MASTER OF SCIENCE IN ENGINEERING

Wasserbauliche Massnahmen zur Förderung kälteliebender Fischarten der Schweiz angesichts des Klimawandels

Masterarbeit Frühlingssemester 2020

Studiengang: Master of Science in Engineering MSE
MRU Civil Engineering & Building Technology
Wasserbau

Vorgelegt von: Martina Küng

Betreut durch: Dr. Jolanda Jenzer Althaus

Adrian Aeschlimann

Advisorin: Dr. Jolanda Jenzer Althaus

Ort und Datum: Bern, 24. Juli 2020

Selbständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbständig angefertigt, nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemässe Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Bern, 24. Juli 2020

Martina Küng

Zusammenfassung

Die Masterarbeit ist Teil des Pilotprogrammes des Bundes „Anpassungen an den Klimawandel“, Teilprojekt 1 Kanton Aargau Wasserbau. **Im ersten Teil** der vorliegenden Arbeit wird die bisherige Revitalisierungspraxis des Kantons Aargau aus der Optik kälteliebender Fischarten reflektiert. **Im zweiten Teil** werden die Habitatvorlieben und -anforderungen der Leitfischarten Äsche und Bachforelle zusammengetragen, wobei die steigende Wassertemperatur gemäss Klimaszenarien besonders berücksichtigt wird. **Im dritten Teil** werden die wasserbaulichen Massnahmen bzw. Massnahmenkombinationen, welche sich positiv bzw. negativ auf die Bachforellenpopulation ausgewirkt haben, diskutiert. **Ziel ist es**, eine wissenschaftliche Grundlage für Empfehlungen zuhanden des Wasserbaus zu erarbeiten.

Die Auswertungen und linearen Regressionsmodelle zeigen einen signifikanten und positiven Zusammenhang zwischen IAM Attraktivität und Forellenbiomasse und Gesamtbiomasse. Höhere Habitatattraktivitätswerte werden in Projekten erreicht, bei welchen Massnahmen zur Entwicklung der Sohle und Ufer in höheren Dichten umgesetzt wurden. Zur Förderung der Bachforelle wird empfohlen, den Schwerpunkt der wasserbaulichen Massnahmen auf Instream-Massnahmen in der Sohle, d.h. höhere Dichten an Strukturen in der Gewässersohle, vorzugsweise mit Totholz, zu setzen.

Der Alet hat bei Wasserbauprojekten profitiert, bei welchen in grösserem Stile Gerinneveränderungen vorgenommen wurden. Gerinneveränderungen sind deshalb in Zukunft wünschenswert, aber nur in Kombination mit Massnahmen zur Senkung der Wassertemperatur und Strukturierung des Gerinnes (Morphologie-Instream).

Mit einem weiteren Anstieg der Wassertemperaturen in den Schweizer Fliessgewässern ist zu rechnen. Um dem Habitatverlust der Bachforelle aufgrund des Wassertemperaturanstieges entgegenzuwirken, müssen Massnahmen der Massnahmengruppe Wassertemperatur prioritär berücksichtigt werden. Das heisst Niederwasserrinnen, Beschattung und Anbindung von Seitengewässern und Oberläufen sind in den Wasserbauprojekten umzusetzen.

Aufgrund der Auswertungen der wasserbaulichen Massnahmen wird empfohlen zukünftig mit einer vorgängigen Analyse der ökologischen Defizite, der Definition der Projektziele und Zielarten die dominanten Massnahmengruppen, sowie spezifische Massnahmen auszuwählen. Zudem wird für die Vergleichbarkeit der Erfolgskontrollen eine Vereinheitlichung der Parameter, Messmethoden und Zeiträume empfohlen.

Inhalt

1 Einleitung 1

2 Revitalisierungen Kanton Aargau aus Sicht der kälteliebenden Fischarten 2
2.1 Fragestellung und Hypothesen 2
2.2 Methoden 3
2.2.1 Parameter 3
2.2.2 Korrelation 5
2.2.3 Wasserbauprojekte Kanton Aargau 5
2.2.4 Grundlagen 6
2.3 Auswertung 7
2.3.1 Wasserbauliche Massnahmen 7
2.3.2 Habitatstrukturen 12
2.3.3 Fische 14
2.4 Diskussion 16
2.4.1 IAM Attraktivität und Massnahmengruppe Morphologie - Instream 17
2.4.2 IAM Attraktivität und Biomasse 17
2.4.3 Weitere Faktoren 23
2.5 Fazit 29

3 Anforderungen Leitfischarten an ihren Lebensraum, Fokus Bachforelle und Äsche 32
3.1 Bachforelle (*Salmo trutta fario*) 32
3.1.1 Wassertemperaturen 32
3.1.2 Sauerstoff 33
3.1.3 Nahrungsangebot 34
3.1.4 Laichsubstrat 35
3.1.5 Einstände für alle Altersstufen 36
3.1.6 Wandermöglichkeiten 39
3.1.7 Zusammenfassung 41
3.2 Äsche (*Thymallus thymallus*) 42
3.2.1 Wassertemperaturen 43
3.2.2 Nahrungsangebot 43
3.2.3 Wandermöglichkeiten 44
3.2.4 Habitate für alle Altersstufen 45
3.2.5 Zusammenfassung 47

3.3 Alet (*Leuciscus cephalus)* 49

4 Grundlage Empfehlungen wasserbauliche Massnahmen 51
4.1 Vorgehen 51
4.2 Bewertung 53
4.3 Diskussion 54
4.3.1 Bachforelle 54
4.3.2 Alet 56
4.3.3 Wassertemperatur 57
4.4 Fazit 59

5 Auswertungen Temperaturdaten 61

6 Fazit 63
6.1 Resultate 63
6.2 Einschränkungen 66
6.3 Weitergehende Forschungsfragen 67

7 Literaturverzeichnis 69

Abbildungsverzeichnis 72

Tabellenverzeichnis 73

Anhang A

Lineare Regressionsmodelle t-Test Daten, Signifikanzniveau α = 1% A-1

Anhang B

Koordinaten Logger Bünz und Wigger B-1

Bern, 24. Juli 2020

1 Einleitung

Die Masterarbeit ist Teil des Pilotprogrammes des Bundes „Anpassungen an den Klimawandel“, Teilprojekt 1 Kanton Aargau Wasserbau. Dieses Teilprojekt behandelt die Fragestellung, wie wasserbauliche Eingriffe für Hochwasserschutz und Revitalisierungen angesichts der Klimaszenarien umgesetzt werden sollen, damit kälte- und sauerstoffliebende Fischarten mittel- bis langfristig in heimischen Gewässern überleben können.

Im Rahmen einer Semesterarbeit wurden in einer Literaturrecherche zentrale Aspekte zu Klimawandel, Wassertemperatur und kälteliebenden Fischarten zusammengetragen. Diese Arbeit ist die Grundlage zur Masterarbeit, in der nun vertiefende Untersuchungen zu ungeklärten Aspekten anstehen.

Die Erkenntnisse für die Empfehlungen werden aus bereits realisierten Gewässerabschnitten abgeleitet, indem die umgesetzten wasserbaulichen Massnahmen den Erfolgskontrollen hinsichtlich des Fischbestands gegenübergestellt werden. Diese Analyse zeigt auf, welche wasserbaulichen Massnahmen sich auf den Bestand kälteliebender Fischarten positiv auswirken, und welche keinen oder sogar einen negativen Effekt hervorgerufen haben. Als Grundlage für die Masterarbeit dienen Wasserbauprojekte im Kanton Aargau, welche in den letzten 20-25 Jahren umgesetzt worden sind.

Aufgrund der verschiedenen Aspekte, welche in der Masterarbeit vertieft angeschaut werden, wird die Arbeit in drei Teile unterteilt. Im ersten Teil erfolgt eine Reflexion der bisherigen Revitalisierungspraxis des Kantons Aargau aus der Optik kälteliebender Fischarten. Im zweiten Teil werden in einer Literaturrecherche die Habitatvorlieben und -anforderungen der Leitfischarten Äsche und Bachforelle zusammengetragen, wobei die steigende Wassertemperatur gemäss Klimaszenarien besonders berücksichtigt wird. Im dritten Teil wird analysiert, welche wasserbauliche Massnahmen bzw. Massnahmenkombinationen bei Wasserbauprojekten, welche sich positiv auf die Bachforellenpopulation auswirken, umgesetzt worden sind und welche Massnahmen bzw. Massnahmenkombinationen sich dabei negativ auf die Bachforellenpopulationen ausgewirkt haben.

Ziel der Masterarbeit ist es, mit den gewonnenen Erkenntnissen aus der Analyse der Wasserbauprojekte, der wasserbaulichen Massnahmen und der Habitatvorlieben und -anforderungen der Leitfischarten eine wissenschaftliche Grundlage für Empfehlungen zuhanden des Wasserbaus zu erarbeiten. Aus den gewonnenen Erkenntnissen aus dieser Arbeit werden vorerst einmal persönliche Empfehlungen abgeleitet.

2 Revitalisierungen Kanton Aargau aus Sicht der kälteliebenden Fischarten

In den letzten 20-25 Jahren wurden schweizweit verschiedene Gewässerabschnitte aufgewertet, sowohl ökologisch wie auch hinsichtlich des Hochwasserschutzes. Diese Revitalisierungen erfolgten gemäss dem Stand der Technik und des Wissens der jeweiligen Projektierungsjahre und unterscheiden sich daher z.T. deutlich. Während anfänglich hauptsächlich aufgeweitet und experimentiert wurde, zeichnet sich neulich ein Trend mit gezieltem Fokus auf Förderung der Fische ab. Kälteliebende Fischarten haben deshalb nicht in allen aufgewerteten Gewässerabschnitten profitieren können.

Für die vorliegende Arbeit hat der Kanton Aargau die Projektgrundlagen vieler seiner revitalisierten Gewässerabschnitte zur Verfügung gestellt. In vorbildlicher Weise wurden bei vielen dieser Wasserbauprojekte Erfolgskontrollen durchgeführt. Eine Zusammenfassung der Erfolgsergebnisse, sowie ein Vergleich zwischen den Wasserbauprojekten aus Sicht der kälteliebenden Fischarten aber fehlten bisher (vor allem aus Sicht der Bachforelle, da es sich um Gewässer der Forellenregion handelt). Im vorliegenden Kapitel 2 soll eine solche Zusammenstellung und eine Reflexion der bisherigen Revitalisierungspraxis des Kantons Aargau aus der Optik kälteliebender Fischarten erfolgen.

2.1 Fragestellung und Hypothesen

Folgende Fragen werden in Kapitel 2 diskutiert und folgende Hypothesen getestet:

- Wasserbauliche Massnahmen: Zusammenfassung der umgesetzten wasserbaulichen Massnahmen (soweit sie auf den Wasserbauplänen erkennbar sind). Deren Reflexion bezüglich Entwicklung der Sohl- und Uferstrukturen.
- Haben die Wasserbauprojekte eine strukturelle Aufwertung bewirkt? Wurden attraktive Fischhabitate geschaffen? Entstand eine Diversität in den aufgewerteten Gewässerabschnitten (Substrat, Fliessgeschwindigkeit, Wassertiefe)?
- Wie haben sich die Gesamtbiomasse und die Artenzusammensetzung verändert? Welche Fischarten haben profitiert und welche dominieren? Wie hat sich der Bestand von insbesondere kälteliebenden Fischarten entwickelt?
- Korrelation: Gibt es eine Korrelation zwischen den Analysen all dieser Projekte?
    - Hypothese 1: Je höher der IAM Attraktivitätswert ist, desto höher ist die Gesamtbiomasse.
    - Hypothese 2: Je höher der IAM Attraktivitätswert ist, desto höher ist die Forellenbiomasse.
    - Hypothese 3: Je stärker der IAM Attraktivitätswert durch die Revitalisierung zunimmt, desto stärker nimmt die Forellenbiomasse zu.
    - Hypothese 4: Je älter das Wasserbauprojekt ist, desto stärker hat der IAM Attraktivitätswert zugenommen.

- Hypothese 5: Je älter das Wasserbauprojekt ist, desto stärker hat die Forellenbiomasse zugenommen.

Der Forellenbestand wird massgeblich durch morphologische Strukturen im Gewässer beeinflusst. Vonlanthen et al. (2018) haben bereits gezeigt, dass der Index IAM Attraktivität mit der Gesamtbiomasse (kg/ha) der Forellenregionen signifikant und positiv korreliert. Bei Gewässern der Forellenregion ist demnach bei einem höheren IAM Attraktivität eine höhere Gesamtbiomasse zu erwarten. Die Hypothese 1 überprüft, ob die vorliegenden Daten diese positive und signifikante Korrelation bestätigt. Da eine höhere Gesamtbiomasse nicht zwingend mit einer höheren Forellenbiomasse gleichzusetzen ist, muss Hypothese 2 geprüft werden. Hypothese 3 testet, ob die Stärke der Veränderung des IAM Attraktivitätswertes durch die Revitalisierung mit der Stärke der Veränderung der Forellenbiomasse korreliert. Es geht darum, den Einfluss des Wasserbauprojektes auf den IAM Attraktivität bzw. die Forellenbiomasse zu beurteilen. Mit Hypothese 4 und 5 wird der Einfluss des Projektalters auf die Zunahme der Forellenbiomasse bzw. des IAM Attraktivität getestet.

Ziel dieser Zusammenstellung ist es, festzustellen, wie sich die Wasserbauprojekte auf die kälteliebenden Fischarten ausgewirkt haben und ob eine Verbesserung in der Bachforellenpopulation erkennbar ist. Falls dies nicht der Fall ist, soll der Negativbefund diskutiert werden.

2.2 Methoden

2.2.1 Parameter

Die Daten der Erfolgskontrollen sind aufgrund der fehlenden einheitlichen methodischen Vorgaben von Seiten BAFU sehr unterschiedlich (Vorgaben sind anfangs 2020 erschienen). Es wurden unterschiedliche Parameter benutzt, verschiedene Tier- und Pflanzgruppen angeschaut (Makrozoobenthos, Krebse, Fische etc.), sowie die gleichen Parameter unterschiedlich bewertet (z.B. Mesohabitat vs. IAM).

Für eine systematische Analyse und einen Vergleich der aufgenommenen Daten, müssen dieselben Parameter mit der gleichen Methodik aufgenommen werden. Da der Schwerpunkt der Arbeit auf kälteliebenden Fischarten liegt und der Fischbestand massgeblich durch morphologische Strukturen im Gewässer beeinflusst wird (Vonlanthen, et al., 2018), wurden die zwei Parameter, **Habitatstruktur** und die **Tierartengruppe Fische**, ausgewählt. Ein Vergleich des methodischen Vorgehens zwischen den Daten der revitalisierten Gewässerabschnitte im Kanton Aargau ergab, dass die beiden ausgewählten Parameter grösstenteils mit der Methodik IAM und quantitative Befischung aufgenommen wurden. Deshalb liegt der Schwerpunkt der Auswertung auf Projekten, bei denen der IAM Diversität und Attraktivität berechnet, sowie eine quantitative Befischung durchgeführt wurde. Im Idealfall liegt eine Vorher-Nachher Aufnahme vor, mindestens jedoch ein Vergleich der Kontrollstrecke zur revitalisierten Strecke. Eine Aufnahme in einer Kontrollstrecke liegt auch bei Nachheraufnahmen immer vor, damit Verbesserungen im revitalisierten Abschnitt eindeutig der Revitalisierung zugeschrieben und eine allgemeine Verbesserung des Gewässers ausgeschlossen werden kann.

Der IAM (Indice d`attractivité morphodynamique) ist eine standardisierte Methode zur Erfassung der Gewässermorphologie von Fliessgewässern, wobei die Vielfalt und Attraktivität des Gewässerabschnittes quantitativ bewertet wird (IAM Attraktivität und IAM Diversität). Die Feldaufnahmen erfolgen zum einen in 10-15 Querprofilen (Aufnahme: Tiefe und Fliessgeschwindigkeit), zum anderen werden die charakteristischen benetzten Substrate kartiert. Aus den Feldaufnahmen entstehen verschiedene Layer (Wassertiefe, Fliessgeschwindigkeit, Substrat/Habitat), welche verschnitten werden, um den Attraktivitäts- und den Diversitätswert zu berechnen. Der IAM Attraktivität bewertet das Vorhandensein der attraktiven Habitate, wie Totholz, unterspülte Ufer etc. Der IAM Diversität hingegen berechnet sich aus der Variabilität der Fliessgeschwindigkeit, des Substrats und der Tiefe. Beide IAM werden in fünf Klassen eingeteilt.

Eine quantitative Befischung erlaubt, die Fischdichte in einem Gewässerabschnitt so genau wie möglich abschätzen zu können. Die Populationsgrösse wird auf der Grundlage der Befischungsdaten geschätzt. Die häufigste Methode der quantitativen Befischung ist die Removal-Methode, wobei ein Abschnitt mehrfach befischt wird und die Fische getrennt nach Durchgang in Becken gesammelt werden. Nach dem letzten Befischungsdurchgang werden die Fische vermessen und gezählt und ins Gewässer zurückgebracht (Peter & Erb, 1996). Die Schätzung der Populationsgrössen erfolgte in den aargauischen Projekten nach Carle & Strub (1978).

2.2.2 Korrelation

Um die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Analysen all dieser Projekte zu prüfen, wird das Modell lineare Regression angewandt. Anhand einer linearen Regression (t-Test) wird geprüft, ob die Hypothesen bestätigt werden können. Getestet wird auf ein Signifikanzniveau von $\alpha = 1\%$. Ist der p-Wert kleiner als α, $p<0.01$, dann werden die Hypothesen in Kapitel 2.1 angenommen.

Aufgrund der geringen Datenmenge sind die Modelle anfälliger auf Ausreisser. Hingegen ist es schwieriger mit einer kleinen Datenmenge signifikante lineare Regressionsmodelle zu erreichen. Beurteilt und diskutiert wird beim jeweiligen linearen Regressionsmodell die Signifikanz und das Bestimmtheitsmass R^2, welches ein Gütemass des Modells ist.

2.2.3 Wasserbauprojekte Kanton Aargau

Die Wasserbauprojekte im Kanton Aargau an der Surb, Bünz und Wigger, welche bereits mit der Projektgruppe an der Gewässerbegehung vom 11.07.2019 angeschaut wurden, werden im Rahmen der Masterarbeit vertieft untersucht. Als Untersuchungsobjekte dienen zudem weitere Wasserbauprojekte, bei denen ökologische Erfolgskontrollen durchgeführt worden sind (Holzbach, Landbach, Pfaffnern, Uerke, Wyna).

Insgesamt ergab die Analyse der Erfolgskontrollen, dass von ca. 40 Wasserbauprojekten (je nach Zählweise) bei 15 Projekten die Parameter Fische und/oder Habitatstrukturen aufgenommen wurden, sowie eine Vorher-Nachheraufnahme vorhanden ist, zumindest aber ein Vergleich mit einer Kontrollstrecke besteht. Von diesen 15 Projekten wurde bei neun Wasserbauprojekten der IAM erhoben und/oder eine quantitative Befischung durchgeführt. Die Zusammenstellung der neun Projekte ist in Tabelle 1 zu finden. Aufgrund der einheitlichen Bewertung der Strukturen und der Fischpopulation können diese Projekte untereinander verglichen und im weiteren Verlauf der Arbeit ausgewertet werden. Die Auswertungen und Aussagen im Kapitel 2 beziehen sich auf diese neun Wasserbauprojekte.

Tabelle 1: Neun Wasserbauprojekte des Kantons Aargau, bei welchen die Parameter Fische und / oder Habitatstruktur mit den Methoden IAM und quantitative Befischung aufgenommen wurden. Diese Projekte dienen aufgrund der einheitlichen Methodik im weiteren Verlauf als Studienobjekte.

Gewässer	Abschnitts-/Projektbezeichnung	Baujahr	Aufnahmen	erhobene Parameter
Surb	Längsvernetzung ARA Tegerfelden	2013	2015 / 2020 / 2025	IAM + quantitative Abfischung
Surb	Blockrampe Gislibachmündung Tegerfelden	2014	2015 / 2020 / 2025	IAM + quantitative Abfischung
Wigger	Hochwasserschutz / Revitalisierung Brittnau	2009	2015 / 2019 / 2020	IAM + quantitative Abfischung
Wigger	Hochwasserschutz / Revitalisierung Brittnau	2018	2015 / 2019 / 2020	IAM + quantitative Abfischung
Wigger	Revitalisierung ASTRA Rothrist	2015	2018 / 2020	IAM
Bünz	Revitalisierung Bünzen / Boswil	2007	2018	IAM + quantitative Abfischung
Bünz	Hochwasserschutz Othmarsingen	2002	2005 / 2008 / 2014	IAM
Bünz	Hochwasserschutz / Revitalisierung Hendschicken	2014	2014 / 2019	IAM + quantitative Abfischung
Wyna	Revitalisierung Gontenschwiler Moos	2008	2017	IAM + quantitative Abfischung

2.2.4 Grundlagen

Für die nachfolgenden Auswertungen stehen folgende Erfolgskontrollen zur Verfügung:

- Aquabios (2014). *Habitatkartierung Bünz vor Renaturierung*. Aarau: Kanton Aargau, Abteilung Wald, Sektion Jagd und Fischerei.
- Aquabios. (2015). *Erfolgskontrolle der Revitalisierung von zwei Wanderhindernissen in der Surb.* Aarau: Kanton Aargau, Abteilung Landschaft und Gewässer und Abteilung Gewässer und Wald, Sektion Jagd und Fischerei.
- Aquabios (2016). *Erfolgskontrolle der Revitalisierungsmassnahmen der Wigger in Brittnau.* Aarau: Kanton Aargau, Abteilung Wald, Sektion Jagd und Fischerei.
- Aquabios (2017). *Erfolgskontrolle Revitalisierung Wyna Gontenschwil – Mikrohabitate und Fische.* Aarau: Kanton Aargau, Abteilung Landschaft und Gewässer und Abteilung Gewässer und Wald, Sektion Jagd und Fischerei.
- Aquabios (2018). *Erfolgskontrolle Revitalisierung Bünz bei Bünzen – Mikrohabitate und Fische.* Aarau: Kanton Aargau, Abteilung Landschaft und Gewässer und Abteilung Gewässer und Wald, Sektion Jagd und Fischerei.
- Aquabios (2020). *IAM Wigger: Strecke Brittnau, sowie quantitative Befischung*. Aarau: Kanton Aargau, Abteilung Landschaft und Gewässer und Abteilung Gewässer und Wald, Sektion Jagd und Fischerei.

- Aquabios (2020). *IAM Wigger: Strecke Rothrist.* Aarau: Kanton Aargau, Abteilung Landschaft und Gewässer und Abteilung Gewässer und Wald, Sektion Jagd und Fischerei.
- Aquabios (2020). *Wirkungskontrolle Revitalisierung Bünz – Gewässermorphologie und Fische bei Hendschiken.* Aarau: Kanton Aargau, Abteilung Landschaft und Gewässer und Abteilung Gewässer und Wald, Sektion Jagd und Fischerei.
- Fischwerk (2020). *Wirkungskontrolle - Erhebung nach 3 Jahren, Revitalisierung der Wigger bei Rothrist/Aarburg.* Zofingen: Bundesamt für Strassen ASTRA.

Des Weiteren werden technische Berichte, Dokumentationen und Wasserbaupläne der Gewässerabschnitte für die Auswertung der wasserbaulichen Massnahmen verwendet.

2.3 Auswertung

Nebst der Auswertung der beiden Parameter Habitatstruktur und Fische, erfolgt auch eine Zusammenfassung der umgesetzten wasserbaulichen Massnahmen der ausgewählten Gewässerabschnitte. Sofern zwei IAM Werte in einem revitalisierten Abschnitt vorlagen (Zwei Abschnitte wurden kartiert) oder zwei revitalisierte Strecken befischt wurden, zählt jeweils der Mittelwert.

2.3.1 Wasserbauliche Massnahmen

> *Wasserbauliche Massnahmen: Zusammenfassung der umgesetzten wasserbaulichen Massnahmen (soweit sie auf den Wasserbauplänen erkennbar sind). Deren Reflexion bezüglich Entwicklung der Sohl- und Uferstrukturen.*

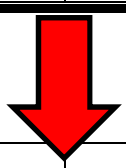
Aus den vorhandenen Unterlagen der neun Wasserbauprojekte werden die jeweiligen wasserbaulichen Massnahmen zusammengetragen. In der Literatur sind diverse Ansätze zur Typisierung von wasserbaulichen Massnahmen beschrieben. Ausgehend von der Tatsache, dass der Fischbestand massgeblich durch morphologische Strukturen im Gewässer beeinflusst wird (Vonlanthen, et al., 2018), wird die Kategorisierung von Kail et al. (2015) ausgesucht. In dieser werden morphologische Revitalisierungsmassnahmen präzise unterteilt. Darin wird unterschieden zwischen Morphologie - Instream, - Gewässerraum, - Gerinneveränderung und - Überflutungsflächen.

Da in dieser Kategorisierung der Temperaturaspekt nicht berücksichtigt ist, wird des Weiteren das Raster der Publikation „Priorisierung von Flussrevitalisierungsprojekten – ökologische Aspekte der Priorisierung und Revitalisierungspotenzial“ (Baumgartner, et al., 2013) beigezogen. Baumgartner et al. (2013) schlagen für jedes Defizit einen möglichen Massnahmenkatalog vor. Obwohl die Kategorisierung in dieser Arbeit aus ökologischer Sicht erfolgt, kann diese ebenso gut auf technische Massnahmen angewendet werden. Jede wasserbauliche Massnahme kann einem oder mehreren Gewässerdefiziten zugeteilt werden.

Diese zwei verschiedenen Ansätze verlangen deshalb eine kombinierte Kategorisierung der wasserbaulichen Massnahmen in Gruppen (Tabelle 2). Die Auflistung der möglichen Massnahmen pro Gruppe ist nicht abschliessend und einige Massnahmen können auch verschiedenen Gruppen zugeordnet werden.

Tabelle 2: Aus dem Raster der Gewässerdefizite (Baumgartner, et al., 2013) und der Massnahmengruppierung (Kail et al., 2015) wird die Kategorisierung der wasserbaulichen Massnahmen für die vorliegende Arbeit vorgenommen.

Ausgehend von Gewässerdefiziten (Baumgartner, et al., 2013)	**Ausgehend von Massnahmengruppe** (Kail et al., 2015)
• Unzureichende Wasserqualität aus Punktquellen oder aus diffusen Quellen • gestörter Grundwasserhaushalt • gestörte Hydrodynamik • gestörter Geschiebehaushalt • gestörtes Temperaturregime • gestörte Längsvernetzung • gestörte Quervernetzung • morphologische Strukturdefizite • unnatürliche Artengemeinschaften	• Wassermenge • Geschiebedynamik • Hydrodynamik • Längsvernetzung • Morphologie – Instream (Gewässersohle und Ufer) • Morphologie – Gewässerraum • Morphologie – Gerinneveränderung • Morphologie - Überflutungsflächen



Massnahmengruppe Wasserbau	**Mögliche Massnahmen**
Längsvernetzung	• Querbauwerke entfernen / fischgängig gestalten • Sohlschwellen entfernen • Ausdolung • Natürliches Sohlsubstrat

Wasserqualität	• Reduktion oder Elimination Schadstoff- / Nährstoffeinträge • Pufferstreifen/Ufervegetation • Schönungsteiche
Geschiebehaushalt	• Geschiebezugabe • Reduktion Geschieberückhalt • Reduktion unnatürlicher Feinsediment-eintrag • Verbesserung Geschiebeweiterleitung • Kolmation der Sohle auflockern • Zulassen Eigendynamik
Hydrodynamik	• Verminderung Beeinträchtigung durch Wasserkraft (Schwall-Sunk, Restwasser) • Staudammmanagement • Management Hochwasserrückhaltebecken
Wassertemperatur	• Niederwasserrinne • Beschattung Gerinne (Bestockung) • Wasserentnahmen kontrollieren • Anbindung Seitengewässer und Grundwasser
Morphologie – Instream (Gewässersohle und Ufer)	• Ufer- und Sohlenfixierung entfernen • Hinzufügen hydraulischer Strukturen • Totholz und Störsteine einbauen • Uferstabilisierungen • Schaffen von Riffle-Pool Sequenzen • Natürliche Gerinnedynamik fördern
Morphologie - Gewässerraum	• Abschnittsweise Flachufer schaffen • Strukturierung Ufer (Steine, Totholz etc.) • Natürliche Ufervegetation • Bestockung
Morphologie – Gerinneveränderung	• Gewässersohle erhöhen • Gerinne aufweiten und einengen • Re-Mäandrierung, wo standorttypisch • Laterale Gerinnedynamik initiieren • Eigendynamik fördern
Morphologie - Überflutungsflächen	• Dämme senken oder entfernen oder zurückversetzen • Überflutungsflächen schaffen / nutzen • Altarme kreieren oder wieder anbinden

Nachfolgend werden die wasserbaulichen Massnahmen der neun Wasserbauprojekte aufgelistet und einer Massnahmengruppe zugeordnet. Für jedes Projekt wird, falls möglich, die dominante Massnahmengruppe definiert und zusätzlich der dominante Baustoff benannt, da sich dieser unter anderem auf die Habitatentwicklung und Wassertemperatur auswirken kann (Tabelle 3).

Tabelle 3: Wasserbauliche Massnahmen der neun Wasserbauprojekte kategorisiert nach Massnahmengruppe (Farben), sowie jeweils die dominante Massnahmengruppe und der dominante Baustoff.

Abschnitt	Dominante Massnahmengruppe	Massnahmen	Dominanter Baustoff
Surb ARA	Längsvernetzung	Blockrampe, natürlicher Absturz aufheben Störsteine einbauen (aus natürlichem Absturz) Ufer- und Sohlenfixierung entfernen Gerinne aufweiten	Stein
Surb Gislibach	Längsvernetzung	Blockrampe bei Gislibachmündung, Schwellen entfernen Ufersicherung (Kleinbuhnen & Faschinen), Störsteine	Stein
Wigger Brittnau 2009	2009: Keine dominante Massnahmengruppe	2009: aufgelöste Blockrampen, Bestockung, Uferstabilisierung (Steinbuhnen), Uferfixierung entfernen (Betonplatten), Flachufer, Gerinne aufweiten	Stein
Wigger Brittnau 2018	Morphologie – Instream	Bestockung an Wasserlinie Totholz: Langholztrichter, Langholzschwelle geneigt, Wurzelstöcke, Rechentrichter, Trichterrechen, Rechenartige Halbmondschwellen, Rechen, Buschlagen im Hangfuss, Wurzelstammrost, Langholzlenkbuhne, Astbund an bestehende Steine verankert	Totholz
Wigger Rothrist	Keine dominante Massnahmengruppe	Schaffung neues Gerinne: 2 Blockrampen, Niederwasserrinne, Steinbuhnen und Holzbuhnen (Unterschiedliche Länge und Winkel), extensive Hochstaudenflur, extensives Ufergehölz, extensive Uferböschung, das rechte Ufer wird nicht bepflanzt (Magerwiese), links: Gehölzsaum, Flachufer mit Kiesbänken (periodische Überflutung)	Stein
Bünz Bünzen	Morphologie – Instream Morphologie – Gerinneveränderung	2 Sohlschwellen, Sohlsubstrat einbringen, Störsteingruppen, Lebendfaschinen, Wurzelstöcke, neue Bestockung, da bestehende Bestockung teilweise gerodet wurde, Aufweitungen im Sinne von einzelnen Verzweigungen, zeitweise Überflutung Uferbereiche	Stein
Bünz Othmarsingen	Längsvernetzung	Steinschwellen mit Tosbecken, 2 Astschwellen, aufgelöste Blockrampe, Sohle mit Kies und Geröll gestaltet, Sohlfixierung entfernen (Turnherr-System), Gerinnestruktur aber weitgehend beibehalten, einzelne Störsteine, Weidenfaschinen, Niederwasserrinne durch Fluss gestalten lassen, Bepflanzung Ufer (gute Beschattung)	Stein
Bünz Hendschicken	Längsvernetzung	Aufhebung Schwellen Ersetzung mit 3 offenen Blockrampen, Niederwasserrinne, Sohlfixierung entfernen (Turnherr-System), Holzbuhnen (Gestaltung Gewässerlauf), Störsteine, Uferstabilisierung, 10% Gewässerraum Gehölz	Stein
Wyna Gontenschwil	Morphologie – Gerinneveränderung	Naturnahe Bachmündung, Amphibientümpel und Pionierstandorte, Steinhaufen, vereinzelt Raubäume & Wurzelstöcke & Faschinen, Pendelndes Gerinne mit Bänken & flachen Böschungen, Aufweitung mit Verlandungszone, Seitengerinne, Laufverlegung mit Bank und Hinterwasser, Verzweigung mit Inseln, Bänken, Hinterwasser und Flutmulde,	Stein

Aus der Zusammenstellung ist ersichtlich, dass das Baumaterial Stein auffallend dominant ist. Totholzstrukturen wurden in der Wigger Brittnau im Jahr 2018, in der Bünz Bünzen (Wurzelstöcke) und in der Wyna Gontenschwil (Wurzelstöcke, Raubäume) eingebaut. In der Wigger Rothrist und in der Bünz Hendschicken wurden wenige Holzbuhnen erstellt, bei einigen Projekten sind Faschinen zur Ufersicherung eingebaut worden. Das Projekt Wigger Brittnau ist das Einzige, bei welchem vorwiegend mit Holz gearbeitet wurde.

Für die Längsvernetzung wurde meist mit einer Art Blockrampe (geschlossen oder aufgelöst) aus Steinen oder Sohlrampen gearbeitet.

Als Instream-Massnahme wurde vor allem das Entfernen von Ufer- und Sohlfixierungen umgesetzt. Zur **Entwicklung der Sohle** sind meist Störsteine eingebaut worden. Ausnahmen sind die erwähnten Totholzstrukturen in der Wigger Brittnau, Bünz Bünzen und wenige auch an der Wyna Gontenschwil. Bei der Mehrheit der Projekte sind die Massnahmen zur Entwicklung der Sohle gering, ebenso deren Dichte pro revitalisierten Gewässerabschnitt. Hingegen sind mehr Massnahmen zur **Entwicklung von Uferstrukturen** umgesetzt worden. Durch die Sicherung der Ufer mit Faschinen und verschiedenen Buhnen sind die Ufer mehrheitlich strukturreicher gestaltet als die Sohle. Das Projekt Wigger Brittnau unterscheidet sich wiederum von den anderen durch die Dominanz der Massnahmen zur Entwicklung der Sohle und Ufer mit Holzeinbauten.

Massnahmen, die den Temperaturhaushalt eines Fliessgewässers entscheidend beeinflussen können, wie Niederwasserrinne, Bestockung oder Anbindung von Seitengewässern, sind umgesetzt worden, aber meist nur eine Massnahme in geringer Dichte. Bei der Bestockung ist entweder die Vegetation ersetzt worden, welche aufgrund der Bauarbeiten entfernt werden musste oder die zusätzlichen Pflanzungen waren gemäss Plänen ungenügend. Von einer „guten Bestockung“ bzw. eine Bepflanzung an der Wasserlinie war nur bei den Projekten Bünz Othmarsingen und Wigger Brittnau 2018 die Rede. Eine Niederwasserrinne wurde bei der Wigger Rothrist und Bünz Hendschicken umgesetzt.

Zusammenfassend sind die wasserbaulichen Massnahmen von geringer Vielfalt bezüglich Bauart, Lage und Baustoff. Bei einigen Projekten lag der Fokus auf dem Hochwasserschutz, weshalb vermutlich die Revitalisierungsmassnahmen zweitrangig definiert wurden und die Massnahmenvielfalt entsprechend gering ausfiel. Das Projekt Wigger Brittnau 2018 unterscheidet sich stark von den anderen Projekten durch die Wahl des Baustoffes und die Dominanz der Massnahmen zur Entwicklung der Sohle und Ufer (Instream).

Es fällt auch auf, dass laut den Wasserbauplänen und technischen Berichten die Massnahmengruppe Längsvernetzung dominiert, weitere Massnahmen untergeordnet umgesetzt wurden. Defizitanalyse und Zielsetzungen bei den Wasserbauprojekten sind nicht sehr spezifisch oder fehlen ganz.

2.3.2 Habitatstrukturen

> *Haben die Wasserbauprojekte eine strukturelle Aufwertung bewirkt? Wurden attraktive Fischhabitate geschaffen? Entstand eine Diversität in den aufgewerteten Gewässerabschnitten (Substrat, Fliessgeschwindigkeit, Wassertiefe)?*

Die strukturelle Vielfalt und Attraktivität der Gewässermorphologie wurde im revitalisierten Gewässerabschnitt, sowie in einer Vorheraufnahme oder zumindest in einer Kontrollstrecke kartiert. Ein Vergleich der Indexwerte Vorher-Nachher bzw. Kontroll-Nachher zeigt die morphologische Aufwertung durch das Wasserbauprojekt im aufgewerteten Gewässerabschnitt.

IAM Diversität

In allen neun Wasserbauprojekten wurde eine Erhöhung der Diversität erreicht. Das heisst in den revitalisierten Gewässerabschnitten nahmen die Variabilität der Fliessgeschwindigkeit und der Wassertiefe, sowie die Substratheterogenität allgemein zu (Abbildung 1). Nur eine geringe Verbesserung der Diversität erzielte das Projekt Surb Gislibach, da die Tiefenvariabilität weiterhin gering ausfällt.

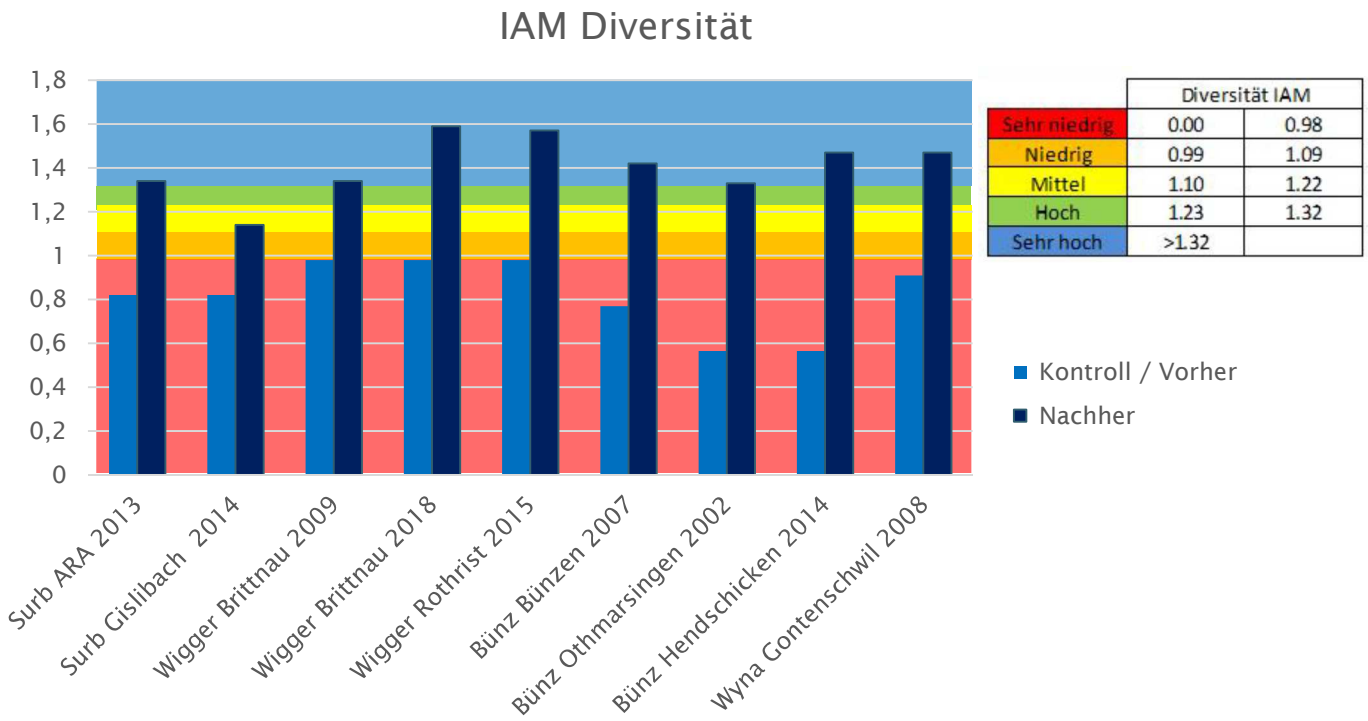


Abbildung 1: Vergleich IAM Diversität des revitalisierten Gewässerabschnittes mit einer Kontrollstrecke oder einer Vorher-Aufnahme.

IAM Attraktivität

Grundsätzlich hatten alle Wasserbauprojekte einen positiven Effekt auf die Attraktivität der Habitate (Abbildung 2). Bei knapp der Hälfte der Projekte wurde eine gute Attraktivität erreicht. Bei den anderen Projekten fehlen genügend attraktive Habitate für Fische (unterspülte Ufer, aquatische Vegetation, Totholz, Kolke etc.). Das Projekt Wigger Brittnau 2018 fällt schlechter aus als Wigger Brittnau 2015.

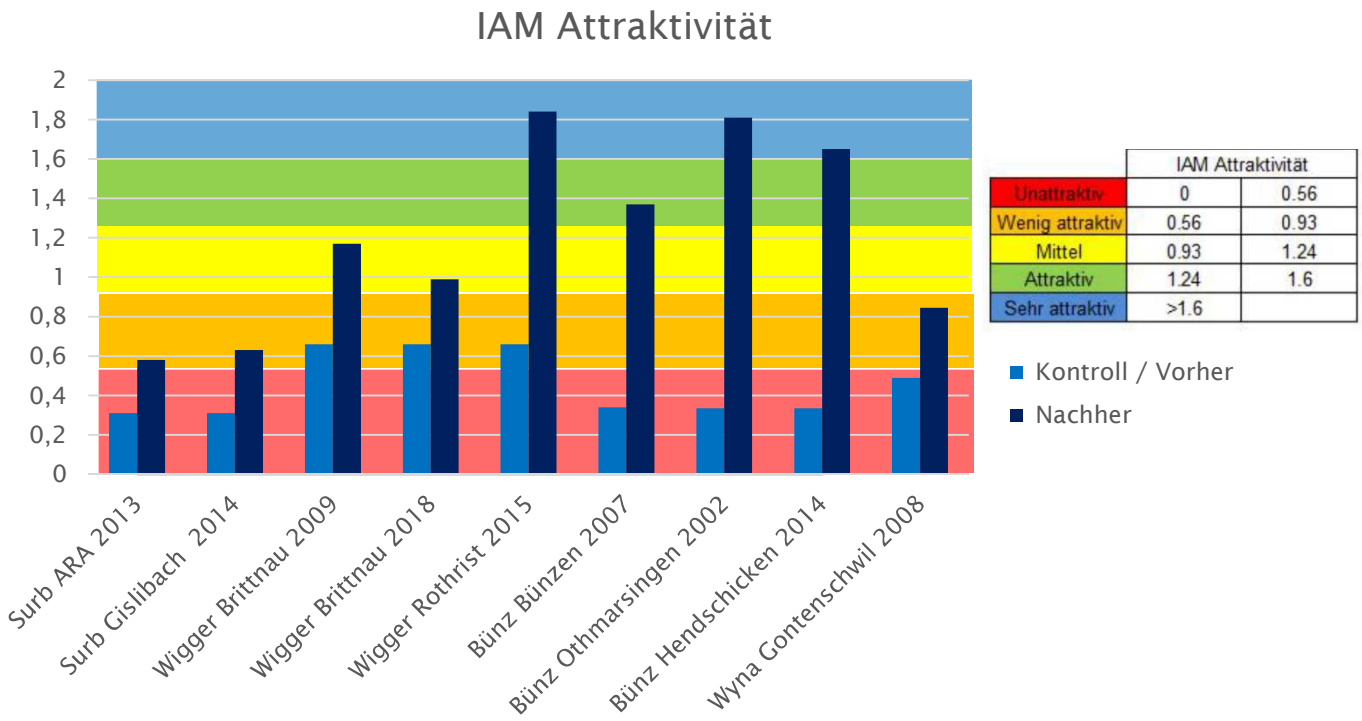


Abbildung 2: Vergleich IAM Attraktivität des revitalisierten Gewässerabschnittes mit einer Kontrollstrecke oder einer Vorher-Aufnahme.

2.3.3 Fische

Wie haben sich die Gesamtbiomasse und die Artenzusammensetzung verändert? Welche Fischarten haben profitiert und welche dominieren? Wie hat sich der Bestand von insbesondere kälteliebenden Fischarten entwickelt?

Alle sieben Wasserbauprojekte, bei denen eine quantitative Befischung vorliegt, gehörten ursprünglich der unteren Forellenregion an. Typische Arten der Forellenregion (Forelle, Elritze, Groppe, Schmerle, Bachneunauge) waren früher vermutlich häufig. Bei der Surb wurden aufgrund der Nähe zur Aare noch weitere Fischarten, wie Barbe, Nase und Lachse erwartet. Weitere Ausnahmen bilden die Wyna Gontenschwil und die Bünz Bünzen, welche durch die Nähe zum Moor (Gontenschwiler Moor, Fohrenmoor) noch andere Fischarten anziehen (Hecht, Schleie etc.). Allgemein wird aufgrund der Gewässererwärmung eine Veränderung der Fischartenzusammensetzung hin zu Fischarten der Äschenregion erwartet (Äsche, Alet, Strömer, Schneider).

Die Gesamtbiomasse hat in allen revitalisierten Gewässerabschnitten zugenommen (Abbildung 3). Die starke Zunahme der Biomassen in der Bünz Bünzen und Wyna Gontenschwil ist aber grösstenteils auf die Zunahme der Alet Biomasse zurückzuführen. Wird in diesen beiden Abschnitten nur die Biomassenzunahme der typischen Fischarten der Forellenregion verglichen, ist die Biomassenzunahme gering. Bei Bünz Hendschicken ist in der Kontrollstrecke, wie auch in den revitalisierten Strecken, der Alet häufig.

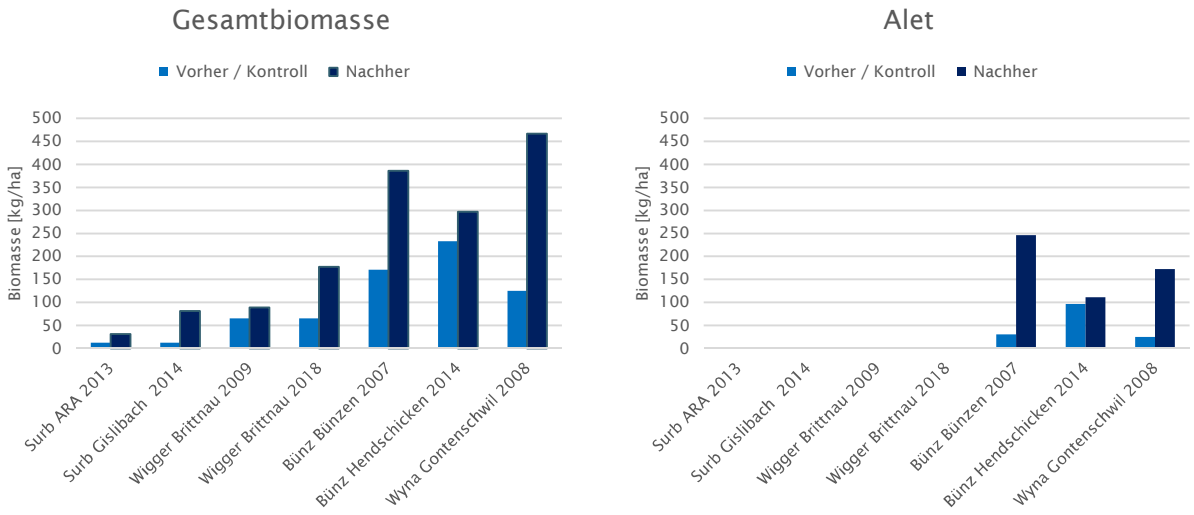


Abbildung 3:Gesamtbiomasse (links) und Biomasse Alet (rechts) vor der Revitalisierung bzw. in der Kontrollstrecke im Vergleich zu nach der Revitalisierung in sieben Gewässerabschnitten.

Die Biomasse und die Anzahl Forellen sind in den revitalisierten Gewässerabschnitten mehrheitlich erhöht. Dennoch liegen sie auch nach den Revitalisierungen, mit Ausnahme der Bünz Hendschicken und der Wigger Brittnau, unter dem Erwartungswert für Forellengewässer von 100-200 kg/ha und 2000 Individuen/ha (Abbildung 4).

Bei der Bünz Bünzen ist die Biomasse zwar erhöht, die Anzahl Forellen im revitalisierten Abschnitt aber rückläufig. Die höhere Anzahl Individuen in der Kontrollstrecke ist auf eine höhere 0+-Dichte zurückzuführen. Bei der Wyna Gontenschwil ist zu differenzieren zwischen den beiden befischten revitalisierten Strecken (Verzweigt vs. Mäandrierend). In der verzweigten Strecke haben die Bachforellen profitiert (Biomasse und Anzahl). In der mäandrierenden Strecke kommt die Bachforelle anzahlmässig seltener vor als in der Kontrollstrecke. Bei der Bünz Hendschicken ist ebenfalls zu differenzieren zwischen den beiden befischten revitalisierten Strecken. Strecke 2 weist die höchste Forellenbiomasse auf, welche zwischen 2017 bis 2019 entlang der Bünz gemessen wurde. Die Strecke 3 hingegen weist eine geringere Biomasse auf als die Kontrollstrecke.

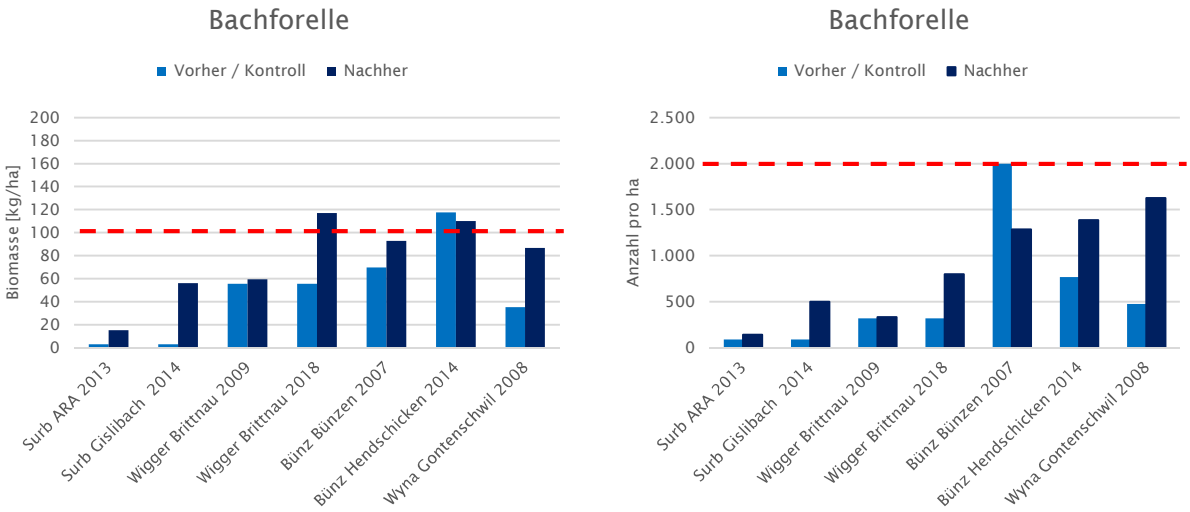


Abbildung 4: Bachforellenpopulation vor der Revitalisierung bzw. in der Kontrollstrecke im Vergleich zu nach der Revitalisierung in sieben Gewässerabschnitten. Die rot gestrichelte Linie kennzeichnet die untere Grenze des Erwartungswertes für Forellengewässer (100-200 kg/ha bzw. 2000 Fische/ha).

Mit Ausnahme der Wyna Gontenschwil kommen nach der Revitalisierung dieselben Fischarten wie vor der Revitalisierung vor. An der Wyna Gontenschwil werden nach der Revitalisierung zusätzlich atypische bzw. nicht heimische Fischarten wie die Regenbogenforellen, Karpfen und Rotfedern gefunden. Typische Arten der unteren Forellenregion fehlen in allen Gewässerabschnitten. Die Dominanzverhältnisse (Biomasse) haben sich ausser an der Wyna Gontenschwil und an der Bünz Bünzen nach der Gewässeraufwertung nicht verändert. Bei den beiden Ausnahmen dominierte vor der Revitalisierung die Bachforelle, nachher hingegen der Alet.

2.4 Diskussion

Korrelation: Gibt es eine Korrelation zwischen den Analysen all dieser Projekte?

Die Daten der t-Teste sind in Anhang A zu finden.

2.4.1 IAM Attraktivität und Massnahmengruppe Morphologie - Instream

Bei einigen Wasserbauprojekten sind mit der Revitalisierung keine guten bis sehr guten IAM Attraktivitätswerte erreicht worden.

Einerseits zeigte der qualitative Vergleich IAM Attraktivität und wasserbauliche Massnahmen, dass bei diesen Projekten nur wenige Massnahmen der Massnahmengruppe Morphologie – Instream umgesetzt wurden. Zur Entwicklung der Sohle und Ufer (Morphologie –Instream) sind bei diesen Projekten vorwiegend Ufer- und Sohlfixierung entfernt und Störsteine platziert worden, was nicht ausreicht, um genügend attraktive Habitate für Fische zu schaffen (Surb ARA, Surb Gislibach, Wigger Brittnau 2009). Bei der Wyna Gontenschwil sind zwar nebst Gerinneaufweitungen auch Raubäume und Wurzelstöcke zur Entwicklung der Sohle und Ufer eingebaut worden, aber in geringen Dichten, so dass keine guten IAM Attraktivitätswerte erreicht werden konnten.

Sobald in höheren Dichten Buhnen (Holz oder Steine), sowie Faschinen oder Totholzstrukturen in die Sohle oder Ufer eingebaut worden sind, erreicht der IAM Attraktivität gute bis sehr gute Werte. Es werden attraktive Habitate für Fische, wie unterspülte Ufer, aquatische Vegetation, Totholz und Kolke geschaffen. Fehlende Massnahmen zur Entwicklung der Sohle und Ufer widerspiegeln sich demnach in der Abwesenheit von attraktiven Habitaten für Fische.

Andererseits weist auch das Projekt Wigger Brittnau 2018 nicht gute IAM Attraktivitätswerte. Die Wigger Brittnau 2018 hat sich gegenüber dem Wasserbauprojekt Wigger Brittnau 2009 sogar verschlechtert, obwohl 2018 vor allem Massnahmen der Massnahmengruppe Morphologie-Instream umgesetzt wurden. Bei der ersten Erfolgskontrolle war das Projekt Wigger Brittnau erst einjährig, das Projekt Wigger Brittnau 2009 hingegen sechsjährig. Ob der Faktor Projektalter einen Einfluss auf den relativen Unterschied des IAM Attraktivitätswertes bzw. auf den relativen Unterschied der Forellenbiomasse hat, wird in Kapitel 2.4.3 diskutiert.

2.4.2 IAM Attraktivität und Biomasse

Hypothese 1: Je höher der IAM Attraktivitätswert ist, desto höher ist die Gesamtbiomasse.

In Abbildung 5 wird auf der x-Achse (unabhängige Variabel) der IAM Attraktivitätswert dargestellt, auf der y-Achse (abhängige Variabel) die Gesamtbiomasse (kg/ha). Eingezeichnet sind die Datenpunkte der Aufnahmen Vorher/Kontroll und Nachher. Es wird erwartet, dass ein höherer IAM Attraktivitätswert mit einer höheren Gesamtbiomasse einhergeht (Hypothese 1).

Die Modellrechnung ergibt, dass die lineare Korrelation positiv und signifikant ist (N=12; R^2=0.295; p<0.01). Die Konstante beträgt 23,002, d.h. bei einem IAM Attraktivitätswert von 0 beträgt die Gesamtbiomasse 23,002 kg/ha. Die Steigung beträgt 183, d.h. bei einer Verbesserung des IAM Attraktivitätswertes um 1 nimmt die Gesamtbiomasse um 183 kg/ha zu. R^2 liegt bei knapp 30% (0.295), d.h. das Modell erklärt knapp 30% der Daten.

Die Hypothese 1 wird angenommen. Das heisst bei einem höheren IAM Attraktivitätswert wird eine höhere Gesamtbiomasse erwartet.

Vonlanthen et al. (2018) haben bereits gezeigt, dass der Index IAM Attraktivität mit der Gesamtbiomasse (kg/ha) der Forellenregion mit guter Wasserqualität positiv und signifikant korreliert (rote Linie) (N=26; R^2=0.56; p<0.001). Diese Korrelation wurde ebenfalls in Abbildung 5 eingetragen (rote Linie).

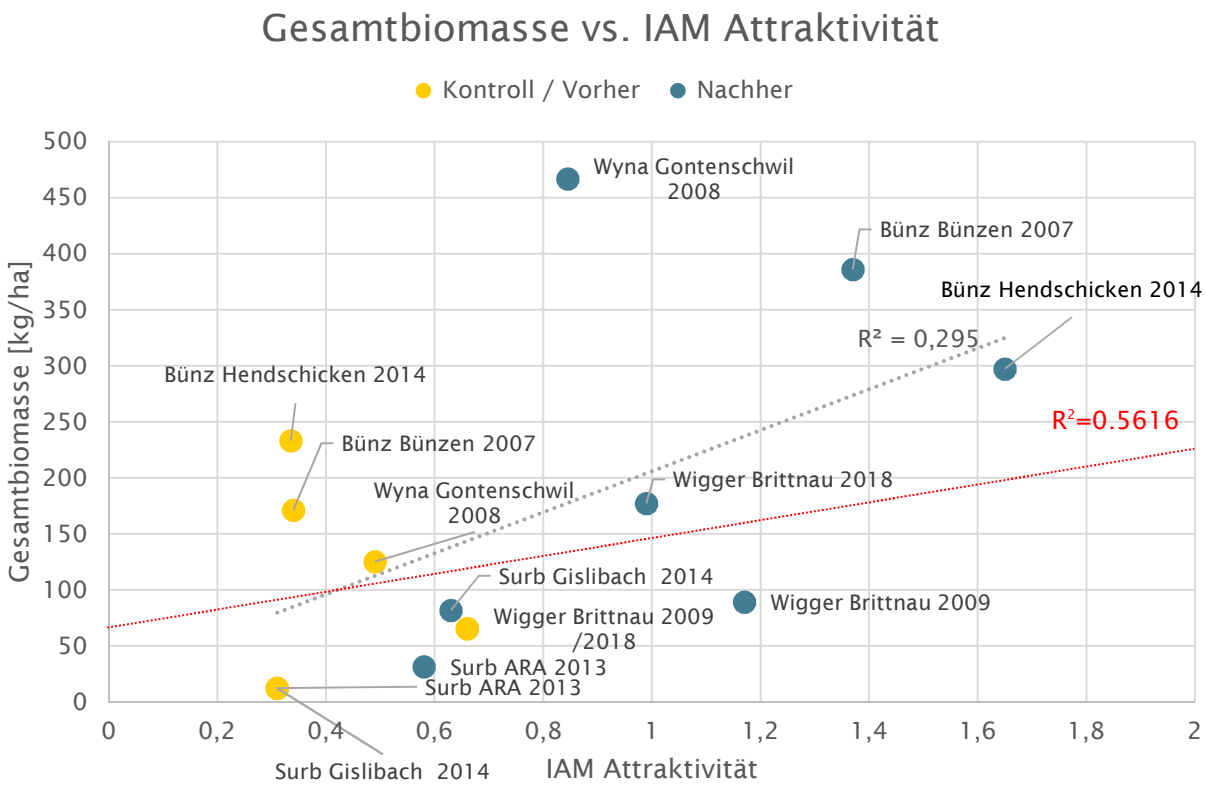


Abbildung 5: Zusammenhang Gesamtbiomasse (kg/ha) – IAM Attraktivität für die vorliegenden Wasserbauprojekte. Die graue Linie zeigt die Korrelation zwischen dem IAM Attraktivität und der Gesamtbiomasse für die die vorliegenden Wasserbauprojekte (N=12; R^2=0.295; p<0.01). Die rote Linie zeigt die Korrelation für Forellengewässer mit guter Wasserqualität gemäss Daten Vonlanthen et al. (2018) (N=26; R2=0.56; p<0.001).

Mit Ausnahme der Abschnitte Bünz Bünzen, Bünz Hendschicken, Wigger Brittnau 2018 und Wyna Gontensschwil liegen die beobachteten Biomassen unter den Erwartungswerten für ein Forellengewässer mit guter Wasserqualität gemäss Vonlanthen et al. (2018). Andere Gewässer haben mit vergleichbarem IAM Wert höhere Biomassen. Die Biomassen der typischen Fischarten sind durchgehend zu gering. Zudem fehlen typische Fischarten.

In der Bünz Hendschicken sind die hohen Biomassen auf die des Alets zurückzuführen. Wird die Biomasse des Alets subtrahiert, kommen die Biomassen in den Bereich des Erwartungswertes.

In der Bünz Bünzen hat besonders der Alet massiv profitiert, sowie atypische Arten (Schleie, Karpfen, Gründling). Auch in der Wyna Gontenschwil ist die hohe Biomasse auf atypische Arten (v.a. Alet) zurückzuführen. Ohne atypische Arten entsprechen die Biomassen beider Gewässerabschnitte dem Erwartungswert für ein Forellengewässer mit guter Wasserqualität.

Hypothese 2: Je höher der IAM Attraktivitätswert ist, desto höher ist die Forellenbiomasse.

In Abbildung 6 wird auf der x-Achse (unabhängige Variabel) der IAM Attraktivitätswert dargestellt, auf der y-Achse (abhängige Variabel) die Forellenbiomasse (kg/ha). Eingezeichnet sind die Datenpunkte der Aufnahmen Vorher/Kontroll und Nachher. Es wird erwartet, dass ein höherer IAM Attraktivitätswert mit einer höheren Forellenbiomasse einhergeht (Hypothese 2).

Die Modellrechnung ergibt, dass die lineare Korrelation positiv und signifikant ist ($N=12$; $R^2=0.3109$; $p<0.01$). Die Konstante beträgt 24,104, d.h. bei einem IAM Attraktivitätswert von 0 beträgt die Forellenbiomasse 24.104 kg/ha. Die Steigung beträgt 52,129, d.h. bei einer Verbesserung des IAM Attraktivitätswertes um 1 nimmt die Forellenbiomasse um 52,129 kg/ha zu. R^2 liegt bei gut 30% (0.3109), d.h. das Modell erklärt gut 30% der Daten.

Die Hypothese 2 wird angenommen. Das heisst bei einem höheren IAM Attraktivitätswert wird eine höhere Forellenbiomasse erwartet.

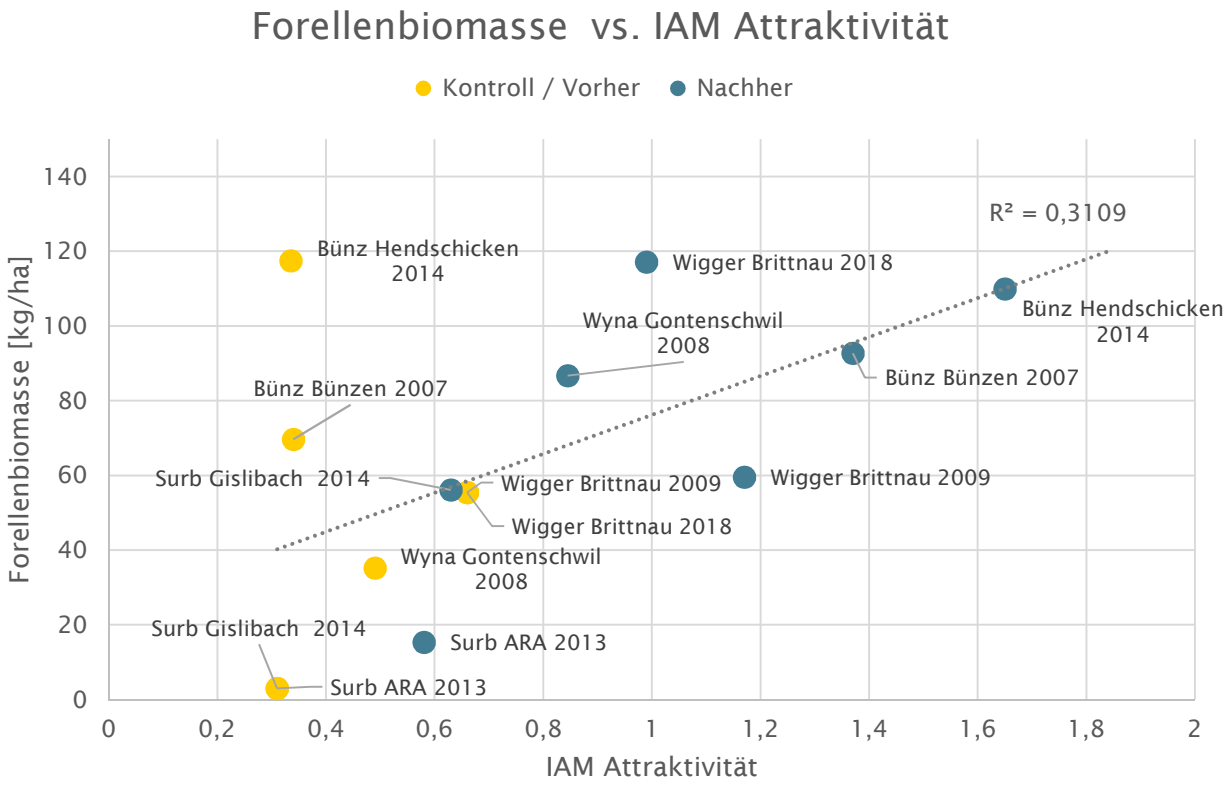


Abbildung 6: Zusammenhang Forellenbiomasse (kg/ha) – IAM Attraktivität, Vergleich Vorher / Kontroll zu Nachher für die Wasserbauprojekte. Die graue Linie zeigt die Korrelation zwischen dem IAM Attraktivität und der Forellenbiomasse in den untersuchten Gewässerabschnitten (N=12; R^2=0.31; p<0.01).

Der Erwartungswert für Forellengewässer von 100-200 kg/ha ist in den Abschnitten Bünz Hendschiken und Wigger Brittnau 2018 erreicht worden. Einzig beim Projekt Bünz Hendschicken ist mit zunehmender Attraktivität der Habitate eine Abnahme der Forellenbiomasse zu beobachten. Es wird vermutet, dass aufgrund der hohen Temperaturen in der Bünz der Forellenbestand eher mit Fläche an stark durchströmten tiefen Flächen (Sauerstoffangebot) korreliert, nicht mit dem Strukturangebot. Auch ist die Kontrollstrecke bekannt für grössere Forellen (Strecke unterhalb ARA).

Obwohl bei der Wigger Brittnau 2018 noch keine gute IAM Attraktivität erreicht worden ist, hat sich die Forellenbiomasse bereits mehr als verdoppelt. Aufgrund des geringen Projektalters (einjährig) wird eine weitere Entwicklung der Habitatattraktivität in den nächsten Jahren erwartet. Weitere Erfolgskontrollen in den nächsten Jahren werden den Erfolg des Projektes Wigger Brittnau 2018 für die Bachforelle verifizieren.

Die positive und signifikante Korrelation zwischen IAM Attraktivität und Forellenbiomasse deuten darauf hin, dass mit zunehmender Habitatattraktivität die Bachforelle gefördert werden kann. Gemäss Kapitel 2.4.1 können attraktive Habitate für Bachforellen mit einer höheren Dichte an Massnahmen der Massnahmengruppe Morphologie-Instream gefördert werden.

Hypothese 3: Je stärker der IAM Attraktivitätswert durch die Revitalisierung zunimmt, desto stärker nimmt die Forellenbiomasse zu.

Um den Einfluss des Wasserbauprojektes auf den IAM Attraktivität bzw. die Forellenbiomasse zu beurteilen, sind nicht nur die absoluten Zahlen aussagekräftig. Stattdessen wird die Zunahme bzw. Abnahme der Werte bewertet. Dazu wird der relative Unterschied der Habitatattraktivität und der Forellenbiomasse aus dem Vergleich Kontroll/Vorher zu Nachher berechnet.

In Abbildung 7 wird auf der x-Achse (unabhängige Variabel) der relative Unterschied des IAM Attraktivität dargestellt, auf der y-Achse (abhängige Variabel) der relative Unterschied in der Forellenbiomasse. Es wird erwartet, dass eine stärkere Zunahme des IAM Attraktivitätswert durch die Revitalisierung mit einer stärkeren Zunahme der Forellenbiomasse einhergeht (Hypothese 3).

Die Modellrechnung ergibt, dass die lineare Korrelation negativ, aber nicht signifikant ist (N=7; R^2=0.0731; p<0.01). Die Konstante beträgt 5,5811, d.h. bei einem gleichbleibenden IAM Attraktivität (relativer Unterschied=0) beträgt die relative Zunahme der Forellenbiomasse 5.5811. Die Steigung ist negativ und beträgt -1,2978, d.h. bei einer relativen Zunahme des IAM Attraktivität um 1 nimmt der relative Unterschied der Forellenbiomasse um 1.2978 ab. R^2 ist schwach und liegt bei 7 % (0.0731), d.h. das Modell erklärt 7% der Daten. Aufgrund der schlechten Modelgüte (R^2) kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, dass der Zusammenhang negativ ist. Er könnte auch positiv sein.

Die Hypothese 3 wird abgelehnt. Aufgrund der Daten kann nicht bestätigt werden, dass mit stärkerer Zunahme des IAM Attraktivität durch die Revitalisierung die Forellenbiomasse stärker zunimmt. Es kann nicht bestätigt werden, dass mit einer starken Verbesserung der Habitatattraktivität die Forellenbiomasse stärker zunimmt, als bei einer schwachen Verbesserung der Habitatattraktivität.

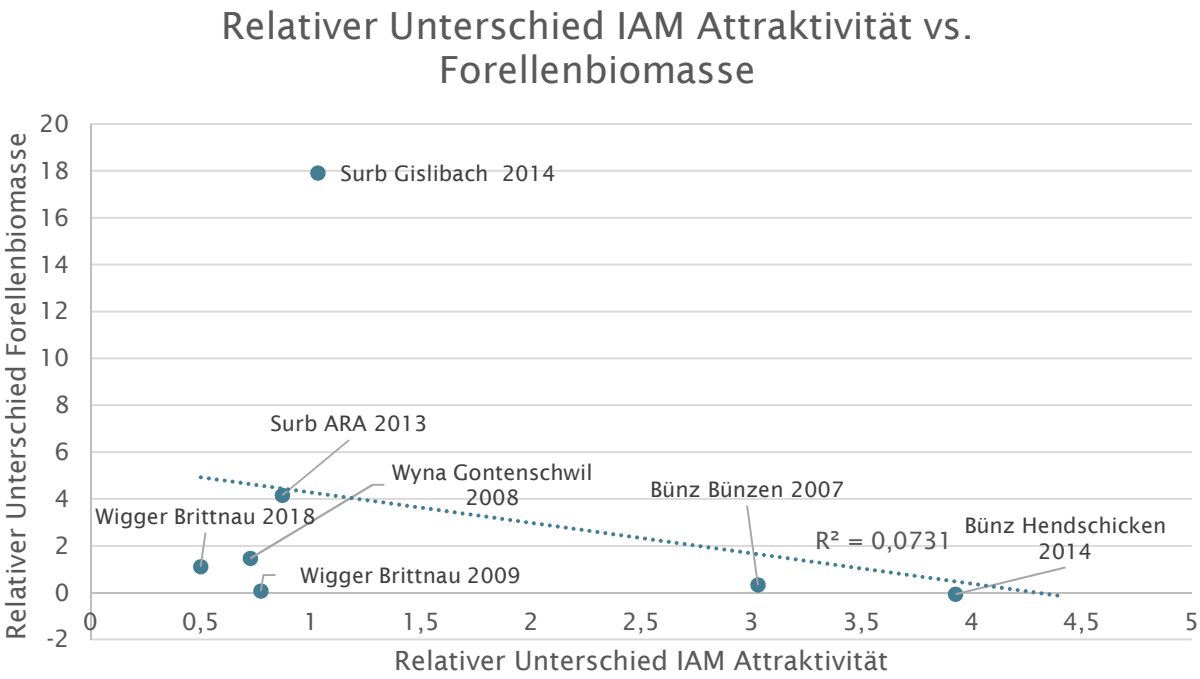


Abbildung 7: Zusammenhang Relativer Unterschied IAM Attraktivität – Relativer Unterschied Forellenbiomasse. Die graue Linie zeigt die Korrelation zwischen dem relativen Unterschied IAM Attraktivität und dem relativen Unterschied der Forellenbiomasse in den untersuchten Gewässerabschnitten (N=7; R^2=0.0731; p<0.01).

Die relative Zunahme der Forellenbiomasse hängt auch von der Quellpopulation im jeweiligen Gewässer ab. Es müssen flussaufwärts oder -abwärts grössere und gesunde Bachforellenpopulationen vorhanden sein, damit ein Wiederbesiedlungspotential in kurzer Zeit gegeben ist. Bei beiden Projekten an der Surb wurde die Längsvernetzung wieder hergestellt. Die starke Zunahme der Forellenbiomasse bei beiden Projekten innerhalb von 1-2 Jahren nach Revitalisierung lässt auf eine Wiederbesiedlung aus Quellpopulationen schliessen.

Auch an der Bünz Hendschicken ist die Längsvernetzung ebenfalls wieder hergestellt, was eine Wiederbesiedlung aus einer nahen Quellpopulation zulassen würde. Der relative Unterschied in der Forellenbiomasse ist aber leicht negativ, obwohl sich die IAM Attraktivitätswerte stark verbessert haben. Es stellt sich die Frage, inwiefern die Fischgängigkeit auch ausserhalb des Projektperimeters gegeben ist. Allenfalls ist die Wiederbesiedlung weiterhin nicht möglich wegen der Hindernisse. Wahrscheinlicher ist aber, dass die Bachforellenbiomasse aufgrund der hohen sommerlichen Wassertemperaturen nicht angestiegen ist. Es wird vermutet, dass der Forellenbestand aufgrund der hohen Wassertemperaturen nicht mehr mit dem Strukturangebot (IAM Attraktivität) sondern mit der Fläche an stark durchströmten tiefen Flächen (Sauerstoffangebot) korreliert. Aufgrund der vorliegenden Daten der Erfolgskontrolle kann diese Vermutung aber nicht definitiv bestätigt werden. Diese mögliche Korrelation sollte mit der Auswertung der Temperaturdaten (Wigger und Bünz) überprüft werden, indem nebst den Temperatur- auch noch Sauerstoffmessungen in Kontroll- und Revitalisierungsstrecken vorgenommen werden.

Gute bis sehr gute IAM Attraktivitätswerte haben zwei der sieben ausgewerteten Projekte erreicht (Bünz Bünzen und Bünz Hendschicken). Bei beiden Projekten ist nur eine geringe relative Zunahme der Forellenbiomasse gemessen worden. Bei Projekten, welche nur mässige IAM Attraktivitätswerte erreichten, stieg die Forellenbiomasse stärker an. Diese Resultate können durch unterschiedliche Umweltbedingungen zustande kommen (Wasserqualität, Wassertemperatur etc.). Die beiden Projekte mit guten bis sehr guten IAM Werten liegen in der Bünz, welche sich im Sommer stark erwärmt. Die Forellenbiomasse wird in der Bünz stark durch weitere Faktoren als die Strukturvielfalt beeinflusst.

Zudem werden langsam durchflossene und tiefe Strukturen als sehr positiv gewertet und heben den IAM Index. In kühlen Gewässern sind solche Strukturen ideal für Bachforellen. In warmen Gewässern, wie die Bünz, bevorzugen Bachforellen stark durchflossene und sauerstoffreiche Bereiche. Die langsam durchflossenen und tiefen Strukturen werden von Cypriniden besiedelt. Somit sind die positiven IAM Bewertungen in der Bünz etwas irreführend, denn aufgrund der hohen Wassertemperaturen im Sommer bevorzugen Bachforellen andere Habitate.

2.4.3 Weitere Faktoren

Der Erfolg einer Revitalisierung für kälteliebende Fische ist nicht nur von morphologischen Aspekten (Habitate, Strukturvielfalt) abhängig. Weitere Faktoren, wie Befischungsdruck, Besatz, Wassertemperatur, Wasserqualität und Alter des Wasserbauprojektes beeinflussen die Fischpopulation.

Kail et al. (2015) untersuchten 91 Europäische Revitalisierungsprojekte und fanden heraus, dass das **Projektalter** die wichtigste Einflussgrösse bei der Beurteilung der Wirkung von Revitalisierungsmassnahmen ist (Abbildung 8).

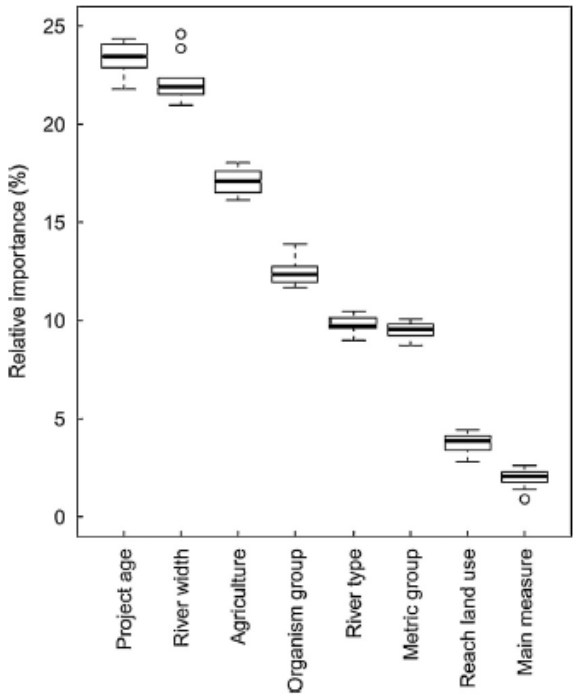


Abbildung 8: Relative Wichtigkeit verschiedener Einflussgrössen auf den Revitalisierungseffekt für alle Organismengruppen (Invertebraten, Fische und Makrophyten). Es handelt sich um eine Post-Treatment-Analyse. Die Boxplots zeigen die Quartile, Ausreisser und den Wertebereich für 10 Modelldurchläufe (Kail et al., 2015).

In den vorliegenden Wasserbauprojekten im Kanton Aargau variiert der Zeitraum zwischen Bauabschluss und ersten Erhebung von einem bis elf Jahren. Ebenso uneinheitlich bezüglich Projektalter sind, falls geplant bzw. bereits durchgeführt, die zweiten und dritten Erhebungen des ökologischen Zustandes. Diese Variabilität in den Zeiträumen kann die Daten der Erfolgskontrollen beeinflussen. In den ersten Jahren nach Revitalisierung nimmt die Wirkung einzelner wasserbaulicher Massnahmen mit Projektalter potenziell zu. Jedes neue Hochwasser kann morphologische Veränderungen hervorrufen.

Hypothese 4: Je älter das Wasserbauprojekt ist, desto stärker hat der IAM Attraktivitätswert zugenommen.

Um den Einfluss des Projektalters bei der ersten Erfolgskontrolle auf den IAM Attraktivität zu beurteilen, sind nicht nur die absoluten Zahlen aussagekräftig. Stattdessen wurde die Zunahme bzw. Abnahme der Werte bewertet. Dazu wird der relative Unterschied der Habitatattraktivität aus dem Vergleich Kontroll/Vorher zu Nachher berechnet.

In Abbildung 9 wird auf der x-Achse (unabhängige Variabel) das Projektalter bei der ersten Erfolgskontrolle dargestellt, auf der y-Achse (abhängige Variabel) der relative Unterschied im IAM Attraktivität. Es wird erwartet, dass ein älteres Projekt eine stärkere Zunahme der Habitatattraktivität aufweist (Hypothese 4).

Die Modellrechnung ergibt, dass die lineare Korrelation positiv, aber nicht signifikant ist (N=9; R^2=0.038; p<0.01). Die Konstante beträgt 1,5168, d.h. direkt nach der Revitalisierung (Projektalter=0) beträgt die relative Zunahme der Habitatattraktivität 1,5168. Die Steigung beträgt 0,0828, d.h. bei Zunahme des Projektalters um ein Jahr nimmt der relative Unterschied des IAM Attraktivitätswertes um 0,0828 zu. R^2 ist schwach und liegt bei 3,8 % (0.038), d.h. das Modell erklärt 3,8 % der Daten. Aufgrund der schlechten Modelgüte (R^2) kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, dass der Zusammenhang positiv ist. Er könnte auch negativ sein.

Die Hypothese 4 wird abgelehnt. Aufgrund der Daten kann nicht bestätigt werden, dass mit Zunahme des Projektalters bei der ersten Erfolgskontrolle der IAM Attraktivität stärker zugenommen hat.

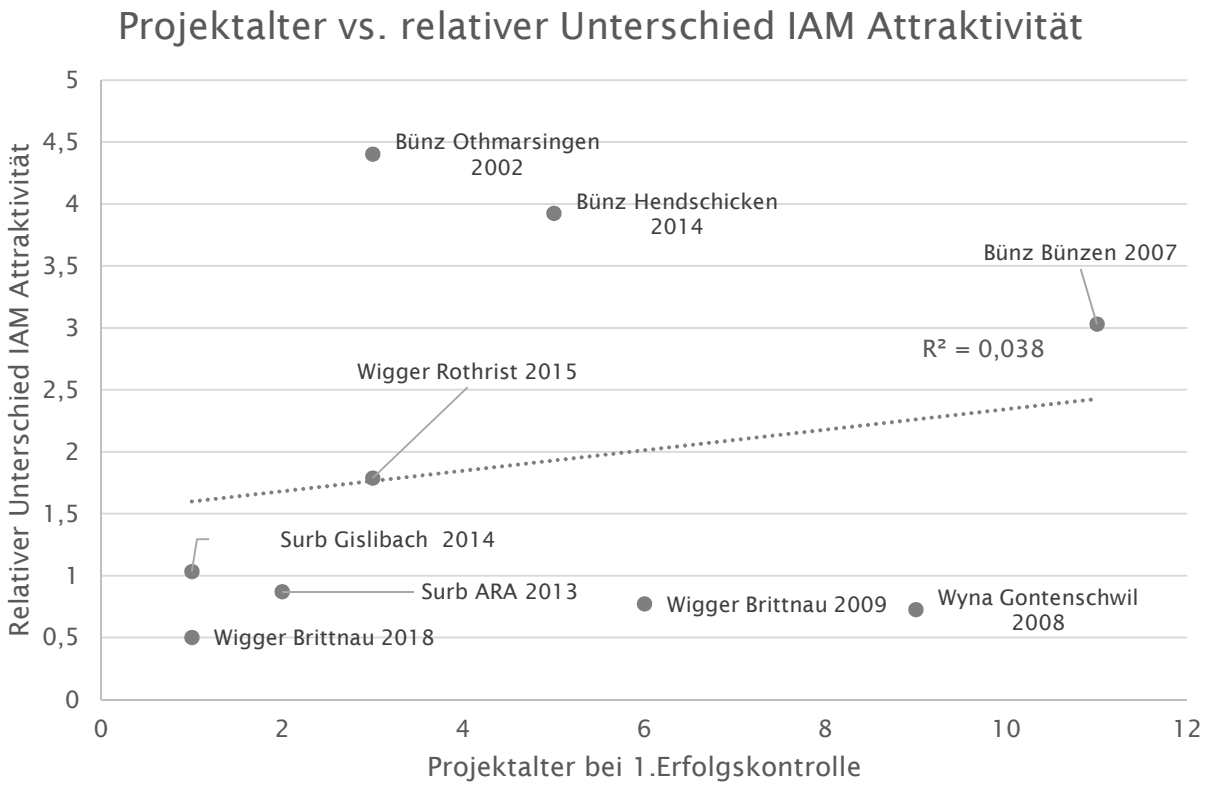


Abbildung 9: Zusammenhang Projektalter bei der ersten Erfolgskontrolle - Relativer Unterschied IAM Attraktivität. Die graue Linie zeigt die Korrelation zwischen dem Projektalter bei der ersten Erfolgskontrolle und dem relativen Unterschied IAM Attraktivität (N=9; R^2=0.038; p<0.01).

Hypothese 5: Je älter das Wasserbauprojekt ist, desto stärker hat die Forellenbiomasse zugenommen.

Um den Einfluss des Projektalters bei der ersten Erfolgskontrolle auf die Forellenbiomasse zu beurteilen, sind nicht nur die absoluten Zahlen aussagekräftig. Stattdessen wird die Zunahme bzw. Abnahme der Werte bewertet. Dazu wird der relative Unterschied der Forellenbiomasse aus dem Vergleich Kontroll/Vorher zu Nachher berechnet.

In Abbildung 10 wird auf der x-Achse (unabhängige Variabel) das Projektalter bei der ersten Erfolgskontrolle dargestellt, auf der y-Achse (abhängige Variabel) der relative Unterschied in der Forellenbiomasse. Es wird erwartet, dass ein älteres Projekt eine stärkere Zunahme der Forellenbiomasse aufweist (Hypothese 5).

Die Modellrechnung ergibt, dass die lineare Korrelation negativ, aber nicht signifikant ist (N=7; R^2=0.2741; p<0.01). Die Konstante beträgt 7,8578, d.h. direkt nach der Revitalisierung (Projektalter=0) beträgt die relative Zunahme der Forellenbiomasse 7,8578. Die Steigung ist negativ und beträgt -0,8579, d.h. bei Zunahme des Projektalters um ein Jahr nimmt der relative Unterschied der Forellenbiomasse im 0,8579 ab. R^2 liegt bei 27 % (0.2741), d.h. das Modell erklärt knapp 30% der Daten.

Die Hypothese 5 wird abgelehnt. Aufgrund der Daten kann nicht bestätigt werden, dass mit Zunahme des Projektalters bei der ersten Erfolgskontrolle die Forellenbiomasse stärker zugenommen hat.

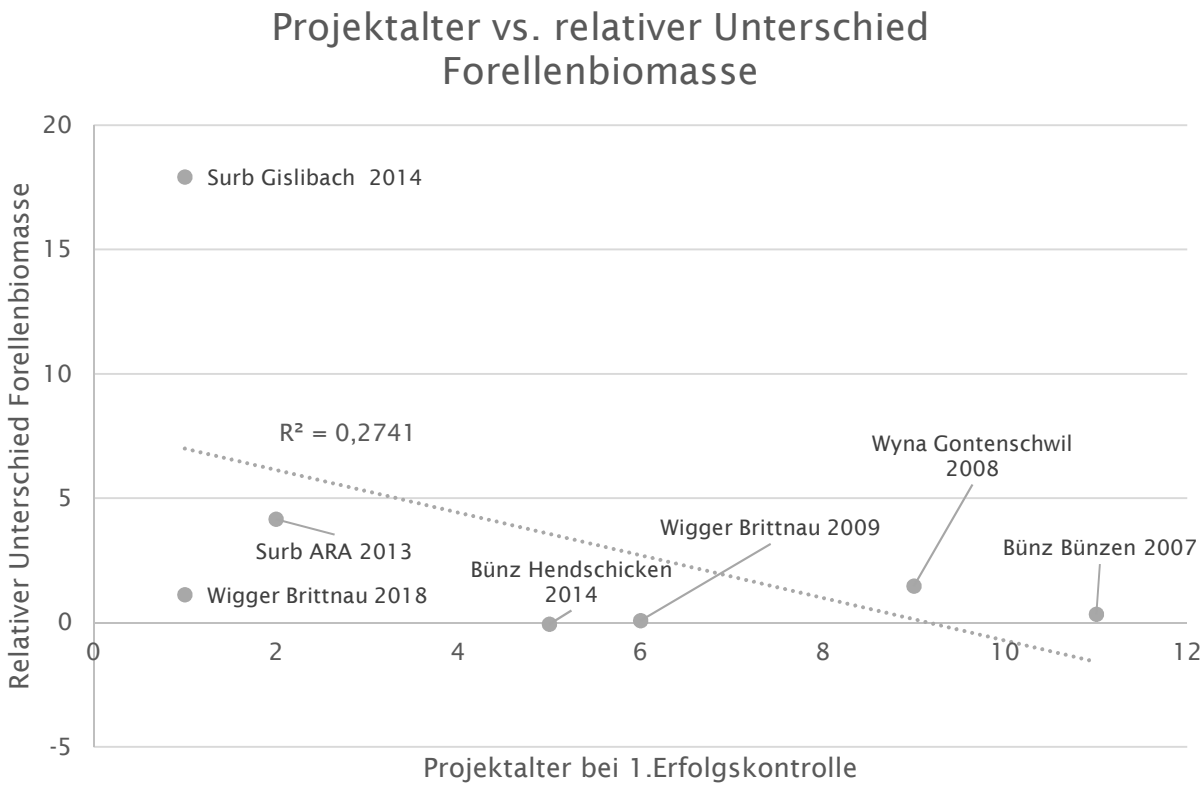


Abbildung 10: Zusammenhang Projektalter bei der ersten Erfolgskontrolle - Relativer Unterschied Forellenbiomasse. Die graue Linie zeigt die Korrelation zwischen dem Projektalter bei der ersten Erfolgskontrolle und dem relativen Unterschied Forellenbiomasse (N=7; R^2=0.2741; p<0.01).

Mit der Verwerfung von Hypothese 4 und 5 kann nicht bestätigt werden, dass das Projektalter bei der ersten Erfolgskontrolle einen signifikanten Einfluss auf den relativen Unterschied der Forellenbiomasse oder des IAM Attraktivitätswertes hat. Obwohl keine Korrelation in Bezug auf das Projektalter gezeigt werden kann, kann mit den vorliegenden Daten die hohe Wichtigkeit des Projektalters gemäss Kail et al. (2015) auf den Revitalisierungseffekt weder bestätigt noch widerlegt werden. Mit Hypothese 4 und 5 wurde nicht die Wichtigkeit sondern mögliche Korrelation getestet. Aufgrund der Ergebnisse gemäss Kail et al. (2015), sowie der positiven bzw. negativen Tendenzen im Modell der Hypothesen 4 und 5 werden für Erfolgskontrollen einheitliche Zeiträume empfohlen. Mit Ausschluss des Einflusses Projektalter durch einheitliche Zeiträume steigt die Vergleichbarkeit der Daten.

Die Fliessgewässer im Mitteland, auch diejenigen im Kanton Aargau, verzeichnen einen **Wassertemperaturanstieg** linear zur Zunahme der Lufttemperatur (BAFU, 2012). Dadurch wird eine Verschiebung der Fischarten von nördlichen und kälte- bzw. sauerstoffliebenden Arten hin zu thermophilen und südlichen Arten, sowie eine Zunahme bzw. Ausbreitung der temperaturabhängigen Krankheiten erwartet (Küng, 2020). Die Bachforellenpopulation kann also aufgrund steigender Wassertemperaturen trotz Aufwertung der Gewässermorphologie und Schaffung von attraktiven Habitaten weiter rückläufig sein. Bachforellen können durch thermophile Arten, wie der Alet ersetzt werden. Die Beschattungskarte des Kantons Aargau zeigt aber Defizite der Bestockung in den revitalisierten Abschnitten auf (Ausnahme Surb ARA, Wigger Brittnau, Bünz Bünzen). Um einen weiteren Temperaturanstieg der Gewässer zu minimieren, muss zukünftig bei Wasserbauprojekten mehr Wert auf eine dichte Bestockung und eine Bepflanzung an der Wasserlinie gelegt werden, soweit die Projektbedingungen es zulassen.

Zudem wird in einigen Erfolgskontrollen die **ungenügende Wasserqualität** angesprochen, welche sich negativ auf die Fischbestände auswirken kann (Aquabios, 2015). Es geht dabei insbesondere um den Einfluss der Siedlungsentwässerung und der Landwirtschaft (Pestizidwerte).

Des Weiteren können auch **Besatz** und **Befischungsdruck** die Bachforellenpopulation massgeblich beeinflussen. Die Entnahme der mässigen Bachforellen durch Sportfischer, sowie das Aussetzen von Bachforellen kann eine Abnahme bzw. eine Zunahme der Bachforellen bewirken.

2.5 Fazit

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels 2, Revitalisierungen Kanton Aargau aus Sicht der kälteliebenden Fischarten, wurden neun Wasserbauprojekte mit einheitlicher Bewertung des Erfolges (quantitative Befischung und IAM) ausgewertet und verglichen. Dabei wurden verschiedene Fragestellungen zu wasserbaulichen Massnahmen, zu strukturellen Aufwertungen des Gewässers und zu Fischen diskutiert, sowie mögliche Korrelationen zwischen den Analysen all dieser Projekte anhand von fünf Hypothesen getestet.

Die Bachforellenpopulationen haben sich mit Ausnahme der zwei Alet dominierten Gewässerabschnitten (Bünz Bünzen, Bünz Hendschicken) verbessert (Anzahl und Biomasse), wobei der Erwartungswert für Forellengewässer von 100-200 kg/ha nur bei den Projekten Wigger Brittnau 2018 und Bünz Hendschicken erreicht wurde.

Aus den Analysen des Kapitels 2 ergeben sich verschiedene Erkenntnisse und lassen sich persönliche Empfehlungen ableiten (Tabelle 4).

Tabelle 4: Zusammenfassung der Erkenntnisse aus Kapitel 2 und der persönlichen Empfehlungen, welche aus diesen Erkenntnissen abgeleitet werden.

Erkenntnisse aus der Arbeit	Persönliche Empfehlungen
Signifikanter und positiver Zusammenhang zwischen IAM Attraktivität und Gesamtbiomasse	Mit höherer Habitatattraktivität kann der Fischbestand in einem Gewässerabschnitt gefördert werden.
Signifikanter und positiver Zusammenhang zwischen IAM Attraktivität und Forellenbiomasse	Mit höherer Habitatattraktivität kann die Bachforelle in einem Gewässerabschnitt gefördert werden.
Höhere Habitatattraktivitätswerte wurden in Projekten erreicht, bei welchen Massnahmen zur Entwicklung der Sohle und Ufer in höheren Dichten umgesetzt wurden.	Mit einer höheren Dichte an Massnahmen der Massnahmengruppe Morphologie-Instream kann die Bachforelle gefördert werden.
Auswahl der wasserbaulichen Massnahmen (Art, Bauweise, Material und Dichte der Massnahmen) wurde bei den vorliegenden Projekten meist nicht begründet	

Es fehlt die Grundlage (Defizitanalyse, ökologische Projektziele und Zielarten), um eine spezifische Auswahl der wasserbaulichen Massnahmen zu definieren.	Es wird empfohlen zukünftig mit einer vorgängigen Analyse der ökologischen Defizite, der Definition der Projektziele und Zielarten die dominanten wasserbaulichen Massnahmengruppen, sowie spezifische Massnahmen auszuwählen.
Gemäss Bericht CCHydro, ist mit einem weiteren Anstieg der Wassertemperaturen in den Schweizer Fliessgewässern zu rechnen (BAFU, 2012)	Um dem Habitatverlust der Bachforelle aufgrund des Wassertemperaturanstieges entgegenzuwirken, müssen Massnahmen der Massnahmengruppe Wassertemperatur prioritär berücksichtigt werden.
Die Zeiträume sind in den vorliegenden Untersuchungen sehr unterschiedlich.	Für die Vergleichbarkeit wird empfohlen, zukünftig mit einheitlichen Zeiträumen zu arbeiten.

Die Hypothese 1, dass ein höherer IAM Attraktivitätswert mit einer höheren Gesamtbiomasse einhergeht, wurde angenommen. Ebenso konnte die Hypothese 2, dass ein höherer IAM Attraktivitätswert mit einer höheren Forellenbiomasse einhergeht, bestätigt werden. Beide Korrelationen sind signifikant und positiv. Aus der positiven und signifikanten Korrelation zwischen IAM Attraktivität und Forellenbiomasse lässt sich die persönliche Empfehlung ableiten, dass mit höherer Habitatattraktivität die Bachforelle gefördert werden kann.

Wasserbauprojekte, bei welchen in höheren Dichten Buhnen (Holz oder Steine), sowie Faschinen oder Totholzstrukturen in die Sohle oder Ufer eingebaut wurden, erreichten gute bis sehr gute Habitatattraktivitätswerte. Fehlende Massnahmen zur Entwicklung der Sohle und Ufer widerspiegeln sich hingegen in der Abwesenheit von attraktiven Habitaten für Fische. Mit einer höheren Dichte an Massnahmen der Massnahmengruppe Morphologie-Instream kann gemäss Hypothese 2 demnach die Bachforelle gefördert werden.

Die Hypothese 3, dass eine stärkere Zunahme des IAM Attraktivitätswert durch die Revitalisierung mit einer stärkeren Zunahme der Forellenbiomasse einhergeht, konnte nicht bestätigt werden. Die Hypothese 3 wurde abgelehnt. Die beiden Projekte mit guten bis sehr guten IAM Werten liegen in der Bünz, welche sich im Sommer stark erwärmt. Bei beiden Projekten ist nur eine geringe relative Zunahme der Forellenbiomasse gemessen worden. Die Forellenbiomasse wird in der Bünz stark durch weitere Faktoren (Wasserqualität, Wassertemperatur etc.) als die Strukturvielfalt beeinflusst.

Zudem werden langsam durchflossene und tiefe Strukturen als sehr positiv gewertet und heben den IAM Index. In kühlen Gewässern sind solche Strukturen ideal für Bachforellen. In warmen Gewässern, wie die Bünz, bevorzugen Bachforellen stark durchflossene und sauerstoffreiche Bereiche. Die langsam durchflossenen und tiefen Strukturen werden von Cypriniden besiedelt. Somit sind die positiven IAM Bewertungen in der Bünz etwas irreführend, denn aufgrund der hohen Wassertemperaturen im Sommer bevorzugen Bachforellen andere Habitate.

Die relative Zunahme der Forellenbiomasse hängt auch von der Quellpopulation im jeweiligen Gewässer ab. Es müssen flussaufwärts oder -abwärts grössere und gesunde Bachforellenpopulationen vorhanden sein, damit ein Wiederbesiedlungspotential in kurzer Zeit gegeben ist.

Die Auswahl der wasserbaulichen Massnahmen (Art, Bauweise, Material und Dichte der Massnahmen) wurde bei den vorliegenden Projekten meist nicht begründet. Es fehlt auch die Grundlage (Defizitanalyse, ökologische Projektziele und Zielarten), um eine spezifische Auswahl der Massnahmen zu definieren. Auch bei Hochwasserschutzprojekten ist eine vorgängige Analyse der ökologischen Defizite und Ziele sinnvoll. Auf diesen Grundlagen können die dominanten Massnahmengruppen, sowie spezifische Massnahmen ausgewählt werden, so dass die Habitatvielfalt für die definierte Zielart gefördert werden kann.

Wasserbauliche Massnahmen der Massnahmengruppe Wassertemperatur, wie Niederwasserrinne, Bestockung oder Anbindung von Seitengewässern wurden in den vorliegenden Projekten umgesetzt, aber meist nur eine Massnahme in geringer Dichte. Gemäss Bericht CCHydro, ist mit einem weiteren Anstieg der Wassertemperaturen in den Schweizer Fliessgewässern zu rechnen (BAFU, 2012). Mit zunehmender Lufttemperatur wird im Mittelland mit einer Zunahme der Wassertemperatur gerechnet (linearer Zusammenhang). Aufgrund dieser erwarteten Wassertemperaturzunahme sollen Massnahmen zur Senkung der Wassertemperatur (Niederwasserrinne, tiefe stark durchströmte Bereiche, Bestockung, Anbindung Seitengewässer) in allen Wasserbauprojekten zukünftig prioritär berücksichtigt werden.

Die Hypothese 4, dass ein älteres Projekt eine stärkere Zunahme der Habitatattraktivität aufweist, wurde abgelehnt. Auch die Hypothese 5, dass ein älteres Projekt eine stärkere Zunahme der Forellenbiomasse aufweist, konnte nicht bestätigt werden. Aufgrund der positiven bzw. negativen nicht signifikanten Tendenzen im Modell der Hypothese 4 und 5 werden für Erfolgskontrollen einheitliche Zeiträume empfohlen. Mit Ausschluss des Einflusses Projektalter durch einheitliche Zeiträume steigt die Vergleichbarkeit der Daten.

3 Anforderungen Leitfischarten an ihren Lebensraum, Fokus Bachforelle und Äsche

In einer Literaturrecherche werden die Habitatvorlieben und -anforderungen der Leitfischarten Äsche und Bachforelle zusammengetragen. Es fragt sich, wie ein Gewässerabschnitt gestaltet sein muss, damit diese Fischarten überleben, sich reproduzieren und stabile, gesunde Populationen aufbauen können. Besonders berücksichtigt wird die Temperatur, welche bereits angestiegen ist und gemäss den Klimaszenarien weiterhin ansteigen wird. Zudem wird diskutiert, auf welche Habitatansprüche der Wasserbau welchen Einfluss hat. Primär wird der Wasserbau die strukturelle Vielfalt im Gewässer verändern, jedoch werden auch andere Parameter wie Substrat, Sauerstoff, Temperatur etc. beeinflusst.

Im letzten Abschnitt werden die Habitatvorlieben und -anforderungen des Alets erläutert. Es hat sich im Kapitel 2 gezeigt, dass bei gewissen Wasserbauprojekten der Alet profitiert hat. Um diese Ergebnisse interpretieren zu können, werden die Habitatansprüche des Alets zusammengetragen.

3.1 Bachforelle (*Salmo trutta fario*)

Elliott (1994) definiert die wichtigsten Anforderungen der Bachforelle an ihren Lebensraum wie folgt:

- Passende Wassertemperaturen
- Ausreichend Sauerstoff
- Reichliches Nahrungsangebot
- Laichsubstrat
- Einstände für alle Altersstadien
- Wandermöglichkeiten

Alle sechs Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit sich eine stabile und gesunde Forellenpopulation in einem Gewässer etablieren kann. Die letzten drei Voraussetzungen (Laichsubstrat, Einstände für alle Altersstadien und Wandermöglichkeiten) hängen direkt mit den hydromorphologischen Bedingungen in einem Gewässer zusammen. Das heisst es kommt auf die Habitatausstattung und deren räumlichen und zeitlichen Vernetzung an (Unfer, 2012).

3.1.1 Wassertemperaturen

Die Bachforelle bevorzugt Wassertemperaturen zwischen 7-19°C. Die Letaltemperatur liegt je nach Sauerstoffgehalt im Wasser und vorgängigen Akklimatisationstemperaturen bei 25-30°C (Jungwirth et al., 2003). Je nach Altersstadium reagiert die Forelle unterschiedlich empfindlich auf hohe Wassertemperaturen. Am empfindlichsten ist die Forelle im Fortpflanzungsstadium und in der Inkubationszeit (Küttel et al. (2002) in Müller (2011)).

Gemäss den Klimaszenarien des Bundes CH2018 wird die Wassertemperaturzunahme linear zur Lufttemperaturzunahme in Schweizer Mittelland-Gewässern erwartet (BAFU, 2012). Bei einer Lufttemperaturerhöhung von 5°C bis ins Jahr 2050 würde die Bachforelle so 44 % ihrer heutigen Habitatfläche verlieren (Notter & Staub, 2009).

Wasserbauliche Massnahmen können sich kühlend auf Gewässerabschnitte auswirken. Deren Wichtigste wurden in der vorgängigen Literaturrecherche (Küng, 2020) zusammengetragen. Es handelt sich dabei um Massnahmen der Massnahmengruppe Wassertemperatur (effektive Beschattung, Niederwasserrinne, Anbindung Seitengewässer). Allgemein kann eine Habitat- und Substratheterogenität mit reicher Strukturierung des Gerinnes (z.B. mit Totholz) den Austausch mit dem Grundwasser fördern und sich kühlend aufs Gewässer auswirken. Zu einer effektiven Beschattung gehören Bestockungen an der Wasserlinie, vollständige und dichte Beschattungen, Wahl einer geeigneten Strecke etc. (Küng, 2020).

3.1.2 Sauerstoff

Die Bachforelle ist auf sauerstoffreiche Gewässer angewiesen. Minimumkonzentrationen liegen bei 5.0-5.5 mg/l. Eier und Larven brauchen hingegen noch mehr Sauerstoff (7-10 mg/l bei 10-17°C), da sie noch nicht in der Lage sind, aktiv zu atmen (Elliott, 1994; Jungwirth et al., 2003). Mit steigender Wassertemperatur steigt auch der Sauerstoffbedarf von wechselwarmen Wassertieren, der Sauerstoffgehalt des Wassers sinkt jedoch (Löslichkeit nimmt ab).

Beeinflusst wird der Sauerstoffgehalt nebst der Wassertemperatur durch den Gasaustausch Atmosphäre-Wasseroberfläche, durch Photosynthese, Mineralisation organischer Stoffe und Respiration. Der Sauerstoffgehalt in der Bachsohle unterscheidet sich von dem im freien Wasserkörper. Aufgrund des Gefälles von Schweizer Fliessgewässern und dem damit verbundenen permanenten Gasaustausch, ist die Sauerstoffsättigung im Wasserkörper meist hoch. In der Bachsohle hingegen kann es bei hohen Nährstoffeinträgen (Landwirtschaft, Siedlung, Abwasser) zu Sauerstoffuntersättigungen kommen (Liechti, 2010). Eintrag von organischen Feinsedimenten kann sich in der Bachsohle ablagern und den Sauerstoffgehalt des Interstitials direkt durch Kolmation verschlechtern, indirekt durch den Abbau der organischen Substanz oder durch übermässiges Algenwachstum. Eier und Larven bedürfen nicht nur eines höheren Sauerstoffgehaltes, sondern sind durch ihren Aufenthalt in der Bachsohle stärker einem potentiellen Sauerstoffmangel ausgesetzt.

Sauerstoffuntersättigungen sind vorrangig mit Massnahmen der Massnahmengruppe Wasserqualität (Nährstoffreduktionen: Pufferstreifen Gewässerraum, Reduktion Eintrag Nährstoffe aus Strassen- und Siedlungsentwässerung) zu lösen.

Experimente haben gezeigt, dass durch eine Sauerstoffübersättigung des Wasserkörpers die Bachforellen hohe Wassertemperaturen besser vertragen. Sie nehmen bei einer Übersättigung noch bis 28^{0}C Wassertemperatur Nahrung zu sich, was unter normalen Umständen der Letaltemperatur der Bachforelle entsprechen würde. Daraus wurde geschlossen, dass nicht die hohe Wassertemperatur, sondern das Sauerstoffangebot bzw. -aufnahmevermögen für die Forelle limitierend wirkt (Jungwirth et al., 2003). In Forellengewässern, die stark vom Klimawandel betroffen sind (v.a. Mittelland), können sich deshalb, nebst Massnahmen zur Senkung der Wassertemperatur, solche zur Erhöhung des Gasaustausches (Erhöhung Turbulenz) positiv auf Bachforellen auswirken.

3.1.3 Nahrungsangebot

Die Bachforelle ist immer auf benthische Invertebraten als Nahrung angewiesen, auch wenn der räuberische Fisch teilweise piscivor lebt und nach Möglichkeiten auch Insekten im Anflug (terrestrische Invertebraten) schnappt (Jungwirth et al., 2003). Das Nahrungsangebot in einem Gewässer hat Einfluss auf die Bachforellenbiomasse. Die Forelle braucht eine gewisse Energiemenge, um den täglichen Bedarf zu decken (Basisration). Zusätzliche Energie (Wachstumsration) wird ins Wachstum investiert. Bei Nahrungsüberschuss ist die Forellendichte meist hoch. Aber auch bei wenig Nahrung kommen meist hohe Forellendichten, aber geringe Biomassen vor. Denn bei wenig Nahrung wandern die grossen Forellen ab, es bleiben die Jungfische, welche genügend Nahrung finden. Der Prädationsdruck durch grosse Forellen sinkt, was zu hohen Dichten an Juvenilen führt (Unfer, 2012). Die Bachforelle bevorzugt Driftnahrung, bei der die Energieaufnahme durch Lauern auf die Beute und zuschnappen im richtigen Moment optimiert wird (Jungwirth et al., 2003).

Kail et al. (2015) zeigten in einer Meta-Studie, dass sich Revitalisierungen grundsätzlich positiv auf aquatische Invertebraten auswirken, insbesondere auf Biomasse und Dichte bereits vorhandener Arten. Die verschiedenen Massnahmengruppen wirkten sich ähnlich positiv auf Invertebraten aus, wobei sich Instream-Massnahmen effektiver in Erhöhung der Diversität zeigten. Grund dafür ist, dass Instream-Massnahmen häufig eine sofortige Erhöhung der Substratdiversität und eine Habitatzunahme bewirken.

Mit zunehmenden Wassertemperaturen wird eine Verschiebung der Lebensgemeinschaften der Wasserwirbellosen von nördlichen und kälte- bzw. sauerstoffliebenden Arten hin zu thermophilen und südlichen Arten erwartet (Daufresne et al., 2003). Der Klimawandel wird mehr die Zusammensetzung und weniger die Verfügbarkeit der Nahrung (Invertebraten allgemein) verändern. Die Bachforelle (opportunistische Ernährungsweise) wird demnach auch in Zukunft genügend Nahrung finden.

Für Bachforellen, welche über eine opportunistische Ernährungsweise verfügen, ist eine Zunahme der Diversität weniger relevant als eine Biomasseerhöhung. Aus Sicht der Bachforelle wirkt sich **eine Revitalisierung, egal welche Massnahmen prioritär umgesetzt werden, in den meisten Fällen positiv auf das Nahrungsangebot aus.**

3.1.4 Laichsubstrat

Der entscheidende Faktor für ein optimales Laichhabitat ist das geeignete Laichsubstrat. Die Bachforelle ist ein Kieslaicher und präferiert je nach Gewässertyp Korngrössen von 10-70 mm (Jungwirth et al., 2003). Der Kies muss durchlässig sein, damit die Eier gut mit Sauerstoff versorgt werden. Weitere Parameter, wie Fliessgeschwindigkeit oder Wassertiefe am Laichplatz sind untergeordnet zu betrachten (Unfer, 2012). Entscheidend ist, dass der Anteil an Feinsediment gering ist, da sonst dieses Lückensystem im Kies verstopft und der Gewässergrund kolmatiert. Als Feinsediment werden Körner mit weniger als 0,85 mm Durchmesser bezeichnet, wobei die Definition variiert (Soulsby et al., 2001; Jensen et al, 2009). Die Folgen aufgrund der Kolmation wären eine geringere Sauerstoffversorgung der Eier, sowie das erschwerte Graben der Laichgruben. Als verträglich wird ein Feinsedimentanteil bis 12 % definiert. Enthalten die Feinsedimentfraktionen einen hohen Anteil an organischem Material, wird durch den Abbau viel Sauerstoff gezerrt, was sich auch negativ auf die Bachforelleneier auswirken kann (Unfer, 2012). Zwischen dem Feinsedimentanteil und der Fliessgeschwindigkeit besteht ein Zusammenhang. Bevorzugt werden Fliessgeschwindigkeiten von ca. 40 cm/s, so dass das Feinsediment weggeschwemmt wird (Jungwirth et al., 2003).

Geeignete Kiesbänke entstehen durch Umlagerung von Geschiebe, vor allem bei Hochwasser. Das Geschiebe setzt sich nach Ereignissen ab und bildet neue sauerstoffdurchlässige Kiesbänke (falls dabei keine grossen Feinsedimenteinträge stattgefunden haben). Im Laufe der Zeit kolmatiert das Kieslückensystem durch den Feinsedimenteintrag, der Sauerstoffgehalt sinkt. Kiesbänke müssen periodisch umgelagert werden, damit keine Verfestigungen auftreten und sich geeignete Laichhabitate für Kieslaicher ergeben (Pulg, 2007).

Die Hauptursache der Laichplatzdegradierung ist die Gewässerregulierung. Befestigungen der Sohle und des Ufers verhindern eine Dynamik des Bachbettes, was die Umlagerung und Kieszufuhr aus den Uferbereichen vermindert. Wehre, Dämme etc. unterbinden den Kiesnachschub, wobei meist auch Geschiebe entnommen wird. In Staubereichen (z.B. oberhalb Kraftwerksanlagen) werden Kiesbänke mit Feinsediment überdeckt. Der Feinsedimenteintrag durch erosionsanfällige Kulturen der Landwirtschaft (z.B. Mais) lässt Kiesbänke verschlammen (Pulg, 2007).

Um degradierte Kieslaichplätze zu erneuern, muss die natürliche Kiesdynamik wieder hergestellt und der Schwebstoffeintrag reduziert werden. Das Erste kann mit Revitalisierungen begünstigt werden, indem naturnahe, ungestaute, dynamische und durchgängige Gewässer geschaffen werden. Das Zweite ist durch erosionsärmere Formen der Landwirtschaft erreichbar (Pulg, 2007).

Mit dem Klimawandel werden vermehrt Hochwasser in der vegetationsarmen Zeit auftreten. Kürzere Schneebedeckung, sowie höhere Niederschlagsmengen in Form von Regen anstelle von Schnee werden zu erhöhter Erosion und somit zu grösserem Feinsedimenteintrag in Gewässern führen. Folglich wird eine erhöhte Kolmation des Interstitial auftreten, so dass die Laichplätze rascher degradieren (Burkhardt-Holm, 2009).

Der durch den Klimawandel erwartete, erhöhte Feinsedimenteintrag kann in geringem Masse durch wasserbauliche Massnahmen der Massnahmengruppe Geschiebehaushalt gedämpft werden (Reduktion Feinsedimenteintrag durch Bestockung des Gewässerraumes und durch einen Pufferstreifen).

Wasserbauliche Massnahmen können indirekt durch Revitalisierungen eine natürliche Kiesdynamik fördern (z.B. durch Schaffung naturnaher, durchgängiger und dynamischer Gewässerabschnitte). Sie gehören vor allem den Massnahmengruppen Morphologie – Instream, Morphologie – Gerinneveränderungen, Morphologie – Überflutungsflächen an. Viele Gewässer werden in ihrer Geschiebe- und Abflussdynamik stark reguliert, so dass eine Revitalisierung nur bedingt eine Kiesdynamik auslösen kann. Bei solchen Gewässern sind weitere wasserbauliche Massnahmen der Massnahmengruppe Geschiebehaushalt (Geschiebeweiterleitung, -zugabe, aktive Laichplatzrestaurierung, Reduktion des Feinsedimenteintrages) und Hydrodynamik (Wiederherstellung des hydrologischen Regimes) notwendig.

3.1.5 Einstände für alle Altersstufen

Nach Schlupf sind die **Larven** zunächst noch nicht schwimmfähig und leben im kiesigen Interstitial (Abbildung 11). Je nach Wassertemperatur dauert die Phase im Interstitial Monate. Als Ei wie auch als Larve (Dottersackstadium) ist die Bachforelle auf ein intaktes, sauerstoffreiches Interstitial angewiesen. In diesen Stadien sind Bachforellen anfällig auf Hochwasser, Sedimenteintrag und Sauerstoffunterversorgung. Während der Zeit im kiesigen Untergrund treten die höchsten Mortalitätsraten im Lebensabschnitt von Forellen auf (Quinn, 2005). Wasserbauliche Massnahmen zur Verbesserung von Larvalhabitaten entsprechen den Massnahmen zur Förderung von Kieslaichplätzen (Siehe Kapitel 3.1.4).

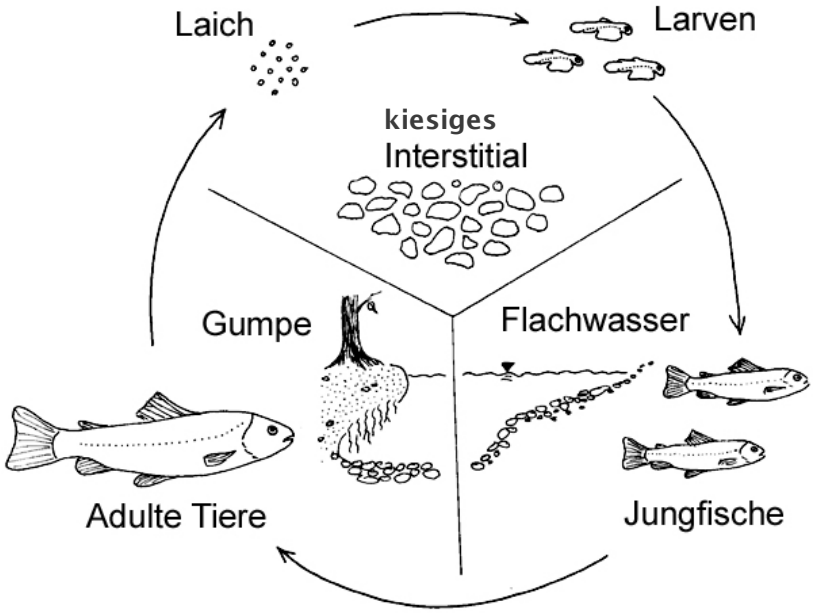


Abbildung 11: Lebenszyklus und Habitatvorlieben der Bachforelle (Bostelmann, 2003).

Die Habitatansprüche **juveniler** und **adulter** Bachforellen überlappen sich. Deshalb ist es die räumliche Anordnung der verschiedenen Mikrohabitattypen[1], welche das Mass an Interaktion festlegt. Die besten Lebensräume zeichnen sich durch Sicht- und Strömungsschutz (energetische Vorteile), sowie optimale Nahrungsversorgung aus. Die Mehrheit der Bachforellen ist territorial. Die Habitatnutzung der Bachforellen ist das Resultat der intraspezifischen Konkurrenz. Der stärkste und grösste Fisch besetzt normalerweise den tiefsten Kolk (Unfer, 2012).

Eine Untersuchung an der Ois (Niederösterreich) weist auf eine klare Präferenz bei Juvenilen für flache überströmte Bereiche mit geringer Tiefenvarianz (Furte) und bei Adulten eine klare Präferenz für Kolke hin. Rinner (Grossteil Abfluss in Tiefenrinne konzentriert) wurden von Juvenilen und Adulten genutzt, wobei mehr Juvenile dieses Mesohabitat[2] besiedeln (Jungwirth et al., 2003).

[1] Mikrohabitate sind Rückzugsorte für Fische in einem Fliessgewässer, die auch Schutz vor Konkurrenten und Fressfeinden bieten (Fischunterstände) (Peter, 1992).
[2] Mesohabitate sind räumliche Bereiche in einem Fliessgewässer mit ähnlichen hydraulischen Eigenschaften (Peter, 1992).

Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass mit zunehmendem Alter Bereiche mit höheren Wassertiefen und höheren mittleren Fliessgeschwindigkeiten bevorzugt werden. Adulte Bachforellen halten sich vermehrt in Bereichen mit 40-65 cm Wassertiefe und mit Fliessgeschwindigkeiten von 15-25 cm/s auf, Juvenile hingegen in Wassertiefen von 30-50 cm und Geschwindigkeiten von 9-13 cm/s (Jungwirth et al., 2003). Generell zeigen Bachforellen eine Präferenz für Habitate mit geringen Fliessgeschwindigkeiten (energetische Vorteile) bei gleichzeitig höheren Fliessgeschwindigkeiten im direkten Umfeld (Driftnahrung). Eine hohe Diversität der Fliessgeschwindigkeiten in einem Gewässerabschnitt ist also positiv zu werten.

Die Bachforelle ist stark strukturgebunden. Strukturen bieten Strömungs- und Sichtschutz. Als Strukturen dienen nebst submersen Materialien (Totholz, Wasserpflanzen, grössere Steine etc.), auch Strukturen, die die Wasseroberfläche durchbrechen (Totholz, Steine etc.), sowie die Ufervegetation. Insbesondere im Winterhalbjahr, wenn Makrophyten und die Ufervegetation ruhen, gewinnen andere Strukturen an Bedeutung. In strukturreichen Gewässern wird das Revier einer einzelnen Bachforelle reduziert, da sie ihre Bedürfnisse (Nahrung, Schutz, Ruhe) auf engerem Raum decken kann (Jungwirth et al, 2003). Das Vorhandensein geeigneter Strukturen kann so die Bachforellendichte in einem Gewässerabschnitt stark erhöhen (Jungwirth & Winkler, 1983; Eklöv & Greenberg, 1998).

Entscheidend für die Eignung eines Gewässers als Juvenil- oder Adultfischhabitat ist nicht das Vorhandensein eines einzelnen Habitattypes, sondern die Summe geeigneter Habitattypen, sowie die Diversität im Lebensraum. Die Habitatnutzung von Bachforellen hängt stark von der Habitatausstattung des jeweiligen Gewässers und der innerartlichen Konkurrenz ab. Zudem ist auch die Nahrungsverfügbarkeit zentral, denn es werden auch schlechte Habitate (z.B. hohe Fliessgeschwindigkeit) genutzt, wenn ein erhöhter Energiegewinn das schlechte Habitat ausgleicht (Unfer, 2012). Allgemeine Habitateignungs- bzw. Präferenzkurven für die Bachforellen lassen sich deshalb nicht exakt bestimmen, sondern können nur für lokale Populationen und bestimmte Gewässer mit konstanten Umweltbedingungen erstellt werden.

Gemäss den Klimaszenarien des Bundes CH2018 werden ausgedehntere Niedrigwasserperioden und geringere Niedrigwasserstände im Sommer erwartet. Die Verfügbarkeit geeigneter Mikrohabitate bei Niedrigwasser wird an Bedeutung zunehmen. Dazu gehören zwingend genügend Strukturen in der Gewässersohle und im Ufer, hohe Diversitäten in Fliessgeschwindigkeiten und in Wassertiefen, sowie tiefere Kolke in höheren Dichten. Auch bei normalen Wasserständen sind diese Mikrohabitate erforderlich.

In einer Meta-Studie hat Roni et al. (2008) die Wirksamkeit von Instream-Massnahmen zur Entwicklung der Sohl- und Uferstruktur untersucht und festgestellt, dass Instream-Massnahmen grösstenteils zu einer wesentlichen Verbesserung der Gerinnediversität (Tiefe, Fliessgeschwindigkeit, Morphologie, Komplexität, Substrat etc.) führten. Kolke traten häufiger auf und waren tiefer.

Zur Förderung juveniler und adulter Bachforellenhabitate sind Massnahmen der Massnahmengruppe Morphologie – Instream (Gewässersohle und Ufer) umzusetzen. Zudem sind die Ufer zu bestocken (Massnahmengruppe Morphologie - Gewässerraum). Vegetation schafft durch Pflanzenteile (Wurzeln, ins Wasser hängende Äste, Schatten, Totholz) wichtige Mikrohabitate für Bachforellen.

3.1.6 Wandermöglichkeiten

Als Migration definiert Northcote (1978) Bewegungen, die regelmässig auftreten, einen Grossteil der Population involviert und die einen Wechsel zwischen zwei oder mehreren getrennten Habitaten verursachen. Die Bewegungen werden zwischen drei funktionalen Lebensräumen, Nahrungsort, Zufluchtsort und Fortpflanzungsort betrachtet (Abbildung 12).

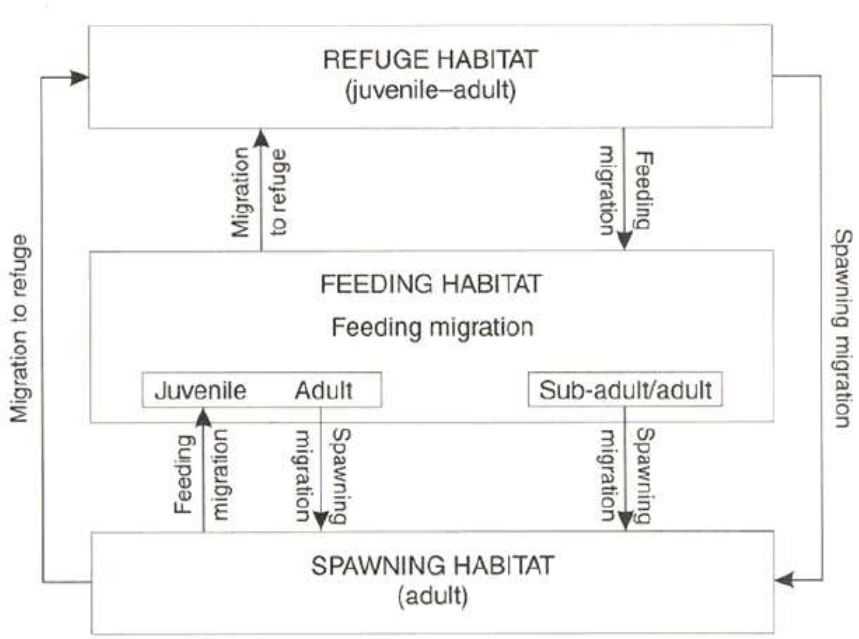


Abbildung 12: Migration zwischen den drei funktionalen Lebensräumen: Nahrungsaufnahme, Zuflucht und Fortpflanzung (Lucas & Baras, 2001).

Es existieren viele Untersuchungen zur Wanderfreudigkeit der Bachforelle, sowie deren Standorttreue. Vielseitige, teils widersprüchliche Wanderphänomene wurden dokumentiert. Grund dafür ist sicher auch, dass meist nur eine Minderheit der Individuen einer Population wanderaktiv ist, die meisten Fische sich aber stationär verhalten (ausgenommen Laichwanderung) (Jungwirth et al., 2003).

Längere Migrationsbewegungen werden vor allem während der Laichzeit der Bachforelle festgestellt. Laichwanderungen sind meist eine flussaufwärts gerichtete Bewegung mit anschliessender Rückkehr zum Nahrungshabitat (Jungwirth et al., 2003). Die Bachforelle verfügt über ein ausgeprägtes Homing (Heimkehrverhalten). Eine Untersuchung von Tilzey (1977) zeigte, dass 90 % der Laichfische wieder zurück in ihr Laichgewässer wandern. Das Homing der Bachforelle ist jedoch nicht so stark ausgeprägt, wie bei anderen Fischarten (z.B. Lachs) (Unfer, 2012).

Weitere Wanderbewegungen sind mit dem Habitatwechsel von Larven zu Juvenile zu Adulte zu beobachten. Mit zunehmender Grösse verändern sich die Habitatansprüche der Fische, so dass neue Lebensräume aufgesucht werden. Wichtig ist die Konnektivität zu Hauptfluss und Seitengewässer. Seitengewässer dienen oftmals als Larven- und Jungfischhabitat. Für Adulte sind jedoch Hauptflüsse aufgrund des höheren Nahrungsangebotes und Verfügbarkeit von Habitaten geeigneter (z.B. Bembo et al., 1993; Unfer, 2012).

Saisonale Migrationen werden zwischen Winter- und Sommerhabitat von Bachforellen beobachtet. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass Bachforellen im Sommer aus Gewässerabschnitten mit hohen Temperaturen abwandern, diese aber im Winter wieder als bedeutende Habitate aufsuchen (z.B. Clapp et al., 1990; Garrett & Bennett, 1995). Mit zunehmenden Wassertemperaturen gemäss Klimaszenarien des Bundes CH2018 wird eine Zunahme der saisonalen Migrationen in kühlere Oberläufe oder Seitengewässer erwartet. Auch bei längeren Niedrigwasserperioden im Sommer mit kleineren Niedrigwasserständen muss die Fischgängigkeit gewährleistet sein. Eine Anbindung der Seitengewässer, die Aufwertung derer Mündungsbereiche, die Anbindung der Oberläufe und die Erstellung einer Niederwasserrinne (Massnahmengruppe Wassertemperatur) sind deshalb prioritär zu behandeln (Küng, 2020).

Massnahmen der Massnahmengruppe Längsvernetzung (Wiederherstellung der Fischgängigkeit eines Gewässers) sind von grosser Bedeutung für eine gesunde Bachforellenpopulation, obwohl sich mit zunehmender Konnektivität auch invasive Arten und Krankheiten schneller verbreiten.

Gesetzliche Vorgaben bezüglich Fischgängigkeit sind einerseits im Bundesgesetz für Fischerei (BGF) für technische Eingriffe und andererseits im revidierten Gewässerschutzgesetz (GSchG) spezifisch für Wasserkraftanlagen festgehalten. Wasserkraftbedingte Hindernisse, welche die Fischwanderung wesentlich beeinflussen, müssen bis 2030 saniert werden. Die Sanierung von nicht wasserkraftbedingten Hindernissen sollen, soweit sinnvoll, im Rahmen einer Revitalisierungsplanung berücksichtigt werden (BAFU, Fischgängigkeit, 2019).

3.1.7 Zusammenfassung

In Tabelle 5 sind die Habitatansprüche der Bachforelle zusammengefasst. Zu jedem Aspekt ist der Einfluss des Wasserbaus durch eine oder mehrere Massnahmengruppen definiert (siehe auch Kapitel 2.3.1). Der Klimawandel wirkt sich auf die Qualität und Verfügbarkeit der Bachforellenhabitate aus. Deshalb ist ebenfalls aufgeführt, welche zusätzlichen Massnahmen unter Berücksichtigung des Klimawandels umzusetzen sind.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Habitatansprüche der Bachforelle (Salmo trutta fario), des Einflusses des Wasserbaus (wasserbauliche Massnahmengruppe), sowie Einfluss des Wasserbaus unter Berücksichtigung des Klimawandels.

	Anforderungen Habitat	Wasserbauliche Massnahmen	Klimawandel
Wassertemperatur	Optimal: 7-19°C, Letal: 25-30°C	Massnahmengruppe Wassertemperatur (effektive Beschattung, Niederwasserrinne, Anbindung Seitengewässer). Allgemein: Habitat- & Substratheterogenität mit reicher Strukturierung des Gerinnes z.B. mit Totholz fördert Grundwasseraustausch. Effektive Beschattung: Bestockungen an der Wasserlinie, vollständige und dichte Beschattungen, Wahl einer geeigneten Strecke etc.	Massnahmengruppe Wassertemperatur
Sauerstoff	Minimumkonzentrationen 5.0-5.5 mg/l. Eier & Larven: 7-10 mg/l bei 10-17°C	Massnahmengruppe Wasserqualität (Nährstoffreduktionen: Pufferstreifen Gewässerraum, Reduktion Eintrag Nährstoffe aus Strassen- und Siedlungsentwässerung)	Forellengewässer mit zu hohen Wassertemperaturen: Massnahmen zur Erhöhung des Gasaustausches (Erhöhung Turbulenz)
Nahrungsangebot	Vorwiegend benthische Invertebraten, teilweise Fische, terrestrische Invertebraten, opportunistische Ernährungsweise, Driftnahrung	Revitalisierung wirkt sich, **egal welche Massnahmen prioritär umgesetzt** werden, in den meisten Fällen positiv auf das Nahrungsangebot aus (Erhöhung Biomasse).	Verschiebung Invertebraten von nördlichen und kälte- bzw. sauerstoffliebenden Arten hin zu thermophilen und südlichen Arten. Bachforelle findet weiterhin genügend Nahrung

Laichsubstrat	Kies, gut durchlässig, sauerstoffreich, Anteil Feinsediment ≤ 12 %, Fliessgeschwindigkeiten ca. 40 cm/s	Durch Revitalisierungen natürliche Kiesdynamik fördern (prioritär Massnahmengruppe Morphologie – Instream, Morphologie – Gerinneveränderungen, Morphologie – Überflutungsflächen) Weitere wasserbauliche Massnahmen der Massnahmengruppe Geschiebehaushalt (Geschiebeweiterleitung, -zugabe, aktive Laichplatzrestaurierung, Reduktion des Feinsedimenteintrages) und Hydrodynamik (Wiederherstellung des hydrologischen Regimes)	Erhöhter Feinsedimenteintrag durch Klimawandel mit wasserbaulichen Massnahmen der Massnahmengruppe Geschiebehaushalt (Reduktion Feinsedimenteintrag durch Bestockung des Gewässerraumes und Pufferstreifen)
Einstände für alle Altersstufen	Hohe Strukturvielfalt in Sohle und Ufer, hohe Diversitäten Fliessgeschwindigkeiten & Wassertiefen, tiefe Kolke in höheren Dichten	Massnahmengruppe Morphologie – Instream (Gewässersohle und Ufer) Ufer bestocken (Massnahmengruppe Morphologie - Gewässerraum)	Verfügbarkeit geeigneter Mikrohabitate bei Niedrigwasser wird an Bedeutung zunehmen. Gleiche Massnahmen, wie ohne Klimawandel umsetzen
Wanderung	Laichwanderungen, Saisonale Migrationen, Wanderbewegungen mit Habitatwechsel von Larven zu Juvenile zu Adulte, Konnektivität Oberlauf / Seitengewässer	Massnahmengruppe Längsvernetzung (Wiederherstellung der Fischgängigkeit eines Gewässers)	Anbindung der Seitengewässer & Aufwertung deren Mündungsbereiche, Anbindung der Oberläufe, sowie Erstellung einer Niederwasserrinne (Massnahmengruppe Wassertemperatur)

3.2 Äsche (*Thymallus thymallus*)

Die Äsche hat ihren Verbreitungsschwerpunkt in Mittelläufen alpiner Fliessgewässer. Diese Gewässerregion ist sommerkühl, das Wasser sauerstoffreich und schnell fliessend. Die Äschenregion weist aber im Vergleich zur Forellenregion ein geringeres Gefälle, höhere sommerliche Wassertemperaturen, grössere Gewässerbreiten und grössere Wassertiefen auf (Jungwirth et al., 2003).

Die Äsche weist einen komplexen Lebenszyklus mit wechselnden ökologischen Ansprüchen und dem damit verbundenen Habitatwechsel auf. Das geeignete Habitatangebot in kritischen Phasen (key periods) entscheidet deshalb über die Überlebenschancen der Tiere, sowie die Vernetzung dieser Habitate. Zudem sind regionale Unterschiede im Lebenszyklus und in der Habitatwahl zu beobachten. Eine Förderung einer lokalen Äschenpopulation bedarf deshalb zwingend lokaler Kenntnisse (Northcote T. G., 1995).

Nebst den spezifischen Habitaten für alle Altersstadien (inkl. Laichhabitat) stellt die Äsche Anforderungen an die Wassertemperatur, das Nahrungsangebot und die Wandermöglichkeiten.

3.2.1 Wassertemperaturen

Am anfälligsten auf hohe Wassertemperaturen sind die Äscheneier. Im März und April darf deshalb die Tagesmaximaltemperatur von 15°C nicht überschritten werden. Das Temperaturoptimum für Äschen liegt zwischen 4-18°C. Bereits bei 26°C ist die Letaltemperatur erreicht, was sie zur temperaturempfindlichsten Art der Schweizer Fliessgewässer macht (Küttel et al. (2002) in Müller (2011)).

Gemäss den Klimaszenarien des Bundes CH2018 wird die Wassertemperaturzunahme linear zur Lufttemperaturzunahme in Schweizer Mittelland-Gewässern erwartet (BAFU, 2012). Kirchhofer & Breitenstein (2019) haben gezeigt, dass die Hälfte der 20 untersuchten Äschengewässer der Schweiz die Temperaturgrenzen von 26°C in einem oder mehreren Sommern in den letzten 20 Jahren überschritten hat. Bei dieser Zunahme der Wassertemperatur muss mit einem Rückgang der Äschen in den wichtigsten Äschenstrecken von nationaler Bedeutung und mit deren Verschwinden in gewissen Teilabschnitten gerechnet werden. Aufgrund der Präferenzen für Fliessgeschwindigkeiten und Gefälle wird die Äsche ihre Habitate nicht in höher gelegene Fliessgewässer verschieben können.

Analog zu den wasserbaulichen Massnahmen zur Förderung der Bachforellen sind demnach Massnahmen der Massnahmengruppe Wassertemperatur (effektive Beschattung, Anbindung Seitengewässer) umzusetzen. Die Massnahme Niederwasserrinne soll prioritär in kleinen bis mittelgrossen Gewässern umgesetzt werden. Viele Äschengewässer der Schweiz (Aare, Limmat etc.) sind jedoch gross, so dass meist keine Niederwasserrinne geplant wird.

3.2.2 Nahrungsangebot

Äschen ernähren sich wie Bachforellen räuberisch. Die wichtigste Nahrungsquelle sind benthische Invertebraten, selten auch kleine Fische, Fischlaich und im Sommer Anflugnahrung. Die wichtigste Nahrung der Äschenlarven sind Chironomiden. Die Nahrungszusammensetzung ändert sich saisonal und im Laufe des Lebenszyklus der Äsche (Jungwirth et al., 2003).

In Österreich gilt die Köcherfliegenlarve (*Allogamus auricollis*) als wichtige Nahrungsgrundlage für die Äsche, da sie in hoher Dichte vorkommt und einfach auf dem Gewässergrund auffindbar ist. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich mit zunehmenden Wassertemperaturen auch das Verbreitungsgebiet dieser Köcherfliegenlarve verkleinert und sie aus gewissen Gewässerabschnitten verschwinden wird (Pletterbauer et al., 2016). Thermophile Invertebraten müssen diese Lücke in der Nahrungsverfügbarkeit füllen. Andere Köcherfliegenlarven leben aber versteckter und kommen in geringerer Dichte vor. Die Auswirkungen auf die Äschenpopulationen sind deshalb noch ungewiss.

Allgemein wird eine Zunahme der Biomasse und Dichte aquatischer Invertebraten als positiv für die Nahrungsverfügbarkeit der Äsche gewertet. Analog zu den wasserbaulichen Massnahmen zur Förderung der Bachforellen, wirkt sich demnach eine **Revitalisierung, egal welche Massnahmen prioritär umgesetzt werden, in den meisten Fällen auch positiv auf das Nahrungsangebot aus.**

3.2.3 Wandermöglichkeiten

Migrationen der Äsche sind bis heute komplexe und unvollständig verstandene Bewegungen. Es handelt sich dabei um saisonale und tageszeitliche Wanderungen, um Laichbewegungen und um Bewegungen zum Habitatwechsel im Verlaufe des Lebenszyklus (Jungwirth et al., 2003). Northcote (1995) definiert drei Haupt-Habitattypen, zwischen welchen Äschen verschiedener Altersklassen wandern: Das Überwinterungs-, das Laich- und das Nahrungshabitat.

Die Laichwanderung der Äsche ist ein bekanntes Phänomen, beschränkt sich jedoch auf eine Distanz von 5-15 km. Laichgebiete von Äschenpopulationen grösserer Fliessgewässer liegen oft in Seitengewässern (Wiesbauer et al. 1991). Nach dem Laichen kehren die Fische in dieselbe Kolk-Furt Sequenz zurück, aus der sie gekommen sind (homing-Verhalten) (Parkinson et al., 1999).

Eine weitere Migration ist der Wechsel zwischen Sommer- und Winterhabitate (tiefe Kolke). Tageszeitliche Bewegungen sind zwischen Tag- und Nachthabitaten zu beobachten. In der Nacht suchen alle Altersklassen zur Optimierung des Energiegewinnes und als Schutz vor Fressfeinden Totwasserbereiche auf und ruhen ohne Strömung am Boden (Jungwirth et al., 2003).

Im Laufe des Lebenszyklus sucht die Äsche neue Habitate auf. Äschenlarven und frühe Juvenilphasen bewegen sich vor allem in der Nacht flussabwärts. Seitengewässer, welche als Laichhabitat genutzt werden, werden verlassen (Jungwirth et al., 2003). Sofern keine Migrationshindernisse bestehen, ist der Bewegungsradius der Äsche relativ hoch. Untersuchungen der Linthkanal – Äschen zeigten Wanderdistanzen bis zu 17 km (Knutti, 2001). Bei weiteren Beobachtungen wurde maximal eine Wanderdistanz von 5-100 km festgestellt (Gutruf, 1996; Parkinson et al., 1999; Meyer, 2001)

Mit zunehmenden Wassertemperaturen gemäss Klimaszenarien des Bundes CH2018 wird eine Zunahme der saisonalen Migrationen in kühlere Oberläufe oder Seitengewässer erwartet, falls die höheren Fliessgeschwindigkeiten und Gefälle für die Äsche noch verträglich sind. Eine Anbindung der Seitengewässer, die Aufwertung derer Mündungsbereiche und die Anbindung der Oberläufe (Massnahmengruppe Wassertemperatur) sind deshalb prioritär zu behandeln (Küng, 2020). Insbesondere bei Seitengewässern, welche geeignete Habitatbedingungen für Äschen aufweisen.

Analog zu den wasserbaulichen Massnahmen zur Förderung der Bachforellen, sind Massnahmen der Massnahmengruppe Längsvernetzung (Wiederherstellung der Fischgängigkeit eines Gewässers) von grosser Bedeutung für eine gesunde Äschenpopulation, obwohl sich mit zunehmender Konnektivität auch invasive Arten und Krankheiten schneller verbreiten.

3.2.4 Habitate für alle Altersstufen

Äschen sind zwar Kieslaicher, ihr Laichverhalten unterscheidet sich aber von den meisten Salmoniden. Sie heben keine Laichgruben aus, sondern legen die Eier oberflächlich ins Sediment. Die Äschenlaichhabitate sind durch kiesig-steiniges Substrat (16-64 mm), mittlere Fließgeschwindigkeiten von 49 cm/s (40-70 cm/s) und Wassertiefen von 20-30 cm definiert (Abbildung 13). Die Laichplätze können im Hauptgerinne oder in Zuflüssen liegen. Zwischen den Laichakten müssen sich die Muttertiere ausruhen können. Flussabwärts liegende Kolke und sichtschutzgebende Strukturen (z.B. Totholz) dienen als Ruheplatz zwischen den Laichakten (Jungwirth et al., 2003). Nach Gutruf (1996) laichen Äschen in Furten und Furt / Kolk-Übergängen.

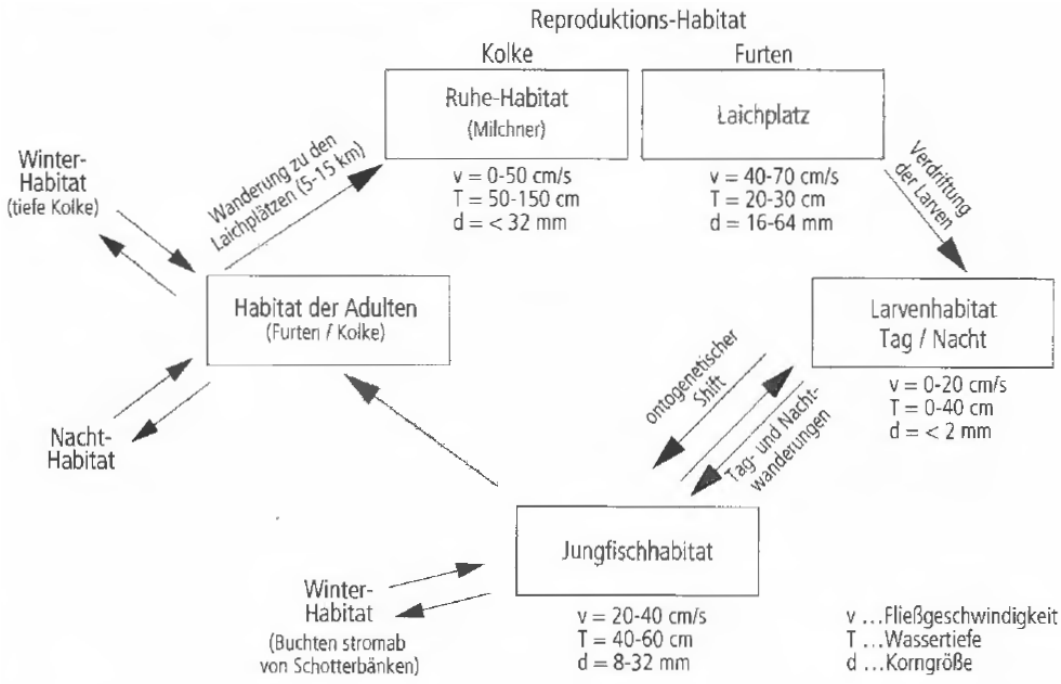


Abbildung 13: Lebenszyklus der Äsche (verändert nach Sempeski & Gaudin, 1995a,b,c,d in Jungwirth et al., 2003).

Nach Schlupf verbringen die Larven 4-13 Tage im Interstitial und emergieren dann aus dem Kiesbett. Die emergierten Larven bevorzugen flache Gewässerbereiche (0-40 cm) mit geringen Fliessgeschwindigkeiten (0-20 cm/s) und Korndurchmesser < 2 mm. Diese Bedingungen finden sich in seichten Uferzonen, in Kehrwassern, entlang von Kies- und Schotterbänken, sowie in Alt- und Seitenarmen (Gutruf, 1996). Im Gegensatz zu Bachforellenlarven sind die Äschenlarven nicht von sichtschutzgebenden Strukturen abhängig (Jungwirth et al., 2003). Im Alter von 3 Wochen, im Übergang zum Juvenilstadium, gibt die Äsche ihr Schwarmverhalten auf, wird agonistisch und territorial (Gutruf, 1996).

Juvenile Fische ab einer Länge von 35-40 mm und Adulte halten sich nahe der Gewässersohle im Hauptgerinne auf (Gutruf, 1996). Die bevorzugte Wassertiefe ist stadienabhängig. Je grösser der Fisch ist, umso tieferes Habitat bevorzugt er. Juvenile und Adulte Fische leben weiterhin in kleinen Gruppen und sind nicht auf Verstecke (sichtschutzgebende Strukturen) angewiesen (Jungwirth et al., 2003).

Wie die Bachforelle, wählt die Äsche Standorte aus, bei welchen die Nettoenergieaufnahme optimiert wird. Das heisst der grösste und dominanteste Fisch besetzt den energetisch besten Standort (Jungwirth et al., 2003).

Und wie bei der Bachforelle ist auch eine natürliche Kiesdynamik Voraussetzung für intakte Laich- und Larvenhabitate vor Emergenz für Äschen. Mit einer periodischen Umlagerung der Kiesbänke treten keine Verfestigungen auf und neue attraktive Habitate werden geschaffen.

Analog zu den wasserbaulichen Massnahmen zur Förderung der Bachforellen, können Massnahmen der Massnahmengruppe Geschiebehaushalt den durch den Klimawandel erwarteten, erhöhten Feinsedimenteintrag in geringem Masse reduzieren (Reduktion Feinsedimenteintrag durch Bestockung des Gewässerraumes und durch einen Pufferstreifen).

Wasserbauliche Massnahmen können indirekt durch Revitalisierungen eine natürliche Kiesdynamik fördern (z.B. durch Schaffung naturnaher, durchgängiger und dynamischer Gewässerabschnitte). Sie gehören vor allem den Massnahmengruppen Morphologie – Instream, Morphologie – Gerinneveränderungen, Morphologie – Überflutungsflächen an. Viele Gewässer werden in ihrer Geschiebe- und Abflussdynamik stark reguliert, so dass eine Revitalisierung nur bedingt eine Kiesdynamik auslösen kann. Bei solchen Gewässern sind weitere wasserbauliche Massnahmen der Massnahmengruppe Geschiebehaushalt (Geschiebeweiterleitung, -zugabe, aktive Laichplatzrestaurierung, Reduktion des Feinsedimenteintrages) und Hydrodynamik (Wiederherstellung des hydrologischen Regimes) notwendig.

Eine Strukturierung des Gerinnes schafft Ruheplätze für Muttertiere während der Laichzeit (Massnahmengruppe Morphologie – Instream). Zudem nimmt die Strömungs- und Wassertiefenvariabilität zu, was sich positiv auf das Habitatangebot für alle Altersgruppen auswirkt.

Viele Äschengewässer des Mittellands sind morphologisch stark beeinträchtigt (begradigt). Weshalb es insbesondere an Habitaten für Larven, welche aus dem Kies emergiert sind, fehlt. Mit Uferrevitalisierungen können Äschenlarven-Lebensräume gefördert werden. Es bedarf natürlicher Flachufer, Reaktivierungen von Seitenarmen und der Schaffung von Kehrwasser und von auslaufenden, seichten Uferzonen. Folglich gehören wichtige wasserbauliche Massnahmen der Massnahmengruppe Morphologie – Instream, Morphologie – Gerinneveränderungen, Morphologie – Überflutungsflächen an.

3.2.5 Zusammenfassung

In Tabelle 6 sind die Habitatansprüche der Äsche zusammengefasst. Zu jedem Aspekt ist der Einfluss des Wasserbaus durch eine oder mehrere Massnahmengruppen definiert (siehe auch Kapitel 2.3.1). Der Klimawandel wirkt sich auf die Qualität und Verfügbarkeit der Äschenhabitate aus. Deshalb ist ebenfalls aufgeführt, welche zusätzlichen Massnahmen unter Berücksichtigung des Klimawandels umzusetzen sind.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Habitatansprüche der Äsche (Thymallus thymallus), des Einflusses des Wasserbaus (wasserbauliche Massnahmengruppe), sowie Einfluss des Wasserbaus unter Berücksichtigung des Klimawandels.

	Anforderungen Habitat	Wasserbauliche Massnahmen	Klimawandel
Wassertemperatur	Optimal: 4-18°C, Letal: 26°C	Massnahmengruppe Wassertemperatur (effektive Beschattung, Anbindung Seitengewässer). Allgemein: Habitat- & Substratheterogenität mit reicher Strukturierung des Gerinnes z.B. mit Totholz fördert Grundwasseraustausch. Effektive Beschattung: Bestockungen an der Wasserlinie, vollständige und dichte Beschattungen, Wahl einer geeigneten Strecke etc.	Massnahmengruppe Wassertemperatur
Nahrungsangebot	Vorwiegend benthische Invertebraten, im Sommer auch Anflugnahrung, selten kleine Fische, Fischlaich. Für Äschenlarven sind Chironomiden die wichtigste Nahrung	Revitalisierungen wirken sich, **egal welche Massnahmen prioritär umgesetzt** werden, in den meisten Fällen positiv auf das Nahrungsangebot aus (Erhöhung Biomasse).	Verschiebung Invertebraten von nördlichen und kälte- bzw. sauerstoffliebenden Arten hin zu thermophilen und südlichen Arten. Köcherfliegenlarve (*Allogamus auricollis*) als wichtige Nahrungsquelle verschwindet teilweise. Unklar

			sind Auswirkungen auf die Äschenpopulation
Wanderung	Laichwanderungen, Saisonale Migrationen, Wanderbewegungen mit Habitatwechsel von Larven zu Juvenile zu Adulte, Konnektivität Oberlauf / Seitengewässer	Massnahmengruppe Längsvernetzung (Wiederherstellung der Fischgängigkeit eines Gewässers)	Anbindung der Seitengewässer & Aufwertung derer Mündungsbereiche, sowie Anbindung Oberläufe (Massnahmengruppe Wassertemperatur), soweit für Äsche verträglich (Gefälle, Fliessgeschwindigkeit)
Habitate für alle Altersstufen	**Laichhabitat**: kiesig-steiniges Substrat (16-64 mm), mittlere Fließgeschwindigkeiten von 49 cm/s (40-70 cm/s) und Wassertiefen von 20-30 cm, Ruheplätze für Muttertiere (Strukturen, Kolke) **Larvalhabiat vor Emergenz**: Kiesiges Interstitial **Larvalhabitat nach Emergenz**: flache Gewässerbereiche (0-40 cm) mit geringen Fliessgeschwindigkeiten (0-20 cm/s) & Korndurchmesser < 2 mm **Juvenile & Adulte:** Hauptgerinne, zunehmende Tiefe mit Grösse des Fisches	**Laich- und Larvalhabitate vor Emergenz**: Durch Revitalisierungen natürliche Kiesdynamik fördern (prioritär Massnahmengruppe Morphologie – Instream, Morphologie – Gerinneveränderungen, Morphologie – Überflutungsflächen) Weitere wasserbauliche Massnahmen der Massnahmengruppe Geschiebehaushalt (Geschiebeweiterleitung, -zugabe, aktive Laichplatzrestaurierung, Reduktion des Feinsedimenteintrages) und Hydrodynamik (Wiederherstellung des hydrologischen Regimes) **Strukturierung des Gerinnes:** Schaffung Ruheplätze für Muttertiere, Zunahme Strömungs- und Wassertiefenvariabilität (Massnahmengruppe Morphologie – Instream) **Larvalhabitat nach Emergenz**: Massnahmen der Massnahmengruppe Morphologie – Instream, Morphologie – Gerinneveränderungen, Morphologie – Überflutungsflächen: Ufer-revitalisierungen, Schaffung natürlicher Flachufer, Reaktivierungen von Seitenarmen, Schaffung von Kehrwasser und von auslaufenden, seichten Uferzonen	Erhöhter Feinsedimenteintrag durch Klimawandel mit wasserbaulichen Massnahmen der Massnahmengruppe Geschiebehaushalt (Reduktion Feinsedimenteintrag durch Bestockung des Gewässerraumes und Pufferstreifen) Ansonsten gleiche Massnahmen, wie ohne Klimawandel umsetzen

3.3 Alet (*Leuciscus cephalus)*

Der Alet ist eine Leitfischart der Barben- und Äschenregion, kann aber von der Forellen- bis Brachsenregion überall vorkommen. Er stellt nur geringe Ansprüche an die Wasserqualität und verfügt über eine hohe Anpassungsfähigkeit. Er ist ein ausgesprochener Allesfresser (omnivor) und ist im Gegensatz zur Bachforelle und Äsche resistenter gegen hohe Wassertemperaturen (Westhauser, 2020). Im Folgenden werden die Habitatansprüche des Alet kompakt zusammengefasst.

Wassertemperatur:

Für die Fortpflanzung benötigt der Alet Temperaturen um 18°C (Alabaster & Lloyd 1980; Elliott, 1981). Es wurden aber bereits bei 13°C Laichaktivitäten beobachtet (Mann, 1996). Letal für den Laich des Alets sind Temperaturen unter 16°C bzw. über 30°C (Elliott, 1981). Bereits oberhalb von 24°C steigen Missbildungen der Embryonen und die Mortalitätsrate (Alabaster & Lloyd, 1980). Adulte Alet bevorzugen Temperaturen zwischen 8 und 25°C (Elliott, 1981). Kritisch werden Temperaturen ab 27°C. Bei Versuchen lag die Letaltemperatur bei 38 bis 39°C (Alabaster & Lloyd, 1980).

Nahrungsangebot:

Das Nahrungsspektrum des Alet ist so breit, wie bei kaum einer anderen einheimischen Fischart. Juvenile ernähren sich vor allem von Anflugnahrung, von Larven und Nymphen und von Pflanzen. Adulte hingegen leben bevorzugt räuberisch (Würmer, kleine Fische und Amphibien). Sie fressen aber auch Laich und Fischbrut anderer Fischarten, sowie Wasserpflanzen, Algen, Früchte und Beeren. Sie sind ausgesprochene Allesfresser (Westhauser, 2020).

Laichsubstrat:

Der Alet bevorzugt grober Kies in schnellfliessenden, sauerstoffreichen, flachen Abschnitten. Oft sind diese Laichhabitate in Zuflüssen zu finden. Die Fischeier werden an Steine oder Wasserpflanzen oder auf Sand abgelegt (Mann, 1976).

Habitate für alle Altersstufen:

Der Alet zeigt einen Habitatwechsel im Verlaufe des Alters, sowie auch ein Habitatwechsel Tag-Nacht.

Juvenile leben in Gruppen, halten sich in der Nähe der Wasseroberfläche in Ufernähe auf, wo sie auf Wasserinsekten (Anflugnahrung) warten. Juvenilhabitate zeichnen sich durch eine geringe Fliessgeschwindigkeit aus (Smith, 1989).

Adulte leben entweder als Einzelgänger oder in kleinen Gruppen (max. 10 Tiere). Tiefere und ruhigere Stellen, abseits der Hauptströmung mit Wasserpflanzen werden bevorzugt. Häufig sind sie auch in Mündungsbereichen von Seitengewässer zu finden, dann aber in strömungsberuhigten Stellen z.B. hinter grösseren Steinen. Sie kommen auch in Mündungsbereichen von Fliessgewässern in Seen, aufgestaute Bereiche oder Entwässerungsgräben vor (Westhauser, 2020).

Der Alet frisst in der Nacht und zieht sich im Tageslicht zurück. Diese Refugien während des Tages zeichnen sich durch eine Kombination aus geringer Wassergeschwindigkeit (< 20 cm/s) und Deckung aus. Dadurch kann der Alet Energie sparen und ist durch das schummrige Licht vor Feinden besser geschützt. Am Abend bewegt sich der Alet in schneller fliessende Gewässerabschnitte (aber nicht die schnellsten Abschnitte), dabei spielen Strukturen und Deckung eine geringere Rolle (Smith, 1989).

Wanderung:

Während der Laichzeit kann der Alet lange Distanzen bis zum Laichhabitat zurücklegen. Le-Louran & Bagliniere (1996) zeigen Wanderdistanzen von einem bis über 30 km.

Fazit:

Der Alet profitiert von einer Zunahme an langsam fliessenden tiefen Gewässerabschnitten (Habitat Adulte), ist resistent gegen eine Zunahme der Wassertemperatur in Forellengewässern und gegen Wasserqualitätsprobleme. Revitalisierungen können andererseits den Alet indirekt fördern, indem langsam fliessende, strukturarme und tiefe Gewässerabschnitte und Abschnitte mit vielen Wasserpflanzen geschaffen werden oder indem die Wassertemperatur in Forellengewässern erhöht wird. Durch seine omnivore Ernährungsweise, seine Anpassungsfähigkeit, sowie seine Resistenz gegenüber höheren Wassertemperaturen und Wasserqualitätsproblemen kann der Alet die Bachforelle in Forellengewässern konkurrieren, sofern die Bedingungen für die Bachforellen nicht mehr optimal sind (z.B. Zunahme Wassertemperatur, Habitat, Wasserqualitätsprobleme).

4 Grundlage Empfehlungen wasserbauliche Massnahmen

Die untersuchten Gewässerabschnitte liegen alle in der Forellenregion, weshalb im vorliegenden Kapitel nur die Grundlage für Empfehlungen zur Förderung der Bachforellen ausgearbeitet werden können.

Im Kapitel 2 wurde der fischereiliche Erfolg der Wasserbauprojekte analysiert und die wasserbaulichen Massnahmen zusammengefasst und reflektiert. Aus Kapitel 3 ist bekannt, welche Anforderungen die Bachforelle an ihre Lebensräume stellt und welchen Einfluss der Wasserbau ausübt.

Im Kapitel 4 werden die Kapitel 2 und 3 kombiniert, indem der fischereiliche Erfolg, die umgesetzten wasserbaulichen Massnahmen und die Anforderungen der Bachforelle an ihren Lebensraum gegenüber gestellt werden. Die Frage ist, welche wasserbauliche Massnahmen bzw. Massnahmenkombinationen bei Wasserbauprojekten, welche sich positiv auf die Bachforellenpopulation ausgewirkt haben, umgesetzt wurden und welche Massnahmen bzw. Massnahmenkombinationen umgesetzt wurden, die sich negativ auf die Bachforellenpopulationen ausgewirkt haben.

4.1 Vorgehen

Für alle Wasserbauprojekte muss der fischereiliche Erfolg und die wasserbaulichen Massnahmen in Bezug auf die Anforderungen der Bachforelle an ihre Lebensräume bewertet werden. Die Bewertung erfolgt in einer dreistufigen Skala (- negativ, + leicht positiv, ++ sehr positiv).

Für den fischereilichen Erfolg werden die Parameter Bachforelle und Alet beurteilt. Für jede Anforderungen der Bachforelle an ihren Lebensraum wird beurteilt, ob wasserbauliche Massnahmen umgesetzt wurden. Ausgenommen von dieser Beurteilung sind die Anforderungen reichliches Nahrungsangebot und ausreichend Sauerstoff, weil sich alle Revitalisierung meistens positiv auf das Nahrungsangebot auswirken und der Einfluss der Revitalisierungen auf die Sauerstoffverfügbarkeit mithilfe der Wasserbaupläne nur ungenügend beurteilen lässt. Der Sauerstoffgehalt im Wasser kann mit der Massnahmengruppe Wasserqualität oder Erhöhung der Turbulenz verbessert werden. Die Massnahmengruppe Wasserqualität wurde bei keinem der Projekte umgesetzt und die Erhöhung der Turbulenz müsste im Feld beurteilt werden (Auswirkung einzelner Massnahmen auf die Erhöhung der Turbulenz).

In Tabelle 7 sind die Parameter und die jeweiligen Indikatoren zur Bewertung des fischereilichen Erfolgs und der wasserbaulichen Massnahmen in Bezug auf die Anforderungen der Bachforelle an ihre Lebensräume zusammengefasst. Eine Massnahme definiert sich als Umsetzung einer Massnahmenart im Projektperimeter an einem oder mehreren Orten (z.B. Bestockung). Sobald zwei Massnahmenarten (z.B. Bestockung und Niederwasserrinne) umgesetzt wurden, wird von mehreren Massnahmen gesprochen. Der Zielwert Forellenbiomasse für Forellengewässer liegt bei 100-200 kg/ha. Im vorliegenden Raster wird eine Forellenbiomasse von 100 kg/ha als Zielwert erreicht definiert.

Tabelle 7: Zusammenfassung Bewertung fischereilicher Erfolg und wasserbauliche Massnahmen in Bezug auf die Anforderungen der Bachforelle an ihren Lebensraum. - = negativ, += leicht positiv, ++= sehr positiv. Zielwert Biomasse Bachforelle 100 kg/ha, Zielwert Anzahl Bachforelle 2000 Individuen/ha.

Parameter	Indikator	-	+	++
Bachforelle	Biomasse [kg/ha] und Anzahl [Anzahl/ha]	Abnahme Biomasse und / oder Anzahl	Zunahme Biomasse und Anzahl	Zunahme Biomasse & Anzahl und Zielwert Biomasse oder Anzahl erreicht
Alet	Biomasse [kg/ha]	Keine Zunahme Biomasse Alet	Geringe Zunahme Alet Biomasse	Min. Verdoppelung Alet Biomasse
Wassertemperatur	Baupläne - Massnahmen	Keine Massnahmen der Massnahmengruppe Wassertemperatur	Eine Massnahme der Massnahmengruppe Wassertemperatur	Mehrere Massnahmen der Massnahmengruppe Wassertemperatur
Laichsubstrat	Baupläne - Massnahmen	Keine Massnahme der Massnahmengruppe Geschiebehaushalt oder Hydrodynamik	Eine Massnahme der Massnahmengruppe Geschiebehaushalt oder Hydrodynamik	Mehrere Massnahmen der Massnahmengruppe Geschiebehaushalt oder Hydrodynamik
Habitate	IAM Attraktivität	Verschlechterung IAM Attraktivität	Verbesserung IAM Attraktivität	Verbesserung IAM Attraktivität & Wert gut bis sehr gut erreicht
Wandermöglichkeiten	Baupläne - Massnahmen	Keine Massnahmen der Massnahmengruppe Massnahmengruppe Längsvernetzung	Min. eine Massnahmen der Massnahmengruppe Massnahmengruppe Längsvernetzung	Min. eine Massnahmen der Massnahmengruppe Massnahmengruppe Längsvernetzung & min. eine Massnahmen der Massnahmengruppe Wassertemperatur: Anbindung der Seitengewässer & Aufwertung deren Mündungsbereiche, Anbindung der Oberläufe, sowie Erstellung einer Niederwasserrinne

Aus der Bewertung der einzelnen Bauprojekte nach Tabelle 7 und mithilfe von IAM Aufnahmen, Luftbildern und Wasserbauplänen soll die Grundlage für Empfehlungen zu wasserbaulichen Massnahmen zur Förderungen der Bachforelle abgeleitet werden.

4.2 Bewertung

In Tabelle 8 werden alle Wasserbauprojekte gemäss Kapitel 4.1 in einer dreistufigen Skala bewertet. Die Grundlagen für die Bewertungen (IAM, Fischdaten und wasserbauliche Massnahmen) sind in Kapitel 2 zu finden.

Bei Bünz Hendschicken wird zwar der Zielwert Forellenbiomasse erreicht, aber die Biomasse hat gegenüber der Kontrollstrecke abgenommen. Der Parameter Bachforelle wird als negativ bewertet, da die Abnahme der Biomasse höher gewichtet wird als das Erreichen des Zielwertes.

Tabelle 8: Bewertung aller Wasserbauprojekte gemäss Kapitel 4.1 in einer dreistufigen Skala, (- negativ, + leicht positiv, ++ sehr positiv).

Abschnitt	Bachforelle	Alet	Wasser-temperatur	Laichsubstrat	Habitate	Wander-möglichkeiten
Surb ARA 2013	+	-	-	-	+	+
Surb Gislibach 2014	+	-	-	-	+	+
Wigger Brittnau 2009	+	+	+	-	+	+
Wigger Brittnau 2018	++	+	+	-	+	-
Wigger Rothrist 2015			+	-	++	++
Bünz Bünzen 2007	-	++	-	+	++	+
Bünz Othmarsingen 2002			+	+	++	+
Bünz Hendschicken 2014	-	+	+	-	++	++
Wyna Gontenschwil 2008	+	++	+	-	+	+

Bei fünf der sieben befischten Projekte hat die Bachforelle profitiert, zwei (Bünz Bünzen und Bünz Hendschicken) fielen negativ aus. Sehr positiv fiel das Ergebnis für die Bachforelle an der Wigger Brittnau 2018 aus. Der Alet hat ebenfalls in fünf Projekten profitiert, bei zwei Projekten hingegen nicht (Surb ARA, Surb Gislibach). Stark zugenommen hat die Aletbiomasse bei den Projekten Bünz Bünzen und Wyna Gontenschwil.

Bei allen Projekten wurden attraktive Fischhabitate geschaffen, bei vielen Projekten wurden Massnahmen für die Wassertemperatur und die Wandermöglichkeiten umgesetzt. Nur bei wenigen Projekten wurden Massnahmen zur Verbesserung des Laichsubstrats realisiert.

4.3 Diskussion

4.3.1 Bachforelle

Massnahmengruppe Morphologie-Instream – Baustoff Holz

Sehr positiv ist das Ergebnis bei der Wigger Brittnau ausgefallen. Die Bachforellenbiomasse und die Anzahl haben zugenommen und der Zielwert von 100-200 kg/ha wurde mit 117 kg/ha erreicht. Bei keinem anderen untersuchten Wasserbauprojekt wurde aufgrund der Revitalisierung dieser Zielwert erreicht.

Es handelt sich um das einzige Projekt, bei welchem in grösserem Stile Strukturen in die Gewässersohle und Ufer eingebaut wurden und der dominante Baustoff Totholz ist. Es wurde aber nur eine mässige Habitatattraktivität erreicht. Aufgrund des geringen Projektalters (einjährig) wird eine weitere Entwicklung der Habitatattraktivität in den nächsten Jahren erwartet. Die Bachforelle hat demzufolge nicht profitiert, weil viele attraktive Fischhabitate (Kolke, unterspülte Ufer etc.) geschaffen wurden, sondern weil viele Strukturen in die Gewässersohle platziert wurden. Die Bachforelle ist gemäss Kapitel 3.1.5 sehr strukturgebunden. Strukturen bieten Strömungs- und Sichtschutz. Gemäss Jungwirth & Winkler (1983) und Eklöv & Greenberg (1998) kann das Vorhandensein geeigneter Strukturen die Bachforellendichte in einem Gewässerabschnitt stark erhöhen. Die positiven Ergebnisse der Wigger Brittnau bestätigen diese Aussagen.

Die dichte Strukturierung der Gewässersohle und Ufer mit Totholz hat sich sehr positiv auf die Bachforellenpopulation ausgewirkt. Aufgrund dieser Ergebnisse lässt sich die Erkenntnis ableiten, dass mit Strukturen in der Gewässersohle und Ufer, Massnahmengruppe Morphologie-Instream, die Bachforelle gefördert werden kann (Biomasse und Anzahl). Die strukturgebundene Bachforelle profitiert von solchen Einbauten. Bei anderen Wasserbauprojekten wurden auch Instream-Strukturen eingebaut, aber in geringeren Dichten, eher im Uferbereich als in der Gewässersohle und nicht mit dem dominanten Baustoff Totholz. Es bedarf demnach eines Schwerpunktes der wasserbaulichen Massnahmen auf Instream-Massnahmen in der Sohle, d.h. höhere Dichten an Strukturen in der Gewässersohle, vorzugsweise mit Totholz.

Sauerstoffangebot

Negativ fiel das Ergebnis für den Gewässerabschnitt Bünz Hendschicken aus. In der Bünz Hendschicken wurde die revitalisierte Strecke 3 als leicht pendelndes Gerinne ausgestaltet (Abbildung 14). Alle Ufersicherungen wurden entfernt, die Niederwasserrinne wurde mit Stein und Holzstrukturen geformt. Die revitalisierte Strecke 2 wurde hingegen als eine offene Blockrampe mit Steinen gestaltet und so fischgängig gemacht. Alle Ufersicherungen wurden ebenfalls entfernt.

Abbildung 14: Strecke 2 wurde als offene Blockrampe gestaltet (links), Strecke 3 wurde als pendelndes Gerinne gestaltet (rechts) (Quelle: Orthofoto 2018, Aargauisches Geographisches Informationssystem (AGIS)).

Die Erfolgskontrolle ergab nicht für beide revitalisierte Strecken dieselben positiven Ergebnisse für die Bachforelle. In der Strecke 2 wurde die höchste Biomasse der Forelle gemessen, welche zwischen 2017 und 2019 in der Bünz beobachtet wurde. In der Strecke 3 war die Biomasse aber geringer als in der Kontrollstrecke (nicht revitalisiert). Einerseits liegt die Kontrollstrecke unterhalb der ARA und ist bekannt für grosse Bachforellen. Andererseits haben die Maximaltemperaturen in den letzten Jahren in der Bünz zugenommen. In Othmarsingen wurden Temperaturen bis 25.9°C gemessen, Wassertemperaturen im Letalbereich der Bachforelle. Die Vermutung liegt nahe, dass die Forellenbiomasse deshalb eher mit dem Sauerstoff-, statt mit dem Strukturangebot korreliert.

In Forellengewässern des Mittellandes, welche im Sommer hohe Maximaltemperaturen aufweisen, ist mit einer Revitalisierung nebst der Förderung vom Strukturangebot der Sauerstoffeintrag zu fördern (Siehe Kapitel 4.3.3). Diese mögliche Korrelation zwischen Forellenbestand und Sauerstoffangebot ist momentan nur eine Vermutung und soll in einer weiteren Forschungsarbeit überprüft werden.

Leicht positive Projekte +

Die meisten Projekte (4/7 Projekten) fielen zwar leicht positiv aus (Forellenbiomasse erhöht), der Zielwert von 100-200 kg/ha wurde aber nicht erreicht. Das Potential für weitere Massnahmen zur Förderung der Bachforelle ist bei diesen Projekten gegeben. Mit Massnahmen der Massnahmengruppe Morphologie-Instream, Massnahmen zur Förderung der Turbulenz und zur Senkung der Wassertemperatur kann gemäss den vorliegenden Auswertungen die Bachforelle gefördert werden.

4.3.2 Alet

In der Bünz Bünzen und Wyna Gontenschwil hat der Alet gegenüber der Vorher-/Kontrollstrecke massiv zugenommen. In der Bünz Hendschicken ist der Alet in der Vorher-/Kontrollstrecke, wie auch in der revitalisierten Strecke sehr häufig.

Der Alet ist resistent gegen höhere Wassertemperaturen in Forellengewässern und gegen Wasserqualitätsprobleme. Er profitiert von einer Zunahme an langsam fliessenden tiefen Gewässerabschnitten ohne viele Strukturen (Siehe Kapitel 3.3). Ebenso kann die Bachforellenpopulation durch eine PKD Erkrankung geschwächt werden, so dass der Alet profitieren kann.

Da der Alet in Bünz Hendschicken in der Vorher-/Kontrollstrecke, wie auch in der revitalisierten Strecke stark vertreten ist, hatte die Revitalisierung nur einen geringen Einfluss auf die Aletpopulation. Eine mögliche Erklärung für die hohe Aletbiomasse sind die hohen sommerlichen Wassertemperaturen, ein mögliches Wasserqualitätsproblem oder die PKD Erkrankung der Bachforellen. Ebenso wurde in gewissen revitalisierten Abschnitten tiefe und langsam fliessende Bereiche ohne viele Strukturen gefördert, von welchen besonders der Alet profitierte.

In der Wyna Gontenschwil und Bünz Bünzen hat der Alet durch die Revitalisierungen stark profitiert und dominiert neu die Fischgemeinschaften. Beide Gewässerabschnitte waren aber aufgrund der Nähe zum Moor (Gontenschwiler Moor, Fohrenmoor) schon immer bekannt für Fischarten, die fremd für Forellengewässer sind (Hecht, Schleie etc.).

Die Wyna Gontenschwil und Bünz Bünzen sind die einzigen untersuchten Wasserbauprojekte, bei welchen in grösserem Stile Gerinneveränderungen vorgenommen wurden. Aus der Zusammenstellung der wasserbaulichen Massnahmen (Siehe Kapitel 2.3.1) geht hervor, dass die neue laterale Gerinnedynamik bei beiden Projekten nicht einherging mit Massnahmen zur Senkung der Wassertemperatur. Bei der Wyna Gontenschwil wurde zwar eine Bachmündung naturnah gestaltet, weitere Massnahmen zur Senkung der Wassertemperatur wurden nicht umgesetzt. Bei der Bünz Bünzen wurde nur gerodete Bestockung ersetzt. Dies könnte in beiden Fällen zu einem Wassertemperaturanstieg geführt haben. Zudem wurden in beiden Fällen durch die Revitalisierungen tiefe und langsam fliessende Bereiche ohne viele Strukturen gefördert, von welchen besonders der Alet profitierte. Beide Projekte (Wyna Gontenschwil 2008, Bünz Bünzen 2007) sind älteren Datums. Eine Strukturierung des Gerinnes war in dieser Zeit noch weniger bekannt, ebenso die Folgen des Klimawandels.

Nebst der Förderung der Alethabitate und der Wassertemperatur, leidet auch die Wyna Gontenschwil und die Bünz Bünzen unter Wasserqualitätsproblemen und einer PKD Erkrankung, was die Bachforelle gegenüber dem Alet zusätzlich schwächt.

Der Alet hat bei Wasserbauprojekten profitiert, bei welchen in grösserem Stile Gerinneveränderungen vorgenommen wurden (Wyna Gontenschwil und Bünz Bünzen). Die neue laterale Gerinnedynamik ging nicht einher mit Massnahmen zur Senkung der Wassertemperatur. Zudem wurden mit diesen Gerinneveränderungen Alethabitate gefördert (tiefe und langsam fliessende Bereiche ohne viele Strukturen). Gerinneveränderungen sind in Zukunft wünschenswert, aber nur in Kombination mit Massnahmen zur Senkung der Wassertemperatur und Strukturierung des Gerinnes (Morphologie-Instream).

4.3.3 Wassertemperatur

Gemäss den Klimaszenarien des Bundes CH2018 wird die Wassertemperaturzunahme linear zur Lufttemperaturzunahme in Schweizer Mittelland-Gewässern erwartet (BAFU, 2012). Bei einer Lufttemperaturerhöhung von 5°C bis ins Jahr 2050 würde die Bachforelle so 44 % ihrer heutigen Habitatfläche verlieren (Notter & Staub, 2009).

In den vorliegenden Wasserbauprojekten wurde die Massnahmengruppe Wassertemperatur umgesetzt, aber meist nur eine Massnahmen in geringer Dichte. Um dem Habitatverlust der Bachforelle aufgrund des Wassertemperaturanstieges entgegenzuwirken, müssen Massnahmen der Massnahmengruppe Wassertemperatur prioritär berücksichtigt werden:

Niederwasserrinnen: In Anbetracht der zunehmenden Niedrigwassertage müssen die Niederwasserinnen zukünftig entsprechend einem tieferen Q_{347} dimensioniert werden. Mit einer eng gestalteten Niederwasserrinne soll eine zusätzlich Erwärmung des Gewässers durch geringe Wassertiefen verhindert und die Durchgängigkeit gewährleisten werden. Mit Niederwasserrinnen bestehen bei Austrocknung gewisser Bachbereiche Fluchtmöglichkeiten für Fische in wasserführende, kühlere Gewässerabschnitte. In eingeengten Gerinnen mit beeinträchtigter Eigendynamik ist die Wassertiefe meist homogen. Eine Niederwasserrinne muss aktiv gestaltet werden. Die Gestaltung kann mittels Strukturen und Lenkungselementen in der Gewässersohle und im Uferbereich, sowie mittels verengten Elementen erfolgen. Durrer et al. (2014) gehen von Punktelementen (Buhnen, Totholzstrukturen, Störsteine etc), von Linienelementen (Blockverbau, Faschinen, Rampen etc.) und Flächenelementen (Bankschüttungen, Kolk-Furt Sequenzen etc.) aus.

Beschattung: Die Beschattung des Gewässerabschnittes kann sich kühlend auf ein Gewässer auswirken (Moosmann et al., 2005; Elber et al., 2019). Wichtig ist eine vollständige Beschattung über mehrere 100 m, denn Wasser leitet Wärme sehr gut, so dass eine Teilbeschattung über die gesamte Strecke einen geringeren Kühlungseffekt hat. Für eine effektive Beschattung müssen Bäume nahe an der Wasserlinie gepflanzt werden. Bei neu gestalteten Gewässer kann eine Bepflanzung an der Gewässerlinie bereits in den ersten Jahren wirksam sein. Ebenso muss eine effektive Beschattung genügend hoch und dicht sein. Geeignete Strecken für eine vollständige Beschattung sind Abschnitte mit geringer Fliessgeschwindigkeit, hohen Wassertemperaturen, wenig Wasserpflanzen und Ausrichtung West-Ost.

Anbindung Seitengewässer, Oberläufe: Eine Vernetzung der Gewässer im Fliessverlauf ist anzustreben, damit kälteliebende Fischarten sich mit zunehmenden Wassertemperaturen flussaufwärts bewegen können. Seitengewässer sind meist kühler (Durch Beschattung, Austausch Grundwasser). Deshalb sollten diese ans Hauptgerinne angebunden und die Mündungsbereiche aufgewertet werden.

Turbulenz fördern: Um das Sauerstoffangebot für die Bachforelle in Gewässern mit hohen sommerlichen Wassertemperaturen zu verbessern, soll mit geeigneten Massnahmen der Gasaustausch erhöht werden. Je turbulenter ein Gewässerabschnitt ist umso höher ist der Gasaustausch, und umso mehr Sauerstoff kann in den Wasserkörper eingetragen werden. Die Turbulenz lässt sich mit der Reynoldszahl beschreiben. Die Turbulenz wird durch die Faktoren hydraulischer Radius und Fliessgeschwindigkeit (Rauigkeit, Gefälle, hydraulischer Radius) des Gerinnes beeinflusst. Hohe Turbulenzen werden mit grossen Fliessgeschwindigkeiten, Strukturreichtum, grösserem Gefälle und grobem Sohlsubstrat erreicht (Freimann, 2014).

Der Sauerstoffeintrag kann durch Strukturen in der Gewässersohle und Ufer (Massnahmengruppe Morphologie-Instream) gefördert werden. Dadurch wird die Rauigkeit, die Strömungs- und Tiefenvariabilität erhöht. Solche Strukturen können beispielsweise Störsteine oder Totholzelemente sein. Ist ein grösseres Gefälle zu überwinden, erhöht sich die Turbulenz aufgrund des Gefälles. Ein höherer Sauerstoffeintrag ist also beispielsweise bei Blockrampen oder Sohlrampen zu erwarten. Verengungen schaffen grössere Wassertiefen und höhere Fliessgeschwindigkeiten, was die Turbulenz fördern kann. Dazu können Buhnen, Trichter etc. aus verschiedenen Materialien eingesetzt werden.

4.4 Fazit

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels 4, Grundlage Empfehlungen wasserbauliche Massnahmen, wurden die Kapitel 2 und 3 kombiniert, indem der fischereiliche Erfolg, die umgesetzten wasserbaulichen Massnahmen und die Anforderungen der Bachforelle an ihren Lebensraum gegenüber gestellt werden. Es wurden wasserbauliche Massnahmen bzw. Massnahmenkombinationen, welche sich positiv bzw. negativ auf die Bachforellenpopulation ausgewirkt haben, diskutiert.

Aus den Analysen des Kapitels 4 ergeben sich verschiedene Erkenntnisse und lassen sich persönliche Empfehlungen ableiten (Tabelle 9).

Tabelle 9: Zusammenfassung der Erkenntnisse aus Kapitel 4 und der persönlichen Empfehlungen, welche aus diesen Erkenntnissen abgeleitet werden.

Erkenntnisse aus der Arbeit	Persönliche Empfehlungen
Dichte Strukturierung der Gewässersohle mit Totholz (Massnahmengruppe Morphologie-Instream) hat sich sehr positiv auf die Bachforellenpopulation	Zur Förderung der Bachforelle wird empfohlen, den Schwerpunkt der wasserbaulichen Massnahmen auf Instream-Massnahmen in der Sohle, d.h. höhere Dichten an Strukturen in der Gewässersohle, vorzugsweise mit Totholz, zu setzen.
Der Alet hat bei Wasserbauprojekten profitiert, bei welchen in grösserem Stile Gerinneveränderungen vorgenommen wurden	Gerinneveränderungen sind in Zukunft wünschenswert, aber nur in Kombination mit Massnahmen zur Senkung der Wassertemperatur und Strukturierung des Gerinnes (Morphologie-Instream).

Gemäss Bericht CCHydro, ist mit einem weiteren Anstieg der Wassertemperaturen in den Schweizer Fliessgewässern zu rechnen (BAFU, 2012)	Um dem Habitatverlust der Bachforelle aufgrund des Wassertemperaturanstieges entgegenzuwirken, müssen Massnahmen der Massnahmengruppe Wassertemperatur prioritär berücksichtigt werden.

Die dichte Strukturierung der Gewässersohle mit Totholz (Massnahmengruppe Morphologie-Instream) hat sich sehr positiv auf die Bachforellenpopulation ausgewirkt. Aufgrund dieser Ergebnisse lässt sich die Erkenntnis ableiten, dass mit Strukturen in der Gewässersohle und Ufer die Bachforelle gefördert werden kann (Biomasse und Anzahl). Es bedarf demnach eines Schwerpunktes der wasserbaulichen Massnahmen auf Instream-Massnahmen in der Sohle, d.h. es braucht höhere Dichten an Strukturen in der Gewässersohle, vorzugsweise mit Totholz.

In Forellengewässern des Mittellandes, welche im Sommer hohe Maximaltemperaturen aufweisen, liegt die Vermutung nahe, dass die Forellenbiomasse nicht mehr mit dem Strukturangebot, sondern mit dem Sauerstoffangebot korreliert. Deshalb ist in solchen Gewässern mit einer Revitalisierung neben der Förderung des Strukturangebotes auch der Sauerstoffeintrag zu fördern. Diese mögliche Korrelation soll aber auch in einer weiteren Forschungsarbeit überprüft werden.

Der Alet hat bei Wasserbauprojekten profitiert, bei welchen in grösserem Stile Gerinneveränderungen vorgenommen wurden. Die neue laterale Gerinnedynamik ging aber nicht einher mit Massnahmen zur Senkung der Wassertemperatur. Zudem wurden mit diesen Gerinneveränderungen Alethabitate gefördert. Gerinneveränderungen sind auch in Zukunft wünschenswert, aber nur in Kombination mit Massnahmen zur Senkung der Wassertemperatur und Strukturierung des Gerinnes (Morphologie-Instream).

Um dem Habitatverlust der Bachforelle aufgrund des Wassertemperaturanstieges entgegenzuwirken, müssen Massnahmen der Massnahmengruppe Wassertemperatur prioritär berücksichtigt werden. Das heisst Niederwasserrinnen, Beschattung, Anbindung von Seitengewässern und Oberläufen, Förderung von turbulenten Stellen sind in den Wasserbauprojekten umzusetzen.

5 Auswertungen Temperaturdaten

Im Dezember 2019 wurden an der Wigger und an der Bünz Temperaturlogger gesetzt. An der Bünz wurde jeweils oberhalb und unterhalb von revitalisierten Abschnitten Temperaturlogger gesetzt, um den Einfluss von wasserbaulichen Massnahmen auf die Wassertemperatur zu prüfen. Es handelt sich dabei um die Gewässerabschnitte Bünz Hendschicken und Bünz Othmarsingen. Zudem wurde in zwei Kolken an der Bünz, jeweils an der Wasseroberfläche und am Grund des Kolkes, ein Logger gesetzt, um das Temperaturverhalten in Kolken zu prüfen.

An der Wigger wurden bereits im Sommer 2019 Logger gesetzt (Intervall 5 min.). Die Daten wurden im Dezember 2019 ausgelesen. Einige Logger wurden am selben Ort wieder platziert, andere wurde aufgrund des neuen Messkonzeptes (oberhalb/unterhalb revitalisierter Abschnitte) verschoben. Auch an der Wigger wurde jeweils oberhalb und unterhalb von revitalisierten Abschnitten Logger gesetzt. Es handelt sich dabei um die Gewässerabschnitte Wigger Brittnau und Wigger Rothrist. In Brittau wurde oberhalb und unterhalb des Holzverbaus, sowie unterhalb des Steinverbaus ein Logger gesetzt. In Rothrist wurde oberhalb und unterhalb der Revitalisierung ein Logger platziert. Der Logger oberhalb der Revitalisierung befindet sich direkt unterhalb einer Blockrampe. Oberhalb der Blockrampe wurde ebenfalls ein Logger gelegt, da dieser bereits im Sommer 2019 dort platziert wurde, um den Einfluss der Blockrampe auf die Wassertemperatur zu messen. In Brittnau wurden die Logger oberhalb und unterhalb des Holzverbaus so platziert, dass sie in einen Kolk zu liegen kamen. In diesen zwei Kolken wurde jeweils noch ein zusätzlicher Logger an der Wasseroberfläche montiert, um das Temperaturverhalten in Kolken zu prüfen.

Insgesamt wurden im Dezember 2019 17 Logger in Betrieb genommen, programmiert in einem 10 min. Intervall. Die Koordinaten der Temperaturlogger sind in Anhang B zu finden. Die Logger wurden beschriftet mit einer Nummer und in einem Gehäuse, als Schutz vor Geschiebetrieb, Hochwasser und Abschwemmung versenkt. Das Gehäuse wurde mit einer Kette an eine beständige Struktur befestigt und mit Schloss gesichert (Abbildung 15). Ausnahme bildeten die vier Temperaturlogger, welche an der Wasseroberfläche installiert wurden. Diese wurden mit einer schwimmfähigen Schnur an einer beständigen Struktur fixiert, so dass die Logger an der Oberfläche schwammen.

Abbildung 15: Installieren der Temperaturlogger an der Wigger und Bünz im Dezember 2019. Die Logger wurden im Gehäuse mit Kette und Schloss gesichert (Quelle: M.Kueng).

Im Verlaufe des Frühlings 2020 wurden die Logger regelmässig durch die Fischereiaufseher Peter Tschudy (Wigger) und Ernst Sennrich (Bünz) geprüft. Nach Hochwasser wurden sie jeweils wieder vom Geschiebe befreit.

Am 22.Juni 2020 wurden die Logger ausgelesen, erneut auf ein 10 min. Intervall programmiert und an derselben Stelle wieder versenkt. Einige Logger waren nicht mehr auffindbar und wurden durch neue ersetzt. Die Temperaturmessungen sollen im Sommer 2020 fortgesetzt werden, damit auch Daten bei Niederwasser und Hitzetagen gesammelt werden können.

Die bisherigen Temperaturdaten wurden in Rohform dem Kanton Aargau übergeben, ebenso die Schlüssel für die Logger. Die Temperaturdaten sollen nach dem Sommer 2020 in einer weiteren Arbeit ausgewertet werden.

6 Fazit

In der vorliegenden Masterarbeit wurde im ersten Teil die bisherige Revitalisierungspraxis des Kantons Aargau aus der Optik kälteliebender Fischarten reflektiert. Im zweiten Teil wurden die Habitatvorlieben und -anforderungen der Leitfischarten Äsche und Bachforelle zusammengetragen, wobei die steigende Wassertemperatur gemäss Klimaszenarien besonders berücksichtigt wurde. Im dritten Teil wurden wasserbauliche Massnahmen bzw. Massnahmenkombinationen, welche sich positiv bzw. negativ auf die Bachforellenpopulation ausgewirkt haben, diskutiert.

Ziel war es, mit den gewonnenen Erkenntnissen aus der Analyse der Wasserbauprojekte, der wasserbaulichen Massnahmen und der Habitatvorlieben und -anforderungen der Leitfischarten eine wissenschaftliche Grundlage für Empfehlungen zuhanden des Wasserbaus zu erarbeiten.

6.1 Resultate

In Tabelle 10 sind die Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit zusammengefasst, sowie die persönlichen Empfehlungen, welche aus den Erkenntnissen abgeleitet wurden, aufgeführt.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit und der persönlichen Empfehlungen, welche aus den Erkenntnissen abgeleitet wurden.

Erkenntnisse aus der Arbeit	Persönliche Empfehlungen
Signifikanter und positiver Zusammenhang zwischen IAM Attraktivität und Gesamtbiomasse	Mit höherer Habitatattraktivität kann der Fischbestand in einem Gewässerabschnitt gefördert werden.
Signifikanter und positiver Zusammenhang zwischen IAM Attraktivität und Forellenbiomasse	Mit höherer Habitatattraktivität kann die Bachforelle in einem Gewässerabschnitt gefördert werden.
Höhere Habitatattraktivitätswerte wurden in Projekten erreicht, bei welchen Massnahmen zur Entwicklung der Sohle und Ufer in höheren Dichten umgesetzt wurden.	Zur Förderung der Bachforelle wird empfohlen, den Schwerpunkt der wasserbaulichen Massnahmen auf Instream-Massnahmen in der Sohle, d.h. höhere Dichten an Strukturen in der Gewässersohle, vorzugsweise mit Totholz, zu setzen.
Dichte Strukturierung der Gewässersohle mit Totholz (Massnahmengruppe Morphologie-Instream) hat sich sehr positiv auf die Bachforellenpopulation	

Auswahl der wasserbaulichen Massnahmen (Art, Bauweise, Material und Dichte der Massnahmen) wurde bei den vorliegenden Projekten meist nicht begründet Es fehlt die Grundlage (Defizitanalyse, ökologische Projektziele und Zielarten), um eine spezifische Auswahl der wasserbaulichen Massnahmen zu definieren.	Es wird empfohlen zukünftig mit einer vorgängigen Analyse der ökologischen Defizite, der Definition der Projektziele und Zielarten die dominanten wasserbaulichen Massnahmengruppen, sowie spezifische Massnahmen auszuwählen.
Der Alet hat bei Wasserbauprojekten profitiert, bei welchen in grösserem Stile Gerinneveränderungen vorgenommen wurden	Gerinneveränderungen sind in Zukunft wünschenswert, aber nur in Kombination mit Massnahmen zur Senkung der Wassertemperatur und Strukturierung des Gerinnes (Morphologie-Instream).
Gemäss Bericht CCHydro, ist mit einem weiteren Anstieg der Wassertemperaturen in den Schweizer Fliessgewässern zu rechnen (BAFU, 2012)	Um dem Habitatverlust der Bachforelle aufgrund des Wassertemperaturanstieges entgegenzuwirken, müssen Massnahmen der Massnahmengruppe Wassertemperatur prioritär berücksichtigt werden.
Die Zeiträume sind in den vorliegenden Untersuchungen sehr unterschiedlich.	Für die Vergleichbarkeit wird empfohlen, zukünftig mit einheitlichen Zeiträumen zu arbeiten.
Die Auswertungen basieren nur auf einer kleinen Anzahl an Wasserbauprojekten, da der Erfolg mit unterschiedlichen Parameter und Messmethoden bestimmt wurde.	Mit den neuen nationalen methodischen Vorgaben „Wirkungskontrollen Revitalisierung„ (Weber, et al., 2019) soll eine Vergleichbarkeit der Erfolgskontrollen erreicht werden. Wünschenswert für die Datenanalyse wären eine Vereinheitlichung der Parameter, Messmethoden und Zeiträume.

Die Bachforellenpopulationen haben sich mit Ausnahme der zwei Alet dominierten Gewässerabschnitten (Bünz Bünzen, Bünz Hendschicken) verbessert (Anzahl und Biomasse), wobei der Erwartungswert für Forellengewässer von 100-200 kg/ha nur bei den Projekten Wigger Brittnau 2018 und Bünz Hendschicken erreicht wurde.

Die Literaturrecherche zeigt, dass die wichtigsten Anforderungen der Bachforelle an ihren Lebensraum passende Wassertemperaturen, ausreichend Sauerstoff, reichliches Nahrungsangebot, Laichsubstrat, Einstände für alle Altersstadien und Wandermöglichkeiten sind. Die Äsche hingegen weist einen komplexen Lebenszyklus mit wechselnden ökologischen Ansprüchen und dem damit verbundenen Habitatwechsel auf. Das geeignete Habitatangebot in kritischen Phasen (key periods) entscheidet deshalb über die Überlebenschancen der Tiere, sowie die Vernetzung dieser Habitate. Nebst den spezifischen Habitaten für alle Altersstadien (inkl. Laichhabitat) stellt die Äsche Anforderungen an die Wassertemperatur, das Nahrungsangebot und die Wandermöglichkeiten. Der Alet, welcher in gewissen revitalisierten Gewässerabschnitten stark zugenommen hat, profitiert von einer Zunahme an langsam fliessenden tiefen Gewässerabschnitten (Habitat Adulte), ist resistent gegen eine Zunahme der Wassertemperatur in Forellengewässer und gegen Wasserqualitätsprobleme. Revitalisierungen können dahingegen den Alet indirekt fördern, indem langsam fliessende, strukturarme und tiefe Gewässerabschnitte, Abschnitte mit vielen Wasserpflanzen geschaffen werden oder die Wassertemperatur in Forellengewässer erhöht wird.

Die Auswertungen und linearen Regressionsmodelle zeigten einen signifikanten und positiven Zusammenhang zwischen IAM Attraktivität und Forellenbiomasse und Gesamtbiomasse. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass mit höherer Habitatattraktivität die Bachforelle gefördert werden kann. Höhere Habitatattraktivitätswerte wurde in Projekten erreicht, bei welchen Massnahmen zur Entwicklung der Sohle und Ufer in höheren Dichten umgesetzt wurden.

Insbesondere die dichte Strukturierung der Gewässersohle mit Totholz (Massnahmengruppe Morphologie-Instream) hat sich sehr positiv auf die Bachforellenpopulation ausgewirkt. Aufgrund dieser Ergebnisse lässt sich die Erkenntnis ableiten, dass mit Strukturen in der Gewässersohle und Ufer die Bachforelle gefördert werden kann (Biomasse und Anzahl). Es bedarf demnach einen Schwerpunkt der wasserbaulichen Massnahmen auf Instream-Massnahmen in der Sohle, d.h. höhere Dichten an Strukturen in der Gewässersohle, vorzugsweise mit Totholz, zu setzen.

Die Auswahl der wasserbaulichen Massnahmen (Art, Bauweise, Material und Dichte der Massnahmen) wurde bei den vorliegenden Projekten meist nicht begründet. Es fehlt auch die Grundlage (Defizitanalyse, ökologische Projektziele und Zielarten), um eine spezifische Auswahl der Massnahmen zu definieren. Es wird empfohlen zukünftig mit einer vorgängigen Analyse der ökologischen Defizite, der Definition der Projektziele und Zielarten die dominanten Massnahmengruppen, sowie spezifische Massnahmen auszuwählen. So kann die Habitatvielfalt für die definierte Zielart gefördert werden.

Der Alet hat bei Wasserbauprojekten profitiert, bei welchen in grösserem Stile Gerinneveränderungen vorgenommen wurden. Die neue laterale Gerinnedynamik ging nicht einher mit Massnahmen zur Senkung der Wassertemperatur. Zudem wurde mit diesen Gerinneveränderungen Alethabitate gefördert. Gerinneveränderungen sind in Zukunft wünschenswert, aber nur in Kombination mit Massnahmen zur Senkung der Wassertemperatur und Strukturierung des Gerinnes (Morphologie-Instream).

Gemäss Bericht CCHydro, ist mit einem weiteren Anstieg der Wassertemperaturen in den Schweizer Fliessgewässern zu rechnen (BAFU, 2012). Um dem Habitatverlust der Bachforelle aufgrund des Wassertemperaturanstieges entgegenzuwirken, müssen Massnahmen der Massnahmengruppe Wassertemperatur prioritär berücksichtigt werden. Das heisst Niederwasserrinnen, Beschattung, Anbindung von Seitengewässern und Oberläufen, Förderung von turbulenten Stellen sind in den Wasserbauprojekten umzusetzen. Aufgrund der Ergebnisse im Wasserbauprojekt Bünz Hendschicken wird empfohlen, bei Revitalisierungen in Forellengewässern des Mittellandes, welche im Sommer hohe Maximaltemperaturen aufweisen, der Sauerstoffeintrag zu fördern (Siehe auch Kapitel 6.3).

6.2 Einschränkungen

Die Auswertungen basieren nur auf einer kleinen Anzahl an Wasserbauprojekten. Bei diesen Projekten wurde der Erfolg anhand der Parameter Fisch und Habitatstruktur bewertet, weshalb die Daten vergleichbar sind. Bei weiteren Revitalisierungen wurde der Erfolg entweder mit anderen Parametern bzw. Methoden gemessen oder es lagen keine Vorher/Kontroll Aufnahmen vor. Die Daten dieser Revitalisierungsprojekte können aber nicht mit den Daten der vorliegenden Projekte verglichen werden. Diese neun ausgewerteten Wasserbauprojekte divergieren trotz derselben Parameterauswahl im Projektalter bei der ersten Erfolgskontrolle.

Die ausgewerteten Wasserbauprojekte sind mit Ausnahme der Wigger Brittnau 2018 alle ähnlichen Stiles. Deshalb divergieren die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen kaum. Das Wasserbauprojekt Wigger Brittnau 2018 unterscheidet sich von den anderen Projekten bezüglich Baustoff und dominanter Massnahmengruppe (Morphologie-Instream). Dieses Projekt ist aber geringen Alters, die Ergebnisse sind mit Vorsicht zu geniessen, der Erfolg des Wasserbauprojektes für die Bachforelle muss sich in den nächsten Jahren noch bestätigen.

Aus den Auswertungen und linearen Regressionsmodelle betreffend Einfluss des Projektalters auf die Habitatattraktivität und Forellenbiomasse lässt sich die Empfehlung zu einheitlichen Zeiträumen ableiten. Nebst den Zeiträumen muss auch die Jahreszeit der Aufnahmen vereinheitlicht werden. Mit Ausschluss des Einflusses Projektalter durch einheitliche Zeiträume steigt die Vergleichbarkeit der Daten. Zudem müssen die gleichen Parameter zur Bewertung des Erfolges ausgewählt und diese müssen auch gleich gemessen werden.

Mit den neuen nationalen methodischen Vorgaben „Wirkungskontrollen Revitalisierung„ (Weber, et al., 2019) soll eine Vergleichbarkeit der Erfolgskontrollen erreicht werden. Wünschenswert für die Datenanalyse wären eine Vereinheitlichung der Parameter, Messmethoden und Zeiträume.

6.3 Weitergehende Forschungsfragen

Beim Wasserbauprojekt Bünz Hendschicken 2014 nahm die Forellenbiomasse im Vergleich zur Kontrollstrecke ab. Es wird vermutet, dass der Forellenbestand aufgrund der hohen Wassertemperaturen im Sommer in der Bünz Hendschicken nicht mehr mit dem Strukturangebot (IAM Attraktivität), sondern mit der Fläche an stark durchströmten tiefen Flächen (Sauerstoffangebot) korreliert. Diese mögliche Korrelation kann in einer weiteren Forschungsarbeit überprüft werden. Es besteht die Möglichkeit, dieser Forschungsfrage mit dem Auswerten der Temperaturdaten der Logger an der Bünz und Wigger nachzugehen. Nebst Temperatur- müssten auch noch Sauerstoffmessungen in Kontroll- und Revitalisierungsstrecken vorgenommen werden.

Betreffend Sauerstoffeintrag wäre zudem interessant zu untersuchen, welche Strukturen den Sauerstoffeintrag ins Gewässer am meisten fördern. Je nach Gewässertyp sind unterschiedliche Massnahmen zur Förderung der Sauerstoffeintrages möglich (Fliessgeschwindigkeiten, Strukturreichtum, Gefälle und Sohlsubstrat). Nebst der Überprüfung der Strukturen auf ihren Sauerstoffeintrag, stellt sich die Frage, welche dieser Massnahmen für welchen Gewässertyp geeignet bzw. möglich sind.

In der vorliegenden Arbeit wurden die wasserbaulichen Massnahmen aus den Plänen eruiert. Nicht nur der Einbau von Strukturen, sondern auch deren Entwicklung im Gewässer ist zentral zur Schaffung geeigneter Fischhabitate. Je nach Lage der wasserbaulichen Massnahmen und je nach Gewässertyp (Dynamik) kann sich eine Massnahme in Gewässern unterschiedlich entwickeln. Eine Kartierung unterschiedlicher Massnahmen in verschiedenen Gewässern über mehrere Jahre könnte das Potential der Massnahme aufzeigen. Es fragt sich, welche Habitate sich aus einer bestimmten Massnahme entwickeln können, wie sich die Substratvielfalt, die Tiefen- und Geschwindigkeitsvariabilität rundum die Struktur entwickeln werden. Mit den Kenntnissen zur Anforderung der Bachforelle an ihren Lebensraum könnten spezifische Empfehlungen zur Förderung der Bachforelle abgeleitet werden. Des Weiteren wäre es möglich, aus diesen Kartierungsarbeiten Aussagen zur Nachhaltigkeit oder Erneuerbarkeit von wasserbaulichen Massnahmen abzuleiten.

7 Literaturverzeichnis

Aargauisches Geographisches Informationssystem. (2018). *Orthofoto*. Von GIS Kanton Aargau: https://www.ag.ch/app/agisviewer4/v1/ abgerufen

Alabaster, J. S., & Lloyd, R. (1980). *Water Quality Criteria for Freshwater Fish.* London and Boston: Butterworths.

Aquabios. (2014). *Habitatkartierung Bünz vor Renaturierung.* Aarau: Kanton Aargau, Abteilung Wald, Sektion Jagd und Fischerei.

Aquabios. (2015). *Erfolgskontrolle der Revitalisierung von zwei Wanderhindernissen in der Surb.* Aarau: Kanton Aargau, Abteilung Landschaft und Gewässer und Abteilung Gewässer und Wald, Sektion Jagd und Fischerei.

Aquabios. (2016). *Erfolgskontrolle der Revitalisierungsmassnahmen der Wigger in Brittnau.* Aarau: Kanton Aargau, Abteilung Wald, Sektion Jagd und Fischerei.

Aquabios. (2017). *Erfolgskontrolle Revitalisierung Wyna Gontenschwil – Mikrohabitate und Fische.* Aarau: Kanton Aargau, Abteilung Landschaft und Gewässer und Abteilung Gewässer und Wald, Sektion Jagd und Fischerei.

Aquabios. (2018). *Erfolgskontrolle Revitalisierung Bünz bei Bünzen – Mikrohabitate und Fische.* Aarau: Kanton Aargau, Abteilung Landschaft und Gewässer und Abteilung Gewässer und Wald, Sektion Jagd und Fischerei.

Aquabios. (2019). *Entwurf IAM Bünz Hendschicken nach Revitalisierung, noch kein Bericht vorliegend.*

Aquabios. (2020). *IAM Wigger: Strecke Brittnau, sowie quantitative Befischung.* Aarau: Kanton Aargau, Abteilung Landschaft und Gewässer und Abteilung Gewässer und Wald, Sektion Jagd und Fischerei.

Aquabios. (2020). *IAM Wigger: Strecke Rothrist.* Aarau: Kanton Aargau, Abteilung Landschaft und Gewässer und Abteilung Gewässer und Wald, Sektion Jagd und Fischerei.

BAFU. (2012). *Auswirkungen der Klimaänderungen auf Wasserressourcen und Gewässer.* Bern: Bundesamt für Umwelt. Umwelt-Wissen Nr. 1217.

BAFU. (2012). *Auswirkungen der Klimaänderungen auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro).* Bern: Bundesamt für Umwelt. Umwelt-Wissen Nr. 1217.

BAFU. (21. November 2019). *Fischgängigkeit.* Von Thema Wasser - Fachinformationen - Massnahmen: https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/fachinformationen/massnahmen-zum-schutz-der-gewaesser/renaturierung-der-gewaesser/fischgaengigkeit.html abgerufen

Baumgartner, S., Peter, A., Reichert, P., Robinson, C., Siegenthaler-Le Drian, C., & Thomas, G. (2013). *Priorisierung von Flussrevitalisierungsprojekten - ökologische Aspekte der Priorisierung und Revitalisierungspotenzial.* Dübendorf: BAFU, Abteilung Wasser.

Bembo, D. G., Beverton, R. J., Weightman, A. J., & Cresswell, R. C. (1993). Distribution, growth and movement of River Usk brown trout (Salmo trutta). *Journal of Fish Biology, 43*, S. 45-52.

Bostelmann, R. (2003). *Bäche, Flüsse und Altarme. Unveröff. Entwurf für die Broschüre „Biotope in Baden-Württemberg".* Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz.

Burkhardt-Holm, P. (2009). Klimawandel und Bachforellenrückgang - gibt es einen Zusammenhang? Resultate aus der Schweiz. *Umweltwissenschaften und Schadstoff Forschung, 21 (2)*, S. 177-185.

Carle, F. L., & Strub, M. R. (1978 (34)). A new method for estimating population size from removal data. *Biometrics*, S. 621-630.

Clapp, D. F., Clark, R. D., & Diana, J. S. (1990). Range, activity, and habitat of large, free-ranging brown trout in a Michigan stream. *Transactions of the American Fisheries Society 119*, S. 1022-1034.

Daufresne, M. R. (2003). Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River: effects of climatic factors. *Global Change Biology 10*, S. 124-140.

Durrer, S., Kirchhofer, A., Schälchli, U., Seippel, A., Sieber, P., & Tesini, C. (2014). *Niederwassergerinne.* vif Kt. Luzern, AWEL Kt. Zürich, BVU Kt. Aargau.

Eklöv, A. G., & Greenberg, L. A. (1998). Effects of artificial instream cover on the density of 0+ brown trout. *Fisheries Management and Ecology 5*, S. 45-53.
Elber, F., Stäheli, T., & Camenzind, M. (2019). Revitalisierung von Fliessgewässern in Zeiten des Klimawandels. *Aquaviva 61. Jahrgang*, S. 26-31.
Elliott, J. M. (1981). Some aspects of thermal stress on freshwater teleosts. *Stress and Fish (A. D. Pickering, ed)*, S. 209-245.
Elliott, J. M. (1994). *Quantitative ecology and the brown trout.* New York: Oxford University Press.
Fischwerk. (2020). *Wirkungskontrolle - Erhebung nach 3 Jahren, Revitalisierung der Wigger bei Rothrist/Aarburg.* Zofingen: Bundesamt für Strassen ASTRA.
Freimann, R. (2014). *Hydraulik für Bauingenieure - Grundlagen und Anwendungen, 3., aktualisierte und erweiterte Auflage.* München: Fachbuchverlag Lepzig im Carl Hanser Verlag.
Garrett, J. W., & Bennett, D. H. (1995). Seasonal movements of adult brown trout relative to temperature in a cool water reservoir. *North American Journal of Fisheries Management 15*, S. 480-487.
Guthruf, J. (1996). *Populationsdynamik und Habitatwahl der Asche (Thymallus thymallus L.) in drei verschiedenen Gewassern des schweizerischen Mittellandes.* Zürich: ETH .
Jensen, D. W., Steel, A. E., Fullerton, A. H., & Pess, G. R. (2009). Impact of Fine Sediment on Egg-To-Fry Survival of Pacific Salmon: A Meta-Analysis of Published Studies. *Reviews in Fisheries Science, 17:3*, S. 348-359.
Jungwirth, M., & Winkler, H. (1983). Die Bedeutung der Flußbettstruktur für Fischgemeinschaften. *Österreichische wasserwirtschaft (ÖWW) 35 (9/10)*, S. 229-234.
Jungwirth, M., Haidvogl, G., Moog, O., Muhar, S., & Schmutz, S. (2003). *Angewandte Fischökologie an Fliessgewässern.* Wien: Facultas Universitätsverlag.
Kail, J., Brabec, K., Poppe, M., & Januschke, K. (2015). The effect of river restoration on fish, macroinvertebrates and aquatic macrophytes: A meta-analysis. *Ecological Indicators 58*, 311-321.
Kirchhofer, A., & Breitenstein, M. (2019). Winner und Loser im Klimapoker - Gewässerorganismen im Stress? *Aquaviva 61. Jahrgang*, S. 16-19.
Knutti, A. (2001). *Radiometrische Untersuchungen von Äschen Thymallus thymallus zur Laichzeit im Linthkanal.* Zürich: Zoologisches Museum der Universität Zürich.
Küng, M. (2020). *Wassertemperatur, Klimawandel und kälteliebende Fischarten der Schweiz – ein Überblick.* Bern: Berner Fachhochschule.
Küttel, S., Peter, A., & Wüest, A. (2002). *Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fliessgewässer.* Kastanienbaum: EAWAG Publikation Rhône-Thur Projekt.
Le-Louran, H., & Bagliniere, J. (1996). Ecological and Biological characteristics of chub (Leuciscus cephalus) in some rivers of the French Atlantic frontage. *Cybium 20 (3)*, S. 55-57.
Liechti, P. (2010). *Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer. Chemisch-physikalische Erhebungen, Nährstoffe. Umwelt-Vollzug Nr. 1005.* Bern: Bundesamt für Umwelt.
Lucas, M. C., & Baras, E. (2001). *Migration of Freshwater Fishes.* Blackwell Science: Oxford.
Mann, R. H. (1976). Observations on the age, growth, reproduction and food of the chub Squalius cephalus (L.) in the River Stour, Dorset. *Journal of Fish Biology, 8*, S. 265-288.
Mann, R. H. (1996). Environmental requirements of European non-salmonid fish in rivers. *Hydrobiologia 323*, S. 223-235.
Meyer, L. (2001). Spawing migration of grayling Thymallus thymallus (L. 1758) in a northern German lowland river. *Archiv für Hydrobiologie*, S. 99-117.
Moosmann, L., Schmid, M., & Wüest, A. (2005). *Einfluss der Beschattung auf das Temperaturregime der Orbe.* Kastanienbaum: EAWAG.
Müller, V. (2011). *Erarbeitung eines anthropogen unbeeinflussten, typischen Jahresgangs der Wassertemperatur nach biozönotischen Regionen. Masterprojektarbeit.* Zürich: ETH Zürich.
Northcote, T. G. (1978). Migration strategies and production in freshwater fishes. *Ecology of freshwater fish production*, S. 326-359.
Northcote, T. G. (1995). Comparative biology and management of Arctic and European grayling (Salmonidae, Thymallus). *Reviews in Fish Biology and Fisheries 5*, S. 141-194.

Notter, B., & Staub, E. (2009 2009). Lebensraum der Bachforelle um 2050. *GWA Gas, Wasser, Abwasser. Nr. 1/2009*, S. 29-44.

Parkinson, D., Philippart, J.-C., & Baras, E. (1999). A preliminary investigation of spawing migrations of grayling in a small stream as determined by radio-tracking. *Journal of Fish Biology 55*, S. 172-182.

Peter, A. (1992). Analyse von Fischmikrohabitaten zur Beurteilung der strukturellen Komplexität eines Fliessgewässers. *EAWAG Jahresbericht 1992*, S. 60-61.

Peter, A., & Erb, M. (1996). *Leitfaden für fischbiologische Erhebungen in Fliessgewässern unter Einsatz der Elektrofischerei.* Bern: BUWAL.

Pletterbauer, F., Graf, W., & Schmutz, S. (2016). Effect of biotic dependencies in species distribuition of Thymallus thymallus under consideration of Allogamus auricollis. *Ecological Modelling*, S. 95-104.

Pulg, U. (2007). *Die Restaurierung von Kieslaichplätzen.* München: Landesfischereiverband Bayern e.V.

Quinn, T. P. (2005). *The Behavior and Ecology of Pacific Salmon and Trout.* Seattle, WA: University of Washington Press.

Roni, P., Hanson, K., & Beechie, T. (2008). Global Review of the Physical and Biological Effectiveness of Review of the Physical and Biological Effectiveness of. *North American Journal of Fisheries Management 28*, S. 856-890.

Sempeski, P., & Gaudin, P. (1995a). Construction of habitat preference curves for spawing sites and young stages of grayling (Thymallus thymallus). *Bulletin Français de la pêche et de la pisciculture 337/338/339*, S. 277-282.

Sempeski, P., & Gaudin, P. (1995b). Habitat selection and habitat use by young stages of rheophilic fish species: The greyling model. *Bulletin Français de la pêche et de la pisciculture 337/338/339*, S. 215-220.

Sempeski, P., & Gaudin, P. (1995c). Habitat selection by grayling I. Spawing habitats. *Journal of Fish Biology 47*, S. 256-265.

Sempeski, P., & Gaudin, P. (1995d). Habitat selection by grayling II. Preliminary results on larval and juvenile daytime habitats. *Journal of Fish Biology 47*, S. 345-349.

Smith, R. P. (1989). *The distribution and habitat requirements of chub (Leuciscus cephalus L.) in several lowland rivers of eastern England. Ph.D. Thesis.* University of East Anglia: Norwich.

Soulsby, C., Youngson, A., Moir, H., & Malcom, I. (2001). Fine sediment influence on salmonid habitat in a lowland agricultural stream: a preliminary assessment. *Science of the Total Environment 265*, S. 295-307.

Tilzey, R. D. (1977). Repeat homing of brown trout (Salmo trutta) in Lake Eucumbene, New South Wales, Australia. *J. Fish. Res. Board Can. 34(8)*, S. 1085-1094.

Unfer, G. (2012). *On the ecology of brown trout, with special emphasis on the first year of development in life history.* Wien: Universität für Bodenkultur Wien (BOKU).

Vonlanthen, P., Périat, G., Kreienbühl, T., Schlunke, D., Morillas, N., Grandmottet, J.-P., & Degiorgio, F. (2018). IAM - Eine Methode zur Bewertung der Habiatvielfalt und -attraktivität von Fliessgewässerabschnitten. *Wasser Energie Luft - 110. Jahrgang, Heft 3*, 201-207.

Weber, C., Sprecher, L., Aberg, U., Thomas, G., Baumgartner, S., & Haertel-Borer, S. (2019). *Wirkungskontrolle Revitalisierung - Gemeinsam lernen für die Zukunft.* Bern: BAFU.

Westhauser, J. (Juni 2020). *Fischlexikon.* Von Döbel (Squalius cephalus): https://www.fischlexikon.eu abgerufen

Whiteway, S., Biron, P., Zimmermann, A., Venter, O., & Grant, J. (2010). Do in-stream restoration structures enhance salmonid abundance? A meta-analysis. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences (67)*, 831-841.

Wiesbauer, H., Bauer, T., Jagsch, A., Jungwirth, M., & Uiblein, F. (1991). *Fischökologische Studie – Mittlere Salzach.* Wien: i. A. Tauernkraftwerke AG.

Abbildungsverzeichnis

Titelbild: Martina Küng, Wigger Brittnau, 2020

Abbildung 1: Vergleich IAM Diversität des revitalisierten Gewässerabschnittes mit einer Kontrollstrecke oder einer Vorher-Aufnahme. 13
Abbildung 2: Vergleich IAM Attraktivität des revitalisierten Gewässerabschnittes mit einer Kontrollstrecke oder einer Vorher-Aufnahme. 14
Abbildung 3:Gesamtbiomasse (links) und Biomasse Alet (rechts) vor der Revitalisierung bzw. in der Kontrollstrecke im Vergleich zu nach der Revitalisierung in sieben Gewässerabschnitten. 15
Abbildung 4: Bachforellenpopulation vor der Revitalisierung bzw. in der Kontrollstrecke im Vergleich zu nach der Revitalisierung in sieben Gewässerabschnitten. Die rot gestrichelte Linie kennzeichnet die untere Grenze des Erwartungswertes für Forellengewässer (100-200 kg/ha bzw. 2000 Fische/ha).... 16
Abbildung 5: Zusammenhang Gesamtbiomasse (kg/ha) – IAM Attraktivität für die vorliegenden Wasserbauprojekte. Die graue Linie zeigt die Korrelation zwischen dem IAM Attraktivität und der Gesamtbiomasse für die die vorliegenden Wasserbauprojekte (N=12; R^2=0.295; p<0.01). Die rote Linie zeigt die Korrelation für Forellengewässer mit guter Wasserqualität gemäss Daten Vonlanthen et al. (2018) (N=26; R2=0.56; p<0.001). 18
Abbildung 6: Zusammenhang Forellenbiomasse (kg/ha) – IAM Attraktivität, Vergleich Vorher / Kontroll zu Nachher für die Wasserbauprojekte. Die graue Linie zeigt die Korrelation zwischen dem IAM Attraktivität und der Forellenbiomasse in den untersuchten Gewässerabschnitten (N=12; R^2=0.31; p<0.01). 20
Abbildung 7: Zusammenhang Relativer Unterschied IAM Attraktivität – Relativer Unterschied Forellenbiomasse. Die graue Linie zeigt die Korrelation zwischen dem relativen Unterschied IAM Attraktivität und dem relativen Unterschied der Forellenbiomasse in den untersuchten Gewässerabschnitten (N=7; R^2=0.0731; p<0.01). 22
Abbildung 8: Relative Wichtigkeit verschiedener Einflussgrössen auf den Revitalisierungseffekt für alle Organismengruppen (Invertebraten, Fische und Makrophyten). Es handelt sich um eine Post-Treatment-Analyse. Die Boxplots zeigen die Quartile, Ausreisser und den Wertebereich für 10 Modelldurchläufe (Kail et al., 2015). 24
Abbildung 9: Zusammenhang Projektalter bei der ersten Erfolgskontrolle - Relativer Unterschied IAM Attraktivität. Die graue Linie zeigt die Korrelation zwischen dem Projektalter bei der ersten Erfolgskontrolle und dem relativen Unterschied IAM Attraktivität (N=9; R^2=0.038; p<0.01). 26
Abbildung 10: Zusammenhang Projektalter bei der ersten Erfolgskontrolle - Relativer Unterschied Forellenbiomasse. Die graue Linie zeigt die Korrelation zwischen dem Projektalter bei der ersten Erfolgskontrolle und dem relativen Unterschied Forellenbiomasse (N=7; R^2=0.2741; p<0.01). 27
Abbildung 11: Lebenszyklus und Habitatvorlieben der Bachforelle (Bostelmann, 2003). 37
Abbildung 12: Migration zwischen den drei funktionalen Lebensräumen: Nahrungsaufnahme, Zuflucht und Fortpflanzung (Lucas & Baras, 2001). 39
Abbildung 13: Lebenszyklus der Äsche (verändert nach Sempeski & Gaudin, 1995a,b,c,d in Jungwirth et al., 2003). 45
Abbildung 14: Strecke 2 wurde als offene Blockrampe gestaltet (links), Strecke 3 wurde als pendelndes Gerinne gestaltet (rechts) (Quelle: Orthofoto 2018, Aargauisches Geographisches Informationssystem (AGIS)). 55
Abbildung 15: Installieren der Temperaturlogger an der Wigger und Bünz im Dezember 2019. Die Logger wurden im Gehäuse mit Kette und Schloss gesichert (Quelle: M.Kueng). 62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Neun Wasserbauprojekte des Kantons Aargau, bei welchen die Parameter Fische und / oder Habitatstruktur mit den Methoden IAM und quantitative Befischung aufgenommen wurden. Diese Projekte dienen aufgrund der einheitlichen Methodik im weiteren Verlauf als Studienobjekte. 6
Tabelle 2: Aus dem Raster der Gewässerdefizite (Baumgartner, et al., 2013) und der Massnahmengruppierung (Kail et al., 2015) wird die Kategorisierung der wasserbaulichen Massnahmen für die vorliegende Arbeit vorgenommen.....8
Tabelle 3: Wasserbauliche Massnahmen der neun Wasserbauprojekte kategorisiert nach Massnahmengruppe (Farben), sowie jeweils die dominante Massnahmengruppe und der dominante Baustoff. 10
Tabelle 4: Zusammenfassung der Erkenntnisse aus Kapitel 2 und der persönlichen Empfehlungen, welche aus diesen Erkenntnissen abgeleitet werden. 29
Tabelle 5: Zusammenfassung der Habitatansprüche der Bachforelle (Salmo trutta fario), des Einflusses des Wasserbaus (wasserbauliche Massnahmengruppe), sowie Einfluss des Wasserbaus unter Berücksichtigung des Klimawandels. 41
Tabelle 6: Zusammenfassung der Habitatansprüche der Äsche (Thymallus thymallus), des Einflusses des Wasserbaus (wasserbauliche Massnahmengruppe), sowie Einfluss des Wasserbaus unter Berücksichtigung des Klimawandels. 47
Tabelle 7: Zusammenfassung Bewertung fischereilicher Erfolg und wasserbauliche Massnahmen in Bezug auf die Anforderungen der Bachforelle an ihren Lebensraum. - = negativ, += leicht positiv, ++= sehr positiv. Zielwert Biomasse Bachforelle 100 kg/ha, Zielwert Anzahl Bachforelle 2000 Individuen/ha. 52
Tabelle 8: Bewertung aller Wasserbauprojekte gemäss Kapitel 4.1 in einer dreistufigen Skala, (- negativ, + leicht positiv, ++ sehr positiv). 53
Tabelle 9: Zusammenfassung der Erkenntnisse aus Kapitel 4 und der persönlichen Empfehlungen, welche aus diesen Erkenntnissen abgeleitet werden. 59
Tabelle 10: Zusammenfassung der Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit und der persönlichen Empfehlungen, welche aus den Erkenntnissen abgeleitet wurden. 63

Anhang A

Lineare Regressionsmodelle t-Test Daten, Signifikanzniveau $\alpha = 1\%$

- **Hypothese 1: Je höher der IAM Attraktivitätswert ist, desto höher ist die Gesamtbiomasse.**

Zweistichproben t-Test unter der Annahme unterschiedlicher Varianzen		
	Variable 1	Variable 2
Mittelwert	0,73857143	158,161857
Varianz	0,17617088	20001,4541
Beobachtungen	14	14
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	13	
t-Statistik	-4,16485891	
P(T<=t) einseitig	0,00055499	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	3,85198239	
P(T<=t) zweiseitig	0,00110998	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	4,22083173	

- **Hypothese 2: Je höher der IAM Attraktivitätswert ist, desto höher ist die Forellenbiomasse.**

Zweistichproben t-Test unter der Annahme unterschiedlicher Varianzen		
	Variable 1	Variable 2
Mittelwert	62,6048571	0,8325
Varianz	1539,70668	0,27420956
Beobachtungen	14	18
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	13	
t-Statistik	5,88991623	
P(T<=t) einseitig	2,6618E-05	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	3,85198239	
P(T<=t) zweiseitig	5,3236E-05	

Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	4,22083173	

- **Hypothese 3: Je stärker der IAM Attraktivitätswert durch die Revitalisierung zunimmt, desto stärker nimmt die Forellenbiomasse zu.**

Zweistichproben t-Test unter der Annahme unterschiedlicher Varianzen		
	Variable 1	Variable 2
Mittelwert	1,89401018	3,56852988
Varianz	2,25991766	42,0671146
Beobachtungen	9	7
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	7	
t-Statistik	-0,66923581	
P(T<=t) einseitig	0,26239784	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	4,78528963	
P(T<=t) zweiseitig	0,52479567	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	5,40788252	

- **Hypothese 4: Je älter das Wasserbauprojekt ist, desto stärker hat der IAM Attraktivitätswert zugenommen.**

Zweistichproben t-Test unter der Annahme unterschiedlicher Varianzen		
	Variable 1	Variable 2
Mittelwert	4,55555556	1,89401018
Varianz	12,5277778	2,25991766
Beobachtungen	9	9
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	11	
t-Statistik	2,07637064	
P(T<=t) einseitig	0,0310431	

Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	4,02470104	
P(T<=t) zweiseitig	0,0620862	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	4,43697934	

- **Hypothese 5: Je älter das Wasserbauprojekt ist, desto stärker hat die Forellenbiomasse zugenommen.**

Zweistichproben t-Test unter der Annahme unterschiedlicher Varianzen		
	Variable 1	Variable 2
Mittelwert	4,55555556	3,56852988
Varianz	12,5277778	42,0671146
Beobachtungen	9	7
Hypothetische Differenz der Mittelwerte	0	
Freiheitsgrade (df)	9	
t-Statistik	0,36279954	
P(T<=t) einseitig	0,36256438	
Kritischer t-Wert bei einseitigem t-Test	4,29680566	
P(T<=t) zweiseitig	0,72512876	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	4,78091259	

Anhang B

Koordinaten Logger Bünz und Wigger

Logger Nummer	Abschnitt	Gewässer	Startzeit 1 / Intervall	Startzeit 2 / Intervall	Startzeit 3 / Intervall	Koordinaten Juli-Dezember 2019	Koordinaten ab Dezember 2019	Bemerkung
1	Hendschicken oben	Bünz	-	03.12.2019 / 10 min	22.6.2020 / 10 min		2659777 / 1248384	
2	Hendschicken unten	Bünz	-	03.12.2019 / 10 min	22.6.2020 / 10 min		2658958 / 1249237	
3	Othmarsingen oben	Bünz	-	03.12.2019 / 10 min	22.6.2020 / 10 min		2658832 / 1249795	
4	Othmarsingen unten	Bünz	-	03.12.2019 / 10 min	22.6.2020 / 10 min		2658630 / 1250261	
5	Kolk Boden	Bünz	-	03.12.2019 / 10 min	22.6.2020 / 10 min		2659508 / 1248522	ca. 200 m unterhalb Brücke
6	Kolk Oberfläche	Bünz	-	03.12.2019 / 10 min	22.6.2020 / 10 min			
7	Kolk Boden	Bünz	-	03.12.2019 / 10 min	23.6.2020 / 10 min		2658757 / 1249922	Logger im Juni 2020 nicht mehr da, neuer Logger gesetzt
8	Kolk Oberfläche	Bünz	-	03.12.2019 / 10 min	23.6.2020 / 10 min			Logger im Juni 2020 nicht mehr da, neuer Logger gesetzt
1,1	Brittnau oben Holzverbau, Kolk Oberfläche	Wigger	29.07.2019 / 5 min	20.12.2019 / 10 min	22.06.2020 / 10 min	2639078 / 1233929	2639078 / 1233929	am 7. Pflock
1,2	Brittnau oben Holzverbau, Kolk Boden	Wigger	29.07.2019 / 5 min	20.12.2019 / 10 min	22.06.2020 / 10 min			am 7. Pflock, im Frühling 2020 mit Geschiebe überdeckt, am 29.5.20 ausgegraben
2,1	Brittnau unten Holzverbau, Kolk Boden	Wigger	29.07.2019 / 5 min	20.12.2019 / 10 min	22.06.2020 / 10 min	2639011 / 1234097	2638982 / 1234146	am 1. Pflock
2,2	Brittnau unten Holzverbau, Kolk Oberfläche	Wigger	29.07.2019 / 5 min	20.12.2019 / 10 min	23.06.2020 / 10 min			am 1. Pflock, Logger im Juni 2020 nicht mehr da, neuer Logger gesetzt
3,1	Restwasserstrecke vor 2. Einlauf Werkkanal Brittnau	Wigger	29.07.2019 / 5 min	-	-	2638749 / 1234735		
3,2	Restwasserstrecke vor 2. Einlauf Werkkanal Brittnau	Wigger	29.07.2019 / 5 min	-	-			
4,1	Rothrist oben Boden	Wigger	29.07.2019 / 5 min	20.12.2019 / 10 min	22.06.2020 / 10 min	2635449 / 1239782	2635524 / 1239740	oberhalb Revitalisierung, oberhalb Blockrampe, Logger 4.1 lag im Dezember 2019 am Ufer (nicht mehr im Wasser)
4,2	Rothrist oben Oberfläche	Wigger	29.07.2019 / 5 min	20.12.2019 / 10 min	22.06.2020 / 10 min		2635524 / 1239741	oberhalb Revitalisierung, oberhalb Blockrampe
5,1	Rothrist oben	Wigger	29.07.2019 / 5 min	20.12.2019 / 5 min	22.06.2020 / 10 min	2635419 / 1239855	2635383 / 1239878	oberhalb Revitalisierung, unterhalb

								Blockrampe, Daten Frühling 2020 nur bis Ende Januar, da fälschlicherweise 1 min Intervall programmiert
5,2	Rothrist oben	Wigger	29.07.2019 / 5 min	-	-			oberhalb Revitalisierung, unterhalb Blockrampe
6,1	Rothrist unten	Wigger	29.07.2019 / 5 min	20.12.2019	22.06.2020 / 10 min	2634839 / 1240182	2634857 / 1240179	unterhalb Revitalisierung, oberhalb Eisenbahnbrücke, Daten Frühling 2020 nicht ablesebar da Batterie zu tief
6.2	Rothrist unten	Wigger	29.07.2019 / 5 min	-	-			unterhalb Revitalisierung, oberhalb Eisenbahnbrücke
7,1	Brittnau unten Steinverbau	Wigger	07.08.2019 / 5 min	20.12.2019	23.06.2020 / 10 min	2638778 / 1234614	2638778 / 1234614	Restwasserstrecke, vor erstem Einlauf, Werkkanal Brittnau, Logger im Juni 2020 nicht mehr da, neuer Logger gesetzt