schweizerisches kompetenzzentrum fischerei SKF
centre suisse de compétences pour la pêche CSCP
centro svizzero di competenza pesca CSCP
center da cumpetenza svizzer da la pestga CCSP

Atlantischer Lachs und Klimawandel

Zusammenstellung bestehender Studien und Grundlagen

Abbildung: ©Michel Roggo

Zitiervorschlag
Schläppi T. (2021). Atlantischer Lachs und Klimawandel, Zusammenstellung bestehender Studien und Grundlagen, Bericht im Auftrag des WWF Schweiz, 24 Seiten.

Bezugsquelle
Der Bericht ist downloadbar auf der Homepage des Schweizerischen Zentrum für Fischerei (SZF) und des WWF Schweiz:
www.kompetenzzentrum-fischerei.ch
https://www.wwf.ch/lachscomeback

Autor
Thomas Schläppi, Schweizerisches Kompetenzzentrum Fischerei
Wankdorffeldstrasse 102
Postfach 371
3000 Bern 22
E-Mail:skf@kompetenzzentrum-fischerei.ch

Dank
Einen grossen Dank an alle, die sich die Zeit genommen haben, den Bericht gegenzulesen und insbesondere an Daniel Schläppi, der mich auch bei der Literaturrecherche mit seiner langjährigen Erfahrung ungemein unterstützt hat und an die Lachsgruppe Schweiz, für die konstruktiven Feedbacks.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung ... 3

1. Einleitung ... 4

1.1. Lachs in der Schweiz ... 4

1.2 Ausgangslage Klimawandel ... 5

2 Temperaturpräferenzen und -toleranzen ... 6

3 Lebensraumpräferenzen ... 8

3.1 Anforderungen an Laichhabitate ... 8

3.2 Anforderungen an Jungfischhabitate ... 8

3.2 Habitatangebot in der Schweiz ... 8

4 Literaturrecherche zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Atlantischen Lachs ... 9

4.1 Auswirkungen höherer Temperaturen ... 9

4.1.1 Einfluss des Klimawandels auf Fruchtbarkeit und Eigrösse ... 9

4.1.2 Einfluss des Klimawandels auf die Embryonalentwicklung ... 10

4.1.3 Einfluss des Klimawandels auf das Lachswachstum ... 11

4.1.4 Einfluss des Klimawandels auf die Smoltwanderung ... 12

4.1.5 Einfluss des Klimawandels auf die Laichwanderung adulter Lachse ... 13

4.1.6 Einfluss des Klimawandels auf Krankheiten und Parasitenbefall ... 14

4.2 Auswirkungen durch klimabedingte veränderte Abflussmengen ... 15

4.2.1 Auswirkungen veränderter Abflussmengen auf die Laichwanderung ... 15

4.2.3 Winterhochwasser ... 15

4.2.4 Trockene Sommer ... 16

4.3 Anpassung an den Klimawandel ... 17

4.4 Verschiebung von Verbreitungsgebieten ... 17

4.5 Reviews und zusammenfassende Studien ... 18

4.5.1 International ... 18

4.5.2 Schweiz ... 19

5 Literaturverzeichnis ... 21

Zusammenfassung

Die Auswirkungen des Klimawandels sind weltweit spürbar. Stetige Umweltveränderungen sind ein charakteristisches Merkmal des Lebens auf der Erde und spielen eine wichtige Rolle bei der Evolution und der globalen Verteilung der Artenvielfalt. Solche Änderungen geschehen heute jedoch schneller als je zuvor, mit potentiell gravierenden Folgen: Der Klimawandel wird als eine der Hauptbedrohungen für die biologische Vielfalt, sowie die Struktur und Funktion von Ökosystemen angesehen, die bereits vorher einer erheblichen anthropogenen Belastung ausgesetzt waren. Die globale Erwärmung verursacht auch weitreichende Folgen für das Leben unter Wasser. Nebst den Lufttemperaturen steigen auch die Temperaturen in vielen Schweizer Gewässern kontinuierlich an: Im Jahre 2018 wurden schweizweit diverse Temperaturrekordwerte gemessen, in der Luft und in Gewässern. Der Klimawandel führt in der Schweiz laut den Klimaszenarien des Bundes unter anderem zu heisseren, trockeneren Sommern und kann sich auf die Abflüsse auswirken, wodurch vermehrt Winterhochwasser erwartet werden.

Der Bund hat sich zum Ziel gesetzte, bis 2030 in der Schweiz aufsteigende und sich fortpflanzende Lachse wiederanzusiedeln. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen einerseits Wanderhilfen gebaut werden, andererseits, sollten auch die Einflüsse des Klimawandels auf die zukünftigen Wassertemperaturen, die Dynamik und die Fischhabitate mitberücksichtigt werden. Diese Massnahmen sind notwendig, um das Lachsmanagement im Hinblick auf die erfolgreiche Wiederansiedlung adäquat anzupassen. Daher ist das Ziel dieser Überblicksstudie Informationen zu möglichen Effekten des Klimawandels auf den Lachs und seinen Lebensraum zusammenzutragen.

Der Klimawandel hat Einfluss auf den gesamten Lebenszyklus des Lachses. Unter anderem können die Entwicklung, das Wachstum, das Verhalten und die Wanderung, als auch die Anfälligkeit auf Krankheiten davon betroffen sein. Potentielle Konsequenzen können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Frühere Smoltwanderung, welche zu unpassenden Bedingungen und Negativauswirkungen zum Zeitpunkt des Eintreffens im Meer führen kann
- Frühere Reife der Lachse bei geringerer Grösse
- Kürzere Aufenthaltsdauer der Lachse im Meer
- Globale Verschiebung des Verbreitungsgebietes des Atlantischen Lachses in Richtung Norden
- Erhöhte Bedrohung des Lachses durch Parasiten und ansteckende Fischkrankheiten
- Stress der juvenilen Lachse durch hohe Wassertemperaturen im Sommer
- Einstellen der Wanderung adulter Lachse bei zu hohen Temperaturen
- Wegspülen der Eier aus den Laichgruben bei Winterhochwassern

Nicht alle der angeführten Punkte werden sich gleich stark auf die Wiederansiedlung des Atlantischen Lachses in der Schweiz auswirken. Sie sind aber im Hinblick auf den Klimawandel und dessen Konsequenzen kritisch zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. In der nächsten Phase der vorliegenden Studie soll eruiert werden, welche Gegenmassnahmen in Betracht gezogen und welche entsprechenden Vorgehensweisen erarbeitet werden können, um trotz erwartetem Klimawandel die Wiederansiedlung des Lachses in der Schweiz zu bewerkstelligen.

1. Einleitung

Der WWF Schweiz will mit dem Projekt «Lachs-Comeback» dem Atlantischen Lachs den Weg zurück in heimische Gewässer bahnen. Der Lachs ist die Flagship-Art für die Vernetzung der grossen Flüsse in der Schweiz und in Europa dar. In der Projektphase «Lachs Comeback» 5 von 2019 bis 2022 will der WWF, gemäss dem Projektziel 6, auch die möglichen Veränderungen durch den Klimawandel und ihre Auswirkungen auf die Gewässer und auf den Wanderfisch Lachs untersuchen. Aufbauend darauf sollen Anpassungsmassnahmen entworfen und initiiert werden.

Der Klimawandel und die damit eingehende Erwärmung der Atmosphäre und der Gewässer sowie das Abschmelzen der Polkappen hat zweifelsohne einen Einfluss auf Wasserlebewesen. Je nach Fischart wirkt sich diese Veränderung unterschiedlich aus. Gewisse Arten werden profitieren, andere wiederum nicht. Eine Vielzahl Forschungsarbeiten befasst sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf den Atlantischen Lachs während seinem Lebenszyklus (Abbildung 1). In der vorliegenden Arbeit werden diese Studien, nach Themen aufgegliedert und zusammengefasst.

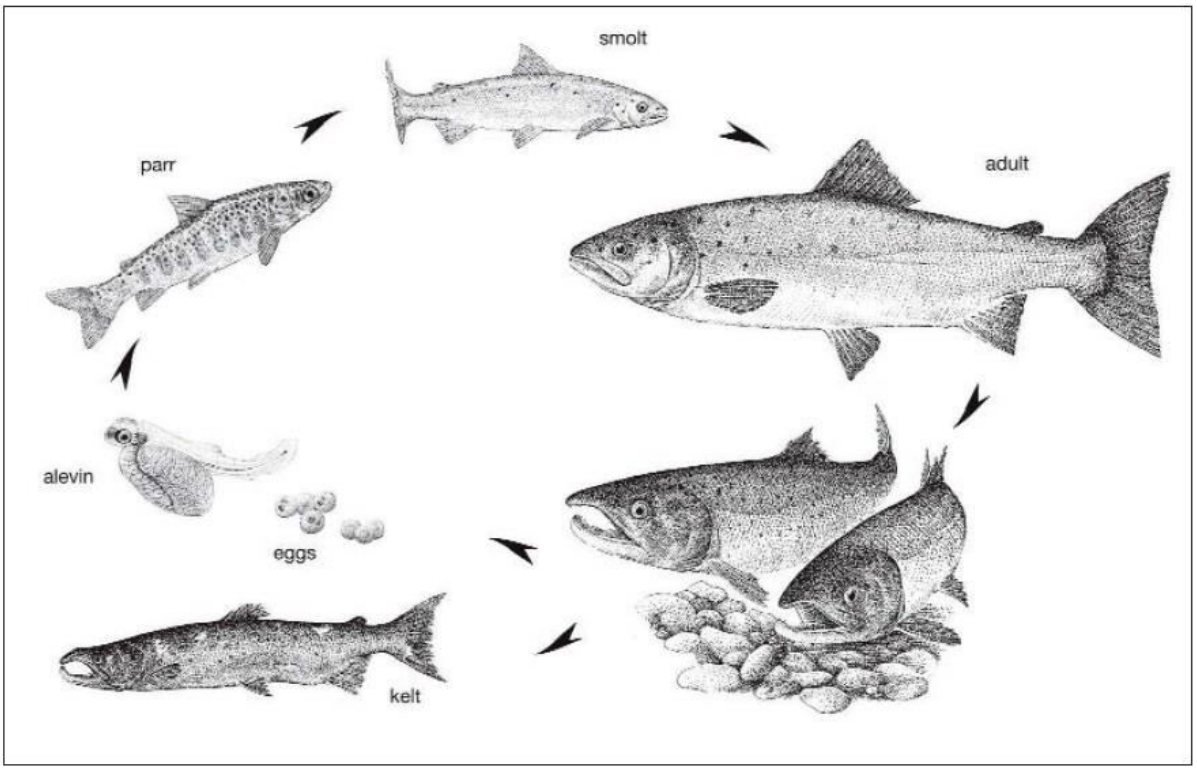

Abbildung 1: Lebenszyklus des Atlantischen Lachses. Lachse die aus dem Süsswasser ins Meer abwandernd nennt man "Parr" (aus Hendry K & Cragg-Hine D (2003). Ecology of the Atlantic Salmon, Sarah Wroot).

1.1. Lachs in der Schweiz

Lachse kamen ursprünglich in allen Ländern vor, deren Flüsse in den Nordatlantik und die Ostsee mündeten. In grossen Zahlen legten sie auf ihren Laichwanderungen ins Süsswasser riesige Distanzen zurück, bis auch in die Flüsse und Bäche der Schweiz [1]. In der Schweiz gilt der Lachs seit den 1950er-Jahren als ausgestorben. Grund dafür sind unter anderem zahlreiche Kraftwerke, Wanderhindernisse, Verbauung, Kanalisierung und Verschmutzung von Gewässern und teilweise auch Überfischung.

Die IKSR, «Internationale Kommission zum Schutz des Rheines», beschloss 1987 das „Aktionsprogramm Rhein“ ins Leben zu rufen. Ein Teilziel war es früher vorhandene, rheintypische Wanderfischarten, wie auch den Lachs, bis zum Jahr 2000 wieder in das Rheingebiet zurückzubringen. Wandernde Tierarten haben oft eine hohe sozio-kulturelle Bedeutung und deren Erhalt kommt eine besonders wichtige Rolle zu [2]. So profitieren von der Förderung des Lachses als Flagship-Art auch viele andere Arten und das gesamte aquatische Ökosystem wird unterstütz.

Das „Aktionsprogramm Rhein“ mit „Lachs 2000“ zeigte Erfolge und trug erste Früchte. Mehr als 3000 laichbereite Lachse sind nachweislich bis Ende 2005 in den sanierten Rhein zurückgekehrt. Der Hochrhein blieb dabei jedoch unerreicht, da diverse Kraftwerke dem Lachs den Weg auf seiner Wanderung versperrten [3]. Im Jahr 2015 wurden im Rheinsystem über 700 Lachse gezählt, allein an der Beobachtungsstation am Fischpass in Iffezheim (Oberrhein) wurden dabei 228 Lachse registriert, soviele wie nie zuvor. 2020 wurde auch in der Fischaufstiegshilfe Gambsheim ein neuer Rekord aufgestellt, mit 160 gezählten aufsteigenden Lachsen.

Gemäss Rheinministerkonferenz von 2013 sollten bis 2020 auch wieder Lachse bis in den Hochrhein schwimmen. Da bis zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht alle Rheinkraftwerke mit Fischaufstiegshilfen ausgestattet waren, wurde dieser Meilenstein nicht erreicht. An der Rheinministerkonferenz von 2020 wurde dieses Ziel nochmals ins Auge gefasst und verkündet, dass die Kraftwerke bis 2027 mit den nötigen Aufstiegshilfen ausgestatten werden. Vier Lachse sind 2020 via Rhein bis in die Schweiz geschwommen; das meldet die Fischzählstation im französischen Kembs unweit von Basel.

Der Lachs wird in der Schweiz auf der Liste der Arten von nationaler Priorität geführt [4]. Der Bund hat sich als Ziel gesetzt, dass bis 2030 die ersten Lachse wieder bis in die Schweiz aufsteigen und sich hier fortpflanzen können. Im Rahmen eines Wiederansiedlungskonzepts haben Vonlanthen et. al. [5] Vorschläge für die Bewirtschaftung gemacht und erarbeitet welche Vorbereitungen getroffen werden müssen, damit der Lachs erfolgreich wiederangesiedelt werden kann. Dönni et. al. [6] beschreiben Schlüsselaspekte für eine erfolgreiche Wiederbesiedlung des Lachses in der Schweiz und kommen zum Schluss, dass auch oberhalb von Basel ein verhältnismässig grosses Angebot an Flächen mit potenziellem Laich- und Juvenilhabitat für den Lachs besteht. Sie gehen davon aus, dass die Rückkehr des Lachses in die Schweiz in den nächsten 15 Jahren realisierbar ist.

1.2 Ausgangslage Klimawandel

Laut den Klimaszenarien des Bundes [7] wird sich das Klima in der Schweiz bis Mitte des kommenden Jahrhunderts deutlich verändern, selbst wenn der Klimawandel weltweit noch gebremst werden kann. Die Auswirkungen sind vielfältig: Trockene Sommer, heftige Niederschläge, Winterhochwasser und schneearme Winter sind nur einige davon. Bereits jetzt sind in der Schweiz die Auswirkungen des Klimawandels spürbar. Die Durchschnittstemperatur in der Schweiz nahm über die letzten 150 Jahre um etwa 2 Grad Celsius zu – deutlich stärker als im weltweiten Schnitt. Die Jahresmittelwerte der Lufttemperatur im Jahr 2018 waren so hoch wie nie zuvor. Dies bleibt nicht ohne Folgen für Gewässer (Abbildung 2). Auch bei Schweizer Fliessgewässern wurden neue Rekorde der Wassertemperaturen verzeichnet [8]. Nebst höheren Wassertemperaturen und Wasserknappheit in Hitzesommern können auch Winterhochwasser einen Einfluss auf den Geschiebetrieb und somit auf die Fischhabitate haben [51].

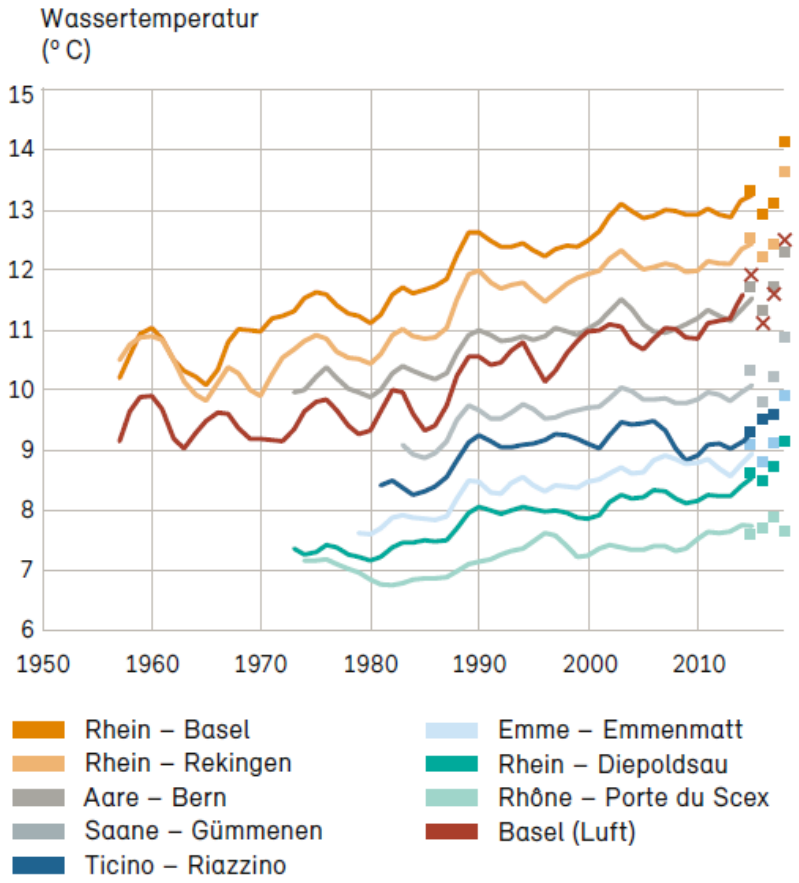

Abbildung 2: Entwicklung der Wassertemperaturen in der Schweiz (Aus BAFU 2019[2]: Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2018. Abfluss, Wasserstand und Wasserqualität der Schweizer Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern.)

Dönni et al. [6] fassen zusammen: Wenn die langfristige Wiederansiedlung des Lachses in der Schweiz erfolgreich sein soll, müssen auch die Einflüsse des Klimawandels, soweit als möglich, berücksichtigt werden. An Gewässer, die schon jetzt grenzwertige Temperaturen aufweisen, müssen gezielte Massnahmen (z.B. Beschattung) getroffen werden, ansonsten sind sie längerfristig nicht geeignet.

2 Temperaturpräferenzen und -toleranzen

Die Wassertemperatur ist einer der wichtigsten Faktoren der Süsswasserlebewesen. Sie beeinflusst alle biochemischen und physiologischen Aktivitäten, die Verteilung, das Vorkommen von Fischen und auch deren Verhalten [19]. Fische sind poikilotherm (wechselwarm, ihre Temperatur passt sich der Umgebung an) und suchen Temperaturen auf, bei denen die physiologischen Körperfunktionen so effizient wie möglich sind [20]. Sie überleben in Bereichen ausserhalb ihrer spezifischen optimalen Temperaturbereiche, jedoch kann dies einen Einfluss auf Körperprozesse, das Verhalten, die Überlebenswahrscheinlichkeit und den Fortpflanzungserfolg haben [21].

In der Literatur finden sich verschiedene Angaben über die Temperaturtoleranzen und Präferenzen des Lachses in den verschiedenen Entwicklungsstadien. Diese können folgendermassen zusammengefasst werden (Abbildung 3):

Eier: Das Eistadium ist das empfindlichste im Lebenszyklus des Lachses [9]. Die Eier ertragen Temperaturen bis maximal 16 °C [10]. Ideal für die Entwicklung sind 4 bis 11 °C [11]. Über 8°C nimmt die Mortalitätsrate stark zu [10].

Juvenile: Eine Temperatur um 17 °C wird bevorzugt [12]. Im Labor wurden Extremwerte von 0 bis 33 °C gemessen, die überlebt werden und ab ca. 23 °C wird die Nahrungsaufnahme eingestellt [13], es tritt Hitzestress auf und die Lachse finden sich in kühleren Bereichen in Gruppen ein. Die Smoltwanderung im Frühling findet bei 7–14 °C statt, über 19 °C wird die Wanderung eingestellt. Der kritische Bereich beginnt über Temperaturen von 28 °C [10].

Adulte: Der Lachs bevorzugt Temperaturen zwischen 9 und 17 °C [14]. Bjornn & Reiser [15] nennen eine obere Letaltemperatur von 27 bzw. 28 °C. Beitinger et al. [16] beschreiben, dass die Fische über längere Zeit Temperaturen von 29 °C ertragen. Der Lachs laicht typischerweise bei Temperaturen bis 8 °C. [14]. Die bevorzugte Wassertemperatur für die Wanderung flussaufwärts beträgt 8–18 °C [17].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die kritischen Wassertemperaturen des Atlantischen Lachses ein paar Grad höher liegen als diejenigen für die Bachforelle. Somit ist anzunehmen, wenn Gewässer die Temperaturanforderungen für die Bachforelle erfüllen, eignen sich diese auch für den Lachs. Im Rahmen des «Pilotprogramms Anpassung an den Klimawandel» läuft im Moment ein Projekt des Schweizerischen Kompetenzzentrums Fischerei SKF, dies sucht nach Antworten, wie einheimische, insbesondere sauerstoffliebende Arten wie Bachforellen und Äschen auch bei Niederwasser und Wärme Lebensraum finden, was sich thematisch auch mit den Herausforderungen an die Wiederansiedlung des Lachses überschneidet.

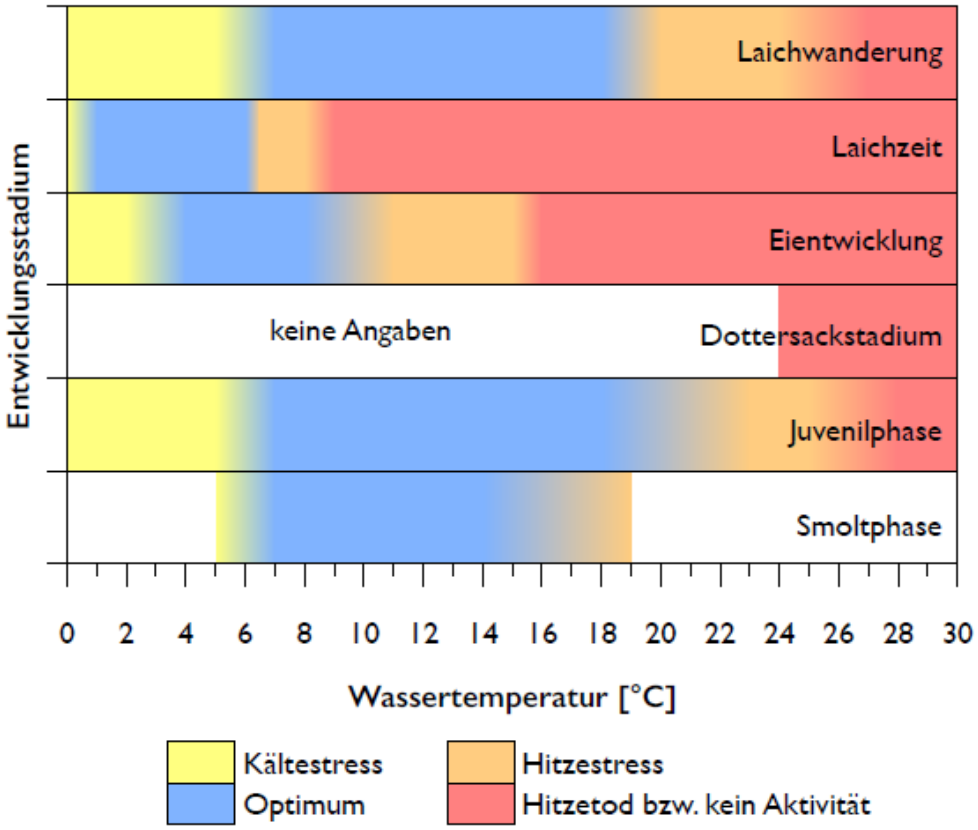

Abbildung 3: Temperaturpräferenzen in verschiedenen Entwicklungsstadien aus Dönni et.al [18].

3 Lebensraumpräferenzen

3.1 Anforderungen an Laichhabitate

Das Laichhabitat der Lachse liegt primär in der Äschenregion und in der unteren Forellenregion. Bevorzugt werden folgende Bedingungen:

- Überströmte, nicht kolmatierte Kiesbänke (Kiesschicht > 30cm)
- Korngrössendurchmesser 2-10cm
- geringer Anteil an Feinmaterial [6]
- Fliessgeschwindigkeiten zwischen 0.15 – 1.8 m/s bei einem Optimum im Bereich von etwa – 0.5 m/s [22]
- eine Wassertiefe von 20-200cm [23]
- Deckungsstrukturen wie unterspülte Ufer, überhängende Vegetation, Totholz, Steinblöcke oder künstliche Strukturen, die den Lachsen Deckung bieten in der Nähe der Laichplätze sind ebenfalls wichtig.

3.2 Anforderungen an Jungfischhabitate

Die optimale Fliessgeschwindigkeit für junge Lachse liegt zwischen 0.2 und 0.7 m/s. Sömmerlinge besiedeln Wassertiefen ab 0.05 m und erreichen ein Tiefe von bis zu 3 m. Lachse halten sich aber häufig in mittlerer Gewässertiefen auf, wobei 0+ Lachse ein heterogenes Habitat, welches allenfalls mit grossen Steinen oder Blöcken durchsetzt ist, bevorzugen [22].

3.2 Habitatangebot in der Schweiz

Das Habitatpotenzial in schweizer Gewässern, die für eine Wiederbesiedlung des Lachses in Frage kommen, ist in verschiedenen Untersuchungen erhoben wurden. Das Laich- und Juvenilhabitat für den Lachs in der Schweiz beträgt laut Dönni et.al insgesamt 530 ha in 76 Gewässern [6]. Später wurden 51 kleinere und mittelgrosse Gewässer durch Begehungen detailliert auf ihre Eignung als Juvenilhabitat untersucht. Davon kommen 244 ha als Habitatfläche in Frage. Hinzu kommen gut 160 km Fliessstrecken grosser Gewässer mit vorhandenem, aber nicht quantifiziertem Habitatangebot [22](Abbildung 4).

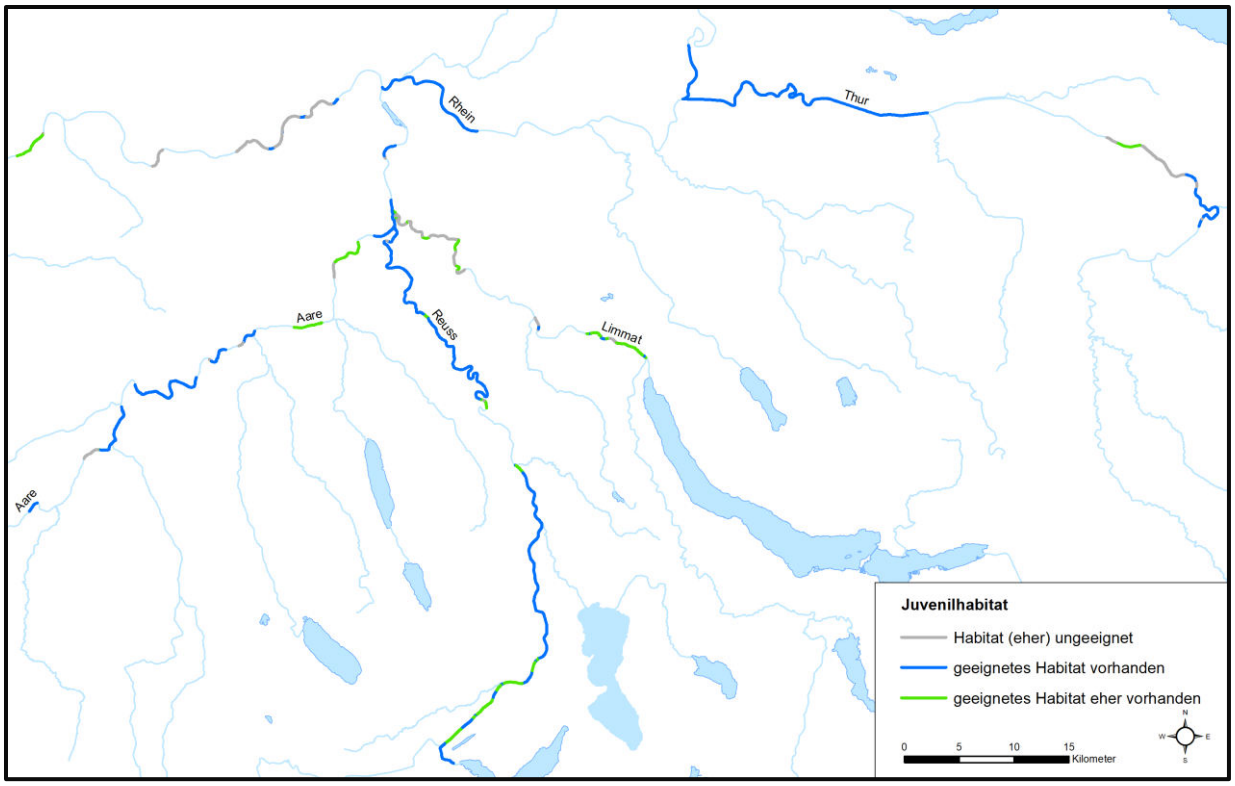

Abbildung 4: Angebot an Juvenilhabitat für Lachse in den untersuchten Abschnitten grosser Fliessgewässer, Aus Dönni et al. [22],Copyright: Gewässer © Bundesamt für Landestopografie

4 Literaturrecherche zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Atlantischen Lachs

4.1 Auswirkungen höherer Temperaturen

4.1.1 Einfluss des Klimawandels auf Fruchtbarkeit und Eigrösse

4.1.1.1 Zusammenfassung

- Es ist zu erwarten, dass sich der Klimawandel durch höhere Wassertemperaturen auf geringere Eigrössen und verminderte Fruchtbarkeit weiblicher Lachse auswirkt.

4.1.1.2 Eigrösse [24]:

In einem norwegischen Fluss wurden Lachse markiert und wiedergefangen. Dabei wurde die Körpergrösse der Tiere sowie die Eigrösse der Weiblichen erfasst. Anhand der Daten konnte gezeigt werden, dass das frühe Wachstum des Atlantischen Lachses die Eigröße und die Fruchtbarkeit bei Erreichen der Geschlechtsreife beeinflusst. Je schneller die Jungfische im frühen Leben im Süsswasser wuchsen, desto kleinere Eier produzierten sie als Erwachsene.

4.1.1.3 Eigrösse und Fruchtbarkeit [25]:

Die Entwicklung der Eier in weiblichen Atlantischen Lachsen findet grösstenteils im Sommer und Frühherbst statt, wenn die Wassertemperaturen relativ hoch sind. In dieser experimentellen Studie

konnte gezeigt werden, dass erhöhte Wassertemperaturen (22 °C statt 14 °C) in der kritischen Zeit während der Eientwicklung die Fruchtbarkeit der Weibchen und das Überleben befruchteter Eier reduzieren. Fruchtbarkeit und Überlebensrate verringerten sich, bei einer Umgebungstemperatur von 22 °C über 6 Wochen, auf 70% und 45%, Bei einer Hälterung für 12 Wochen sanken Fruchtbarkeit und Überlebensrate sogar auf 40% und 13% ab.

4.1.2 Einfluss des Klimawandels auf die Embryonalentwicklung

4.1.2.1 Zusammenfassung:

- Die Temperatur während der frühen Entwicklung hat einen Einfluss auf das spätere Verhalten und Wachstum und führt zu einem früheren Zeitpunkt der Smoltwanderung.
- Wärmere Temperaturen während der frühen Entwicklung führen zu einer früheren Laichwanderung der Lachse

4.1.2.2 Embryonalentwicklung, Wachstum [26]:

Die Autoren dieser experimentellen Studie inkubierten Eier des Atlantischen Lachses unter verschiedenen Temperaturbedingungen, um herauszufinden, ob und wie sich die Temperatur während der Eiphase auf das spätere Wachstum der Junglachse auswirkt. Bei wärmeren Temperaturen (7.2 °C) manifestierte sich signifikant schnelleres Wachstum als bei kälteren Temperaturen (2.6 °C). Die Autoren schlussfolgern, dass der Klimawandel für den Lachs zu früherem Abwandern ins Meer führt, was dazu führt, dass er bei niedrigeren Wassertemperaturen dort eintrifft. Dies wiederum führt zu einer verringerten Überlebenswahrscheinlichkeit im Meer. Es wird vermutet, dass epigenetische Anpassungsprozesse in der frühen Entwicklung dafür verantwortlich sind.

4.1.2.3 Embryonalentwicklung, Wanderung [27]:

Atlantische Lachse, die während der Embryonalentwicklung in wärmerem Wasser gehalten wurden, kehrten nach einem Jahr im Meer zwei Wochen früher zu ihren Laichgewässern zurück, als Lachse, die in kälterem Wasser gehalten wurden. Dies ist relevant in Hinsicht auf den Klimawandel und auch auf die Aufzucht und den Besatz von Lachsen. Diese Unterschiede kommen sehr wahrscheinlich durch epigenetische Vorgänge in der frühen Entwicklung zustande.

4.1.2.4 Embryonalentwicklung, life-history traits [28]:

In diesem Review wird zusammengefasst, wie sich die Temperatur während der frühen Entwicklung verschiedener Fischarten auf deren life history traits auswirkt. Die Temperatur kann das Verhalten beeinflussen, und kann, zum Beispiel in Bezug auf den Zeitpunkt der Lachswanderung, einen Einfluss auf das Geschlechterverhältnis haben. Die Autoren schlussfolgern, dass phänotypische Anpassungen während der frühen Entwicklung die Fische darauf vorbereitet, unter den gegebenen Temperaturbedingungen während der Embryoentwicklung maximalen Fortpflanzungserfolg (maximale Anzahl überlebender Nachwuchs) zu erreichen.

4.1.3 Einfluss des Klimawandels auf das Lachswachstum

4.1.3.1 Zusammenfassung

- Höhere Temperaturen im Ozean führen zu geringerem Wachstum und kleineren Rückkehrern in die Flüsse
- Höhere Wassertemperaturen führen zu früherer Reife bei tendenziell kleinerer Körpergrösse
- Wärmere Temperaturen führen zu weniger Aufsteigern, die mehr als ein Jahr im Meer verbracht haben und somit tendenziell kleineren Laichtieren

4.1.3.2 Wachstum im Ozean [29]:

Die Analyse von Fangzahlen über 14 Jahren verdeutlicht, dass rückkehrende Lachse im Nordostatlantik eine negative Wachstumsreaktion zeigten, korrelierend mit höherer Oberflächentemperatur des Ozeans. Dies weist darauf hin, dass höhere Temperaturen das Lachswachstum im Ozean hemmen, bzw. den frühzeitigen Verbrauch von Fettreserven ankurbeln.

4.1.3.3 Wachstum im Ozean [30]:

In einem norwegischen Fluss wurden Daten aufsteigender markierter Lachse über die Zeitspanne von 1976 bis 2010 analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Länge und das Gewicht der Rückkehrer über diese Zeitspanne deutlich abnahmen, dies korreliert negativ mit der Temperatur des Europäischen Nordmeers, wo die meisten Lachse ihre Futtergründe aufsuchen. Es wird vermutet, dass die beobachteten Variationen hauptsächlich mit den veränderten Bedingungen im pelagischen Nahrungsnetz im Ozean assoziiert werden können (Kollaps und Wiederaufbau von pelagischen Fischbeständen, Abnahme von Zooplankton und höhere Oberflächentemperaturen).

4.1.3.4 Wachstum, Zeitpunkt der Smoltifikation [31]:

Während 16 Jahren wurden in einem Fluss in Norwegen abwandernde Smolts gezählt und vermessen. Die Daten zeigen auf, dass sich das Klima während der Entwicklung auf späteres Wachstum und den Zeitpunkt der Smoltifikation auswirkt. Lachse, die nach einem milden und feuchten Winter geschlüpft waren, wurden im ersten Jahr im Fluss tendenziell größer und wanderten jünger ins Meer, als diejenigen, die nach einem kalten und trockenen Winter schlüpften.

4.1.3.5 Wachstum, Zeitpunkt der Reife [32]:

In dieser experimentellen Untersuchung wurden Atlantische Lachse bei unterschiedlichen Bedingungen gehältert, um herauszufinden, ob sich die Wassertemperatur und Qualität des Futters im Winter auf die Grösse und das Alter bei der Reife auswirkt. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Lachse bei wärmeren Temperaturen zum Zeitpunkt der Reife tendenziell jünger und kleiner sind und, dass dieser Effekt auch von der Qualität der Nahrung und des Geschlechts des Fisches abhängig ist.

4.1.3.6 Wachstum, Aufenthaltsdauer im Meer [33]:

Durch die Analyse der Daten von markierten atlantischen Lachsen aus früheren Jahren in der Ostsee wurde festgestellt, dass bei einem warmen Frühling tendenziell mehr Lachse wieder aufsteigen, die

nur ein Jahr im Meer verbracht haben. Des weiteren waren diese leichter als jene bei kälteren Frühlingstemperaturen. Zudem scheint ein warmer Sommer das Smoltwachstum zu verlangsamen und sich diese im Meer weniger weit von ihrem Ursprungsfluss und der Küste entfernen als in kälteren Sommern.

4.1.4 Einfluss des Klimawandels auf die Smoltwanderung

4.1.4.1 Zusammenfassung

- Wärmere Temperaturen führen zu früheren Abwanderungen der Smolts, wodurch ungünstige Bedingungen zum Zeitpunkt des Eintreffens im Meer entstehen können.
- Mit Modellierungen können Vorhersagen über den Start der Lachsabwanderung, unter wechselnden Umweltbedingungen aufgrund des Klimawandels gemacht werden.

4.1.4.2 Zeitpunkt der Abwanderung, Wachstum [35]:

Zum Untersuchen, ob der Zeitpunkt der Abwanderung einen Einfluss auf das Wachstum und die Überlebenschancen im Meer hat, abwandernde Lachse markiert und in den darauffolgenden Jahren beim Aufstieg wieder gefangen. In allen Monaten konnten abwandernde Lachse nachgewiesen werden, mit Höhepunkt im Mai. Die Überlebenschance von abwandernden Lachsen im Sommer und Herbst ist gegenüber denen im Winter und Frühling reduziert. Der Zeitpunkt der Abwanderung scheint höchst temperaturabhängig zu sein und hat sich seit 1970 pro Jahrzehnt um 4 Tage zugunsten früherer Migration verschoben. Smolts die, nach einem relativ kühlen Frühling und verhältnismässig spät im Mai Richtung Meer wanderten, hatten die höchste Überlebenschance.

4.1.4.3 Zeitpunkt der Abwanderung, Überlebenswahrscheinlichkeit [36]:

Zwischen 1978 und 2008 wurden im Bush-River in Nordirland die Smolt-Migration im Hinblick auf den Zeitpunkt der Wanderung und anschliessenden Überlebenschance im Meer untersucht. Der Beginn der grössten Abwanderungsbewegung im Frühling hat sich in den letzten Jahrzehnten deutlich verschoben. Die Wanderung begann, laut der Messreihen der vergangenen Jahren schon 10 bis 11 Tage früher als zu Messbeginn. Mildere, wärmere Frühlingswetter stehen mit dieser Veränderung in Zusammenhang. Weiter zeigten die Daten, dass der Temperaturunterschied zwischen Süss- und Salzwasser zum Zeitpunkt des Eintreffens im Meer,und die damit verbundene frühere Migration, negativ mit der Überlebenswahrscheinlichkeit im Meer korreliert.

4.1.4.4 Zeitpunkt der Abwanderung [37]:

Unter Verwendung von Modellen wurden Smolt-Abwanderungsdaten der letzten 50 Jahre von 67 Flüssen, die in den Nordatlantik münden, analysiert. Dem Ergebnis zufolge beginnt die Lachswanderung im Osten tendenziell früher als im Westen und der Start hat sich im Frühling über die letzten 50 Jahre verschoben. Damit beginnen die Lachse ihre Wanderung im Zehnjahresintervall um ungefähr 2.5 Tage früher.

4.1.4.5 Zeitpunkt der Abwanderung, Auslöser [38]:

Zwischen 1972 und 2002 wurden in einem finnischen Fluss abwandernde Smolts markiert. Der Beginn der Smoltwanderung korrelierte mit der Wassertemperatur. Als wichtigster Umweltfaktor, der die Smoltwanderung auslöst, wurde der Schwellenwert von 10 °C Wassertemperatur eruiert. Zu tiefe (<9 °C) und zu hohe (>12 °C) Oberflächentemperaturen des Meeres im Frühsommer schienen sich negativ auf das Überleben der abgewanderten Smolts im Meer auszuwirken.

4.1.4.6 Zeitpunkt der Abwanderung, Auslöser [39]:

Anhand von Daten eines 11-jährigen Monitorings in dem Fluss Ourthe in Belgien wurde ein phänologisches Modell erstellt, welches Vorhersagen über den Smoltmigrationszeitpunkt zulässt. Basis für das Modell waren Photoperiode, Wassertemperatur und Abflussbedingungen. Ab einer Temperaturschwelle von 7 °C konnte ein synergistischer Effekt zwischen Temperatur und Photoperiode als Auslöser der Smoltmigration aufgezeigt werden. Das Modell soll helfen, zukünftige Lachswanderungen präziser vorauszusagen, um z.B. mittels Turbinenabschaltung oder Abflussmanagement der Bypässe Schadensbegrenzung der Lachsmortalität an Kraftwerken zu erreichen. Weiter konnten mit dem Modell Szenarien für den Wanderzeitpunkt unter dem zukünftigen Klimawandel erarbeitet werden: Eine Erwärmung der Wassertemperatur um 1–4 °C resultiert laut dem Modell in einer Migration, die 6-51 Tage früher einsetzt. Ebenfalls wird angenommen, dass Hochwasserereignisse im Frühjahr die Migrationsperiode verlängern.

4.1.4.7 Smoltwanderung durch einen See [40]:

In dieser Studie konnte anhand von akustischer Telemetrie und Modellierungen beschrieben werden, dass Smolts, die auf ihrer Wanderung einen See durchqueren oder sich temporär darin aufhalten, schneller meerwärts abwandern, wenn die Wassertemperatur höher ist. Grund dafür könnte ein rascheres Aufbrauchen der Energiereserven sein, welches folglich zu suboptimalen Bedingungen beim Eintreffen im Ozean führt. Kleinere Smolts, die früher im Meer eintreffen, sind aufgrund von Grössenselektivität mit einer geringeren Überlebenswahrscheinlichkeit konfrontiert.

4.1.5 Einfluss des Klimawandels auf die Laichwanderung adulter Lachse

4.1.5.1 Zusammenfassung:

- Bei Wassertemperaturen über 25 °C wird die Laichwanderung eingestellt
- Höhere Temperaturen haben vor allem für kleinere Laichtiere negative Auswirkungen

4.1.5.2 Einstellen der Wanderung [41]:

Diese Zusammenfassung verschiedener Studien im Rheineinzugsgebiet hält fest, dass aufsteigende Adulttiere bei Temperaturen über 25 °C ihre Wanderung einstellen. Sie sind wahrscheinlich gestresst und anfälliger für Infektionen.

4.1.5.3 Energieverbrauch [42]:

In einem norwegischen Fluss wurden Atlantische Lachse markiert und zusätzlich mit Temperaturloggern ausgestattet. Anhand der Daten wurde modelliert, wie sich die Temperatur, Aktivität und Grös-

se der Lachse während ihrer Wanderung auf den Energieverbrauch auswirken. Es wurde angenommen, dass sich höhere Temperaturen negativ auf den Energieverbrauch auswirken könnten. Diese Annahme konnte teilweise bestätigt werden, jedoch hatten Körpergrösse und Änderung der Schwimmgeschwindigkeit grösseren Einfluss auf den Energieverbrauch als die Wassertemperatur. Grundsätzlich wird aber vermutet, dass höhere Wassertemperaturen zu einer Verschiebung des Einstiegzeitpunktes in die Flüsse führt und dies für kleinere Individuen mit potenziell gravierenderen Folgen verbunden ist.

4.1.6 Einfluss des Klimawandels auf Krankheiten und Parasitenbefall

4.1.6.1 Zusammenfassung

- Höhere Temperaturen im Zusammenhang mit Parasiten und Krankheiten können zu erhöhter Anfälligkeit, schlechterem Gesamtzustand und höheren Mortalitätsraten führen. Besonders im Zusammenspiel mit weiteren Stressoren.
- Steigende Temperaturen erhöhen den Schweregrad des Verlaufes und die Mortalität bei einer PKD Erkrankung. Aus bisher unbekannten Gründen scheinen die Lachse, die in der Schweiz ausgesetzt wurden, keine Empfänglichkeit für den PKD Erreger aufzuweisen.

4.1.6.2 Parasiten im Meer [46]:

In einer experimentellen Studie wurde der Zusammenhang von Temperatur und den negativen Einflüssen eines Parasiten (Seelaus, *Lepeophtheirus salmonis*) auf juvenile Lachse untersucht. Die Lachse wurden in Gruppen verschieden stark mit Seeläusen infiziert und unter fünf verschiedenen Temperaturregimen gehältert. Höhere Temperaturen kombiniert mit Parasitenbefall wirken sich negativ auf die Wachstumsrate, den Gesundheitszustand und das Überleben der Lachse aus. In dieser Studie wird beispielhaft aufgezeigt, wie sich negative Effekte von Parasiten aufgrund des Klimawandels verstärken können.

4.1.6.3 Multiple Stressoren [47]:

Im Jahre 2002 sind im Fluss Klamath im Süden Oregons über 34´000 Fische verendet, darunter vor allem Chinook Lachse. Die Untersuchung, die sich mit der Thematik beschäftigte, kam zu dem Schluss, dass dem massiven und einzigartigen Fischsterben eine Kombination von Faktoren zugrunde lag. Die Todesursache war schlussendlich ein schwerer Ausbruch der Fischkrankheit *Ichthyophthiriose (Weißpünktchenkrankheit)*, zurückzuführen auf ein Wimpertierchen, das die Kiemen des Fisches befällt. Die Lachswanderung startete in diesem Jahr etwa eine Woche früher als normal, zusätzlich führte der Fluss deutlich weniger Wasser als in anderen Jahren und warme Temperaturen und Lachsansammlungen boten ideale Voraussetzungen für den Ausbruch der Krankheit. Laut den Autoren wäre das Fischsterben wahrscheinlich nicht aufgetreten, wenn weniger Wasser für die Landwirtschaft verwendet worden wäre, um klimawandelbedingten Dürreauswirkungen zu minimieren.

4.1.6.4 Krankheiten, PKD [6], [59]:

Aus Norwegen sind starke PKD-Ausbrüche bekannt, die Junglachspopulationen stark dezimierten. Die Auswirkungen scheinen aber im Allgemeinen weniger gravierend zu sein als bei Bachforellen. Die Autoren fassen die Situation mit PKD und dem Lachs in der Schweiz folgendermassen zusammen:

In der Schweiz wurden bisher unter anderem Lachse aus dem Magdenerbach, sowie aus der Birs und der Ergolz auf Infektionen mit PKD untersucht. Es wurden keine infizierten Fische gefunden. Die Junglachse in den Schweizer Gewässern zeigen aus bisher unerklärlichen Gründen offenbar keine Empfänglichkeit für den PKD-Erreger.

4.2 Auswirkungen durch klimabedingte veränderte Abflussmengen

4.2.1 Auswirkungen veränderter Abflussmengen auf die Laichwanderung

4.2.1.1 Zusammenfassung

- Trockene Bedingungen und wenig Abfluss können die Laichwanderung verzögern
- Der Abfluss ist ein Hauptauslöser der Laichwanderung

4.2.1.2 Wanderverhalten [48]:

In einem schottischen Fluss wurden zwischen 1969 und 2005 alle aufsteigenden Lachse gezählt und vermessen. Diese Daten wurden mit den jeweiligen Abflüssen verglichen, um Rückschlüsse auf den Effekt des Abflusses auf das Wanderverhalten zu beurteilen. In feuchteren Jahren beginnt der Aufstieg in den Fluss normalerweise relativ früh. Im Gegensatz dazu führen trockene Jahre zu einem verzögerten Fischeintritt.

4.2.1.3 Wanderverhalten, Auslöser [49]:

In einem kleinen schottischen Fluss wurden Abflussdaten und Daten markierter Lachse bei der Wanderung über zehn Jahre analysiert. Der Abfluss ist oft der Hauptfaktor, der bestimmt, wann die Salmoniden in die Flüsse aufsteigen und auch Schwankungen des Abflusses sind wichtig für den Zeitpunkt des Aufstiegs. In abflussreichen Jahren waren die aufsteigenden Lachse gleichmässiger verteilt, trockenere Jahre führen zu einer Verzögerung des Aufstiegs. Jedoch steigen die Lachse, wenn die Laichzeit näher rückt, auch bei suboptimalen und trockenen Bedingungen auf

4.2.3 Winterhochwasser

4.2.3.1 Zusammenfassung

- Hochwasser und Abflussspitzen im Herbst/Winter können die Laichwanderung begünstigen
- Extreme Hochwasserereignisse können durch Umwälzen der Sohle zu einer hohen Eimortalität führen
- Kleinere Laichtiere graben die Eier weniger Tief ein, was sie anfälliger auf Hochwasserereignisse macht

4.2.3.2 Jungfische [50]:

Anhand verschiedener Modelle wurde in dieser Studie versucht Zusammenhänge zwischen verschiedenen Abflussregimen und Dichten von 0+ Lachsen aufzudecken. Monitoring Daten der Jungfische

von fünf Gewässern an 36 Messtellen in Wales und England und deren Zusammenhang mit Frequenz, Höhe und Dauer von Hochwasserereignissen wurden evaluiert. Es konnte kein eindeutiger positiver oder negativer Effekt auf die Jungfischdichten nachgewiesen werden. Vermutet wird, dass bei Hochwasserereignissen vor oder währende der Laichzeit mehr Lebensraum für die laichenden Lachse zur Verfügung steht und sie diese besser erreichen können. Weiter wird darauf hingewiesen, dass Hochwasser über einem bestimmten Abfluss die Eimortalität erhöhen können.

4.2.3.3 Geschiebe [51]:

Gemäss verschiedener Klimamodelle werden Winterhochwasser in Zukunft öfters und stärker auftreten. Mittels Simulationen wurden Geschiebetransportprognosen für die Zukunft gemacht und deren Auswirkungen für die Bachforelle in alpinen und voralpinen Gewässern untersucht. Eine Intensivierung der Umlagerungen und der Erosion der Gerinnesohle ist zu erwarten. Negative Effekte auf die Fortpflanzung der Bachforelle sind möglich, da durch Tiefenerosion Laichgruben weggespült werden. Weiter wurden Laichgruben von Bachforellen auf ihre Tiefe untersucht. Die eruierten Werte lagen deutlich tiefer als bisher in der Fachliteratur beschrieben wurde. Obwohl Lachse tiefere Laichgruben schlagen als Bachforellen (Nach der Überdeckung mit Kies befinden sich die abgelegten Eier der Lachse meist in einer Tiefe von 10-30 cm, Mittelwerte um 20 cm [52]) könnte sich der Klimawandel auch negativ auf die Laichgruben des Lachses auswirken.

4.2.3.4 Winterhochwasser und Geschiebe [52]:

Basierend auf Klimadaten, die trockenere Sommer und mehr Niederschlag (Regen statt Schnee) im Herbst und Winter voraussagen, wurden für einen Fluss in den Rocky Mountains (Idaho USA) Modelle errechnet, um herauszufinden, wie sich Hochwasserereignisse auf die Entwicklung von Salmoniden Eiern im Kiesbett auswirken können. Ein höheres Risiko besteht für Herbst- und Winterlaicher. Zudem sind die Eier kleinerer Individuen weniger tief vergraben, was sie anfälliger auf Hochwasserereignisse macht. Die Häufigkeit von Hochwasserereignissen ist im Verhältnis zu den typischen Lebenszyklen der untersuchten Salmoniden relativ gering, was darauf hindeutet, dass einzelne Jahrgänge von Ausfällen betroffen sein können, aber ein Aussterben einer Population unwahrscheinlich ist. Die Herangehensweise und Modelle der Autoren könnte auch in anderen Einzugsgebieten Anwendung finden: Zum Beispiel, um Verschiebungen in der räumlichen Verteilung von geeigneten Laichhabitaten vorherzusagen oder um Risikoabschätzungen zur Priorisierung von Arten für Management- und Schutzstrategien zu machen.

4.2.4 Trockene Sommer

4.2.4.1 Zusammenfassung

- In trockenen Sommern nimmt die Lebensraumverfügbarkeit für juvenile Lachse ab
- Bei sinkenden Wasserständen werden tiefe Pools, meist flussaufwärts, aufgesucht

4.2.4.2 Lebensraum [53]:

Unter der Annahme verschiedener Klimaszenarien, die auch trockenere Sommer mit tiefen Abflüssen beinhalten, wurde modelliert, wie sich Populationen juveniler Lachse in einem Wasserkraftregulierten Fluss entwickeln. Unter allen Szenarien nahm die Lachs-Dichte ab. Der entscheidende Faktor für

den Rückgang ist der benetzte Querschnitt und somit auch der verfügbare Lebensraum, welcher in trockenen Sommern abnimmt.

4.2.4.2 Lebensraumnutzung [54]:

In einem künstlich angelegten Fluss wurde untersucht, wie juvenile Atlantische Lachse auf sinkende Wasserstände reagiert. 95 Prozent der Lachse suchten bei sinkendem Wasserstand tiefere Pools auf. Die Lachse zeigten eine starke Tendenz sich flussaufwärts zu orientieren, nur ein geringer Anteil (26%) bewegte sich flussabwärts.

4.3 Anpassung an den Klimawandel

4.3.1 Zusammenfassung

- Eine kurzfristige Anpassung von Populationen an höhere Temperaturen ist nicht anzunehmen
- Phänotypische Plastizität könnte unterschiedliches Verhalten zwischen Populationen bezüglich des Aufsuchens von Kaltwasserzonen bei extremen Temperaturen erklären

4.3.2 Aggregation in Kaltwasserzonen [43]:

Mittels PIT-Tags und Schnorcheln wurde in zwei verschiedenen Flüssen in Kanada ermittelt, wie sich juvenile Atlantische Lachse verhalten, wenn die Wassertemperatur im Sommer hohe Temperaturen erreichen (>23 °C). Prinzipell tendieren die Jungfische dazu, sich bei solchen Temperaturen in Kaltwasserzonen zu aggregieren. Die Studie zeigte auf, dass sich die Temperaturen, ab denen sich die Jungfische in die Kaltwasserzone begeben, unterscheiden zwischen den zwei Flüssen unterscheiden. Dies deutet darauf hin, dass die vorherrschenden Temperaturverhältnisse über eine längere Zeit im Voraus auch das Verhalten in Extremsituationen beeinflusst. Es wird empfohlen, das Lachs-Management lokal und flussspezifisch anzupassen, zumal die Ergebnisse bis zu einem gewissen Grad auf phänotypische Plastizität hindeuten. Ebenfalls wird, in Hinblick auf zukünftig wärmerer und trockenerer Sommer, die Wichtigkeit von komplexen thermalen Strukturen unter Wasser inklusive Kaltwasserzonen hervorgehoben.

4.3.3 Thermale Anpassungen [10]:

Die Autoren fassen verschiedene früher veröffentlichte Studien zusammen. Obwohl es bei Lachsen in Flüssen mit sehr tiefen Temperaturen gewisse Anzeichen für geringfügige thermale Anpassungen gibt, ist nicht anzunehmen, dass eine ähnliche Anpassung an höhere Temperaturen kurzfristig möglich ist. Die Autoren betonen die Wichtigkeit tiefer Pools und die Zugänglichkeit kühler Seitengewässer in potenziellen Lachsgewässern.

4.4 Verschiebung von Verbreitungsgebieten

4.4.1 Zusammenfassung

- Der Zusammenbruch der Lachspopulationen in südlichen Verbreitungsgebieten ist höchstwahrscheinlich auf den Klimawandel zurückzuführen

- Anhand von Modellen kann vorausgesagt werden, in welchen Gebieten es aufgrund des Klimawandels für den Lachs künftig kritisch wird

4.4.2 Fangdaten aus Nordspanien [44]:

Fangdaten der Lachsfischerei in Nordspanien über 65 Jahre (1949-2013) und deren Zusammenhang mit lokalen und globalen Wassertemperaturen und hydrologischen Bedingungen wurden analysiert. Die Lachsfänge sind über diesen Zeitraum stark eingebrochen (90% Rückgang). Die modellierten Daten weisen stark darauf hin, dass die Klimaerwärmung, sowohl global als auch lokal, den grössten Einfluss auf den Lachsrückgang hat. Weitere Gründe dafür könnten jedoch auch Überfischung oder Krankheiten sein.

4.4.3 Voraussagen Verbreitungsgebiet [45]:

Diese Studie beschreibt einen Methode um, aufgrund der veränderten Verbreitung von Fischarten, Gewässer, die anfällig auf Klimaveränderungen sind, zu Identifizieren. In einem sechsstufigen Ansatz wird Schritt für Schritt aufgezeigt, wie aus Klima-, Lebensraum- und Fischverbreitungsdaten die Auswirkungen des Klimawandels bewertet werden kann.

4.5 Reviews und zusammenfassende Studien

4.5.1 International

4.5.1.1 Zusammenfassung

- Der Einfluss des Klimawandels auf den Atlantischen Lachs ist weltweit spürbar und wirkt sich in vielen Punkten negativ aus
- Viele negative Faktoren (Aquakultur, Überfischung, Besatz usw.) wirken synergisch mit dem Klimawandel und sind somit gravierender als es jeder Stressor für sich alleine wäre könnte
- Vorsorgliche, ganzheitliche und integrative Massnahmen sind nötig, um die Lachspopulationen zu schützen und zu unterstützen
- Es besteht weiterer Forschungsbedarf um die Effekte des Klimawandels alleine und in Kombination mit anderen Stressoren zu verstehen und um daraus Management- und Schutzstrategien für den Lachs abzuleiten.

4.5.1.2 Jonsson & Jonsson [56], A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon Salmo salar and brown trout Salmo trutta, with particular reference to water temperature and flow:

Im Hinblick auf den Klimawandel wird der Effekt von Wassertemperatur und Abfluss auf Migration, Entwicklung, Wachstum und späteren, lebensphasenspezifischen Eigenschaften Atlantischer Lachse zusammengefasst. Die Autoren erwarten, dass sich die Verbreitungsgebiete in den Norden verschieben und Populationen am südlichen Rande aussterben. Frühere Abwanderung, späteres Laichen, jüngeres Alter bei der Smoltifikation und sexueller Reife und eine höhere Anfälligkeit auf Krankheiten werden prognostiziert.

4.5.1.3 Todd et al. [57], Getting into hot water? Atlantic salmon responses to climate change in freshwater and marine environments:

Änderungen der saisonalen Temperatur und des Abflussregimes werden komplexe Auswirkungen in Bezug auf die Überlebensrate, das Wachstum, Smoltifikation und den Zeitpunkt der Abwanderung des Lachses haben. Änderungen der Meerestemperatur werden sich direkt auf die Überlebensrate der Post-Smolts auswirken und indirekt die Verfügbarkeit von Beutetieren und damit die langfristige Überlebensrate, sowie das Wachstum, die Reifung und den Zeitpunkt der Laichwanderung beeinflussen.

4.5.1.4 IKSR [41], Gesamtanalyse einschließlich Bewertung der Wirksamkeit der laufenden und geplanten Maßnahmen im Rheingebiet mit Blick auf die Wiedereinführung von Wanderfischen:

Diese Studie hat zum Ziel, die Wirksamkeit bereits erfolgter Maßnahmen zur Wiedereinführung anadromer Wanderfische im Rheineinzugsgebiet mit Schwerpunkt Lachs aufzuzeigen.
Hinsichtlich Temperatur kann gesagt werden, dass vorrangig sommerlicher Höchsttemperaturen relevant sind. Während der Smoltmigration und zur Laichzeit sind die Temperaturverhältnisse im Rhein und in den Reproduktionsgebieten bisher unproblematisch.

4.5.1.5 ICES [58], Report of the Workshop on Potential Impacts of Climate Change on Atlantic Salmon Stock Dynamics:

Die vielfältigen Auswirkungen des Klimawandels auf den Lachs werden auf globaler und lokaler Ebene zusammengefasst.
Die Autoren betonen, dass nebst dem Klimawandel auch noch andere anthropogene Faktoren einen grossen Einfluss auf das Verschwinden des Lachses haben: Aquakultur, Überfischung, Besatz und viele mehr, die insgesamt synergisch mit dem Klimawandel wirken, gravierender als es jeder Stressor für sich alleine könnte. Es wird als äusserst unwahrscheinlich angesehen, dass der Atlantische Lachs innerhalb der nächsten 100 Jahre weltweit aussterben wird, es werden jedoch etliche Populationen erhebliche Bestandseinbußen erleiden, insbesondere am südlichen Ende des Verbreitungsgebiets.

4.5.2 Schweiz

4.5.2.1 Zusammenfassung

- Die Wiederansiedlung des Lachses in der Schweiz ist im Hinblick auf den zu erwartenden Temperaturanstieg kritisch zu prüfen und es gilt Massnahmen entsprechend anzupassen
- Die Fortpflanzung des Lachses in der Schweiz wird sich in Zukunft verstärkt auf die kühleren Zuflüsse des Hochrheins konzentrieren

4.5.2.2 Dönni et al. [6], Die Rückkehr des Lachses in der Schweiz – Potential und Perspektiven. Auslegeordnung:

In dieser Studie wurden die Schlüsselaspekte für eine erfolgreiche Wiederansiedlung des Lachses in der Schweiz analysiert. Es konnte aufgezeigt werden, dass oberhalb von Basel verhältnismässig grosse Flächen vorhanden sind, die geeignet sind als Juvenil- und Laichhabitat für den Lachs, und eine Rückkehr des Lachses ist grundsätzlich erreichbar. Dies auch unter Umsetzung verschiedener Mass-

nahmen, wie die Erstellung von Wanderhilfen an Hindernissen, der Umsetzung weiterer Revitalisierungsprojekte, der Reaktivierung des Geschiebetriebes und der Minderung der negativen Einflüsse von Schwall und Sunk. Die maximalen Wassertemperaturen im Sommer sind möglicherweise weniger entscheidend als die schleichende Erwärmung der Gewässer. Deren Relevanz gilt es jedoch, wie auch die von Fischkrankheiten, invasive Neozoen und andere Risikofaktoren, im Auge zu behalten.

4.5.2.4 Dönni & Spalinger [18], Wassertemperatur und Fische in Fliessgewässern:

Die Bemühungen zur Wiederansiedlung des Atlantischen Lachses in Potentialgewässern der Schweiz sind unter dem Aspekt der steigenden Wassertemperaturen kritisch zu prüfen. Die Lachswanderung flussaufwärts im Rhein sollte trotz hohen Temperaturen in Zukunft möglich sein, wenn auch zeitweise etwas verzögert. Die Temperaturen in den Potentialgewässern während dem Ablaichen und den frühen Entwicklungsstadien werden ebenfalls nicht als problematisch angesehen. Bei den geschlüpften Junglachsen hingegen sieht es anders aus: Die optimale Temperatur wird oft überschritten, jedoch nur selten um so viel, dass Ausweichen in kühlere Gewässerteile notwendig ist. Die Autoren sagen voraus, dass sich die Fortpflanzung des Lachses in Zukunft verstärkt auf die kühleren Zuflüsse des Hochrheins konzentrieren, welche oft ein gutes Potenzial an Laich- und Jungfischhabitat aufweisen. Die Wichtigkeit von guter Vernetzung und der Erreichbarkeit kühlerer Zuflüsse und Temperaturrefugien wird mehrfach betont.

5 Literaturverzeichnis

1. Mills, D. H. (1989). Ecology and Management of Atlantic Salmon, London: Chapman and Hall.
2. Meretsky, Jonathon W. Atwell, & Jeffrey B. Hyman, "Migration and Conservation: Frameworks, Gaps, and Synergies in Science, Law, and Management", 41 ENVTL. L. 447, 458 (2011).
3. IKSR 2007, Bericht Nr. 162-d, Lachs 2020 "Der Weg zu selbst erhaltenden Populationen von Wanderfischen im Einzugsgebiet des Rheins".
4. BAFU (Hrsg.) 2019: "Liste der National Prioritären Arten und Lebens-räume. In der Schweiz zu fördernde prioritäre Arten und Lebensräume." Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1709: 99 S.
5. Vonlanthen, P., Dönni, W., Ninck, L., Kreienbühl. T. 2020. Wiederansiedlungskonzept Atlantischer Lachs Schweiz – Für die Jahre 2021-2035. Aquabios GmbH, Fischwerk GmbH Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU).
6. Dönni, W., Spalinger, L., Knutti, A. 2016: "Die Rückkehr des Lachses in der Schweiz – Potential und Perspektiven. Auslegeordnung." Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt,55 S.
7. NCCS (Hrsg.) 2018: CH2018 - "Klimaszenarien für die Schweiz. " National Centre for Climate Services, Zürich. 24 S. ISBN-Nummer 978-3-9525031-0-2
8. BAFU (Hrsg.) 2019: "Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2018. Abfluss, Wasserstand und Wasserqualität der Schweizer Gewässer." Bundesamt für Umwelt, Bern.
9. Gunnes, Knut. "Survival and development of Atlantic salmon eggs and fry at three different temperatures." Aquaculture 16.3 (1979): 211-218.
10. Elliott, J. M., Elliott, J. A. (2010) "Temperature requirements of Atlantic salmon Salmo salar, brown trout Salmo trutta and Arctic charr Salvelinus alpinus: predicting the effects of climate change." Journal of Fish Biology 77, 1793-1817.
11. Poxton, M. G. "Incubation of salmon eggs and rearing of alevins: natural temperature fluctuations and their influence on hatchery requirements." Aquacultural engineering 10.1 (1991): 31-53.
12. Javaid, M. Yaqub, and John M. Anderson. "Thermal acclimation and temperature selection in Atlantic salmon, Salmo salar, and rainbow trout, S. gairdneri." Journal of the Fisheries board of Canada 24.7 (1967): 1507-1513.
13. Elliott, J. M. "Tolerance and resistance to thermal stress in juvenile Atlantic salmon, Salmo salar." Freshwater Biology 25.1 (1991): 61-70.
14. Elliott, J. M. "Some aspects of thermal stress on fresh-water teleosts." Stress and fish. (1981): 209-245.
15. Bjornn, TCj, and D. W. Reiser. "Habitat requirements of salmonids in streams." American Fisheries Society Special Publication 19.837 (1991): 138.
16. Beitinger, Thomas L., Wayne A. Bennett, and Robert W. McCauley. "Temperature tolerances of North American freshwater fishes exposed to dynamic changes in temperature." Environmental biology of fishes 58.3 (2000): 237-275.
17. Aas, Øystein, et al., eds. Atlantic salmon ecology. John Wiley & Sons, 2010
18. Dönni, W., Spalinger, L. 2018: "Wassertemperatur und Fische in Fliessgewässern," Studie im Auftrag des BAFU, unveröffentlicht
19. Alabaster, J. S.; Lloyd, R. 1982: "Water quality criteria for freshwater fish." Butterworths, London, 361 p.
20. Crawshaw, L. I. 1977: "Physiological and behavioral reactions of fishes to temperature change. "Journal of the Fisheries Research Board of Canada 34: 730-734.
21. Reynolds, W. W. 1977: "Temperature as a proximate factor in orientation behaviour. " Journal of the Fisheries Research Board of Canada 34: 734- 739.
22. Ninck, L., Dönni, W. 2019: Die Rückkehr des Lachses in der Schweiz - Habitatangebot für juvenile Lachse. Phase II. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt: 27 S
23. Schneider, J. (2017) Revitalisierung von Laich und Aufwuchsgewässern - was gefällt dem Lachs? In: 174411, S. (ed.). Berner Fachhochschule, Burgdorf.
24. Jonsson, N., B. Jonsson, and I. A. Fleming. "Does early growth cause a phenotypically plastic response in egg production of Atlantic salmon?." Functional Ecology (1996): 89-96.
25. King, H. R., N. W. Pankhurst, and M. Watts. "Reproductive sensitivity to elevated water temperatures in female Atlantic salmon is heightened at certain stages of vitellogenesis." Journal of Fish Biology 70.1 (2007): 190-205.
26. Jonsson, Anders G. Finstad Bror. "Effect of incubation temperature on growth performance in Atlantic salmon." Marine Ecology Progress Series 454 (2012): 75-82.
27. Jonsson, B., & Jonsson, N. (2018). "Egg incubation temperature affects the timing of the Atlantic salmon Salmo salar homing migration." Journal of Fish Biology,93, 1016–1020
28. Jonsson, Bror, and Nina Jonsson. "Phenotypic plasticity and epigenetics of fish: embryo temperature affects later-developing lift-history traits." Aquatic Biology 28 (2019): 21-32.
29. Todd, Christopher D., et al. "Detrimental effects of recent ocean surface warming on growth condition of Atlantic salmon." Global change biology 14.5 (2008): 958-970.

30. Jonsson, Bror, Nina Jonsson, and Jon Albretsen. "Environmental change influences the life history of salmon Salmo salar in the North Atlantic Ocean." Journal of fish biology 88.2 (2016): 618-637.
31. Jonsson, Nina, Bror Jonsson, and Lars Petter Hansen. "Does climate during embryonic development influence parr growth and age of seaward migration in Atlantic salmon (Salmo salar)?." Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 62.11 (2005): 2502-2508.
32. Jonsson, Bror, Anders G. Finstad, and Nina Jonsson. "Winter temperature and food quality affect age at maturity: an experimental test with Atlantic salmon (Salmo salar)." Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 69.11 (2012): 1817-1826.
33. Kallio-Nyberg, I., Saloniemi, I., Koljonen, M., (2020). "Increasing temperature associated with increasing grilse proportion and smaller grilse size of Atlantic salmon", Applied Ichthyology, Volume 36, Issue 3, 288 – 297
34. Bal, Guillaume, Etienne Rivot, Etienne Prévost, Cyril Piou, and Jean-Luc Baglinière. 2011. "Effect of water temperature and density of juvenile salmonids on growth of young-of-the-year Atlantic salmon Salmo salar." Journal of Fish Biology 78: 1002–1022.
35. Jonsson and Jonsson, 2014 "Time and size at seaward migration influence the sea survival of Salmo salar" J. Fish Biol., 84 (5) (2014), pp. 1457-1473
36. Kennedy, R. J., and W. W. Crozier. "Evidence of changing migratory patterns of wild Atlantic salmon Salmo salar smolts in the River Bush, Northern Ireland, and possible associations with climate change." Journal of Fish Biology 76.7 (2010): 1786-1805.
37. Otero J, L'abee-Lund JH, Castro-Santos Tet al.(2014) "Basin-scale phenology and effects of climate variability on global timing of initial seaward migration of Atlantic salmon (Salmo salar). " Global Change Biology,20,61–75
38. Jutila, E., E. Jokikokko, and M. Julkunen. "The smolt run and postsmolt survival of Atlantic salmon, Salmo salar L., in relation to early summer water temperatures in the northern Baltic Sea." Ecology of Freshwater Fish 14.1 (2005): 69-78.
39. Teichert, Nils, et al. "Development of an accurate model to predict the phenology of Atlantic salmon smolt spring migration." Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 30.8 (2020): 1552-1565.
40. Strople, Leah C., et al. "The effect of environmental conditions on Atlantic salmon smolts'(Salmo salar) bioenergetic requirements and migration through an inland sea." Environmental Biology of Fishes 101.10 (2018): 1467-1482.
41. IKSR. 2009. "Gesamtanalyse einschließlich Bewertung der Wirksamkeit der laufenden und geplanten Maßnahmen im Rheingebiet mit Blick auf die Wiedereinführung von Wanderfischen. " Nr. 167. Interna-tionale Kommission zum Schutz des Rheins.
42. Lennox R. J., et al. "Bioenergetic consequences of warming rivers to adult Atlantic salmon Salmo salar during their spawning migration." Freshwater Biology 63.11 (2018): 1381-1393.
43. Corey Emily, et al. "Comparing the behavioural thermoregulation response to heat stress by Atlantic salmon parr (Salmo salar) in two rivers." Ecology of Freshwater Fish 29.1 (2020): 50-62
44. Nicola, Graciela G., et al. "Local and global climatic drivers of Atlantic salmon decline in southern Europe." Fisheries Research 198 (2018): 78-85.
45. Tsang, Yinphan 2020, Conserving stream fishes with changing climate: Assessing fish responses to changes in habitat over a large region, Science of the Total Environment
46. Godwin, Sean C., et al. "Increasing temperatures accentuate negative fitness consequences of a marine parasite." Scientific Reports 10.1 (2020): 1-10.
47. Belchik, Michael, Dave Hillemeier, and Ronnie M. Pierce. "The Klamath River fish kill of 2002; analysis of contributing factors." Yurok Tribal Fisheries Program. 42pp 2.3 (2004): 4.
48. Tetzlaff, D., et al. "Influence of hydrological regimes on the pre-spawning entry of Atlantic salmon (Salmo salar L.) into an upland river." River Research and Applications 24.5 (2008): 528-542.
49. Tetzlaff, D., Soulsby, C., Youngson, A. F., Gibbins, C., Bacon, P. J., Malcolm, I. A. & Langan, S. (2005). Variability in stream discharge and temperature: a preliminary assessment of the implications for juvenile and spawning Atlantic salmon. Hydrology and Earth System Science **9,** 193–208.
50. Gillson, Jonathan P., et al. "Can aspects of the discharge regime associated with juvenile Atlantic salmon (Salmo salar L.) and trout (S. trutta L.) densities be identified using historical monitoring data from five UK rivers?." Fisheries Management and Ecology 27.6 (2020): 567-579.
51. Badoux, Alexandre, et al. "Geschiebetransport und Forellenhabitate in Gebirgsflüssen der Schweiz: mögliche Auswirkungen der Klimaänderung." Wasser Energie Luft 106.3 (2014): 200-209
52. DeVries, Paul. "Riverine salmonid egg burial depths: review of published data and implications for scour studies." Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 54.8 (1997): 1685-1698.
53. Sundt-Hansen, L. E., et al. "Modelling climate change effects on Atlantic salmon: Implications for mitigation in regulated rivers." Science of the Total Environment 631 (2018): 1005-1017.

54. Huntingford, F. A., et al. "How juvenile Atlantic salmon, Salmo salar L., respond to falling water levels: experiments in an artificial stream." Fisheries Management and Ecology 6.5 (1999): 357-364.
55. Turner, Margot, and Michael Stewardson. "Hydrologic indicators of hydraulic conditions that drive flow–biota relationships." Hydrological Sciences Journal 59.3-4 (2014): 659-672.
56. Jonsson, B. & Jonsson, N. (2009). "A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon Salmo salar and brown trout Salmo trutta, with particular reference to water temperature and flow."Journal of Fish Biology 75, 2381–2447.
57. Todd, Christopher D., et al. "Getting into hot water? Atlantic salmon responses to climate change in freshwater and marine environments." Atlantic salmon ecology (2011): 409-444.
58. ICES. 2017. "Report of the Workshop on Potential Impacts of Climate Change on Atlantic Salmon Stock Dynamics" (WKCCISAL), 27–28 March 2017, Copenhagen, Den-mark. ICES CM 2017/ACOM:39. 90 pp..
59 Wahli, T. & Zopfi, D. "Vergleich der Empfänglichkeit von Lachs (Salmo salar), Aesche (Thymallus thymallus) und Bachforelle (Salmo trutta fario) für Tetracapsuloides bryosalmonae, dem Erreger der Proliferativen Nierenkrankheit", Projektbericht (2016), Zentrum für Fisch- und Wildtiermedizin und Amt für Wald beider Basel, Jagd- und Fischereiwesen