Bauhaus-Universität Weimar

Fakultät Bauingenieurwesen

Weiterbildendes Studium «Wasser und Umwelt»

Masterarbeit

Reg.-Nr. WU - MA 345 / 21

Grundlagen für wasserbauliche Massnahmen zur Verbesserung der Lebensräume kälteliebender Fischarten in der Schweiz hinsichtlich des Klimawandels

Erstprüfer: Prof. Dr. Jolanda Jenzer Althaus, Berner Fachhochschule

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Roy Holzhey, Bauhaus-Universität Weimar

Vorgelegt von: Jon Drewes am 31.07.2021

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis III

Abbildungsverzeichnis IV

Abkürzungsverzeichnis VI

Formelverzeichnis VII

Kurzzusammenfassung 1

Abstract 1

1 Einführung 2

2 Literaturrecherche 4

2.1 Physikalische Eigenschaften von Wasser 4

2.2 Wassertemperaturen in Fliessgewässern 5

2.2.1 Die Bedeutung der Wassertemperatur 5

2.2.2 Das natürliche Temperaturregime in Fliessgewässern 8

2.2.3 Auswahl von Einflüssen auf die Wassertemperatur in Fliessgewässern 11

2.2.4 Ausgewählte Einflüsse des Klimawandels auf Fliessgewässer 15

2.2.5 Durchgeführte Temperaturuntersuchungen in Gewässern 19

2.2.6 Formeln 21

3 Material und Methoden 22

3.1 Untersuchungsgebiete 22

3.1.1 Wigger 23

3.1.2 Bünz 27

3.1.3 Kennwerte und Zuflüsse 29

3.2 Verwendete Datensätze 31

3.3 Eingesetzte Messgeräte und Materialien 32

3.4 Messungen 34

3.4.1 Übersicht Temperaturlogger Wigger 1 und 2 35

3.4.2 Übersicht Temperaturlogger Wigger 4 und 5 36

3.4.3 Übersicht Temperaturlogger Bünz 5 und 6 37

3.5 Rohdatenaufbereitung und -bereinigung 38

3.6 Hypothesentest ... 38
3.7 Auswahl von Wärme, Hitze- und Niedrigwasserperioden ... 39
4 Ergebnisse ... 40
4.1 Ergebnisse Wigger ... 40
4.2 Ergebnisse Bünz ... 46
4.3 Hypothesentests ... 51
4.4 Weitere Ergebnisse ... 53
4.4.1 Vergleichstest der Logger Blockrampe Wigger Oftringen ... 53
4.4.2 Vergleichstests der Logger in Wasserbecken ... 54
4.4.3 Eingegrabener Logger Wigger 1 ... 60
5 Diskussion ... 61
5.1 Diskussion der Ergebnisse ... 61
5.2 Fazit und Empfehlungen für die wasserbauliche Praxis ... 66
6 Zusammenfassung ... 69
7 Dank ... 70
Literaturverzeichnis ... VIII
Selbstständigkeitserklärung ... X
Anhang ... xi
Anhang 1: Restwasserregelungen Wigger gemäss Angaben Kanton Aargau ... xii
Anhang 2: Angaben zu den einzelnen Loggern ... xiii
Anhang 3: Ausschlusskriterien für die Rohdatenbereinigung ... xvi
Anhang 4: Kommentierte Rohdaten, kontrollierte / bereinigte Messreihen sowie ausgewertete Wetter und Abflussdaten ... xxii
Anhang 5: Ergebnisse Hypothesentests ... xxiii
Anhang 6: Erklärungsversuche zum Kapitel Diskussion ... xxvii
Anhang 7: Berechnete Einflüsse der seitlichen Zuflüsse ... xxix

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Optimal- und Extrembereiche hinsichtlich Wassertemperaturen der Fischarten Bachforelle und Äsche. Literaturwerte unverändert aus [26] 7

Tab. 3-1: Übersicht Untersuchungsperimeter 22

Tab. 3-2: Kennwerte der untersuchten Gewässer [1], Sohlenbreiten gemäss [44] 29

Tab. 3-3: In den Untersuchungsperimetern vorhandene Zuflüsse [36] 29

Tab. 3-4: Für die vorliegende Arbeit verwendete Datensätze 31

Tab. A1: Angaben zu den einzelnen Loggern aus [25], ab 2021 ergänzt durch den Verfasser mit eigenen Beobachtungen und Angaben der kantonalen Fischereiaufseher xiii

Tab. A2: Übersicht der Messperioden und -intervalle xv

Tab. A3: Ergebnisse Hypothese 1 xxiii

Tab. A4: Ergebnisse Hypothese 1.2 xxiii

Tab. A5: Ergebnisse Hypothese 2 xxiv

Tab. A6: Ergebnisse Hypothese 2.2 xxiv

Tab. A7: Ergebnisse Hypothese 3 xxv

Tab. A8: Ergebnisse Hypothese 4 xxv

Tab. A9: Ergebnisse Hypothese 5 xxvi

Tab. A10: Ergebnisse Hypothese 6 xxvi

Tab. A11: Ergebnisse Oberst. Pritschen Wuhrbach xxix

Tab. A12: Ergebnisse Hardbach xxix

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Der Sauerstoffbedarf von Wasserorganismen (Kurve b) und der temperaturbedingte Wert der Sauerstoffsättigung des Wassers (Kurve a). Unverändert aus [24] 5

Abb. 2-2: Mittlere tägliche Wassertemperaturen und Wassertemperaturschwankungen in Abhängigkeit der Fliessdistanz und Gewässergrösse. Unverändert aus [9] 8

Abb. 2-3: Typische Temperaturbänder für die untere Forellenregion (auf kolliner Höhenstufe) und die Äschenregion, aufbereitet und dargestellt nach [32] 9

Abb. 2-4: Einflussfaktoren auf das Temperaturregime in Flüssen. Unverändert aus [9] 10

Abb. 2-5: Die Wassertemperatur beeinflussende Energieflüsse. Unverändert aus [14] 11

Abb. 2-6: Entwicklung der beobachteten und erwarteten mittleren jährlichen Lufttemperatur. Unverändert aus [6] 15

Abb. 2-7: Bisherige Regimetypen für die Periode 1950 – 1980 und Prognose der künftigen Regimetypen um 2085. Rot dargestellt der neue Regimetyp «pluvial de transition». Unverändert aus [5] 16

Abb. 2-8: Gemessene Wassertemperaturen an neun ausgesuchten Stationen sowie die gemessene Lufttemperatur in Basel als Vergleich. Unverändert aus [5] 17

Abb. 2-9: Modellierte Habitat-Verteilung der Bachforelle um 2050. Unverändert aus [35] 18

Abb. 2-10: Gemessene Verhältnisse zwischen den mittleren Wassertemperaturen und Sauerstoffwerten in Pools während Dürre- und Nicht-Dürrejahren. Unverändert aus [11] 20

Abb. 3-1: Abbildungen des Abschnitts Wigger Oftringen (Blick jeweils vom orographisch rechten Ufer gegen die Fliessrichtung). Fotos des Verfassers 23

Abb. 3-2: Übersicht Perimeter Wigger Oftringen. Grundkarte [43] ergänzt 24

Abb. 3-3: Übersicht Perimeter Wigger Brittnau. Grundkarte [43] ergänzt 25

Abb. 3-4: Abbildungen des Abschnitts Wigger Brittnau. Fotos des Verfassers 26

Abb. 3-5: Übersicht des Perimeters Bünz. Grundkarte [43] ergänzt 27

Abb. 3-6: Abbildungen des Abschnitts Bünz (Blick jeweils gegen Fliessrichtung vom orographisch linken Ufer aus). Fotos des Verfassers 28

Abb. 3-7: Verwendete Stahlhülsen, Kette und Schnur. Fotos des Verfassers 32

Abb. 3-8: In Becken geklebte Logger und Ansicht gefülltes Becken. Fotos des Verfassers 33

Abb. 3-9: (1) Temperaturlogger in Stahlhülle mit Kette an Holzpfahl in der Flussmitte liegend (2) Schwimmender Logger an Schnur an Kette befestigt. Abbildungen des Verfassers 35

Abb. 3-10: (1) Temperaturlogger 4 und 5 in Stahlhülle mit Kette am Gewässerrand fixiert. (2) Schwimmender Logger Nr. 4.2 an Schnur an Kette befestigt. Foto links: Loggerstandort Nr.4. Foto rechts: Loggerstandort Nr. 5. Abbildungen des Verfassers 36

Abb. 3-11: (1) Temperaturlogger in Stahlhülle mit Kette an Holzpfahl in Bachmitte befestigt (zugehöriges Foto links unten), (2) Schwimmender Logger an Schnur an Busch am Gewässerrand befestigt (zugehöriges Foto rechts unten). Abbildungen des Verfassers 37

Abb. 4-1: Übersicht der am Logger Wigger 4.1 im Jahre 2020 gemessenen Wassertemperaturen gegenübergestellt mit in der unteren Forellenregion relevanten Temperaturbereichen und -grenzen 40

Abb. 4-2: Längenprofil Wigger 31.07.2020 mit jeweils an der Sohle gemessenen Wassertemperaturen (Mittel-, Maximal- und Minimalwerte), ergänzt mit Angaben des Kantons Aargau [36], [37]. 42

Abb. 4-3: Gegenüberstellung aller Wigger-Logger (Sohle) in Sommerperiode 2020 43

Abb. 4-4: Gemessene Wassertemperaturen bei der Blockrampe Wigger Oftringen in Hitzeperiode 2020. Der Logger 4 befindet sich oberhalb und der Logger 5 unterhalb der untersuchten Blockrampe 45

Abb. 4-5: Übersicht der am Logger Bünz 4 im Jahre 2020 gemessenen Wassertemperaturen gegenübergestellt mit in der unteren Forellenregion relevanten Temperaturbereichen und -grenzen 46

Abb. 4-6: Längenprofil Bünz 31.07.2020 mit jeweils an der Bachsohle gemessenen Wassertemperaturen (Mittel-, Maximal- und Minimalwerte), ergänzt mit Angaben des Kantons Aargau [1], [36], [37] 48

Abb. 4-7: Gegenüberstellung aller Bünz-Logger (Sohle) in Sommerperiode 2020 49

Abb. 4-8: Vergleichstest der Logger an der Blockrampe Wigger Oftringen 53

Abb. 4-9: Vergleichstest aller Logger Wigger in Wasserbecken 54

Abb. 4-10: Auswertung der Maximalwerte und Tagesschwankungen der Logger Wigger 55

Abb. 4-11: Vergleichstest der Logger Blockrampe Wigger in Wasserbecken 56

Abb. 4-12: Auswertung der Maximalwerte und Tagesschwankungen der Logger Wigger Blockrampe 57

Abb. 4-13: Vergleichstest aller Logger Bünz in Wasserbecken 58

Abb. 4-14: Auswertung der Maximalwerte und Tagesschwankungen Bünz 5 und 6 59

Abb. 4-15: Temperaturverhalten des eingegrabenen Loggers Wigger 1.2 60

Abb. A-1: Übersicht Restwasserregelungen Wigger xii

Abkürzungsverzeichnis

μ_D: Mittelwert der gepaarten Differenzen

ARA: Abwasserreinigungsanlage

BAFU: Bundesamt für Umwelt

BSB: Bachsohlenbreite

DN: Nennweite von Rohren

EZG: Einzugsgebietsgrösse

H_0: Nullhypothese

H_1: Alternativhypothese

MeteoCH: Meteo Schweiz

PKD: Proliferative Kidney Disease; proliferative Nierenkrankheit [8]

Q_{347}: «Das Q_{347} bezeichnet denjenigen Abfluss, der im Mittel an 347 Tagen erreicht oder überschritten wird. Die mittlere jährliche Unterschreitungsdauer beträgt folglich 18 Tage.» (zit. [5])

WSP: Wasserspiegel

Formelverzeichnis

Formel 1: Richmannsche Mischungsregel aus [30], [39]. 21

Kurzzusammenfassung

Die Wassertemperatur beeinflusst zahlreiche chemische sowie physikalische Vorgänge in Fliessgewässern und ist ein ökologischer Schlüsselfaktor für die Leitarten Äsche und Bachforelle. Bedingt durch den Klimawandel werden in Zukunft extremere Hitze- und Dürreperioden auftreten, was das Vorkommen der obgenannten kälteliebenden Fischarten im schweizerischen Mittelland in Frage stellt. In den Gewässern Bünz und Wigger wurden in den Jahren 2019 bis 2021 mit Loggern die Wassertemperaturen an zwölf Gewässerstandorten erfasst und kombiniert mit Wetter- und Abflussdaten ausgewertet. Es konnte hier, selbst in ausgeprägten Hitze- und Niedrigwasserperioden, keine Temperaturschichtung in Kolken festgestellt werden. Auch eine stark besonnte Blockrampe von ca. 60 m Länge zeigte keine messbare Erwärmung des Abflusses. Bestätigt wurde, dass die Wassertemperaturen im Fluss-Längsverlauf deutlich heterogen verteilt waren. Im Jahre 2020 wurden an mehreren Standorten kritische Temperaturbereiche überschritten. Aus der Arbeit abgeleitet werden für die wasserbauliche Praxis hauptsächlich die Massnahmen Beschattung, Vernetzung und Konzentration der Niedrigwasserrinne empfohlen.

Schlüsselwörter: Äsche (*thymallus thymallus*); Bachforelle (*salmo trutta fario*); Fliessgewässer; Flussbau; Klimawandel; Wassertemperaturen

Abstract

The water temperature is known to affect many chemical and physical processes in watercourses. Therefore, it’s a very important habitat factor for river trout and grayling. Climate change will lead to more intense heatwaves and droughts, which will endanger the fish species mentioned above in the Swiss midlands. In the rivers Bünz and Wigger water temperature was measured on twelve spots with loggers over the years 2019 to 2021 and plotted afterwards, combined with weather and runoff data. It could be shown that, even in hot periods with low runoff, there was no temperature layering in pools to be measured. Also, a sunny ramp with a length of about 60 m did not rise water temperature. It was proved that water temperatures varied noticeable along the course. In 2020 various loggers had shown critical water temperature levels. In conclusion, it is recommended to focus mostly on the aspects shading, the removal of barriers and a narrow low-flow in river engineering projects.

Keywords: river trout (*salmo trutta fario*); climate change; grayling (*thymallus thymallus*); river engineering; watercourses; water temperatures

1 Einführung

Die gemessenen Wassertemperaturen in schweizerischen Fliessgewässern haben sich im Zeitraum zwischen 1979 und 2018 im Sommer gemittelt um ca. 2.3 °C erhöht. Zudem wurden in den letzten Jahren (2003, 2015 und 2018) an vielen Messstationen neue Temperaturrekorde aufgezeichnet. Bis 2085 werden im schweizerischen Mittelland und Jura, je nach Emissionsszenario, im Sommer weitere Wassertemperaturanstiege von ca. 1.5 bis 5 °C erwartet. Erhöhte Wassertemperaturen können für Wasserlebewesen Stress und Tod bedeuten und den Ausbruch von Krankheiten begünstigen. Gleichzeitig werden sich die Abflussregime verändern, verbunden mit einer substanziellen Abflussabnahme im Sommer (BAFU [6]). Das bei geringeren Abflüssen vergrösserte Verhältnis zwischen Wasseroberfläche und -volumen verstärkt die einwirkenden Temperatureinflüsse (Pfammatter [38]) und wird somit Wassertemperaturextreme begünstigen.

Um auf Veränderungen reagieren zu können, finanziert die Eidgenossenschaft das Pilotprogramm «Anpassungen an den Klimawandel» [34]. Das darin enthaltene Projekt «Wasserbau und Fischerei im (Klima-)Wandel» wird aktuell zusammen mit mehreren Kantonen und dem schweizerischen Fischereiverband umgesetzt. Das Hauptziel ist das Erarbeiten von Lösungsansätzen damit einheimische Fische bei Niedrigwasser und Wärme genügend Lebensräume vorfinden. Im auf den Wasserbau fokussierenden Teilprojekt werden im Kanton Aargau die Aspekte Trockenheit und Wärme untersucht [33], woran die Masterarbeit angegliedert wurde.

Vor diesem Hintergrund ergab sich die Fragestellung der Arbeit: *Mit welchen wasserbaulichen Massnahmen lässt sich die Wassererwärmung in Fliessgewässern besonders in kritischen Niedrigwasser- und Hitzeperioden abmindern bzw. sogar umkehren, um so Habitate für gefährdete aquatische Lebewesen zu erhalten?*

Dazu wurden vom Kanton Aargau erhobene Wassertemperaturdaten ausgewertet und das lokale Temperaturverhalten speziell an Sommer- bzw. Hitzetagen bei Niedrigwasserführung untersucht. Abgeleitet vom bereits zu Beginn der Arbeit vorgegebenen Messkonzept wurde drei Fragen nachgegangen. Ziel der Masterarbeit war, Antworten zu finden ob die untersuchten Gewässerstrukturen, welche wasserbaulich beeinflussbar sind, Temperaturunterschiede bewirken können.

- Führt die 2015 in Betrieb genommene Blockrampe am Abschnitt Wigger Oftringen, welche als kaum beschattet und mit nahezu fehlender Niedrigwasserrinne bezeichnet werden kann, insbesondere in Niedrigwasser- und Hitzeperioden, zu einer messbaren Erwärmung des Abflusses?
- Ist innerhalb des Wasserkörpers in Pools während Niedrigwasser- und Hitzeperioden eine Temperaturschichtung messbar?

- Sind im Abschnitt Wigger Brittnau in einer mit vergleichsweise viel Totholz ergänzten Gewässerstrecke (zusätzlich zu Blockverbauungen) im Vergleich zu einer fast nur mit Blöcken verbauten Gewässerstrecke (bei nahezu gleichem Beschattungs- und Blockverbauungsgrad) unterschiedliche Wassertemperaturen messbar? Dieser Frage konnte infolge von Datenausfällen nicht nachgegangen werden.

Es wurden die folgenden Hypothesen aufgestellt und mittels t-Test für gepaarte Differenzen, bei Signifikanzniveau α = 1 % geprüft:

- Hypothesen 1 und 2: An Sommertagen / Hitzetagen mit Niedrigwasserabfluss ist die maximale Wassertemperatur unterhalb der Blockrampe Wigger Oftringen im Vergleich zur maximalen Wassertemperatur oberhalb Blockrampe erhöht bzw. die Wassertemperatur schwankt unterhalb der Blockrampe stärker über den Tag.
- Hypothesen 3 und 4: An Sommertagen / Hitzetagen mit Niedrigwasserabfluss ist die maximale Wassertemperatur im Flusskörper höher im Vergleich zur maximalen Wassertemperatur an der Sohle bzw. die Wassertemperatur schwankt im Flusskörper stärker über den Tag.
- Hypothesen 5 und 6: An Sommertagen / Hitzetagen mit Niedrigwasserabfluss ist die maximale Wassertemperatur auf der Wasseroberfläche höher im Vergleich zur maximalen Wassertemperatur an der Sohle bzw. die Wassertemperatur schwankt auf der Oberfläche stärker über den Tag.

Die Arbeit geht zuerst auf physikalische Eigenschaften des Wassers und die Bedeutung der Wassertemperatur für aquatische Biozönosen ein. Danach werden natürliche Temperaturregime in Fliessgewässern und verschiedene Einflüsse auf Wassertemperaturen inklusive Klimawandel aus der Literatur vorgestellt. Im Kapitel Material und Methoden wird das gewählte Vorgehen bei den Messungen, Auswertungen und Hypothesentests erläutert. Die Ergebnisse stellen die Temperaturauswertungen für beide Fliessgewässer im Jahresgang 2020 als Ganzes sowie detaillierter in Sommerperioden vor. Der Vergleich der gemessenen Wassertemperaturen mit Schwellen- und Erwartungswerten der unteren kollinen Forellenregion zeigt wie die Werte aus fischökologischer Sicht einzuordnen sind. Anhand von Längenprofilen wird das Temperaturverhalten im Flusslängsverlauf an einem Hitzetag mit möglichen Ursachen vorgestellt. Die Hypothesentests zeigen die Grössenordnung von lokal messbaren Temperaturunterschieden. Die Ergebnisse und mögliche Ursachen werden mit Bezug auf bestehende Literatur diskutiert und auf die, soweit bekannt, zugrundeliegenden Umweltbedingungen eingegrenzt. Zudem wird das Literaturstudium, Ergebnisse und Diskussion zu wasserbaulich umsetzbaren Empfehlungen verknüpft.

2 Literaturrecherche

2.1 Physikalische Eigenschaften von Wasser

Wasser hat zahlreiche physikalische Eigenschaften, wovon hier nur zwei erläutert werden.

Die *spezifische Wärme* beschreibt die Energiemenge, die benötigt wird, um 1 kg eines Stoffes um 1 °C zu erwärmen. Wasser besitzt eine hohe spezifische Wärme von 4,186 kJ für die Erwärmung von 14,5 auf 15,5 °C. Dadurch hat Wasser ein hohes Puffervermögen gegenüber Lufttemperaturschwankungen über den Tag und das Jahr. In der Folge sind aquatische Lebensräume weniger hohen Schwankungen ausgesetzt als terrestrische [24].

Durch Wärmeleitung nehmen mit der Zeit alle Stellen eines Körpers die gleiche Temperatur an. Dabei wird von energiereicheren Molekülen durch Bewegung Energie auf die umliegenden energieärmeren Moleküle verteilt [30].

Die *Wärmeleitfähigkeit* beschreibt die stoffspezifische Fähigkeit Wärme zu transportieren. Sie ist definiert als Wärmemenge, die pro Sekunde einen Würfel mit 1 cm Würfelkantenlängen durchströmt. Für Wasser bezeichnend ist eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit von 0.569 W / m * K. Dies bedeutet, dass der molekulare Wärmeaustausch vernachlässigbar ist, wodurch Temperaturschichtungen in Gewässern möglich werden. Wärmespeicherung wird gefördert. Wärmetransporte im Wasser erfolgen nahezu ausnahmslos durch Wasserbewegungen bzw. Turbulenz [24].

2.2 Wassertemperaturen in Fliessgewässern

2.2.1 Die Bedeutung der Wassertemperatur

Die Wassertemperatur ist eine der zentralsten ökologischen Faktoren und ein wichtiges Qualitätsmerkmal in Gewässerökosystemen. Sie verändert die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Wassers sowie die Löslichkeit der darin enthaltenen Gase [24], [38]. Der Stoffwechsel von wechselwarmen Wasserorganismen und damit Atmung, Verdauung, Wachstum, Aktivität, Fortpflanzung und vieles mehr hängen wesentlich von der Temperatur des umgebenden Wassers ab [24]. Die Präferenzen und Toleranzen gegenüber der Wassertemperatur entscheiden über das Vorkommen oder Fehlen von Arten in Fliessgewässern oder Fliessgewässerabschnitten [7], [9], [26]. Sie beeinflusst somit die Entwicklung, Zusammensetzung und Verteilung von Gewässerbiozönosen [24].

Da sich die Löslichkeit von Gasen bei ansteigenden Wassertemperaturen reduziert, enthält wärmeres Wasser weniger gelösten Sauerstoff als kälteres. Die durch Assimilation, Respiration und Abbauprozesse beeinflusste Sauerstoffsättigung befindet sich in natürlichen Gewässern selten im Gleichgewicht, sondern weicht meist gegen unten oder oben davon ab. Neben der Abnahme von verfügbarem Sauerstoff bei erhöhten Wassertemperaturen erhöht sich parallel auch der Sauerstoffbedarf von wechselwarmen Organismen. Höhere Wassertemperaturen wirken für Salmoniden mit hohem Sauerstoffbedarf limitierend, wofür indirekt die ungenügende Sauerstoffversorgung verantwortlich ist [24].

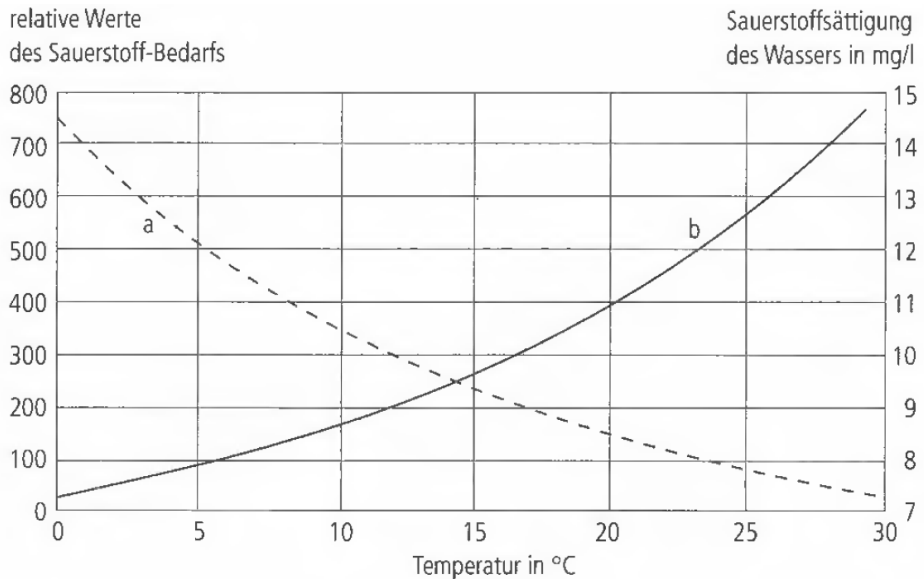


Abb. 2-1: Der Sauerstoffbedarf von Wasserorganismen (Kurve b) und der temperaturbedingte Wert der Sauerstoffsättigung des Wassers (Kurve a). Unverändert aus [24]

Für aquatische Biozönosen haben ungünstige Temperaturverhältnisse in Fliessgewässern negative Auswirkungen bis hin zum Tod zur Folge. Fische sind wechselwarm, weshalb ihre Körpertemperatur direkt mit der Wassertemperatur zusammenhängt. Mit höherer Temperatur steigen die Aktivität und der Stoffwechsel, was bei zu hohen Temperaturen dazu führt, dass sie ihren Energiebedarf nicht mehr decken können [26].

Fische zeigen Temperaturpräferenzen. Im Sommer sind hohe Temperaturen für wärmeliebende Fischarten von Vorteil (zu Ungunsten der Salmoniden). Der Anpassung der Fische an Wassertemperaturen sind allerdings Grenzen gesetzt [26]. Die Temperatur legt Habitatgrenzen fest. Langanhaltende Abweichungen von den Temperaturpräferenzen aquatischer Lebewesen führt zu Veränderungen der Artzusammensetzung [22].

Höhere Wassertemperaturen führen zudem zu einer Verbreitung von temperaturbedingten Krankheiten. Bei Bachforellen führt das Vorhandensein des Erregers von PKD (proliferative kidney disease) und ein Überschreiten der Wassertemperaturgrenze von mittleren Tagestemperaturen über 15 °C ab zwei bis vier Wochen zu einer hohen Mortalität [8], [22]. Sommerliche Erwärmung über die Toleranzbereiche kann die Bachforelle zum Verschwinden bringen [24].

Wie in der nachfolgenden Tab. 2-1 ersichtlich sind die Präferenztemperaturen je nach Art und Altersstadium (hier für Äschen und Forellen dargestellt) unterschiedlich. Es wird sowohl für Äschen wie auch Bachforellen die obere kritische Temperaturgrenze von 25 °C genannt [26]. Die für Fische tolerierbare Temperatur ist aber zudem abhängig von der Expositionsdauer und der Akklimatisationstemperatur. So können juvenile Salmoniden bei einer Expositionszeit von einer Minute Temperaturen von ca. 28 °C, bei einer Expositionszeit von zehn Minuten Temperaturen von ca. 27 °C und bei einer Expositionszeit von einer Stunde Temperaturen von ca. 25 °C ertragen [39].

Die Bedeutung der Erhaltung von möglichst naturnahen Temperaturregimen in Fliessgewässern schlägt sich in der schweizerischen Gesetzgebung nieder [4], [16].

Tab. 2-1: Optimal- und Extrembereiche hinsichtlich Wassertemperaturen der Fischarten Bachforelle und Äsche. Literaturwerte unverändert aus [26]

		Bachforelle (Salmo trutta fario) [°C]	Äsche (thymallus thymallus) [°C]
Eier	Maximum	14	16
	Oberes Optimum	9	14
	Unteres Optimum	1	7
	Minimum	0	0
Juvenile	Maximum	28	k. A.
	Oberes Optimum	14	k. A.
	Unteres Optimum	7	k. A.
	Minimum	0	k. A.
Adulte	Maximum	30	26
	Oberes Optimum	19	18
	Unteres Optimum	4	4
	Minimum	0	0

Während die Präferenzen für Leitfischarten (z.B. Bachforelle und Äsche) gut bekannt sind, sind die Kenntnisse für viele weitere Arten dieser Lebensräume ungenügend. Die Leitfischarten mit ihren Ansprüchen an die Umgebung können aber als stellvertretend für die ganze Biozönose angesehen werden [32].

Natürlicherweise waren nach den Eiszeiten sämtliche Fliessgewässer, ausser den sehr breiten, ausserhalb von Feuchtgebieten und unterhalb der Waldgrenze (mit Ausnahme von Waldbrand- und Windwurfflächen) bewaldet und damit stark beschattet. Die darin lebenden Biozönosen waren und sind daher mehrheitlich kühle Gewässer gewohnt und an die entsprechenden chemisch-physikalischen Verhältnisse angepasst [10].

In [7] wurde erkannt, dass Beschattungsgrade von 20 bis 40 % ausreichen, damit die letalen Temperaturgrenzwerte für Forellen nicht überschritten werden. Allerdings wird eine Beschattung von 80 % empfohlen, damit die Forellenentwicklung optimal verlaufen kann (hier definiert als Temperaturbereich zwischen 4 bis 19 °C). Vermutet wird, dass noch stärkere Beschattungen nötig sein werden (> 80 %), um temperaturempfindliche Arten vor dem Klimawandel zu schützen.

In [10], [31] und [40] wurden Beschattungsempfehlungen erarbeitet, auf welche in Kapitel 5.2 noch eingegangen wird.

2.2.2 Das natürliche Temperaturregime in Fliessgewässern

In den als sommerkalt und winterwarm bezeichneten Quellgewässern entspricht die Wassertemperatur an der Quelle in etwa der übers Jahr gemittelten Lufttemperatur am jeweiligen Ort. Mit steigender Entfernung vom Oberlauf nehmen im Sommer die Wassertemperatur und die täglichen Schwankungen generell zu. Im Winter ist dagegen ab der Quelle abwärts häufig eine Abkühlung messbar [24]. Die sommerliche Erwärmung flussabwärts verlangsamt sich mit zunehmender Entfernung vom Oberlauf und damit zunehmender Breite des Gewässers [9]. Während im Längsverlauf Temperaturveränderungen auftreten, ist die Wassertemperatur im Querschnitt in unverzweigten Gerinnen homogen verteilt. In strukturreichen Gerinnen mit Altarmen und Flachufern sind hingegen Unterschiede auch im Querprofil messbar, wobei diese bei kleinen Abflüssen am grössten sind [24].

Das Jahrestemperaturregime in Fliessgewässern weist einen sinusförmigen Verlauf (Jahresgang) auf. Dieser folgt um einige Wochen verzögert der mittleren Lufttemperatur vor Ort [22]. Die Wassertemperaturmaxima treten in den Sommermonaten (Juni bis September) auf, die Wassertemperaturminima in den Wintermonaten (um den Jahreswechsel) [4].

Der Jahresgang wird von Tagesschwankungen (dem Tagesgang) überlagert. Diese Schwankungen nehmen bei kleinen quellbeeinflussten Fliessgewässern bachabwärts mit zunehmender Breite und abnehmendem Einfluss der Ufergehölze zuerst zu. Die natürlichen sommerlichen Tagesamplituden können im Mittellauf bis zu 10 °C erreichen. In den Unterläufen und den damit zunehmenden Wassertiefen und -Volumina schwanken die Wassertemperaturen über den Tag wieder geringer (häufig weniger als 1 °C pro Tag) [24]. Die Tagesminimaltemperaturen treten frühmorgens auf, die Tagesmaximaltemperaturen spätnachmittags bis abends [32].

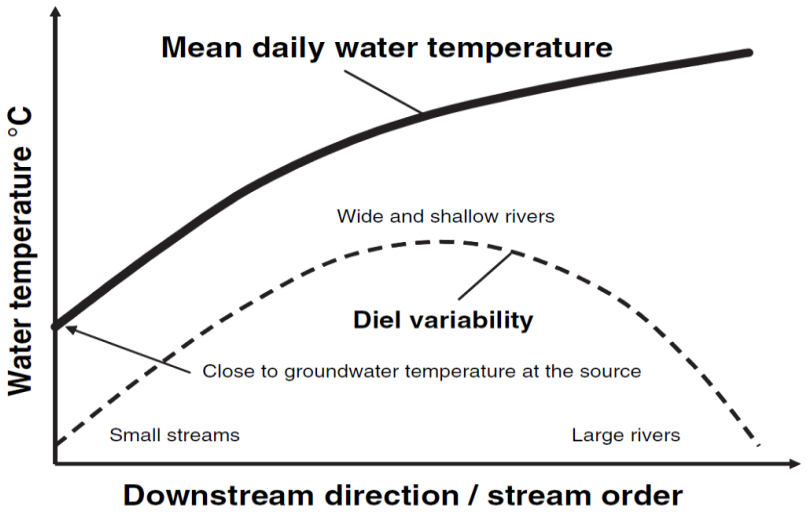


Abb. 2-2: Mittlere tägliche Wassertemperaturen und Wassertemperaturschwankungen in Abhängigkeit der Fliessdistanz und Gewässergrösse. Unverändert aus [9]

Während im Winter ein Fluss und ein Bach im langjährigen Vergleich ähnliche Temperaturen aufwiesen, konnte in [9] gezeigt werden, dass der Bach im Sommer jeweils über 5 °C kühler war.

Müller erarbeitete in [32] über Sinusregressionen typische Temperaturbänder für die in der Schweiz vorkommenden biozönotischen Regionen, abgestuft nach geobotanischen Höhenstufen. Die Temperaturbänder basieren auf gemessenen Wassertemperaturen (Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte) ab Anfang 1990 (d.h. nach dem irreversiblen Sprung 1987 / 1988, auf welchen im Kapitel 2.2.4 noch eingegangen wird) bis Ende 2010 von «unbeeinflussten» (ohne Wasserkraftnutzung und thermische Einleitungen) schweizerischen Fliessgewässern.

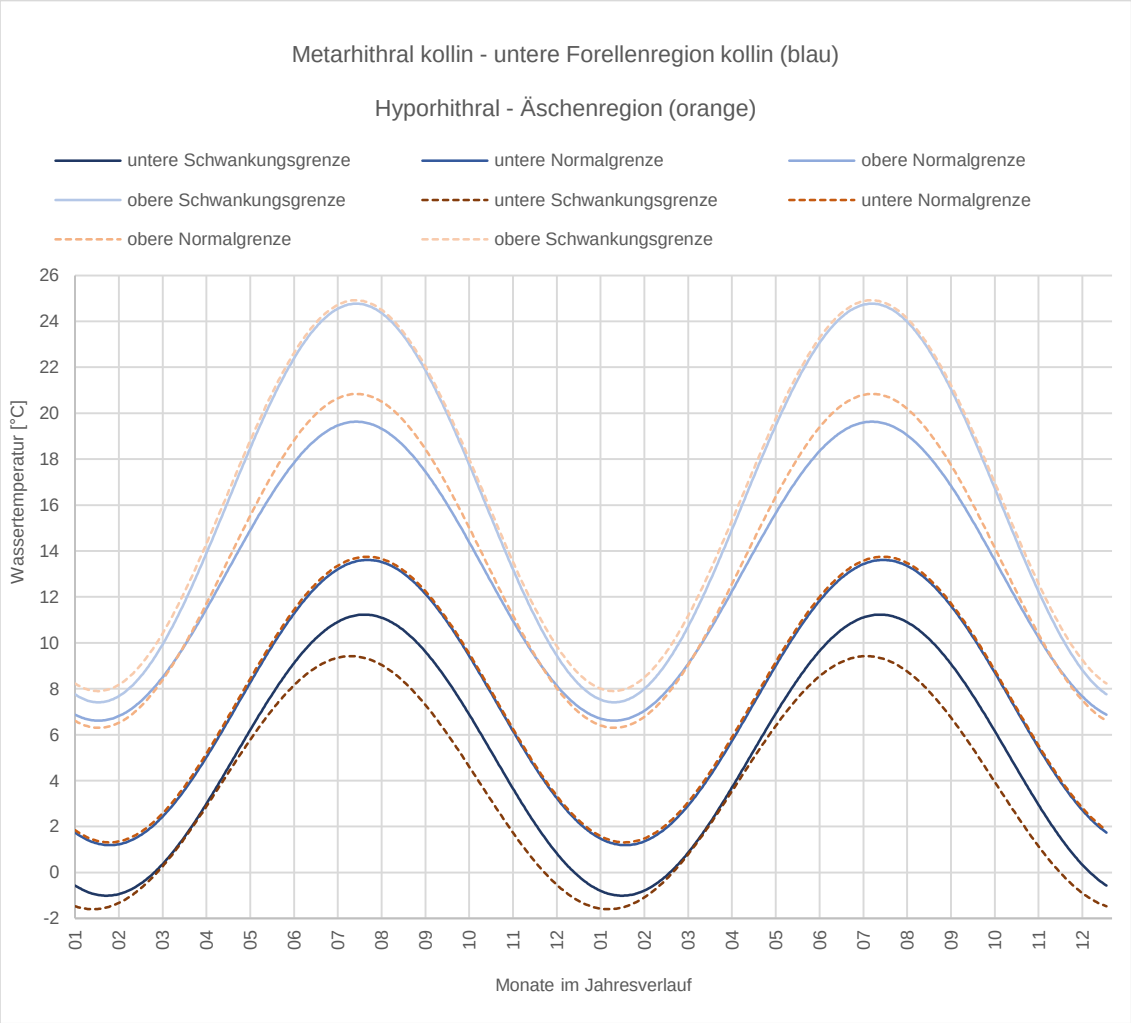


Abb. 2-3: Typische Temperaturbänder für die untere Forellenregion (auf kolliner Höhenstufe) und die Äschenregion, aufbereitet und dargestellt nach [32]

Die Wassertemperaturen in Fliessgewässern sind im Gegensatz zu Seen deutlich homogener verteilt. Die für Seen typische Schichtung wird durch Wasserbewegungen verhindert. Erst ab Fliesstiefen zwischen 10 – 15 m mit geringer Turbulenz sind Temperaturunterschiede zwischen der Gewässersohle und -oberfläche zu finden. Die Temperaturextreme über das Jahr und den Tag sind durch die hohe spezifische Wärme des Wassers geringer als bei der Lufttemperatur [24].

Allerdings konnte in [11] gezeigt werden, dass in «Dürrejahren» eine Temperaturschichtung in weit weniger tiefen Pools (< 1.65 m) in Form einer Temperaturabnahme mit zunehmendem Abstand von der Wasseroberfläche messbar ist. Auf diese Studie wird nachfolgend im Kapitel 2.2.5 noch näher eingegangen.

Grossräumig (Klima) werden die Wassertemperaturen natürlicherweise beeinflusst durch Niederschlag, Verdunstung, Kondensation, Luftfeuchtigkeit, Ein- / Ausstrahlung, Windgeschwindigkeit sowie Austauschprozesse mit dem Untergrund und der Luft [9], [22]. Kleinräumigere Einflussfaktoren sind die Wasserherkunft (z.B. Quell-, Schmelz-, Grundwasser und Zuflüsse), Höhenlage, Exposition, Wasserführung, Gewässermorphologie und die Beschattung [4].

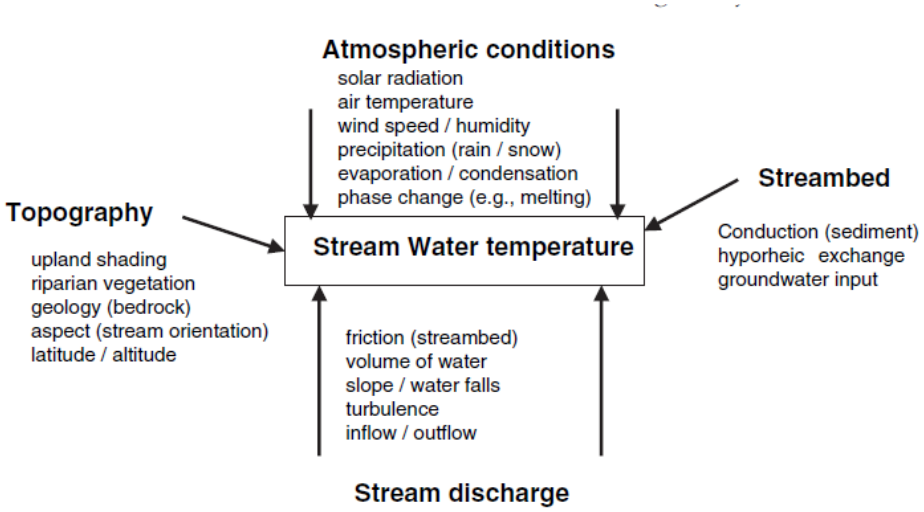


Abb. 2-4: Einflussfaktoren auf das Temperaturregime in Flüssen. Unverändert aus [9]

2.2.3 Auswahl von Einflüssen auf die Wassertemperatur in Fliessgewässern

Als die hauptsächlichsten Einflüsse auf die Wassertemperatur werden generell die Lufttemperatur und damit die geographische Höhe [32] sowie lokal die Einstrahlungsverhältnisse bzw. Beschattung angegeben [38]. In [9] werden vor allem die atmosphärischen Verhältnisse und die Topographie als am wesentlichsten angegeben. In [31] wird die Sonneneinstrahlung als der bedeutendste Treiber der Gewässererwärmung genannt. In [38] die Evaporation und Konvektion als wichtigste Einflüsse der Gewässerabkühlung. Generell ist die Lufttemperatur ein besonders guter Prädiktor der Wassertemperatur [7]. Die Bedeutung aller Einflüsse variieren von Fliessgewässer zu Fliessgewässer [38].

Die Wassertemperatur wird durch die in Abb. 2-5 dargestellten Energieflüsse beeinflusst (wobei der Wasseraustausch z.B. mit dem Grundwasser in der Abbildung vernachlässigt wird) [14]:

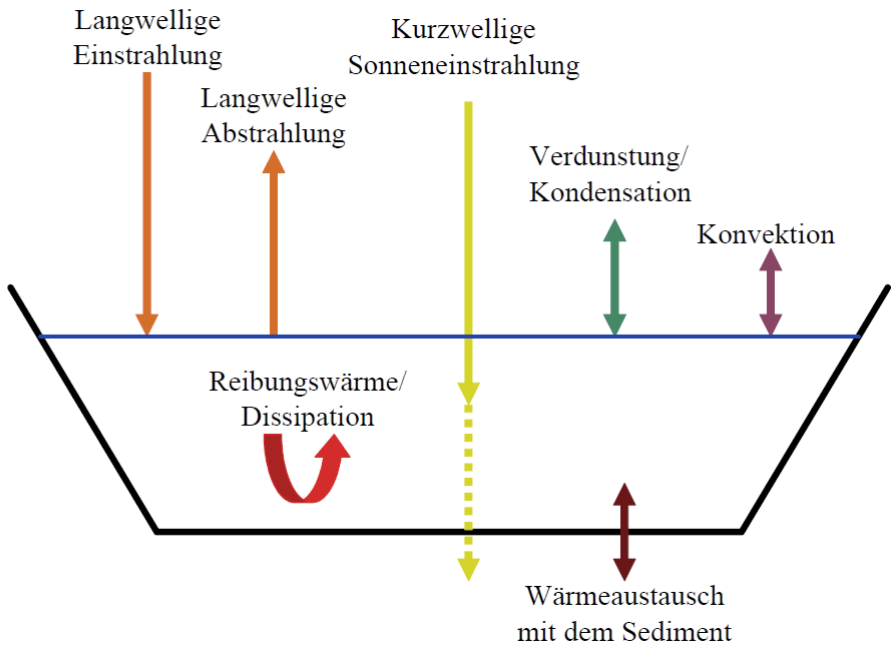


Abb. 2-5: Die Wassertemperatur beeinflussende Energieflüsse. Unverändert aus [14]

Von den vielen in Fliessgewässern vorkommenden, temperaturrelevanten Faktoren werden nachfolgend eine auf die Arbeit bezogene, nicht abschliessende Auswahl von Einflüssen erläutert. Sie kommen kaum einzeln vor, sondern überlagern sich. Eine Abgrenzung ist aus Sicht des Verfassers schwierig. Auf gewisse Einflüsse wie Gletschereffekte, Seeausflüsse, Karstgewässer, Thermalgewässer, Kühlwasser und weitere wird bewusst verzichtet:

- *Veränderte Landnutzung:* Während die Sonneneinstrahlung auf trockenen Oberflächen (z.B. versiegelten oder drainierten Flächen) vor allem zur Bildung von Wärme führt, wird bei feuchten Oberflächen oder Gewässern ein Grossteil der Sonnenenergie in Verdunstungskälte umgewandelt, welche erst später oder an einer anderen Stelle wieder abgegeben wird [40].

- *Die veränderte Nutzung der Wälder*: Laubwälder kühlen mit Unterschieden bis zu 10 °C der Lufttagesmaxima die Landschaft markant ausgeprägter als Nadelwälder. Damit beeinflussen Wälder über die Lufttemperatur die Wassertemperatur in Fliessgewässern. Ufergehölze und Wald senken die Lufttemperatur am Tag (im Schnitt ist die maximale Lufttemperatur im Wald an Sommertagen bis zu 4 °C geringer als ausserhalb). Im Winter und in der Nacht wird dieser Effekt umgekehrt (bis zu 1 °C wärmer als ausserhalb). In Kahlschlaggebieten konnten im Vergleich zwischen vor und nach der Rodung bis 13 °C veränderte Wassertemperaturen in Fliessgewässern nachgewiesen werden [40].

- Fehlende *Beschattung* durch Ufergehölze: In [31] wurde mittels Modellierungen eine vollständig beschattete Fliessstrecke mit der gleichen Strecke ohne Beschattung der Orbe verglichen. Dabei wurde im Sommer eine Abnahme der maximalen Wassertemperatur von rund 4 °C bei Niedrigwasserabfluss auf einer Strecke von 800 m durch vollständige Beschattung errechnet. Wobei die Temperatur in der Folge allerdings bei fehlender Beschattung innerhalb weniger Kilometer wieder das ursprüngliche Niveau annahm. Auch [40] nennt deutliche Wassertemperaturzunahmen durch fehlende oder ungenügende Beschattung infolge entfernter Ufervegetation. Ufergehölze haben eine auf die Wassertemperatur kühlende und dämpfende Wirkung, was auf die Faktoren Wind, Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung zurückzuführen ist. In [40] werden Temperaturverläufe von beschatteten und unbeschatteten Pools im Sommer 2006 in Südengland gegenübergestellt. Während in den beschatteten Pools die Wassertemperatur um maximal ca. 5 °C schwankte, wurden in den unbeschatteten Pools Tagesamplituden von bis zu 15 °C gemessen. Die Wassertemperatur-Tagesmaxima der beschatteten Pools waren bei ca. 22 °C erreicht, wogegen diese in den unbeschatteten Pools vereinzelt sogar 30 °C überschritten.

- *Wetterlagen* können kurzfristig grosse Veränderungen der Wassertemperatur erzeugen. Im Sommer führt eine Schlechtwetterlage zu Abkühlung, da einerseits kühleres Niederschlagswasser ins Gewässer eingetragen wird und sich andererseits die Erwärmung durch geringere Einstrahlung abmindert. Im Winter führt eine Schlechtwetterlage hingegen zu einer Erwärmung des Gewässers [22].

- Grössere *Zuflüsse* können zu erheblichen Temperatursprüngen im Vorfluter führen [24].

- Hohes *Gefälle und Rauheit* führt durch Reibung zu einer Erwärmung, die insbesondere in steilen Gerinnen im Winter bei Niedrigwasserabflüssen auffallend sein kann [22]. Mit Ausnahme der alpinen Fliessgewässer kann die Reibung betreffend Einfluss auf die Wassertemperaturen aber vernachlässigt werden [14].

- Überbreite *Niedrigwasserrinnen* in Fliessgewässern *(*z.B. durch Querbauwerke erzeugt) können durch geringere Wassertiefen und Fliessgeschwindigkeiten zu einer erhöhten Gewässererwärmung führen. Auf Empfehlungen wird im Kapitel 5.2 eingegangen [40].

- *Begradigungen*: Durch die schnelleren Fliessgeschwindigkeiten (erhöhtes Gefälle) reduziert sich der Wärmeaustausch mit der Umgebung. Daraus resultieren ausgeglichenere Temperaturverläufe [32].
- *Eindolungen* sind vollständig beschattete Fliessgewässerabschnitte ohne Windeinflüsse. Die Wassertemperatur hängt stark von der Temperatur des angrenzenden Erdreiches ab. In einer 500 m langen Eindolung im Landwirtschaftsland konnte eine Abkühlung um 3.3 °C gemessen werden. Wohingegen die eingedolten Zuflüsse im Siedlungsgebiet zu einer leichten Erwärmung der untersuchten Fliessgewässer führten [40].
- *Grundwasser*: Die Temperatur des Grundwassers entspricht ungefähr der mittleren Jahreslufttemperatur vor Ort und schwankt gering. Daher führen Grundwassereinträge in Fliessgewässer zu einer Glättung der Temperaturamplituden sowohl im Jahresgang wie auch den kurzfristigen Temperaturschwankungen. Die kurzfristige Dämpfung ist vor allem im Winter bei Niedrigwasser auffallend [22]. Absinkende Grundwasserspiegel führen zu ausgeprägteren Niedrigwasserperioden. Die Kolmatierung der Fliessgewässersohlen vermindert zudem den Austausch mit dem Grundwasser. Die Temperaturunterschiede des Grundwassers schwanken im schweizerischen Mittelland übers Jahr zwischen 7 bis 10 °C. Zugeführtes Grundwasser und / oder Quellwasser senkt im Sommer und steigert im Winter die Temperatur in Fliessgewässern [40].
- *Stauhaltungen*: Im Stauraum kann sich eine Temperaturschichtung einstellen [38]. Die durch die vergrösserte Wasseroberfläche und Aufenthaltszeit erhöhte Gewässererwärmung der oberen Schichten hat dabei kaum Einfluss auf die tieferen Bereiche [32]. Die Wiedereinleitung von turbiniertem Wasser aus den unteren kühleren Schichten (häufig 4 °C) hat einen übers Jahr dämpfenden Effekt auf die anschliessenden Fliessgewässerabschnitte. Im Winter findet eine Erwärmung statt, im Sommer eine Abkühlung [38], [32]. An der Rhone konnte im Winter eine Erwärmung von 2 °C und im Sommer eine Abkühlung von 1 °C nachgewiesen werden [22]. Durch die Wasserentnahme erhöht sich die Temperaturschwankung in den Restwasserstrecken, da das verbleibende Wasser infolge grösseren Verhältnisses zwischen Gewässeroberfläche und -volumen stärker auf die Energieflüsse reagiert. Damit ist insbesondere tagsüber im Sommer eine Gewässererwärmung verbunden [38], [4]. Flusskraftwerke haben einen Einfluss auf den Temperatur-Tagesgang, nicht auf den Jahresgang [32].
- Das *Sediment* hat meist eine dämpfende Wirkung auf die Wassertemperatur, da es am Tag Wärme aufnimmt und in der Nacht wieder abgibt [14]. Dasselbe gilt im Jahresverlauf (Wassererwärmung im Winter, -Abkühlung im Sommer) [31].
- *Abwasserreinigungsanlagen (ARA)*: Das hier eingeleitete Wasser führt generell zu einer Erwärmung des Vorfluters. Es konnte aber auch gezeigt werden, dass zum Zeitpunkt der Maximaltemperaturen das eingeleitete Wasser die Spitze dämpfen kann [40].

- *Wasserbauliche Baustoffe*: In [41] wurden in identischen Wasserbecken die Temperatureigenschaften von Natursteinblöcken und Totholz untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass im Wasser liegendes Totholz die Gewässererwärmung abmindern kann. Die Temperatur in den Becken mit Blöcken verhielt sich vergleichbar zu dieser in den nur mit Wasser gefüllten Becken, während sie in den Becken mit Totholz weniger hoch anstieg. Die Becken waren dabei der vollen Sonneneinstrahlung ausgesetzt.
- *Regenwassereinleitungen aus Misch- und Trennwassersystemen* können zu einer Erwärmung des Wassers in Bächen führen, da die Temperatur des Regenwassers aufgrund der Herkunft von versiegelten Flächen im Sommer höher ist als das Wasser im kleinen Fliessgewässer. So kann das Verhältnis von Einleitmenge zum Fliessgewässervolumen hier relevante Mengen annehmen kann [22]. Die fortschreitende Versiegelung führt auch dazu, dass das Regenwasser den Vorfluter schneller erreicht. Unter normalen Bedingungen wird beim «Worstcase» (ohne Abkühlung in der Leitung) bei einem sommerlichen Regenereignis von 2-jährlicher Überschreitungswahrscheinlichkeit und einer Stunde Dauer die Temperaturgrenze von 22 °C nicht überschritten [39]. Unter sehr seltenen Umständen, wie zum Beispiel im Hitzesommer 2003, kann der Oberflächenabfluss von asphaltierten Flächen Temperaturen von bis zu 29 °C erreichen. Dabei wurden voll besonnte Asphaltflächen untersucht, die direkt neben einem Fliessgewässer liegen [39]. Abhängig von der eingeleiteten Menge und Temperaturdifferenz ergibt sich nach erfolgter Durchmischung eine Gewässererwärmung oder -abkühlung [4] (auch in Formel 1 sichtbar).
- *Chemische und biologische Prozesse* können die Wassertemperatur in Fliessgewässern ebenfalls leicht erwärmen. Gegenüber der Sonneneinstrahlung sind diese Einflüsse aber eher vernachlässigbar [31].

Generell führen geringere Abflussvolumina dazu, dass die Wassertemperatur in Fliessgewässern stärker auf die einwirkenden Energieflüsse reagiert [31], [38]. Dies kann sich beispielsweise in einer rascheren Abkühlung bei Beschattung aber auch einer schnelleren Erwärmung ohne Beschattung zeigen [31]. Durch gesunkenes Retentionsvermögen der Landschaft hat der Basisabfluss in Fliessgewässern generell abgenommen [40].

2.2.4 Ausgewählte Einflüsse des Klimawandels auf Fliessgewässer

Aufgrund der Aufgabenstellung wird dem Klimawandel ein eigenes Kapitel gewidmet, obwohl er zu den Einflüssen auf Fliessgewässer gezählt werden kann, die in Kapitel 2.2.3 erläutert sind.

Seit Messbeginn vor rund 150 Jahren haben sich die übers Jahr gemittelten *Lufttemperaturen* in der Schweiz um knapp 2 °C erhöht, wobei sich die Erwärmung seit den 1980er-Jahren beschleunigt hat. In den letzten zwei Jahrzehnten häuften sich warme Jahre (neun der zehn wärmsten Jahre wurden nach 2000 festgestellt) und die Anzahl Hitzetage mit Tagestemperaturen über 30 °C nahmen merklich zu. Je nach Klimaszenario wird ein weiterer unterschiedlich ausgeprägter Jahresmitteltemperatur-Anstieg bis Ende des Jahrhunderts von 0.6 - 5.4 °C erwartet [6]. «Besonders stark nehmen die Höchsttemperaturen im Sommer zu. Hitzewellen und heisse Tage und Nächte werden nicht nur extremer, sondern treten auch deutlich häufiger auf» (zit. [6]).

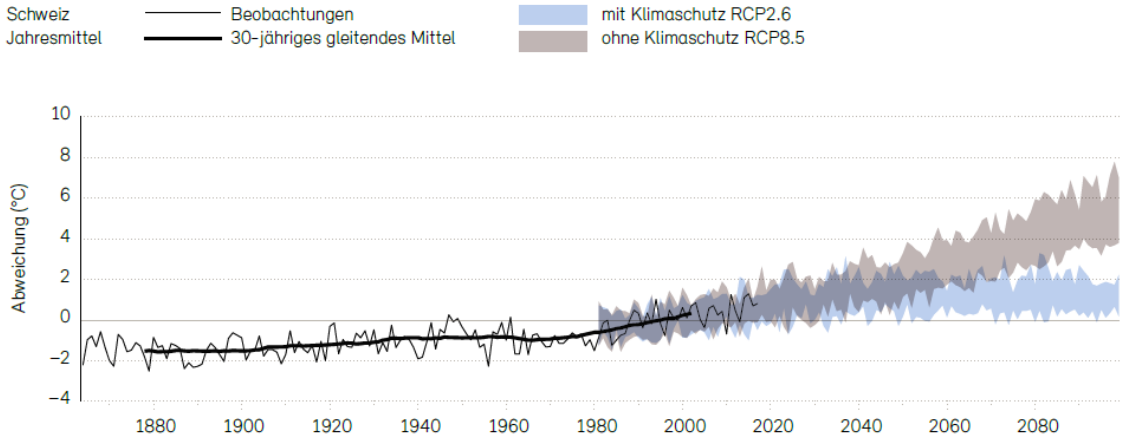


Abb. 2-6: Entwicklung der beobachteten und erwarteten mittleren jährlichen Lufttemperatur. Unverändert aus [6]

Die *Niederschläge* in der Schweiz haben sich seit Messbeginn in Bezug auf die Jahres- und Saisonmengen nicht signifikant verändert, allerdings traten in den letzten 100 Jahren zunehmend häufiger Starkniederschläge auf. Auch in Zukunft werden kaum Veränderungen der Jahresniederschläge erwartet, jedoch bis 2085 eine Reduktion der mittleren Sommerniederschläge um bis zu 20 %. Ohne Klimaschutz wird mit häufigeren und längeren Trockenphasen im Sommer gerechnet [6].

Im Jura und im Mittelland wird eine Verschiebung zu einem bisher in der Schweiz nicht gekannten Abflussregimetyp - «pluvial de transition» genannt - prognostiziert. Diese fast nur durch Regenwasser gespiesenen Gewässer werden ihr Abflussminimum im Hochsommer (August) finden, wobei diese häufig mit den Hitzeperioden zusammenfallen werden. Extremere Niedrigwasserführung wird die Folge sein [5].

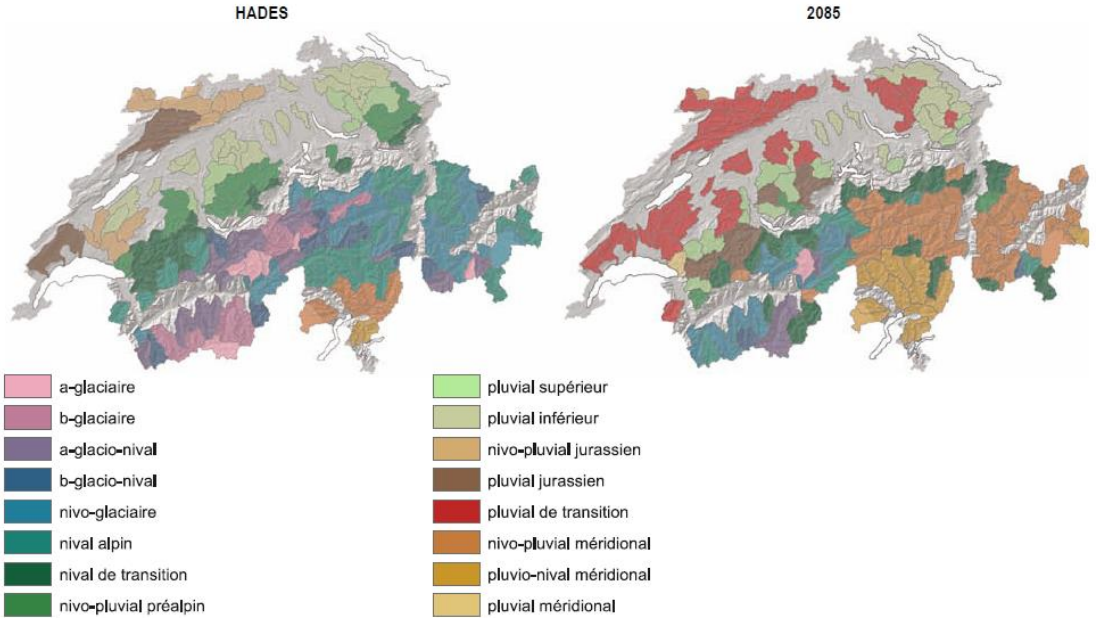


Abb. 2-7: Bisherige Regimetypen für die Periode 1950 – 1980 und Prognose der künftigen Regimetypen um 2085. Rot dargestellt der neue Regimetyp «pluvial de transition». Unverändert aus [5]

Die gemessenen *Wassertemperaturen* in schweizerischen Fliessgewässern haben sich im Zeitraum zwischen 1979 und 2018 gemittelt um ca. 1.3 °C erhöht, im Sommer um ca. 2.3 °C. Der jährliche Anstieg entspricht dabei ca. 90 % des Lufttemperaturanstiegs im gleichen Zeitraum. In den Jahren 2003, 2015 und 2018 wurden an vielen Messstationen neue Temperaturrekorde aufgezeichnet, an manchen Gewässern mit Werten deutlich über 25 °C. Bis 2085 werden im schweizerischen Mittelland und Jura, je nach Emissionsszenario, weitere Wassertemperaturanstiege von übers Jahr gemittelt ca. 1 bis 3 °C und im Sommer ca. 1.5 bis 5 °C erwartet [6].

Ein sprunghafter Anstieg der Wassertemperaturen wurde von 1987 auf 1988 festgestellt [23]. Nach 1988 lagen alle gemittelten Jahrestemperaturen über dem Durchschnitt der Periode 1961 bis 1990 [5]. Das parallele Ansteigen von regionalen Luft- und Wassertemperaturen mit dem merklichen Sprung um 1987 / 1988 deutet darauf hin, dass für die höheren Wassertemperaturen der Klimawandel verantwortlich ist (andere Einflüsse auf die Wassertemperatur zeigen diesen Sprung nicht) [32].

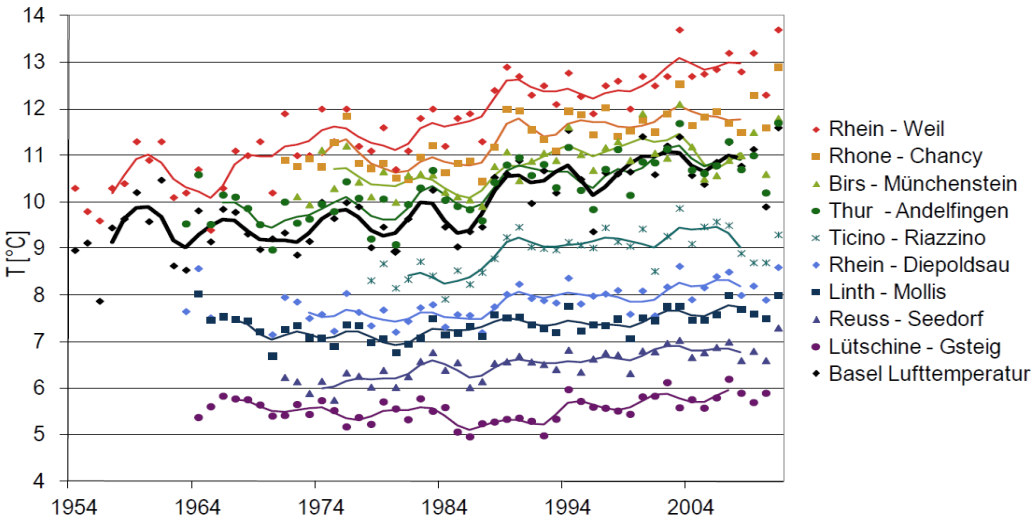


Abb. 2-8: Gemessene Wassertemperaturen an neun ausgesuchten Stationen sowie die gemessene Lufttemperatur in Basel als Vergleich. Unverändert aus [5]

In den nicht durch Gletscher beeinflussten Bächen und Flüssen des Mittellandes wurde im Sommer eine deutliche oder signifikante Abnahme der *Niedrigwasserabflüsse* seit 1961 festgestellt. In den vergangenen 20 Jahren wurden bezüglich Niedrigwasserführung neue Rekordwerte gemessen (z.B. 2003, 2015 und 2018). Durch die längeren Trockenperioden wird im Schweizer Mittelland im Sommer und Herbst bis 2085 eine weitere Reduktion der Niedrigwassermengen Q_{347} erwartet [6].

Ein genereller Anstieg der Wassertemperaturen schadet den Salmoniden. Ihre Konkurrenzfähigkeit und Lebensräume gehen verloren. Besser angepasste Arten wandern an ihrer statt ein. Die globale Klimaerwärmung droht unabhängig von lokalen Unterschieden die Salmoniden vor vermehrte Probleme zu stellen [26].

Die bisherige Wassertemperatursteigerung in den letzten 25 Jahren wird mit einer Vorverschiebung des Schlüpfzeitpunkts der Bachforelleneier und einer Anhebung des Bachforellenhabitats um rund 130 m nach oben in Verbindung gebracht. Durch die häufigeren Zeitperioden mit höheren Wassertemperaturen als 15 °C über länger als 2 bis 4 Wochen wird das vermehrte Ausbrechen der Nierenkrankheit PKD (proliferative kidney disease) erwartet [8].

Gemäss Modellrechnungen reduziert sich der für Bachforellen optimal verfügbare Lebensraum in schweizerischen Fliessgewässern bis 2050 um 6 bis 44 %. Die Spannweite der Prognose resultiert aus unterschiedlichen zugrunde gelegten Klimaszenarien. Als Temperaturgrenze der Zuordnung «Bachforellengewässer» / «nicht Bachforellengewässer» wurde eine gemittelte Juli-Wassertemperatur von 19 °C verwendet. Im negativsten Fall einer Abnahme von 44 % würde die Bachforelle aus dem Schweizer Mittelland verschwinden [35].

Die Abb. 2-9 stellt die Modellergebnisse der prognostizierten Habitat-Verteilungen der Bachforelle um 2050 für das tiefe und das hohe Klimaszenario dar. Das tiefe Szenario entspricht einer Lufttemperaturzunahme gegenüber 1990 von 1 °C, das hohe Szenario von 5.5 °C. Blau dargestellt werden «Bachforellengewässer»; violett «nicht Bachforellengewässer».

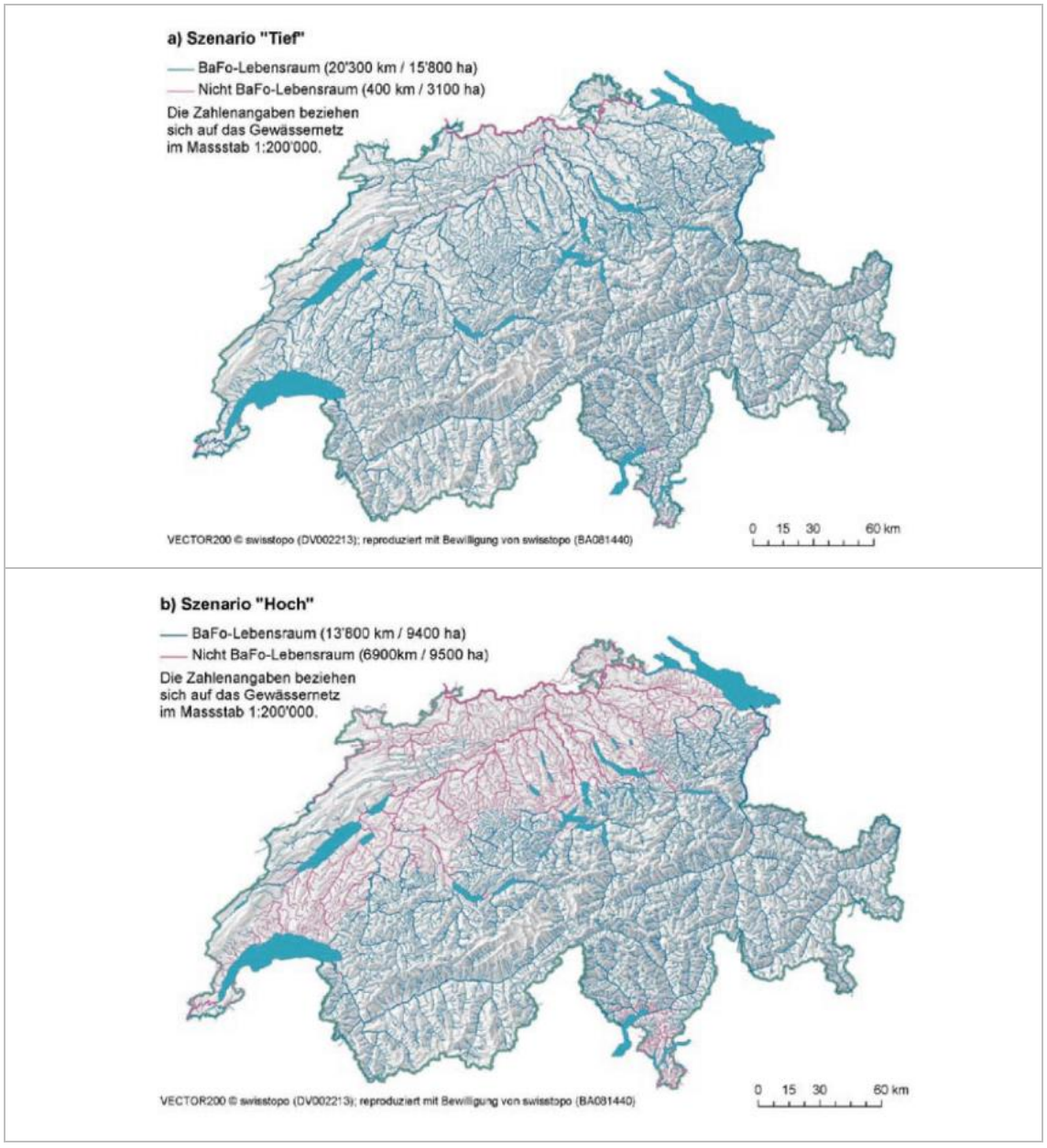


Abb. 2-9: Modellierte Habitat-Verteilung der Bachforelle um 2050. Unverändert aus [35]

2.2.5 Durchgeführte Temperaturuntersuchungen in Gewässern

In [40] wurde der Einfluss der direkten Sonneneinstrahlung auf Logger nahe an der Wasseroberfläche untersucht. Dazu wurden zwei Logger ohne Abdeckung, zwei Logger mit schwarzer Abdeckung und zwei Logger mit grauer Abdeckung an einem Sommertag in einen voll besonnten Gewässerabschnitt gesetzt. Es zeigte sich, dass die Logger ohne Abdeckung bis 1.5 °C höhere Temperaturen gemessen hatten als die Logger mit Abdeckung.

Ebenfalls in [40] wurde die benötigte Fliessstrecke bis zur zufriedenstellenden Durchmischung bei seitlichen Zuflüssen getestet. Eine gute Durchmischung wurde am Zufluss des Heischer Dorfbaches in die Jonen (Kanton Zürich) bei Niedrigwasserbedingungen nach rund 70 m erreicht. Die Autoren gingen in der Folge nach einem Zufluss und 100 m Fliessdistanz von einer erfolgreichen Durchmischung aus und positionierten ihre Logger entsprechend. Sie weisen jedoch darauf hin, dass die Durchmischungsstrecke von den Gewässergrössen (Volumen der sich vermischenden Wasserkörper) und Morphologie (Turbulenz) am Zusammenfluss abhängt.

Elliot untersuchte in [11] fünf Pools des Baches «Wilfin Beck» in Nordwest-England mit Tiefen bis 1.65 m. In diesen Pools wurden an ausgewählten Sommertagen (jeweils 1. bis 14. Juli) in den Jahren 1976, 1977, 1983 und 1985 die Parameter Pool-Oberfläche, Pool-Tiefe, Wassertemperatur, Sauerstoffkonzentration und das Forellenvorkommen nach Altersstadium mittels Beobachtung erfasst. Die Jahre 1976 und 1983 wurden als «Dürrejahre» klassiert. Die Wassertemperatur und Sauerstoffkonzentration wurde jeweils an der tiefsten Poolstelle zur Mittagszeit und um Mitternacht erfasst. Die zwei tiefsten Pools wurden hinsichtlich Wassertemperaturen und Sauerstoffkonzentration genauer untersucht. Dabei wurden die Werte alle 2 h in den Wassertiefen 0.1 m, 0.5 m, 1.0 m und an der tiefsten Pool-Stelle erfasst.

Elliot beobachtete einen signifikanten Zusammenhang zwischen den gemessenen Wassertemperaturen und der Pool-Tiefe in Dürrejahren. Je tiefer der untersuchte Pool war, desto mehr nahm die Wassertemperatur ab. In «Nicht-Dürrejahren» blieb die Wassertemperatur hingegen je nach Pool-Tiefe nahezu konstant. In Dürrejahren waren die Wassertemperaturen deutlich höher (über 25 °C) als in nicht Dürrejahren (ca. 16 °C) [11].

Die Sauerstoffkonzentration blieb in Nicht-Dürrejahren in unterschiedlichen Pool-Tiefen fast gleich. Hingegen nahm die Sauerstoffkonzentration mit zunehmender Pool-Tiefe in Dürrejahren ab. In Dürrejahren betrug die Sauerstoffkonzentration in den Pools 1 und 2 nur noch rund die Hälfte im Vergleich zu Nicht-Dürrejahren [11].

Wenn die Temperatur- und Sauerstoffwerte in den Dürrejahren für Forellen letale Grössenordnungen annahmen, wurden in den betroffenen Wasserschichten keine Forellen mehr beobachtet. Zur Mittagszeit wurden die Forellen ausnahmslos in Pool-Tiefen > 1 m beobachtet, um Mitternacht auch in weniger tiefen Pool-Stellen. Sie wählten, zwischen Standplätzen mit höheren Temperaturen und höheren Sauerstoffkonzentration und solchen mit tieferen Temperaturen aber auch tieferen Sauerstoffkonzentration, jeweils diesen mit tieferen Wassertemperaturen [11].

In der Studie [11] werden keine Fliessgeschwindigkeiten angegeben.

Die Abb. 2-1 zeigt die gemessenen Verhältnisse zwischen den mittleren Wassertemperaturen (●) und Sauerstoffwerten (■) in Dürrejahren (D) und nicht Dürrejahren (ND) in Abhängigkeit der Wassertiefe im Pool. Die Buchstaben bedeuten: a) Pool 1 in den Jahren 1976 und 1977. b) Pool 1 in den Jahren 1983 und 1985. c) Pool 2 in den Jahren 1976 und 1977. d) Pool 2 in den Jahren 1983 und 1985.

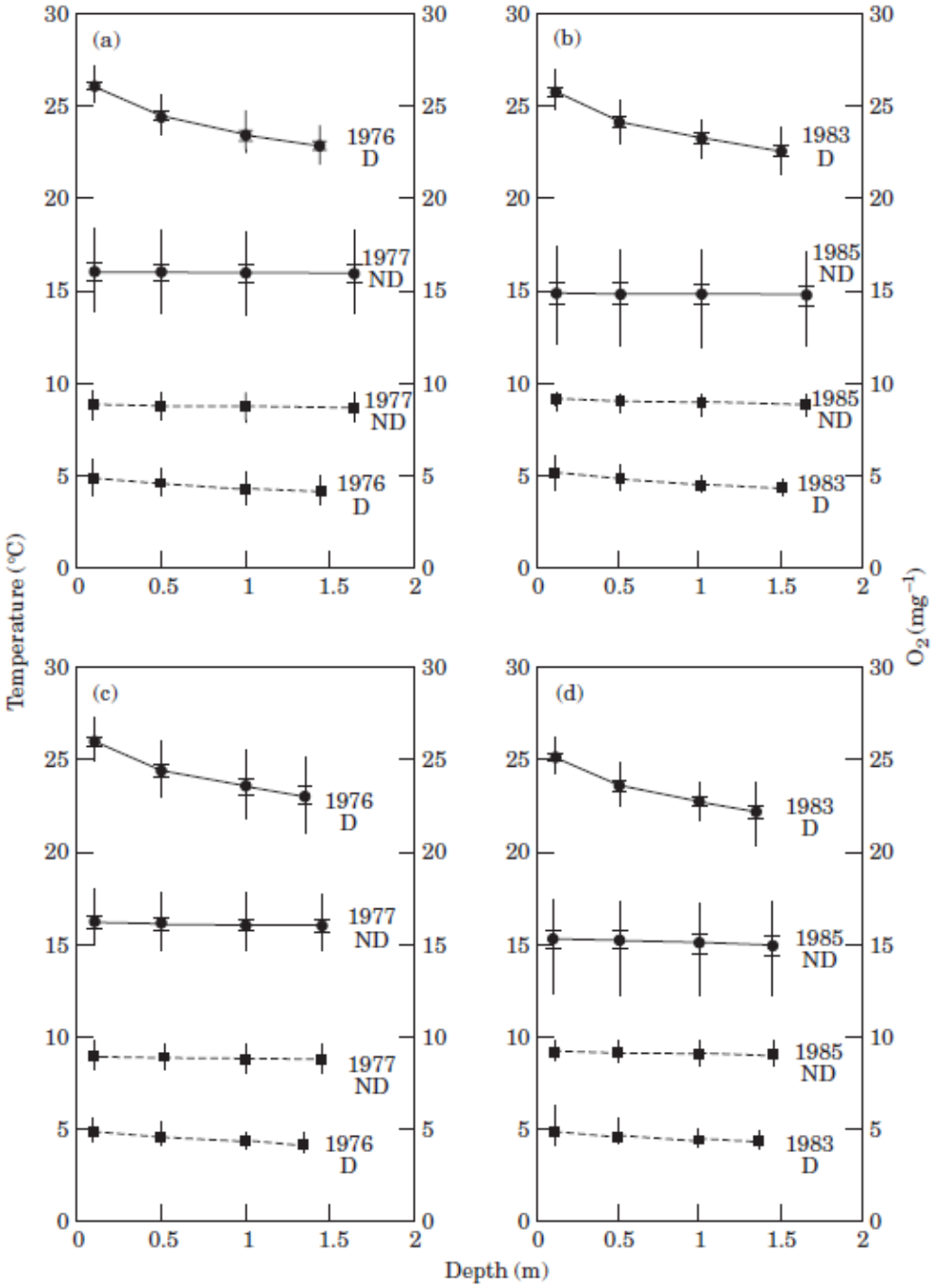


Abb. 2-10: Gemessene Verhältnisse zwischen den mittleren Wassertemperaturen und Sauerstoffwerten in Pools während Dürre- und Nicht-Dürrejahren. Unverändert aus [11]

2.2.6 Formeln

Mit der Richmannschen Mischungsregel lässt sich die sich einstellende Mischungstemperatur zweier Massen berechnen. Unter der Annahme, dass keine Änderung des Aggregatszustandes eintritt, kann die Vermischung von zwei Wassermengen mit unterschiedlichen Temperaturen folgendermassen berechnet werden [30]:

Formel 1: Richmannsche Mischungsregel aus [30], [39].

$$Tm = \frac{m1 \times T1 + m2 \times T2}{m1 + m2}$$

Tm: Gemeinsame Temperatur nach Vermischung

m1, m2: Massen der Körper 1 und 2

T1, T2: Temperatur der Körper 1 und 2

Eine weitere Einschränkung dieser Formel besteht darin, dass das System in sich geschlossen sein muss [30]. Was in der Natur nicht der Fall ist. Die Formel wird dennoch verwendet zur Abschätzung der sich einstellenden Temperatur zweier sich vermischender Flüssigkeiten, z.B. bei Einleitungen in Gewässer [39].

3 Material und Methoden

3.1 Untersuchungsgebiete

In der vorliegenden Arbeit wurden die Wassertemperaturen an verschiedenen Stellen in zwei Abschnitten an der Wigger und einem Abschnitt an der Bünz untersucht. Alle drei Strecken liegen im Kanton Aargau im schweizerischen Mittelland. Die Logger-Standorte waren zu Beginn der Arbeit vorgegeben. Die zwei Abschnitte an der Wigger werden nachfolgend mit «Wigger Oftringen» und «Wigger Brittnau» unterschieden.

Tab. 3-1: Übersicht Untersuchungsperimeter

Bezeichnung	Koordinaten (von unten nach oben)	Logger im Perimeter (von unten nach oben)
Wigger Oftringen	2634839 / 1240182 bis 2635524 / 1239740	Wigger 6 Wigger 5 Wigger 4.1 und 4.2
Wigger Brittnau	2638778 / 1234614 bis 2639078 / 1233929	Wigger 7 Wigger 2.1 und 2.2 Wigger 1.1 und 1.2
Bünz	2658630 / 1250261 bis 2659777 / 1248384	Bünz 4 Bünz 3 Bünz 2 Bünz 5 und 6 Bünz 1

Die Koordinaten von jedem Logger sind im Anhang (Tab. 2-1) ersichtlich.

3.1.1 Wigger

Der Abschnitt Wigger Oftringen ist ein im Jahre 2015 fertiggestellter Revitalisierungsabschnitt [20]. Der Abschnitt wurde mit Blockrampen, Stein- Holz- und Mikrobuhnen strukturiert. Der Abschnitt beginnt am oberen Ende des Perimeters mit einer ca. 120 m langen wabenförmig strukturierten Blockrampe, wovon ca. 60 m sichtbar sind [19] (die Blockrampe wird in der Arbeit hinsichtlich Temperaturen noch näher untersucht). Der Abschnitt ist ca. 800 m lang.

Der Abschnitt Oftringen ist gemäss Karte «Potential für Beschattung an Gewässern» als ungenügend beschattet (gelb, «Gehölzpflanzungen mit Einschränkungen möglich») klassiert [37].

Die Abb. 3-1 zeigen Fotos dieses Abschnitts: Oben links den Standort des untersten Loggers Wigger 6. Oben rechts und unten links sind die dazwischenliegenden Strecken abgebildet; unten rechts die wabenförmig strukturierte Blockrampe:

Abb. 3-1: Abbildungen des Abschnitts Wigger Oftringen (Blick jeweils vom orographisch rechten Ufer gegen die Fliessrichtung). Fotos des Verfassers

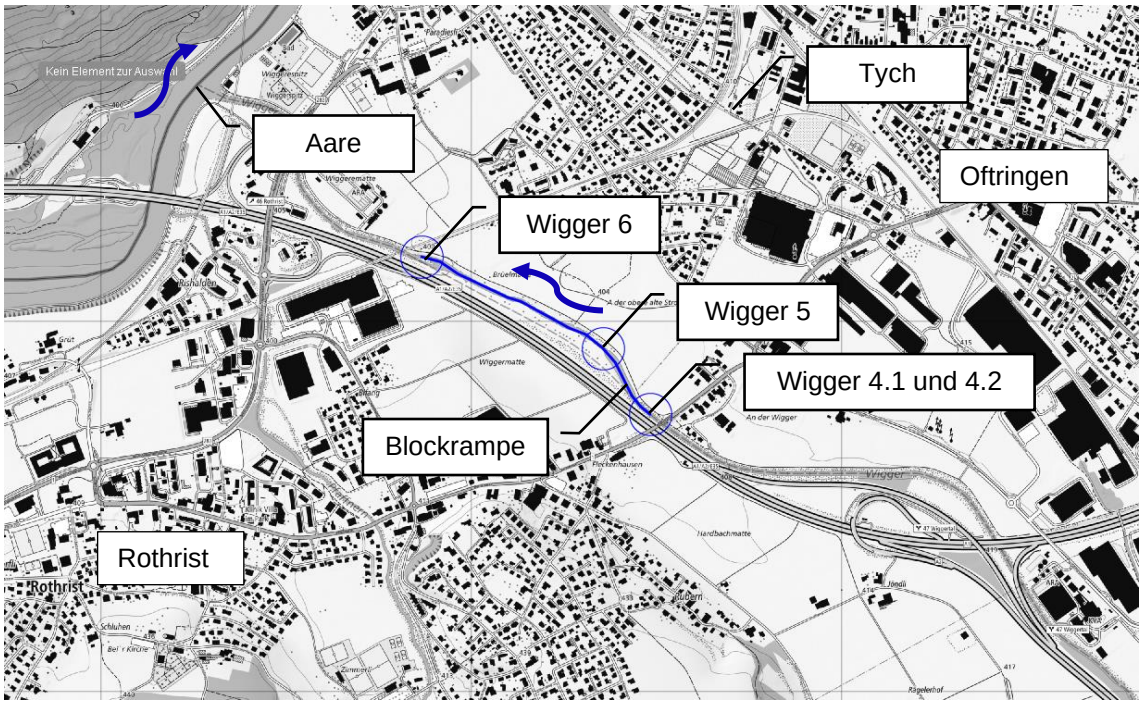


Abb. 3-2: Übersicht Perimeter Wigger Oftringen. Grundkarte [43] ergänzt

Beide untersuchten Gewässerabschnitte der Wigger sind Restwasserstrecken.

Das Wasser wird im Abschnitt Oftringen gemäss Kanton Aargau folgendermassen entnommen:

- Das Restwasser beträgt ca. 800 l / s. Der Tych (Ausleitkanal) vermag rund 3 m^3 / s zu fassen.

Im Abschnitt Brittnau bestehen wiederum gemäss Kanton Aargau die folgenden Restwasserregelungen:

- Das Kraftwerk, welches vom Wehr Wiggerhöfe gespeist wird (Abb. 3-3), muss stets 680 l / s in die Restwasserstrecke abgeben. Die Ausbaumenge des Kraftwerkkanals beträgt 6 m^3 / s
- Zudem wird oberhalb des Wehres zusätzlich Wasser in die Altachen ausgeleitet. Bei einem mittleren Abfluss sind dies rund 900 l / s, beim Q_{347} rund 500 l / s.

Die aus diesen Angaben errechneten Restwassermengen bei verschiedenen Abflüssen der zwei Abschnitte an der Wigger sind im Anhang (Abb. A-1) ersichtlich.

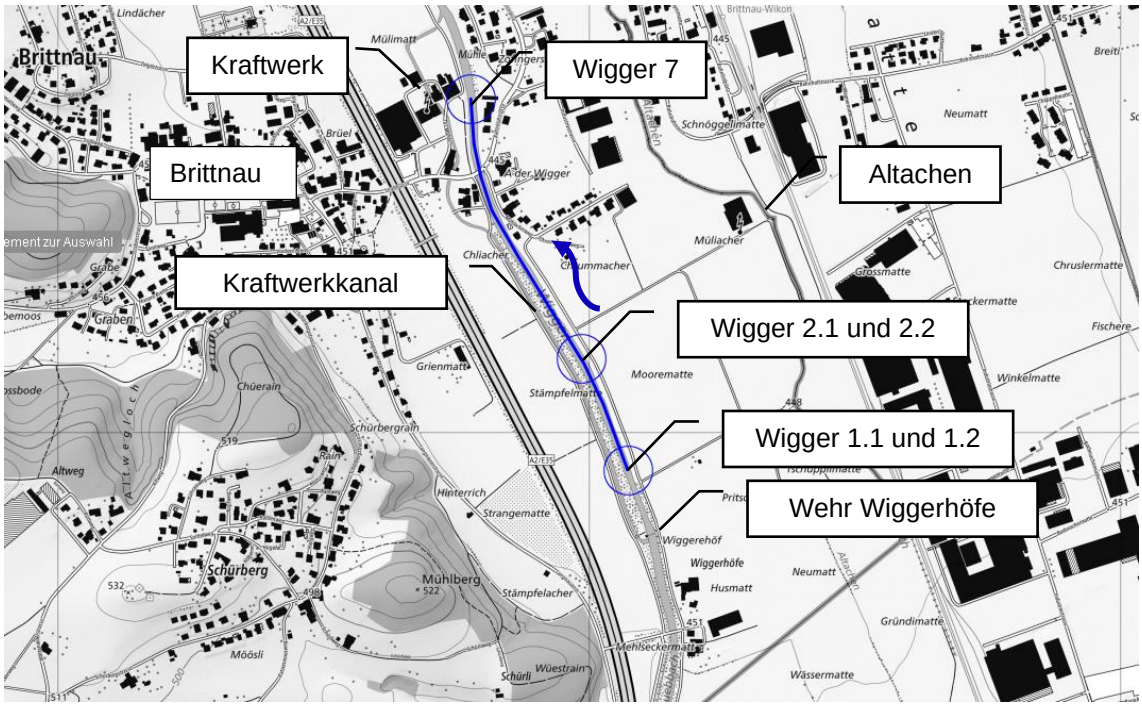


Abb. 3-3: Übersicht Perimeter Wigger Brittnau. Grundkarte [43] ergänzt

Der Abschnitt Wigger Brittnau ist ein im Jahre 2009 / 2010 ausgebauter Abschnitt. Dabei wurde unter anderem die Gerinnesohle verbreitert, Böschungen abgeflacht sowie lokale Sohlen- und Ufersicherungen mit Blöcken eingebaut (auf Infotafeln vor Ort sichtbar). Zudem wurden im oberen Abschnitt zwischen Logger 1 und 2 auf einer Länge von rund 365 m im Abstand von 15 bis 20 m nachträglich ergänzende Totholzstrukturen (u.A. Wurzelstöcke, Raubäume, Pallisadenhölzer) eingebaut [12]. Der untersuchte Abschnitt ist ca. 775 m lang. Orographisch links verläuft der Kraftwerkkanal, der ausgeleitetes Wasser vom Wehr «Wiggerhöfe» dem Kraftwerk in der «Müli-matt» zuführt.

Der Abschnitt in Brittnau wird in der Karte «Potential für Beschattung an Gewässern» unten als ungenügend beschattet (gelb, «Gehölzpflanzungen mit Einschränkungen möglich» und grün, «Gehölzpflanzungen möglich») und gegen oben als vorwiegend genügend beschattet (blau, «Gewässerabschnitt genügend beschattet») eingestuft [37].

Die Fotos in Abb. 3-4 zeigen Ansichten des Abschnittes Wigger Brittnau: Oben links ist der Standort des Loggers Nr. 7 (Blick von Brücke in Fliessrichtung) sichtbar. Oben rechts der obenliegend anschliessende Abschnitt (Blick von Brücke gegen Fliessrichtung) In der Mitte links und rechts sind die vorwiegend mit Blöcken und nachträglich ergänztem Totholz verbauten Abschnitte abgebildet (Blick jeweils vom orographisch rechten Ufer gegen die Fliessrichtung). Unten links das Wehr Wiggerhöfe (Blick vom orographisch linken Ufer gegen Fliessrichtung). Unten rechts der Kraftwerkkanal (Blick in Fliessrichtung):

Abb. 3-4: Abbildungen des Abschnitts Wigger Brittnau. Fotos des Verfassers

3.1.2 Bünz

Das untersuchte Teilstück an der Bünz besteht aus seit 1935 / 1936 kanalisierten Abschnitten und einem im Jahre 2014 revitalisierten Abschnitt der dritten Bünzkorrektion [3]. Der revitalisierte Abschnitt liegt zwischen den Logger-Standorten 5 / 6 und 2. Dabei wurden drei offene Blockrampen eingebaut und der Bünz ein leicht mäandrierendes Fliessen ermöglicht [29], [13]. Es konnten, im Feld deutlich sichtbar, einige ausgewachsene Bäume erhalten werden (was sich aus Sicht des Verfassers in der Beschattungskarte niederschlägt). Der gesamte untersuchte Abschnitt (kanalisiert und revitalisiert) ist ca. 2.30 km lang.

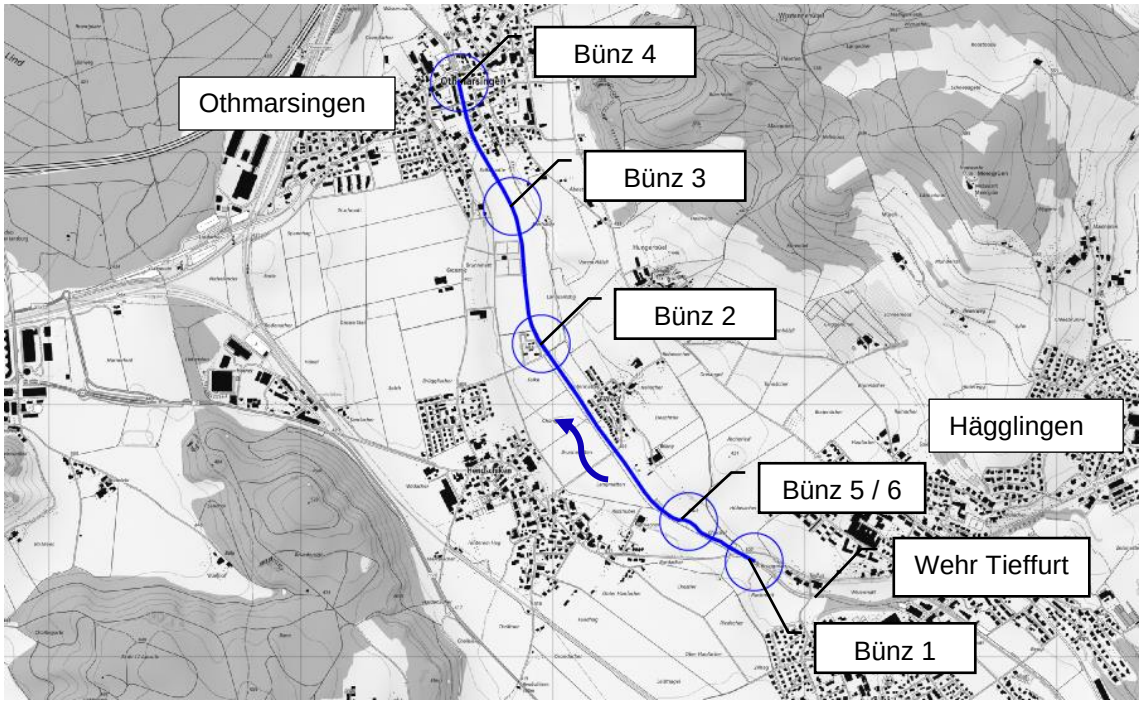


Abb. 3-5: Übersicht des Perimeters Bünz. Grundkarte [43] ergänzt

Die Bünz wird im Ort Othmarsingen abschnittsweise als genügend beschattet (blau, «Gewässerabschnitt genügend beschattet») und ungenügend beschattet (gelb, «Gehölzpflanzungen mit Einschränkungen möglich») eingestuft. Im Landwirtschaftsland hingegen ist die Bünz als ungenügend beschattet klassiert (gelb, «Gehölzpflanzungen mit Einschränkungen möglich», ein kurzer Abschnitt ist fälschlicherweise als eingedolt eingestuft). Im obersten Abschnitt (ca. Logger Nr. 5 / 6 bis 1) gilt die Bünz als genügend beschattet (blau, «Gewässerabschnitt genügend beschattet») [37].

Auch oberhalb des Perimeters der Bünz wird Wasser am Wehr Tieffurt entnommen. Dieses wird der Bünz ca. 100 m oberhalb des obersten Loggers Nr. 1 wieder zugeführt.

Die folgenden Abb. 3-6 stellen den Abschnitt Bünz dar: Die obersten Fotos zeigen den seit 1935 / 1936 kanalisierten Abschnitt in Othmarsingen zwischen dem Logger 4 und 3 und in der oberhalb anschliessenden Strecke im Landwirtschaftsland. Die Abbildungen in der Mitte zeigen den revitalisierten Abschnitt. Auf der Abbildung unten links sichtbar ist der wiederum kanalisierte Abschnitt des obersten Loggers Nr. 1. Unten rechts das Wehr Tieffurt:

Abb. 3-6: Abbildungen des Abschnitts Bünz (Blick jeweils gegen Fliessrichtung vom orographisch linken Ufer aus). Fotos des Verfassers

3.1.3 Kennwerte und Zuflüsse

Die nachfolgende Tabelle stellt Kennwerte der untersuchten Gewässer näher vor:

Tab. 3-2: Kennwerte der untersuchten Gewässer [1], Sohlenbreiten gemäss [44]

Gewässer / Station (Abschnitt)	EZG [km^2]	Höhe Station [m]	Q_{182} (MW) [m^3 / s]	Q_{347} (NW) [m^3 / s]	Sohlenbreite [m]
Wigger / Zofingen Wigger (Brittnau)	366	426.0	4.46	1.93	10.0 – 12.0 [1] 8.0 [2]
Bünz / Othmarsingen	111	390.0	1.21	0.46	6.0 [3]

Sowohl die Wigger [2] wie auch die Bünz [3] wird in den Untersuchungsperimetern der unteren Forellenregion zugeteilt. In den Erfolgskontrollen [2], [3], [20] wurden zur Auswertung der Habitatqualität die Fliessgeschwindigkeiten in revitalisierten und Kontrollstrecken bei verschiedenen Abflüssen modelliert. Diese Modellierungsergebnisse werden in Kapitel 5.1 dieser Arbeit, unter Annahme der Übertragbarkeit auf vergleichbare Abschnitte, zur Abschätzung von Fliessgeschwindigkeitsbereichen verwendet.

In der Tab. 3-3 sind die seitlichen Zuflüsse aufgelistet, die in Anlehnung an [40] innerhalb oder bis 100 m oberhalb der Perimeter liegen (Annahme vollständiger Durchmischung).

Tab. 3-3: In den Untersuchungsperimetern vorhandene Zuflüsse [36]

Vorfluter / Abschnitt	Zufluss	Beschreibung
Wigger Oftringen	Oberst. Pritschen-Wuhrbach	Offener Zufluss rechts, BSB ca. 1 m
	Hardbach	Eingedolter Zufluss links (DN 1000)
Wigger Brittnau	Schürbergbächli	Eingedolter Zufluss links (DN 900), unklar ob Einmündung in Wigger oder Kraftwerkkanal
Bünz	Gislisbergbächlein	Eingedolter Zufluss rechts (DN 300)
	Krebsbach	Eingedolter Zufluss rechts (DN 800)
	Rotenbühlbach	Eingedolter Zufluss rechts (DN 600)

[1] Perimeter Wigger Oftringen
[2] Perimeter Wigger Brittnau
[3] Perimeter Bünz

Zur Prüfung ob die Zuflüsse im Perimeter Oftringen auf die gemessenen Wassertemperaturen und Hypothesentests einen potenziell messbaren Einfluss haben können, wurde am 15.06.2021 (Sommertag) die Wassertemperatur und Wassermenge der Zuflüsse Hardbach und Oberst. Pritschen Wuhrbach im Perimeter Oftringen ermittelt. Dazu wurden die Temperaturen mit dem WTW-Messgerät erfasst, die Wassermenge mit einem skalierten Eimer und Stoppuhr bzw. die Wassertiefe mit Zollstock gemessen und die Wassermenge anschliessend unter Annahme von Normalabfluss abgeschätzt. Die Ergebnisse der mit der Formel 1 ermittelten Einflüsse auf die Wassertemperatur im Vorfluter sind im Anhang (Tab. A11 und Tab. A12) ersichtlich. Der Einfluss der weiteren Zuflüsse wurde nicht untersucht.

Auf die in den Untersuchungsperimetern weiteren, zahlreichen Einleitungen sei hingewiesen [36]. Speziell auf die Einleitung der Abwasser-Reinigungsanlage (DN 1000) in die Bünz (658'959.46, 249'216.24). Der Einfluss dieser ARA-Einleitung und der sonstigen Leitungen wurde nicht untersucht. Einzig der Abschnitt der Blockrampe Wigger Oftringen wurde im Feld abgeschritten und dabei auf Einleitungen geachtet (siehe Ergebnisse in Kapitel 4.1).

3.2 Verwendete Datensätze

Für die vorliegende Arbeit wurden folgende Datensätze verwendet:

Tab. 3-4: Für die vorliegende Arbeit verwendete Datensätze

Datensatz	Quelle
Mit Loggern gemessene Wassertemperaturen der Wigger und Bünz, Standorte gemäss Tab. A1	Kanton Aargau, Sektion Jagd und Fischerei Mehrmals ausgelesen z.T. zusammen mit dem Verfasser
Gemessene Abflussmengen (Bünz Othmarsingen), Wassertemperaturen (Bünz Othmarsingen) und Niederschläge (Wohlen), ab 2021 ungeprüfte Daten	Kanton Aargau [1]
Seitliche Zuflüsse und Einleitungen: Bach- und Abwasserkataster	Kanton Aargau [36]
Gemessene Abflussmengen Wigger Zofingen[4], provisorische Messdaten	BAFU [21]
Gemessene Wassertemperaturen (Fischtreppe am Zufluss Wigger «Luthern»: Gettnau, ungeprüfte Daten) und Niederschläge (Langnau bei Reiden)	Kanton Luzern [15]
Gemessene Lufttemperaturen 2 m über Boden an der Station Buchs / Aarau	Meteo Schweiz [28]
Modellierte Sonneneinstrahlung und Windgeschwindigkeit in Othmarsingen bzw. Zofingen	Meteoblue [27]

[4] Die Station Zofingen (2637580 / 1237080) befindet sich unterhalb der Einleitung Altachen und oberhalb der Ausleitung Mühletych. Daher werden an der Station keine Restwassermengen gemessen (Annahme).

3.3 Eingesetzte Messgeräte und Materialien

Die durch den Kanton Aargau erhobenen und in der Arbeit verwendeten Temperaturdaten wurden mit dem HOBO® 64K Pendant® Temperature / Alarm (Waterproof) Data Logger, Modell UA-001-64 der Firma Onset erfasst. Diese Temperaturlogger haben gemäss Herstellerangaben folgende Spezifikationen [17]:

- Messbereich: - 20 °C bis + 70 °C
- Genauigkeit: ± 0.53 °C von 0 bis 50 °C
- Auflösung: 0.14 °C bei 25 °C
- Abmessungen: 58 x 33 x 23 mm

Die Temperaturlogger an der Sohle wurden in Stahlhülsen auf die Sohle versenkt und an einer Kette an vorhandenen Fixpunkten (Büsche, Wurzeln oder Holzpfähle) befestigt. Die von sich aus schwimmenden Temperaturlogger wurden mittels Schnur an Fixpunkten (Kette oder Büsche) im Wasserkörper oder auf der Oberfläche gehalten.

Abb. 3-7: Verwendete Stahlhülsen, Kette und Schnur. Fotos des Verfassers

Die vom Kanton Aargau verwendeten Logger wurden mit genaueren und empfindlicheren Datenloggern verifiziert. Dazu wurden HOBO® Water Temp Pro v2 Logger mit folgenden Spezifikationen eingesetzt [18]:

- Messbereich: - 40 °C bis + 70 °C
- Genauigkeit: ± 0.21 °C von 0 bis 50 °C
- Auflösung: 0.02 °C bei 25 °C
- Abmessungen: 114 x 30 x 63 mm

Die Daten wurden mit der zugehörigen HOBO® Optic USB-Base Station ausgelesen und mit der Software HOBOware®, Version 3.7.22 als CSV-Dateien exportiert. Diese konnten anschliessend ins Excel eingelesen werden.

Für Einzelmessungen wurde das Präzisions-Messgerät WTW Multi 3430 mit den Sensor WTW FDO ® 925 eingesetzt. Dieser weist die folgenden Herstellerangaben auf [46]:

- Messbereich: 0 °C bis + 50 °C
- Genauigkeit Temperaturmessungen: ± 0.2 °C bzw. K

Die CSV-Dateien konnten direkt ohne Software via USB-Stick exportiert werden.

Die in der Wigger und Bünz eingesetzten Logger (Hobo 64K Pendant und Hobo Water Temp Pro) wurden zum Abschluss der Arbeit in einem Wasserbecken gegeneinander verglichen. Dazu wurden sie auf den Grund eines Plastikbeckens geklebt. Das Becken war mit ca. 60 L Wasser gefüllt und auf dem Balkon (Holzboden) an den Tagen vom 09.07 – 15.07.2021 an einem beschatteten Standort den sommerlichen Lufttemperaturen ausgesetzt. Um einen höheren Temperaturbereich abzudecken, wurde das Wasser am 12.07.2021 durch Mischen mit wärmerem Wasser und unter Rühren innerhalb von ca. 3.5 h kontinuierlich auf ca. 25.5 °C erhöht.

Abb. 3-8: In Becken geklebte Logger und Ansicht gefülltes Becken. Fotos des Verfassers

3.4 Messungen

Insgesamt wurden an den in Tab. A1 im Anhang genannten Gewässerstellen in der Bünz und der Wigger Temperaturlogger gesetzt. An manchen Stellen zwei Logger an derselben Stelle (Sohle und schwimmend). Die Orte der Messungen waren zu Beginn der Arbeit vorgegeben. Die Gründe für die jeweilige Standortwahl konnte nicht abschliessend eruiert werden.

Die Tab. A2 im Anhang stellt die Messperioden und -intervalle dar.

Die Auslesung der Daten erfolgte ungefähr halbjährlich. In dieser Arbeit sind sie bis zum 12.03.2021 berücksichtigt und ausgewertet. Die restlichen Daten bis zum Ende der Messkampagne am 21.06.2021 wurden zusammen mit den Fischereiaufsehern nur noch ausgelesen und gespeichert.

Die Geräte wurden nachträglich über die werkseitige Kalibrierung hinaus in einem Wasserbecken überprüft (siehe vorheriges Kapitel 3.3).

Die Messungen an der Sohle wurden jeweils mit dem beschriebenen und nachfolgend skizzierten Vorgehen bei unterschiedlichen Fliesstiefen gemäss Tab. A1 durchgeführt. Bei der Erhebung der Wassertemperaturen der schwimmenden Temperaturlogger kamen unterschiedliche, nachfolgend dargestellte Vorgehensweisen zum Einsatz.

3.4.1 Übersicht Temperaturlogger Wigger 1 und 2

Die Temperaturlogger Wigger 1.1 und 1.2 wurden an einem Holzpfahl mittels Kette in der Flussmitte befestigt. Die Logger befanden sich im strukturbedingten Kolk vor einer «Palisadenschwelle». Der Logger 1.2 an der Sohle befand sich in einer Stahlhülse; am 12.03.21 in einer Wassertiefe von rund 55 cm. Der schwimmende Logger 1.1 war mittels 30 cm langer Schnur an der Kette befestigt, sodass durch den Auftrieb eine Höhendifferenz von schätzungsweise ca. 20 bis < 30 cm bestand.

Zwischen dem Beginn der Kette bei Stahlhülse (1) und dem Anschlusspunkt der Schnur (2) bestand eine Distanz von ca. 2 m (in der untenstehenden Skizze zu nahe beieinander gezeichnet).

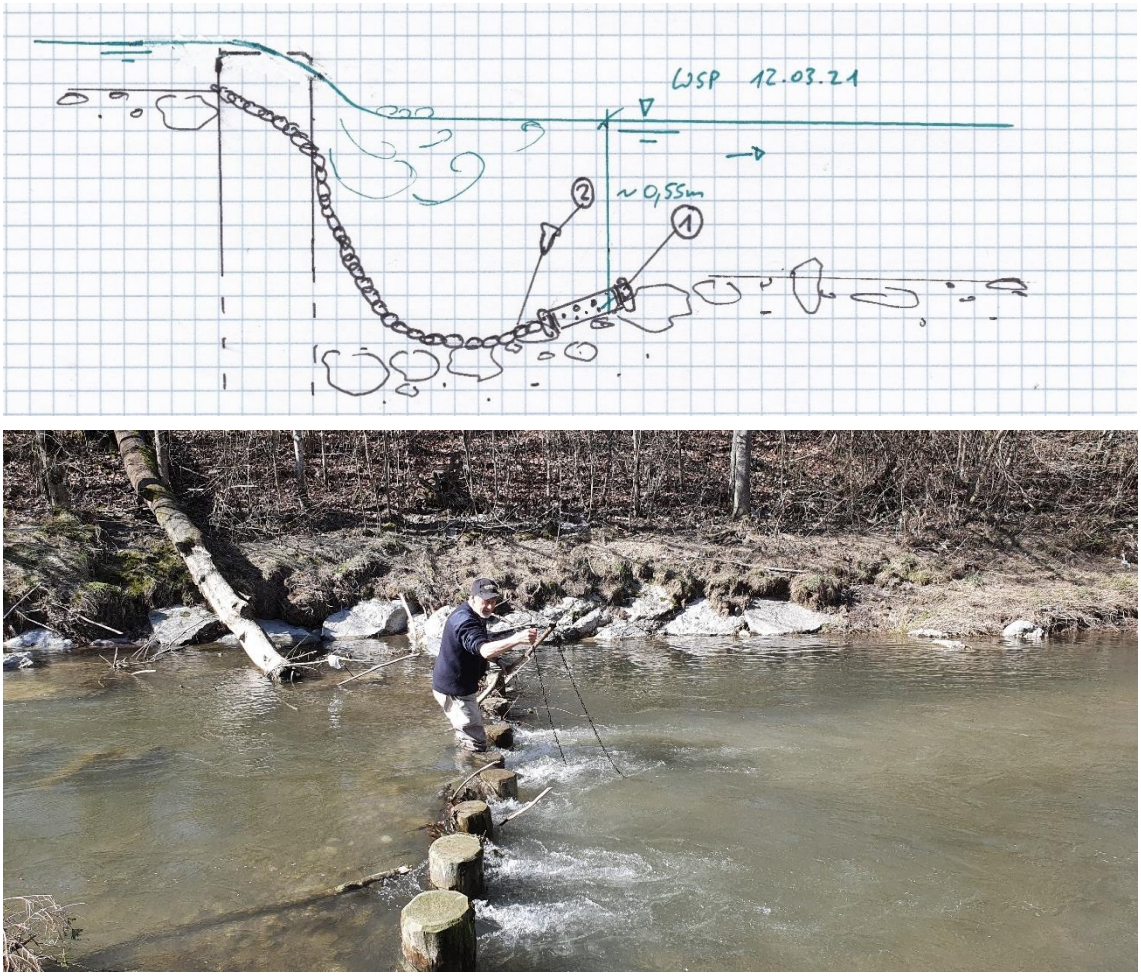


Abb. 3-9: (1) Temperaturlogger in Stahlhülle mit Kette an Holzpfahl in der Flussmitte liegend (2) Schwimmender Logger an Schnur an Kette befestigt. Abbildungen des Verfassers

In der Arbeit ebenfalls ausgewertet wurden die Logger Wigger 2.1 und 2.2. Diese gingen bereits vor der ersten Begehung verloren. Laut Schilderungen der Fischereiaufseher war hier das Konzept aber vergleichbar wie am Loggerstandort Wigger 1.

3.4.2 Übersicht Temperaturlogger Wigger 4 und 5

Die Logger am Standort Wigger 4 und 5 wurden mittels Kette an einem Busch befestigt und auf die Gewässersohle versenkt. Beide Logger befanden sich in Vertiefungen am Gewässerrand (die Logger 4 orographisch rechts, Logger 5 orographisch links), welche aus Sicht des Verfassers als leichte «Kurvenkolke» bezeichnet werden können. Der Logger 4.1 an der Sohle befand sich in einer Stahlhülse; am 12.03.21 in einer Wassertiefe von rund 75 cm. Der schwimmende Logger 4.2 war mittels 30 cm langer Schnur an der Kette befestigt, sodass auch hier durch den Auftrieb eine Höhendifferenz von schätzungsweise ca. 20 bis < 30 cm bestand. Der Logger 5 befand sich ebenfalls in einer Stahlhülse; am 12.03.21 in einer Tiefe von rund 35 cm unter Wasser.

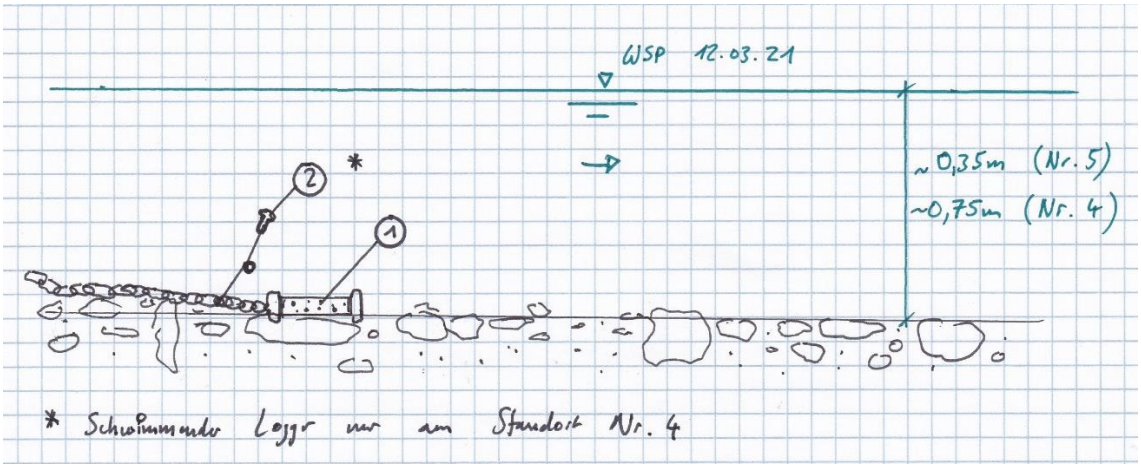


Abb. 3-10: (1) Temperaturlogger 4 und 5 in Stahlhülle mit Kette am Gewässerrand fixiert. (2) Schwimmender Logger Nr. 4.2 mit Schnur an Kette befestigt. Foto links: Loggerstandort Nr. 4. Foto rechts: Loggerstandort Nr. 5. Abbildungen des Verfassers

3.4.3 Übersicht Temperaturlogger Bünz 5 und 6

Der Logger Bünz 5 wurde an einem Holzpfahl mittels Kette in der Flussmitte befestigt. Er befand sich in einer Stahlhülse und lag im strukturbedingten Kolk vor einer inklinant eingebauten «Palisadenbuhne». Am 12.03.21 in einer Wassertiefe von rund 80 cm. Der schwimmende Logger Bünz 6 war mittels ca. 2 m Schnur an einem Busch befestigt und wurde auf die Wasseroberfläche gelegt. Der Logger war somit sämtlichen Schwankungen und Strömungen des Wasserspiegels ausgesetzt (leider war der Logger zum Teil auch im Gebüsch an der Luft hängend).

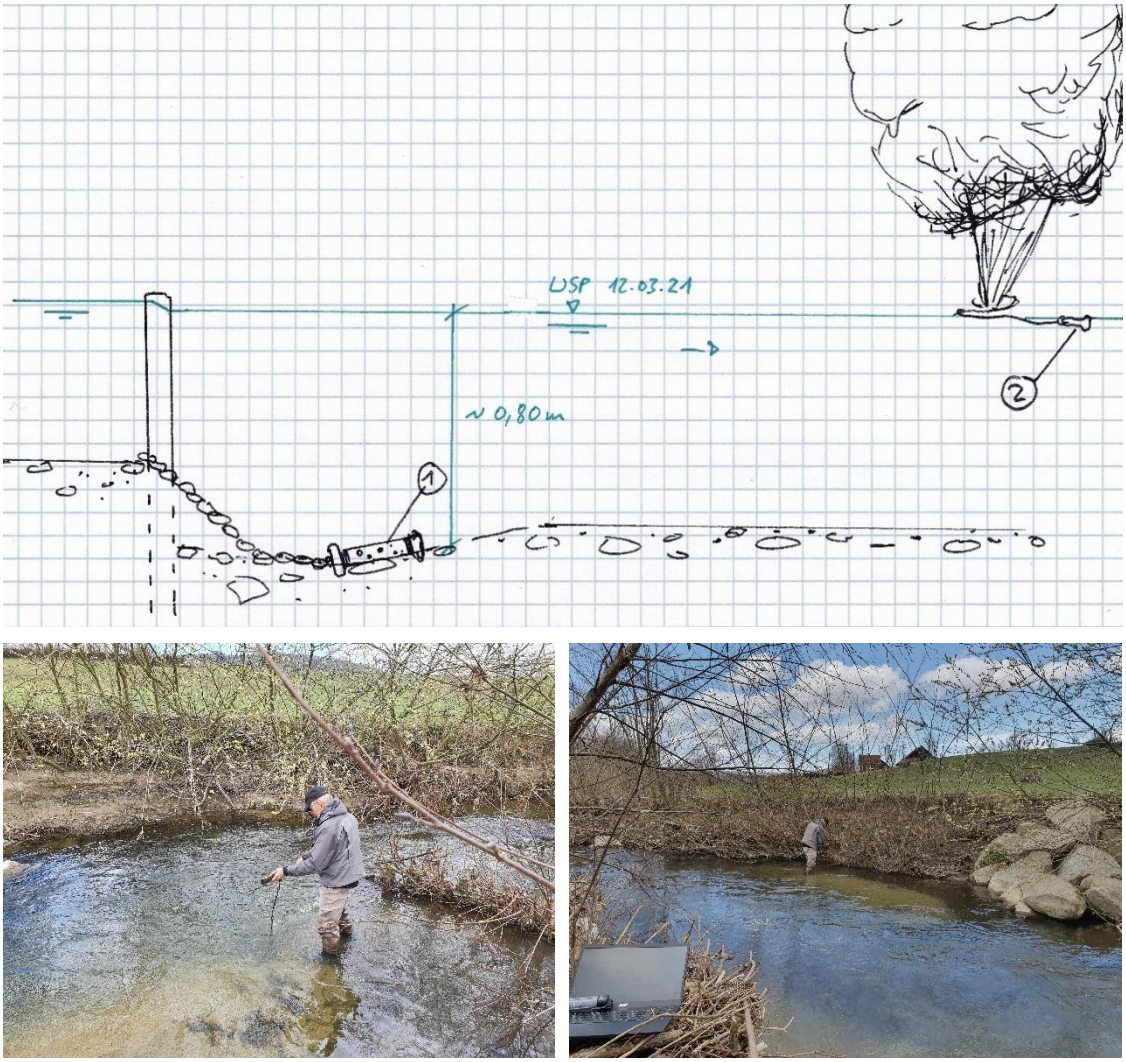


Abb. 3-11: (1) Temperaturlogger in Stahlhülle mit Kette an Holzpfahl in Bachmitte befestigt (zugehöriges Foto links unten), (2) Schwimmender Logger an Schnur an Busch am Gewässerrand befestigt (zugehöriges Foto rechts unten). Abbildungen des Verfassers

3.5 Rohdatenaufbereitung und -bereinigung

Die Rohdaten wurden in einem ersten Schritt in Excel aufbereitet. Die im amerikanischen Datumsformat vorhanden Daten wurden mittels Gebietsschema-Funktion in Excel in europäisches Format umgewandelt. Die je nach Winterzeit / Sommerzeit beim Aufsetzen der Logger jeweils vorgegebene Zeitzonen (GMT +1 bzw. GMT +2, in den Metadaten ersichtlich) wurde einheitlich auf GMT +1 geändert. Offensichtliche Ausreisser (zum Teil kurze Lufttemperaturmessungen) in den Auslesestunden wurden ausgeschlossen. Die Resultate wurden in Diagrammen mit gemessenen Wasser- und Lufttemperaturen-Datensätzen der Kantone (gemäss Tab. 3-4) gegenübergestellt. Bei Feldbegehungen notierte Vorkommnisse - manche Logger lagen am Ufer, andere waren mit Geschiebe überdeckt oder wurden nicht mehr gefunden bzw. waren offensichtlich gestohlen worden (Schutzbehälter offen, aber noch vorhanden) - gemäss Tab. A1 wurden direkt in den Rohdaten-Diagrammen vermerkt.

Die erstellten Rohdaten-Diagramme sind im Anhang sichtbar.

Es war offensichtlich oder teilweise bekannt, dass manche Logger zwischenzeitlich an der Luft lagen. Daher mussten die aufbereiteten Daten auf Luftmessungen hin untersucht und bereinigt werden.

Die für diese Bereinigung angewandten Ausschlusskriterien sind im Anhang 3 dokumentiert.

Die kontrollierten und bereinigten Messreihen sind ebenfalls im Anhang 4 ersichtlich.

Bei den im Wasserbecken durchgeführten Vergleichstests waren an einzelnen Loggern einzelne Ausreisser aufgetreten. Diese im Vergleich mit den anderen Loggern in gemeinsamem Wasserbecken unlogischen Temperaturausschläge wurden ausgeschlossen. Bei der künstlichen Erwärmung auf über 25 °C kam es offensichtlich kurzzeitig zu ungenügender Vermischung der Wassermassen weshalb die Logger in diesem Zeitraum nicht gegeneinander verglichen werden durften. Mit der Auswertung der Werte aus dem Wasserbecken wurde erst eine Stunde nach Einbringen begonnen und somit eine Anpassungszeit berücksichtigt. Es wurde in einem Temperaturbereich zwischen ca. 13.5 bis 25.5 °C getestet.

3.6 Hypothesentest

Die Hypothesen wurden mit dem Hypothesentest für gepaarte Differenzen geprüft.

Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 0.01$ festgelegt.

Die Daten wurden auf Ausreisser überprüft. Werte, die in Anlehnung an die empirische Regel um die 2-fache Standardabweichung vom Mittelwert abwichen, wurden näher beurteilt und zum Teil ausgeschlossen. Diese Arbeitsschritte wurden dokumentiert und sind im Anhang 5 ersichtlich.

3.7 Auswahl von Wärme, Hitze- und Niedrigwasserperioden

Zur *Auswahl von ausgeprägten Wärme- und Hitzeperioden* wurden in Tab. 3-4 genannten Datensätze nach meteorologischen Kenngrössen ausgewertet:

- Sommertag: «Ein Sommertag ist ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur ≥ 25 °C beträgt.» (zit. [45]).
- Hitzetag: «Ein Heißer Tag ist ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C beträgt.» (zit. [45])
- Regentag: «Ein Regentag ist ein Tag mit einer 24-stündigen gemessenen Regenhöhe größer / gleich 0,1 mm». (zit. [45]).

Mit dem Ziel möglichst viele Einflüsse auf eine Wassertemperaturschichtung auszuschliessen, wurden zusätzlich «Windtage» (Annahme des Verfassers) definiert, wenn der mittlere Windspeed 11 km / h überstieg. In Anlehnung an die Beaufort-Skala: Windgeschwindigkeiten zwischen 6 bis 11 km / h werden als «leichte Brise» (Beaufort 2) bezeichnet. Windgeschwindigkeiten zwischen 11 bis 19 km / h als «schwacher Wind» (Beaufort 3) [45].

Zur *Auswahl von Niedrigwasserperioden* wurden die erhobenen und ausgewerteten Wassertemperaturen gemäss Tab. 3-1 und Tab. A2 bezüglich «Niedrigwassertagen» gefiltert. Dabei wurden als Niedrigwassertage definiert, wenn der gemittelte Tageswert kleiner dem statistischen Q_{347} war. An der Wigger wurden die nach Kapitel 3.1 ermittelten Restwassermengen auf Unterschreitung des Q_{347} überprüft und das Kriterium verschärft, sodass als Niedrigwassertage galten, wenn der maximale Tageswert < Q_{347} war. Auch hier war das Ziel möglichst viele Einflüsse auszuschliessen. In den Restwasserstrecken konnte daher das Niedrigwasserkriterium verschärft werden bei gleichzeitig genügend verbleibenden untersuchbaren Tagen.

Schlussendlich wurde nach diesen Kriterien ausgewählt und dokumentiert:

- «Sommertage mit Niedrigwasserabfluss ohne Regen[5] und Wind» und
- «Hitzetage mit Niedrigwasserabfluss ohne Regen und Wind»

Die ausgewerteten Wetter- und Pegeldaten sind im Anhang 4 ersichtlich.

[5] Die Regentage wurden nur berücksichtigt, wenn sie zum Abbruch der Niedrigwasserbedingungen führten.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse Wigger

Nachfolgend wird der gemessene Jahresgang am Logger 4.1 (Logger an der Sohle) mit gemessenen Lufttemperaturen und Erwartungswerten der unteren kollinen Forellenregion vorgestellt:

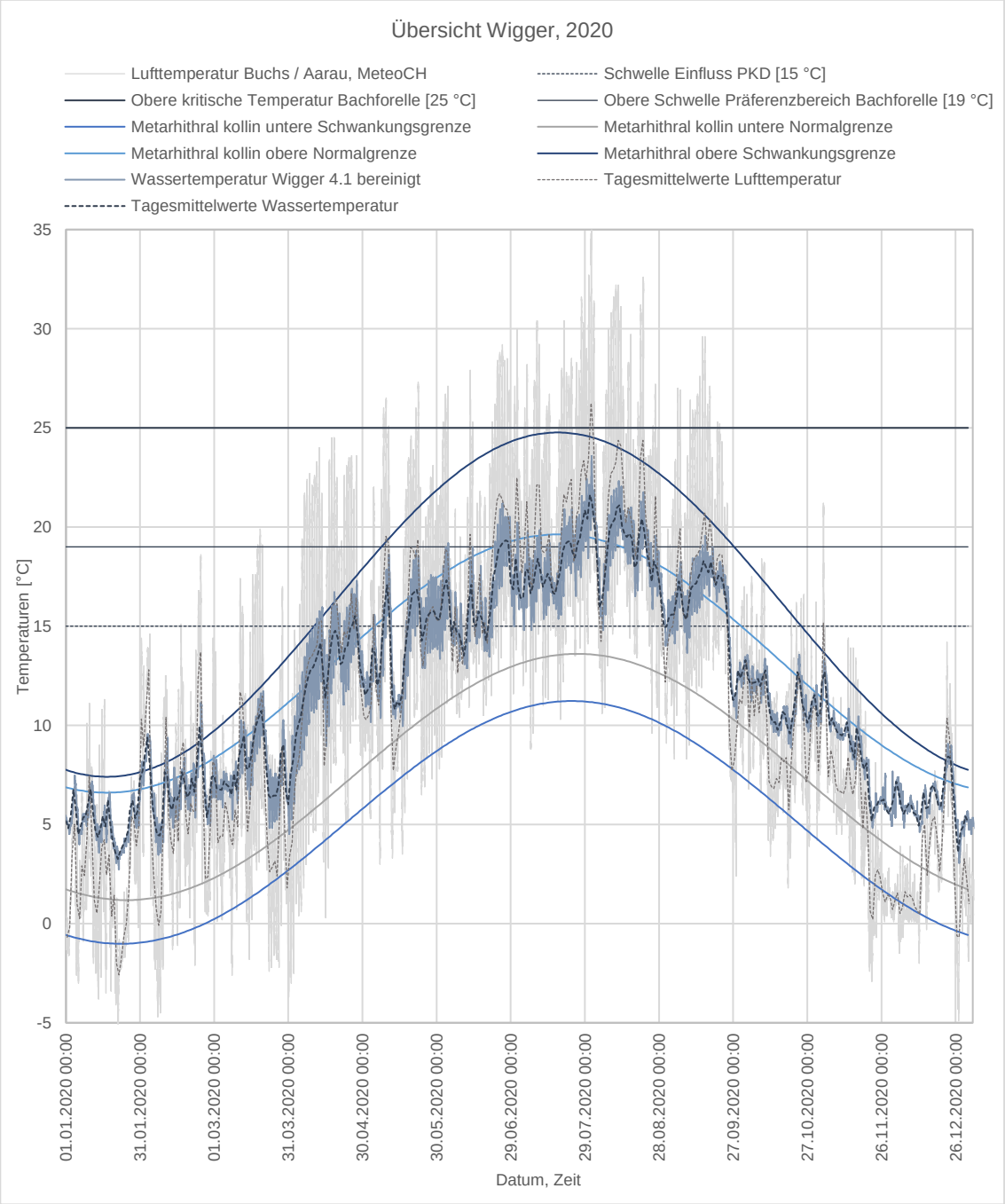


Abb. 4-1: Übersicht der am Logger Wigger 4.1 im Jahre 2020 gemessenen Wassertemperaturen gegenübergestellt mit in der unteren Forellenregion relevanten Temperaturbereichen und - grenzen

Anstelle des Logger Nr. 6 mit den höchsten gemessen Wassertemperaturen und auch Tagesschwankungen (infolge Datenausfällen kein durchgehender Jahresgang) wird hier der Logger 4.1 vorgestellt. Generell folgte die Wassertemperatur der Lufttemperatur, deutliche Temperatursprünge sind in beiden Kurven sichtbar. Die Lufttemperaturen schwankten bis ca. 20 °C / Tag, die Wassertemperaturen max. 5 °C / Tag.

Im Winter lag die mittlere Wassertemperatur häufig über der mittleren Lufttemperatur, während dies im Sommer oft umgekehrt war.

Die obere kritische Temperatur für Bachforellen von 25 °C wurde am Logger 4.1 mit max. 24.2 °C zu keinem Zeitpunkt erreicht (am Logger 6 mit 25.5 °C am 31.07.2020 schon). Hingegen wurde die Präferenztemperatur von 19 °C im Jahre 2020 an 54 Tagen überschritten. Die Einflussgrenze PKD war zum Teil ab April 2020 überschritten, jedoch nicht länger als 2 Wochen am Stück. Ab Mitte Mai bis in die zweite Hälfte September wurde die PKD Einfluss-Grenze von gemittelten Tagestemperaturen > 15 °C aber nahezu durchgehend, unterbrochen von zwei Einzeltagen, überschritten. Im Winter inklusive März wurden die optimalen Bereiche für Bachforelleneier von 9 °C an 18 Tagen überschritten. Generell lagen die Wassertemperaturen oberhalb des gemittelten Normalbereiches und häufig nahe an der oberen Normalgrenze der Erwartungswerte der unteren kollinen Forellenregion.

Im Jahr 2020 wurde an der Station Wigger Zofingen (keine Restwasserstrecke) an 33 Tagen ein unterschrittener gemittelter Tagesabfluss < Q_{347} gemessen. In der Restwasserstrecke Brittnau wurden mit der strengeren Niedrigwasser-Auslegung (alle über den Tag gemessene Werte < Q_{347}) an 324 Tagen Niedrigwasserbedingungen errechnet; bei gemittelten Tageswerten < Q_{347} an 354 Tagen. In Oftringen mit der strengeren Interpretation an 271 Tagen (bei gemittelten Tageswerten < Q_{347} an 301 Tagen). Die Niedrigwasserbedingungen in den Restwasserstrecken werden generell nur bei grösseren Abflüssen (> ca. 5 m^3/s Oftringen, > ca. 9 m^3/s Brittnau) unterbrochen (siehe Anhang 1).

Das Längenprofil der Wigger stellt die im Längsverlauf gemessenen Wassertemperaturen (Minimal-, Mittel- und Maximalwerte) am Hitzetag 31.07.2020 dar. Ab dem obersten Logger 1 flussabwärts war bezogen auf die Mittelwerte ein positiver Temperaturgradient gemessen worden. Das am Logger 1 eintreffende Wasser war im Vergleich hinsichtlich Maximaltemperaturen und Tagesschwankungen am tiefsten (nach genügend beschatteter Strecke und Stauhaltung). Innerhalb von ca. 750 m nahmen dann zwischen Logger 1 bis 7 die mittleren Wassertemperaturen vergleichsweise rasch um ca. 1 °C zu (gemäss Kanton Aargau z.T. ungenügend beschatteter Abschnitt). Während am obersten Logger Nr. 1 Tageschwankungen von unter 2 °C und ein Maximalwert von ca. 21 °C gemessen wurden, nahmen die Schwankungen bis Logger Nr. 7 auf 5 °C und die Maximalwerte auf ca. 24 °C (ca. + 0.4 °C / 100 m) zu. Zwischen den Perimetern Wigger Brittnau (Logger 1 und 7) und Wigger Oftringen (Logger 4, 5 und 6) liegt dann eine Fliessstrecke von ungefähr 6.5 km ohne dazwischenliegende Temperatur-Kenntnisse, in welcher sich der

Mittelwert weniger rasch erwärmte und der Maximalwert sowie Variabilität über den Tag leicht abnahmen (ca. 6.5 km genügend beschattet). In der unterliegenden Strecke zwischen Logger 4 und 5 (Blockrampe) reduzierte sich die Tagesschwankung um ca. 0.3 °C. Vom Logger 5 zu Logger 6 fand wiederum eine vergleichsweise rasche Erwärmung statt (ungenügend beschattete Strecke). Die Maximalwerte erhöhten sich innerhalb von ca. 550 m von ca. 23.5 °C auf ca. 25.5 °C (ca. +0.35 °C / 100m) und die Schwankung erhöhte sich von ca. 3.5 °C auf ca. 5.5 °C / Tag.

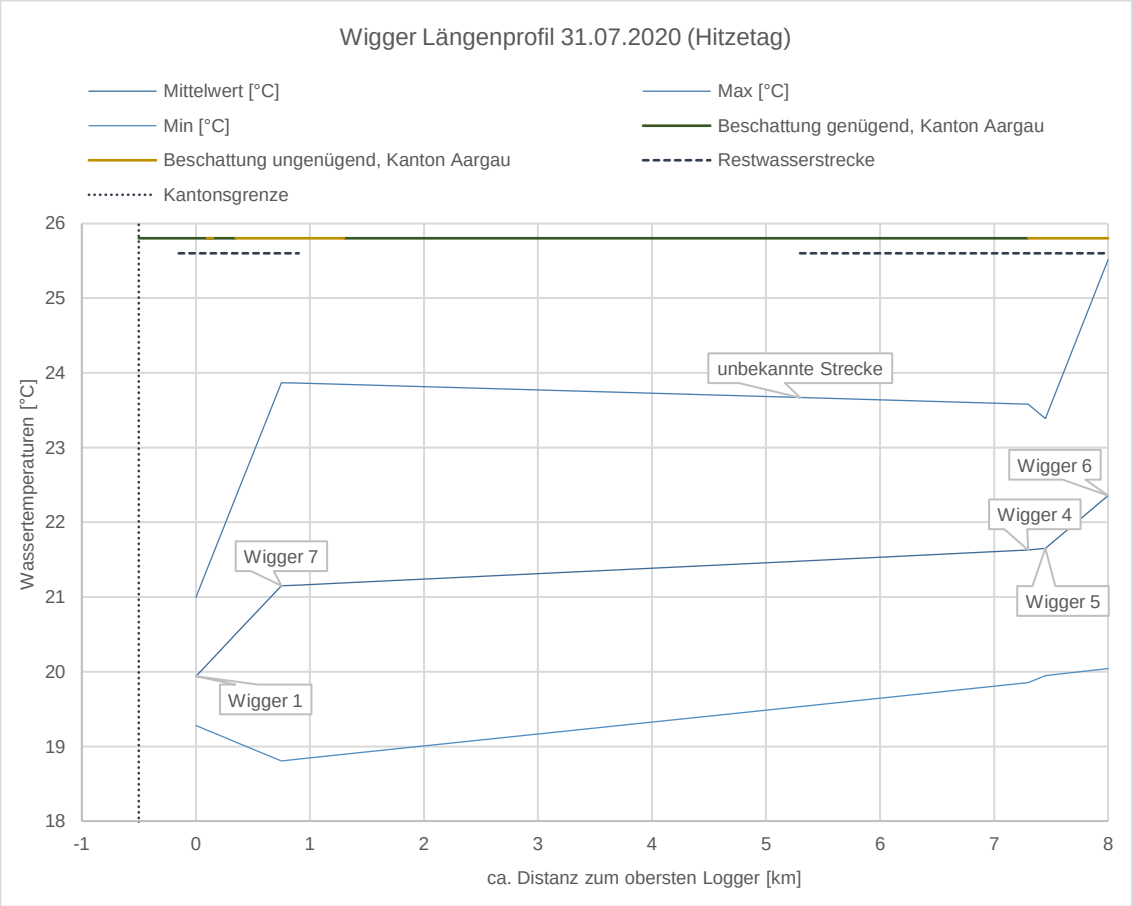


Abb. 4-2: Längenprofil Wigger 31.07.2020 mit jeweils an der Sohle gemessenen Wassertemperaturen (Mittel-, Maximal- und Minimalwerte), ergänzt mit Angaben des Kantons Aargau [36], [37].

In Abb. 4-3 werden alle Wigger-Messreihen (Sohle) in einer ausgeprägten Sommer- (alles Sommertage ausser 24.07.) und teils Hitzeperiode (20., 27., 28., 30.07. bis 01.08.) mit durchgehenden Niedrigwasserbedingungen (alle Logger in Restwasserstrecken) gegenübergestellt. Die Regentage (21., 23., 24., 26., 28.07.) mit täglichen Regenmengen zwischen 0.1 – 2 mm führten zu keinem Abbruch der Niedrigwasserbedingungen. Die Tagessummen der Sonneneinstrahlung lagen zwischen ca. 5.5 bis 7.7 kW / m^2, ausser am 22. (4.6 kW / m^2) und 24.07 (2.9 kW / m^2).

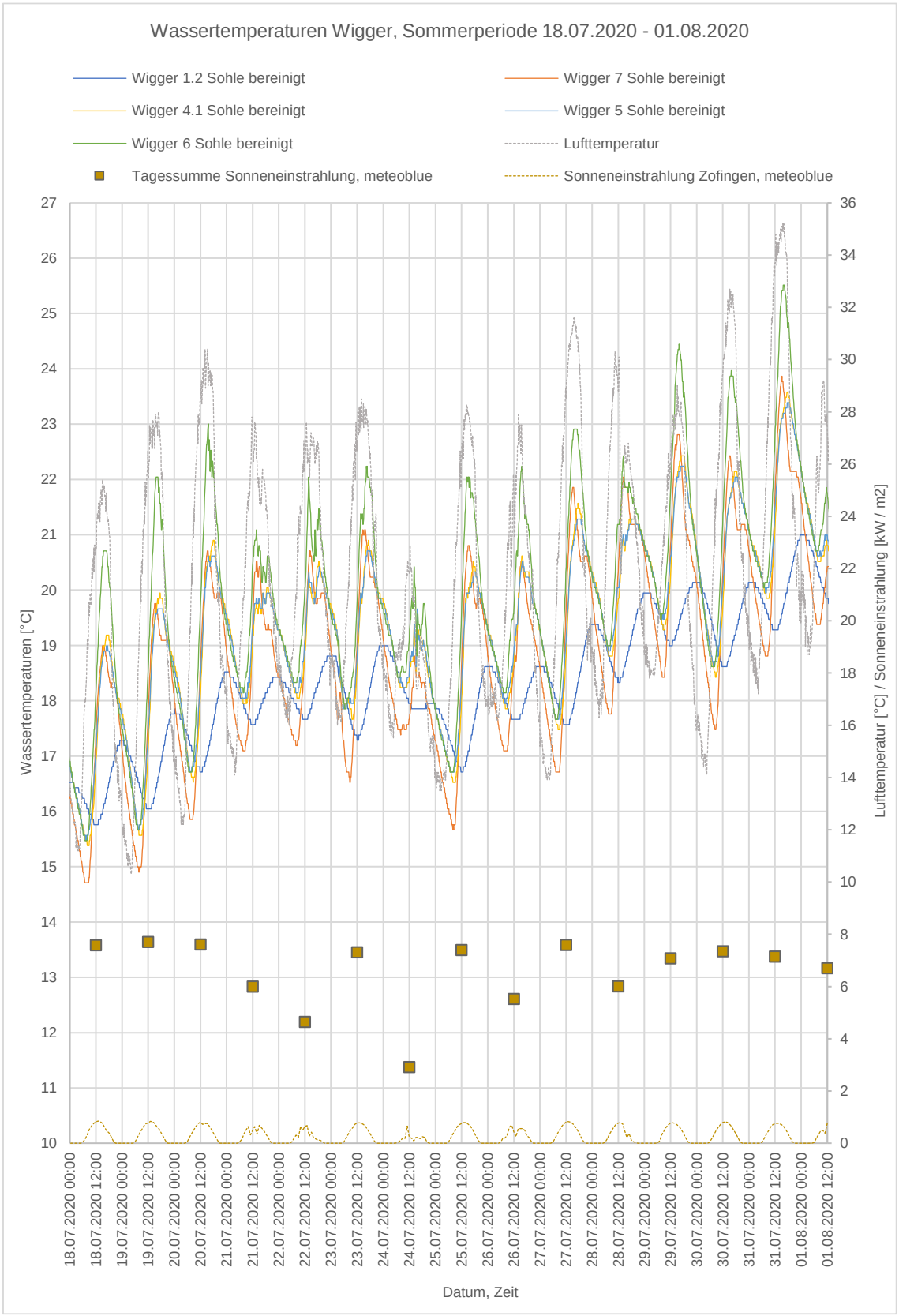


Abb. 4-3: Gegenüberstellung aller Wigger-Logger (Sohle) in Sommerperiode 2020

Die maximalen Wassertemperaturen traten im Vergleich mit den maximalen Lufttemperaturen meist leicht verzögert auf. Die kurzzeitigen Schwankungen der maximalen Lufttemperaturen zeigten sich häufig auch in der maximalen Wassertemperatur (z.B. an Logger 6 am 22.07.). Die minimalen Wassertemperaturen traten verzögert auf, folgten aber auch den minimalen Lufttemperaturen. Der Anstieg der Wassertemperaturen erfolgte verglichen mit der Lufttemperatur jeweils verzögert, während die Abkühlung relativ zeitgleich begann. Die Tagesserien mit Tagessummen der Sonneneinstrahlung > 6 kW / m^2 zwischen dem 18 – 20.07 und 29. – 31.07. führten hier meist zu kontinuierlich sich von Tag zu Tag erhöhenden Wassertemperaturen. Der 24.07. mit vergleichsweise tiefer Sonneneinstrahlung fällt mit tieferen Wassertemperaturen auf.

Die unter dem Logger 1 flussabwärts liegenden Messgeräte zeigten stärkere Tagesschwankungen von ca. 2 – 6 °C mit Minima um ca. 07:00 bis 09:00 und Tagesmaxima um ca. 14:00 bis 18:00. Der Logger Nr. 7 hatte morgens vergleichsweise tiefere Minimalwerte aufgezeichnet als die anderen Logger. Der Logger Nr. 6 sticht in dieser Periode mit hohen Maximalwerten hervor und macht die Schwankungen der maximalen Lufttemperaturen am stärksten mit.

Als Ausnahme zu den obgenannten Beobachtungen fällt der Logger 1 auf (lag unterhalb einer Stauhaltung). Er zeigte Tagesgänge mit Schwankungen von ca. 1 – 2 °C und Minimalwerten um die Mittagszeit und Maximalwerten um Mitternacht. Er machte kurzzeitige Schwankungen der maximalen Lufttemperatur weniger mit.

Vom Logger 2.1 bestehen in dieser Sommerperiode keine Daten.

Das Diagramm in Abb. 4-4, der in der Hitzeperiode Anfang 08. bis 12. August 2020 jeweils ober- und unterhalb der Blockrampe Wigger Oftringen gemessenen Temperaturen, zeigt einen leicht gedämpfteren Temperaturverlauf unterhalb der Blockrampe mit jeweils um ca. 0.1 – 0.2 °C verminderten Maximal- und Minimalwerten.

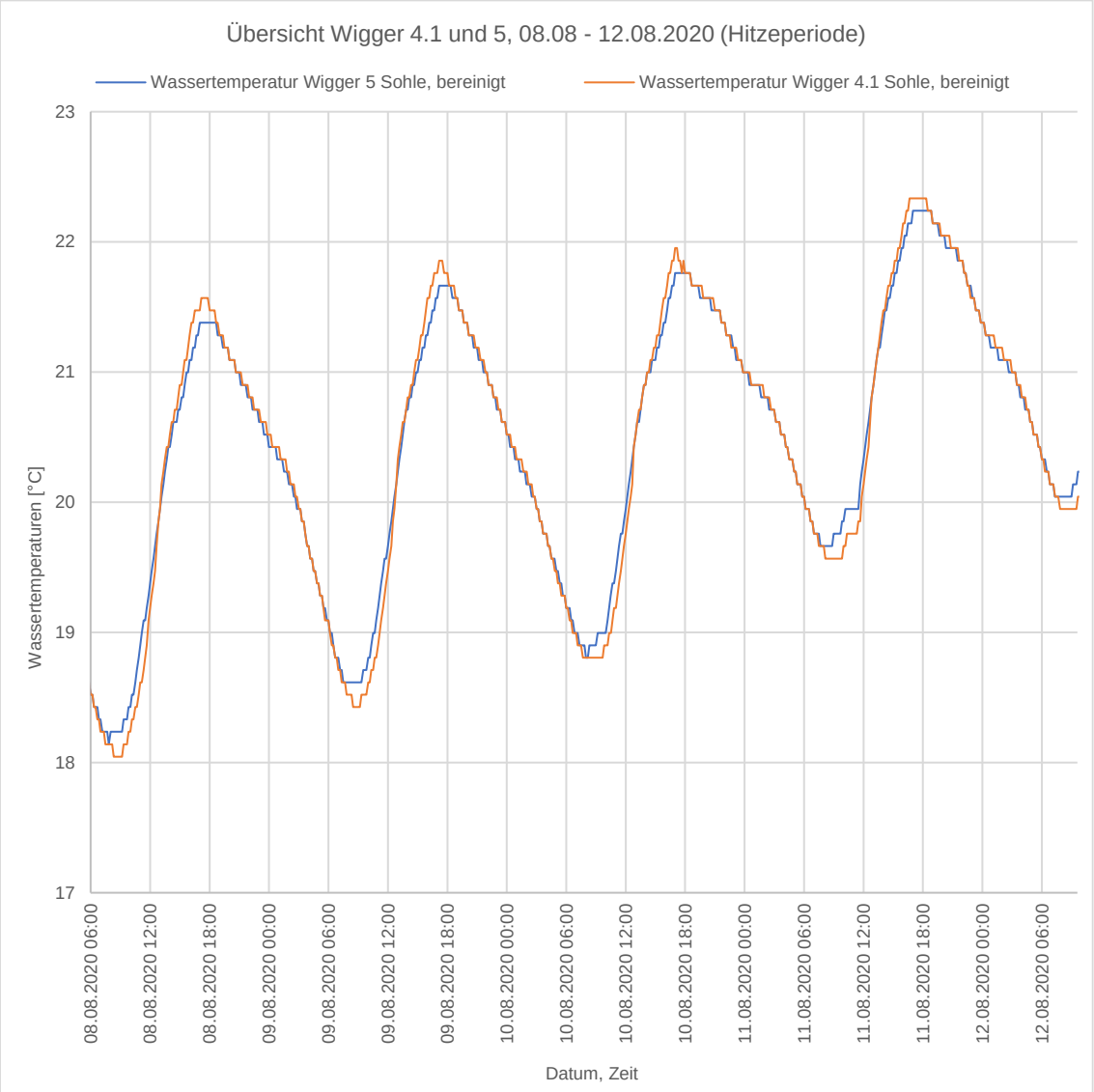


Abb. 4-4: Gemessene Wassertemperaturen bei der Blockrampe Wigger Oftringen in Hitzeperiode 2020. Der Logger 4 befindet sich oberhalb und der Logger 5 unterhalb der untersuchten Blockrampe

Mit den durchgeführten Feldtests zeigte sich, dass die seitlichen Zuflüsse (Oberst. Pritschen Wuhrbach und Hardbach) trotz sommerlichen Temperaturen nach erfolgter Durchmischung keinen messbaren Einfluss auf die Wassertemperatur der Wigger Blockrampe Oftringen hatten (Δt = max. + 0.001, - 0.02 °C). Weitere Einleitungen waren in diesem Abschnitt keine sichtbar.

4.2 Ergebnisse Bünz

In der folgenden Abbildung Abb. 4-5 wird der im Jahre 2020 gemessene Jahresgang am Logger Nr. 4 mit Lufttemperaturen und Erwartungswerten der unteren Forellenregion dargestellt:

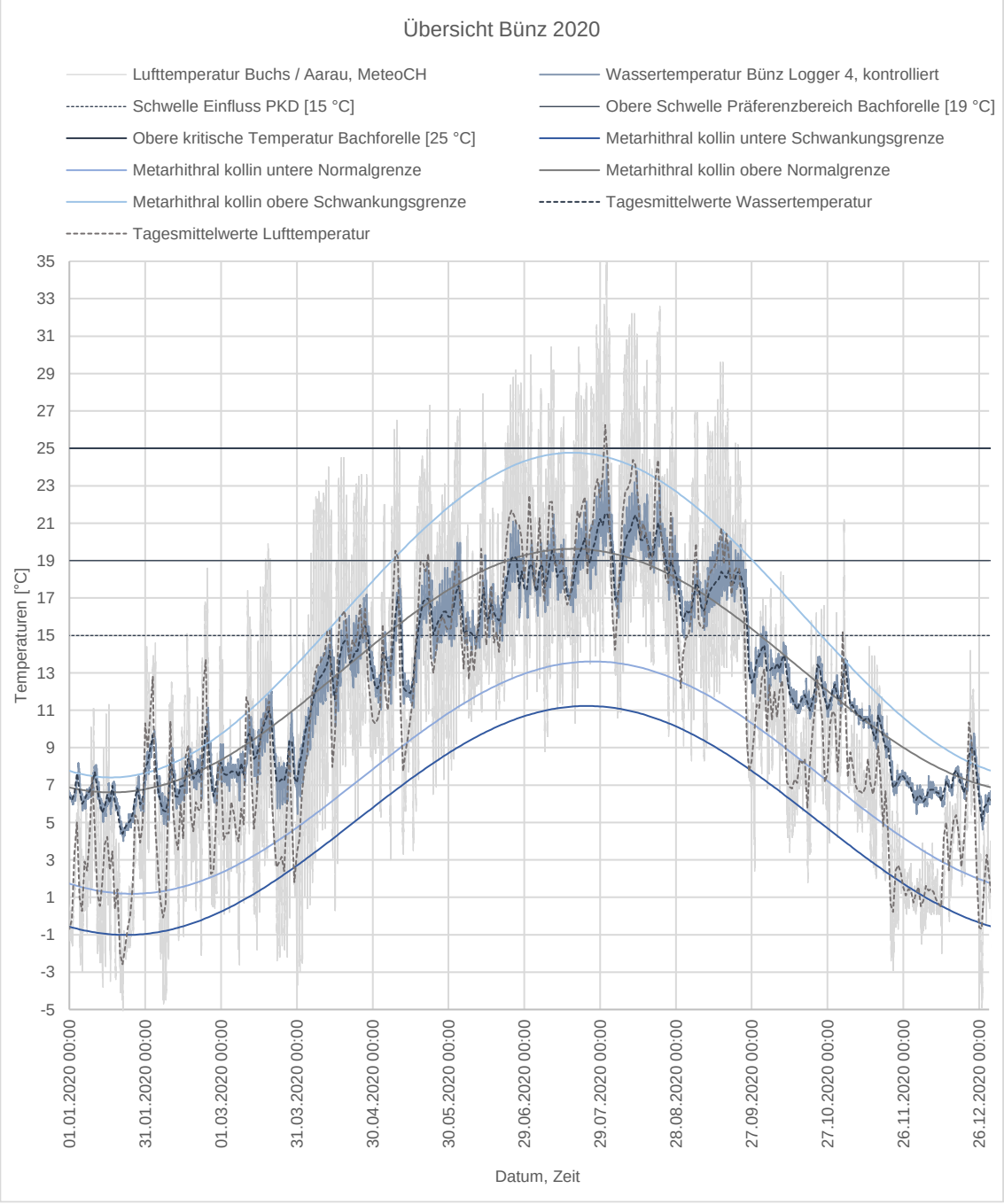


Abb. 4-5: Übersicht der am Logger Bünz 4 im Jahre 2020 gemessenen Wassertemperaturen gegenübergestellt mit in der unteren Forellenregion relevanten Temperaturbereichen und - grenzen

Der gewählte Logger Bünz 4 hatte von den untersuchten Loggern hinsichtlich Maximaltemperaturen im Sommer die höchsten Wassertemperaturen und stärksten Tagesschwankungen gemessen. Auch hier folgte die Wassertemperatur der Lufttemperatur, deutliche Temperatursprünge sind ebenfalls sichtbar. Die Lufttemperaturen schwankten bis ca. 20 °C / Tag, die Wassertemperaturen max. 4.5 °C / Tag.

Im Winter lag die mittlere Wassertemperatur auch an der Bünz häufig über der mittleren Lufttemperatur, während dies im Sommer meist umgekehrt war.

Während die obere kritische Temperaturgrenze von 25 °C für Bachforellen nie überschritten wurde (max. am 31.07.2020 mit 24.2 °C), lagen die Wassertemperaturen von Juni bis September an 74 Tagen über der Präferenztemperatur von 19 °C. Die Einflussgrenze PKD von gemittelten Tageswassertemperaturen > 15 °C war von Mitte Mai bis Ende September fast durchgehend, unterbrochen von 2 Einzeltagen, überschritten. Im Winter und März wurden die optimalen Bereiche für Bachforelleneier von 9 °C an 27 Tagen überschritten. Generell lagen die Wassertemperaturen, wie an der Wigger, oberhalb des gemittelten Normalbereiches und häufig nahe an der oberen Normalgrenze der kollinen unteren Forellenregion.

Im Jahre 2020 wurden an der Bünz an 56 Tagen Niedrigwasserbedingungen (< Q_{347}) gemessen.

Das Längenprofil der Bünz vom Hitzetag 31.07.2020 stellt die gemessenen Wassertemperaturen (wiederum die Maximal-, Mittel- und Minimalwerte) an der Bünz im Längsverlauf dar. Die obersten zwei Logger 1 und 5 (unterhalb mehrheitlich genügend beschatteter Strecke und Stauhaltung) hatten die am wenigsten ausgeprägten Tagesschwankungen gemessen. Vom Logger 1 abwärts war bezogen auf den Mittelwert ein ziemlich ausgeglichener Verlauf aufgezeichnet worden (generell ca. 21.5 °C). Weiter ist ersichtlich, dass unterhalb Logger 5 sowohl die Tagesmaxima wie auch die Variabilität über den Tag bachabwärts laufend anstiegen, bedingt durch eine Zunahme der Maximal- (ca. 0.1 °C / 100 m) und eine Abnahme der Minimalwerte. Diese Abschnitte werden als grösstenteils ungenügend beschattet bezeichnet. Während am Logger 5 eine maximale Wassertemperatur von ca. 22.3 °C und eine Tagesschwankung von ca. 1.6 °C gemessen wurde, betragen diese Werte beim Logger 4 nach rund 2 km ca. 24.2 °C und ca. 4.4 °C.

Die rund 50 m unterhalb Logger Nr. 4 liegende kantonale Station Othmarsingen hatte mit ca. 0.15 °C leicht tiefere Mittel- und Minimalwerte gemessen.

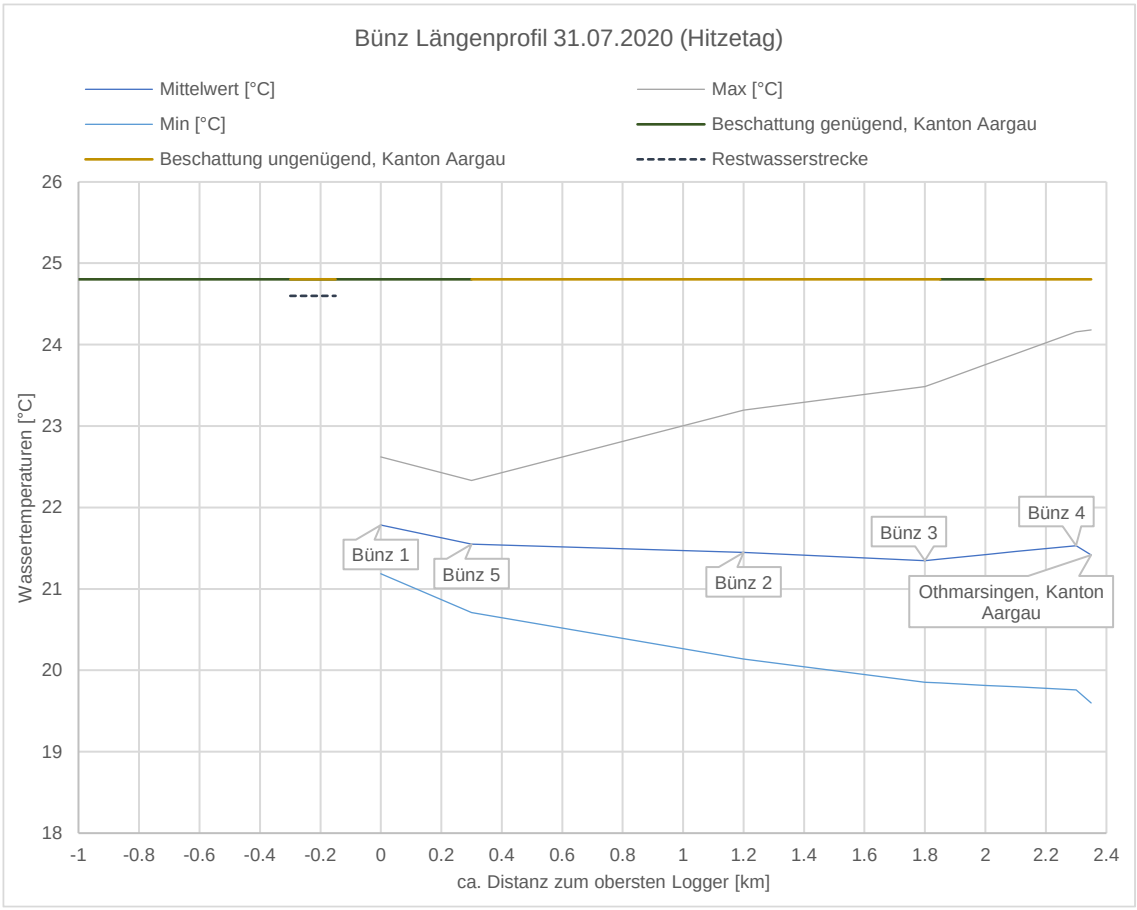


Abb. 4-6: Längenprofil Bünz 31.07.2020 mit jeweils an der Bachsohle gemessenen Wassertemperaturen (Mittel-, Maximal- und Minimalwerte), ergänzt mit Angaben des Kantons Aargau [1], [36], [37]

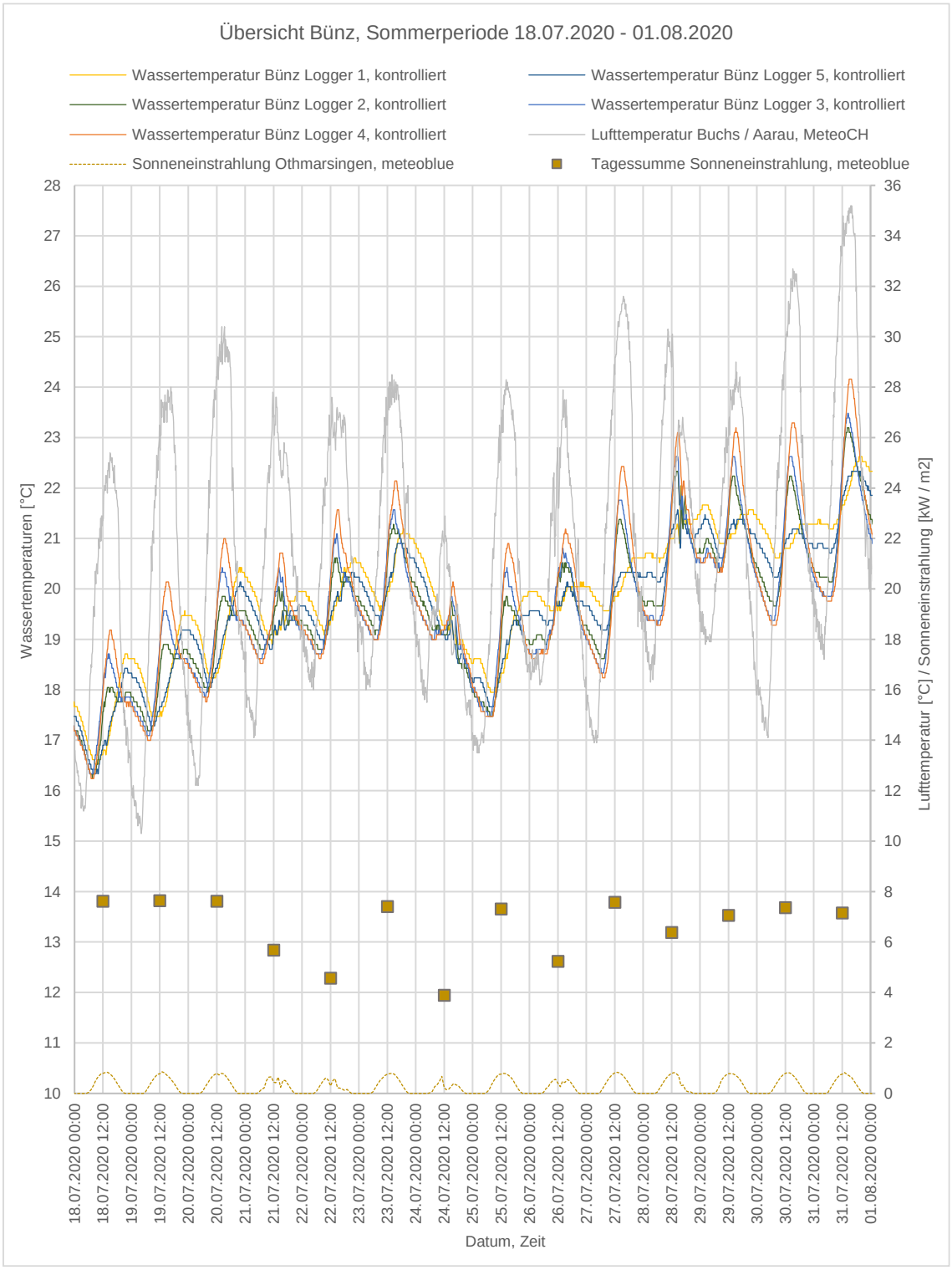


Abb. 4-7: Gegenüberstellung aller Bünz-Logger (Sohle) in Sommerperiode 2020

In der vorangehenden Abbildung Abb. 4-7 werden die an der Bünz an allen Loggern an der Sohle in der ausgewählten Sommer- und Hitzeperiode gemessenen Wassertemperaturen mit Lufttemperaturen dargestellt. Es waren alles Sommertage (ausser 24.07.) und häufig Hitzetage (20., 27., 28., 30.07. bis 01.08.). Ab dem 20.07. waren alles Niedrigwassertage. Der 24., 26. und 28.07. waren Regentage mit 1 – 2 mm Tagesmenge. Die Tagessummen der Sonneneinstrahlung lagen zwischen ca. 5.2 bis 7.6 kW / m^2, ausser am 22. (4.6 kW / m^2) und 24.07. (3.9 kW / m^2).

Die maximalen Wassertemperaturen traten auch an der Bünz fast zeitgleich mit den maximalen Lufttemperaturen auf. Die minimalen Wassertemperaturen traten im Vergleich zur Luft später auf, folgten dann aber auch den minimalen Lufttemperaturen. Der Anstieg der Wassertemperaturen erfolgte verglichen mit der Lufttemperatur jeweils verzögert, während die Abkühlung ziemlich zeitgleich begann.

Die Logger 2 bis 4 hatten Tagesschwankungen von ca. 2 bis 4 °C gemessen mit Minimalwerten am Morgen ca. 07:00 bis 09:00 und Maximalwerten am Nachmittag ca. 14:00 bis 16:00. Die Logger 1 und 5 hatten hingegen vergleichsweise stärker gedämpfte Tagesgänge gemessen mit Minimalwerten am Morgen um ca. 09:00 bis 12:00 und Maximalwerten nachts zwischen ca. 22:00 bis 24:00. Diese nächtlichen Spitzen zeigten sich abgeschwächt zum Teil (z.B. 29.07.) auch noch an den darunterliegenden Loggern (Temperaturdrift).

An der Bünz führten die Tage (18. – 20.07., 23., 25., 27. – 31.07.) mit Einstrahlungssummen grösser als 6 KW / m^2 meist zu sich kontinuierlich erhöhenden Minimal- und Maximalwerten (ausser 30. und 31.07.).

4.3 Hypothesentests

Hypothese 1: An Sommertagen / Hitzetagen mit Niedrigwasserabfluss ist die maximale Wassertemperatur unterhalb der Blockrampe Wigger Oftringen im Vergleich zur maximalen Wassertemperatur oberhalb Blockrampe erhöht.

H_0: $\mu_D \geq 0$

H_1: $\mu_D < 0$ [6]

Die Nullhypothese konnte weder an Sommer- noch an Hitzetagen abgelehnt werden (positiver Mittelwert).

Aufgrund dieses Ergebnisses wurde eine neue Hypothese aufgestellt:

Hypothese 1.2: An Sommertagen / Hitzetagen mit Niedrigwasserabfluss ist die maximale Wassertemperatur unterhalb der Blockrampe Wigger Oftringen im Vergleich zur maximalen Wassertemperatur oberhalb Blockrampe um 0.12 bzw. 0.08 °C vermindert.

H_0: $\mu_D \leq 0.12 / 0.08$

H_1: $\mu_D > 0.12 / 0.08$ [6]

Die Nullhypothese konnte sowohl an Sommer- (0.12) wie auch Hitzetagen (0.08) abgelehnt und die Alternativhypothese angenommen werden (p > 99.99).

Hypothese 2: An Sommertagen / Hitzetagen mit Niedrigwasserabfluss schwankt die Wassertemperatur pro Tag unterhalb der Blockrampe Wigger Oftringen stärker als oberhalb der Blockrampe.

H_0: $\mu_D \geq 0$

H_1: $\mu_D < 0$ [6]

Die Nullhyphothese konnte weder an Sommer- noch an Hitzetagen abgelehnt werden (positiver Mittelwert).

Aufgrund dieses Ergebnisses wurde auch hier eine neue Hypothese aufgestellt:

Hypothese 2.2: An Sommertagen / Hitzetagen mit Niedrigwasserabfluss schwankt die Wassertemperatur pro Tag unterhalb der Blockrampe Wigger Oftringen um 0.18 bzw. 0.15 °C schwächer als oberhalb der Blockrampe.

H_0: $\mu_D \leq 0.18 / 0.15$

H_1: $\mu_D > 0.18 / 0.15$ [6]

Die Nullhypothese konnte sowohl an Sommer- (0.18) wie auch Hitzetagen (0.15) abgelehnt und die Alternativhypothese angenommen werden (p > 99.99).

[6] Der unten an der Blockrampe gemessene Wert wird von diesem oberhalb abgezogen

Hypothese 3: An Sommertagen / Hitzetagen mit Niedrigwasserabfluss ist die maximale Wassertemperatur der im Flusskörper schwimmenden Logger höher im Vergleich zur maximalen Wassertemperatur der Logger an der Sohle.

H_0: $\mu_D \leq 0$

H_1: $\mu_D > 0$ [7]

Die Nullhypothese konnte weder an Sommer- noch an Hitzetagen abgelehnt werden (negativer Mittelwert).

Hypothese 4: An Sommertagen / Hitzetagen mit Niedrigwasserabfluss schwankt die Wassertemperatur der im Flusskörper schwimmenden Logger stärker im Vergleich zum Logger an der Sohle.

H_0: $\mu_D \leq 0$

H_1: $\mu_D > 0$ [7]

Die Nullhypothese konnte weder an Sommer- noch an Hitzetagen abgelehnt werden (negativer Mittelwert).

Hypothese 5: An Hitzetagen (aufgrund der verbleibenden Werte keine weiteren Sommertage) mit Niedrigwasserabfluss ist die maximale Wassertemperatur der auf der Wasseroberfläche schwimmenden Logger höher im Vergleich zur maximalen Wassertemperatur der Logger an der Sohle.

H_0: $\mu_D \leq 0$

H_1: $\mu_D > 0$ [7]

Die Nullhypothese konnte nicht abgelehnt werden ($p < 99.99$).

Hypothese 6: An Hitzetagen (aufgrund der verbleibenden Werte keine weiteren Sommertage) mit Niedrigwasserabfluss schwankt die Wassertemperatur der auf der Wasseroberfläche schwimmenden Logger stärker im Vergleich zum Logger an der Sohle.

H_0: $\mu_D \leq 0$

H_1: $\mu_D > 0$ [7]

Die Nullhypothese konnte nicht abgelehnt werden ($p < 99.99$).

Die Berechnungsergebnisse und aufgelisteten gepaarten Differenzen sind im Anhang 5 sichtbar.

Alle Auswertungen in Kapitel 4.1 bis 4.3 erfolgten vor den Vergleichstests in Wasserbecken. Aus zeitlichen Gründen konnten daher z.B. keine systematischen Fehler berücksichtigt werden.

[7] Der an der Sohle gemessene Wert wird vom schwimmenden Wert abgezogen

4.4 Weitere Ergebnisse

4.4.1 Vergleichstest der Logger Blockrampe Wigger Oftringen

Vom 16.06. – 21.06.21 (Sommertage) wurden die Logger an der Blockrampe Oftringen an der jeweils gleichen Stelle im Gewässer mit den «genaueren» Loggern (Messgenauigkeit ± 0.21 °C) gegeneinander getestet (Abb. 4-8). Dazu wurden diese ca. 0.5 m von der Stahlhülle entfernt mittels Schnur an der Kette befestigt und im selben Zeitraum in der Wigger belassen, während die «weniger genauen» Logger (± 0.53 °C) dabei weiterhin in der Stahlhülse waren. Beim Einbringen der genaueren Logger lag der Logger Nr. 5 auf einer Kiesbank und wurde ins Wasser gelegt. Am Vormittag des 19.06. hatte dieser dann aufgehört zu messen. Der Gegenlogger 5 (Nr. 20847585) hatte gemittelt um 0.11 °C niedriger gemessen als sein «Nachbar» und der Gegenlogger 4 (Nr. 20847586) um 0.07 °C tiefer als der Logger Wigger 4.1. Die Vergleichsmessung erfolgte in einem Temperaturbereich zwischen ca. 16 bis 20.5 °C.

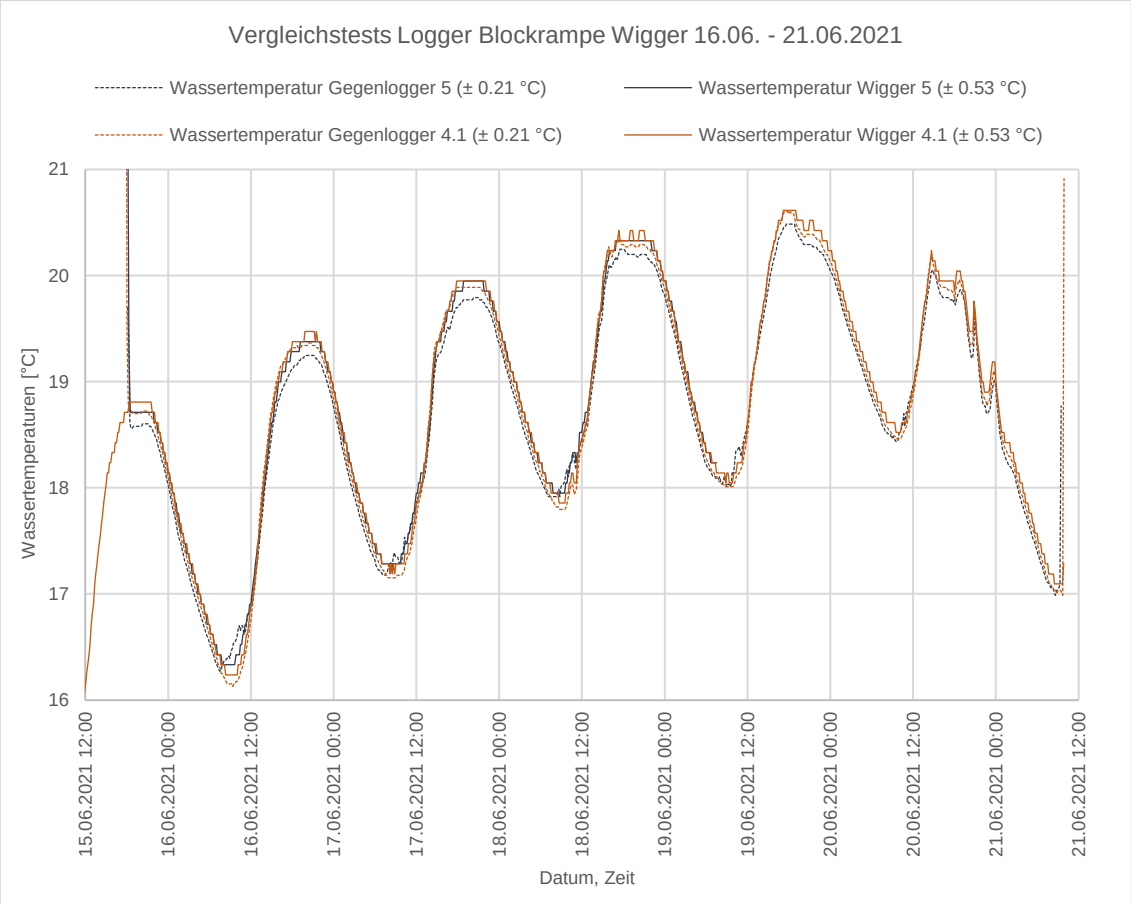


Abb. 4-8: Vergleichstest der Logger an der Blockrampe Wigger Oftringen

Mit dem Vergleich mit empfindlicheren Loggern in der Wigger und im Wasserbecken (siehe Abb. 4-8 und Abb. 4-11) zeigte sich, dass die verwendete Stahlhülse keinen Einfluss auf die Messwerte hatte. Die Logger verhielten sich im Flussbett mit Stahlhülse im Vergleich mit den Gegenloggern vergleichbar wie im Wasserbecken ohne Stahlhülse.

4.4.2 Vergleichstests der Logger in Wasserbecken

Im folgenden Diagramm (Abb. 4-9) werden die im Wasserbecken (siehe Kapitel 3.3) aufgezeichneten Temperaturverläufe aller Logger der Wigger sowie die resultierenden Differenzen 1.1 vs. 1.2; 4.1 vs. 4.2 und die maximale Abweichung aller Logger gegeneinander dargestellt [8].

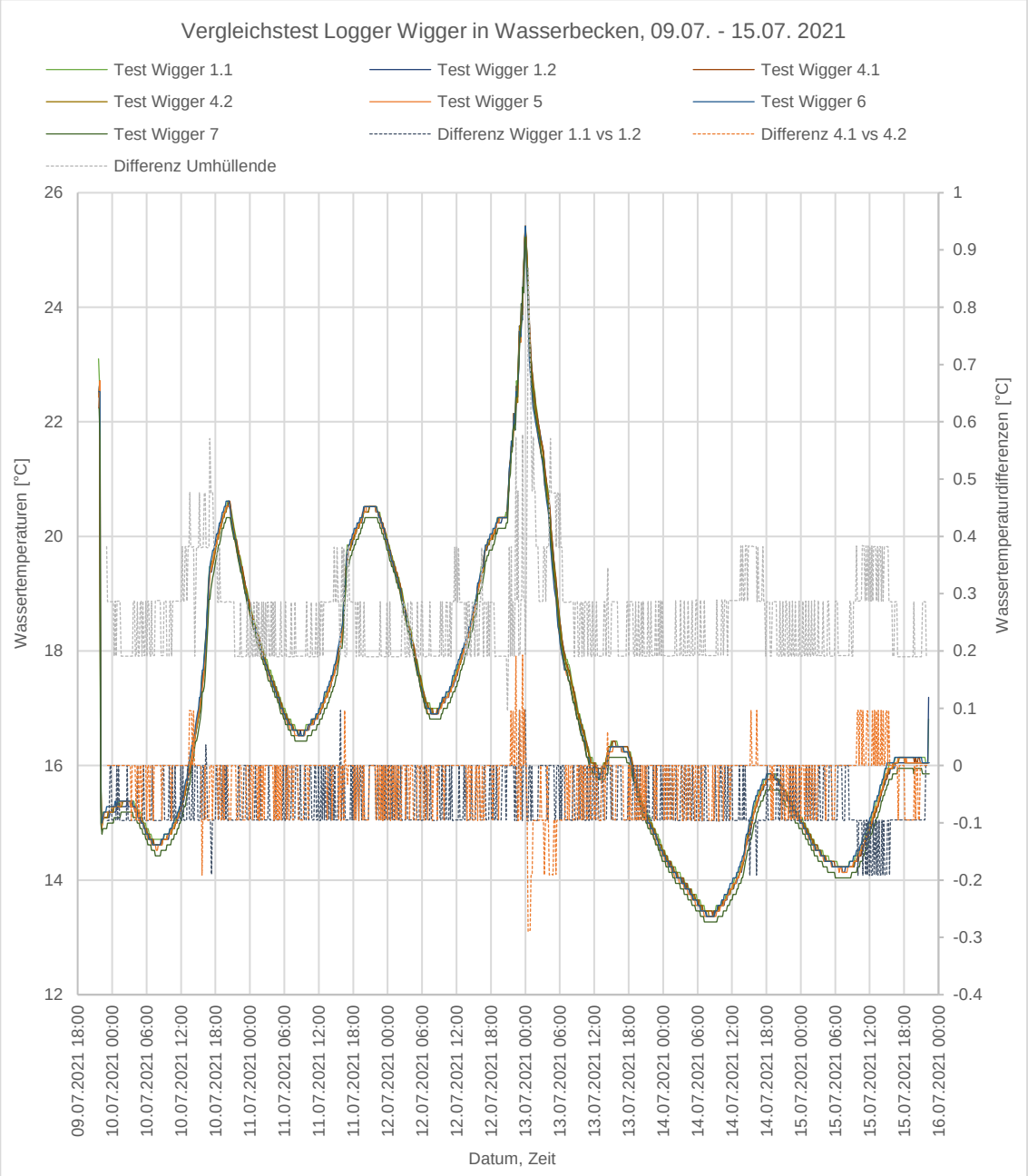


Abb. 4-9: Vergleichstest aller Logger Wigger in Wasserbecken

[8] Die im Diagramm als «Differenz Umhüllende» bezeichnete Linie ergibt sich aus dem Abstand der umhüllenden Verbindungslinien der zu jedem Zeitpunkt gemessenen Maximal- und Minimalwerte. Dazu wurde immer der kleinste Messwert aller Logger vom grössten Messwert aller Logger abgezogen.

Die Auswertung der Logger Wigger ergab (Abb. 4-9), dass diese untereinander («Differenz Umhüllende») 0.2 bis 0.6 °C abwichen. Ausnahmen waren während der künstlichen Erwärmung auf 25.5 °C aufgetreten (Annahme: versuchsbedingt) und wurden nicht weiter berücksichtigt. Die grössten verbleibenden Abweichungen entstanden in den Anstiegsphasen. Auffallend war, dass der Logger 7 konsequent ca. 0.15 °C tiefere Werte aufgezeichnet hatte. Im Vergleich zum Logger 1.2 waren die gemittelten Werte am Logger 1.1 um 0.07 °C höher; 4.1 und 4.2 waren im Mittel identisch. Die aufgezeichneten Differenzen zwischen den Loggern 1.1 vs. 1.2 und 4.1 vs. 4.2 beschränkten sich auf einen Bereich von ± 0.2 °C.

Zudem wurden die gemessen Differenzen der Tagesmaximalwerte und Tagesschwankungen ausgewertet, da diese Werte auch in den Hypothesentest miteinander verglichen worden waren. Wie in Abb. 4-10 sichtbar waren die Tagesamplituden am Logger 1.2 vs. 1.1 um 0 bis 0.2 °C höher. Die restlichen Vergleiche wichen um max. ± 0.1 °C voneinander ab.

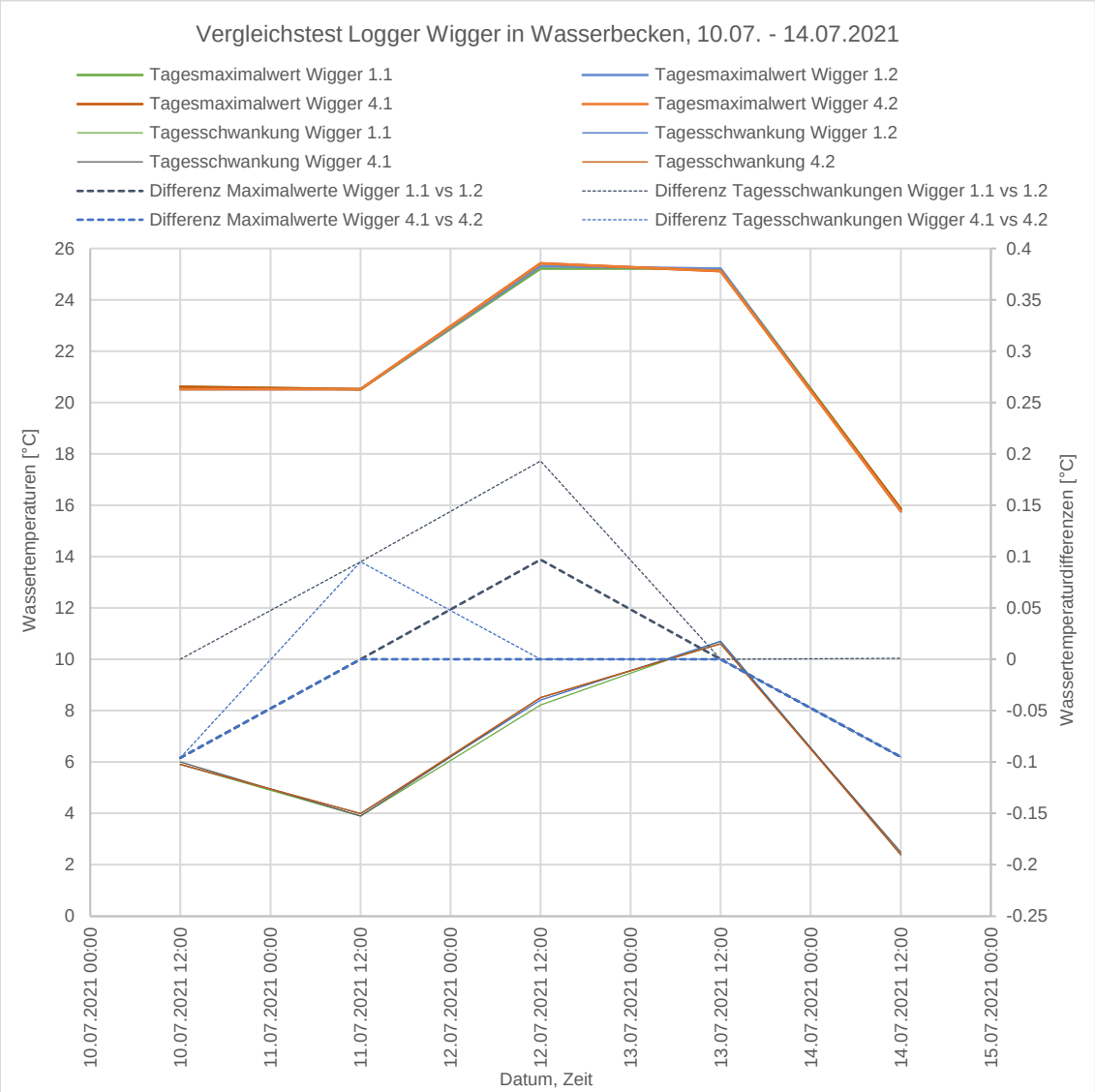


Abb. 4-10: Auswertung der Maximalwerte und Tagesschwankungen der Logger Wigger

Die an der Blockrampe Wigger Oftringen eingesetzten Logger wurden ebenfalls gegeneinander verglichen (Abb. 4-11), unter anderem um den Einfluss der Stahlhülsen einzuordnen. Nr. 5 hatte gemittelt um 0.12 °C höher gemessen als der Gegenlogger 5 (Nr. 20847585). Nr. 4 dagegen im Mittel 0.10 °C höher als der Gegenlogger 4 (Nr. 20847586). Die empfindlicheren Gegenlogger waren gegeneinander kaum abgewichen. Im Vergleich zum Logger 4.1 waren die gemittelten Werte am Logger 5 um 0.06 °C tiefer. Alle Differenzen beschränkten sich, unter Ausschluss der Erwärmungsphase, auf einen Bereich von ca. ± 0.3 °C.

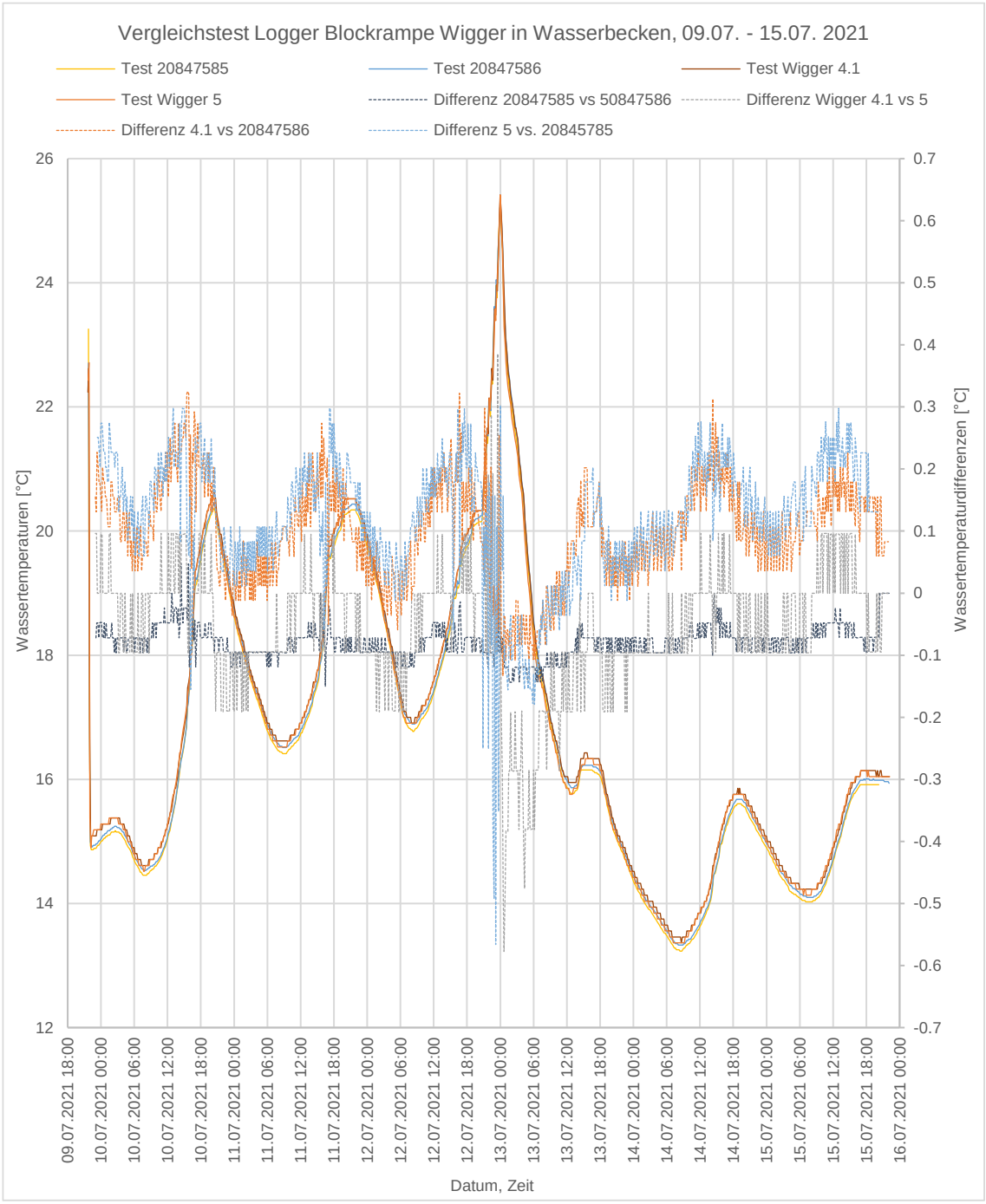


Abb. 4-11: Vergleichstest der Logger Blockrampe Wigger in Wasserbecken

Wie in Abb. 4-13 zu sehen wichen die Tagesmaximalwerte sowie -Amplituden zwischen Logger 4.1 und 5 um bis ca. 0.35 °C gegeneinander ab (Abb. 4-12).

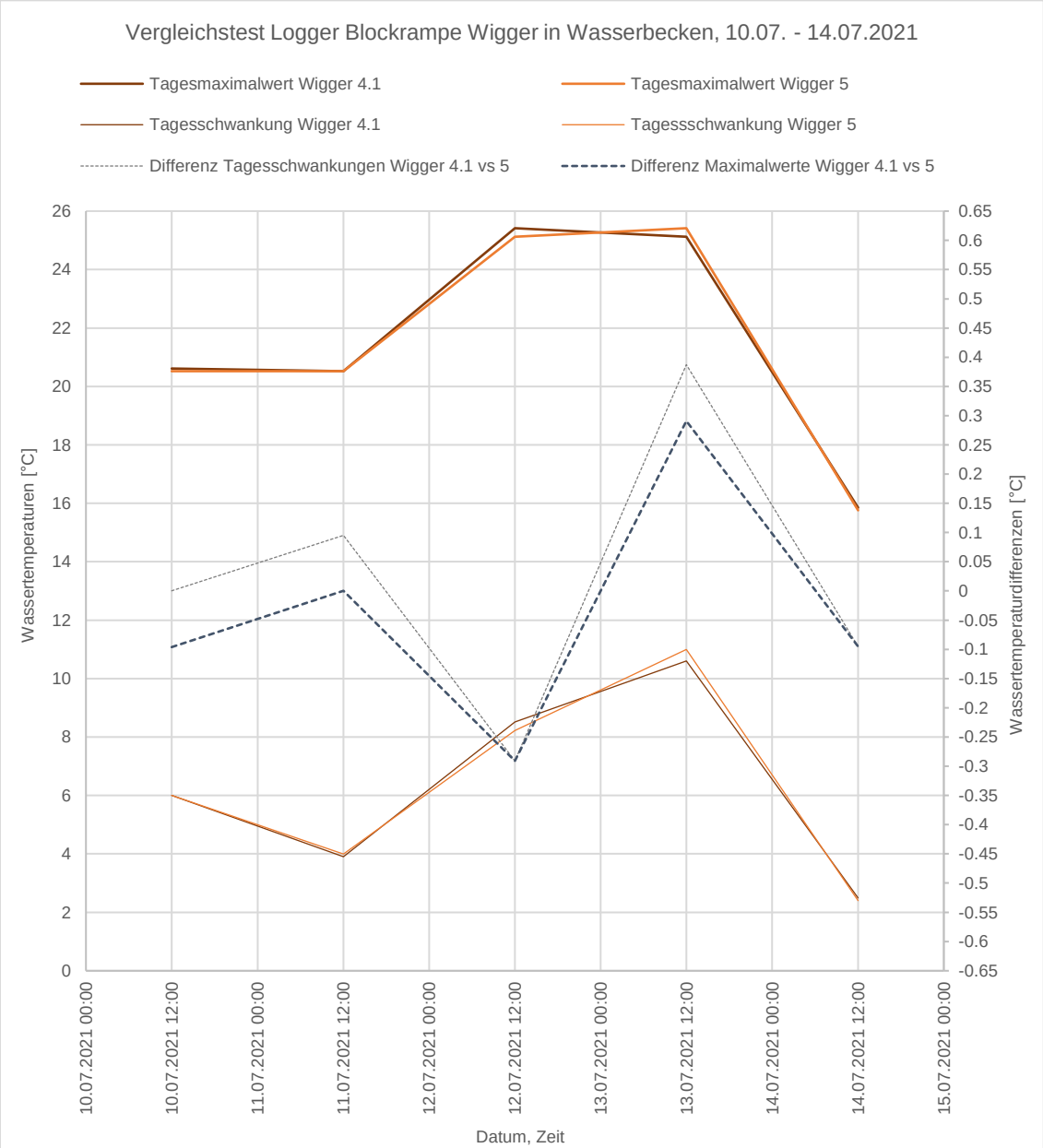


Abb. 4-12: Auswertung der Maximalwerte und Tagesschwankungen der Logger Wigger Blockrampe

Die Abb. 4-13 zeigt die im Wasserbecken gemessenen Temperaturen aller Logger der Bünz und die jeweils resultierende Differenz zwischen dem Logger 5 und 6. Im Vergleichstest wichen die Temperaturdaten der einzelnen Logger – «Differenz Umhüllende» -der Bünz bis max. 0.4 °C voneinander ab (mit einzelnen Ausnahmen bis 1 °C während der Erwärmungsphase am 13.07.21, die hier nicht weiter berücksichtigt wurde). Im Mittel hatte der Logger 6 rund 0.14 °C höher gemessen als der Logger 5; die Logger 5 vs. 6 hatten gegeneinander Differenzen von bis zu ± 0.4 °C aufgezeichnet.

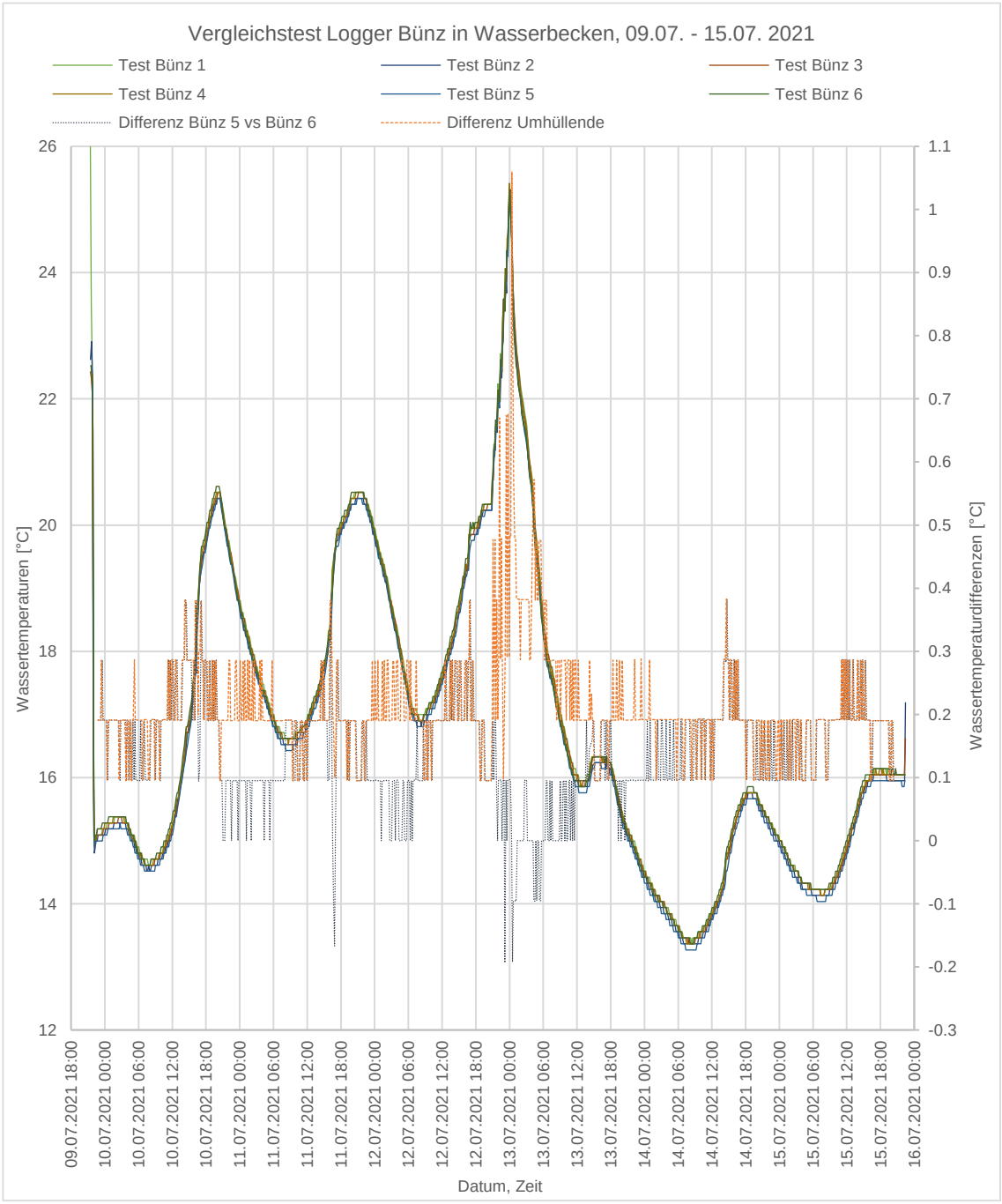


Abb. 4-13: Vergleichstest aller Logger Bünz in Wasserbecken

Abb. 4-14: Die Differenzen zwischen den Loggern Bünz 5 und 6 schwankten um bis ca. ± 0.2 °C gegeneinander.

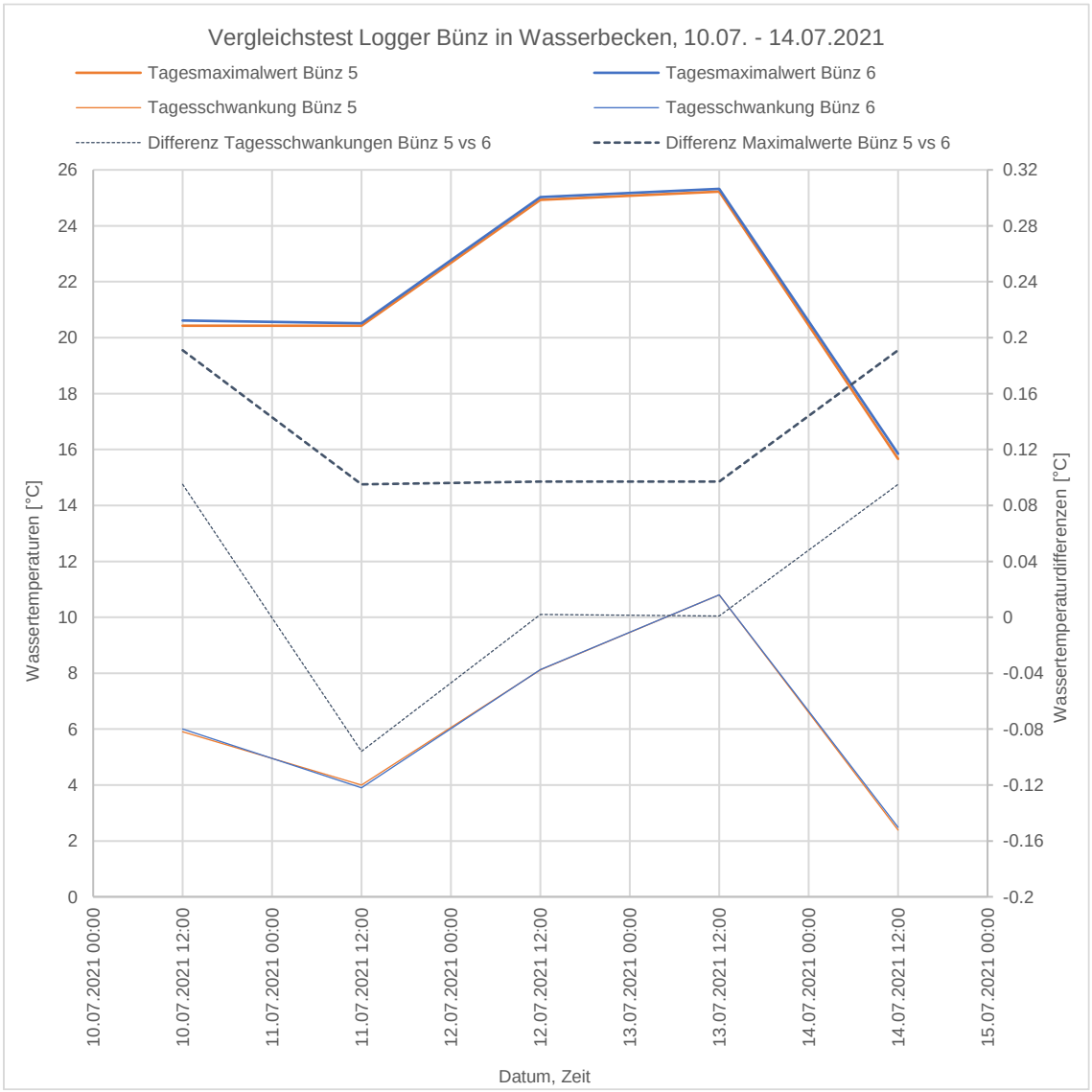


Abb. 4-14: Auswertung der Maximalwerte und Tagesschwankungen Bünz 5 und 6

Im Wasserbecken wurde ein Temperaturbereich von ca. 13 bis 25.5 °C getestet.

4.4.3 Eingegrabener Logger Wigger 1

Der Logger Nr. 1.2 (an der Sohle in Stahlhülse) war am 29.05.2020 mit Geschiebe überdeckt. Er wurde unter Wasser mit Pickel und in Handarbeit ausgegraben. Schätzungsweise war die Stahlhülse mit Logger rund 60 cm in der Flusssohle eingegraben. Da zwischen der Stahlhülse und dem Beginn der Schnur des schwimmenden Loggers 1.1 eine Distanz von rund 2 m bestand ist denkbar, dass der schwimmende Logger nicht oder weniger eingegraben war (dies konnte aus den mündlichen Aussagen aber nicht rekonstruiert werden).

Der Logger 1.2 an der Sohle hatte zwischen 02.05 (Beginn mit Serie von Tagen mit höheren Abflüssen) bis 29.05.20 weniger ausgeprägte Tageschwankungen gemessen. Diese betrugen zwischen dem 17.05 bis 29.05 am Logger in der Stahlhülse ca. 1 °C / Tag, während der schwimmende Logger Tagesschwankungen von ca. 4 °C / Tag aufgezeichnet hatte. Nach dem Ausgraben lagen die aufgezeichneten Wassertemperaturen beider Logger wieder nahe beieinander.

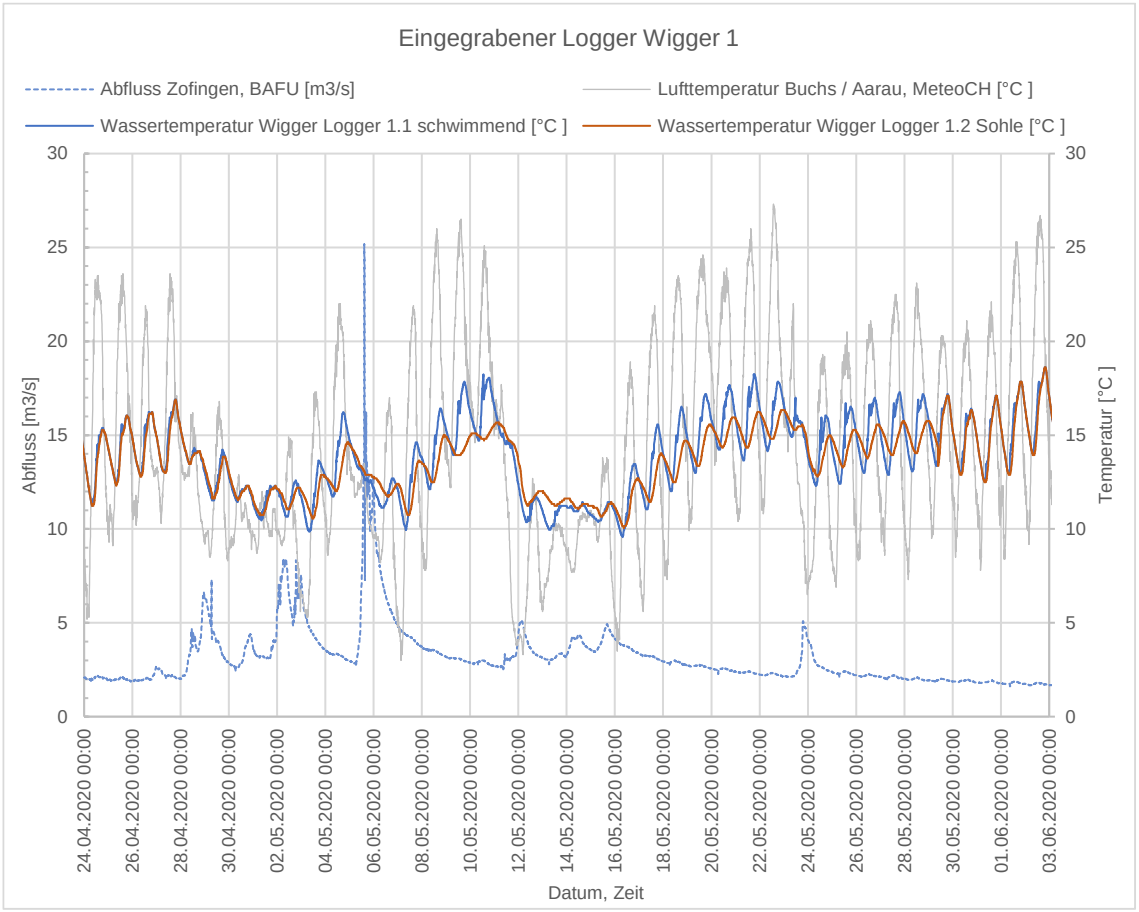


Abb. 4-15: Temperaturverhalten des eingegrabenen Loggers Wigger 1.2

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Ergebnisse

Die in beiden untersuchten Fliessgewässern im Jahr 2020 gemessenen Wassertemperaturen zeigten visuell höhere Werte, als dies in vergleichbaren «unbeeinflussten» Gewässern beobachtet worden war (im oberen Bereich der typischen Temperaturbänder nach Müller [32]. Dabei beziehen sich die genannten und dargestellten Temperaturbänder bereits auf Datenreihen nach 1990 und zeigen somit einem «dynamischen», den Klimawandel bis 1990 bereits einschliessenden Normal- und Schwankungsbereich nach dem Temperatursprung 1987 / 1988 [32]).

Im Jahr 2020 wurden deutlich mehr (an der Wigger rund doppelt, an der Bünz rund drei Mal so viele) Niedrigwassertage (gemittelter Abfluss < Q_{347}) gemessen [1] als dies in der Referenzperiode (Wigger 1980 – 2017; Bünz 1977 – 2019 [1]) der Fall war. Insbesondere in den Restwasserstrecken der Wigger sind die errechneten Niedrigwasserbedingungen nahezu ganzjährig existent.

Die festgestellten Temperatur- und Abflussbedingungen übers Jahr 2020 (Anhang 4) besonders in den Hitze- und Trockenperioden, sind für die Leitfischart Bachforelle (stellvertretend gut untersuchte Art von vielen weiteren dieses Lebensraums) und den Präferenzangaben (Küttel [26]) kritisch. Das Auftreten des Erregers von PKD kann unter diesen Temperatur-Bedingungen grosse Bestände auslöschen (Burkhardt [8]). Der Faktor Wassertemperatur beeinflusst zudem zahlreiche physikalische und chemische Vorgänge im Wasser (beispielsweise die Abhängigkeit zwischen Sauerstoffsättigung und Sauerstoffbedarf [24]).

Die Wassertemperaturen der in Längenprofilen untersuchten Gewässerabschnitte waren am Hitzetag 31.07.2020 im Flussverlauf heterogen verteilt. Es zeigte sich eine visuell gute Übereinstimmung zwischen rascher Erwärmung und Zunahme von Tagesschwankungen bei den vom Kanton Aargau als ungenügend beschattet klassierten Abschnitten bzw. moderatere Temperaturextreme nach längeren, als genügend beschattet klassierten Abschnitten. Diese Beobachtung wurde nicht auf statistische Signifikanz untersucht, deckt sich jedoch mit den Aussagen anderer Autoren (z.B. [31], [40]).

Es werden keine langjährigen Messreihen diskutiert, sondern ausschliesslich der Jahresverlauf 2020, wobei zu erwähnen ist, dass in Abb. 4-1 und Abb. 4-5 Logger ausgewählt wurden mit unter den Loggern hohen Maximalwerten und -schwankungen. Weiter wurden nur einzelne Logger-Standorte beschrieben und mittels Normalbereichen und Grenzwerten gegenübergestellt. Aus der Literatur bekannt, und in den ausgewerteten Längenprofilen auch sichtbar, ist eine Heterogenität im Längsverlauf. Die Beobachtungen können daher nicht ungefragt auf alle Gewässerabschnitte oder andere Fliessgewässer übertragen werden.

Anhand der ausgewerteten Sommer und Winterperioden sowohl der Wigger wie auch der Bünz zeigte sich aus Sicht des Verfassers eine Deckung mit der aus der Literatur bekannten Feststellung, dass die Lufttemperatur ein guter Prädiktor der Wassertemperatur ist (z.B. Broadmeadow [7]). Die Wassertemperaturen folgten jeweils weniger oder mehr verzögert der Lufttemperatur. Übers Jahr waren die Wassertemperaturen generell weniger extrem als die Lufttemperaturen (im Winter gemittelt wärmer; im Sommer kühler), was auf die hohe spezifische Wärme des Wassers zurückgeführt werden kann (Jungwirth [24]).

Im Sommer führten Serien mit hoher Sonneneinstrahlung häufig zu kontinuierlich wärmeren maximalen Tages-Wassertemperaturen und am nächsten Morgen zu jeweils erhöhten Basistemperaturen. Tage mit vergleichsweise kleinen Tagessummen der Sonneneinstrahlung resultierten im Sommer oft in sich weniger stark erwärmendem Wasser (meist tiefere Maximalwerte). Diese Beobachtung deckt sich mit der Literaturaussage, dass die Sonneneinstrahlung Treiber der Gewässererwärmung ist (Pfammater [38]).

Die meisten Logger in den Restwasserstrecken der Wigger reagierten im Sommer empfindlicher auf Einflüsse wie z.B. die Lufttemperatur als die Logger der Bünz, welche nicht in einer Restwasserstrecke lagen. Was unter anderem durch höhere Tagesschwankungen sichtbar war (siehe z.B. Logger 6 in Abb. 4-3). Bekannt ist aus der Literatur, dass die Wassertemperaturen bei grösseren Verhältnissen zwischen Wasseroberfläche zum Volumen stärker auf Temperatureinflüsse reagieren (z.B. Sieber / Mende [40]). Eine mögliche Erklärung der obgenannten Beobachtung könnte daher die im Vergleich häufig stärker zusammengefasste und beschattete Niedrigwasserrinne in den revitalisierten Abschnitten an der Bünz sein (Vermutung). Die stärksten Ausschläge hatte denn auch der Logger Wigger 6 gemessen, welcher nach einer längeren kaum beschatteten Strecke mit häufig kaum konzentrierter Niedrigwasserrinne lag (siehe Abb. 3-1). Dies wurde jedoch nicht genauer untersucht.

Ausnahmen der obgenannten Aussagen waren die Tages-Temperaturgänge der Logger Nr. 1 Wigger und Bünz (jeweils die obersten Logger, die beide unterhalb von Stauhaltungen und grösstenteils genügend beschatteten Abschnitten lagen) mit überraschend verspäteten Minimalwerten um die Mittagszeit und Maximalwerten um Mitternacht und deutlich abgeschwächten Tagesamplituden. Die Maximaltemperaturen um Mitternacht sind generell und auch in Bezug auf die Literatur erstaunlich, da die Einflüsse auf die Wassertemperatur und auch die Erfahrung ab Sonnenuntergang eine Abkühlung und nicht einen weiteren Anstieg erwarten lassen würden. Dies wurde nicht genauer untersucht, jedoch ist im Anhang 6 ein kurzer Erklärungsversuch zu finden.

Zum Temperaturverhalten von Blockrampen sind keine Studien bekannt, zumal Ergebnisse auch kaum übertragbar sein dürften. Aufgrund des Literaturstudiums wurde infolge ungenügender Beschattung bei gleichzeitiger Verbreiterung des Flussbetts (im Untersuchungsabschnitt von ungefähr 10 auf 20 m verdoppelt) auf der Blockrampe Oftringen tendenziell eine Erwärmung tagsüber an Sommer- / Hitzetagen bei Niedrigwasser erwartet (die Fliessstrecke oberhalb Logger Nr. 4 ist genügend beschattet).

Hypothese 1: Die aufgezeichneten Messwerte zeigten auf der Blockrampe an Sommer- und Hitzetagen eine statistisch signifikante Abkühlung von ca. 0.1 °C. (vor dem durchgeführten Vergleichstest). Der Vergleich im Wasserbecken zeigte, dass der Logger 5 gemittelt 0.06 °C tiefer gemessen hatte als der Logger 4.1. Beide Resultate liegen für sich innerhalb der Auflösung der Messgeräte von ± 0.14 °C. Die Maximalwerte beider Logger wichen bis ± 0.3 °C pro Tag voneinander ab. Damit relativiert sich die errechnete Abkühlung über die Blockrampe. Mit den verwendeten Loggern konnte bei diesen geringen Temperaturunterschieden nicht gesagt werden ob tatsächlich eine leichte Abkühlung auf der Blockrampe stattfand. Eine messbare Erwärmung auf der Blockrampe kann aber ausgeschlossen werden.

Hypothese 2: Mit den ausgewerteten Messresultaten konnte zudem eine statistisch signifikante Dämpfung der Tagesgänge an Sommer- und Hitzetagen von ca. 0.15 °C ermittelt werden (vor dem durchgeführten Vergleichstest). Die Tagesamplituden im Wasserbeckentest wichen zwar einerseits bis zu ca. ± 0.35 °C voneinander ab. Der Logger 5 hatte aber andererseits generell leicht tiefer gemessen, wobei die beiden Temperaturverläufe meist durchaus parallel zueinander lagen. Damit könnte die festgestellte leichte Dämpfung der Tagesamplituden über die Blockrampe Wigger Oftringen als wahrscheinlich angenommen werden (Annahme).

Aus den Hypothesen 1 und 2 zusammen konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass auf der Blockrampe keine messbare Erwärmung an Sommer- und Hitzetagen bei Niedrigwasser stattgefunden hatte, aber wahrscheinlich eine Dämpfung der Tagesamplitude nach dem Abfliessen über die Blockrampe um ca. 0.15 °C. Da der untere Logger 5 generell zu tief gemessen hatte, dürfte der in Abb. 4-4 dargestellte gedämpfte Tagesgang hauptsächlich durch erhöhte nächtliche Minimaltemperaturen unterhalb der Blockrampe bedingt sein (Annahme).

Die nicht existente messbare Erwärmung auf der Blockrampe war eher erstaunlich, da die verstärkte Sonneneinstrahlung bei gleichzeitiger Verbreiterung des Flussbetts sich ja dennoch auswirkte. Denn im unterhalb angrenzenden Flussabschnitt zwischen Logger 5 und 6, welcher mit der Blockrampe vergleichbar unbeschattet war, wurde beispielsweise am Hitzetag 31.07.20 ca. 0.35 °C / 100 m Erwärmung bezogen auf den Tagesmaximalwert gemessen.

Die möglichen Ursachen, der auf der Blockrampe wahrscheinlich stattfindenden Dämpfung der Tagesamplituden, konnten aus zeitlichen Gründen nicht untersucht werden. Dennoch wird im Anhang 6 versucht mögliche Erklärungen zu finden.

Hypothesen 3 und 4: Die in denselben Wasserschichten festgestellten Temperaturunterschiede in Pools (bis ca. 3 °C Differenz in Pooltiefen < 1.65 m im Temperaturbereich zwischen ca. 23 bis 26 °C ohne Angabe von Fliessgeschwindigkeiten gemäss Elliot [11]) konnten in der Wigger nicht gemessen werden. In den untersuchten Wasserschichten zwischen der Gewässersohle und rund 30 cm darüber, bei abgeschätzten Fliessgeschwindigkeiten von ca. 0.4 bis 1.5 m / s ([2], [20]) und im Temperaturbereich zwischen ca. 17 bis 23.5 °C konnten keine Temperaturunterschiede festgestellt werden. Untersucht wurden zwei Kolke vor einer Palisadenschwelle (Schicht ca. 0.25 bis 0.55 cm unter Wasser) und ein «leichter Kurvenkolk» (Schicht ca. 0.45 bis 0.75 cm unter der Oberfläche). Auch an den heissen Tagen der Jahre 2019 / 2020, bei gleichzeitig konstant niedrigen Abflussbedingungen < Q_{347} (Restwasserstrecken) und den ausgeschlossenen potenziellen Einflüssen Regen / Wind konnten keine Hinweise auf Temperaturunterschiede in verschiedenen Schichten der Wigger gefunden werden.

Die aufgezeichneten Differenzen an Sommer- und Hitzetagen an der Wigger wichen in beide Richtungen voneinander ab, ohne signifikante Tendenz. Die Vergleichstests in den Becken der Logger Wigger 1.1 vs. 1.2 und 4.1 vs. 4.2 im selben Temperaturbereich zeigten keine systematischen Abweichungen. Sie hatten gegeneinander innerhalb 0.2 °C genau gemessen (nahe an der Auflösung der Logger von ±0.14 °C). Für das Messen von lokalen kleinen Differenzen wären empfindlichere Logger nötig gewesen.

Was als unklar verbleibt ist das Verhalten der an einer Schnur unter Auftrieb im Wasser befindlichen Logger bei Turbulenzen und nach Hochwassern. Es ist nicht auszuschliessen, dass Temperaturen der beiden Logger bei geringeren Höhenunterschieden als 30 cm (oder auch gar keinen) aufgezeichnet wurden.

Hypothesen 5 und 6: Auch bei den durchgeführten Vergleichen zwischen den Wassertemperaturen der Sohle und der Wasseroberfläche (Δh ca. ≤ 80 cm bei Niedrigwasserführung) an der Bünz konnten bei abgeschätzten Fliessgeschwindigkeiten von ca. 0.4 bis 1.5 m / s [3] im Temperaturbereich zwischen ca. 20 bis 21.5 °C keine signifikanten Temperaturunterschiede festgestellt werden. Untersucht wurde ein Kolk vor einer Palisadenschwelle. Das Messen der Wassertemperaturen auf der Wasseroberfläche mit freischwimmendem Logger stellte sich als anspruchsvoll heraus. Durch Datenausfälle (Luftmessungen) verblieben wenige Werte, aus denen keine statistische Signifikanz abgeleitet werden konnte. Die Berechnungen reagierten dabei sehr empfindlich auf einen einzelnen abweichenden Wert. Wenn dieser ausgeschlossen wurde, resultierte ein signifikanter Temperaturunterschied von ca. 0.5 °C. Durch den durchgeführten Vergleichstest zeigte sich auch, dass der obere Logger gemittelt ca. 0.14 °C höher gemessen hatte. Es scheint dennoch möglich, dass mit mehr brauchbaren Messwerten ein statistisch signifikanter Temperaturunterschied zwischen dem oberen (halb an der Luft befindlichen und der Sonne ausgesetzten) Loggers und diesem an der Sohle feststellbar wäre (auch in [40] bei Messungen ohne Abdeckung festgestellt).

Diese Schichten dürften allerdings für die genannten Leitarten kaum interessant sein. Der Aspekt ist allenfalls bei in letzter Zeit vermehrt durchgeführten Drohnenflügen zur Messung der Temperaturen auf Wasseroberflächen zu berücksichtigen.

Die abgeschwächten Amplituden des eingegrabenen Loggers (Abb. 4-15) sind vermutlich auch durch den Einfluss des Sediments [14] erklärbar. Dies wurde nicht weiter untersucht.

Zu bedenken ist, dass bei allen Auswertungen in der Arbeit nur bekannte Daten berücksichtigt werden konnten. Es verbleiben zahlreiche unbekannte Wassertemperatur-Einflüsse wie z.B. Kondensation / Verdunstung, Temperatureinträge von Grundwasser usw. Der Einfluss der Zuflüsse konnte nur bei der Blockrampe Oftringen als vernachlässigbar ausgeschlossen werden. Zudem sind die ausgewerteten Daten nur beschränkt genau (z.B. Wetterdaten häufig nicht vor Ort gemessen oder modelliert). Ferner wurden nur die Sommer 2019 und 2020 untersucht. Infolge von Datenausfällen waren die untersuchbaren Perioden zum Teil weiter verkürzt.

5.2 Fazit und Empfehlungen für die wasserbauliche Praxis

Eine generelle auf die Wassertemperatur bezogene, wasserbauliche Empfehlung zu Blockrampen oder Kolken konnte aus der Arbeit nicht abgeleitet werden. Festgestellt wurde eine Wassertemperatur-heterogenität an allen drei Gewässerabschnitten beider Gewässer im Längsverlauf. Als vermutlich offensichtlich konnte der kühlende und dämpfende Einfluss der Beschattung herausgestrichten werden. In der Arbeit wurde zudem angenommen, dass die in den Restwasserstrecken der Wigger im Vergleich zur Bünz (keine Restwasserstrecken) stärkeren Temperaturschwankungen mit dem vergrösserten Verhältnis zwischen Wasseroberfläche und Abflussvolumen zusammenhängen könnte. Bekannt ist aus der Literatur [32] und auch in der Arbeit sichtbar (z.B. Abb. 4-3), dass Wasserspeicher zu gedämpften Tagesamplituden und damit geringeren Temperaturspitzen führen können. Bei den durchgeführten Wassertemperaturauswertungen verbleiben zahlreiche weitere, meist unbekannte Temperatureinflüsse, die quantitativ nicht ausgewertet werden konnten.

Wichtig erscheint dem Verfasser im Hinblick auf die festgestellten, für die Leitfischarten Bachforelle und Äsche kritischen Wassertemperaturbedingungen bei gleichzeitig ungünstigen Klimaprognosen und sich gegenseitig verschärfenden Effekten (z.B. Sauerstoffsättigung vs. Sauerstoffbedarf), die bekannten kühlenden bzw. die Wassererwärmung abschwächenden Massnahmen in Zukunft auszuschöpfen. Dabei erscheint es sinnvoll den Möglichkeiten hinsichtlich ihres möglichen Einflusses Grössenordnungen zuzuweisen.

Nachfolgend werden abgeleitete Empfehlungen *für die wasserbauliche Praxis* aufgeführt:

- Die *Fliessgewässerbeschattung mit Gehölzen* sollte konsequent bei allen Wasserbauprojekten und im Unterhalt fester Bestandteil der Projektierung und Umsetzung werden. Durch vollständige Beschattung eines mehrere 100 m langen Fliessgewässerabschnitts sind geringere maximale Tagestemperaturen von mehreren Grad (bis ca. 4 °C) möglich [31]. Als weiter motivierend kann der Umstand gesehen werden, dass die Wassertemperaturen bei geringeren Abflüssen stärker auf Temperatureinflüsse reagieren [38]. Damit nimmt die Wirksamkeit der Beschattung in den kritischen Niedrigwasserperioden zu bzw. führt im Gegenzug das Fehlen von Beschattung zu kritischen Temperaturspitzen. Für die Gehölzpflanzung ist zu bedenken, dass die Umsetzung bereits vor Eintreten der prognostizierten Temperaturextreme erfolgen sollte, um dem Aufwuchs von Gehölzen genügend Zeit zu geben. Weitere Empfehlungen aus der Literatur sind:
    - ein Beschattungsgrad von mindestens 80 %. Die Studie [7] nennt dabei eine anzustrebende Mindest-Beschattungsstrecke von 100 m bis 1 km
    - Bepflanzungen besonders am Südufer damit die Sonneneinstrahlung um die Mittagszeit abgehalten wird [31]. In [40] wird zudem empfohlen das Westufer zu beschatten um die Sonneneinstrahlung spätnachmittags, die zeitlich mit den höchsten Wassertemperaturen zusammenfällt, abzuschirmen

  - Beschattung von langsam fliessenden Strecken, damit die Aufenthaltszeit des Wassers im Schatten verlängert wird [31]
  - Pflanzung der Gehölze möglichst nahe an den Gewässerrand; prüfen ob bereits grössere Gehölze gepflanzt werden können [10]
  - Beschattung von Strecken mit erhöhter Disposition zu hohen Temperaturen wohingegen Abschnitte z.B. unterhalb eines kühlen Zuflusses weniger Priorität haben sollten [31]

- *Vernetzung*: Damit die im Flusslängsverlauf lokal unterschiedlichen Wassertemperaturen von Fischen ausgenützt werden können, müssen Fliessgewässer zumindest passierbar sein. Schon nach einer Strecke von unter 1 km können bereits 2 – 3 °C tiefere Maximaltemperaturen vorherrschen (Abb. 4-2, wobei für das Vorhandensein kühlerer Abschnitte sehr wahrscheinlich eine ausreichende Beschattung Bedingung ist). Generell muss dennoch immer, um ein Ausweichen für Gewässerlebewesen zu ermöglichen, die Vernetzung weiter gefördert werden. Dabei sollten auch die als kühler bekannten kleineren Seitengewässer (bis 5 °C, [9]) ans Fliessgewässernetz angeschlossen werden.
- Das Wasser *konzentrierende Niedrigwasserrinnen* sollten bei Wasserbauprojekten und im Gewässerunterhalt gefördert oder erhalten werden. Das kleinere Verhältnis zwischen Wasseroberfläche und Abflussvolumen wirkt einer verstärkten Erwärmung entgegen, wobei dies nicht generell quantifiziert werden kann [40]. In der Literatur wurden zu Niedrigwasserrinnen folgende weiteren Empfehlungen gefunden [40]:
  - Bevorzugen von eigendynamischen Entwicklungen gegenüber Einbauten
  - Gewässereinbauten sollten überströmt erstellt werden (geringere Erwärmung der Einbauten). Dabei ist Totholz zu bevorzugen (siehe auch weiter unten)
  - Das Niedrigwasser sollte bevorzugt in beschatteten Bereichen geführt werden
- Auch wenn dies in den wenigen untersuchten Kolken der Bünz und Wigger nicht messbar war, sollte in Wasserbauprojekten das *initiieren / fördern von Kolken* geprüft werden. Dies kann in sehr seltenen Dürreperioden bis zu 3 °C tiefere Maximaltemperaturen bedeuten, wobei die Kolke dann von Fischen bevorzugt werden [11]. Vermutlich sind Kolke da wirksam, wo bekanntlich hohe Grundwasserstände oder -Aufstösse vorhanden sind, und damit die Wassertemperaturen im Sommer gesenkt werden.
- *Totholzeinbauten gegenüber Natursteinblöcken* wo möglich bevorzugen. Im Experiment von Spycher [41] führte ein eingetauchtes Totholzstück zu einer vergleichsweise um ca. 1.5 – 2 °C tieferen Gewässererwärmung pro Tag bei einer Wassermenge von rund 350 L. Im Umkehrschluss wird vermutet, dass, um einen merklichen Effekt in Fliessgewässern zu erreichen - je nach Abfluss - grosse Totholzmengen benötigt werden (Annahme).

- Im Bereich der verwandten Disziplin der Siedlungswasserwirtschaft sollte besonders bei kleinen Fliessgewässern die verzögerte Einleitung von erwärmtem Wasser von versigelten Flächen angedacht werden, was zugegebenermassen nicht einfach sein dürfte. Damit könnten sehr seltene Temperaturspitzen von bis zu 29 °C [39] in kleinen Fliessgewässern verhindert werden. Unter Beachtung der bekannten Vermischungsregeln (Formel 1) wird die Temperatur nach Vermischung entweder gesenkt durch tiefere Einleittemperaturen oder kleinere Einleitmengen.

In der Summe erscheint es mit den genannten Empfehlungen möglich, die prognostizierten sommerlichen Gewässererwärmungen infolge Klimawandels von bis zu 5 °C abzuschwächen oder zu verhindern, und somit Lebensräume der Bachforelle und Äsche zu erhalten. Jeder Bach und Fluss, jeder Abschnitt und jede Struktur ist dabei individuell. Die effektiven Begebenheiten vor Ort werden wohl kaum je mit vertretbarem Aufwand erhoben werden können. Daher wird sich der Wasserbauer mit Annahmen und Fingerspitzengefühl an die Thematik herantasten müssen (z.B. wo Kolke sinnvoll sein könnten).

Die Empfehlungen beschränken sich hier auf Massnahmen in Gewässernähe. Es ist klar, dass grossräumigere Massnahmen wie Klimaschutz, angepasste Land- und Forstnutzung den angestrebten Artenschutz unterstützen würden.

Theoretisch denkbar wäre es den dämpfenden / potenziell kühlenden Effekt von Wasserspeichern (z.B. Rückhaltebecken im Nebenschluss oder Regenrückhaltebecken) zu nutzen. Ob dies wirtschaftlich oder ökologisch sinnvoll ist, kann hier nicht beantwortet werden.

Das kontinuierliche Messen von Wassertemperaturen über mehrere Jahre stellte sich als anspruchsvoll heraus. Soweit bekannt führten Luftmessungen, Geschiebetrieb / Hochwasser, Sabotage / Diebstahl und tiefe Batteriestände zu Datenausfällen. Während manche Logger gar nicht mehr gefunden wurden, hatten andere fragwürdige Werte aufgezeichnet. Aus Sicht des Verfassers könnten daher für künftige Messungen folgende Empfehlungen hilfreich sein:

- Grundlegende Überlegungen zu Logger-Anforderungen wie z.B. der Messgenauigkeit
- Eichung der Logger vor und während Messungen im Wasser in gemeinsamem Wasserbecken. Damit werden bereits bei der Messkampagne systematische Fehler reduziert
- Check der Batteriestände beim Einbringen, Kontrolle der Messintervalle
- Abdeckung von Loggern an der Wasseroberfläche [40]
- Regelmässige Zwischenkontrollen vor Ort, besonders nach Hochwasserereignissen. Gegebenenfalls notieren von Besonderheiten
- Führen von Begehungsprotokollen mit Angaben z.B. zu Datum, Zeiten, Witterungsverhältnissen, Lufttemperaturen, Abflüssen sowie dem Notieren von Besonderheiten. Diese waren im Nachhinein jeweils wertvoll zum Verständnis der ausgelesenen Daten.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde das generelle Temperaturregime in Teilstrecken der Bünz und Wigger im Jahr 2020 untersucht. Die aufgezeichneten Wassertemperaturen mussten dabei im Vergleich mit bekannten Schwellenwerten für die Leitarten Bachforelle und Äsche als häufig zu hoch eingestuft werden. Unter diesen Bedingungen kommt es hier wohl zu Lebensraumverlusten.

Weiter wurden die Daten auf das Temperaturverhalten von vier Kolken und an einer Blockrampe ausgewertet. Dabei konnten bezogen auf die Fragestellung keine hilfreichen Temperaturunterschiede festgestellt und somit keine wasserbaulichen Massnahmen abgeleitet oder empfohlen werden.

Der in der Literatur beschriebene kühlende Einfluss von Totholz auf Wasser konnte aufgrund von Datenausfällen nicht wie gewünscht in einem Fliessgewässer untersucht werden. Hier besteht meiner Meinung nach weiterhin Forschungsbedarf.

Auch nach eingehender Auseinandersetzung in diesen im Verhältnis zu den Einzugsgebieten eher kurzen Fliessgewässerabschnitten verbleiben in der Natur noch viele Unbekannte.

Es wurden jedoch deutliche Hinweise gefunden, dass die Beschattung von Fliessgewässern mit Ufergehölzen offensichtlich wirksam ist, um die Erwärmung besonders in kritischen Niedrigwasser- und Hitzeperioden abmindern bzw. umkehren zu können. Infolge starker Temperaturunterschiede im Flusslängsverlauf muss die Vernetzung von Bedeutung sein, damit kühlere Abschnitte von Fischen erwandert werden können. Als weitere sinnvolle Massnahmen werden in der Literatur das Konzentrieren des Niedrigwasserabflusses, das Initiieren von Kolken und der Einbau von Totholz beschrieben, um tiefere Temperaturen oder kühle Rückzugsorte schaffen zu können.

Dem Wasserbauer stehen damit wirksame Massnahmen zur Verfügung, um die Erwärmung von Fliessgewässern abzuschwächen oder umzukehren. Trotz Klimawandel sollte es so möglich sein im schweizerischen Mittelland für die Bachforelle und Äsche geeignete, genügend kühle Lebensräume zu erhalten.

7 Dank

Ganz besonderer Dank gilt meinen Betreuern Frau Prof. Dr. Jolanda Jenzer von der Fachhochschule Burgdorf sowie Herrn Roy Holzhey von der Bauhaus Universität Weimar für die regelmässige Unterstützung und Geduld während der halbjährigen Erarbeitungszeit. Die immer wieder gestellten Fragen, Ergänzungen oder Bestätigungen waren unverzichtbar und sehr wertvoll.

Ebenso danken möchte ich den Vertretern des schweizerischen Kompetenzzentrums Fischerei Adrian Aeschlimann und David Bittner für einzelne, gezielte Inputs.

Martina Küng danke ich für die geleisteten Vorarbeiten sowie die präzisen Erläuterungen dazu und Matthias Mende für seine Experteneinschätzung zu Wassertemperaturen in Stauhaltungen.

Weiterer besonderen Dank gilt den Mitarbeitenden des Kantons Aargau, Ernst Sennrich, Fritz Tschudi, Christoph Balmer, Corinne Schmid sowie Tabea Kropf, die mich wiederholt bei der Feldarbeit unterstützt haben oder auf meine Fragen jeweils prompt und kompetent antworten konnten.

Von der Fachhochschule Burgdorf möchte ich Prof. Dr. Reto Spöhel danken für die Beratung zur gewählten statistischen Methode und Natalia Wyss für die Einführung zu den Temperaturloggern.

Vom Kanton Bern bedanke ich mich beim Fischereiinspektorat bei Olivier Hartmann und Thomas Maurer für wertvolle Hinweise zu Wassertemperaturen und aktueller Literatur. Sowie Vinzenz Maurer und Reto Schaffner für Informationen zu Sauerstoffmessungen in Berner Gewässern und die Einführung zum Sauerstoffmessgerät.

Erwähnen möchte ich zudem die zur Verfügung gestellten Daten des Bundesamts für Umwelt, von Meteo Schweiz, den Kantonen Aargau und Luzern sowie von Meteoblue, ohne welche die gemachten Auswertungen nicht möglich gewesen wären.

Ein grosser Dank gilt meinem Umfeld für die Unterstützung und Verständnis während der Erarbeitungszeit. Zuletzt danke ich meinem Arbeitgeber, der Gruner Region Bern AG, für die zur Verfügungstellung von Büro- und Feldmaterial und meinem Arbeitskollegen Christian Bischofberger für das Korreferat.

Literaturverzeichnis

[1] *Aktuelle Wasserdaten Kanton Aargau*. URL https://www.ag.ch/app/hydrometrie/liste. - abgerufen am 2021-03-01

[2] AQUABIOS GMBH: *Erfolgskontrolle der Revitalisierungsmassnahmen der Wigger in Brittnau*. Düdingen, 2016

[3] AQUABIOS GMBH: *Wirkungskontrolle Revitalisierung Bünz – Gewässermorphologie und Fische bei Hendschiken*, 2020

[4] BAFU: *Expertenbericht zu einem Modul Temperatur im Rahmen des Modul-Stufen-Konzepts*. Bern : Bundesamt für Umwelt, 2011

[5] BAFU: *Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro)*. Bern : Bundesamt für Umwelt, 2012

[6] BAFU: *Auswirkungen das Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft.* Bern : Bundesamt für Umwelt, 2021

[7] BROADMEADOW, S. B. ; JONES, J. G. ; LANGFORD, T. E. L. ; SHAW, P. J. ; NISBET, T. R.: The influence of riparian shade on lowland stream water temperatures in southern England and their viability for brown trout. In: *River Research and Applications* Bd. 27 (2011), Nr. 2, S. 226–237

[8] BURKHARDT-HOLM, PATRICIA: *Klimawandel und Bachforellenrückgang – gibt es einen Zusammenhang? Resultate aus der Schweiz* : Springer, 2009

[9] CAISSIE, D.: The thermal regime of rivers: a review. In: *Freshwater Biology* Bd. 51 (2006), Nr. 8, S. 1389–1406

[10] ELBER, FREDY ; STÄHELI, TINO ; CAMENZIND, MATHIEU: Revitalisierung von Fliessgewässern in Zeiten des Klimawandels. In: *Aqua viva*, Nr. 3 / 2019

[11] ELLIOTT, J. M.: Pools as refugia for brown trout during two summer droughts: trout responses to thermal and oxygen stress. In: *Journal of Fish Biology* Bd. 56 (2000), Nr. 4, S. 938–948

[12] EMCH + BERGER AG BERN: Gewässerunterhalt Wigger - Massnahmen km 8.40-9.00 Situation 1:500, 2018

[13] FLURY BAUINGENIEURE AG: Renaturierung Bünz Hendschiken - Pläne des ausgeführten Bauwerks. Oftringen, 2015

[14] FREY, MARTIN: *Temperaturmodellierung - Auswirkungen von Kraftwerken auf das Temperaturregime in Zuflüssen der Rhone*. Kastanienbaum : EAWAG, 2003

[15] *Geoportal Kanton Luzern - Datenbestellung*. URL https://www.geo.lu.ch/messdaten/hydrometrie. - abgerufen am 2021-02-08

[16] Gewässerschutzverordnung (GSchV), Stand am 01. Mai 2017, 1998

[17] HOBO® Pendant® Temperatur-Datenlogger (UA-001-xx) Handbuch, HOBO

[18] HOBO® Water Temp Pro v2 (U22-001) Handbuch, HOBO

[19] HUNZIKER, ZARN & PARTNER: Monitoring Wiggerrenaturierung Situation 1:1'000. Aarau, 2019

[20] HUNZIKER, ZARN & PARTNER: *Wiggerrenaturierung - Morphologisches, hydraulisches und fischbiologisches Monitoring*. Aarau : ASTRA, 2020

[21] *Hydrodaten BAFU, Station Wigger*. URL https://www.hydrodaten.admin.ch/de/2450.html. - abgerufen am 2021-05-16

[22] JAKOB, ADRIAN: Temperaturen in Schweizer Fliessgewässern - Langzeitbeobachtung. In: *GWA Gas, Wasser, Abfall* (2010), Nr. 3/2010, S. 221–231

[23] JAKOB, ADRIAN ; LIECHTI, PAUL ; SCHÄDLER, BRUNO: Temperatur in Schweizer Gewässern - Quo Vadis? In: *GWA Gas, Wasser, Abfall* (1996), Nr. 4/1996, S. 288–294

[24] JUNGWIRTH, MATHIAS ; HAIDVOGL, GERTRUD ; MOOG, OTTO ; MUHAR, SUSANNE ; SCHMUTZ, STEFAN: *Angewandte Fischökologie an Fliessgewässern*. Wien : Facultas, 2003

[25] KÜNG, MARTINA: *Wasserbauliche Massnahmen zur Förderung kälteliebender Fischarten der Schweiz angesichts des Klimawandels - Masterarbeit Frühlingssemester 2020*. Bern : BFH, 2020

[26] KÜTTEL, STEFAN ; PETER, ARMIN ; WÜEST, ALFRED: *Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten schweizerischer Fliessgewässer*, *Rhone Thur Publikation Nr.1*. Kastanienbaum : EAWAG, 2002

[27] *Meteoblue history+*. URL https://www.meteoblue.com/de/historyplus. - abgerufen am 2021-02-23

[28] *MeteoSchweiz IDAWEB*. URL https://gate.meteoswiss.ch/idaweb/login.do. - abgerufen am 2021-04-05

[29] METRON RAUMENTWICKLUNG AG ; FLURY BAUINGENIEURE AG ; INGENIEURBÜRO WILHELM + WAHLEN: *Renaturierung Bünz Hendschiken - technischer Bericht*. Brugg, 2012

[30] MICHAEL, A. ; RUNDEL ET AL: *Physik Libre*. URL https://physikbuch.schule/preface.html. - abgerufen am 2021-02-15

[31] MOOSMANN, LORENZ ; SCHMID, MARTIN ; WÜEST, ALFRED: *Einfluss der Beschattung auf das Temperaturregime der Orbe*. Kastanienbaum : EAWAG, 2005

[32] MÜLLER, VALENTIN: *Masterarbeit- Erarbeitung eines anthropogen unbeeinflussten, typischen Jahresgangs der Wassertemperatur nach biozönotischen Regionen*. Zürich : ETH, 2011

[33] *Naturnaher Wasserbau*. URL https://www.bfh.ch/de/forschung/referenzprojekte/naturnaher-wasserbau/. - abgerufen am 2021-07-10

[34] NCCS, NATIONAL CENTRE FOR CLIMATE SERVICES: *Pilotprogramm zur Anpassung an den Klimawandel*. URL https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/massnahmen/pak.html. - abgerufen am 2021-07-10

[35] NOTTER, BENEDIKT ; STAUB, ERICH: Lebensraum der Bachforelle um 2050 - Schätzung anhand eines GIS-basierten Modells. In: *GWA Gas, Wasser, Abfall* (2009), Nr. 1/2009, S. 39–44

[36] *Onlinekarten Kanton Aargau - Gewässer (Bachkataster) und Abwasserkataster*. URL https://www.ag.ch/app/ agisviewer4/v1/agisviewer.html. - abgerufen am 2021-02-12

[37] *Onlinekarten Kanton Aargau - Karte Potential für Beschattung an Gewässern*. URL https://www.ag.ch/app/agisviewer4/v1/agisviewer.html. - abgerufen am 2021-05-17

[38] PFAMMATER, FABIAN: *Untersuchungen zur Wassertemperatur in Schweizerischen Fliessgewässern*. Bern : Universität Bern, 2004

[39] ROSSI, LUCA: Temperaturveränderungen im Gewässer bei Regenwetter. In: *GWA Gas, Wasser, Abfall* (2004), Nr. 11/2004, S. 795–805

[40] SIEBER & LIECHTI GMBH, IUB ENGINEERING AG: *Temperaturverlauf in Fliessgewässern - Untersuchung und Visualisierung von Temperatureinflüssen, Ableitung von Massnahmenvorschlägen*, 2020

[41] SPYCHER, LUKAS: *Wasserbauliche Massnahmen hinsichtlich Bestandssteigerung Forellen und Äschen - Einfluss von Baustoffen auf die Wassertemperatur / Auswertung Temperatur-Monitoring am Gäbelbach Bachelorthesis Frühlingssemester 2020*. Burgdorf : BFH, 2020

[42] *Swiss Geoportal - aktueller Grundwasserzustand*. URL https://map.geo.admin.ch. - abgerufen am 2021-07-03

[43] *Swiss Geoportal - Grundkarten*. URL https://map.geo.admin.ch. - abgerufen am 2021-07-12

[44] *Swiss Geoportal - Karte Ökomorphologie F Abschnitte*. URL https://map.geo.admin.ch. - abgerufen am 2021-02-18

[45] *Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Glossar*. URL https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html. - abgerufen am 2021-06-14

[46] WTW FDO® 925 Bedienungsanleitung, WTW

Selbstständigkeitserklärung

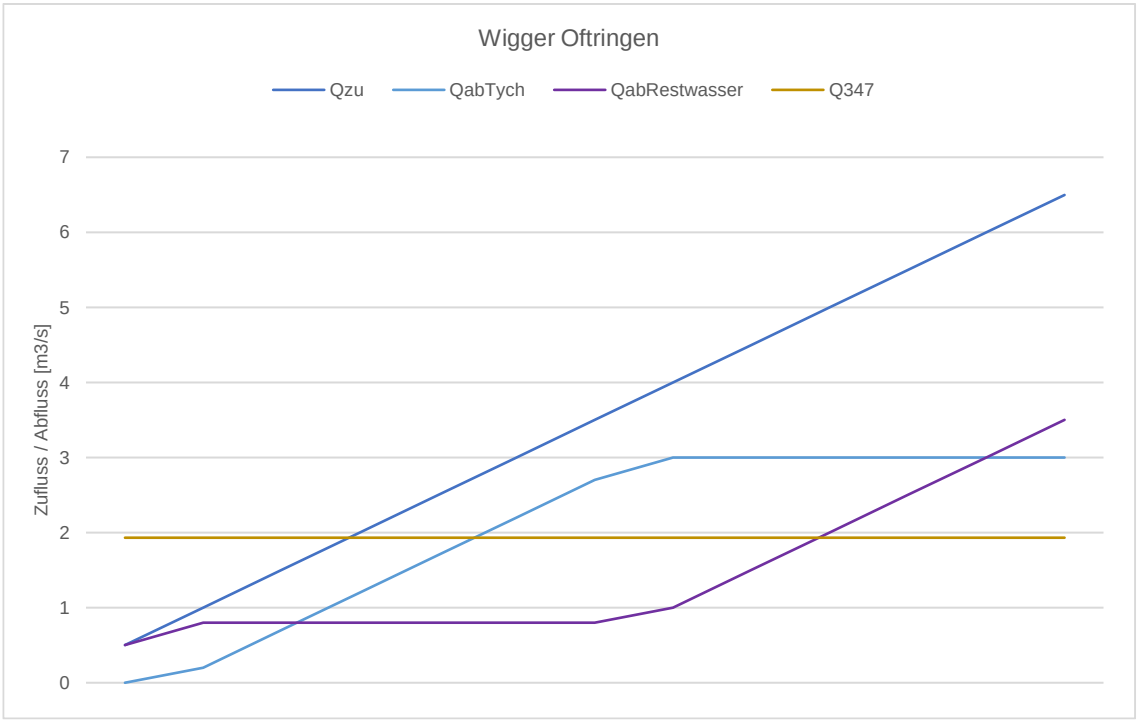
Ich, Jon Drewes (Matrikelnummer: 118859), erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Thema «Grundlagen für wasserbauliche Massnahmen zur Verbesserung der Lebensräume kälteliebender Fischarten in der Schweiz hinsichtlich des Klimawandels» selbstständig und unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Ort, Datum

Unterschrift

Anhang

Anhang 1: Restwasserregelungen Wigger gemäss Angaben Kanton Aargau



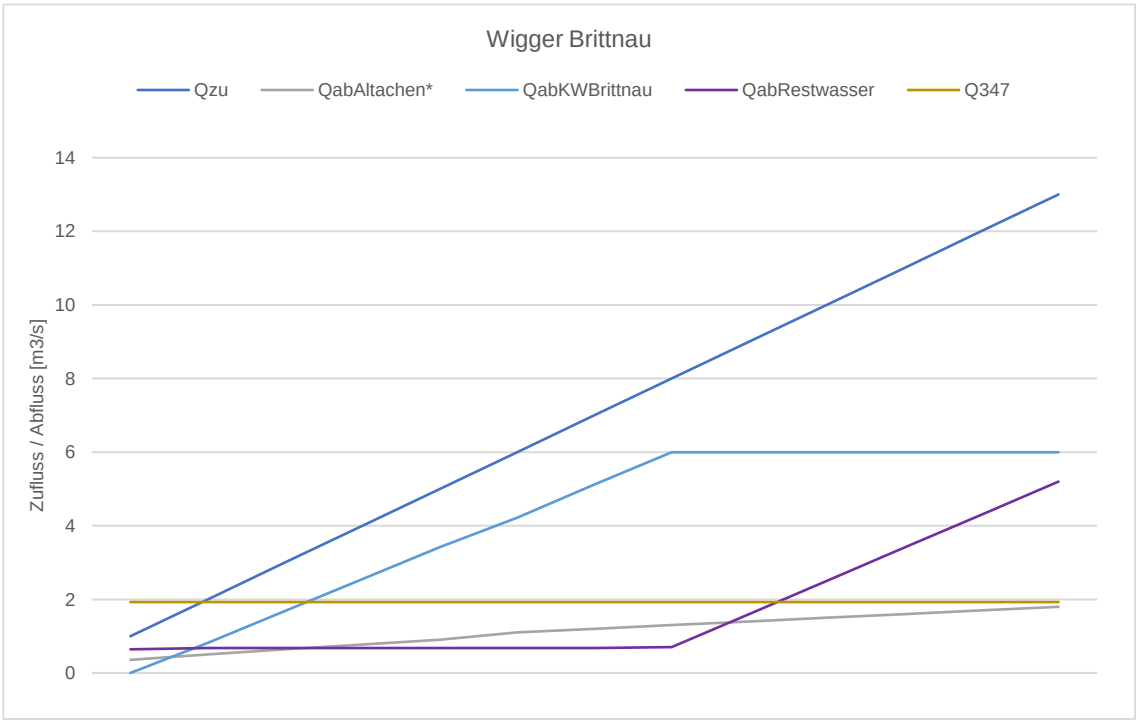


Abb. A-1: Übersicht Restwasserregelungen Wigger

Anhang 2: Angaben zu den einzelnen Loggern

Tab. A1: Angaben zu den einzelnen Loggern aus [25], ab 2021 ergänzt durch den Verfasser mit eigenen Beobachtungen und Angaben der kantonalen Fischereiaufseher

Logger	Koordinaten	Bemerkungen
Wigger 1.1	2639078 / 1233929	Logger schwimmend, an Schnur ca. 30 cm über Logger 1.2 [9]. am 12.03.2021 weg, neuer Logger gesetzt
Wigger 1.2		Logger an der Sohle, ca. 55 cm unter Wasser [9] Im Frühling 2020 mit ca. 60 cm Geschiebe überdeckt, am 29.05.2020 ausgegraben, im Frühling mit ca. 100 cm Geschiebe überdeckt, am 09.03.21 ausgegraben, Logger hatte nach 12.03.2021 nicht mehr gemessen
Wigger 2.1	2639011 / 1234097 bis Dez. 2019, 2638982 / 1234146 ab Dez. 2019	Logger an der Sohle, am 12.03.2021 weg, kein neuer Logger gesetzt
Wigger 2.2		Logger schwimmend, im Juni 2020 weg, neuer Logger gesetzt [9], danach am 01.07.20 per Zufall wieder gefunden, am 12.03.2021 weg, kein neuer Logger gesetzt
Wigger 4.1	2635449 / 1239782 bis Dez. 2019, 2635524 / 1239740 ab Dez. 2019	Logger an der Sohle. Logger lag im Dezember 2019 am Ufer (nicht mehr im Wasser), am 12.03.2021 neuer Logger gesetzt (Batteriestand zu tief)
Wigger 4.2		Logger schwimmend, an Schnur ca. 30 cm über Logger 4.1 [9] Logger lag im Dezember 2019 am Ufer (nicht mehr im Wasser), Logger am 09.03.2021 mit ca. 50 cm Geschiebe überdeckt, am 09.03.2021 ausgegraben, am 12.03.2021 neuer Logger gesetzt (Batteriestand zu tief)
Wigger 5	2635419 / 1239855 bis Dez. 2019,	Logger an der Sohle, ca. 30 cm unter Wasser [9] Daten Frühling 2020 nur bis Ende Januar, da

[9] Am 12.03.2021, bei einem Abfluss von ca. 4.46 m^3 / m in Zofingen [1], was einem Abfluss in der Restwasserstrecke Wigger Oftringen von ca. 1 m^3/s und einem Abfluss in der Restwasserstrecke Brittnau von ca. 0.68 m^3/s entspricht (vgl. Restwasserregeln im Anhang)

	2635383 / 1239878 ab Dez. 2019	fälschlicherweise 1 min Intervall programmiert, im Juni 2020 neuer Logger gesetzt, Logger hatte am 19.06.21 aufgehört zu messen
Wigger 6	2634839 / 1240182 bis Dez. 2019, 2634857 / 1240179 ab Dez. 2019	Logger an der Sohle, ca. 40 cm unter Wasser [9] Daten im Frühling 2020 nicht ablesebar, Logger 6 lag am 09.03.2021 am Ufer -> wieder ins Wasser gelegt
Wigger 7	2638778 / 1234614	Logger an der Sohle, ca. 75 cm unter Wasser [9] Logger im Juni 2020 nicht mehr da, neuer Logger gesetzt, Logger am 09.03.2021 mit ca. 20 cm Geschiebe überdeckt, am 09.03.2021 ausgegraben, Logger hatte im Januar 2021 aufgehört zu messen
Bünz 1	2659777 / 1248384	Logger an der Sohle, ca. 35 cm unter Wasser [10]
Bünz 2	2658958 / 1249237	Logger an der Sohle, ca. 55 cm unter Wasser [10], Logger hatte nach 21.03.21 nicht mehr gemessen
Bünz 3	2658832 / 1249795	Logger an der Sohle, ca. 30 cm unter Wasser [10], Logger hatte am 19.06.21 aufgehört zu messen
Bünz 4	2658630 / 1250261	Logger an der Sohle, ca. 30 cm unter Wasser [10]
Bünz 5	2659508 / 1248522	Logger an der Sohle, ca. 75 cm unter Wasser [10], Logger hatte am 19.06.21 aufgehört zu messen
Bünz 6		Logger auf der Wasseroberfläche schwimmend, am 12.03.2021 in der Luft im Gebüsch hängend, Logger hatte am 17.04.21 aufgehört zu messen, am 21.06.21 wieder im Gebüsch hängend

[10] Am 12.03.2021, bei einem Abfluss von ca. 0.95 m^3 / s [1]

Tab. A2: Übersicht der Messperioden und -intervalle

Messstellen	Periode	Intervall
Wigger 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 4.1, 4.2	29.07.2019 bis 20.12.2019	5-min Intervall
Wigger 1.1, 2.1	20.12.2019 bis 22.06.2020	10-min Intervall
Wigger 1.1	12.03.2021 bis 21.06.2021	10-min Intervall
Wigger 1.2	20.12.2019 bis 12.03.2021	10-min Intervall
Wigger 4.1, 4.2	20.12.2019 bis 21.06.2021	10-min Intervall
Wigger 2.2	20.12.2019 bis 01.07.2020	10-min Intervall
Wigger 5	20.12.2019 bis 25.01.2020	1-min Intervall
	22.06.2020 bis 19.06.2021	10-min Intervall
Wigger 6	22.06.2020 bis 09.03.2021, 12.03.2021 bis 21.06.2021	10-min Intervall
Wigger 7	07.08.2019 bis 20.12.2019	5-min Intervall
	20.12.2019 bis 28.01.2021, 12.03.2021 bis 21.06.2021	10-min Intervall
Bünz 1 bis 6	03.12.2019 bis 21.06.2021	10-min Intervall

Anhang 3: Ausschlusskriterien für die Rohdatenbereinigung

Bei der Messreihe Bünz Logger Nr. 6 (schwimmender Logger) wurden die wissentlich zum Teil unbrauchbaren Rohdaten (Logger kam an die Luft) folgendermassen bereinigt:

- Beim Auftreten von Minus-Wassertemperaturen wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen. Generell sind in Fliessgewässern auch leichte Minus-Wassertemperaturen möglich [32]. Da diese Perioden für die Aufgabenstellung dieser Arbeit nicht relevant sind wurde dieses Ausschlusskriterium jedoch vereinfacht
- Beim Auftreten von Wassertemperaturen über 26 °C (in Anlehnung an [4]) wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen
- Bei Wassertemperaturschwankungen über einen Tag von über 10 °C (in Anlehnung an [24]) wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen
- Bei Überschreiten einer Wassertemperaturzunahme bzw. -abnahme von 1 °C / 10 min wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen [11]
- Sofern die gemessenen Tages-Wassertemperatur-Extreme (Bünz Logger 6) näher an den gemessenen Tages-Lufttemperatur- Extremen in Buchs / Aarau (meteoCH) lagen als an den gemessenen Tages-Wassertemperatur-Extremen in Othmarsingen (Kanton Aargau) wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen
- Rohdaten bis zu 1 Tag vor und nach ausgeschlossenen Zeiträumen wurden ganztags ausgeschlossen, sofern visuell auffällig. Zwischen ausgeschlossenen Zeiträumen verbleibende Einzeltage (bis zu drei Tage) wurden ebenfalls ganztags ausgeschlossen

Ein Vergleich mit den vom Kanton Aargau in Othmarsingen gemessenen Werten bestätigte aus Sicht des Verfassers das Vorgehen. Dieser Vergleich zeigte, dass mit den angewandten Kriterien bei der kantonalen Messtelle keine einzige im 10-min-Intervall erfasste Messung ausgeschlossen worden wäre (tiefste gemessene Wassertemperatur: 3.49 °C, höchste gemessene Wassertemperatur: 25.26 °C, max. Wassertemperaturschwankung an einem Tag: 5.06 °C, max. Wassertemperaturzunahme / 10 min: 0.49 °C, max. Wassertemperaturabnahme: - 0.43 °C / 10 min. Der Vergleich, ob die gemessenen Extreme näher an der Luft- als an der Vergleichsmessung im Wasser (=diese Messreihe) lagen, konnte nicht vorgenommen werden).

[11] Eine Annahme des Verfassers: Die Tagesamplitude der Wassertemperaturen ist in Fliessgewässern deutlich gedämpfter als die der Lufttemperaturen [24]. Beim hier gewählten Kriterium wurde in der Überlegung von einer maximalen Wassertemperaturschwankung über den Tag von 10 °C [24] ausgegangen während die Tagesminima an der Bünz um ca. 08:00 auftreten und die Tagesmaxima um ca. 15:00 (gemäss vom Kanton Aargau gemessenen und vom Verfasser ausgewerteten Wassertemperaturen in einer ausgeprägten Wärme- und Niedrigwasserperiode vom 08.08 – 12.08 2020). [15:00 – 08:00 = 7h |7h = 420min | 10 °C / 420min= 0.024 °C / 1 min => 0.24 °C / 10 min]. Um nicht unnötig geeignete Daten auszuschliessen wurde der Wert von 0.24 °C / 10 min konservativ auf 1 °C / 10 min Temperaturzunahme bzw. Abnahme erhöht.

Zudem fielen die ausgeschlossenen Daten häufig zwischen zwei erhöhte Abflüsse was plausibel ist, wenn der Logger zum Teil im Gebüsch hing und zum Teil nicht. Weiter wären aber auch starker Wind, Menschen, Tiere usw. für ein Wiedereinbringen ins Wasser denkbar.

Die angewandten Kriterien führten auch bei den restlichen Datenreihen der Bünz 1 bis 5 (alles Logger an der Sohle) nicht zum Ausschluss von Rohdaten (tiefste gemessene Wassertemperatur: 2.19 °C (Logger Bünz Nr. 5), höchste gemessene Wassertemperatur: 24.15 °C (Logger Bünz Nr. 4), max. Wassertemperaturschwankung an einem Tag: 4.97 °C (Logger Bünz Nr. 1), max. Wassertemperaturzunahme / 10 min: 0.86 °C (Logger Bünz Nr. 1), max. Wassertemperaturabnahme: - 0.80 °C / 10 min (Logger Bünz Nr. 2). Der Vergleich, ob die gemessenen Extreme näher an der Luft- als an der Vergleichsmessung im Wasser lagen, wurde nicht vorgenommen).

Die gemessenen Wassertemperaturen an der Wigger warfen ebenfalls Fragen auf. Die gemessenen Wassertemperaturen Wigger 1.1 und 1.2 zeigten einerseits, dass am obersten Logger-Standort plausible Wassertemperaturen gemessen wurden (keine Minus-Wassertemperaturen, keine Wassertemperaturen über 26 °C und keine Wassertemperatur-Schwankungen über den Tag grösser als 10 °C). Andererseits waren an den anderen Logger-Standorten oft selbst bei den Loggern an der Sohle stärker abweichende Temperaturextreme gemessen worden. Da es sich bei allen Loggern-Standorten an der Wigger um Restwasserstrecken mit potenziell stärkeren Wassertemperaturschwankungen handelt, wurden die Daten in der Folge weniger streng ausgeschlossen als an der Bünz. Ein gleiches Vorgehen wie an der Bünz hätte an der Temperatur-Vergleichsmessstelle des Kantons Luzern (Fischpass Luthern Gettnau) aus Sicht des Verfassers zu viele Daten ausgeschlossen.

Bei der Messreihe Wigger 1.1 (schwimmender Logger) wurden keine Rohdaten ausgeschlossen. Es wurden keine Minus-Temperaturen (tiefste gemessene Temperatur: 3.16 °C), Temperaturen über 26 °C (höchste gemessene Temperatur: 21.57 °C) und Wassertemperaturschwankungen über einen Tag von über 10 °C (maximale Tagesdifferenz: 5.23 °C) gemessen.

Der Logger Wigger Nr. 1.2 (Logger an der Sohle) war am 29.05.2019 gemäss kantonalem Fischereiaufseher mit ca. 60 cm Geschiebe überdeckt. Visuell war aus Sicht des Verfassers in den Rohdaten eine klare «Dämpfung» der Wassertemperaturschwankungen erkennbar im Vergleich zum Logger Wigger Nr. 1.1 (schwimmender Logger). Die Rohdaten vom mit Geschiebe überdeckten Logger bis zum mutmasslich geschiebeführenden Ereignis wurden gutachterlich ausgeschlossen. Weiter wurden keine Daten ausgeschlossen (tiefste gemessene Wassertemperatur: 1.76 °C, höchste gemessene Wassertemperatur: 21.57 °C, max. Wassertemperaturschwankung an einem Tag: 5.33 °C)

Bei der Messreihe Wigger Logger Nr. 2.1 (Logger an der Sohle) wurden die Rohdaten (Logger kam wohl an die Luft obwohl an der Sohle) folgendermassen bereinigt:

- Es waren keine Minus-Wassertemperaturen gemessen worden (min. 2.0°C)
- Beim Auftreten von Wassertemperaturen über 28 °C (Mittelwert zwischen offenen Pools [40] und natürlichen Gewässern [4]) wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen (max. gemessene Temperatur 42.3 °C)
- Bei Wassertemperaturschwankungen über einen Tag von über 10 °C (in Anlehnung an [24]) wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen
- Bei Überschreiten einer Wassertemperaturzunahme von 1 °C / 10 min wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen, sofern visuell auffällig
- Bei Überschreiten einer Wassertemperaturabnahme von 1 °C / 10 min wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen, sofern visuell auffällig
- Ein Vergleich mit einer offiziellen Wassertemperatur-Messtelle war nicht möglich, da die Wassertemperatur an der Wigger nicht gemessen wird. Die Messstelle am Zufluss Luthern in Gettnau befindet sich in einer Wasserentnahmestrecke (Fischpass). Diese Messstelle wies aus Sicht des Verfassers ebenfalls fragwürdige Temperaturausschläge auf (höchste gemessene Wassertemperatur: 32.6 °C, max. Wassertemperaturschwankung an einem Tag: 15.4 °C, max. Wassertemperaturzunahme / h: 7.8 °C) und wurde daher nicht als Vergleich verwendet
- Rohdaten 1 Tag vor und nach ausgeschlossenen Zeiträumen wurden ganztags ausgeschlossen, sofern visuell auffällig. Zwischen ausgeschlossenen Zeiträumen verbleibende Einzeltage (bis zu drei Tage) wurden ebenfalls ganztags ausgeschlossen

Bei der Messreihe Wigger Logger Nr. 2.2 (schwimmender Logger) wurden die Rohdaten (Logger kam wohl an die Luft) folgendermassen bereinigt:

- Es waren keine Minus-Wassertemperaturen gemessen worden (2.9 °C)
- Beim Auftreten von Wassertemperaturen über 28 °C (Mittelwert zwischen offenen Pools [40] und natürlichen Gewässern [4]) wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen (max. gemessene Temperatur 41.4 °C)
- Bei Wassertemperaturschwankungen über einen Tag von über 10 °C (in Anlehnung an [24]) wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen
- Bei Überschreiten einer Wassertemperaturzunahme von 1 °C / 10 min wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen, sofern visuell auffällig
- Bei Überschreiten einer Wassertemperaturabnahme von 1 °C / 10 min wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen, sofern visuell auffällig

- kein Vergleich mit einer offiziellen Wassertemperatur-Messstelle
- Rohdaten 1 Tag vor und nach ausgeschlossenen Zeiträumen wurden ganztags ausgeschlossen, sofern visuell auffällig. Zwischen ausgeschlossenen Zeiträumen verbleibende Einzeltage (bis zu fünf Tage) wurden ebenfalls ganztags ausgeschlossen

Bei den Messreihen Wigger Logger Nr. 7 (Logger an der Sohle) wurden keine Rohdaten ausgeschlossen. Es wurden keine Minus-Temperaturen (tiefste gemessene Temperatur: 1.43 °C) Temperaturen über 26 °C (höchste gemessene Temperatur: 23.86 °C) und Wassertemperaturschwankungen über einen Tag von über 10 °C (maximale Tagesdifferenz: 6.41 °C) gemessen.

Bei der Messreihe Wigger Logger Nr. 4.1 (Logger an der Sohle) wurden die Rohdaten (Logger war zum Teil an der Luft gelegen) folgendermassen bereinigt:

- Es waren keine Minus-Wassertemperaturen gemessen worden (min. 1.2 °C)
- Beim Auftreten von Wassertemperaturen über 28 °C (Mittelwert zwischen offenen Pools [40] und natürlichen Gewässern [4]) wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen
- Bei Wassertemperaturschwankungen über einen Tag von über 10 °C (in Anlehnung an [24]) wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen
- Bei Überschreiten einer Wassertemperaturzunahme von 1 °C / 10 min wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen, sofern visuell auffällig
- Bei Überschreiten einer Wassertemperaturabnahme von 1 °C / 10 min wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen, sofern visuell auffällig
- kein Vergleich mit einer offiziellen Wassertemperatur-Messstelle
- Rohdaten 1 Tag vor und nach ausgeschlossenen Zeiträumen wurden ganztags ausgeschlossen, sofern visuell auffällig. Zwischen ausgeschlossenen Zeiträumen verbleibende Einzeltage (bis zu drei Tage) wurden ebenfalls ganztags ausgeschlossen

Bei der Messreihe Wigger Logger Nr. 4.2 (schwimmender Logger) wurden die Rohdaten (Logger war zum Teil an der Luft gelegen) folgendermassen bereinigt:

- Beim Auftreten von Minus-Wassertemperaturen wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen
- Beim Auftreten von Wassertemperaturen über 28 °C (Mittelwert zwischen offenen Pools [40] und natürlichen Gewässern [4]) wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen

- Bei Wassertemperaturschwankungen über einen Tag von über 10 °C (in Anlehnung an [24]) wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen
- Bei Überschreiten einer Wassertemperaturzunahme von 1 °C / 10 min wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen, sofern visuell auffällig
- Bei Überschreiten einer Wassertemperaturabnahme von 1 °C / 10 min wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen, sofern visuell auffällig
- kein Vergleich mit einer offiziellen Wassertemperatur-Messtelle
- Rohdaten 1 Tag vor und nach ausgeschlossenen Zeiträumen wurden ganztags ausgeschlossen, sofern visuell auffällig. Zwischen ausgeschlossenen Zeiträumen verbleibende Einzeltage (bis zu drei Tage) wurden ebenfalls ganztags ausgeschlossen

Bei der Messreihe Wigger Logger Nr. 5 (Logger an der Sohle) wurden die Rohdaten (Logger war zum Teil an der Luft gelegen) folgendermassen bereinigt:

Beim Auftreten von Minus-Wassertemperaturen wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen

- Es waren keine Wassertemperaturen über 26 °C gemessen worden (max. 24.8 °C)
- Bei Wassertemperaturschwankungen über einen Tag von über 10 °C (in Anlehnung an [24]) wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen
- Bei Überschreiten einer Wassertemperaturzunahme von 1 °C / 10 min wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen, sofern visuell auffällig
- Bei Überschreiten einer Wassertemperaturabnahme von 1 °C / 10 min wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen, sofern visuell auffällig
- kein Vergleich mit einer offiziellen Wassertemperatur-Messtelle
- Rohdaten 1 Tag vor und nach ausgeschlossenen Zeiträumen wurden ganztags ausgeschlossen, sofern visuell auffällig. Zwischen ausgeschlossenen Zeiträumen verbleibende Einzeltage (bis zu drei Tage) wurden ebenfalls ganztags ausgeschlossen

Bei der Messreihe Wigger Logger Nr. 6 (Logger an der Sohle) wurden die offensichtlich zum Teil unbrauchbaren, gemessenen Rohdaten (Logger lag zum Teil an der Luft) folgendermassen bereinigt:

- Beim Auftreten von Minus-Wassertemperaturen wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen
- Beim Auftreten von Wassertemperaturen über 28 °C (Mittelwert zwischen offenen Pools [40] und natürlichen Gewässern [4]) wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen

- Bei Wassertemperaturschwankungen über einen Tag von über 10 °C (in Anlehnung an [24]) wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen
- Bei Überschreiten einer Wassertemperaturzunahme von 1 °C / 10 min wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen, sofern visuell auffällig
- Bei Überschreiten einer Wassertemperaturabnahme von 1 °C / 10 min wurde der ganze betroffene Tag ausgeschlossen, sofern visuell auffällig
- kein Vergleich mit einer offiziellen Wassertemperatur-Messstelle
- Rohdaten 1 Tag vor und nach ausgeschlossenen Zeiträumen wurden ganztags ausgeschlossen, sofern visuell auffällig. Zwischen ausgeschlossenen Zeiträumen verbleibende Einzeltage (bis zu drei Tage) wurden ebenfalls ganztags ausgeschlossen

Es wurde ein Vergleich mit den vom Kanton Luzern an der Luthern in Gettnau (Fischpass) gemessenen Werten vorgenommen. Dieser Vergleich zeigte, dass mit den angewandten Kriterien bei der kantonalen Messstelle Daten an 32 Tagen ausgeschlossen worden wäre (tiefste gemessene Wassertemperatur: 1.0 °C, höchste gemessene Wassertemperatur: 32.6 °C, max. Wassertemperaturschwankung an einem Tag: 15.4 °C, max. Wassertemperaturzunahme: 7.80 °C/, max. Wassertemperaturabnahme: - 5.30 °C / h.

Die Ausschlussgründe wurden in den Excel-Files dokumentiert.

Anhang 4: Kommentierte Rohdaten, kontrollierte / bereinigte Messreihen sowie ausgewertete Wetter und Abflussdaten

In Absprache mit den Betreuern wurden die kommentierten Rohdaten und kontrollierten bzw. bereinigten Messreihen und die ausgewerteten Wetter- und Abflussdaten ausschliesslich digital auf dem beiliegenden USB-Stick abgegeben (Grossformat)

Anhang 5: Ergebnisse Hypothesentests

Tab. A3: Ergebnisse Hypothese 1

Rechenschritt	Ergebnisse Sommertage	Ergebnisse Hitzetage
Anzahl gepaarte Differenzen	$n = 35$	$n = 12$
Anzahl Freiheitsgrade	$n\text{-}1 = 34$	$n\text{-}1 = 11$
Mittelwert Differenzen	$\overline{d} = 0.16$	$\overline{d} = 0.16$
Standardabweichung	$s = 0.09$	$s = 0.09$
Standardfehler	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.02$	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.03$
Prüfgrösse für gepaarte Differenzen	$\frac{\overline{d}}{s / \sqrt{n}} = 10.28$	$\frac{\overline{d}}{s / \sqrt{n}} = 5.86$
p-Wert	$<< 0.01$	$<< 0.01$

Tab. A4: Ergebnisse Hypothese 1.2

Rechenschritt	Ergebnisse Sommertage	Ergebnisse Hitzetage
Anzahl gepaarte Differenzen	$n = 35$	$n = 12$
Anzahl Freiheitsgrade	$n\text{-}1 = 34$	$n\text{-}1 = 11$
Hypothetische Differenz	0.12	0.08
Mittelwert Differenzen	$\overline{d} = 0.04$	$\overline{d} = 0.08$
Standardabweichung	$s = 0.09$	$s = 0.09$
Standardfehler	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.02$	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.03$
Prüfgrösse für gepaarte Differenzen	$\frac{\overline{d}}{s / \sqrt{n}} = 2.73$	$\frac{\overline{d}}{s / \sqrt{n}} = 2.92$
p-Wert	$(100 - 0.005) > 99.99$	$(100 - 0.007) > 99.99$

Tab. A5: Ergebnisse Hypothese 2

Rechenschritt	Ergebnisse Sommertage	Ergebnisse Hitzetage
Anzahl gepaarte Differenzen	$n = 35$	$n = 12$
Anzahl Freiheitsgrade	$n - 1 = 34$	$n - 1 = 11$
Mittelwert Differenzen	$\overline{d} = 0.24$	$\overline{d} = 0.28$
Standardabweichung	$s = 0.13$	$s = 0.12$
Standardfehler	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.02$	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.04$
Prüfgrösse für gepaarte Differenzen	$\frac{\overline{d}}{s / \sqrt{n}} = 11.32$	$\frac{\overline{d}}{s / \sqrt{n}} = 7.71$
p-Wert	$<< 0.01$	$<< 0.01$

Tab. A6: Ergebnisse Hypothese 2.2

Rechenschritt	Ergebnisse Sommertage	Ergebnisse Hitzetage
Anzahl gepaarte Differenzen	$n = 35$	$n = 12$
Anzahl Freiheitsgrade	$n - 1 = 34$	$n - 1 = 11$
Hypothetische Differenz	0.18	0.15
Mittelwert Differenzen	$\overline{d} = 0.06$	$\overline{d} = 0.13$
Standardabweichung	$s = 0.13$	$s = 0.12$
Standardfehler	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.02$	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.04$
Prüfgrösse für gepaarte Differenzen	$\frac{\overline{d}}{s / \sqrt{n}} = 2.81$	$\frac{\overline{d}}{s / \sqrt{n}} = 3.55$
p-Wert	$(100 - 0.004) > 99.99$	$(100 - 0.002) > 99.99$

Tab. A7: Ergebnisse Hypothese 3

Rechenschritt	Ergebnisse Sommertage	Ergebnisse Hitzetage
Anzahl gepaarte Differenzen	$n = 87$	$n = 13$
Anzahl Freiheitsgrade	$n\text{ -1} = 86$	$n\text{ -1} = 12$
Mittelwert Differenzen	$\overline{d} = \text{--}0.04$	$\overline{d} = \text{-}0.09$
Standardabweichung	$s = 0.17$	$s = 0.07$
Standardfehler	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.02$	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.02$
Prüfgrösse für gepaarte Differenzen	$\frac{\overline{d}}{s\,/\,\sqrt{n}} = \text{-}2.42$	$\frac{\overline{d}}{s\,/\,\sqrt{n}} = 4.39$
p-Wert	0.01	0.01

Tab. A8: Ergebnisse Hypothese 4

Rechenschritt	Ergebnisse Sommertage	Ergebnisse Hitzetage
Anzahl gepaarte Differenzen	$n = 88$	$n = 13$
Anzahl Freiheitsgrade	$n\text{ -1} = 87$	$n\text{ -1} = 12$
Mittelwert Differenzen	$\overline{d} = \text{-}0.01$	$\overline{d} = \text{-}0.07$
Standardabweichung	$s = 0.20$	$s = 0.07$
Standardfehler	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.02$	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.02$
Prüfgrösse für gepaarte Differenzen	$\frac{\overline{d}}{s\,/\,\sqrt{n}} = \text{-}0.30$	$\frac{\overline{d}}{s\,/\,\sqrt{n}} = \text{-}3.83$
p-Wert	0.38	0.01

Tab. A9: Ergebnisse Hypothese 5

Rechenschritt	Ergebnisse Sommertage	Ergebnisse Hitzetage
Anzahl gepaarte Differenzen	$n = 5$	$n = 5$
Anzahl Freiheitsgrade	$n - 1 = 4$	$n - 1 = 4$
Mittelwert Differenzen	$\overline{d} = 0.84$	$\overline{d} = 0.84$
Standardabweichung	$s = 0.57$	$s = 0.57$
Standardfehler	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.25$	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.25$
Prüfgrösse für gepaarte Differenzen	$\frac{\overline{d}}{s / \sqrt{n}} = 3.32$	$\frac{\overline{d}}{s / \sqrt{n}} = 3.32$
p-Wert	$(100 - 0.015) < 99.99$	$(100 - 0.015) < 99.99$

Tab. A10: Ergebnisse Hypothese 6

Rechenschritt	Ergebnisse Sommertage	Ergebnisse Hitzetage
Anzahl gepaarte Differenzen	$n = 5$	$n = 5$
Anzahl Freiheitsgrade	$n - 1 = 4$	$n - 1 = 4$
Mittelwert Differenzen	$\overline{d} = -1.47$	$\overline{d} = -1.47$
Standardabweichung	$s = 1.13$	$s = 1.13$
Standardfehler	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.50$	$\frac{s}{\sqrt{n}} = 0.50$
Prüfgrösse für gepaarte Differenzen	$\frac{\overline{d}}{s / \sqrt{n}} = 2.91$	$\frac{\overline{d}}{s / \sqrt{n}} = 2.91$
p-Wert	$(100 - 0.02) < 99.99$	$(100 - 0.02) < 99.99$

In Absprache mit den Betreuern wurden die den obenstehenden Hypothesentests zugrunde liegenden Tabellen und Berechnungen ausschliesslich digital auf dem beiliegenden USB-Stick abgegeben (Grossformat)

Anhang 6: Erklärungsversuche zum Kapitel Diskussion

Erklärungsversuch nächtlicher Temperaturspitzen der Logger Wigger 1 und Bünz 1:

Die Logger Nr. 1 der Wigger und der Bünz (jeweils die obersten Logger, die beide unterhalb von Stauhaltungen liegen) hatten überraschend verspätete Minimalwerte um die Mittagszeit und Maximalwerte um Mitternacht aufgezeichnet. Die nächtlichen Temperaturspitzen sind meiner Meinung nach generell und auch in Bezug auf die Literatur erstaunlich, da die Einflüsse auf die Wassertemperatur und auch die Erfahrung ab Sonnenuntergang eine Abkühlung und nicht einen weiteren Anstieg erwarten lassen würden. Dies wurde nicht genauer untersucht, jedoch soll nachfolgend kurz versucht werden die nächtlichen Temperaturanstiege einzuordnen:

Die Energieflüsse nach Frey ([14]) Einstrahlung, Abstrahlung, Konvektion sind nicht vorhanden oder Entziehen dem Wasser in der Nacht Wärme. Die Reibung ist in den Stauhaltungen vernachlässigbar und wäre auch bei den anderen Loggern vorhanden. Unter der Annahme, dass in der Nacht der Taupunkt in der Luft unterschritten wird, kann dem Wasser Energie durch Kondensation zugeführt werden. Auch dieser Einfluss dürfte aber an allen Loggern in vergleichbarem Ausmass wirken. Aus Sicht des Verfassers verbleiben daher Wärmeeinträge gespeicherter Energie (Sediment, Stauhaltungen, Fremdeinträge), oder biologische Prozesse als denkbare Erklärungen.

Fremdeinträge, z.B. illegale nächtliche Einleitungen sind infolge Fehlens von Industrie und auch dadurch unwahrscheinlich, dass die nächtlichen Temperaturspitzen an zwei verschiedenen Gewässern festgestellt wurden.

Einleuchtender ist ein Zusammenhang mit den Stauhaltungen. Der Sonne übermässig ausgesetzte Natursteinblöcke oder Sediment konnten hier nicht erkannt werden. Dennoch könnten Blöcke und die in der Stauhaltung gespeicherte Wärme auch noch nach Sonnenuntergang abgegeben werden.

Der nächtliche weitere Anstieg der Wassertemperaturen könnte auch auf biologische Prozesse zurückgeführt werden (siehe [31]).

Die nächtliche Erwärmung kann im Rahmen der Arbeit und auch aus Expertensicht (Abklärungen mit Matthias Mende) nicht erklärt werden.

Erklärungsversuch der nächtlichen Erwärmung auf der Blockrampe Wigger Oftringen:

Aus den Untersuchungen auf der Blockrampe Oftringen konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass auf der Blockrampe keine messbare Erwärmung an Sommer- und Hitzetagen bei Niedrigwasser stattgefunden hatte, aber wohl eine Dämpfung der Tagesamplitude nach dem Abfliessen über die Blockrampe um ca. 0.15 bis 0.20 °C. Dies wird auf erhöhte nächtliche Minimaltemperaturen unterhalb der Blockrampe zurückgeführt. Obwohl nicht genauer untersucht, werden nachfolgend einige Gedankengänge dargelegt und dieses Resultat zu begründen versucht:

Von den bekannten Einflüssen auf Wassertemperaturen sind beim vorliegenden Vergleich die grossräumigen Einflüsse die Gleichen. Es verbleiben aus Sicht des Verfassers die lokalen Einflüsse wie z.B. das Sediment / die Natursteinblöcke, Kondensation oder die Wasserherkunft.

Auch unterschiedliche Bedingungen der Logger wären theoretisch gewesen (z.B. ein Logger eingegraben), dies konnte nicht rekonstruiert werden.

Die Logger lagen zudem in unterschiedlichen Fliesstiefen (35 cm / 75 cm). Dieser Einfluss ist aufgrund der bekannten Literatur und der Untersuchungen dieser Arbeit wohl als vernachlässigbar zu sehen.

Das Sediment war, soweit sichtbar, an beiden Logger Standorten und auch oberhalb Logger Nr. 4 vergleichbar es Flusskies. Auf der Blockrampe kommen jedoch deutlich grössere Blöcke zum anstehenden Flusskies hinzu die oft aus dem Wasser herausragen. Diese herausragenden Blöcke können sich, wie auch in [41] gezeigt, erwärmen und die gespeicherte Wärme später wieder abgeben. Die daraus resultierende Dämpfung müsste sich in einer verspäteten Erwärmung und Abkühlung zeigen, was aus den Daten in Abb. 4-4 nicht sichtbar ist. Im Gegenteil scheint die Wassertemperatur am Logger 5 frühmorgens bereits früher anzusteigen als am Logger 4.1.

Denkbar war auch eine Dämpfung der Temperaturkurve am Logger Nr. 5 durch Grundwassereinträge, durch die im Gelände tiefer eingeschnittene Lage gegenüber Logger Standort 4. Die Grundwassertemperaturen in Brittnau im Sommer 2021 betrugen rund 12.5 °C [42]. In dieser Grössenordnung liegende Grundwassertemperaturen können daher die nächtlich erhöhten Wassertemperaturen unterhalb der Blockrampe nicht erklären. Durch eine Vermischung mit kühlem Grundwasser gemäss Formel 1 müsste durch den kühlen Grundwassereintrag im Sommer eine konsequent tiefere Wassertemperatur – auch Nachts - resultieren. Zudem müsste die Wassertemperatur im Winter tendenziell erhöht sein (zumindest bei gleichen Eintragsmengen), dies ist aus den Daten nicht ersichtlich.

Anhang 7: Berechnete Einflüsse der seitlichen Zuflüsse

Tab. A11: Ergebnisse Oberst. Pritschen Wuhrbach

	Ergebnis	Bemerkungen
m_1	0.8 m^3/s	3.8 - 3.0 (Restwasserregelungen), Abfluss am 15.06.21 = 3.8 m^3 / s
T_1	18.45 °C	Temperatur Wigger Logger 4.1, gemittelt 16:00 – 17:00
m_2	0.001 m^3/s	1 l / s am 15.06.21, 17:00
T_2	21 °C	Temperatur Wuhrbach am 15.06.21, gemittelt 16:00 – 17:00
T_M	18.453 °C	gemäss Formel 1
ΔT	0.003 °C	

Tab. A12: Ergebnisse Hardbach

	Ergebnis	Bemerkungen
m_1	0.8 m^3/s	3.8 - 3.0 (Restwasserregelungen), Abfluss am 15.06.21 = 3.8 m^3 / s
T_1	18.45 °C	Temperatur Wigger Logger 4.1, gemittelt 16:00 – 17:00
m_2	0.005 m^3/s	5 l / s am 15.06.21, 16:30 (Abschätzung Normalabfluss mit h = 0.05 und angenommenen J = 0.5 %
T_2	15.2 °C	Temperatur Harbach am 15.06.21, gemittelt 16:30 – 17:30
T_M	18.43 °C	gemäss Formel 1
ΔT	-0.02 °C	