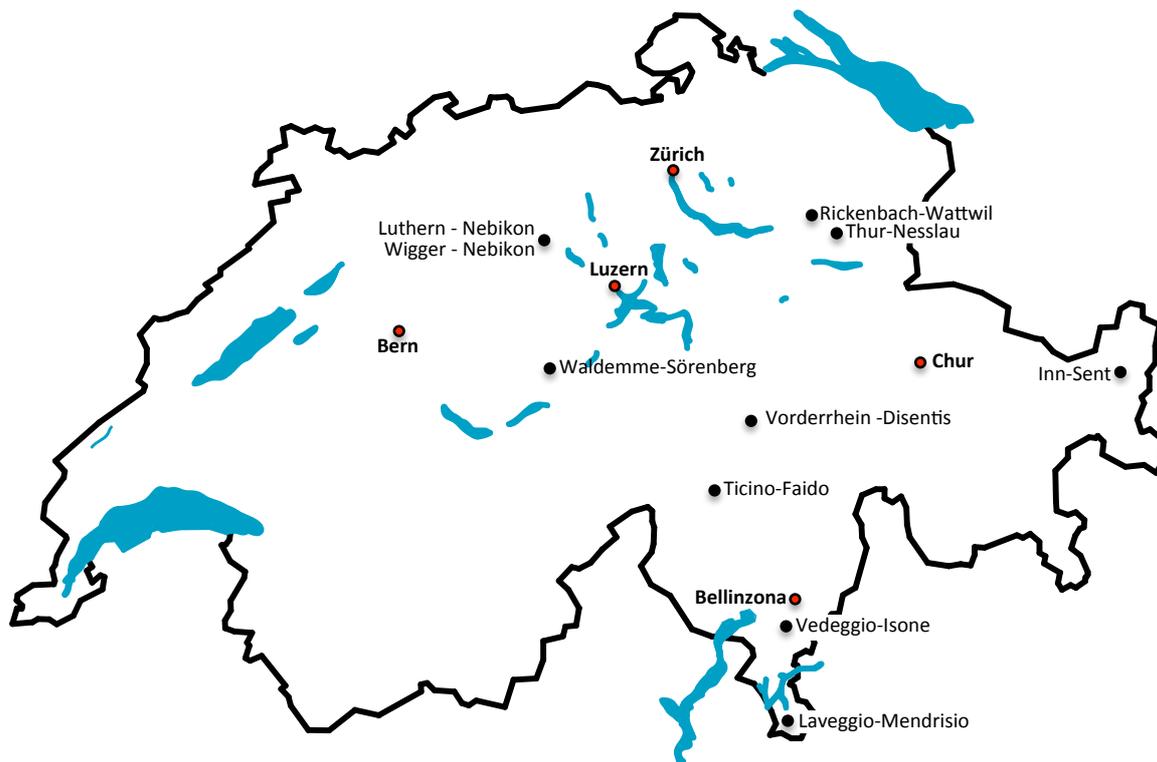


Abb. 5: Untersuchungsgebiet und ausgewählte Flüsse.

2.1.1 Wahl der Flüsse

Insgesamt wurden zehn Flüsse aus den obengenannten Gebieten untersucht. Gemäss der Einteilung von Huet (1949) gehören diese alle zur Forellenregion.

Die Wahl der Flüsse wurde so durchgeführt, dass sie in zwei Gruppen eingeteilt werden konnten: Flüsse die im Winter ein stabiles Wasserabflussregime besitzen und Flüsse bei denen die Wahrscheinlichkeit von grossen winterlichen Abflussvariationen gross ist (siehe Kapitel 2.3.1).

Um Flüsse mit winterstabilen Abflüssen einzubeziehen, wurden speziell hochgelegenen Fliessgewässern berücksichtigt (50 % der Fälle).

Um diese Einteilung möglichst objektiv zu gestalten, wurden Flüsse mit einer vorhandenen Abflussmessstelle bevorzugt berücksichtigt oder Strecken, wo der Abfluss rekonstruierbar war.

Nach Rücksprache mit den verschiedenen kantonalen Fachstellen und mit den zuständigen Fischereiaufsehern wurden dann geeignete Strecken identifiziert (Strecken mit bedeutender Laichaktivität der Forellen).

Tab. 1: Liste der gewählten Flüsse, geografische Lage, und hydrologische Angaben.

Fluss	Ort	Kanton	Höhe [m ü.M.]	Jahresabflussmittel (2010) [m ³ /s]	Abflussregimetyp	Streckenlänge [m]	Gefälle [%]
Luthern	Nebikon-Schötz	LU	485	1.61	Pluvial-inferior	1497	0.7
Wigger	Nebikon	LU	485	3.85	Pluvial-superior	752	0.6
Rickenbach	Wattwil - Wis	SG	614	1.28	Pluvial-inferior	1149	1.2
Thur	Nesslau	SG	757	7.58	Nival de Transition	1505	0.4
Laveggio	Mendrisio	TI	298	0.63	Pluvial-meridional	347	1.1
Vedeggio	Isone	TI	728	1.00	Nivo-pluvial-meridional	469	6.0
Waldemme	Sörenberg	LU	1170	1.15	Nivo-pluvial prealpin	225	1.3
Vorderrhein	Diesentis - Pardomat	GR	984	1.04*	Nivo-glaciale	940	1.5
Inn	Sent	GR	1121	2.48**	Nivo-glaciale	345	1.4
Ticino	Faido	TI	706	0.38**	Nival-meridional	591	1.9

*Daten beziehen sich auf das Jahr 2011. ** Abgeschätzte Jahresabflussmittel durch Restwassermengen Daten.

In der Folge sind die Flüsse und die gewählte Strecken beschrieben:

Thur:



Abb. 6: Thur bei Nesslau, Kt. St. Gallen.

Die Thur (Abb. 6) ist mit ihren 134 km einer der längsten Flüsse der Schweiz. Die hydrologische Quelle der Thur liegt an den Südhängen des Säntis bei 1520 m ü.M. (Kanton St. Gallen) aus denen die Säntisthur entsteht. Erst beim Dorf Unterwasser, nach dem Zusammenfluss mit der Wildhuser Thur, heisst der Fluss Thur. Nach der Durchquerung des Toggenburgs und des Kantons Thurgau tritt sie in den Kanton Zürich ein, wo sie bei Ellikon am Rhein in den Rhein mündet (345 m ü.M.).

Die Laichgrubenareale wurden entlang einer Strecke von 1560 m (Gefälle 0.42 %) in der kantonalen Schonstrecke bei Nesslau (757 m ü.M.) untersucht. In diesem Teil weist die Thur einen Wildflusscharakter auf und morphologisch gesehen, besitzt sie eine ganze Bandbreite von Mesohabitaten.

Diese Strecke wurde ausgewählt, weil der Abfluss in diesem Gebiet auch während der Wintermonate grosse Variationen aufweisen kann.

Die repräsentativen hydrologischen Daten wurden aus der Zusammenstellung der hydrometrischen Daten der beiden kantonalen Abflussmessstellen der Thur und des Seitenflusses Wiss-Thur in Stein übernommen, welche ca. 2.5 km oberhalb der untersuchten Strecke liegen. Anhand des hyd-

rologischer Atlas der Schweiz (HADES)⁵ besitzt die Thur in dieser Zone ein natürliches Abflussregime vom Typ *nival de transition* (Weingartner & Aschwanden, 1992; Pfaundler *et al.*, 2006).

Das langjährige Abflussmittel (1990-2010) für diese Stelle beträgt 5.3 m³/s.

Rickenbach:

Der Rickenbach (Abb. 7) entsteht in Ricken (Kanton St. Gallen, 780 m ü.M.) aus dem Zusammenfluss von vielen kleinen Bächen, die aus den umstehenden Bergen (darunter der Regelstein und der Rotstein) sprudeln. Ab Ricken fliesst der Bach entlang des sogenannten Hummelwaldes durch das Rickentobel in Richtung Wattwil, wo er in der Nähe von Wiss in die Thur mündet (614 m ü.M.).

Flussaufwärts von der kantonalen Abflussmessstelle bei Rickenhof, wurde eine Strecke von 1150 m Länge untersucht (Gefälle 1.2 %). Im unteren Teil fliesst der Bach in einer tief eingeschnittenen



engen Rinne zwischen landwirtschaftlichen Feldern. Sobald der Rickenbach in den Hummelwald eintritt, beansprucht der Fluss mehr Platz und erhält damit einen Wildbachcharakter.

Ähnlich wie bei der Thur, unterliegt der Abfluss des Rickenbaches grossen Variationen während der Wintermonate (z.B. im Jahr 2010 mit Abflussspitzen bis acht Mal grösser als das Monatsmittel).

Da die kantonale Abflussmessstelle erst seit 2009 in Betrieb ist, wurden die hydrologischen Daten anhand einer Regression von den Daten des

Abb. 7: Rickenbach bei Wattwil, Kt. St. Gallen.

Gonzenbachs abgeleitet. Der Gonzenbach ist ein Seitenfluss, der linksufrig in die Thur einmündet (zirka 10 km nördlich von Wattwil) und der ein ähnliches Abflussverhalten wie der Rickenbach aufweist. Der Rickenbach besitzt ein natürliches Abflussregime des Typs pluvial-inferior was auch mittels Pardé Koeffizienten bestätigt wurde (Pfaundler *et al.*, 2006; Pfaundler & Zappa, 2006)⁶. Das Abflussmittel 2009-2011 für diese Stelle beträgt 0.6 m³/s.

Wigger:

Die hydrologische Quelle der Wigger (Abb. 8) liegt am Nordhang des Napfs (1300 m ü.M.) wo die Enziwigger entspringt. Ab Willisau, wo das Wasser der Enziwigger mit dem der Buechwigger und der Seewag zusammenkommt, wird der Fluss Wigger genannt. Die Wigger mündet in die Aare bei Aarburg (Kanton Aargau, 400 m ü.M.).

⁵ Siehe <http://www.hydrologie.unibe.ch/hades/index.html>

⁶ Siehe auch <http://www.bafu.admin.ch/hydrologie/01832/01855/index.html?lang=de>



Abb. 8: Wigger bei Nebikon, Kt. Luzern.

Die Untersuchungen wurden in Nebikon (Kanton Luzern, 485 m ü.M.) durchgeführt. Eine Flussstrecke von 752 m wurde untersucht (Gefälle 0.6 %). In dieser Strecke fließt die Wigger abgetieft in einem Doppeltrapezprofil. Im oberen Teil sind beide Ufer noch zugänglich. Unten, wo der Fluss das Dorf durchfließt, bestehen die Dämmen aus hohen Mauern, was der Zugang zu den Ufern verhindert. Deswegen ist die Wigger morphologisch gesehen in dieser Strecke sehr monoton. Schwellen sind über die gesamte Länge der Untersuchungsstrecke verteilt.

Diese Strecke wurde aufgrund ihrer tiefen Lage und ihres pluvial-superioren Abflussregimes (Weingartner & Aschwanden, 1992) gewählt, welches der Wigger winterinstabilen Abflusscharakter erteilen könnten.

Die hydrologischen Daten stammen aus der kantonalen Abflussmessstelle, die ca. 500 m unterhalb der untersuchten Strecke liegt. Das langjährige Abflussmittel (1981-2010) beträgt an dieser Stelle $3.6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Luthern:

Die Luthern (Abb. 9) ist ein Zufluss der Wigger. Sie entspringt den Hängen des Napfs auf einer Höhe von 1046 m ü.M. und fließt weiter durch das Lutherental (Kanton Luzern) in Richtung Norden bis Nebikon (485 m ü.M.), wo sie in die Wigger mündet.

Die Laichgruben wurden in einer Flussstrecke von 1500 m zwischen Schötz und Nebikon untersucht (Gefälle 0,7 %). Der Fluss hat in dieser Strecke die typischen Charakteristika eines Flachland-Baches in landwirtschaftlichen Gebieten und fließt zwischen 2 m hohe Dämmen bis ca. 2 km vor der Mündung, wo vor kurzem eine Revitalisierung realisiert wurde. Im eingedämmten Teil ist die Luthern morphologisch sehr monoton und durch Schwellen unterbrochen, unter denen sich einige tiefere Kolken gebildet haben. In der revitalisierten Strecke weist der Fluss dagegen eine natürliche Charakteristik auf, indem sich verschiedene Mesohabitate entfalten können.

Die Luthern besitzt ein natürliches Abflussregime des Typs pluvial-inferior (Weingartner & Aschwanden, 1992), was auch mittels Pardé Koeffizienten bestätigt wurde (Pfaundler *et al.*, 2006; Pfaundler & Zappa, 2006).



Abb. 9: Luthern bei Schötz, Kt. Luzern.

Für die Wahl dieses Flusses gilt dieselbe Begründung wie für die Wigger. Die hydrologischen Daten stammen aus der Abflussmessstelle des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), welche ca. 120 m vor der Mündung liegt. Das langjährige Abflussmittel (1988-2010) beträgt an dieser Stelle 1.5 m³/s.

Waldemme:

Die Waldemme (Abb. 10) hat ihre Quelle auf dem Emmensprung am Briener Rothorn (1460 m ü.M.) und sammelt alle Gewässern aus dem Mariental und der Talregion von Flühli. Die Waldemme fliesst dann weiter in Richtung Norden bis Schlüpfheim, wo sie, nach dem Zusammenfluss mit der



Abb. 10: Waldemme bei Sörenberg, Kt. Luzern.

Wiss Emme, ihren Namen in Kleine Emme ändert.

Die Laichgruben wurden in einer kurzen Strecke von 225 m in Sörenberg (1170 m ü.M.) untersucht (Gefälle 1.3 %). Die Waldemme stellt sich in dieser Zone als Bergbach vor, wo Furten und kleine Kolken die Hauptmesohabitate sind.

Gemäss dem hydrologischer Atlas der Schweiz (Weingartner & Aschwanden, 1992) liegt die Waldemme im Bereich von nivo-pluvialen prealpinen Flüssen, was auch mittels Pardé Koeffizienten bestätigt wurde (Pfaundler *et al.*, 2006; Pfaundler & Zappa,

2006). Die Strecke wurde aufgrund ihrer hohen Lage gewählt, was theoretisch die Wahrscheinlichkeit von extremen Hochwasserereignissen im Winter verringern sollte.

Hydrologische Daten wurden aus der kantonalen Abflussmessstelle gewonnen, die ca. 700 m unterhalb der Untersuchungsstrecke liegt. Das langjährige Abflussmittel (1995-2010) beträgt an dieser Stelle 1,2 m³/s.

Inn:

Der Inn (Abb. 11) entsteht aus dem Lungin See, auf 2484 m ü.M. oberhalb von Maloja und mündet nach 517 km in die Donau bei Passau. Die untersuchte Flussstrecke (Gefälle 1.4%) befindet sich bei Sent, in der Gegend von Sur En (1121 m ü.M.) und ist durch einen Restwasserregime charakterisiert, weil der Inn talaufwärts durch das Wasserkraftwerk Pradella gestaut ist. Die Stauanlage in Pradella hat eine Kapazität von 20 m³/s. Die saisonal bedingte Restwassermenge variiert zwischen 3 und 4 m³/s (Sommer) und 2 m³/s (Winter). Oberhalb von Pradella (Scuol - Tarasp) weist der Inn ein nivo-glaciales Abflussregime (Weingartner & Aschwanden, 1992) und ein langjähriges Abflussmittel (1970-2010) von 20.5

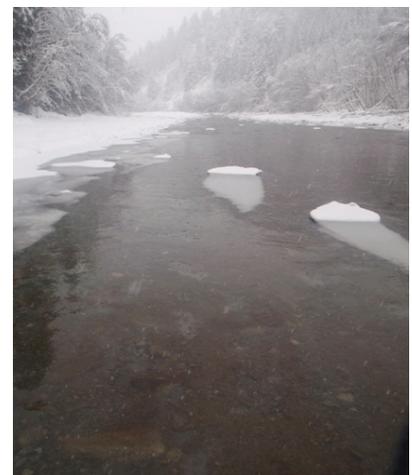


Abb. 11: Inn bei Sur En, Kt. Graubünden.

m³/s auf.

Alle Laichgruben wurden in einer relativ kurzen Strecke (350 m) untersucht, welche in einem Fischschongebiet liegt.

Es ist bekannt, dass in dieser Zone Hochwasserereignisse während der Monaten Oktober und November möglich sind (Nicola Gaudenz 2011; persönliche Mitteilung), aber da die Strecke in einer hohen Lage und unter Restwasserregime fliesst, bleibt die Wahrscheinlichkeit solcher Ereignisse klein.

Die hydrologischen Daten wurden dank der Zusammenstellung der hydrometrischen Daten der Messstelle des Bundesamtes für Umwelt in Scuol-Tarasp und der Restwassermengendaten von Pradella errechnet.

Vorderrhein:

Der Vorderrhein (Abb. 12) ist einer der zwei Quellflüsse des Rheins und entspringt mehreren Hängen in der Region des Oberalppasses (2044 m ü.M.). Ein grosser Teil des Wassers wird in den grossen Staubecken von *Curnera*, *Nalps* und *Santa Maria* zurückgehalten und von den „Kraftwerken Vorderrhein“ genutzt.

Die Laichgruben wurden in Disentis bei Pardomat (984 m ü.M.) innerhalb der kantonale Fischschonstrecke in einer 940 m langen Flussstrecke untersucht (Gefälle 1,5 %). Laut der allgemeinen Charakterisierung des Vorderrheins durch Rupf (1998) liegt diese Strecke in einem Abschnitt mit geringer Restwassermenge. Der Fluss ist morphologisch gut strukturiert, mit einer Alternanz von Furten und Gleit-Bereiche. Die Strecke wurde gewählt, weil sie hochgelegen ist, was theoretisch die Wahrscheinlichkeit von extremen Hochwasserereignissen im Winter vermindert.

Der Vorderrhein ist als Fluss mit nivo-glacialem, natürlichem Abflussregime einzustufen (Weingartner & Aschwanden, 1992). Das langjährige Abflussmittel (2004-2011) beträgt 1.03 m³/s. Die hydrologische Daten stammen von der kantonalen Messstelle, welche ca. 3 km Flussaufwärts liegt.

Ticino:

Der Fluss Ticino entspringt beim Grieshorn (2407 m ü.M.) und beim Nufenenpass (2566 m ü.M.). Er fliesst zuerst nach Nord-Osten durch das Bedrettal und dann in einem grossen Bogen von Airolo Richtung Süd-Osten durch die Leventina und die Riviera bis kurz vor Bellinzona, wo er nach Südwesten biegt und dann in einer relativ kurzen Strecke den Lago Maggiore (Langensee) durch das Delta in den Bolle di Magadino erreicht.



Abb. 12: Vorderrhein bei Disentis, Kt. Graubünden.



Abb. 13: Ticino bei Faido, Kt. Tessin.

Die Untersuchungen wurden in der Schonstrecke von Faido (706 m ü.M.) (Abb. 13) durchgeführt (Gefälle 1,9 %). In diesem Teil weist der Ticino typische Bergtalfluss Charakteristiken auf und beherbergt eine grosse und gut strukturierte Forellenpopulation. Aus diesem Grund wurden hier auch die Beobachtungen für die Bestimmung der Beziehung zwischen der Länge der Weibchen mit der Eiereingrabungstiefe durchgeführt (siehe Kapitel 2.2.3).

Der Ticino bei Faido fliesst unter Restwasserregime, da Tal aufwärts in Rodi, sowie auf den zwei wichtigeren Zuflüssen dazwischen (Piumogna in Dalpe und Ri Sciresa in Polmenngo) je eine Wasserfassung und eine Wasserkraftwerke an-

wesend sind. Die saisonal bedingte Restwassermenge variiert in Rodi zwischen $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sommer) und $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (Winter). Dies hat zur Folge, dass der Abfluss stabiler und konstanter ist, da Hochwasserereignisse in der Regel gepuffert werden. Das Stauwerk in Rodi ist seit 1942 in Betrieb. Die Stauwerke der Seitenflüsse haben einen geringeren Einfluss auf das Abflussregime der untersuchten Strecke. Gemäss dem hydrologischer Atlas der Schweiz ist hier der natürlichen Charakter des Ticino als nival-meridional einzustufen (Weingartner & Aschwanden, 1992).

Die hydrologischen Daten wurden aus der Zusammenstellung der hydrometrischen Daten vom Stauwerk in Rodi mit den Restwassermengendaten in Dalpe berechnet.

Vedeggio:



Abb. 14: Vedeggio bei Isonne, Kt. Tessin.

Der Vedeggio hat seine Quellen an den Hängen des Camoghé (ca. 1750 m ü.M.) und mündet nach 25 km in den Luganersee bei Agno (277 m ü.M.). In den ersten 15 km fliesst der Fluss als Bergbach grösstenteils durch Laubwälder. Ab Camignolo (451 m ü.M.) übernimmt er Talfluss Charakteristiken.

Die Laichgruben wurden in Isonne (728 m ü.M.) in einer ca. 500 m langen Flussstrecke untersucht (Gefälle 6 %). Der Vedeggio öffnet sich in dieser Strecke markant und flacht aus (Abb. 14). Deswegen verliert der Fluss zum Teil seinen charakteristische Kaskadenverlauf, was die Verfügbarkeit von geeigneten Laichplätzen im Vergleich zu anderen Strecken erhöht.

Im oberen Teil besitzt der Vedeggio ein nivo-pluvial-meridional natürliches Abflussregime (Weingartner & Aschwanden, 1992),

das langjährige Abflussmittel (1981-2010) beträgt $0.83 \text{ m}^3/\text{s}$. Hydrologische Daten wurden aus der kantonalen Messstelle erhoben, welche genau an der oberen Grenzen der untersuchten Strecke liegt.

Laveggio:

Der Fluss Laveggio ist ein typischer Flachlandfluss. Die Quelle befindet sich in der hügeligen Zone hinter dem Dorf von Stabio (447 m ü.M.), woher der Fluss in Richtung Norden fließt und in den Luganersee bei Capolago mündet (274 m ü.M.). Der Verlauf des Laveggios durchquert verschiedene dicht besiedelte Ortschaften und Industriegebiete und ist deswegen oft zwischen künstliche Dämme gezwungen worden. Die Morphologie des Laveggios ist deshalb stark monotonisiert. Das Wasser ist zum Teil mittel bis stark belastet (IST - SUPSI, 2010).

Die Laichgruben wurden auf einer Flusstrecke von ca. 350 m in Mendrisio-Penate (298 m ü.M.) untersucht (Gerinnegefälle 1.1 %). Die Strecke befindet sich in einer industriellen Zone und kurz talaufwärts einer revitalisierten Strecke. Dieser Teil des Flusses stellt sich als kanalisierte und morphologisch relativ



Abb. 15: Laveggio bei Mendrisio, Kt. Tessin.

monotone Strecke vor (Abb. 15). Trotzdem konnten mehrere Laichgruben beobachtet und untersucht werden. Aus diesem Grund wurden hier auch die Beobachtungen für die Bestimmung der Beziehung zwischen der Länge der Weibchen und der Eiereingrabungstiefe durchgeführt (siehe Kapitel 2.2.3).

Der Laveggio besitzt ein pluvial-meridionales Abflussregime (Weingartner & Aschwanden, 1992) und ein langjähriges Abflussmittel (1981-2010) von $0.42 \text{ m}^3/\text{s}$. Die hydrologischen Daten stammen aus der kantonalen Messstelle, welche mitten in der untersuchten Strecke liegt.

2.2 Analyse der Laichgruben und Eingrabungstiefe der Eier

2.2.1 Kartierung

Während den Monaten Oktober und November 2011 wurden die gewählten Flüsse ein bis zwei Mal begangen, um geeignete Laichstrecken zu identifizieren. Alle gefundenen Laichgruben wurden mit GPS Koordinaten, Fotos, schriftlichen Beschreibungen und durch farbige Markierungen im Feld so umschrieben, dass ein individuelles Wiederfinden der kartierten Laichgruben möglich war.

2.2.2 Messungen der charakteristischen Grösse der Laichgruben

Zwischen November und Ende Dezember wurden die Laichgruben in den verschiedenen Flussstrecken analysiert. Um die Kohärenz der Messungen innerhalb desselben Flusses zu gewährleisten, wurden die Aufnahmen an den einzelnen Flüssen nach Möglichkeit am selben Tag durchgeführt. An den Stellen, wo die minimale Anzahl von gültigen Beobachtungen (Laichgruben mit Eiern) nicht erreicht wurde, fand eine zweite Begehung statt (Luthern, Wigger und Vedeggio).

Laichgrubenareal Planaufsicht

Um die Charakteristika der morphologischen Strukturen der Laichgrubenareale von Bachforellen zu beschreiben wurden die Länge und die Breite der Laichgruben, die Länge der Aufschüttung und die maximale Breite für jedes Laichgrubenareal gemessen. Die Flächen der einzelnen Laichgrubenareale wurden mittels der Formel einer Ellipse berechnet (Ottaway *et al.*, 1981; Steen & Quinn, 1999).

Wassertiefe

Der Längsschnitt der einzelnen Laichgrubenareale wurde anhand von Messungen der Wassertiefe vor dem Laichgrubenareal (**c**), im Mittelpunkt der Grube (**d**), auf dem Übergangsbereich (**e**), auf der Aufschüttung (**f**) und hinter dem Laichgrubenareal (**g**) bestimmt (Buchstaben zwischen Klammern beziehen sich auf Abb. 4).

Als weitere Microhabitatsparameter wurden die Fliessgeschwindigkeit und die Substratzusammensetzung aufgenommen.

Fliessgeschwindigkeit

Die Fliessgeschwindigkeit wurde drei Zentimeter über dem Grund (Fliessgeschwindigkeit über Flusssohle) an vier Stellen mit einem Fliessgeschwindigkeitsmessgerät vom Typ MMI Model 2000 Flomate (Marsh-McBirney, inc.) gemessen: vor dem Laichgrubenareal (**v**), in der Mitte der Grube (**l**), auf dem Übergangsbereich (**u**) und auf der Aufschüttung (**i**) (Buchstaben zwischen Klammern beziehen sich an Abb. 4).

Substratzusammensetzung

Die Substratzusammensetzung wurde, wie von Riedl & Peter (eingereicht) vorgeschlagen, gemäss der modifizierten Wentworth Skala (Wentworth, 1922) gemessen. Es wurden neun verschiedene Substratklassen unterschieden (Tab. 2):

Tab. 2: Klassifizierung des Substrates, "modifizierte Wentworth Scale".

Substratklasse	Grössenbereich (mm)
Sand und Lehm	< 2
Feiner Kies	2 – 8
Mittlerer Kies	8 – 16
Grobkörniger Kies	16 – 32
Sehr grobkörniger Kies	32 – 64
Kleine Steine	64 – 127
Steine	128 – 256
Grosse Steine	256 – 384
Kleine Blöcke	384 – 512
Grosse Blöcke	> 512

Für jede Laichgrube wurde die Substratzusammensetzung der Aufschüttung durch direkte Beobachtungen mit Hilfe eines Guckrohrs bestimmt (Abb. 16). Die Substratzusammensetzung der Laichgrube und des Übergangsbereichs wurde anhand der Fotos von den Laichgrubenarealen bestimmt. Dabei diente die im Feld erhobene Substratzusammensetzung der Aufschüttung als Referenz.

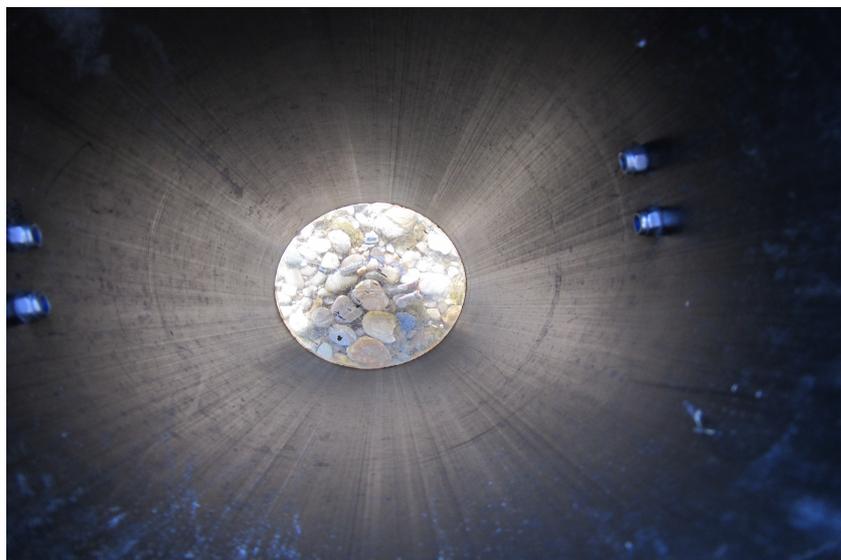


Abb. 16: Beobachtung der Substratzusammensetzung mit Hilfe eines Guckrohrs.

2.2.3 Untersuchung der Eingrabungstiefe der Eier

Die Daten zur Eingrabungstiefe der Eier wurden mit der von Riedl und Peter (eingereicht) vorgeschlagenen Methoden erhoben. In der Aufschüttung wurde eine punktuelle Aufnahme durchgeführt,



Abb. 17: Suche der Eier bei Untersuchung eines Laichgrubenareals im Rickenbach (Foto: Daniel Gübeli).

um das Laichgrubenareal nur in einem minimalen Teil zu beeinträchtigen. Die Eier wurden sorgfältig vom Hand oder mit Hilfe einer kleinen Schaufel ausgegraben. Das Substrat wurde Schicht für Schicht entfernt bis die ersten Eier auftraten. Um ein Wegschwemmen der Eier zu verhindern und sicher zu sein, dass alle Eier erwischt wurden, wurde unterhalb des Aufnahmepunktes während des Ausgrabungsprozesses einen rechteckigen Kescher (60 X 50 cm) mit Maschenweite 1 mm gesetzt. Das ausgegrabene Substrat wurde immer im Kescher gesammelt und nach jeder entfernten Substratschicht wurde der Kescherinhalt auf Eier überprüft.

Sobald die ersten Eier auftauchten, wurde die Wassertiefe bis zur oberen Lage des Eierpaketes gemessen. Mit Hilfe den erhobenen Daten zu den Längsschnitten (Wassertiefe über verschiedenen Stellen der Laichgruben, siehe 2.2.2) und gemäss Literatur (DeVries, 1997; Stenn & Quinn, 1999; Riedl & Peter, eingereicht) wurden dann zwei verschiedene Eier-Eingrabungstiefen (EETA und EETB) eruiert. Die Eier-Eingrabungstiefe A wurde als Differenz zwischen der Wassertiefe über der Aufschüttung und der an der oberen Lage des Eierpaketes gemessenen Tiefe berechnet (siehe Abb. 4). Die Eier-Eingrabungstiefe B wurde als die Differenz zwischen der Wassertiefe über der ursprünglichen Lage des Substrats (vor dem Laichgrubenareal) und der an der oberen Lage des Eierpaketes gemessenen Tiefe berechnet (siehe Abb. 4).

Länge der Weibchen versus Eingrabungstiefe der Eier

Die Beziehung zwischen der Länge der Weibchen und der Eingrabungstiefe der Eier wurde in den Flüssen Ticino und Laveggio untersucht. Während den Kartierungsarbeiten wurden die Fische und deren Verhalten auf den Laichgrubenarealen eingehend beobachtet. Die Weibchen wurden identifiziert, indem die typischen Schwanzflossenschläge während der Bildung der Laichgruben beobachtet wurden. Da es unmöglich war, diese Fische zu fangen und deren biometrischen Daten zu messen, wurde die Länge der Weibchen von Auge und durch Vergleich mit Gegenständen der Umgebung (wie zum Beispiel Steinen, Holzstücken etc.) abgeschätzt. Die zum Vergleich beigezogenen Gegenstände der Umgebung wurden in Abwesenheit der Fische vermessen. Zu den gesammelten

Daten wurden lineare Regressionen berechnet. Die gefundenen Zusammenhänge wurden mit Resultaten anderer Studien (Ottaway *et al.*, 1981; Elliott, 1984; Crisp & Carling, 1989) verglichen. Zusätzlich zu den im Vedeggio und Ticino erhobenen Daten, wurde auch der in Armstrong *et al.* (2003) und Crisp (1996) vorgeschlagene Ansatz zur Einschätzung der Eier-Eingrabungstiefe geprüft. Dieser besagt, dass die durchschnittliche Eingrabungstiefe 0.4 mal der Länge des laichenden Fisches entspricht.

Vorhersehbarkeit der Eier-Eingrabungstiefe durch empirische Messung der Laichgrubentiefe
Anhand der Betrachtungen von Crisp & Carling (1989) und Stenn & Quinn (1999) wurde die Beziehung zwischen der Wassertiefe bei der Grube und dem gemessene Wassertiefe beim Eierpakete durch eine lineare Regression untersucht.

2.2.4 Statistische Analysen

Für die Beschreibung und Charakterisierung der Laichgrubenareale wurde eine Analyse durchgeführt, um einen möglichen Einfluss des Flusses auf die verschiedenen Variablen, welche das Laichgrubenareal charakterisieren, zu untersuchen. Da mehrere Zielgrößen immer mit dem gleichen Faktor (Faktor Fluss) erklärt wurden, wurde eine multivariate ANOVA (MANOVA) angewendet. Weiter wurden verschiedene univariate ANOVAs zwischen den verschiedenen Variablen durchgeführt, um Unterschiede in der Nutzung der verschiedenen Stellen der Laichgrubenareale zu untersuchen.

Den Vorschlägen von Riedl & Peter (eingereicht) folgend, wurde der Unterschied zwischen den beiden Eier-Eingrabungstiefen (A und B) mit einem t-Tests überprüft.

Da die beiden Zielgrößen Eingrabungstiefe A und B im oben genannten MANOVA Test durch die Variablen, welche das Laichgrubenareal beschreiben, beeinflusst werden könnten, wurde zusätzlich ein analoger MANOVA Test nur für die beiden Zielgrößen „EETA“ und „EETB“ durchgeführt.

Die Statistische Analyse wurde mit IBM SPSS 20 erstellt.

2.3 Analyse der Laichgruben und Eingrabungstiefe der Eier in instabilen und stabilen Flüssen

2.3.1 Kriterien für die Einteilung in instabile und stabile Flüsse

Wie schon in der Einführung erwähnt, wurde in dieser Arbeit der Abfluss eines Flusses als winterstabil betrachtet, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass während den Wintermonaten Geschiebetransport stattfindet, null oder sehr klein ist.

Um die Winterstabilität eines Abflussregimes zu bestimmen, wurde für jeden Fluss der kritische Abfluss, bei Beginn der Geschiebebewegung berechnet (Badoux & Rickenmann, 2008).

Der kritische Abfluss pro Einheitsbreite bei Geschiebetransportbeginn ($q_{c,min}$) wurde für jeden Fluss durch folgende empirische Gleichung bestimmt:

$$q_{c,min} = 0.065 * (s-1)^{1,67} * g * d_{50} * S^{-1,12} \quad [m^2/s], \quad \text{Gl. 1}$$

wobei s das Dichteverhältnis für Quarzsediment zu Wasser (nicht-dimensionale Konstante mit einem Wert von 2.68), g die Erdbeschleunigung, d_{50} die charakteristische Korngrösse des Bachbettmaterials für welche 50% des Materials feiner ist und S dem Gerinnegefälle entspricht.

Die charakteristische Korngrösse wurde anhand der gesammelten Daten über das Substrat geschätzt. Das Gerinnegefälle wurde mittels eines Höhenmodells der untersuchten Flussstrecke errechnet.

Um den kritischen Abfluss bei Geschiebetransportbeginn auf der gesamten Breite (K_a) zu berechnen wurde $q_{c,min}$ mit der mittleren Breite der untersuchten Strecke multipliziert.

$$K_a = q_{c,min} \cdot \text{Mittlere Breite der Flussstrecke} \quad [m^3/s] \quad \text{Gl. 2}$$

Die mittlere Breite wurde für jeden Fluss anhand von Satellitenbildern und geographischen Karten sowie, wo möglich, durch kantonale, geographische Datenbanken bestimmt.

Alle untersuchten Flüsse besitzen ausgeprägte Sohlenstrukturen und eine Deckschicht. Die oben genannte Formel (Gl. 1) stützen sich auf Laborversuche. Entsprechend wurde, wie in Badoux & Rickenmann (2008) vorgeschlagen, folgende Formel für die Abschätzung des kritischen Abflusses beim Aufbrechen der Deckschicht ($q_{c,d}$) benutzt:

$$q_{c,d} = K_a \cdot (d_{90}/d_m)^{10/9} \quad [m^3/s]. \quad \text{Gl. 3}$$

Dabei ist d_{90} die charakteristische Korngrösse des Bachbettmaterials, für welche 90% des Materials feiner ist. d_m entspricht dem mittleren Korndurchmesser der Unterschicht.

Alle benötigten Werte für die verschiedenen Korngrössen wurden anhand der Substratanalyse des Laichgrubenareales abgeschätzt (siehe Kapitel 2.2.2). Das heisst, dass Substratkorngrössen, die nicht im Laichgrubenareal vorhanden sind, nicht berücksichtigt werden. Die oben beschriebenen Formeln beziehen sich aber auf das ganze Spektrum der Substratkorngrössen. Eine zu tiefe Einschätzung der verschiedenen Korngrössen könnte eine Unterschätzung der $q_{c,d}$ - Werte verursachen. Um eine solche Verzerrung zu vermeiden wurde der erhaltene $q_{c,d}$ - Wert um 20 % erhöht ($q_{c,d 20\%}$ [m^3/s]), (Turowski 2012, persönliche Empfehlungen).

Um die Wahrscheinlichkeit von Geschiebebewegungen während der Wintermonate abzuschätzen, wurden die gesammelten Abflussdaten anhand von Wahrscheinlichkeitskurven dargestellt. Die Analysen wurden für typisierte Tageswerte für die Jahre 2004-2010 (Monate Oktober-Februar) durchgeführt. Für jeden Fluss wurde die Wahrscheinlichkeit bestimmt, bei welcher der $q_{c,d 20\%}$ -Wert überschritten wird. Aus dieser Wahrscheinlichkeit wurden die Anzahl Tage mit Tagesmittel grösser als der $q_{c,d 20\%}$ -Wert über 6 Winterperioden sowie die Anzahl Tage mit Tagesmittel grösser als der $q_{c,d 20\%}$ -Wert über 1 Winterperiode ermittelt.

Flüsse mit einer Anzahl Tage gleich oder höher als 1 wurden als „instabile Flüsse“ klassifiziert. Gewässer, deren Tagesmittel den $q_{c,d 20\%}$ -Wert an weniger als 1 Tag überschritten, wurden als stabile Flüsse klassifiziert.

2.3.2 Vergleich der Charakteristika der Laichgruben und der Eingrabungstiefe der Eier zwischen instabilen und stabilen Flüssen

Gemäss der Einteilung in Kapitel 2.3.1 wurden die erhobenen Daten nochmals separat für instabile und stabile Flüsse analysiert (selbe Analysen aber separat für die beiden Flussklassen). Dies ermöglichte einen Vergleich zwischen instabilen und stabilen Flüssen.

Um die Beziehung zwischen der Winterstabilität eines Flusses mit der Eingrabungstiefe der Eier zu prüfen, wurde eine lineare Regression zwischen den gefundenen „Eier-Eingrabungstiefen“ und den „Anzahl Tagen mit Tagesmittel höher als der kritische Abfluss“ durchgeführt.

Die Effekte der Abflusscharakteristika (Gefälle/Substrat/Abfluss) des Flusses wurden durch einer linearen Regression zwischen den „Eingrabungstiefen der Eier“ und „dem Wert des kritischen Abflusses $q_{c,d 20\%}$ “ untersucht.

2.3.3 Statistische Analysen für den Vergleich von instabilen und stabilen Flüssen

Ziel der zweiten Analyse war zu untersuchen, ob sich die Ergebnisse für die instabilen von denen der stabilen Flüsse unterscheiden. Eigentlich ist diese Analyse lediglich eine Teilanalyse der ersten Analyse und wurde im Rahmen der MANOVA via Kontraste getestet. D.h. jeder Fluss wird in Abhängigkeit seiner Stabilität gewichtet. Die Summe der Gewichtungen der stabilen Flüsse muss im absoluten Wert derjenigen der instabilen Flüsse entsprechen. Im spezifischen Fall wurde jedem instabilen Fluss die Gewichtung 1 gegeben und jedem stabilen Fluss die Gewichtung -1.5 (Kontrast = 1 1 1 1 1 1 ; -1.5 -1.5 -1.5 -1.5). Dadurch konnte getestet werden, ob sich die zwei gewichteten Gruppen voneinander unterscheiden. Die Modellierung wurde auf allen Parametern durchgeführt, welche die Laichgrubenareale charakterisieren.

Die beiden Zielgrößen Eingrabungstiefe A und B könnten in der oben genannte MANOVA durch die Variablen, die das Laichgrubenareal beschreiben, ebenfalls beeinflusst worden sein. Um dem Rechnung zu tragen, wurde speziell für die Eier-Eingrabungstiefe zusätzlich eine MANOVA mit Kontrasten durchgeführt, welche nur die beide Zielgrößen „EETA“ und „EETB“ enthielt.

3 Resultate

3.1 Analyse der Laichgruben und Eingrabungstiefe der Eier

Insgesamt wurden 214 Laichgrubenareale in zehn verschiedenen Flüssen untersucht. In 172 Laichgruben (80.4 %) wurden Eier gefunden, während in den übrigen 42 (19.6 %) keine Eier gefunden wurden.

Von den 172 Laichgruben mit Eiern, befanden sich 16 (9.3 %) in Kolken, 48 (27.9 %) in Furten und der grösste Teil der Laichgruben (108; 62.8 %) befand sich in Gleit-Bereichen des Flusses. Von den 42 Laichgruben ohne Eier waren 2 (4.8 %) in Kolken, 13 (31 %) in Furten und 27 (64.2 %) in Gleit-Bereichen gefunden worden.

3.1.1 Messungen der charakteristischen Grösse der Laichgruben

Laichgrubenareal Planaufsicht

Innerhalb jedes Flusses wiesen die Mittelwerte der Laichgruben-Durchmesser und der Breite der Laichgruben sehr ähnliche Werte auf. Im Durchschnitt betragen die Durchmesser der Laichgruben 33.8 cm und wiesen eine Breite von 34.0 cm auf (Tab. 3).

Die Aufschüttungslängen variierten zwischen einem Minimalwert von 18 cm (Waldemme) und einem Maximalwert von 157 cm (Wigger).

Die durchschnittlich grössten und längsten Laichgruben wurden in der Wigger gefunden (0.97 m² Oberfläche und 157 cm Länge). Die durchschnittlich kleinsten und kürzesten Laichgruben wurden in der Waldemme gemessen (durchschnittlich 0.14 m² Oberfläche und 59 cm Länge). Der Mittelwert aller Flüsse war 0.35 m² für die Oberfläche und 90 cm für die Länge der Laichgrubenareale.

Tab. 3: Laichgrubenareal-Charakteristika und Eingrabungstiefe der Eier. Für Jede Kenngrösse sind Mittelwert \pm Standardabweichung, sowie Minimum und Maximum gezeigt. Für die dominante Substratkategorie (d.h. die Korngrösse) und der relative Anteil dieser Kategorie gezeigt.

	Luthern (n = 16)	Wigger (n = 15)	Rickenbach (n = 16)	Thur (n = 15)	Lavaggio (n = 19)	Veduggio (n = 17)	Weidenme (n = 18)	Vorderrhein (n = 20)	Imn (n = 18)	Ticino (n = 18)	Total (n = 172)
Laichgrubenareal-Planaufsicht											
Grube-Durchmesser [cm]	44.4 \pm 9.1 (21.5 - 59.0)	57.5 \pm 14.2 (41.0 - 79.0)	33.8 \pm 7.4 (24.0 - 46.0)	47.0 \pm 9.6 (29.0 - 63.5)	24.3 \pm 6.7 (16.0 - 43.0)	23.5 \pm 4.5 (17.5 - 32.0)	24.8 \pm 7.9 (15.5 - 38.0)	29.3 \pm 6.0 (18.0 - 42.0)	24.0 \pm 7.5 (15.0 - 43.0)	37.3 \pm 10.3 (22.5 - 60.0)	33.8 \pm 13.8 (15.0 - 79.0)
Grube-Länge [cm]	46.3 \pm 1.1 (23.5 - 67.0)	56.6 \pm 18.7 (31.0 - 86.0)	31.8 \pm 9.6 (19.5 - 49.0)	44.9 \pm 9.8 (23.0 - 61.0)	25.7 \pm 6.8 (19.0 - 48.0)	24.0 \pm 4.7 (16.5 - 34.0)	24.1 \pm 5.1 (16.0 - 33.5)	31.6 \pm 6.1 (21.0 - 44.0)	25.1 \pm 7.1 (16.0 - 46.0)	37.6 \pm 12.1 (22.0 - 60.0)	34.0 \pm 14.0 (16.0 - 86.0)
Aufschüttung-Länge [cm]	89.0 \pm 31.6 (44.5 - 154)	102.6 \pm 36.4 (43.0 - 157)	49.8 \pm 20.5 (19.5 - 106)	70.6 \pm 20.2 (39.0 - 111)	33.4 \pm 10.1 (19.5 - 61.0)	43.4 \pm 12.1 (21.0 - 65.0)	35.0 \pm 13.4 (18.0 - 67.0)	45.0 \pm 10.7 (25.0 - 65.0)	38.8 \pm 9.0 (27.0 - 55.5)	70.8 \pm 21.3 (29.5 - 102)	56.2 \pm 29.5 (18.0 - 157)
Laichgrubenareal-Länge [cm]	135.3 \pm 40.7 (79.0 - 221)	159.2 \pm 48.4 (77.0 - 235)	80.6 \pm 23 (49.0 - 136.5)	115.5 \pm 28 (74.0 - 161)	59.1 \pm 16.0 (39.5 - 109)	67.5 \pm 15.0 (41.0 - 91.0)	59.0 \pm 15.7 (38.0 - 90.0)	76.6 \pm 14.5 (48.0 - 109)	63.9 \pm 13.7 (46.5 - 94.0)	108.3 \pm 28.6 (51.5 - 159)	90.3 \pm 41.2 (38.0 - 235)
Laichgrubenareal-Breite [cm]	55.7 \pm 10.5 (38.0 - 77.0)	73.9 \pm 18.5 (45.0 - 107)	41.5 \pm 7.8 (31.5 - 56.0)	56.3 \pm 10.8 (47.0 - 88.0)	29.8 \pm 8.4 (16.0 - 48.0)	31.8 \pm 9.7 (18.0 - 49.0)	28.6 \pm 9.1 (15.5 - 43.0)	40.4 \pm 9.5 (27.0 - 66.0)	27.9 \pm 17.0 (17.0 - 43.0)	45.7 \pm 12.0 (22.5 - 64.0)	42.5 \pm 17.5 (15.5 - 107)
Laichgrubenareal-Fläche [m ²]	0.60 \pm 0.23 (0.25 - 1.0)	0.97 \pm 0.49 (0.27 - 1.97)	0.27 \pm 0.12 (0.15 - 0.55)	0.54 \pm 0.2 (0.29 - 0.98)	0.15 \pm 0.08 (0.06 - 0.41)	0.17 \pm 0.1 (0.8 - 0.3)	0.14 \pm 0.1 (0.05 - 0.25)	0.25 \pm 0.08 (0.12 - 0.39)	0.15 \pm 0.06 (0.07 - 0.32)	0.41 \pm 0.19 (0.09 - 0.71)	0.35 \pm 0.31 (0.05 - 1.97)
Laichgrubenareal-Längsschnitt											
Wassertiefe beim Originalsubstrat [cm]	18.4 \pm 5.4 (11.5 - 29.5)	32.9 \pm 7.8 (17.0 - 44.0)	15.4 \pm 8.5 (7.0 - 35.5)	22.8 \pm 7.2 (13.0 - 39.0)	33.3 \pm 6.9 (20.5 - 42.0)	18.0 \pm 6.2 (9.5 - 34.5)	15.8 \pm 4.0 (9.0 - 24.5)	19.8 \pm 7.1 (8.0 - 37.5)	22.4 \pm 5.3 (15.0 - 33.0)	25.0 \pm 11.2 (6.0 - 42.0)	22.4 \pm 9.3 (6.0 - 44.0)
Wassertiefe bei der Grube [cm]	23.0 \pm 6.2 (14.5 - 38.0)	39.2 \pm 6.5 (19.5 - 45.5)	19.3 \pm 8.8 (12.0 - 42.5)	27.4 \pm 5.3 (18.0 - 39.0)	35.4 \pm 7.0 (21.5 - 44.0)	19.6 \pm 4.8 (13.0 - 31.5)	18.0 \pm 3.5 (12.0 - 26.0)	22.3 \pm 6.1 (11.0 - 39.0)	27.0 \pm 4.0 (25.5 - 38.0)	28.8 \pm 12.0 (12.5 - 52.5)	25.9 \pm 9.4 (11.0 - 52.5)
Wassertiefe beim Übergangsbereich [cm]	18.0 \pm 5.0 (12.0 - 30.0)	32.2 \pm 6.8 (14.0 - 38.5)	14.5 \pm 8.2 (7.0 - 38.0)	22.8 \pm 5.5 (13.0 - 34.0)	30.1 \pm 6.5 (15.0 - 38.0)	15.7 \pm 4.9 (8.5 - 26.0)	15.0 \pm 3.6 (9.5 - 22.0)	18.2 \pm 5.1 (9.5 - 31.0)	22.4 \pm 4.0 (17.0 - 34.5)	23.3 \pm 10.8 (7.0 - 45.0)	21.1 \pm 8.5 (7.0 - 45.0)
Wassertiefe hinter dem Laichgrubenareal [cm]	13.9 \pm 4.4 (8.0 - 24.0)	27.8 \pm 5.7 (12.5 - 35.0)	11.9 \pm 8.5 (5.0 - 37.0)	16.5 \pm 4.7 (11.0 - 29.0)	27.5 \pm 6.6 (14.5 - 35.0)	12.9 \pm 4.5 (6.0 - 21.0)	13.3 \pm 3.3 (6.0 - 20.0)	14.9 \pm 3.9 (8.0 - 25.0)	19.3 \pm 3.9 (15.0 - 31.0)	19.0 \pm 10.7 (5.5 - 41.0)	17.6 \pm 8.0 (6.0 - 41.0)
Fließgeschwindigkeit über Flusssohle											
Vor der Laichgrube [m/s]	0.39 \pm 0.14 (0.17 - 0.67)	0.36 \pm 0.07 (0.23 - 0.47)	0.10 \pm 0.07 (0.3 - 0.24)	0.23 \pm 0.10 (0.07 - 0.42)	0.20 \pm 0.06 (0.08 - 0.31)	0.20 \pm 0.14 (0.02 - 0.46)	0.37 \pm 0.09 (0.22 - 0.55)	0.33 \pm 0.09 (0.18 - 0.5)	0.28 \pm 0.09 (0.16 - 0.47)	0.30 \pm 0.08 (0.16 - 0.44)	0.28 \pm 0.13 (0.02 - 0.67)
Grube [m/s]	0.30 \pm 0.07 (0.19 - 0.43)	0.31 \pm 0.12 (0.14 - 0.66)	0.07 \pm 0.08 (0.1 - 0.28)	0.16 \pm 0.10 (0.02 - 0.39)	0.14 \pm 0.06 (0.06 - 0.28)	0.14 \pm 0.09 (0.01 - 0.29)	0.27 \pm 0.07 (0.13 - 0.36)	0.24 \pm 0.09 (0.07 - 0.41)	0.22 \pm 0.07 (0.09 - 0.32)	0.22 \pm 0.10 (0.09 - 0.38)	0.21 \pm 0.11 (0.01 - 0.66)
Übergangsbereich [m/s]	0.43 \pm 0.09 (0.29 - 0.59)	0.46 \pm 0.10 (0.35 - 0.68)	0.11 \pm 0.08 (0.02 - 0.31)	0.26 \pm 0.12 (0.10 - 0.53)	0.22 \pm 0.07 (0.06 - 0.36)	0.20 \pm 0.10 (0.01 - 0.41)	0.39 \pm 0.09 (0.24 - 0.56)	0.39 \pm 0.11 (0.22 - 0.58)	0.28 \pm 0.08 (0.15 - 0.40)	0.31 \pm 0.11 (0.10 - 0.56)	0.30 \pm 0.14 (0.01 - 0.68)
Aufschüttung [m/s]	0.47 \pm 0.12 (0.19 - 0.62)	0.56 \pm 0.13 (0.37 - 0.86)	0.12 \pm 0.09 (0.01 - 0.34)	0.32 \pm 0.12 (0.12 - 0.53)	0.26 \pm 0.08 (0.16 - 0.44)	0.24 \pm 0.11 (0.2 - 0.42)	0.41 \pm 0.09 (0.22 - 0.56)	0.42 \pm 0.12 (0.25 - 0.67)	0.35 \pm 0.11 (0.18 - 0.53)	0.33 \pm 0.09 (0.13 - 0.51)	0.35 \pm 0.16 (0.01 - 0.86)
Dominante Substratkategorie											
Grube	16 - 32 mm (25.3 %)	16 - 32 mm (30.0 %)	16 - 32 mm (34.5 %)	16 - 32 mm (29.6 %)	16 - 32 mm (31.3 %)	16 - 32 mm (31.0 %)	32 - 64 mm (28.1 %)	16 - 32 mm (27.0 %)	16 - 32 mm (30.3 %)	-	16 - 32 mm (29.1 %)
Übergangsbereich	8 - 16 mm (41.6 %)	16 - 32 mm (51.4 %)	8 - 16 mm (38.2 %)	8 - 16 mm (34.6 %)	8 - 16 mm (30.9 %)	16 - 32 mm (38.0 %)	16 - 32 mm (39.1 %)	16 - 32 mm (29.0 %)	16 - 32 mm (35.3 %)	-	16 - 32 mm (33.7 %)
Aufschüttung	8 - 16 mm (40.6 %) 16 - 32 mm (40.6 %)	16 - 32 mm (51.0 %)	8 - 16 mm (35.3 %)	8 - 16 mm (36.3 %)	8 - 16 mm (34.1 %)	16 - 32 mm (36.5 %)	16 - 32 mm (39.2 %)	16 - 32 mm (33.0 %)	16 - 32 mm (46.9 %)	16 - 32 mm (44.7 %)	16 - 32 mm (37.5 %)
Eier-Eingrabungstiefe											
Eier-Eingrabungstiefe A [cm]	13.6 \pm 4.1 (4.5 - 20)	16.3 \pm 3.4 (9.1 - 22.0)	7.3 \pm 1.9 (4.0 - 12.5)	9.9 \pm 3.4 (5.0 - 17.5)	8.2 \pm 3.0 (4.5 - 18.0)	7.4 \pm 3.1 (4.0 - 17.0)	6.2 \pm 2.4 (2.5 - 11.5)	10.3 \pm 4.2 (4.0 - 19.0)	10.3 \pm 6.1 (4.0 - 28.5)	11.6 \pm 3.1 (4.5 - 16.0)	10.1 \pm 4.7 (2.5 - 28.5)
Eier-Eingrabungstiefe B [cm]	9.1 \pm 4.4 (-1.0 - 17.5)	11.2 \pm 5.3 (4.0 - 23.5)	3.8 \pm 3.8 (-4.5 - 9.5)	3.6 \pm 5.4 (-8.5 - 12.5)	2.5 \pm 4.4 (-3.5 - 15.0)	2.3 \pm 5.0 (-9.0 - 10.5)	3.7 \pm 3.0 (-1.5 - 8.5)	5.4 \pm 5.8 (-7.0 - 14.5)	6.2 \pm 5.7 (-5.0 - 15.0)	5.6 \pm 5.7 (-6.5 - 14.5)	5.2 \pm 5.4 (-9.0 - 23.5)

Wassertiefe

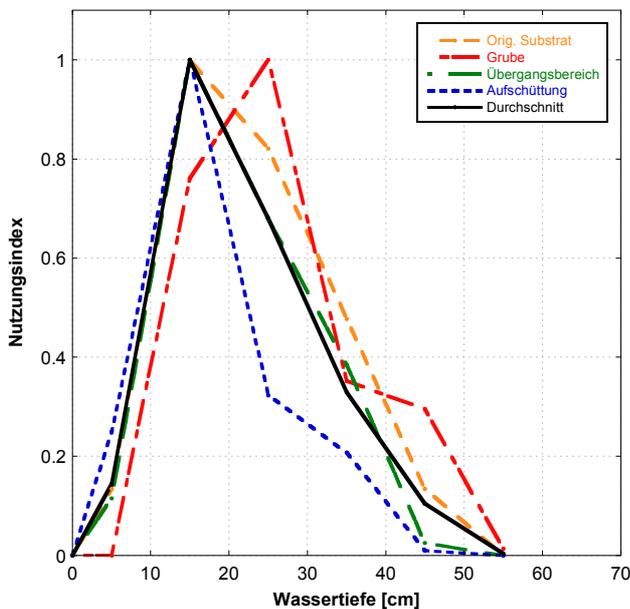


Abb. 18: Nutzungskurven für Wassertiefen bei verschiedenen Punkten auf dem Laichgrubenareal. Der Wert 1 entspricht dabei der am häufigsten gemessenen Wassertiefe. Die Kurve „Durchschnitt“, wurde als Durchschnitt der Nutzungswerte von allen Punkten des Laichgrubenareals be-

Der Fluss indem die Bachforellen am tiefsten gelaicht haben ist der Laveggio (im Durchschnitt bei einer Wassertiefe von 33,3 cm) (Tab. 3). Der Rickenbach und die Waldemme waren diejenigen Flüsse, an denen die Forellen in geringster Wassertiefe abgelaiht haben (im Durchschnitt an Stellen mit 15 cm Wassertiefe). Der Mittelwert zwischen den fünf gemessenen charakterisierenden Tiefen für die zehn Flüsse betrug 21,6 cm. Wenn man nur die drei charakterisierenden Tiefen in der Laichgrube (Grube, Übergangsbereich und Aufschüttung) berücksichtigt, betrug der Mittelwert ebenfalls 21,6 cm.

Die aus den Daten abgeleiteten Nutzungskurven (Abb. 18) zeigen, dass Bachforellen ihre Laichgruben vorwiegend in Tiefen zwischen 10 - 20 cm angelegt hatten. Die Kurven für die Wassertiefe vor dem Laichgrubenareal (Orig. Substrat in Abb. 18), diejenige für den Übergangsbereich, sowie diejenigen für die gemittelten Werte über alle Punkte des Laichgrubenareals zeigen einen ähnlichen Verlauf. Für die drei Kurven liegt der maximale Nutzungsindex bei 15 cm. Die Kurve für die Aufschüttung fällt nach dem maximalen Indexwert (bei 15 cm) schneller auf tiefere Werte ab, als die restlichen Kurven. Die Kurve für die Laichgruben zeigt dagegen einen maximalen Nutzungsindex bei 25 cm und ist im Vergleich zu den anderen leicht nach rechts verschoben.

Fliessgeschwindigkeit

In allen Flüssen zeigten die Fliessgeschwindigkeitsdaten (Tab. 3) kleinere Werte in den Gruben als über den restlichen Stellen (vor der Laichgrube, Übergangsbereich und Aufschüttung). Die Werte für die Stelle vor der Laichgrube und im Übergangsbereich waren innerhalb eines Flusses immer ähnlich. Hingegen variierten diese Werte von Fluss zu Fluss. Die Fliessgeschwindigkeiten über der Aufschüttung wiesen im Vergleich mit den anderen Punkte die höchsten Werte auf.

Die Resultate der ANOVA Tests zeigten, dass es oft signifikante (p-Wert < 0.05) Unterschiede zwischen den Fliessgeschwindigkeiten an den verschiedenen Messstellen (vor dem Laichgrubenareal, Grube, Übergangsbereich und Aufschüttung) gab, vor allem zwischen der Fliessgeschwindigkeit in der Grube und auf der Aufschüttung.

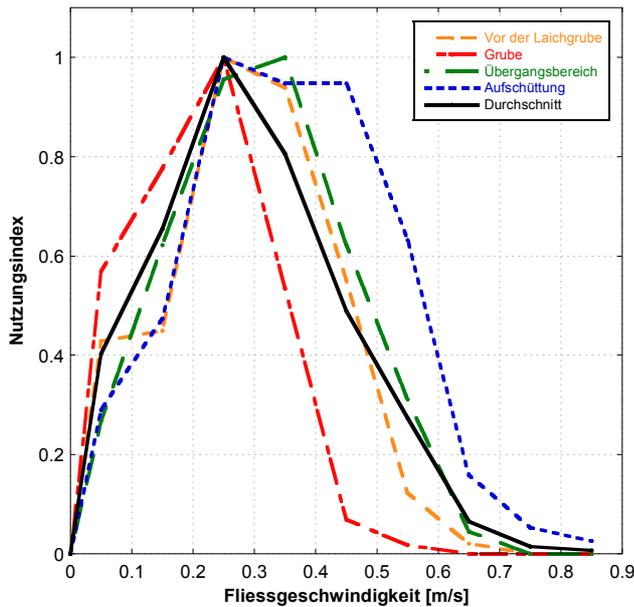


Abb. 19: Nutzungskurven für Fließgeschwindigkeit in verschiedenen Punkten auf dem Laichgrubenareal. Der Wert 1 entspricht dabei der am häufigsten gemessenen Fließgeschwindigkeiten. Die Kurve „Durchschnitt“ wurde als Durchschnitt der Nutzungswerte von allen Punkten des Laichgrubenareals berechnet.

Die Nutzungskurve für die gemittelten Werte über alle Punkte des Laichgrubenareals („Durchschnitt“) zeigt, dass der maximale Nutzungsindex bei einer Fließgeschwindigkeit von 0.25 m/s erreicht wird. (Abb. 19). Die Kurve für die Laichgrube ist schmaler und der Bereich mit hohem Nutzungsindex liegt zwischen Fließgeschwindigkeiten von 0.15 m/s und 0.30 m/s. Die restlichen Kurven sind breiter, besonders die Kurve der Aufschüttung. Die höchsten Nutzungsindexwerte für die Nutzungskurve über der Aufschüttung liegen in einem Bereich von 0.2 bis 0.5 m/s.

Die Nutzungskurven für den Übergangsbereich und für die Messstelle vor dem Laichgrubenareal zeigen einen ähnlichen Verlauf und sind durch die Durchschnittskurve gut angenähert.

Substratzusammensetzung

Die dominante Substratkategorie in den Laichgruben war für alle Flüsse die grobkörnige Kiesfraktion (16 - 32 mm) (Tab. 3). Der Anteil von grobkörnigem Kies variierte von Fluss zu Fluss zwischen 25.3 % (Luthern) und 34.5 % (Rickenbach). Durchschnittlich war 29.1 % des Kiesel aus dieser Substratkategorie (also 16-32 mm)

Im Übergangsbereich enthielt das dominante Substrat je nach Fluss entweder mittleren (8-16 mm) oder grobkörnigen (16 - 32 mm) Kies (Tab. 2). Die Luthern, der Rickenbach, die Thur und der Laveggio zeigten im Übergangsbereich mittleren Kies als dominante Substratkategorie. Dessen Anteil im Übergangsbereich dieser Flüsse variierte zwischen 30.9 % (Laveggio) und 41.6 % (Luthern). Der Übergangsbereich der Wigger, des Vedeggio, der Waldemme, des Vorderrheins und des Inns enthielten hingegen hauptsächlich grobkörnigen Kies. Sein Anteil im Übergangsbereich variierte in diesen Flüssen zwischen 29 % (Vorderrhein) und 51.4 % (Wigger). Über alle Flüsse gesehen, war der grobkörnige Kies die dominanteste Kiesfraktion im Übergangsbereich und machte im Mittel 37.7% des Substrates aus. Im Fluss Ticino konnten die Substratdaten weder für die Laichgruben noch für den Übergangsbereich bestimmt werden.

Die Situation bei den Aufschüttungen wär ähnlich: Je nach Fluss war die dominante Substratkategorie entweder mittlerer oder grobkörniger Kies. In drei Flüsse (Rickenbach, Thur und Laveggio) war das dominante Substrat der mittlere Kies. Der Anteil dieser Substratkategorie variierte in den

drei Flüssen zwischen 34.1% und 36.3%. In der Luthern waren zwei Substratkategorien (mittlerer Kies und grobkörniger Kies) gleich dominant (40.6 %). In allen anderen Flüssen war das dominante Substrat der grobkörnige Kies mit Anteilen, die zwischen 36.5 % und 51 % variierten.

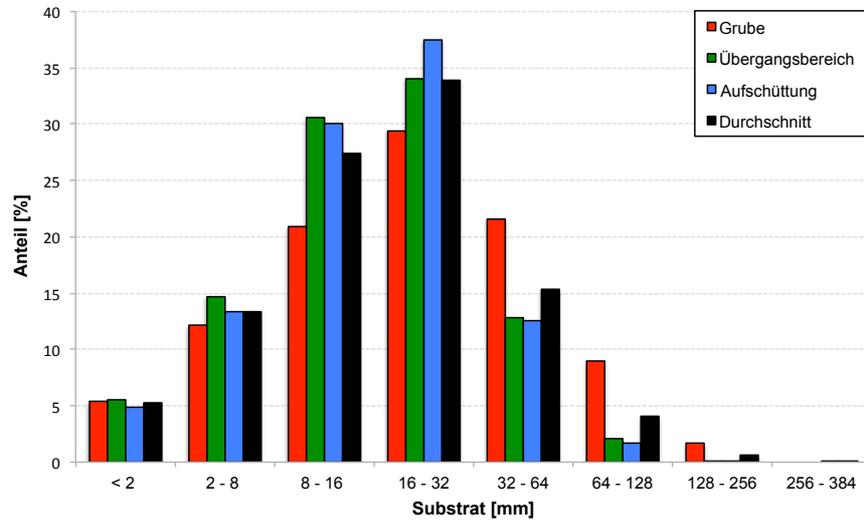


Abb. 20: Substratklassenanteile, berechnet für die verschiedenen Bereiche eines Laichgrubenareals. Die schwarzen Balken („Durchschnitt“) widerspiegeln die durchschnittliche Substratklassenverteilung aller Bereiche eines Laichgrubenareals.

Die Abbildung 20 zeigt die Anteile der verwendeten Substratkategorien für jeden Bereich (Grube, Übergangsbereich und Aufschüttung) der Laichgrubenareale sowie für den Durchschnitt aller Bereiche. Die häufigsten Substratkategorien waren mittlerer und grobkörniger Kies. Für den Übergangsbereich, sowie für die Aufschüttung erreichte die Summe der Anteile dieser beiden Kategorien ca. 65%. Die verbleibenden 35% teilten sich auf die restlichen Substratkategorien auf. Wobei feiner Kies (2 - 8 mm) und sehr grobkörniger Kies (32 - 64 mm) am bedeutendsten waren.

Im Vergleich zu den anderen Bereichen der Laichgrubenareale, wurden in den Laichgruben höhere Anteile an größerem Kies gemessen. Insbesondere wurde im Vergleich zum Durchschnitt etwa 5% mehr sehr grobkörniger Kies und etwa 7% mehr kleine Steine (64 - 128 mm) festgestellt. Sand und Lehm (Korngröße <2 mm) machten in allen Bereichen der Laichgrubenareale lediglich etwa 5% aus.

3.1.2 Untersuchung der Eingrabungstiefe der Eier

Die Werte der Eier-Eingrabungstiefe A pendelten zwischen einem Minimum von 2.5 cm (Waldemme) und einem maximalen Wert von 28.8 cm (Inn, Tab. 3). Im Durchschnitt hatten die Bachforellen in der Wigger ihre Eier am tiefsten eingegraben (16.3 cm unter dem Aufschüttungskies), während in der Waldemme die kleinsten Eingrabungstiefen der Eier gemessen wurden (6.2 cm unter dem Aufschüttungskies). Der Durchschnitt der Eingrabungstiefen aller Flüsse lag bei 10.1 cm.

Die Berechnung der Eier-Eingrabungstiefen B lieferte 26 negative Werte. Dies bedeutet, dass die Eier in diesen 26 Fällen über dem Substratniveau vor dem Laichgrubenareal lagen. Durchschnittlich wurde eine globale Eier-Eingrabungstiefe B von 5.2 cm festgestellt.

Abbildung 21 zeigt Boxplots der Eier-Eingrabungstiefen für die verschiedenen Flüsse dargestellt. Ein t-Test zeigte, dass sich die zwei Typen von Eingrabungstiefen (A und B) signifikant (p -Wert < 0.05) unterscheiden. Die Werte der Eier-Eingrabungstiefe A waren immer tiefer als diejenigen der Eiern-Eingrabungstiefe B. Beispielsweise waren im Rickenbach 50% der erhobenen Werte für Eiern-Eingrabungstiefe A in einem Bereich von ca. 2 cm, während für die Eier-Eingrabungstiefe B 50% der Werte in einem Bereich von ca. 4 cm lagen.

Auch für die Eingrabungstiefen gelten die Resultate der durchgeführten MANOVA, welche bestätigte, dass die Eingrabungstiefen von Fluss zu Fluss unterschiedlich waren.

Generell war die Streuung für die Werte der Eier-Eingrabungstiefe B grösser als für die Werte der Eier-Eingrabungstiefe A (Abb. 21).

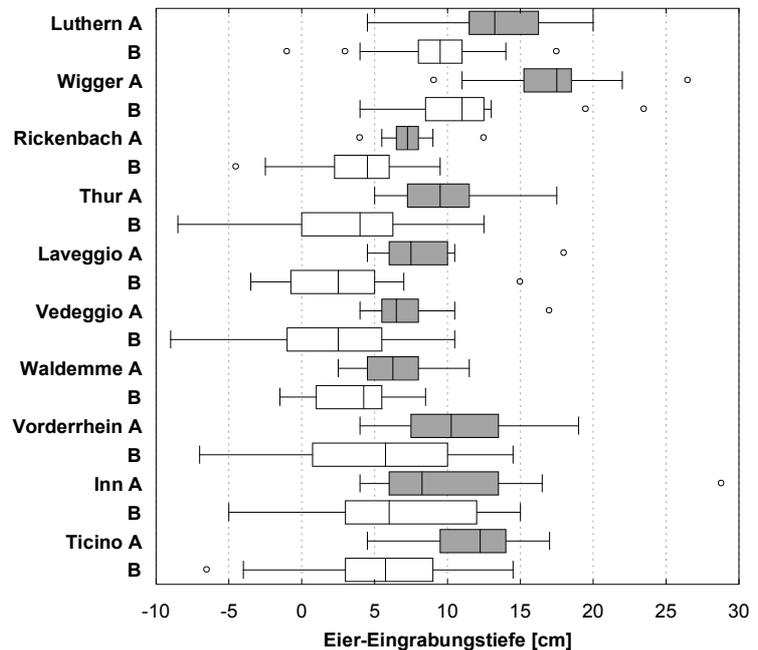


Abb. 21: Boxplots der Eier-Eingrabungstiefen der zehn untersuchten Flüsse.

Graue Boxplots: EETA. Weiße Boxplots EETB. Die Ausdehnung der Box entspricht der Spannweite, in der die mittleren 50 % der Daten liegen. Die Länge der Box wird auch Interquartilsabstand genannt, da sie durch das obere (75 %) und untere Quartil (25 %) begrenzt ist. Der Median ist als Strich in der Box eingezeichnet. Die Linien an den Seiten der Box (Antennen) stellen die Daten ausserhalb der Box dar. Minimum und Maxima sind durch die Grenzen der Antennen oder mit Ausreisserpunkten dargestellt.

In Abbildung 22 sind die zusammenfassenden Boxplots für die gesamte Datenmenge (alle Flüsse) dargestellt. Die Spannweite der Interquartile für die Eier-Eingrabungstiefe A reicht von 6.5 bis 13 cm. Zudem ist das rechtsschiefe Muster des Boxplots zu bemerken.

Das Muster des Boxplots der Eier-Eingrabungstiefe B ist dagegen ziemlich ausgeglichen (Normalverteilung der Daten) und die Spannweite der Interquartile erstreckt sich zwischen 1.2 bis 9 cm.

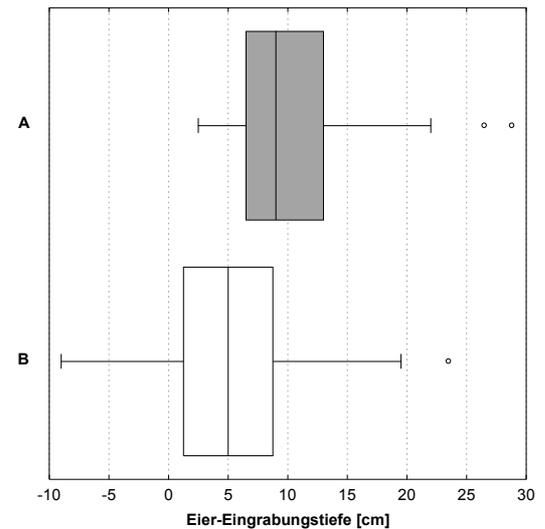


Abb. 22: Boxplots für die Eier-Eingrabungstiefen A (Grau) und B (Weiss) aller erhobenen Daten (Durchschnitt der Flüsse).

Länge der Weibchen vs. Eingrabungstiefe der Eier

Im Ticino wurden aus einem Total von 21 untersuchten Laichgrubenarealen in 14 Fällen die Längen der laichenden Weibchen geschätzt. Von diesen 14 Laichgrubenarealen wurden in 2 Fällen keine Eier gefunden, sodass für die Analyse insgesamt 12 Datenpaare zu Verfügung standen.

Den geschätzten Längen der Weibchen wurde ein Fehler von +/- 2 cm eingeräumt.

Durch eine linearen Regression (Form: $y = ax + b$) (Crisp & Carling, 1989) mit den Daten für die Eier-Eingrabungstiefe A und der Länge der Weibchen wurden Werte von 0.12 für a (V.I. 95 % [- 0.33 ; 0.56]) und 9.2 für b (V.I. 95 % [- 2.19 ; 21.27]) errechnet (Abb. 23). Das Bestimmtheitsmass R^2 betrug 0.035, was bedeutet, dass die Regression 3.5 % der Varianz der Daten erklärt. Der p -Werte_{0.05} der linearen Regression ($p = 0.56$) zeigte, dass kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Länge der Weibchen und der Eingrabungstiefe der Eier im Ticino gefunden wurde.

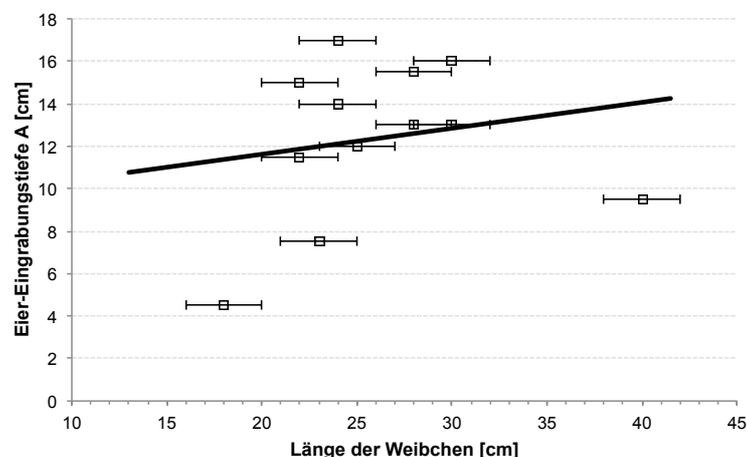


Abb. 23: Lineare Regression zwischen der Eier-Eingrabungstiefe A und die Länge der laichenden Weibchen für den Ticino.

Unter Verwendung der vorgeschlagenen semilogarithmischen, linearen Beziehung nach Ottaway *et al.* (1981) (Form: $y = a \cdot \ln(x) + b$), erhöhte sich die durch die Regression erklärte Varianz auf 8.2 % ($a = 5.18$, V.I. 95 % [- 7.01 ; 17.4]; $b = -4.45$, V.I. 95 % [- 44.2 ; 35.3]). Die Korrelation zwischen der Eier-Eingrabungstiefe A und der Länge der Weibchen war aber nach wie vor nicht signifikant ($p\text{-Wert}_{0.05} = 0.37$) (Abb. 24).

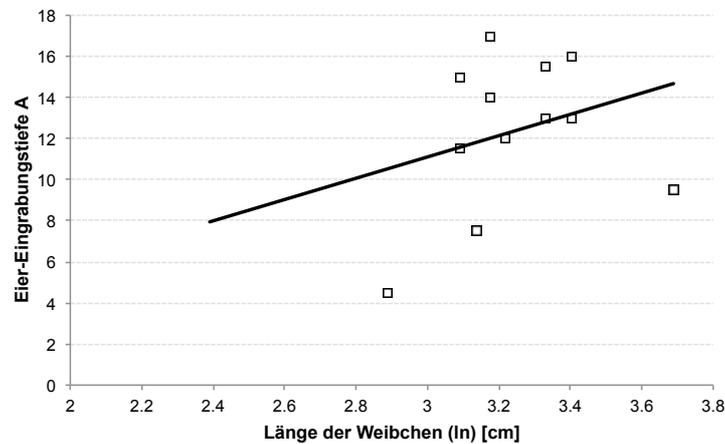


Abb. 24: Semilogarithmische, lineare Regression zwischen der Eier-Eingrabungstiefe A und der Länge der laichende Weibchen für den Fluss Ticino.

Im Laveggio wurden für 13 der 22 untersuchten Laichgrubenareale die Längen der laichenden Weibchen geschätzt. Auch in diesem Fluss wurden in 2 Laichgrubenarealen keine Eier gefunden, sodass für die Analyse insgesamt 11 Datenpaare zu Verfügung standen.

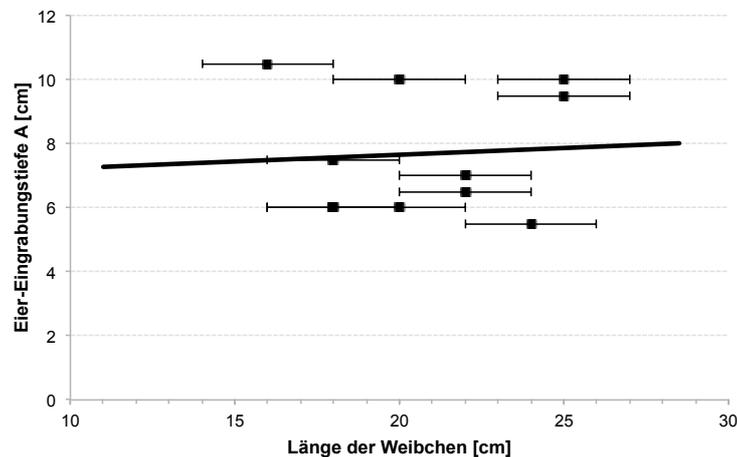


Abb. 25: Lineare Regression zwischen der Eier-Eingrabungstiefe A und der Länge der laichenden Weibchen für den Laveggio.

Durch eine linearen Regression der Form $y = ax + b$ wurden Werte von 0.04 für a (V.I. 95 % [- 0.43 ; 0.51]) und 6.8 für b (V.I. 95 % [- 3.0 ; 16.6]) errechnet. Das Bestimmtheitsmass R^2 betrug 0.005, was bedeutet, dass die Regression nur 0.5 % der Varianz erklärt (Abb. 25). Auch in diesem Fall war die Korrelation zwischen den erwähnten Variablen statistisch nicht signifikant ($p\text{-Wert}_{0.05} = 0.84$).

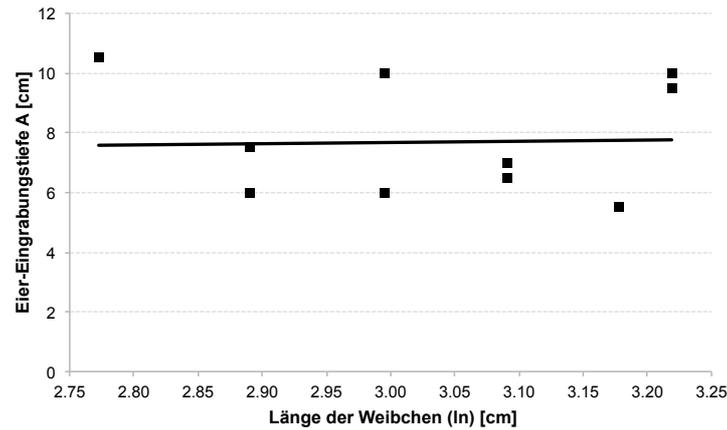


Abb. 26: Semilogarithmische lineare Regression zwischen der Eier-Eingrabungstiefe A und der Länge der laichende Weibchen für den Ticino.

Durch das semilogarithmische Modell von Ottaway *et al.* (1981) wurde die lineare Beziehung zwischen Eier-Eingrabungstiefe A und der Länge der Weibchen noch undeutlicher (Abb. 26). Das Bestimmtheitsmass R^2 reduzierte sich um 0.001 (die Varianz ist durch das Modell nicht erklärbar) und die lineare Beziehung war mit einem $p\text{-Wert}_{0.05}$ von 0.93 nicht signifikant ($a = 0.41$, V.I. 95 % [- 9.2 ; 10.0]; $b = 5.45$, V.I. 95 % [- 22.7 ; 35.6]).

Die Verwendung der Länge der laichenden Weibchen als Mass für die Eingrabungstiefe der Eier (Ansatz Armstrong *et al.*, 2003 und Crisp, 1996) ergab als Resultat für den Ticino 10.5 cm, dem gegenüber stand der gemessene Durchschnitt von 12.4 cm. Für den Laveggio wurde anhand der Länge der laichenden Weibchen eine Eingrabungstiefe von 8.3 cm bestimmt, die gemessenen Werte ergaben hier einen Durchschnitt von 7.7 cm.

Vorhersehbarkeit der Eier-Eingrabungstiefe durch empirische Messung der Laichgrubentiefe

Die Beziehung zwischen der Tiefe der Laichgrube und dem gemessenen Wasserstand beim Eierpaket (Crisp & Carling, 1989) konnte gut durch eine lineare Regression beschrieben werden (Abb. 27).

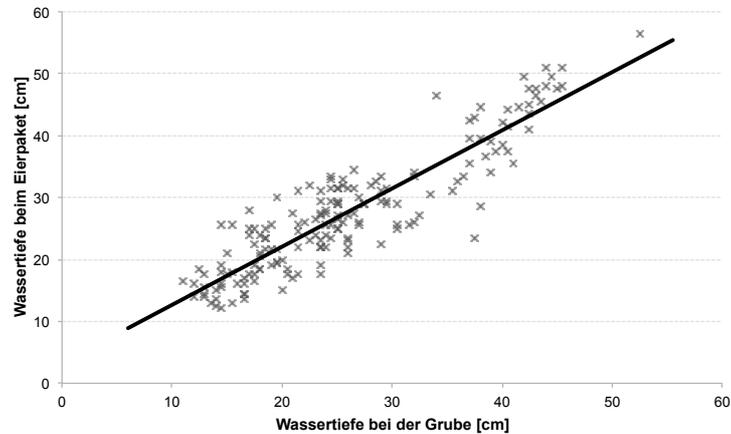


Abb. 27: Lineare Regression zwischen der Wassertiefe beim Eierpaket und die Wassertiefe bei der Laichgrube.

Durch eine lineare Regression der Form $y = ax + b$ wurden Werte von 0.94 für a (V.I. 95 % [0.87 ; 1.01]) und 3.27 für b (V.I. 95 % [1.4 ; 5.1]) errechnet. Das Bestimmtheitsmass R^2 betrug 0.815. Die lineare Beziehung wurde als hoch signifikant eingestuft ($p\text{-Wert}_{0.05} < 0.001$).

3.2 Analyse der Laichgruben und Eingrabungstiefe der Eier in instabilen und stabilen Flüssen

3.2.1 Einteilung in instabile und stabile Flüsse

Die Daten wurden entsprechend der Stabilität der Flüsse in zwei Gruppen eingeteilt (siehe Methoden Kapitel 2.3.2). Insgesamt wurden 6 instabile Flüsse und 4 stabile Flüsse untersucht. Für die Auswertung standen 98 Beobachtungen aus instabilen Flüssen und 74 Beobachtungen aus stabilen Flüssen zur Verfügung.

Tab. 4: Kritischer Abfluss beim Aufbrechen der Deckschicht ($q_{c,d20\%}$), Aufbruchwahrscheinlichkeit über 6 Winterperioden und Anzahl Tage mit Abflusstagesmittel höher als $q_{c,d20\%}$ über 6 bzw. 1 Winterperiode in den gewählte Flüsse.

	Instabile Flüsse						Stabile Flüsse			
	Luthern	Wigger	Rickenbach*	Thur	Laveggio	Vedeggio	Waldemme	Vorderrhein	Inn	Ticino
Kritische Abfluss beim Aufbrechen der Deckschicht ($q_{c,d20\%}$) [m ³ /s]	5.2	7.6	1.3	12.1	1.3	1.1	15.8	6.7	22.7	3.1
Aufbruchwahrscheinlichkeit über 6 Winterperioden	2.1	5.1	6.6	2.7	2.7	10.4	0.0	0.0	0.3	0.3
Anzahl Tage mit Tagesmittel > $q_{c,d20\%}$ über 6 Winterperioden	19.0	46.2	59.8	24.5	24.5	94.2	0.0	0.0	2.7	2.7
Anzahl Tage mit Tagesmittel > $q_{c,d20\%}$ über 1 Winterperiode	3.2	7.7	10.0	4.1	4.1	15.7	0.0	0.0	0.5	0.5

* Gerechnete Werte anhand der vom Gonzenbach abgeleiteten hydrologischen Daten (siehe auch Kapitel 2.1.1).

Tabelle 4 zeigt die Resultate der Berechnungen der typisierten Abflussdaten⁷ von den Winterperioden zwischen 2004 und 2010. Von allen untersuchten Flüssen war der Vedeggio mit durchschnittlichen 15.7 Tagen pro Winterperiode, derjenige Fluss in dem die Deckschicht am regelmässigsten aufgebrochen wurde. Danach folgten in absteigender Reihenfolge der Rickenbach (10.2 Tage), die Wigger (7.7 Tage), die Thur und der Laveggio (beide 4.1 Tage) und die Luthern (3.2 Tage).

Die Waldemme, der Vorderrhein, der Inn und der Ticino erwiesen sich als Flüsse mit stabilem Abflussverhalten während der Winterperiode (Tab. 4).

⁷ Daten aus einer Periode in welcher Abflusswerte für alle untersuchte Flüsse verfügbar sind.

3.2.2 Vergleich der Charakteristika der Laichgruben und der Eingrabungstiefe der Eier zwischen instabilen und stabilen Flüssen

Laichgrubenareal Planaufsicht

Aus der separaten Betrachtung der gemittelten Werte von instabilen und stabilen Flüssen (Tab. 5) wurde ersichtlich, dass die Laichgrubenareale der stabilen Flüsse immer kleinere Werte (für Messgrößen der Planansicht) annahmen als in den instabilen Flüssen. Beispielsweise waren die Laichgrubenareal-Längen, -Breiten und -Flächen in instabilen Flüssen um 24 cm, 10.9 cm und 0.21 m² grösser als in den stabilen Flüssen. Auch die Durchschnittswerte der Durchmesser und der Längen der Laichgruben unterschieden sich signifikant (MANOVA p-Wert_{0,05} < 0.0001) voneinander (um ca. 8 cm).

Tab. 5: Zusammenfassende Tabelle für die Charakteristika der Laichgrubenareale und der Eier-Eingrabungstiefen. Für jede Kenngröße sind Mittelwert ± Standardabweichung, Minimum und Maximum angegeben. Für die dominante Substratkategorie werden die Substratklasse und der relative Anteil angegeben.

	Instabile Flüsse (n = 98)	Stabile Flüsse (n = 74)	Total (n = 172)
Laichgrubenareal-Planaufsicht			
Grube-Durchmesser [cm]	37.7 ± 15.2 (16.0 - 79.0)	28.8 ± 9.3 (15.0 - 60.0)	33.8 ± 13.8 (15.0 - 79.0)
Grube-Länge [cm]	37.5 ± 15.8 (16.5 - 86.0)	29.4 ± 9.2 (16.0 - 60.0)	34.0 ± 14.0 (16.0 - 86.0)
Aufschüttung-Länge [cm]	63.1 ± 33.6 (19.5 - 157)	47.2 ± 19.3 (18.0 - 102)	56.2 ± 29.5 (18.0 - 157)
Laichgrubenareal-Länge [cm]	100.6 ± 46.9 (39.5 - 235)	76.6 ± 26.1 (38.0 - 159)	90.3 ± 41.2 (38.0 - 235)
Laichgrubenareal-Breite [cm]	47.6 ± 19.3 (16.0 - 107)	35.8 ± 11.9 (15.5 - 66.0)	42.5 ± 17.5 (15.5 - 107)
Laichgrubenareal-Fläche [m ²]	0.44 ± 0.37 (0.06 - 1.97)	0.23 ± 0.15 (0.05 - 0.71)	0.35 ± 0.31 (0.05 - 1.97)
Laichgrubenareal-Längsschnitt			
Wassertiefe beim Originalsubstrat [cm]	23.7 ± 10.0 (7.0 - 44.0)	20.7 ± 8.0 (6.0 - 42.0)	22.4 ± 9.3 (6.0 - 44.0)
Wassertiefe bei der Grube [cm]	27.4 ± 10.0 (12.0 - 45.5)	24.0 ± 8.0 (11.0 - 52.5)	25.9 ± 9.4 (11.0 - 52.5)
Wassertiefe beim Übergangsbereich [cm]	22.3 ± 9.2 (7.0 - 38.5)	19.6 ± 7.1 (7.0 - 45.0)	21.1 ± 8.5 (7.0 - 45.0)
Wassertiefe bei der Aufschüttung [cm]	18.5 ± 8.8 (5.0 - 37.0)	16.5 ± 6.4 (5.5 - 41.0)	17.6 ± 8.0 (5.0 - 41.0)
Wassertiefe hinter dem Laichgrubenareal [cm]	21.3 ± 9.2 (4.0 - 44.0)	20.2 ± 6.7 (9.5 - 45.0)	20.8 ± 8.2 (4.0 - 45.0)
Fliessgeschwindigkeit über Flusssohle			
Vor der Laichgrube [m/s]	0.24 ± 0.14 (0.02 - 0.67)	0.32 ± 0.09 (0.16 - 0.55)	0.28 ± 0.13 (0.02 - 0.67)
Grube [m/s]	0.18 ± 0.12 (0.01 - 0.66)	0.24 ± 0.08 (0.07 - 0.41)	0.21 ± 0.11 (0.01 - 0.66)
Übergangsbereich [m/s]	0.28 ± 0.15 (0.01 - 0.68)	0.34 ± 0.11 (0.10 - 0.58)	0.30 ± 0.14 (0.01 - 0.68)
Aufschüttung [m/s]	0.32 ± 0.18 (0.01 - 0.86)	0.38 ± 0.12 (0.10 - 0.67)	0.35 ± 0.16 (0.01 - 0.86)
Dominante Substratkategorie			
Grube	16 - 32 mm (30.1 %)	16 - 32 mm (27.7 %)	16 - 32 mm (29.1 %)
Übergangsbereich	8 - 16 mm (34.0 %)	16 - 32 mm (37.8 %)	16 - 32 mm (33.7 %)
Aufschüttung	16 - 32 mm (34.9 %)	16 - 32 mm (40.8 %)	16 - 32 mm (37.5 %)
Eier-Eingrabungstiefe			
Eier-Eingrabungstiefe A [cm]	10.4 ± 4.8 (4.0 - 26.5)	9.6 ± 4.6 (2.5 - 28.5)	10.1 ± 4.7 (2.5 - 28.5)
Eier-Eingrabungstiefe B [cm]	5.3 ± 5.7 (-9.0 - 23.5)	5.2 ± 5.1 (-7.0 - 15.0)	5.2 ± 5.4 (-9.0 - 23.5)

Wassertiefe

Es zeigte sich, dass die Wassertiefen bei den Laichgruben in instabilen Flüssen grösser waren als in stabilen Flusssystemen (Tab. 5). Die Standardabweichungen aller Wassertiefen waren in instabilen Flüssen stets grösser als in stabilen Gewässern (Tab. 5). Dies ist auch in Abbildung 28 ersichtlich: Die Kurven der instabilen Flüsse sind merklich breiter als in den stabilen Flüssen.

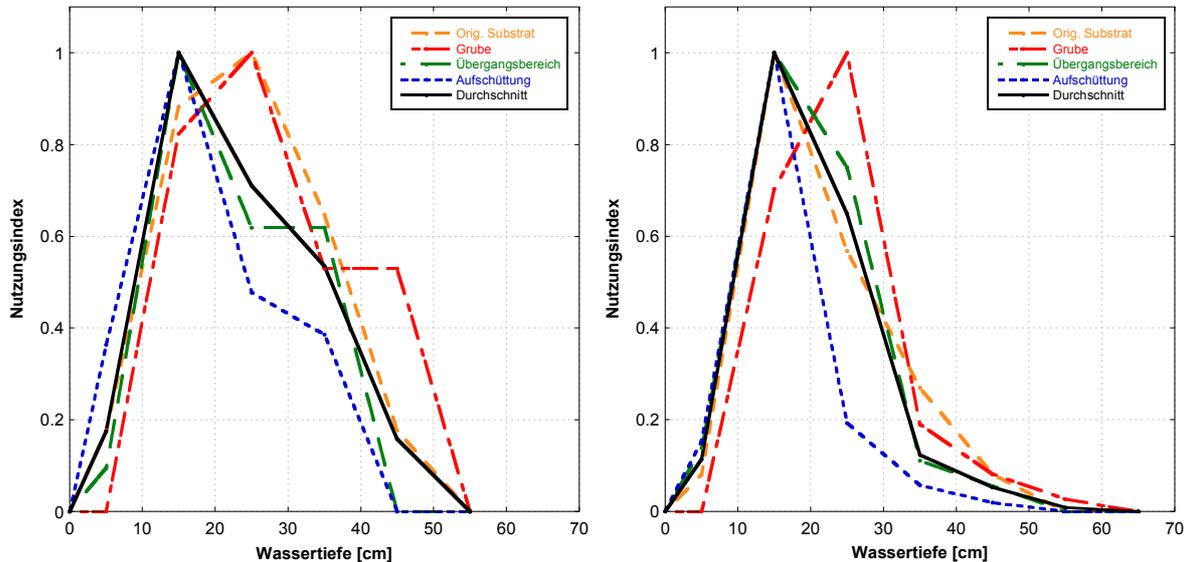


Abb. 28: Nutzungskurven für Wassertiefe: Links instabile Flüsse, rechts stabile Flüsse.

Alle erstellten Nutzungskurven (Abb. 28) zeigten einen ähnlichen Verlauf. Wie schon bei den Kurven aller Daten ersichtlich (Kapitel 3.1.1), zeigen die Kurven für die Laichgruben auch hier einen maximalen Nutzungsindex bei 25 cm Wassertiefe. Dies gilt sowohl für stabile, wie auch instabile Flüsse. Im Vergleich zu den restlichen Bereichen der Laichgrubenareale ist die Kurve für die Laichgruben leicht nach rechts verschoben. Ähnliches gilt für die Kurve des Wasserstands vor dem Laichgrubenareal in instabilen Flüssen, welche ein sehr ähnliches Muster zeigt.

In stabilen sowie in instabilen Flüssen zeigen die Kurven für den Übergangsbereich und diejenigen für die gemittelten Werte über alle Bereiche des Laichgrubenareals einen ähnlichen Verlauf. Die Kurve für die Wassertiefe der Aufschüttungen fällt nach dem maximalen Index bei 15 cm Wassertiefe schneller als die anderen Kurven.

Fließgeschwindigkeit

Bezüglich den Fließgeschwindigkeiten konnte beobachtet werden, dass instabile Flüsse durchschnittlich kleinere Werte bei allen gemessenen Bereichen des Laichgrubenareales aufweisen (Tab. 5).

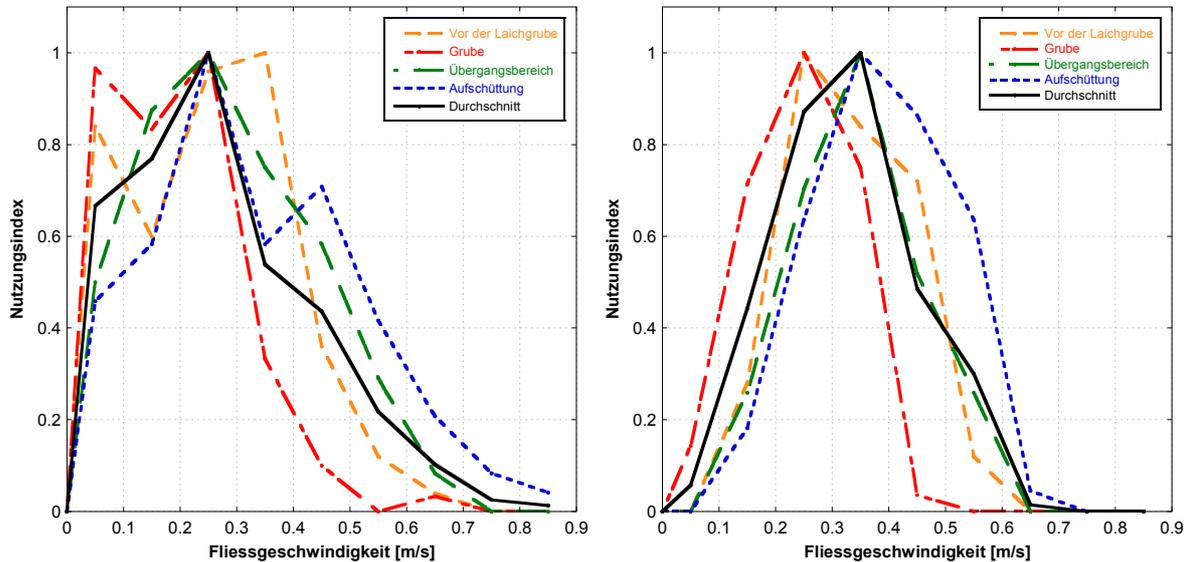


Abb. 29: Nutzungskurven der Fließgeschwindigkeiten: Links instabile Flüsse, rechts stabile Flüsse.

Aus der Abbildung 29 ist schon von Auge ersichtlich, dass sich die Kurven für instabile und stabile Flüsse klar unterscheiden. Während die Kurven der stabilen Flüsse einem kontinuierlichen Ablauf folgen, zeigen sie in instabilen Flüssen zum Teil unregelmässige Fluktuationen.

Die Nutzungskurven für die gemittelten Werte aller Bereiche des Laichgrubenareals („Durchschnitt“) zeigen unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten bei den maximale Nutzungsindices; in instabilen Flüssen ist die Fließgeschwindigkeit bei maximalem Index 0.25 m/s, in stabilen Flüssen dagegen 0.35 m/s. Das gleiche gilt auch für die Kurven des Übergangsbereichs und der Aufschüttung. Die Nutzungskurven für die Laichgruben zeigen in beiden Fällen bei maximalem Index eine Fließgeschwindigkeit von 0.25 m/s. Es ist jedoch zu bemerken, dass in instabilen Flüssen eine zweite Spitze bei 0.05 m/s vorhanden ist. Weiter ist zu bemerken, dass der Bereich vor dem Laichgrubenareal in instabilen Flüssen bei einem Indexwert von 1 Fließgeschwindigkeiten von 0.35 m/s zeigt. In stabilen Flüssen liegt dieser Wert bei 0.25 m/s.

Substratzusammensetzung

Im Durchschnitt war die dominante Substratkategorie in den Laichgruben der instabilen und der stabilen Flüsse der grobkörnige Kies (16 - 32 mm) mit einem Anteil von 30.1 % resp. 27.7 % (Tab. 5). Im Übergangsbereich des Laichgrubenareales war die dominante Substratkategorie für die beiden Flusskategorien (stabil, instabil) aber unterschiedlich: In instabilen Flüssen dominierte der mittlere Kies (8 - 16 mm) mit einem Anteil von 34 %. In stabilen Flüssen war das dominante Substrat hingegen der grobkörnige Kies (16 - 32 mm) mit einem Anteil von 37.8 %. Auf der Aufschüt-

tung war die dominante Substratkategorie für beide Flusskategorien der grobkörnige Kies (16 - 32 mm) mit Anteilen von 34.9 % respektive 40.8 %.

Abbildung 30 zeigt die Substratkategorienanteile für jeden Bereich der Laichgrubenareale für instabile und stabile Flüsse. Daraus wird ersichtlich, dass die häufigsten Substratklassen der mittlere und der grobkörniger Kies waren.

Die Balken der durchschnittlichen Anteile zeigen, dass im Vergleich zu den stabilen Flüssen in instabilen Flüssen die Substratkategorien Sand und Lehm (<2 mm), feiner Kies (2 - 8 mm) und mittlerer Kies (8 - 16 mm) häufiger vorkamen. Dagegen wurde in den Laichgrubenarealen von stabilen Flüssen ein deutlich höherer Anteil von sehr grobkörnigem Kies (32 - 64 mm) und kleinen Steinen (64 - 128 mm) festgestellt.

Wie bereits im Kapitel 3.1.1 bemerkt, war die Substratzusammensetzung in den Gruben geprägt von deutlich größerem Kies als in den anderen Bereichen des Laichgrubenareals. Dieser Unterschied in der Substratzusammensetzung der Laichgrube und dem Rest des Laichgrubenareals war in instabilen Flüssen deutlicher.

Der Übergangsbereich in instabilen Flüsse war im Vergleich zu stabilen Flüssen geprägt von höheren Anteilen an mittlerem Kies (34 % in instabilen Flüssen, 25 % in stabilen Flüssen). Stabile Flüsse wiesen aber höhere Anteile an sehr grobem Kies und kleinen Steinen auf.

Ähnliches konnte für die Substratzusammensetzung in den Aufschüttungen beobachtet werden. Instabile Flüsse hatten einen ca. 10 % höheren Anteil an mittlerem Kies als stabile Flüsse. Andererseits wurden in instabilen Flüssen kleinere Anteile für die Substratkategorien feiner Kies und sehr grobkörniger Kies gemessen.

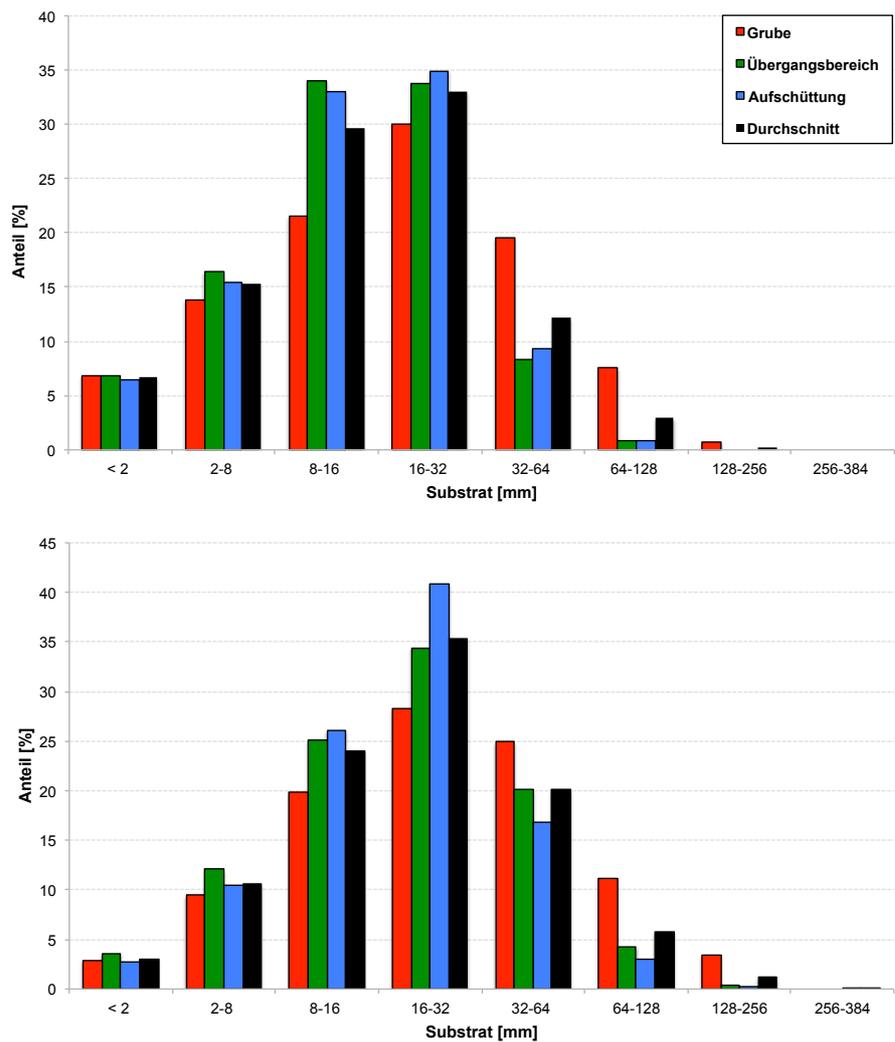


Abb. 30: Anteil der Substratklassen für die verschiedenen Bereiche der Laichgrubenareale für instabile (oben) und stabile Flüsse (unten).

Stabile Flüsse wiesen aber höhere Anteile an sehr grobem Kies und kleinen Steinen auf.

Ähnliches konnte für die Substratzusammensetzung in den Aufschüttungen beobachtet werden. Instabile Flüsse hatten einen ca. 10 % höheren Anteil an mittlerem Kies als stabile Flüsse. Andererseits wurden in instabilen Flüssen kleinere Anteile für die Substratkategorien feiner Kies und sehr grobkörniger Kies gemessen.

Eingrabungstiefe der Eier

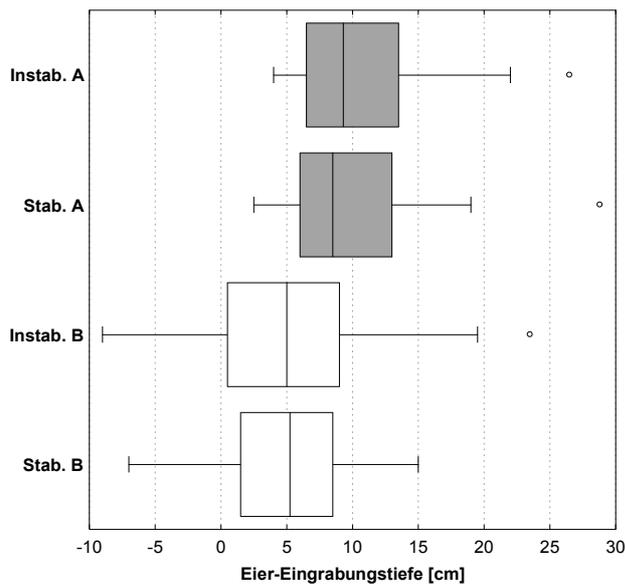


Abb. 31: Boxplots für die Eier-Eingrabungstiefen A (Grau) und B (Weiss) in instabile (Instab.) und stabile (Stab.) Flüsse.

(Tab. 5). Dies entspricht im Vergleich zum Durchschnitt aller Flüsse (5.2 cm) einer Differenz von +0.1 cm. In stabilen Flüssen variierten die Werte der Eier-Eingrabungstiefe B in einer engeren Spannweite (zwischen -7.0 cm und 15.0 cm). Die durchschnittliche Eingrabungstiefe lag bei 5.2 cm und entsprach damit dem durchschnittlichen Wert aller Flüsse. Boxplots für Eier-Eingrabungstiefe A zeigen rechtsschiefe Verteilung (Abb. 31).

In instabilen Flüssen schwankten die Werte der Eier-Eingrabungstiefe A zwischen 4.0 cm und 26.5 cm. (Tab. 5). Im Durchschnitt hatten die Bachforellen ihre Eier in einer Tiefe von 10.4 cm eingegraben. Dies entspricht im Vergleich zum Durchschnitt aller Flüsse (10.1 cm) einer Differenz von +0.3 cm. In stabilen Flüssen variierten die Werte der Eier-Eingrabungstiefe A zwischen 2.5 cm und 28.5 cm. Die durchschnittliche Eingrabungstiefe in stabilen Flüssen lag bei 9.6 cm. Dies entspricht im Vergleich zum Durchschnitt aller Flüsse einer Differenz von -0.5 cm.

In instabilen Flüssen betrug die Eier-Eingrabungstiefe B im Durchschnitt 5.3 cm

Mit Hilfe einer linearen Regression (der Form: $y = ax + b$) mit den Daten für die Eier-Eingrabungstiefe A und der Anzahl Tage mit Tagesmittelabfluss höher als der kritischer Abfluss $q_{c,d20\%}$ wurden Werte von -0.08 für a (V.I. 95 % [- 0.22; 0.07]) und 10.4 für b (V.I. 95 % [9.5 ; 11.4]) berechnet (Abb. 32). Das Bestimmtheitsmass R^2 betrug 0.006.

Bei der Regression mit Eier-Eingrabungstiefe B wurde für a ein Wert von -0.1 (V.I. 95 % [-0.27 ; 0.7]) und 5.7 für b (V.I. 95 % [4.6 ; 6.8]) berechnet.

Die Regression für die Eingrabungstiefe A (p-Wert=0.299) als auch diejenige für die Eingrabungstiefe B (p-Wert=0.234) waren nicht signifikant.

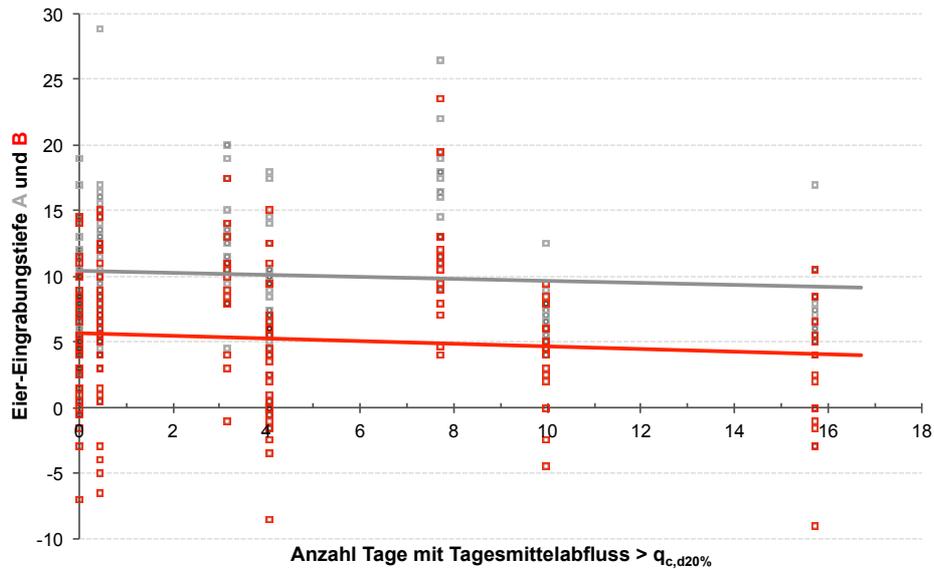


Abb. 32: Lineare Regression zwischen der Eier-Eingrabungstiefe (A schwarz, B rot) und der Anzahl Tage mit Tagesmittelabfluss höher als der kritische Abfluss $q_{c,d20\%}$.

Aus der linearen Regression (Form: $y = ax + b$) mit den Daten für die Eier-Eingrabungstiefe A und dem kritischen Abfluss $q_{c,d20\%}$ liessen sich Werte von -0.002 für a (V.I. 95 % [- 0.11; 0.10]) und 10.1 für b (V.I. 95 % [9.0 ; 11.2]) errechnen (Abb. 33). Das Bestimmtheitsmass R^2 betrug 0. Das Modell hatte deswegen auch keine statistische Relevanz (p -Wert $_{0,05} = 0.975$).

Bei der Regression mit der Eier-Eingrabungstiefe B liess sich für a ein Wert von -0.066 (V.I. 95 % [- 0.05 ; 0.19]) und für b ein Wert von 4.7 (V.I. 95 % [3.5 ; 5.9]) errechnen. Das Bestimmtheitsmass R^2 betrug 0.007. Mit ein p -Wert $_{0,05}$ von 0.27 war die lineare Regressionen statistisch nicht signifikant.

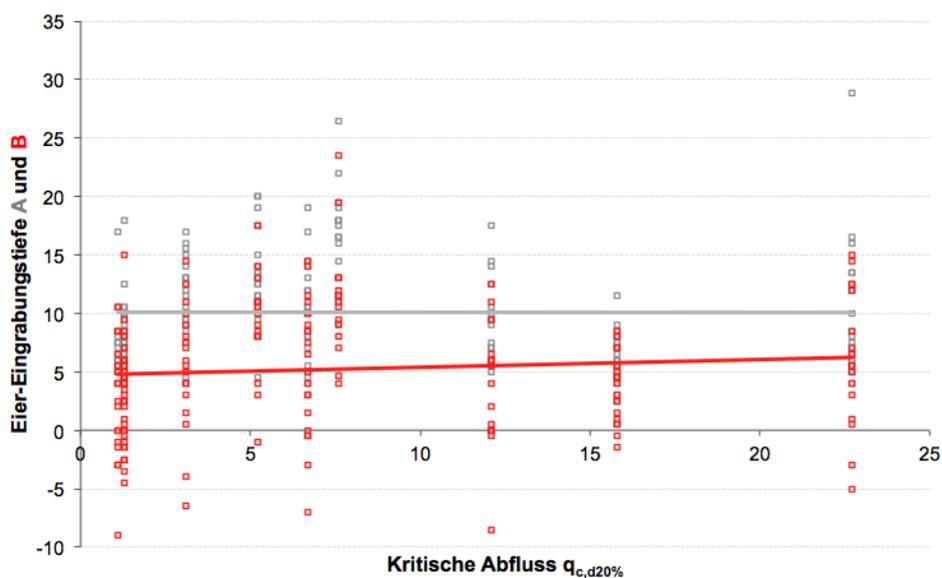


Abb. 33: Lineare Regression zwischen der Eier-Eingrabungstiefe (A schwarz, B rot) und dem kritische Abfluss $q_{c,d20\%}$.

3.3.4 Statistische Analysen für den Vergleich zwischen instabilen und stabilen Flüssen

Aus dem statistischen Test (MANOVA mit Kontrasten für instabile und stabile Flüsse) ergab sich, dass für alle untersuchten Messgrößen, ausser für die Wassertiefe bei der Aufschüttung ($p\text{-Wert}_{0.05} = 0.57$), die Wassertiefe hinten den Laichgrubenarealen ($p\text{-Wert}_{0.05} = 0.43$), die Eier-Eingrabungstiefe A ($p\text{-Wert}_{0.05} = 0.13$) und die Eier-Eingrabungstiefe B ($p\text{-Wert}_{0.05} = 0.79$), signifikante Unterschiede bestehen ($p\text{-Wert}_{0.05}$ nach Pillai-Spur < 0.005).

Eine zusätzliche MANOVA für die Eier-Eingrabungstiefe zeigte zudem, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen instabilen und stabilen Flüssen festgestellt werden konnten ($p\text{-Wert}_{0.05}$ nach Pillai-Spur für den multivariaten Test = 0.12; $p\text{-Wert}_{0.05}$ Eingrabungstiefe A = 0.099; $p\text{-Wert}_{0.05}$ Eingrabungstiefe B = 0.735).

4 Diskussion

4.1 Diskussion der Methoden

4.1.1 Wahl der Flüsse

Es wurden nur Flüsse ausgewählt, die eine Abflussmessstelle in der Nähe der potentiellen Untersuchungsstrecke hatte. Diese Anforderung schränkte die Anzahl möglicher Flüsse deutlich ein. Im Sinne einer guten und glaubwürdigen Auswertung der Daten war es unerlässlich, dass die Abflussmessstationen so nah wie möglich an den Untersuchungsstrecken lagen, oder dass der tatsächliche Abfluss wenigstens gut rekonstruiert werden konnte. Eine grosse Herausforderung war, hoch gelegenen Flussstrecken zu finden, die diese Anforderung erfüllten. Solche Flussstrecken mussten zudem auch eine gute Laichaktivität aufweisen.

4.1.2 Analyse der Laichgruben und Eingrabungstiefen der Eier

4.1.2.1 Messungen der charakteristischen Grösse der Laichgruben

Die Methode für die Bestimmung der Substratzusammensetzung enthält in sich eine gewisse Subjektivität. Die Bestimmung der Anteile der verschiedenen Substratklassen in den verschiedenen Laichgrubenarealpunkten (l, u und i in Abb. 4) ist eine Beobachter abhängige Schätzung. Da aber alle in dieser Arbeit verwendeten Substratzusammensetzungen vom selben Beobachter geschätzt wurden, sollten die Zahlen innerhalb dieser Studie untereinander vergleichbar sein.

4.1.2.2 Untersuchung der Eingrabungstiefe der Eier

In der vorliegenden Arbeit wurde die Eingrabungstiefe durch Ausgraben der Eier von Hand und/oder mit einer kleinen Schaufel bestimmt. Das ist die einfachste und am häufigsten verwendete Methode, um eingegrabene Fischeier aus dem Laichgrubenareal auszugraben (DeVries, 1997). Besonders die von Riedl & Peter (eingereicht) entwickelte Variante erlaubt eine genügend genaue Bestimmung der Eingrabungstiefe (man schätzt der Fehler auf 3 cm ab), trotz des Problems der Auswaschung von Substrat. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass Laichgruben die tiefer als 55-60 cm liegen, nicht untersucht werden können. Dieses Problem trat aber nur bei 6 (4 im Bereich von Kolken und 2 am Fusse von Kaskaden) der kartierten Laichgruben der Fall.

Grost *et al.* (1991) zeigten, dass die Eierpakete entlang der gesamten Länge des Laichgrubenareals liegen können. Am häufigsten sind sie aber in der vorderen Hälfte der Aufschüttung platziert. Die Stelle für die Messung der Eingrabungstiefe in dieser Arbeit wurde entsprechend dieser Erkenntnisse gewählt.

Länge der Weibchen vs. Eingrabungstiefe

Im Unterschied zu früheren Studien (Ottaway *et al.* 1981; Crisp & Carling, 1989) konnte die Länge der Weibchen nicht durch Elektrofischung bestimmt werden. Die in dieser Arbeit verwendete Abschätzung der Länge der Weibchen durch den Vergleich mit Gegenständen der Umgebung, sollte aber genügend genaue Resultate liefern. Der Fehler dieses Ansatzes wird auf ± 3 cm geschätzt. Für eine zuverlässige Abschätzung war eine möglichst exakte Beschreibung der Laichgrubenarealumgebung während der Kartierung von grosser Bedeutung.

4.1.3 Analyse der Laichgruben und Eingrabungstiefen der Eier in instabilen und stabilen Flüssen

4.1.3.1 Einteilung in instabile und stabile Flüsse

In der Literatur findet man mehrere Beispiele von Formeln zur Beschreibung der Geschiebepbewegung in Flüssen (Gomez & Church, 1989; Schwendel *et al.*, 2010). Für die Verwendung vieler dieser Formeln sind detaillierte Kenntnisse des Flussbetts und der hydrologischen Verhältnisse nötig (Lapointe *et al.*, 2000; Montgomery *et al.*, 1996; Schuett-Hames *et al.* 1999). Da solche Daten weder zur Verfügung standen noch generiert werden konnten, wurde der Ansatz von Badoux & Rickenmann (2008) (siehe auch Nitsche *et al.*, 2011) angewendet. Dieser erlaubt eine gute Schätzung des kritischen Abflusses bei Beginn des Geschiebetransportes. Die Anwendung dieses Modells bringt einen gewissen Fehler mit sich, wenn nur die Substratkorngrößen der Laichgrubenareale berücksichtigt werden. Nach einer entsprechenden Korrektur kann dieser Fehler aber weitgehend akzeptiert werden (siehe 2.3.1). Zudem sollte man nicht vergessen, dass die Flüsse so gewählt wurden, dass sie gewisse Voraussetzungen für Stabilität (z.B. Flüsse in hohen Lagen oder an Restwasserstrecken) respektive Instabilität (z.B. Flachlandflüsse, hochwasserunterliegende Flüsse) von Anfang an erfüllten. Die Kombination der beiden Beurteilungsmethoden ergibt eine gewisse Sicherheit für eine korrekte Einteilung der Flüsse.

Wegen Datenmangel konnte eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit von Geschiebepbewegungen während der Wintermonate anhand von Abfluss-Stundenwerte nicht gemacht werden.

4.2 Diskussion Resultate

4.2.1 Analyse der Laichgruben und Eingrabungstiefe der Eier

Die Resultate der vorliegenden Studie mit anderen Untersuchungen zu vergleichen, war nicht immer einfach. Die Arbeit die am besten als Vergleich mit der vorliegenden Studie dienen kann, ist diejenige von Riedl & Peter (eingereicht). Ein Problem beim Vergleich liegt bei der oft beschränkten Anzahl der untersuchten Laichgruben bei einigen Autoren. Daher können Unterschiede zwischen den Studien auch einfach durch unterschiedliche Aufnahmemethoden bedingt sein. In Tabelle 6 sind die Resultate von einigen Studien zusammengefasst. Weitere Beispiele sind in DeVries (1997) und Louhi *et al.* (2008) zu finden.

Tab. 6: Vergleich der Resultate mit andere Studien.

	Vorliegende Arbeit	Riedl & Peter (eingereicht)	Wollebæck <i>et al.</i> (2008)	Zimmer & Power (2006)	Beard & Carline (1991)	Grost <i>et al.</i> (1990)	Heggberget <i>et al.</i> (1988)	Shirvell & Dungey (1983)	Ottaway <i>et al.</i> (1981)
Laichgrubenareal-Planaufsicht									
Grube-Durchmesser [cm]	33.8 ± 13.8 (15.0 - 79.0)								(27-41)
Grube-Länge [cm]	34.0 ± 14.0 (16.0 - 86.0)		98 ± 45 (45 - 380)						(32 -54)
Aufschüttung-Länge [cm]	56.2 ± 29.5 (18.0 - 157)								(46 - 69)
Laichgrubenareal-Länge [cm]	90.3 ± 41.2 (38.0 - 235)	120 ± 40 (60 - 320)	206 ± 83 (100 - 615)	176.9		147 ± 42 (70 -259)			
Laichgrubenareal-Breite [cm]	42.5 ± 17.5 (15.5 - 107)	70 ± 20 (20 - 160)	101 ± 34 (45 - 235)	75.2					
Laichgrubenareal-Fläche [m ²]	0.35 ± 0.31 (0.05 - 1.97)	0.7 ± 0.5 (0.1 - 4.0)		1.15			4.7 ± 2.9		1.5
Laichgrubenareal-Längsschnitt									
Wassertiefe beim Originalsubstrat [cm]	22.4 ± 9.3 (6.0 - 44.0)			40.4		17 ± 5 (7 -30)	43.1 ± 17.1		
Wassertiefe bei der Grube [cm]	25.9 ± 9.4 (11.0 - 52.5)	30 ± 10 (10 -50)	109 ± 40 (30-218)		28 (20 - 41)	20 ± 5 (10 - 34)			
Wassertiefe beim Übergangsbereich [cm]	21.1 ± 8.5 (7.0 - 45.0)	20 ± 10 (10 -40)				11 ± 5 (3- 25)			
Wassertiefe bei der Aufschüttung [cm]	17.6 ± 8.0 (5.0 - 41.0)	20 ± 10 (10 -50)						31.0 ± 14.4 (6.0 - 82.0)	
Wassertiefe hinter dem Laichgrubenareal [cm]	20.8 ± 8.2 (4.0 - 45.0)								
Fliessgeschwindigkeit über Flusssohle									
Vor der Laichgrube [m/s]	0.28 ± 0.13 (0.02 - 0.67)		0.29 ± 0.20 (0.0- 0.82)	0.34		0.22 ± 0.11 (0.05 - 0.61)			(0.22 - 0.38)
Grube [m/s]	0.21 ± 0.11 (0.01 - 0.66)	0.20 ± 0.1 (0 - 0.50)			0.17 (0.07 - 0.39)	0.13 ± 0.09 (0.00 - 0.44)			
Übergangsbereich [m/s]	0.30 ± 0.14 (0.01 -0.68)	0.40 ± 0.1 (0.20 - 0.70)							
Aufschüttung [m/s]	0.35 ± 0.16 (0.01 - 0.86)	0.40 ± 0.1 (0.20 - 0.70)				0.39 ± 0.14 (0.09 - 0.73)		0.39 ± 0.11 (0.15 -0.75)	(0.31 - 0.42)
Dominante Substratkategorie									
Grube	16 - 32 mm (29.1 %)	48 ± 38 mm	80 ± 40 mm						
Übergangsbereich	16 - 32 mm (33.7 %)	25 ± 20 mm							
Aufschüttung	16 - 32 mm (37.5 %)	20 ± 21 mm	40 ± 20 mm						
Durchschnitt	16 - 32 mm			60 ± 19 mm	12 -32 mm	26 - 75 mm (60 %)	66 ± 19 mm	14 ± 6 mm	

4.2.1.1 Messungen der charakteristischen Grösse der Laichgruben

Laichgrubenareal Planaufsicht

Angaben zu den Messgrößen der Planaufsicht der Laichgrubenareale konnten nur vereinzelt gefunden werden. Wo immer ein Vergleich mit Messgrößen der Planaufsicht möglich war (z B. Riedl & Peter, eingereicht; Wollebæck *et al.*, 2008 und Ottaway *et al.*, 1981), zeigte sich, dass die Werte der vorliegenden Arbeit meist kleiner waren (Tab. 6). Die untersuchten Laichgrubenareale waren kürzer und weniger breit als frühere Studien (Riedl & Peter, eingereicht; Wollebæck *et al.*, 2008 und

Grost *et al.*, 1990). Zudem waren die Laichgruben kürzer als in anderen Studien (Wollebæck *et al.*, 2008 und Ottaway *et al.*, 1981). Einzig für den Laichgruben-Durchmesser und die Aufschüttungslänge fanden Ottaway *et al.* (1981) ähnliche Werte.

Armstrong *et al.* (2003) zeigten, dass die Resultate häufig von Fluss zu Fluss variieren (was hier als „Flusseffekt“ bezeichnet wird). Wie die Resultate aus Kapitel 3.2 zeigten, konnte dieser „Flusseffekt“ auch in dieser Studie festgestellt werden. Daher scheint es plausibel, dass zumindest ein Teil der Unterschiede zu anderen Studien durch Unterschiede der untersuchten Flusssysteme erklärt werden können. Zudem dürften die Grössen der Weibchen einen massgeblichen Einfluss auf die Grössen der Laichgrubenareale gehabt haben (siehe z.B. Crisp & Carling, 1989 und Ottaway *et al.*, 1981).

Wassertiefe

Die Resultaten über alle Messbereiche zeigten eine durchschnittliche Wassertiefe von 21.6 cm. Das typische „Wellenmuster“ des Querschnitts eines Laichgrubenareals (wie in Abb. 4 abgebildet) war auch für Laichgrubenareale dieser Arbeit sichtbar. Die Messungen **c**, **d**, **e**, **f** und **g** (Abb. 4) zeigten dieses besondere Muster deutlich. Für einen Vergleich mit anderen Studien muss berücksichtigt werden, an welchem Punkt des Laichgrubenareals die Tiefe gemessen worden ist.

Die einzige Studie die einen direkten Vergleich mit den Tiefenmessungen für die drei Punkte in Laichgrubenareal (Grube, Übergangsbereich und Aufschüttung) ermöglicht, ist diejenige von Riedl & Peter (eingereicht). Dort wurden mittlere Werte für die Wassertiefe von 30 cm (± 10 cm) in der Laichgrube und je 20 cm (± 10 cm) für den Übergangsbereich und die Aufschüttung gefunden. Diese Daten stimmen gut mit jenen der vorliegenden Arbeit überein. Wegen der methodisch unterschiedlichen Datenerfassung ist der folgende Vergleich mit anderen Studien mit Vorsicht zu genießen. Die Wassertiefen dieser Arbeit lagen im Bereich von dem was Ottaway *et al.* (1981), Witzel & MacCrimmon (1983) und Grost *et al.* (1990) gefunden haben. Arbeiten von Wollebæck *et al.* (2008), Heggberget *et al.* (1988) und Shirvell & Dungey (1983) beispielsweise fanden aber bedeutend höhere Werte für die Wassertiefen. In Louhi *et al.* (2008) und in Riedl & Peter (eingereicht) sind weitere Beispiele aufgeführt, von denen einige in die Tabelle 6 mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen wurden. Besonders der Review von Louhi *et al.* (2008), wo die Daten für grosse (mittlerer Abfluss > 10 m³/s) und kleine Flüsse separat (mittlerer Abfluss < 10 m³/s) aufgelistet sind, verdeutlicht, dass gemessene Wassertiefen über den Laichgrubenarealen durch verschiedene Parameter eines Flusses beeinflusst werden: Die Wassertiefen können durch die Grösse eines Flusses, seine hydromorphologischen Charakteristiken und den momentanen Abflusszustand (Riedl & Peter, eingereicht; Louhi *et al.*, 2008) beeinflusst werden.

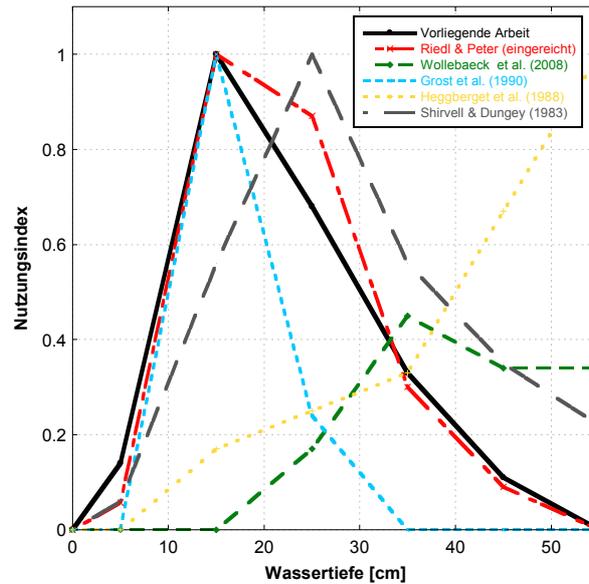


Abb. 34: Vergleich der in verschiedenen Studien festgestellten durchschnittlichen Wassertiefen über Laichgrubenarealen. Der Nutzungsindex gibt an, wie häufig eine Tiefe festgestellt wurde. Der Wert 1 entspricht dabei der am häufigsten gemessenen Wassertiefe.

Der Vergleich der Nutzungskurven der Wassertiefen aus verschiedenen Studien (Abb. 34) zeigt zudem einen gewissen Unterschied zwischen den ausgewählten Studien auf. Zu bemerken ist, dass die Nutzungskurven der vorliegenden Arbeit einen praktisch identischen Verlauf haben wie jene von Riedl & Peter (eingereicht). Eine mögliche Erklärung dafür könnte die geographische Nähe der untersuchten Flüsse (alle aus der Schweiz) und die damit verbundene hydromorphologische Ähnlichkeit der Flüsse sein. Zudem können auch die Grössen der laichenden Weibchen einen wichtigen Einfluss auf die festgestellten Wassertiefen haben (Ottaway *et al.*, 1981; Morbey & Hendry, 2008). Dieser Aspekt könnte im Besonderen die Unterschiede zu den Studien von Wollebæck *et al.* (2008) und Heggberget *et al.* (1988) erklären: Im Gegensatz zu der vorliegenden Arbeit untersuchten diese beiden Studien ausschliesslich Laichgrubenareale von grossen Bachforellen (>35 cm).

Fliessgeschwindigkeit

In allen untersuchten Flüssen widerspiegeln die Werte der Fliessgeschwindigkeiten die typisch wellenartige Oberfläche der Laichgrubenarealquerschnitte. (Tonina & Buffington, 2009; Burner, 1951). Die Fliessgeschwindigkeit nimmt in der Laichgrube ab, um dann im Übergangsbereich und über der Aufschüttung wieder zuzunehmen. Solche Unterschiede beweisen, dass die Bachforellen die Fliessbedingungen der Laichplatzumgebung aktiv verändern. Die veränderten, lokalen Fliessmuster begünstigen die Zufuhr von Sauerstoff zu den eingegrabenen Eierpaketen unter der Aufschüttung (Reiser & Wesche, 1977; Tonina & Buffington, 2009).

Mit diesen Überlegungen können auch die unterschiedlichen Verläufe der Nutzungskurven in Abb. 35 erklärt werden.

Ein Vergleich mit anderen Studien war aber nicht immer möglich, da oft die mittlere Fließgeschwindigkeit anstatt der Fließgeschwindigkeit über der Flusssohle gemessen wurde. In Tab 6 sind ausschliesslich Studien aufgeführt, welche die Fließgeschwindigkeit über der Flusssohle gemessen haben. Weitere Beispiele können im Review von Louhi *et al.* (2008) oder in der Arbeit von Riedl & Peter (eingereicht) gefunden werden.

Die Daten der vorliegenden Arbeit sind auch im Falle der Fließgeschwindigkeiten ähnlich wie die Werte aus der Studie von Riedl & Peter (eingereicht). Es fällt auch auf, dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Studien allgemein weniger ausgeprägt sind, als für andere Charakteristika der Laichgrubenareale (z.B. Messgrößen der Planaufsicht, Wassertiefen) (Abb. 35).

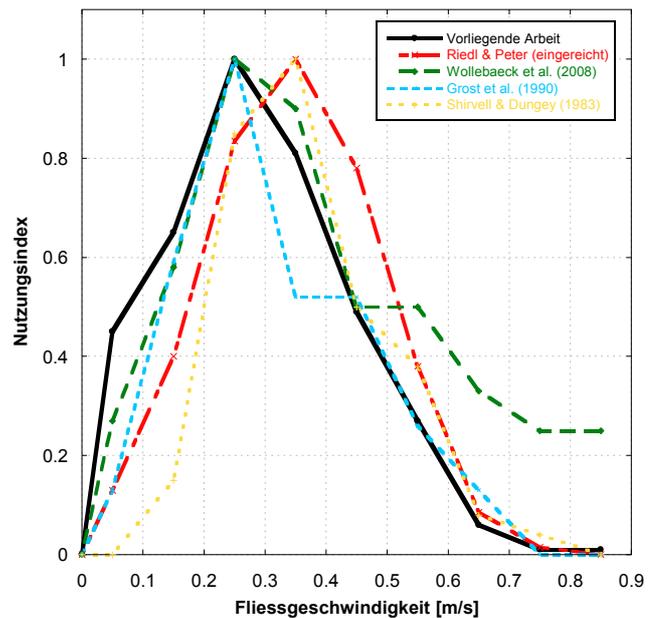


Abb. 35: Vergleich der durchschnittliche Nutzung der Fließgeschwindigkeit mit andere Studien.

Substratzusammensetzung

Die Suche der Laichgrubenareale während der Kartierungen ist im Allgemeinen nicht schwierig gewesen. Grund dafür war die einfache Vorhersehbarkeit der benötigten Substratkorngrösse. Die erhobene Daten bestätigen, dass die am meisten verwendeten Substratkorngrößen mittlerer (8 - 16 mm) und grobkörnigerer (16 - 32 mm) Kies waren. Dass die Weibchen ihre Laichgruben gezielt in Substrat einer gewissen Korngrösse schlagen, konnte im Vedeggio gut beobachtet werden: Das Flussbett des Vedeggios besteht hauptsächlich aus sehr grobkörniges Kies oder noch größerem Substrat (> 32 - 64 mm). Die kartierten Laichgrubenareale wurden aber in den wenigen Stellen gefunden, wo feineres Substrat vorhanden war.

In mehrere Studien wird die Substratkorngrösse im Laichgrubenareal mit der Grösse der laichenden Fischen in Beziehung gesetzt (z.B. Crisp & Carling, 1989; Kondolf & Wolman, 1993; Armstrong *et al.*, 2003). In dieser Studie wurden Laichgrubenareale von Fischen mit Längen von ca. 18 bis 45 cm untersucht. Der Bereich der verwendeten Korngrößen stimmte mit jenen der Fischlängen gemäss der Untersuchung von Kondolf & Wolman (1993) überein.

Der resultierende Substratnutzungsbereich der vorliegenden Arbeit (2 - 128 mm) überlagert sich mit dem von Armstrong *et al.* (2003) vorgeschlagenen Bereich (8 - 128 mm). In diesem Bereich liegen auch die Substratwerte von andere Studien, wie z.B. Riedl & Peter (eingereicht), Wollebäck *et al.* (2008), Zimmer & Power (2006), Beard & Carline (1991), Grost *et al.* (1990) und Heggberget *et al.* (1988). Die dominanten Substratkorngrößen unterscheiden sich in diesen Studien aber stark. Ein

Vergleich ist nicht immer einfach da die Methoden der Datenaufnahme und die gemessenen Stellen auf dem Laichgrubenareal zwischen verschiedenen Studien oft unterschiedlich sind. Im Vergleich mit der vorliegenden Studie weisen die Studien von Ottaway *et al.* (1981), Heggberget *et al.* (1988) und Wollebæck *et al.* (2008) aber deutlich grössere dominante Substratkorngrössen auf. Dagegen sind die Werte in Studien von Shirvell & Dungey (1983), Witzel & MacCrimmon (1983), Beard & Carline (1991) und Riedl & Peter (eingereicht) ähnlich zu den Werten der vorliegenden Untersuchung.

4.2.1.2 Untersuchung der Eingrabungstiefe der Eier

Der Vergleich der vorliegende Arbeit mit jene von Riedl & Peter (eingereicht) zeigt im Durchschnitt eine Differenz von 4.3 cm für die Eingrabungstiefe A und eine Differenz von 1.4 cm für die Eingrabungstiefe B. Angesichts des geschätzten Fehlers von ± 3 cm bei den Messungen und der rechtschiefen Verteilung der Daten der Eingrabungstiefe A (Abb. 22) können diese Differenzen als klein eingestuft werden. Wenn man nur die alpinen Flüsse der vorliegenden Studie berücksichtigt (Inn, Vorderrhein, Waldmme, Ticino und Vedeggio), bleiben die Differenzen praktisch unverändert (4.1 cm für EETA respektive 0.85 cm für EETB).

Im Vergleich mit anderen Studien war der Mittelwert (10.1 cm) und die Spannweite der EETA (2.5 - 28.5) ähnlich zu den Untersuchungen von Ottaway *et al.* (1981) (9, 7-14 cm)⁸, Grost *et al.* (1991) (12, 2-23 cm; 11, 2-20 cm)⁹, Heggberget *et al.* (1988) (12 cm)¹⁰, Reiser & Wesche (1977) (9 und 12 cm). Dagegen zeigen die Studien von Hardy (1963) (16, 10-20 cm) und Witzel & MacCrimmon (1983) (>14 cm) höhere Werte. Die Resultate der vorliegenden Arbeit liegen genau im Bereich der von DeVries (1997) vorgeschlagenen Werte für die Eier-Eingrabungstiefe A.

Der Vergleich der Resultate der Eier-Eingrabungstiefe B hebt Unterschiede in den Spannweiten der Eingrabungstiefe hervor: Erstens, in den fünf zitierten Studien in DeVries (1997) wurden nie negative Werte festgestellt. Negative Werte bedeuten, dass am Ende des Vorganges die Eier über dem Niveau des ursprünglichen Substrats vor dem Laichgrubenareal liegen. Zweitens, die gefundenen Mittelwerte und Spannweiten in anderen Studien, ausser zum Teil Resultate von Jones & Balle (1954) (Mittelwert von 8 cm), weisen höhere Werte auf (Mittelwerte von 15 bis 25 cm). In der vorliegenden Arbeit lag der Mittelwert (ohne negative Fälle) bei 6.7 cm und die Spannweite der Eingrabungstiefe B (ohne negative Fälle) bei 0-23 cm.

Werden die Resultate und Differenzen der Eingrabungstiefe der Eier mit Werten anderer Salmoniden verglichen, merkt man, dass die Unterschiede zwischen den Studien über Bachforellen doch

⁸ Eier-Eingrabungstiefe gemessen in untere Teil der Eierpakete.

⁹ Eier-Eingrabungstiefe gemessen in untere Teil der Eierpakete.

¹⁰ Eier-Eingrabungstiefe gemessen in der Mitte der Eierpakete.

recht klein sind (im Vergleich zu anderen Arten). Königslachs (*Oncorhynchus tshawytscha*) und Silberlachs (*Oncorhynchus kisutch*) graben ihre Eier beispielsweise deutlich tiefer ein (ca. 10 cm tiefer als Bachforellen) (DeVries, 1997). Der Bachforelle (*Salmo trutta fario*) systematisch nähere Arten, wie der Atlantische Lachs (*Salmo salar*) oder die Meerforelle (*Salmo trutta trutta*), graben ihre Eier im Durchschnitt ebenfalls 10 cm tiefer ein als die Bachforellen (z.B. Crisp & Carling, 1989). Das verdeutlicht, dass die grossen Unterschiede für die Eingrabungstiefen zwischen den verschiedenen Fischarten und nicht innerhalb der einzelnen Fischarten zu finden sind.

Länge der Weibchen vs. Eingrabungstiefe der Eier

Es zeigte sich, dass die Länge der Weibchen und die Eingrabungstiefe der Eier nicht deutlich korreliert sind, was mit den Ergebnissen von Elliott (1984) übereinstimmt. Immerhin, mindestens für den Ticino Fluss war ein leichter Trend zu beobachten. In Gegensatz zu Ottaway *et al.* (1981), in dieser Arbeit konnte die Hypothese, dass grössere Fische ihre Eier tiefer eingraben nicht bestätigt werden. Das Hauptproblem bei dieser Analyse war, dass für beide Flüsse (Ticino und Laveggio) wenige Datenpaare zu Verfügung standen. Ein weiteres Problem könnte die kleine Spannweite in der Länge der untersuchten Fische gewesen sein. Nur im Fluss Ticino konnte ein grosses Exemplar (>35 cm) einer laichenden Bachforellen beobachtet werden.

Auch wenn noch nicht ganz eindeutig, deuten doch etliche Studien darauf hin, dass die Grösse der Weibchen einen Einfluss auf die Eingrabungstiefe zu haben scheint (Steen & Quinn, 1999; DeVries, 1997; Crisp & Carling, 1989; Ottawai *et al.*, 1981). Auch Resultate aus Studie wie die von Wollebæck *et al.* (2008), welche nur grosse Bachforellen untersuchten, deuten darauf hin, dass es zwischen der Grösse der Weibchen und der Eingrabungstiefe einen Zusammenhang gibt.

Die von Crisp (1996) (zitiert in Armstrong, 2003) vermerkte Formel für die Einschätzung der Eingrabungstiefe anhand der Länge der Weibchen ergab plausible Resultate für beide Flüsse (Ticino und Laveggio). Mit durchschnittlichen Fehlern von lediglich 1.9 cm für den Fluss Ticino respektive 0.6 cm für den Laveggio, kann man durchaus sagen, dass der Ansatz von Crisp eine gute Einschätzung darstellt.

Vorhersehbarkeit der Eingrabungstiefe der Eier durch Messung der Laichgrubentiefe

Die Wassertiefe bei der Grube hat sich als eine geeignete Variable erwiesen, um die Eingrabungstiefe der Eier vorauszusagen. Diese Erkenntnis steht im Widerspruch zu den Schlussfolgerungen die Crisp & Carling (1989) zogen. Die in dieser Arbeit berechnete Funktion konnte verwendet werden, um die Eingrabungstiefen in den untersuchten Flüssen zu schätzen. Mit diese Funktion sowie Messungen der Wassertiefe auf der Aufschüttung und über dem ursprünglichen Substratniveau konnten die Eingrabungstiefen A und B gut geschätzt werden.

Bachforellen legen ihre Eierpakete typischerweise in einer Sequenz von Laichgruben (diese bilden dann das Laichgrubenareal) ab (Chapman, 1988; Tonina & Buffington, 2009). Da die Grube, welche

die Eier enthält mit dem Substrat der nächsten, flussaufwärtsgelegenen Grube bedeckt wird, ist zu erwarten, dass es eine Korrelation zwischen der Eingrabungstiefe der Eier und der Tiefe der Laichgrube gibt.

4.2.2 Analyse der Laichgruben und Eingrabungstiefen der Eier in instabilen und stabilen Flüssen

4.2.2.1 Einteilung in instabile und stabile Flüsse

Die Berechnung der „Deckschichtaufbruchs-Wahrscheinlichkeit“ und der „Anzahl Tage mit Tagesmittel höher als die kritische Abflussmenge“ (Tab. 4) basieren auf Daten aus sechs Jahren. Diese Messgrößen ändern sich ständig in Abhängigkeit des jährlichen Abflussverlaufs. Da der jährliche Abflussverlauf klimatisch bedingt ist, ist nicht auszuschliessen, dass die in dieser Studie gemachte Einteilung in Zukunft nicht mehr gültig sein wird (siehe auch 1.2.1).

Die Einteilung in instabile Flüsse anhand der in Kapitel 2.3.1 definierten Kriterien entsprach mehrheitlich den Erwartungen (Flachlandflüsse und nicht an Restwasserstrecken = instabil), aufgrund welcher die Flüsse ausgewählt wurden. Überraschend war hingegen die Einteilung des Vedeggio in die Klasse der instabilen Flüsse. Ursprünglich war dieser Fluss ausgewählt worden, da er in hoher Lage lag und Bergbachcharakteristika aufwies. Es wurde vermutet, dass der Vedeggio deshalb winterstabil sein könnte. Diese Vermutung entpuppte sich als falsch – der Vedeggio erwies sich als der instabilste Fluss gemäss den hier angewendeten Kriterien.

Waldemme und der Vorderrhein zeigten eine extrem hohe Stabilität (Deckschichtaufbruch-Wahrscheinlichkeit über sechs Winterperioden gleich null). Bemerkenswert sind auch die Resultate zum Inn und zum Ticino. Die beiden Flüsse weisen eine Deckschichtaufbruch-Wahrscheinlichkeit über sechs Winterperioden von 0.3 auf, was pro Winter etwa einem halben Tagen mit Tagesmittel über der kritischen Abflussmenge entspricht. Das entspricht über sechs Winterperioden 2.7 „kritischen“ Tagen. Die Möglichkeit, dass diese 2.7 Tage alle während eines einzigen Hochwasserereignisses in einem Jahr, und nicht jedes Jahr an nur einem halben Tag, auftreten scheint relativ gross. Das würde bedeuten, dass während einer Fischgeneration nur 1 bis 2 Mal einen solchen Ereignis stattfinden würde, also ein eher seltener Ereignis. Trotz einer geringen Deckschichtaufbruch-Wahrscheinlichkeit von 0.3 wurden diese beiden Flüsse als stabil betrachtet.

4.2.2.2 Vergleich der Charakteristika der Laichgruben und der Eingrabungstiefen der Eier zwischen instabilen und stabilen Flüssen

Laichgrubenareal Planaufsicht

Die vergleichsweise kleinen Werte für die Messgrößen der Planaufsicht der Laichgrubenareale können allenfalls durch drei potentielle Faktoren erklärt werden:

Erstens könnte die Beziehung zwischen der Grösse der laichenden Weibchen und der Grösse des Laichgrubenareals (Ottaway *et al.* 1981, Crisp & Carling, 1989) einen Einfluss gehabt haben. Für Studien mit vergleichsweise kleinen Fischen würde man daher auch kleinere Laichgrubenareale erwarten. Tatsächlich waren die untersuchten Fische dieser Studie eher klein (ca. 18-40 cm) im Vergleich zu anderen Studien (z.B. Wollebæck *et al.*, 2008).

Zweitens kann die Fliessgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Grösse des Laichgrubenareals haben, indem die Substratpartikel bei schnellerer Strömung weiter stromabwärts in den hinteren Teil der Laichgrube gedriftet werden können (Burner, 1951). Dass höhere Fliessgeschwindigkeiten mit grösseren Laichgrubenarealen assoziiert waren, konnte in dieser Arbeit aber nicht beobachtet werden.

Die Verfügbarkeit von geeigneten Laichplätzen (und damit die Charakteristika des Flussbettes) könnte als dritter Faktor zu den kleinen Werten geführt haben. Tatsächlich konnte in dieser Arbeit beobachtet werden, dass die Laichgruben in drei der vier stabilen Flüsse (Waldemme, Vorderrhein und Ticino) mehrheitlich kurz waren und zudem auf die wenigen geeigneten Stellen im Fluss (hauptsächlich Substrat-bedingt) eingeschränkt waren.

Wassertiefe

Die von Bachforellen in stabilen und instabilen Flüssen unterschiedlich verwendeten Wassertiefen können durch die Flusscharakteristika (Grösse des Flusses, dem Querschnitt des Flussbettes, usw.), die Hydromorphologie des Flusses und durch dem aktuellen Flusswasserpegel bei der Messung erklärt werden (DeVries, 1997).

Fliessgeschwindigkeit

Dieselben Annahmen wie oben für die Wassertiefe gemacht wurden, gelten auch für die Fliessgeschwindigkeit. Die Fliessgeschwindigkeit des Wassers ist unter anderem durch den Abfluss bedingt (DeVries, 2008). Die statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den erhaltenen Werten für die beiden Flussgruppen, können möglicherweise durch die Flusscharakteristika und die Hydromorphologie des Flusses erklärt werden.

Die Neigung der Bachforellen in instabilen Flüssen Stellen zu benutzen, wo die Fliessgeschwindigkeit niedriger ist, ist ein Hinweis darauf, dass Forellen ihr Verhalten in instabilen Flüssen anpassen. Möglicherweise suchen die Bachforellen gezielt Stellen auf, die auch bei erhöhtem Abfluss eine nicht all zu hohe Fliessgeschwindigkeit aufweisen.

Substratzusammensetzung

Auch beim Vergleich der Substratzusammensetzung zwischen stabilen und instabilen Flüssen können die Unterschiede durch den Flusstyp („Flusseffekt“) erklärt werden. Die vier stabilen Flüsse besitzen Bergflusscharakter der alpinen und prealpinen Region. Tatsächlich ähnelt die Substratzusammensetzung der stabilen Flüsse den Resultaten von Riedl & Peter (eingereicht) mehr, als dies für die instabilen Flüsse der Fall ist. Riedl & Peter (eingereicht) untersuchten ausschliesslich Laichgrubenareale in alpinen Flüssen.

Der erhöhte Anteil von kleineren Substratkategorien in Laichgrubenarealen aus instabilen Flüssen ist wahrscheinlich eine Folge der besseren Verfügbarkeit dieser Substratkategorien. Dagegen sind die hohen Anteile an grobkörnigem Kies und kleinen Steinen in Laichgrubenarealen aus stabilen Flüssen möglicherweise auf Mangel an kleineren Substratkategorien zurück zu führen. Es scheint also, dass Bachforellen das jeweils geeignetste Substrat zur Ablage der Eier auswählen. In Flüssen wo Mangel an idealem Substrat herrscht, weichen die Weibchen auf die nächst beste Kategorie aus. Weiter zu bemerken ist, dass im Vergleich mit der Studie von Riedl & Peter (eingereicht) ein deutlich geringerer Anteil von Sand und Lehm auf den Laichgrubenarealen gefunden wurde. Der einzige Fluss, der vergleichbare Werte mit der Studie von Riedl & Peter (eingereicht) aufwies, war der Lavaggio (durchschnittlicher Anteil von Sand und Lehm = 11.2 %).

Eingrabungstiefe der Eier

Die Resultate dieser Arbeit sprechen gegen die Hypothese, dass die Fische, die in instabilen Flüssen leben, entsprechend adaptiert sind und deswegen ihre Eier tiefer eingraben (Montgomery *et al.* 1996): Die statistischen Analysen zeigten, dass es keine Korrelation zwischen der Winterinstabilität der Flüsse und der Eingrabungstiefe der Eier gibt. Zudem konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Eingrabungstiefe der Eier und der Deckschichtaufbruchs-Wahrscheinlichkeit gefunden werden (siehe Kapitel 3.2.2). Im Fall von Adaptation der Forellen würde man einen positiven Zusammenhang zwischen der Eingrabungstiefe der Eier und der Bewegungswahrscheinlichkeit des Substrates erwarten. Die Resultate zeigten aber, dass das Gegenteil – ein negativer Zusammenhang (nicht signifikant) – der Fall war (Abb. 32).

Eine mögliche Erklärung dafür könnte eine Abwägung (auf englisch: *Trade-off*) zwischen Schutz vor Auswaschung bei Hochwasserereignissen und gutem interstitiellem Wasserfluss sein. Tief eingegrabene Eier würden demnach weniger leicht durch Hochwasser ausgewaschen. Andererseits wäre der interstitielle Wasserfluss in tieferen Schichten reduziert was eine reduziertere Sauerstoffversorgung der Eierpaketen zur Folge haben kann (Morbey & Hendry, 2008; Peterson & Quinn, 1996). Eine weitere Abwägung, welche die Eingrabungstiefe betrifft, könnte mit der Emergenz der Brütlinge zusammenhängen: Je tiefer die Eier eingegraben sind, desto schwieriger wird das Austreten der Brütlingen aus dem Substrat, was zu erhöhter Mortalität führen kann (Morbey & Hendry, 2008). Solche Abwägungen könnten erklären, warum Forellen aus instabilen Flüssen ihre Eier nicht tiefer eingraben. Für schlüssige Antworten sind aber weitere Untersuchungen unabdingbar.

Aus solchen Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass für die Eier-Eingrabungstiefe die Instabilität eines Flusses nicht Bestandteil des sogenannten „Flusseffektes“ ist, welcher im Kapitel 4.2.1 festgestellt wurde.

Die fehlende Korrelation zwischen der Eingrabungstiefe der Eier und dem kritischen Abfluss ($q_{c,d20\%}$) könnte ein Hinweis sein, dass auch die Abflusscharakteristika eines Flusses keinen relevanten Einfluss auf der Eingrabungstiefe der Eier haben. Eine Studie von Montgomery *et al.* (1996) hat aber gezeigt, dass für den Hundslachs (*Onchorhynchus keta*) ein enger Zusammenhang zwischen Eier-Eingrabungstiefe und Erosionstiefe bei Geschiebebewegungsereignissen besteht. Das wäre ein Hinweis darauf, dass sich die Fischen an ein hydrologische Regime anpassen können. Andererseits haben Spina (2001) und Unfer *et al.* (2011) eine inverse Beziehung zwischen Fischabundanz in Frühling und Winterabflussspitze festgestellt. Schuett-Hames *et al.* (1999) identifizierten als Hauptfaktor für das Überleben von Salmonidenpopulationen die Zerstörung der Laichgruben durch Geschiebebewegung. Solche Studien sind Hinweise darauf, dass sich Fischpopulationen betreffend Eingrabungstiefe der Eier nicht an das hydrologische Regime ihres Flusses anpassen. Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Analysen unterstützen diese letzten Betrachtungen. Anpassungen an ein hydrologisches Regime scheinen eher durch eine zeitliche Verschiebung der Laichaktivität als durch eine Veränderung der Eingrabungstiefe zu geschehen (Gortázar *et al.* 2007; Beechie *et al.* 2008).

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die gesammelten Daten bilden, zusammen mit denen von Riedl & Peter (eingereicht), eine umfassende Beschreibung der Umweltfaktoren welche Bachforellen in der Schweiz zur Fortpflanzung benötigen. Überdies erweitern die Daten die Kenntnisse über der Tiefe in welcher verschiedene Bachforellenpopulationen der Schweiz ihre Eier eingraben.

Für die Eingrabungstiefe der Eier wurden unterschiedliche Werte für die verschiedenen Flüsse festgestellt. Die Existenz eines sogenannten „Flusseffektes“ wurde festgestellt. Dieser führt von Fluss zu Fluss zu unterschiedlichen Eier-Eingrabungstiefen. Die Ursachen dieser Unterschiede sind weitgehend unbekannt und auch in der Literatur bleibt die Diskussion offen (DeVries, 1997), da die verschiedenen Studien auf diesem Thema widersprüchliche Resultate liefern.

Aufgrund dieser Resultate kann die Nullhypothese H1 verworfen werden.

Die Hypothese des Einflusses der Körperlänge der Weibchen auf die Eingrabungstiefe der Eier, getestet an den zwei Flüssen Ticino und Laveggio, konnte keinen signifikanten Zusammenhang aufzeigen. In beiden Fällen wurde festgestellt, dass die Eingrabungstiefe nicht von der Grösse der laichenden Weibchen abhängt.

Aufgrund dieser Resultate wird die Nullhypothese H2 nicht verworfen.

Gleichzeitig zeigen aber die plausiblen Resultate aus Experimenten mit dem Ansatz von Crisp (1996) (zitiert in Armstrong, 2003) und Studien wie denen von Ottaway *et al.* (1981) dass zu diesem Thema noch weitere Untersuchungen nötig sind.

Weiter wurde mit dieser Arbeit gezeigt, dass für die betrachteten Flüsse die Eingrabungstiefe der Eier anhand der Tiefe der Laichgrube vorhersagbar ist. Die Resultate zeigten, dass eine lineare Beziehung zwischen der Wassertiefe bei der Grube und dem gemessenen Wasserstand beim Eierpaket besteht.

Anhand dieser Resultate kann die Nullhypothese H3 verworfen werden.

Wie für die Eingrabungstiefe der Eier, wurden auch für die Laichgruben-Charakteristika unterschiedliche Werte für die verschiedene Flüsse festgestellt. Das heisst, dass auch im diesem Fall die Existenz eines „Flusseffekt“ festgestellt wurde, welcher einen eindeutigen Einfluss auf die verschiedenen Variablen des Laichgrubenareals hat.

Die Analysen der Laichgrubenareal-Charakteristika haben gezeigt, dass die Bachforellen in den verschiedenen untersuchten Flüssen Laichgrubenareale mit unterschiedlichen Grössen, bei unterschiedlichen Tiefen und Fliessgeschwindigkeiten bauen.

Aufgrund dieser Resultate kann die Nullhypothese H4 verworfen werden.

Die beiden Substratkategorien mittlerer Kies (8 - 16 mm) und grobkörniger Kies (16 - 32 mm) waren dagegen in Laichgrubenarealen aller Flüsse die dominanten Kategorien. Diese Substratkategorien sollten deshalb in unseren Flüssen bewahrt und, wo nötig, gefördert werden.

Die Analyse nach der Einteilung in instabile und stabile Flüsse hat gezeigt, dass keine Unterschiede bei der Eingrabungstiefe der Eier zwischen diesen zwei Gruppen bestehen. Gemäss der durchgeführten Untersuchung haben die Winterinstabilität und die Effekte der Abflusscharakteristika (Gefälle/Substrat/Abfluss) eines Fliessgewässers keinen Einfluss auf die Eingrabungstiefe der Bachforelleneiern.

Diese Resultate sprechen gegen der Vermutung, dass die Bachforellen in abflussinstabilen Flüssen ihre Eier tiefer Eingraben.

Deswegen kann die Nullhypothese H5 angenommen werden.

Zudem wurde mit dieser Arbeit gezeigt, dass sich die Habitatsansprüche von Forellen aus instabilen und stabilen Flüssen unterscheiden. Alle Laichgruben-Charakteristika ausser dem „Wasserstand bei der Aufschüttung“ und der „Wasserstand hinter dem Laichgrubenareal“ unterschieden sich.

Die Nullhypothese H6 kann somit verworfen werden.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit können als Entscheidungshilfe bei Revitalisierungsprojekten von Salmoniden-Gewässern dienen. Zudem können die Resultate dieser Arbeit als Ausgangspunkt für weitere und spezifischere Untersuchungen dienen:

Von grossem Nutzen wären etwa Modelle, mit welchen potentielle Reproduktionsareale identifiziert werden können. Solche Modelle sollten Anhand von Daten aus Studien zu Habitatsansprüchen beim Laichen erstellt und mit Feldbeobachtungen validiert werden. Ein Vergleich der Resultate von solchen Modellen mit Modellen über die Erosionstiefe bei Geschiebeereignissen (z.B. Lapointe *et al.*, 2000 und DeVries, 2008) könnte, in Kombination mit Erhebungen über die Eingrabungstiefe der Eier, wichtige Einblicke in das Laichverhalten von Bachforellen ermöglichen.

Weiterhin nicht abschliessend geklärt, ist die Frage, inwiefern das Laichverhalten von Populationen (insbesondere die Eingrabungstiefe der Eier) an die lokalen Flussverhältnisse adaptiert ist (siehe diese Arbeit aber auch Morbey & Hendry, 2008 und Montgomery *et al.* 1996). Um diese Frage zu klären sind rein beobachtende Daten kaum ausreichend, da stets mehrere potentielle Einflussfaktoren miteinander auftreten und teilweise korreliert sind. Mit einem geeigneten experimentellen Design könnten aber verschiedene Einflussfaktoren getrennt voneinander betrachtet werden. So wäre beispielsweise ein Experiment denkbar, bei dem Fische in andere Flüsse (mit anderen hydrologischen, morphologischen etc. Eigenschaften) versetzt würden, um anschliessend das Laichverhalten der versetzten mit den lokalen Forellen zu vergleichen.

Allgemein sind weitere Studien nötig, die den genauen Inhalt des gefunden „Flusseffektes“ (4.2.1.1) vertieft untersuchen. Dieser „Flusseffekt“ besteht höchst wahrscheinlich aus verschiedenen Komponenten (z.B. Substratzusammensetzung, Fliessgeschwindigkeit, Wassertiefe etc.), welche miteinander stark korreliert sind. Experimentelle Untersuchungen wie oben beschrieben, könnten über die verschiedenen Komponenten Auskunft geben. Da das Designen eines solchen Experiments nicht trivial ist, wird die Thematik nicht so leicht zu klären sein und Fischbiologen wohl noch längere Zeit beschäftigen.

6 Danksagung

Für die Unterstützung und fachliche Beratung während meiner Arbeit möchte ich mich besonders bei meinem Betreuer Dr. Armin Peter bedanken. Ich konnte immer auf seine wertvolle Unterstützung und Beratung zählen.

Christina Riedl hat mich in die Methodik und Analyse der Laichgrubenareale und der Eingrabungstiefe der Eier eingeführt. Vielen Dank - auch für die konstruktiven Diskussionen.

Vielen Dank an die Ämter für Fischerei der Kantone Graubünden, Luzern, Sankt Gallen und Tessin. Insbesondere möchte ich mich herzlich bei Philipp Amrein, Marcel Michel, Roland Tomaschett, Nicola Gaudenz, Michael Kugler, Roland Riederer, Christoph Birrer, Bruno Polli und Giorgio Leoni bedanken. Ohne ihre Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Herzlichen Dank auch an die Kantone Aargau und Zürich, insbesondere Thomas Stucki und Andreas Hertig.

Für ihr Engagement bei der Feldarbeit möchte ich mich bei Chiara Leonardi, Christoph Birrer, Daniel Gübeli, Samuel Wechsler und Bruno Polli herzlich bedanken. Vielen Dank auch an Brigitte Germann für die Einführung in die Handhabung der Messgeräte.

Ein besonderer Dank geht auch an Prof. Dr. Rolf Weingartner vom Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB) und an Jens Turowski von der WSL für die Hilfe bei der Entwicklung der Kriterien für die Einteilung der untersuchten Flüsse.

Danke auch an Corrado Rossini von der Azienda Elettriche Ticinesi (AET), Maurizio Pozzoni vom Istituto Scienze della Terra (SUPSI), Dr. Andreas Gees vom Amt für Umwelt und Energie des Kt. St. Gallen, Riet Schocher und Ernst Schnurrenberger vom Amt Umwelt und Energie des Kt. Luzern, für die Bereitstellung der hydrologischen Daten.

Für die statistische Beratung danke ich Dr. Bernd Fellinghauer vom Statistik-Seminar der ETH Zürich.

Der grösste Dank geht an Samuel Wechsler, Pascale Steiner, Jean-Martin Fierz, Bruno Polli, Emilie Person und Nicole Egloff für die wertvollen sprachlichen Korrekturen, Hinweise und Ergänzungen zur Verbesserung der Arbeit.

Schlussendlich geht ein grosser Dank an alle, die mich in dieser Zeit unterstützt haben; vor allem meine Freundin Chiara und meine Familie.

7 Literaturverzeichnis

- Armstrong, J., P. S. Kemp, G. J. A. Kennedy, M. Ladle, N. J. Milner (2003). Habitat requirements of Atlantic salmon and brown trout in rivers and streams. *Fisheries Research*. **62**: 143-170.
- Badoux, A. & D. Rickenmann (2008). Berechnungen zum Geschiebetransport während der Hochwasser 1993 und 2000 im Wallis. *Wasser Energie Luft*. Heft 3.
- Barlaup, B. T., S. E. Gabrielsen, H. Skoglund, T. Wiers (2008). Addition of spawning gravel - a mean to restore spawning habitat of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.), and anadromous and resident brown trout (*Salmo trutta* L.) in regulated rivers. *River Research and Application*. **24**: 543-550.
- Beard, T. D. & R. F. Carline (1991). Influence of spawning and other stream habitat features on spatial variability of wild brown trout. *Transactions of the American Fisheries Society*. **120**: 711-722.
- Beechie, T., H. Moir, G. Pess (2008). Hierarchical physical controls on salmonid spawning Location and timing. *American Fisheries Society Symposium*. **65**: 83-101. In: Sear, D. & P. DeVries, (2008). Salmonid spawning habitat in rivers, physical controls, biological responses, and approaches to remediation. *American Fisheries Society Symposium* 65.
- Burkhardt-Holm, P. (2009). Klimawandel und Bachforellenrückgang – gibt es einen Zusammenhang? Resultate aus der Schweiz. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*. **21**: 177-185.
- Burner, C. J. (1951). Characteristics of the spawning nests of Columbia River salmon. *Fishery Bull. Fish. Wildl. US*. **52**: 97-110.
- Chapman, D. W. (1988). Critical review of variables used to define effects of fines in redds of large salmonids. *Transactions of the American Fisheries Society*. **117**: 1, 1-21.
- Crisp, D.T. (1996). Environmental requirements of common riverine European salmonid fish species in fresh water with particular reference to physical and chemical aspects. *Hydrobiologia*. **323**: 201-221.
- Crisp, D. T. & P. A. Carling (1989). Observations on siting, dimensions and structure of salmonid redds. *Journal of Fish Biology*. **34**: 119-134.
- Dagani, D. (2010). Introgression of Atlantic brown trout (*Salmo trutta*) and presence of marble trout (*Salmo marmoratus*) in the Swiss portion of the Ticino river. *Travail de master ès sciences en comportement, evolution et conservation*. Université de Lausanne.
- DeVries, P. (1997). Riverine salmonid egg burial depths: review of published data and implications for scour studies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. **54**: 1685-1698.

- DeVries, P. (2008). Bed disturbance processes and the physical mechanisms of scour in salmonid spawning habitat. American Fisheries Society Symposium. **65**:121-147. In: Sear, D. & P. DeVries, (2008). Salmonid spawning habitat in rivers, physical controls, biological responses, and approaches to remediation. American Fisheries Society Symposium 65.
- Elliott, J. M. (1984). Numerical changes and population regulation in young migratory trout *Salmo trutta* in a lake district stream, 1966-83. The Journal of Animal Ecology. **53**: 327-350.
- Elliott, J. M. (1989). Wild brown trout *Salmo trutta*: an important national and international resource. Freshwater Biology. **21**: 1-5.
- Elliott, J. M. (1994). Quantitative ecology and the brown trout. Oxford university press. Oxford, New York, Tokyo. 286 p.
- Gomez, B. & M. Church (1989). An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers. Water resources research. Vol. 25. **6**: 1161-1186.
- Gortázar, J., D. García de Jalón, C. Alonso- González, P. Vizcaíno, D. Baeza, M. Marchamalo (2007). Spawning period of a southern brown trout population in a highly unpredictable stream. Ecology of Freshwater Fish. **16**: 515-527.
- Grost, R. T., T. A. Wesche, W. A. Hubert (1990). Redd site selection by brown trout in Douglas Creek, Wyoming. Journal of Freshwater Ecology. **5**: 365-371.
- Grost, R. T., W. A. Hubert, T. A. Wesche (1991). Description of brown trout redds in a mountain stream. Transactions of the American Fisheries Society. **120**: 582-588.
- HADES. Hydrologischer Atlas der Schweiz. Abteilung Hydrologie, BAFU, Bern.
- Hardy, C. J. (1963). An examination of eleven stranded redds of brown trout (*Salmo trutta*), excavated in the Selwyn River during July and August, 1960. New Zealand Journal of Science. **6**: 107-119.
- Heggberget, T.G., T. Haukebø, J. Mork, G. Ståhl (1988). Temporal and spatial segregation of spawning in sympatric populations of Atlantic salmon, *Salmo salar* L., and brown trout, *Salmo trutta* L..Journal of Fish Biology. **33**: 347-356.
- Huet, M. (1949). Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courantes. Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie. **11**: 333-351.
- IST-SUPSI - Istituto scienze della Terra, (2010). Ricerche sull'evoluzione del Lago di Lugano. Aspetti limnologici. Programma quinquennale 2008-2012, Campagna 2010. Commissione Internazionale per la Protezione delle Acque Italo-Svizzere (Ed.). 108 pp.
- Jones J. W. & J. N. Ball (1954). The spawning behaviour of brown trout and salmon. The British Journal of Animal Behaviour. **2**: 103-114.
- Jonsson, B. & N. Jonsson (2011). Ecology of Atlantic salmon and brown trout. Springer, Dordrecht. 680 p.

- Kirchhofer, A. & D. Hefti (1996). Conservation of endangered freshwater fish in Europe. *Advance in Life Sciences*. Birkhäuser. 347 p.
- Kondolf, G. M. & M. G. Wolman (1993). The sizes of salmonid spawning gravels. *Water Resources Research*. **29**: 2275-2285.
- Kottelat, M. & J. Freyhof (2007). *Handbook of European freshwater fishes*. Publications Kottelat, Cornol, Switzerland. 646 p.
- Lapointe, M., B. Eaton, S. Driscoll, C. Latulippe (2000). Modelling the probability of salmonid egg pocket scour due to floods. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. **57**: 1120-1130.
- Largiadèr, C. R., A. Scholl, R. Guyomard (1996). The role of natural and artificial propagation on the genetic diversity of brown trout (*Salmo trutta* L.) off the upper Rhône drainage. In: Kirchhofer, A. & D. Hefti (1996). Conservation of endangered freshwater fish in Europe. *Advance in Life Sciences*. Birkhäuser. 347 p.
- Leitritz, E. (1980). *Die Praxis der Forellenzucht*. Verlag Paul Parey. Hamburg und Berlin. 121 p.
- Louhi, P., A. Mäki-Petäys, J. Erkinaro (2008). Spawning habitat of Atlantic salmon and brown trout: General criteria and intragravel factors. *River Research and Applications*. **24**: 330-339.
- Montgomery, D. R., J. M. Buffington, N. P. Peterson, D. Schuett-Hames, T. P. Quinn, (1996). Stream-bed scour, egg burial depths, and the influence of salmonid spawning on bed surface mobility and embryo survival. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. **53**: 1061-1070.
- Montgomery, D. R., E. M. Beamer, G. R. Pess, T. P. Quinn (1999). *Channel type and salmonid spawning distribution and abundance*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. **56**: 377-387.
- Morbey, Y. E. & A. P. Hendry, (2008). Adaptation of Salmonids to Spawning Habitats. *American Fisheries Society Symposium*. **65**:15-35. In: Sear, D. & DeVries, P. (2008). *Salmonid Spawning Habitat in Rivers, Physical controls, Biological Responses, and Approaches to Remediation*. *American Fisheries Society Symposium* 65. 376 p.
- Nitsche, M., D. Rickenmann, J. Turowski, A. Badoux, W. Kirchner (2011). Evaluation of bedload transport predictions using flow resistance equations to account for macro-roughness in steep mountain streams. *Water Resources Research*. Vol. 47. W08513, doi: 10.1029/2011WR010645.
- Ottaway, E. M., P. A. Carling, A. Clarke, N. A. Reader (1981). Observation on the structure of brown trout, *Salmo trutta* Linnaeus, redds. *Journal of Fish Biology*. **19**: 593-607.
- Peter, A. (2011). Spawning habitat of salmonids - Fish habitat. Fish Management Course ETHZ. Vorlesungsunterlagen.

- Peterson, N. P., & T. P. Quinn, (1996). Spatial and temporal variation in dissolved oxygen in natural egg pocket of chum salmon, in Kennedy Creek, Washington. *Journal of Fish Biology*. **48**:131-143.
- Pfaundler, M., R. Weingartner, R. Diezig (2006). Versteckt hinter den Mittelwerten - die Variabilität des Abflussregimes. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*. **50**: Heft 3,116-123.
- Pfaundler, M. & M. Zappa, (2006). Die mittleren Abflüsse über die ganze Schweiz. Ein optimierter Datensatz im 500x500 m Raster. *Wasser Energie Luft*. Heft 4.
- Reiser, D. W. & T. A. Wesche (1977). Determination of physical and hydraulic preferences of brown and brook trout in the selection of spawning locations. *Water Resources Series 64*. Water Resources Research Institute, University of Wyoming, Laramie, Wyoming.
- Riedl, C. & A. Peter (eingereicht). Characterization of brown trout spawning activities in alpine river Systems.
- Rupf, R. (1998). Ökomorphologie des Vorder- und Hinterrheins: Zustandsbewertung und Massnahmenvorschläge aus fischökologischer Sicht. Diplomarbeit am geographischen Institut der Universität Zürich. 1-86.
- Schädler, B. & R. Weingartner (2010). Impact of climate change on water resources in the alpine regions of switzerland. U. Bundi (ed.), *Alpine Waters, Handbook of Environmental Chemistry*. **6**: 59-69.
- Schuett-Hames, D., A. E. Pleus, D. Smith, (1999). TFW Monitoring Program method manual for the salmonid spawning habitat survey. Prepared for the Washington State Dept. of Natural Resources under the Timber, Fish, and Wildlife Agreement. TFW-AM9-99-007. DNR#109.
- Schwendel, A. C., R. G. Death, I. C. Fuller, (2010). The assessment of shear stress and bed stability in stream ecology. *Freshwater Biology*. **55**: 261-281.
- Shirvell, C. S. & R. G. Dungey (1983). Microhabitats chosen by brown trout for feeding and spawning in rivers. *Transactions of the American Fisheries Society*. **112**: 355–367.
- Spina, A. P. (2001). Incubation discharge and aspects of brown trout population dynamics. *Transactions of the American Fisheries Society*. **130**: 322-327.
- Steen, R. P. & T. P. Quinn (1999). Egg burial depth by sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*): implications for survival of embryos and natural selection on female body size. *Canadian Journal of Zoology*. **77**: 836-841.
- Tonina, D., & J. M. Buffington (2009). A three-dimensional model for analyzing the effect of salmon redds on hyporheic exchange and egg pocket habitat. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. **66**: 2157-2173.
- Unfer, G., C. Hauer, E. Lautsch (2011). The influence of hydrology on the recruitment of brown trout in an alpine river, the Ybbs River, Austria. *Ecology of Freshwater Fish*. **20**: 438-448.

- Weingartner, R. & H. Aschwanden (1992). Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES) -Tafel 5.2.
- Wentworth, C.K. (1922). A scale of grade and class terms for elastic sediments. *Journal of Geology*. **30**: 377-392.
- Witzel, L. D. & H.R. MacCrimmon (1983). Embryo survival and alevin emergence of brook charr, *Salvelinus fontinalis*, and brown trout, *Salmo trutta*, relative to redd gravel composition. *Canadian Journal of Zoology*: **61**: 1783-1792.
- Wollebæk, J., R. Thue, J. Heggenes (2008). Redd site microhabitat utilization and quantitative models for wild large brown trout in three contrasting boreal rivers. *North American Journal of Fisheries Management*. **28**: 1249-1258.
- Zaugg, B., P. Stucki, J. C. Pedroli, A. Kirchhofer (2003). *Fauna Helvetica 7, Pisces Atlas*. SEG CSCF. 233 p.
- Zimmer, M. P. & M. Power (2006). Brown trout spawning habitat selection preferences and redd characteristics in the Credit River, Ontario. *Journal of Fish Biology*. **68**: 1333-1346.

Internet Nachweis:

BAFU, Klimaänderung und Hydrologie (Projekt CCHydro):

www.bafu.admin.ch/wasser/01444/01991/10443/index.html?lang=de

Projekt SEDRIVER:

www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/wildbaeche/projekte/sedriver/index_DE

Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES):

www.hydrologie.unibe.ch/hades/index.html

BAFU, Mittlere monatliche und jährliche Abflusshöhen:

www.bafu.admin.ch/hydrologie/01832/01855/index.html?lang=de