



Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Fischzönosen oberösterreichischer Fließgewässer

mit besonderer Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Klimastudie
Prinz et al. 2009

Impressum

Autorinnen und Autoren:

Florian KEIL*, Reinhard HAUNSCHMID*, Haimo PRINZ*, Brigitte SASANO*, Lukas HUNDRITSCH*

Auftragnehmer:

*Bundesamt für Wasserwirtschaft

Institut für Gewässerökologie und Fischereiwirtschaft

Scharfling 18, 5310 Mondsee

Auftraggeber:

Amt der Oö. Landesregierung

Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft

Abteilung Wasserwirtschaft / Wasserwirtschaftliche Planung

Kärntnerstraße 10-12, 4021 Linz

Titelfoto: Florian KEIL

Scharfling, 2018

Inhalt

1 Einleitung	3
2 Forschungsauftrag.....	7
3 Material und Methoden.....	8
3.1 Datengrundlage.....	8
3.2 Trend- & Korrelationsanalysen	11
3.3 Mittlere jährliche Temperaturänderung	12
3.4 Verschneidung Luft-/Wassertemperaturmessreihen.....	13
3.5 Analyse der Temperaturgrenzen gem. WRG (i.e. Überschreitung von fischregionsspezifischen Wassertemperaturgrenzwerten	14
3.6 Seehöhenmodell und Fischartengemeinschaft.....	15
3.7 Prognosemodelle.....	17
4 Ergebnisse und Diskussion	18
4.1 Trend- & Korrelationsanalysen	18
4.2 Mittlere jährliche Temperaturänderung	22
4.3 Korrelation von Luft-/Wassertemperaturmessdaten und retrospektive Analysen	30
4.4 Analyse der Temperaturgrenzwerte gem. WRG (i.e. Überschreitung von fischregionsspezifischen Wassertemperaturgrenzwerten)	35
4.5 Seehöhenmodell und Fischartengemeinschaft.....	40
Fließlängenverschiebung.....	46
4.6 Prognosemodelle.....	50
4.7 Temperaturpräferenz am Beispiel der Äsche (<i>Thymallus thymallus</i>).....	52
5 Zusammenfassung	56
Literaturverzeichnis	60

1 Einleitung

Die im Folgenden angeführte Textpassage ist dem „Fifth Assessment Report“ des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen), im Deutschen oft als „Weltklimarat“ bezeichnet, entnommen (IPCC, 2014) und könnten eindeutiger kaum sein:

“Previous assessments have already shown through multiple lines of evidence that the climate is changing across our planet, largely as a result of human activities. (...) Global mean surface air temperatures over land and oceans have increased over the last 100 years. (...) Paleoclimatic reconstructions have helped place ongoing climate change in the perspective of natural climate variability.”

„Frühere Bewertungen haben bereits gezeigt, dass sich das Klima auf unserem Planeten verändert, hauptsächlich aufgrund menschlicher Aktivitäten. (...) Die globalen mittleren Lufttemperaturen an Land und in den Ozeanen haben in den letzten 100 Jahren zugenommen. (...) Paläoklimatische Rekonstruktionen haben dazu beigetragen, den fortschreitenden Klimawandel in die Perspektive der natürlichen Klimavariabilität zu stellen.“

Klimawandel findet statt, daran gibt es keinen Zweifel mehr. So war die global gemessene Temperatur an der Erdoberfläche in jedem der letzten drei Jahrzehnte sukzessive wärmer als in den vorherigen Jahrzehnten seit 1850. In der nördlichen Hemisphäre war 1983-2012 wahrscheinlich die wärmste 30-Jahres-Periode der letzten 1400 Jahre. Die global gemittelten kombinierten Daten der Land- und Ozeanoberflächentemperatur, berechnet durch einen linearen Trend, zeigen eine Erwärmung von 0,85 °C [0,65 bis 1,06 °C] über den Zeitraum 1880 bis 2012 (IPCC, 2014). Die globale Oberflächentemperatur der Erde wurde 2017 einer Analyse der NASA zufolge als die zweit-wärmste seit 1880 eingestuft, die global gemittelten Temperaturen im Jahr 2017 waren um 0,90 Grad Celsius wärmer als der Mittelwert von 1951 bis 1980 (NASA, 2018).

Auf nationaler Ebene beschreiben Böhm et al. (Böhm, Godina, Nachtnebel & Pirker, 2008), dass gerade die alpinen Regionen gegenüber Klimaänderungen besonders sensibel sind. So sind die Änderungen im Alpenraum deutlich stärker ausgeprägt als im globalen Mittel. Die Lufttemperatur hat in Österreich seit Mitte der 1970er bis Anfang der 2010er Jahre deutlich

(fast 1,5 °C) zugenommen, wobei es sich dabei um einen für Österreich sehr einheitlichen Trend handelt (Schöner et al., 2010).

Bezogen auf die aquatischen Lebensräume und dessen Bewohner ist die Wassertemperatur einer der wichtigsten Faktoren. Mit der Wassertemperatur wird, neben chemischen und physikalischen Eigenschaften des Wassers, auch der Ablauf der Lebensvorgänge von Fischen entscheidend beeinflusst. Fische als wechselwarme (poikilotherme) Organismen reagieren besonders sensibel auf Veränderungen der Wassertemperatur. Dies zeigt sich unter anderem beim Laichverhalten, welches je nach Fischart bei ganz bestimmten Temperaturen stattfindet. Aber auch Prozesse wie Wachstum, Stoffwechsel, bis hin zur Entwicklungsdauer und zum Schlüpfertag der Eier sind temperaturabhängig. Außerhalb eines optimalen Temperaturbereichs, welcher für verschiedene Fischarten charakteristisch ist, folgen Bereiche, in denen die Fische physiologischem Stress ausgesetzt sind. Auswirkungen dieses Stresses reichen von Verhaltensänderungen bis hin zum Tod bei nicht tolerierbaren Temperaturänderungen (Becker & Genoway, 1979).

Die wechselwarme Eigenschaft bedeutet, dass die Fische nicht physiologisch, sondern nur verhaltensmäßig thermoregulieren können, indem sie sich in Bereiche mit geeigneten Temperaturen bewegen. Wenn sie dazu in der Lage sind (i.e. bei vorhandener Durchgängigkeit der Gewässer), werden sich die Populationsbildung kalt-stenothermer Arten (z.B. Salmoniden) wahrscheinlich zu höheren Breiten oder Höhen hin verschieben, während solche Arten am wärmeren Ende des Verbreitungsgebietes lokal aussterben könnten. Im Gegensatz dazu können eurytherme Arten, die eine große thermische Toleranz aufweisen (z.B. Cypriniden) in der Lage sein mit den neuen thermischen Gegebenheiten fertig zu werden und so keinen Verlust und möglicherweise sogar eine Verbreitungszunahme erfahren (Graham & Harrod, 2009; Hari & Januar, 2004; Jeppesen & Iversen, 1987; Lyons, Stewart & Mitro, 2010; Prinz, Lahnsteiner, Haunschmid, Jagsch & Sasano, 2009).

Untersuchungen in der Schweiz ergaben einen Temperaturanstieg zwischen 0,4 und 1,6°C innerhalb der letzten 25 Jahre des letzten Jahrtausends als Folge des Klimawandels und eine Verschiebung der Lebensräume von Bachforellen in 100 – 200 m höhere Regionen (Meili, Scheurer, Schipper & Holm, 2004). Die Hypothese, dass Veränderungen der Wassertemperatur zu einem Rückgang der Fischpopulationen und -fänge geführt haben, hat sich in dieser Studie bei warmen Mittellandflüssen mit mehrwöchigen Perioden über 15 °C bestätigt. Ähnliche Werte wurden auch für Oberösterreich in den Fischbioregionen „Alpenvorland und Flysch“ (118 – 128 m) sowie „Kalkvoralpen und Kalkhochalpen“ (122 – 147 m) in der Studie von Prinz (Prinz et al., 2009) errechnet, mit Ausreißern nach oben in der Fischbioregion „Granit und Gneisgebiet der Böhmisches Masse“ mit 367 – 509 m Seehöhenverschiebung (95%-ige Vertrauensgrenzen).

Bachforellen bevorzugen zum Beispiel kühlere Temperaturen um 13°C, wohingegen Wassertemperaturen über 25°C nur kurzzeitig ertragen werden können. Alle Fischarten und –regionen übergreifend wurden 2008 im „Leitfaden zur typspezifischen Bewertung der allgemein physikalisch-chemischen Parameter in Fließgewässern gemäß WRRL“ Temperaturgrenzwerte für jede Fischregion Österreichs und die Grenzen zwischen den Zuständen sehr gut – gut und gut – mäßig festgelegt. Hierbei wurde nicht nur die kurzzeitige Überschreitung von Temperaturwerten berücksichtigt, sondern auch das längerfristige Einwirken auf die Fischfauna mitbedacht. So wirken z.B. in der Forellenregion (Epi- und Metarhithral) längerfristige Überschreitungen von 20°C bereits populationsbeeinflussend und ein guter Zustand kann nicht mehr gewährleistet werden (Deutsch, Haunschmid, Kreuzinger & Prinz, 2015).

In der Studie von Prinz et al. 2009, in der Wassertemperaturentwicklungen an 76 oberösterreichischen Gewässern bis ca. 2005 untersucht wurden, konnten seit den 1980er Jahren zum Teil beachtliche Temperaturerhöhungen festgestellt werden. Unterschiede ergaben sich bei Betrachtung der Fischbioregionen sowie zwischen Fließgewässern oder saisonalen Temperaturschwankungen.

Zusammenfassend sind folgende Ergebnisse angeführt:

- Die Trendanalyse von 76 Wassertemperaturmessstellen in Oberösterreich ergab, dass bei 55% der Gewässer (42 Messstellen) ein signifikanter Trend zu steigenden Jahresmittelwerten der Wassertemperatur von 1984 bis 2004 vorherrscht.
- Die Berechnung der mittleren jährlichen Temperaturänderung von 1984 bis 2004 ergaben Änderungen von bis zu 0,12°C des Jahresmittelwertes pro Jahr, der Mittelwert über alle Messstellen ergibt einen Temperaturanstieg von 0,041 °C pro Jahr.
- Die beobachtete Temperaturerhöhung verteilt sich nicht gleichmäßig auf das ganze Jahr, sondern tritt in den 2. und 3. Quartalen (Monate April bis August) des Beobachtungszeitraumes am Stärksten auf.
- Aufgrund von retrospektiven Untersuchungen konnte ein konstanter, gleich bleibender Temperaturverlauf bei Zeitreihen zwischen maximal rückreichend bis 1885 und 1990 belegt werden; der durchschnittliche Temperaturanstieg der Jahresmittelwerte pro Jahr beträgt hier 0,002°C. Zwischen den Jahren 1990 bis 2007 wurde hingegen ein starker Anstieg bei der Mehrzahl der untersuchten Stellen gefunden; hier beträgt der mittlere Temperaturanstieg 0,041°C, das mehr als zwanzigfache gegenüber 1885-1990.
- Die prognostizierte Erhöhung der Wassertemperatur bis 2020 führt zu einer mittleren Verschiebung der Fischregionen flussaufwärts um 124 m Seehöhe in der

Fischbioregion Alpenvorland und Flysch, um 138 m in der Fischbioregion Kalkalpen und um 436 m in der Fischbioregion Granit- und Gneisgebiet der böhmischen Masse. Bezogen auf den longitudinalen Flussverlauf bedeutet dies eine mittlere Verschiebung der jeweiligen Fischregion flussaufwärts von 27 km im Alpenvorland und Flysch, 10 km in den Kalkalpen und 43 km im Granit- und Gneisgebiet.

2 Forschungsauftrag

Da Temperaturen und Temperaturveränderungen signifikante Auswirkungen auf Fische haben können, stellte sich die Frage, ob die in der Studie 2009 prognostizierten Werte anhand neuer Temperaturdaten (bis 2015) verifiziert werden können bzw. Prognosen mittels neuem Datenstand de novo erstellt werden können. Die Klimaveränderung zeigt ihre Auswirkungen nicht nur anhand der Temperatur, sondern auch anhand damit einhergehender Veränderungen wie z.B. Frequenz oder Ausprägungen von Hochwasserereignissen bzw. wie Ökosysteme (und Fische als Teil der Ökosysteme) auf die Summe dieser Veränderungen reagieren.

Fische stellen seit dem Jahr 2003 im österreichischen Wasserrechtsgesetz (WRG 1959 i.d.g.F.) das Qualitätselement in Fließgewässern dar, welches maßgeblich indikativ für hydromorphologische Belastungen ist. Sie dienen als biologische Messgröße des Zustandes der Gewässer. Das dazu notwendige Bewertungssystem (Fisch-Index-Austria, kurz FIA) basiert auf einem so genannten Leitbild, i.e. der Referenzichthyozönose. Darin enthalten sind die jeweiligen typspezifischen Fischarten, welche wiederum spezifische Temperaturpräferenzen haben, aber auch spezifische Anforderungen hinsichtlich hydromorphologischer Merkmale ihres Lebensraumes aufweisen.

Das vorliegende Projekt umfasst die Grundlage einerseits in Hinsicht Forschung, andererseits in Hinsicht wasserwirtschaftlich-planerischer Entscheidungsfindung. In der Studie 2009 wurde der Ansatz verfolgt, ob und in welchem Ausmaß Fischregionen von der Temperaturveränderung betroffen sind. Der Aufbau dieser Studie ähnelt jenem aus dem Jahr 2009. Neu ist ein erweiterter Temperaturdatensatz von beachtlichen etwa 10 Jahren, die Vergleichsmöglichkeit zu den Erkenntnissen aus 2009 und damit auch der Aussagekraft dieser Modellierungen und die Ermittlung der gewässerbezogenen (theoretischen) Auswirkung der Wassertemperaturveränderung auf die Fischregionseinteilung.

Verändert sich die Temperatur, tritt schließlich auch die Frage auf, inwieweit sich die gesamte Fischzönose (Fischregion) theoretisch flussauf verschiebt. Aufgrund der unterschiedlichen Bedürfnisse der einzelnen Arten (Temperatur, Hydromorphologie) ist auch die Möglichkeit denkbar, dass sich neue Artenzusammensetzungen ergeben; diese schon sehr detailreichen Untersuchungen sind allerdings nicht Teil dieses Projektes.

3 Material und Methoden

3.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage wurde vom Hydrographischen Dienst des Landes Oberösterreich (HD OÖ) (Wassertemperaturdaten) bzw. von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) zur Verfügung gestellt. Eine Übersicht über die Messstationen ist in Abbildung 1 ersichtlich.

Der Fokus der vorliegenden Untersuchung bezieht sich auf Fließgewässer in Oberösterreich. Insgesamt wurden 95 Wassertemperaturmessstellen für diese Untersuchung herangezogen. Nach einer ersten „Plausibilitätsprüfung“ konnten immerhin 63 Messstellen für die weiteren Detailauswertungen verwendet werden (Abbildung 1). Die restlichen Messstellen wurden entweder aufgrund eines zu kurzen Daten-Zeitraumes nicht verwendet (siehe Abbildung 2) oder weil sie sich als Messstellen in stehenden Gewässern erwiesen. Sämtliche Wassertemperaturdaten wurden vom Hydrographischen Dienst des Landes Oberösterreich in digitaler Form zur Verfügung gestellt.

Die Wassertemperaturen (WTemp) lagen als 15-Minuten-Messwerte vor. Für die weiteren Analysen wurden Tagesmittelwerte sowie Jahressummengrade und -mittelwerte für jede Messstelle gebildet. Daten zu den Messstellen umfassten den Namen und HZBNr. der Messstelle, Koordinaten, Seehöhe, Einzugsgebiet und Zeitraum der Messreihe. Die Messreihen reichten von 01.01.1976 bis maximal 31.12.2015. Über 80% aller Aufnahmen umfassen den Zeitraum 1984-2015, welcher im Weiteren meist als Betrachtungszeitraum herangezogen wird.

Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik stellte insgesamt 29 Lufttemperatur-Stellen samt Messreihen zur Verfügung, welche in Oberösterreich oder nahe der Landesgrenze liegen. Die Messreihen reichten von maximal 1876 bis 2017. Insgesamt 6 Messstellen wurden nicht in die weiteren Auswertungen miteinbezogen, da ihre Messreihen zu kurz waren. Die Lufttemperaturen (LTemp) lagen als Tagesmittelwerte vor, die weiteren Messstelleninformationen umfassten Seehöhe und Koordinaten sowie den Zeitraum der Messreihe.

Sämtliche Temperaturdaten wurden als Rohdaten in die Statistik-Freeware R (R Core Team, 2018) importiert und dort für die Berechnungen weiterverarbeitet. Alle Messstellen und deren Messreihen wurden über Verschneidung den entsprechenden Fischbioregionen und

Fischregionen zugeordnet, wobei das aktuellste Bundesgewässernetz (BGN 2015) als Datengrundlage verwendet wurde.

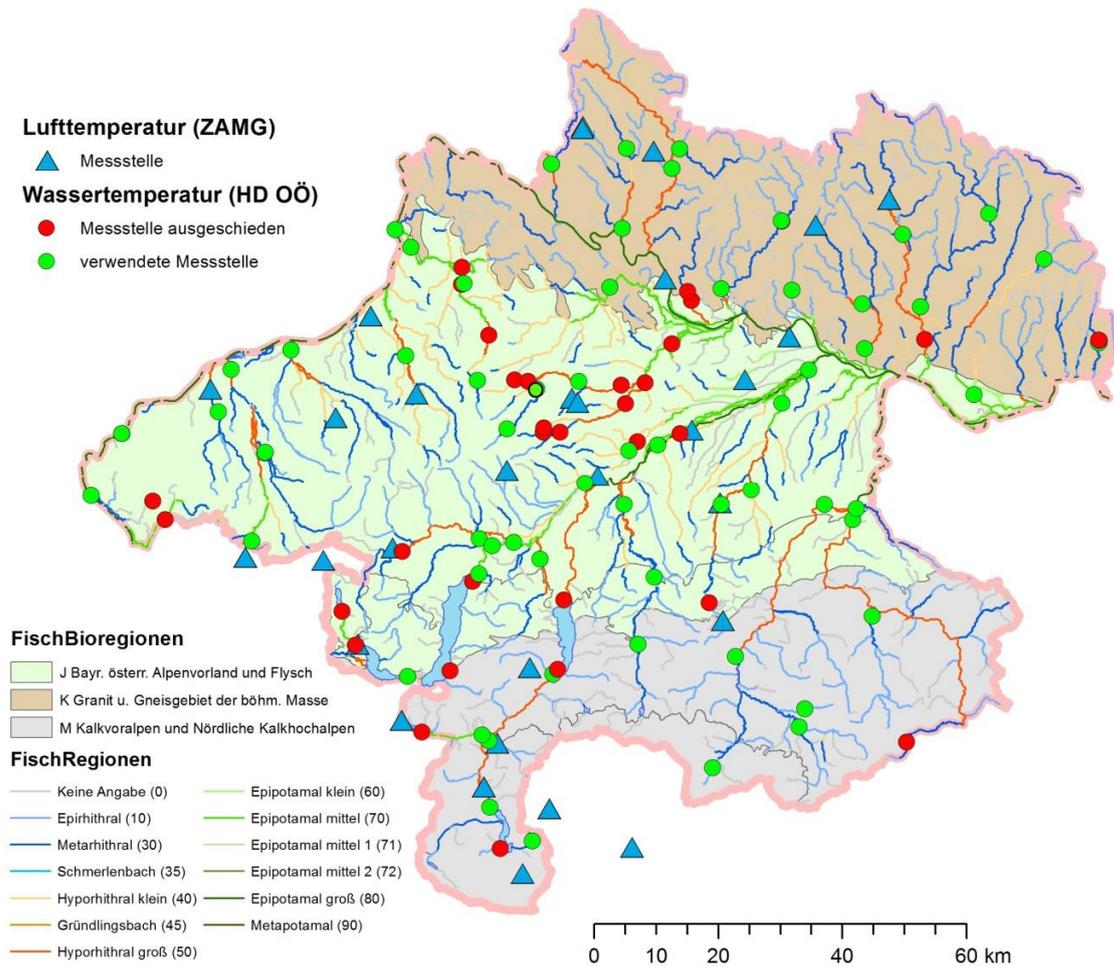


Abbildung 1 Übersichtskarte über alle in den Analysen verwendeten und nicht berücksichtigten Wasser- und Lufttemperaturmessstellen in Oberösterreich bzw. im grenznahen Gebiet; im Hintergrund Fischbioregionen sowie das Gewässernetz mit Fischregionseinteilungen (BMLFUW, 2015)

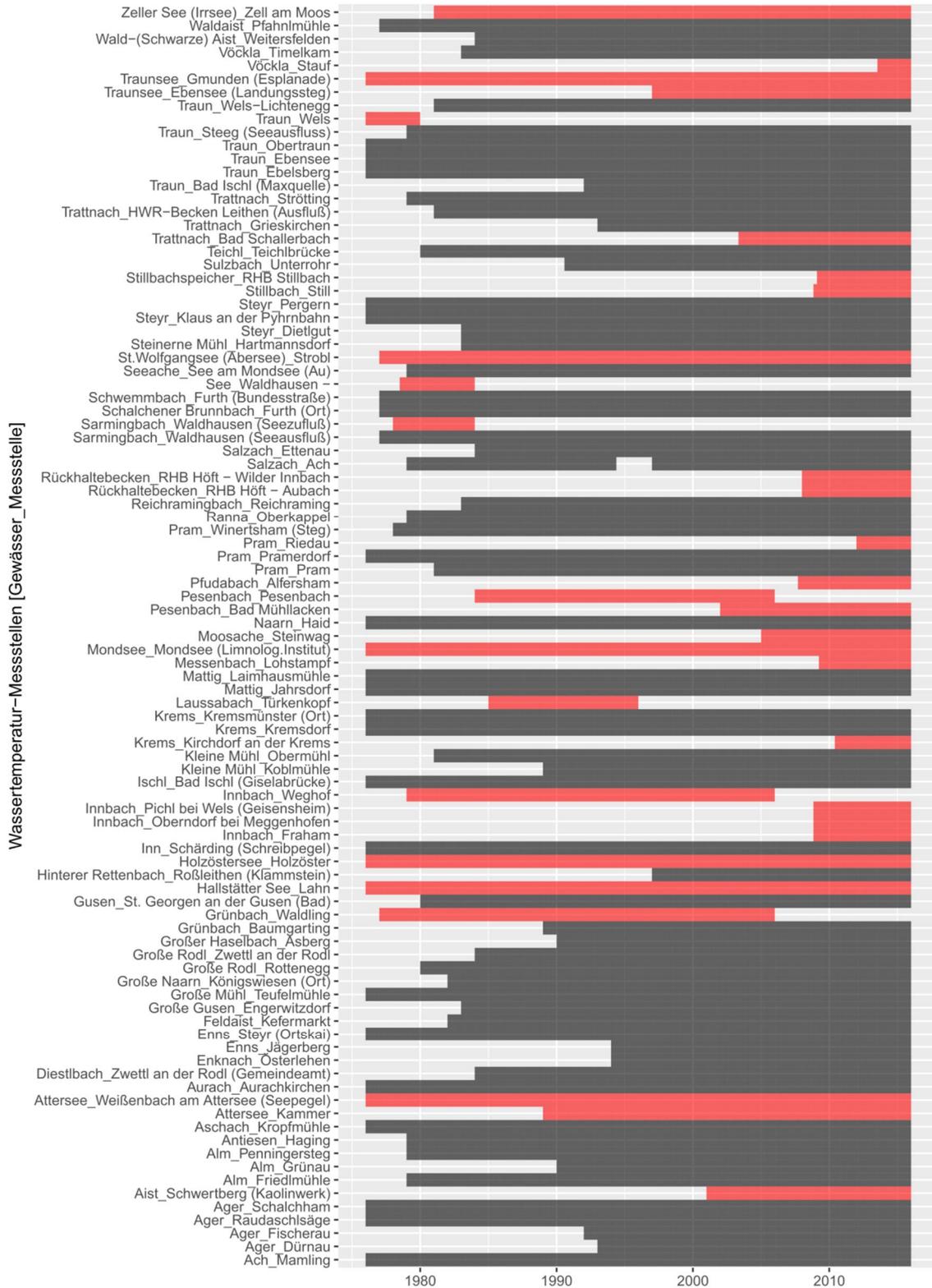


Abbildung 2 Überblick über die vom Hydrographischen Dienst des Landes OÖ zur Verfügung gestellten Wassertemperatur-Messreihen; Beschriftung links definiert Gewässer_Messstelle; rote Balken symbolisieren nicht verwendete Messreihen; x-Achse in Jahren, Balken verlaufen tagesspezifisch;

3.2 Trend- & Korrelationsanalysen

Datenreihen der 63 Messstellen wurden einer Saison-Trend-Zerlegung mithilfe von Loess (STL) unterzogen, wobei die Monatsmittelwerte des Betrachtungszeitraumes zwischen 1984 und 2015 jeder Messstelle verwendet wurden. Die STL zerlegt eine Zeitreihe in eine Trend-, eine Saison- und eine Restkomponente und beruht auf einem iterativen Algorithmus, dem additiven Ansatz der Komponentenzerlegung, und verwendet vor allem das Loess-Verfahren zur Schätzung der einzelnen Werte der Komponenten (Cleveland, Cleveland, McRae, & Terpenning, 1990).

Die Saisonkomponente ist eine dem Datensatz intrinsische, regelmäßig wiederkehrende (z.B. täglich, monatlich, jährlich, ...) und vor allem (möglichst) konstante Struktur. Demgegenüber ist die Trendkomponente eine geglättete Linie, die keinerlei saisonale Strukturen im Zeitraum der Saisonkomponente aufweist. Sie bildet eine langfristige Entwicklung ab, in der nichtsdestotrotz mittel- und langfristige Schwankungen auftreten können. Die Restkomponente weist jene Werte aus, die von den beiden vorherigen nicht erklärt werden können. Hier sollte es sich um stochastisch zufällig entstandene Werte, welche keiner Regelmäßigkeit folgen, handeln.

Aus der STL wurde die Trendkomponente extrahiert und einer Regressionsanalyse (lineares Modell, lm) zwischen den Werten und der Zeitachse unterzogen. Aus dem linearen Modell wurden für eine erste Abschätzung der Trendanalysen die Steigung der Geraden (i.e. Temperaturänderung pro Jahr), das Bestimmtheitsmaß (R^2) und das Signifikanzlevel extrahiert. R^2 ist der prozentuale Anteil der Variation, der durch das lineare Modell „erklärt“ wird, und liegt zwischen 0 (also kein linearer Zusammenhang) und 1 (perfekter linearer Zusammenhang). Je näher also das Bestimmtheitsmaß am Wert 1 liegt, desto höher ist die „Bestimmtheit“ bzw. „Güte“ der Anpassung.

Die 63 ausgewählten Wassertemperatur-Messreihen wurden des Weiteren mittels verschiedener Korrelationsanalysen (Pearsons r , Spearmans ρ , Kendalls τ) analysiert, wobei die Jahresmittelwerte jeder Messstelle für diese Berechnungen herangezogen wurden, die Datenreihen wurden wieder auf den Zeitraum 1984 – 2015 beschränkt.

Bei Pearsons-Produktmomentkorrelationskoeffizienten folgt die Teststatistik einer t -Verteilung mit $(x)-2$ Freiheitsgraden, wenn die Stichproben unabhängigen Normalverteilungen folgen. Dies impliziert des Weiteren ein metrisches Skalenniveau; auch wird eine lineare Beziehung beider Parameter (in unserem Fall „Jahr“ und „Jahresmittelwert“) und eine zweidimensionale Normalverteilung der Daten angenommen.

Bei der Kendalls Tau oder Spearmans Rho-Statistik wird ein rangbasiertes Maß der Assoziation geschätzt. Hier wird angenommen, dass die Daten nicht notwendigerweise aus einer bivariaten Normalverteilung stammen. Spearmans Rangkorrelationskoeffizient ist ein parameterfreies Maß für Korrelationen und benötigt im Gegensatz zu Pearsons r nicht die Annahme, dass die Beziehung zwischen den Variablen linear ist. Kendalls tau ist wie Spearmans Rho ein nichtparametrischer Rangkorrelationskoeffizient, welcher den Zusammenhang zwischen zwei Variablen beschreibt, ohne Annahmen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Variablen zu machen.

Im Zuge dieser Auswertungen erwuchs die Fragestellung, wie mit Stellen weiter vorzugehen ist, welche einen (durch anthropogene Einflüsse erklärbaren) negativen Trend, also eine Abkühlung, aufwiesen. Dies waren, wie in Abbildung 4 ersichtlich, insgesamt 4 Messstellen (Vöckla/Timelkam, Traun/Bad Ischl, Samingbach/Waldhausen und Steyr/Dietlgut). Es sei darauf hingewiesen, dass wohl bei genauerer Betrachtung an mehreren Stellen ein Teil der Temperaturveränderung durch (direkte) anthropogene Beeinflussungen erklärt werden könnten. Allerdings würde man so sich in der Einzel-Messstellenbetrachtung verlieren, weshalb nur die Negativ-Extremergebnisse (ebendiese 4 Messstellen) im Zuge der weiteren Analysen ausgenommen wurden. Die Gesamtzahl der Messstellen verringert sich somit auf 59.

3.3 Mittlere jährliche Temperaturänderung

Zunächst wurden die Messreihen bestehend aus Tagesmittelwerten in Datensätze mit Jahresmittelwerten transformiert. Basierend auf den Jahresmittelwerten der 59 Wassertemperaturmessstellen wurden mittlere jährliche Temperaturänderungen für den Zeitraum 1984 – 2015 errechnet. Dazu wurden zunächst für jede Messstelle lineare Regressionsanalysen auf Basis der Jahresmittelwerte gebildet, die Steigung k dieser Regressionen entspricht der mittleren jährlichen Temperaturänderung [$^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$] der jeweiligen Messstelle für den Betrachtungszeitraum. Ebendiese Temperaturänderungen wurden gesammelt und graphisch nach verschiedenen Parametern (Fischbioregion, Fischregion) getrennt dargestellt (Boxplots). Anhand einer Bootstrap-Analyse wurden Mittelwerte und Varianz der mittleren jährlichen Temperaturänderung für die in Oberösterreich wirksamen Fischbioregionen und Fischregionen errechnet.

Zusätzlich zu den Regressionsgleichungen der Jahresmittelwerte wurden lineare Regressionen für jedes Monat basierend auf Monatsmittelwerten errechnet, um die Temperaturänderung auf einzelne Monate herabbrechen zu können. Auch hier wurden wieder die Steigungen der Regressionsgleichungen als Maß der Temperaturänderung pro

Jahr über den Betrachtungszeitraum 1984 – 2015 für weitere graphisch-deskriptive Darstellungen herangezogen.

3.4 Verschneidung Luft-/Wassertemperaturmessreihen

Da Wassertemperaturdaten nur bis maximal 1976 zurückliegend vorhanden waren, die dem Projekt zugrundeliegenden Messreihen der Lufttemperatur jedoch teilweise bis 1876 zurückreichen, wurden für eine retro- und prospektive Analyse der Temperaturdaten Luft- und Wassertemperaturen miteinander korreliert. Dazu wurden in einem ersten Schritt über eine „Nearest-Neighbour-Analyse“ jeder Wassertemperatur-Messstelle die geographisch nächstgelegenen drei Lufttemperatur-Messstellen zugeordnet. So sollen auch kleinräumige klimatische Bedingungen auf regionaler Ebene bestmöglich in die Analysen mitaufgenommen werden. Dies erscheint gerade in Oberösterreich sinnvoll und wichtig, unterscheiden sich doch die Regionen der Kalkvorlpen bzw. des Alpenvorlandes von den nördlichen Regionen (Granit- und Gneisgebiet) deutlich. Aus den nächstgelegenen drei Lufttemperatur-Messstellen wurde schließlich jene in den weiteren Korrelationsanalysen verwendet, welche den längsten Messzeitraum aufweist.

Es gibt grundsätzlich mehrere Ansätze, wie man Luft- und (Fließgewässer-) Wassertemperaturen korrelieren kann (z.B. linear, logistisch, stochastisch, periodisch autokorreliert, ...). Lineare Modelle sind dabei am einfachsten und verständlichsten und werden in der internationalen Literatur häufig angewandt (Benyahya, Caissie, St-Hilaire, Ouarda, & Bobée, 2007; Caissie, 2006; Kaushal et al., 2010; Rice & Jastram, 2015). Die Regressionsgerade und deren Güte ist dabei direkt abhängig vom Betrachtungsniveau – so weisen Korrelationen in geringer zeitlicher Auflösung (Jahres-, Monats-, Wochendaten) eine bessere Korrelation auf als beispielsweise direkt miteinander korrelierte Tagesmittelwerte oder gar Stundenwerte (Caissie, 2006; Morrill, Bales, & Conklin, 2005; Rice & Jastram, 2015). Dies liegt einerseits am zeitlich etwas verzögerten Energieaustausch zwischen Luft und Wasser, andererseits an sekundären Einflussfaktoren wie z.B. Grundwassereintrag, Schneeschmelze, Gewässertopographie, Grundwasserdargebot, etc.. Weiters stellt der Gefrierpunkt ein Limit für die lineare Regression der beiden Temperaturen dar, ebenso wie in der Literatur ab höheren Temperaturen aufgrund von Kühlungseffekten an der Wasseroberfläche Unsicherheiten beschrieben werden (Bogan, Mohseni, & Stefan, 2003; O. Mohseni & Stefan, 1999; Omid Mohseni, Stefan, & Erickson, 1998).

Für die lineare Korrelationsanalyse zwischen Luft- und Wassertemperaturen wurden in dieser Studie die Messreihen auf Luft-Tagesmittelwerte $>0^{\circ}\text{C}$ beschränkt. Auf Basis der Korrelationsanalysen können anhand der Geradengleichung über die Lufttemperatur die

Wassertemperatur retrospektiv errechnet werden. Für jede Messstelle wurde basierend auf den Originaldaten sowie den errechneten Wassertemperaturdaten eine graphische Darstellung der Temperaturentwicklung über den maximal zur Verfügung stehenden Messzeitraum (bestimmt durch die gewählte Lufttemperaturmessstelle) erstellt. Hierbei wurden (um kurzfristige Temperaturschwankungen zu glätten) die Jahressummengrade der tatsächlich gemessenen sowie der errechneten Wassertemperatur-Tagesmittelwerte sowie ein gleitender Mittelwert verwendet.

Weiters wurden basierend auf diesen Datensätzen (errechnete Wassertemperaturwerte) Anomalie-Graphen generiert, also graphische Darstellung der Abweichung der Jahressummengrade von einer langjährigen Referenz. Dieser Referenzzeitraum wurde entsprechend anderer Studien (Blöschl, Schöner, Helmut Kroiß, Wilfried, & Ludwig, 2011; Schmutz, Jungwirth, & Boku, 2003) mit 1961-1990 festgelegt, d.h. einem errechneten mittleren Jahressummengrad-Wertes jeder Messstelle für diesen Zeitraum. Selbige Vorgehensweise wurde für eine detailliertere Betrachtung der Sommermonate (Mai-September) gewählt.

3.5 Analyse der Temperaturgrenzen gem. WRG (i.e. Überschreitung von fischregionsspezifischen Wassertemperaturgrenzwerten)

Fische sind in Fließgewässern Organismen der Gewässerbiozönose, die sehr sensibel auf Veränderungen der Temperatur reagieren. Eine Festlegung von Qualitätsstandards hat dabei zu berücksichtigen, dass Fische in ihrem Lebenszyklus unterschiedliche Temperaturansprüche haben. Neben maximal zulässigen Temperaturen bei kurzer Dauer in den Sommermonaten sind die Temperaturansprüche zur Laichzeit zu beachten.

Im Leitfaden „Bewertung Gemäß WRRL - Allgemein Physikalisch-Chemische Parameter in Fließgewässern“ (Deutsch et al., 2015) sind für alle in Österreich relevanten Fließgewässertypen (ausgenommen spezielle Typen) Qualitätszielvorschläge für den Parameter Temperatur angeführt (Zusammenfassung in Tabelle 1). Die angeführten Qualitätsstandards für die Abgrenzung des sehr guten Zustands entsprechen im Wesentlichen dem Mittelwert der oberen maximalen Optimaltemperaturen der für das Leitbild jeder Fischbioregion charakteristischen Leit- und typischen Begleitfischarten. Die Bewertung erfolgt dabei anhand der statistischen Kenngröße 98-Perzentil (entspricht Fischgewässer-RL).

In dieser Studie wurden ebendiese Temperaturgrenzen zwischen sehr gutem und gutem Zustand untersucht. Dabei wurden Tage, an denen der Tagesmittelwert diese Grenzen überschreitet, gezählt und umgerechnet auf Überschreitungen pro Jahr und Gewässer bzw. pro Jahr und Prozent der jeweiligen Messstelle.

Tabelle 1 Temperaturgrenze nach Fischregionen gemäß „Leitfaden zur typspezifischen Bewertung gemäß WRRL – Allgemein physikalisch-chemische Parameter in Fließgewässern“ (Deutsch et al., 2015)

FISCHREGION	Grenze sehr gut – gut	Grenze gut – mäßig
Epirhithral	15 °C	20 °C
Metarhithral	17 °C	20 °C
Hyporhithral klein	19 °C	21.5 °C
Hyporhithral groß	19 °C	21.5 °C
Epiopotamal klein	23 °C	26 °C
Epiopotamal mittel	22 °C	26 °C
Epiopotamal groß	23 °C	26 °C
Metapotamal	25 °C	26 °C

3.6 Seehöhenmodell und Fischartengemeinschaft

Wie bereits in Prinz et al. (2009) beschrieben wurde, nimmt sowohl die Wassertemperatur als auch die Lufttemperatur mit zunehmender Seehöhe ab, wobei es Unterschiede in den drei hier betrachteten Fischbioregionen gibt. In der Studie 2009 wurde die Seehöhe basierend auf der durchschnittlichen Zunahme der Jahressummengrade zwischen 1984 und 2020 (prognostiziert) analysiert. Hier wird nun ein anderer Ansatz verfolgt: es wurde die Verschiebung der Seehöhen basierend auf den Jahressummengraden zwischen Beginn der Lufttemperaturaufzeichnungen und 2016 (rezenteste Daten) einer detaillierteren Betrachtung unterzogen. Als Betrachtungszeitraum wurde für jede Fischbioregion die maximal verfügbare Datenreihe je Fischbioregion definiert (diese ist unterschiedlich aufgrund der Messreihenlänge der Lufttemperaturdaten). Sämtliche nachstehenden Auswertungen wurden fischbioregionspezifisch durchgeführt.

Für die Auswertungen der Wassertemperaturen in Bezug auf Seehöhenverschiebung wurden errechnete Jahressummengrade (berechnet aus den Luft-Wassertemperatur-Korrelationen) verwendet. Dabei wurde eine weitere Datenbereinigung vorgeschoben, nämlich wurden Seeausrinne sowie Ausreißer der Jahressummengrade (oberes und unteres Prozent der JSG-Verteilung aller Messstellen einer Fischbioregion) aus der Analyse exkludiert. Die Seeausrinne würden nämlich in dieser Betrachtung zu Ausreißern aufgrund ihres See-beeinflussten Wasserhaushaltes führen. Die 1%-Ausreißer wurden exkludiert, da in den Rohdaten fehlende Tagesdaten vorkommen, welche ebenfalls zu hohen bzw. niedrigen Ausreißer führen würden.

Zunächst erfolgte eine lineare Korrelationsanalyse zwischen Jahressummengraden (JSG) und Seehöhe erstellt, einerseits für das „Referenzjahr“ (frühestes Jahr mit Temperaturdaten je Fischbioregion (FBR), andererseits für alle darauffolgenden Jahre („Jahr_x“)). In der Temperatur-Seehöhen-Korrelation des „Jahr_x“ wurde nun die tatsächliche Seehöhe der Messstellen eingesetzt und so ein Jahressummengrad-Wert („JSG_x“) rückgerechnet, welcher wiederum in die Temperatur-Seehöhen-Korrelation des „Referenzjahr“ eingesetzt wurde, um eine Seehöhe zu errechnen. Die Differenz aus dieser errechneten Seehöhe der Jahressummengrade des Jahres x und der tatsächlichen Seehöhe der jeweiligen Messstelle ergibt die Seehöhenverschiebung basierend auf der Temperaturveränderung.

Um Ausreißer und natürliche, interannuelle Klimaschwankungen weiter zu dämpfen und einen möglicherweise langfristigen Trend besser sichtbar zu machen, wurden für die oben beschriebenen Auswertungen nicht Einzeljahre, sondern Zeiträume von jeweils ± 5 Jahren rund um das jeweilige „Jahr_x“ in die Auswertung eingespeist. Es wurden also z.B. die mittleren JSGe von 1966-1975 (Jahr_x ± 5 Jahre) jenen von 1960 (Referenzjahr) gegenübergestellt, also jeweils Zeiträume von insgesamt 10 Jahren.

Die Ergebnisse der Seehöhendifferenz wurden einem Bootstrap-Verfahren mit 1000 Wiederholungen unterzogen, um die Varianz der Daten besser abschätzen zu können. Als Endergebnis liegt ein Datensatz vor, welcher – basierend auf den aus den Lufttemperaturdaten errechneten Wassertemperaturen – anhand der Korrelation aus Temperatur und Seehöhe retrospektive Aussagen über die Verschiebung der Seehöhe in Fließgewässern aufgrund der Temperaturveränderung ermöglicht. Diese Verschiebung der Temperaturverhältnisse in Richtung größere Höhenlagen (i.e. 1960 herrschte auf Seehöhe x eine mittlere Wassertemperatur vor, welche 2015 erst in einer Seehöhe von x+150 zu erwarten ist) kann auch zur theoretischen Verschiebung der Fischregionen flussaufwärts führen. Theoretisch deshalb, da andere Parameter wie Strömungsgeschwindigkeit, Nahrungsverfügbarkeit etc. die Ausprägung einer Fischartengemeinschaft entscheidend mitsteuern.

3.7 Prognosemodelle

Basierend auf den Erkenntnissen der Studie Prinz et al. (2009) hat sich gezeigt, dass das lineare Regressionsmodell gute Ergebnisse liefert – sowohl was die retrospektive Betrachtung der Temperaturentwicklung ab 1984 anlangt, als auch eine Prognose der zukünftigen Temperaturentwicklung. Klar ist, dass ein Schluss auf die zukünftigen Wassertemperaturen basierend auf den bisherigen Messreihen nicht eine mögliche und notwendige Änderung globalen anthropogenen Verhaltens (z.B. Umsetzung ambitionierter Klimastrategien, ...) mitberücksichtigen kann, ebenso wie Klimaphänomene hier keine Berücksichtigung finden (z.B. Änderung hydrologischer Regime, ...).

In dieser Studie wird nunmehr auf die in der Studie 2009 errechnete „optimistische“ Variante einer Prognose (i.e. basierend auf Zeitreihen von 1984 und davor) verzichtet. Diese musste bei Betrachtung der aktuellen Temperaturdaten als nicht valide eingestuft werden. So wurde anhand der neuen Datengrundlagen das „pessimistische“ Modell von 2009 aktualisiert, bei welchem auf den Zeitreihen von 1984 bis 2015 lineare Regressionsgeraden und die Prognosen bis 2020, 2030 und 2050 errechnet wurden.

4 Ergebnisse und Diskussion

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der einzelnen Analyseschritte (auszugs- bzw. stellenweise) präsentiert und sogleich diskutiert.

4.1 Trend- & Korrelationsanalysen

Die Saison-Trend-Zerlegung nach Loess (SLT) wurde mit allen 63 Wassertemperatur-Datenreihen basierend auf den Monatsmittelwerten durchgeführt. Beispielhaft ist die SLT für die Messstelle „Krems – Kremsmünster“ in Abbildung 3 abgebildet. Der Graph „data“ bildet die Datenreihe ab, die darunterliegenden Graphen bilden die Ergebnisse der STL („saisonal“, „trend“, „random“) ab. Die aus der Zerlegung der Zeitreihe gewonnene Trendkomponente („trend“) wurde danach einer Regressionsanalyse unterzogen.

Von den insgesamt 63 analysierten Wassertemperatur-Messstellen weisen lediglich 4 einen negativen Trend auf, d.h. über die Zeitachse kühler werdende Messreihen der Monatsmittelwerte (siehe Abbildung 4). Bei einer Einzelfallanalyse dieser Messstellen zeigte sich, dass alle durch anthropogene Einflüsse erklärbar sind. Die Vöckla bei Timelkam dürfte wohl aufgrund geringer werdender Wärmeeinleitungen des nahegelegenen Dampfkraftwerkes scheinbar kühler werden, jedoch ausgehend von einem sehr hohen Niveau (bis ca. 2000 wurden hier in den Wintermonaten Temperaturen von durchschnittlich 10°C gemessen). Ähnliche Effekte dürften an der Traun bei Bad Ischl (Maxquellgasse) einen negativen Trend verursachen, auch hier wäre eine logische Erklärung der Wegfall einer Wärmeeinleitung Anfang der 2000er-Jahre. Die Messstelle Steyr-Dietlgut dürfte früher aufgrund einer Teichanlage unnatürlich hohe Temperaturen angezeigt haben und durch den Wegfall der Entnahme eine scheinbar abrupte Abkühlung erfahren haben, welche zu einem negativen Trend über den gesamten Betrachtungszeitraum führt. Ebenso durch eine Teichanlage dürfte wohl auch der negative Trend am Sarningbach bei Waldhausen (Seeausfluß) hervorgerufen werden. Diese 4 Messstellen mit negativem Trend wurden in den weiteren Analysen nicht mehr berücksichtigt.

Die restlichen ~ 94% der herangezogenen Messstellen (also 59 von 63 Messstellen) weisen einen positiven Temperatortrend zwischen 1984 und 2015 auf, davon wiederum knapp 92% (54 von 59 Messstellen) signifikant (≤ 0.05 sig.-level).

In der vorhergegangenen Studie (Prinz et al., 2009) ergab eine erste Trendanalyse einen signifikanten Trend mit starker Wassertemperaturzunahme von 1984-2004 bei 55% der Messstellen (insgesamt 42 von 76 Messstellen). Damals wurden 5 Stellen mit sinkender Wassertemperatur festgestellt, wobei Vöckla-Timelkam und Steyr-Dietlgut bereits oben als anthropogen beeinflusst beschrieben wurden. Die Messstellen Ager-Schalchham und Schalchener Brunnbach-Furth finden sich in dieser Studie zwar mit positivem Trend wieder, jedoch ohne Signifikanz. Die Messstelle Vöckla-Vöcklabruck ist in der aktuellen Studie aufgrund zu kurzer Zeitreihe nicht mehr enthalten.

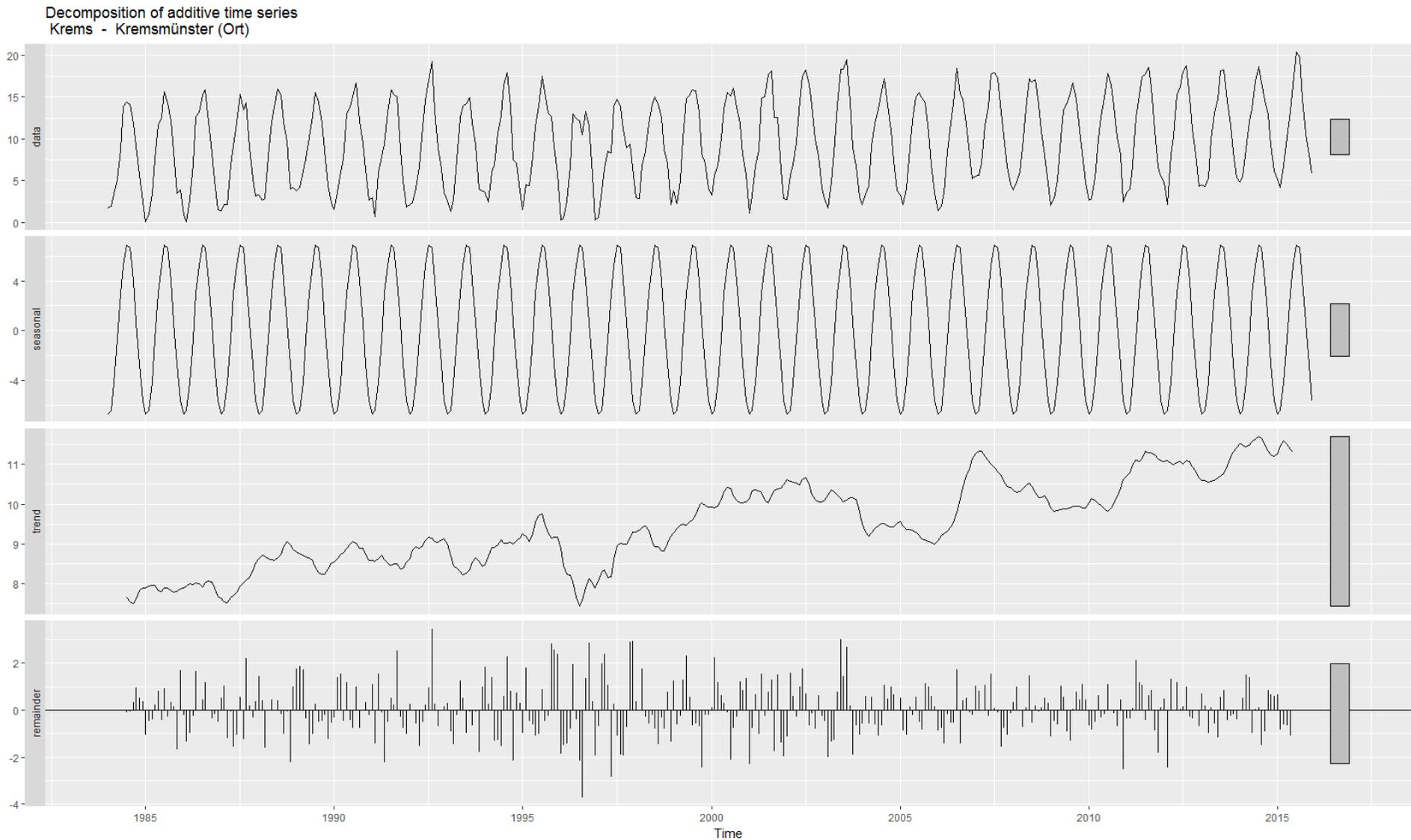


Abbildung 3 Saison-Trend-Zerlegung am Beispiel der Messstelle Krems – Kremsmünster basierend auf Monatsmittelwerten über den Zeitraum 1984 – 2015

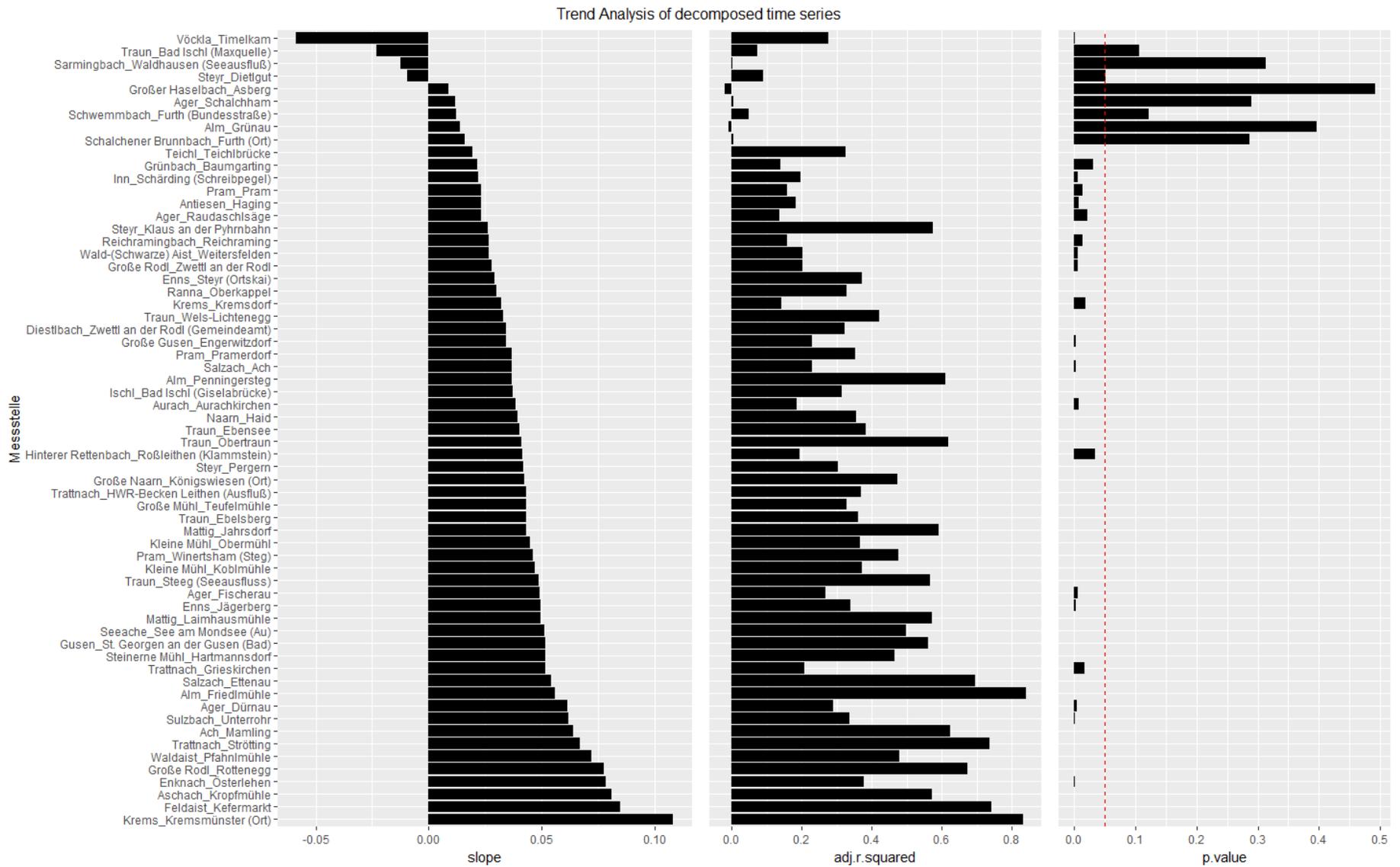


Abbildung 4 Ergebnisse der Regressionsanalysen basierend auf der Trend-Komponente der STL für alle 63 verwendeten Messstellen

Die Korrelationsanalysen der Jahresmittelwerte jeder der 63 Messstellen mittels Pearsons r , Spearmans ρ und Kendalls τ ergab ein sehr ähnliches Bild wie die STL-Methodik. Die Daten hierzu basieren auf Jahresmittelwerten jeder Messstelle für den Zeitraum 1984-2015. In allen drei Testverfahren konnten 4 Messstellen mit negativem Trend (eine davon mit signifikant negativem Trend) bestätigt werden, die anderen 59 weisen auch hier einen positiven Trend auf, 51 davon einen signifikant positiven Trend (vergleiche Tabelle 2).

Tabelle 2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Korrelationsanalysen (Pearsons r , Spearmans ρ und Kendalls τ) basierend auf Jahresmittelwerten für alle 63 Messstellen; Angaben in Anzahl Messstellen sowie % vom Gesamtergebnis

r, rho, tau	Negativer Trend		Positiver Trend		Gesamt	
nicht signifikant	3	4.76%	8	12.70%	11	17.46%
signifikant	1	1.59%	51	80.95%	52	82.54%
Gesamt	4	6.35%	59	93.65%	63	100%

4.2 Mittlere jährliche Temperaturänderung

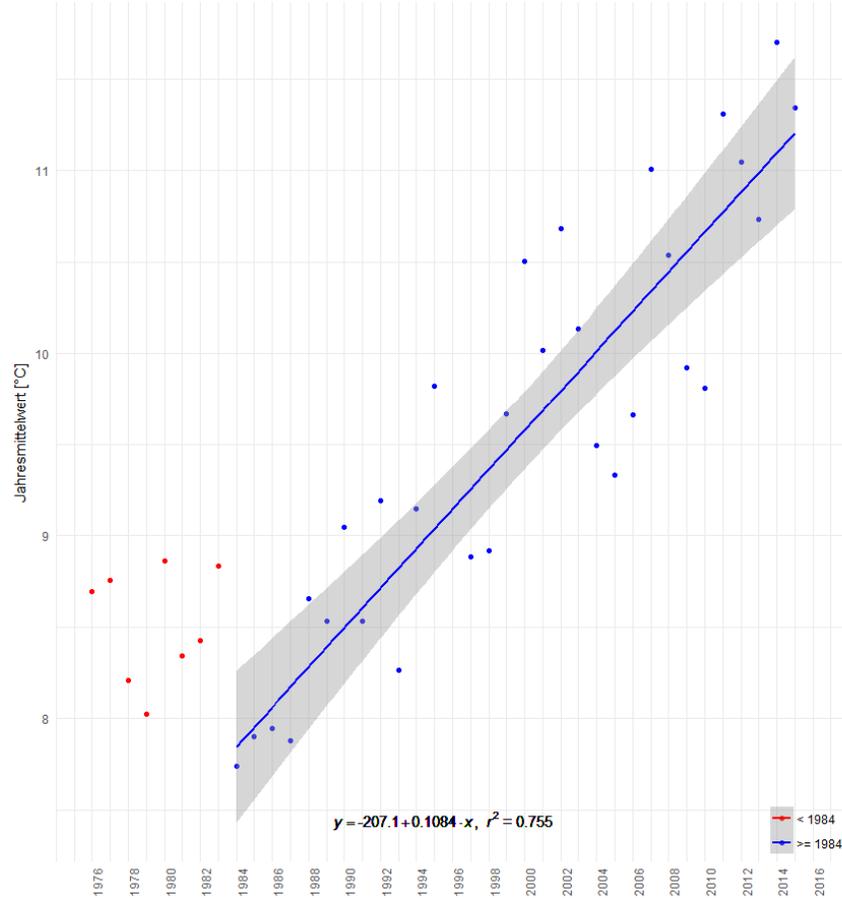
Die mittlere jährliche Temperaturänderung wurde für die 59 Wassertemperaturmessstellen, welche einen positiven Trend aufweisen, analysiert. Dabei wurden die Jahresmittelwerte für die lineare Regression herangezogen, beispielhaft sei hier Abbildung 5-A erwähnt, der k -Wert der Regressionsgleichung entspricht dabei dem mittleren Temperaturanstieg pro Jahr [$^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$].

Für die Betrachtung der einzelnen Monate wurden die Tagesmittelwerte herangezogen (Abbildung 5-B). In Abbildung 5-C sind die Tagesmittelwerte aller vorhandenen Jahresreihen im Jahresverlauf abgebildet, wobei geglättete Mittelwerts-Kurven für den verfügbaren Zeitraum vor 1990 (blau) sowie nach 2010 (rot) eingezeichnet sind.

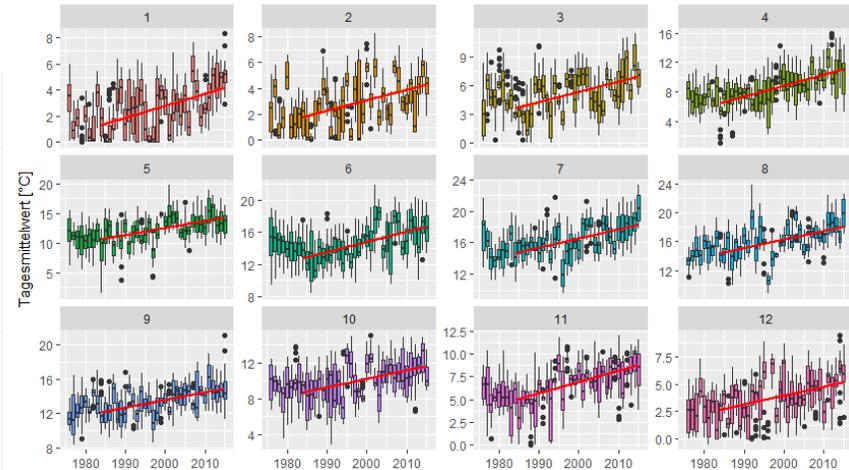
Im Mittel weisen die analysierten Datenreihen eine Wassertemperaturerhöhung für den Zeitraum 1984-2015 von 0.043°C pro Jahr auf. Die Einzelwerte der Messstellen reichen dabei von min. $0.009^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$ (großer Haselbach – Asberg) bis $0.180^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$ (Kremsmünster – Krems Ort), die Bandbreite ist also hoch (siehe auch Abbildung 6).

A Veränderung Jahresmittelwert
Krems Kremsmünster (Ort)

FischBioregion J
FischRegion 50
Zeitraum 1976 - 2015



B Krems Kremsmünster (Ort)



C

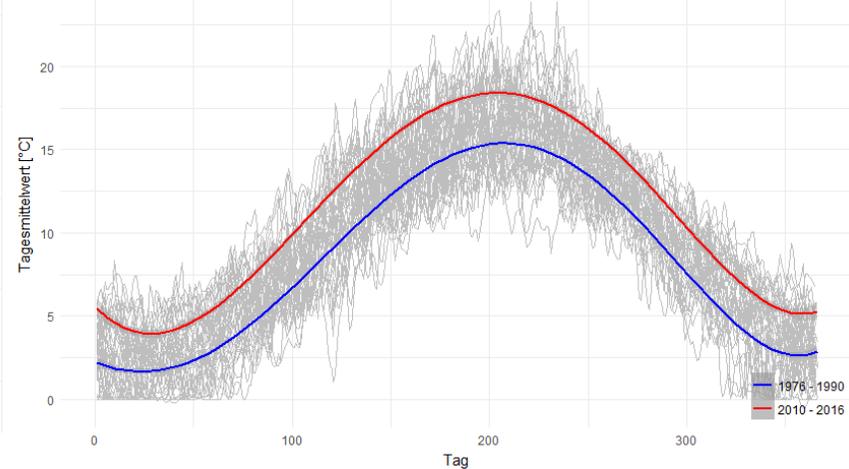


Abbildung 5 A-C Auswertungen der Wassertemperaturdaten je Messstelle (Beispiel Krems-Kremsmünster); A: Regressionsanalyse der Jahresmittelwerte, wobei der Betrachtungszeitraum einheitlich auf die Jahren 1984 - 2015 beschränkt wurde; B: Analyse der Tagesmittelwerte der einzelnen Monate; C: Verlauf der Temperatur im Jahresverlauf basierend auf Tagesmittelwerten, genäherte Kurven für den Zeitraum vor 1990 (blau) und nach 2010 (rot);

Änderung der mittlere Jahrestemperatur zwischen 1984-2015

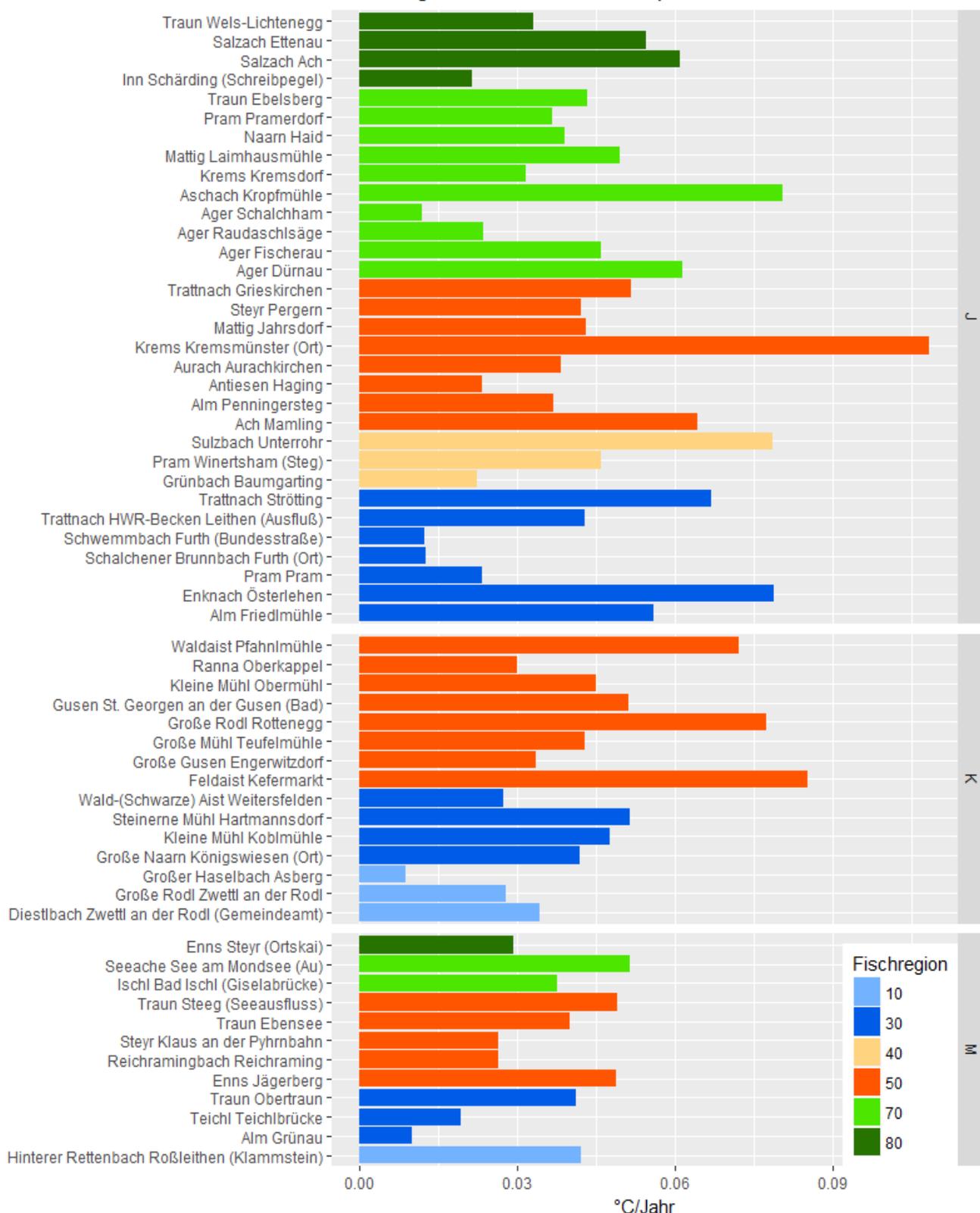


Abbildung 6 k-Werte der Regressionsgeraden (entspricht der mittlere Temperaturänderung in °C/Jahr) der Jahresmittelwerte zwischen 1984-2015 für jede Messstelle nach Fischbioregion getrennt (J... Bayer. Österreichisches Alpenvorland und Flysch, K... Granit- und Gneisgebiet der böhm. Masse; M... Kalkvoralpen und Nördliche Kalkhochalpen); Balken nach Fischregion gefärbt (10... Epirhithral; 30... Metarhithral; 40... Hyporhithral klein; 50... Hyporhithral groß; 70... Epipotamal mittel; 80... Epipotamal groß)

Bereits in Abbildung 7 ist ersichtlich, dass in den Fischbioregionen Bayer. Österreichisches Alpenvorland und Flysch (J) sowie Granit- und Gneisgebiet der Böhmisches Masse (K) teils höhere Temperaturerhöhungen festgestellt werden konnten, als beispielsweise in der Fischbioregion Kalkvoralpen und Nördliche Kalkhochalpen (M). Dies wird auch in den Mittelwerten der Temperaturerhöhungen je Fischbioregion (siehe Tabelle 3) bestätigt, wobei in K und J jeweils mittlere Wassertemperaturerhöhungen von $0.045^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$ festgestellt werden konnten, in M im Mittel $0.035^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$.

Dieser erste grobe Überblick zeigt schon, dass sich seit der Studie von Prinz et al. (2009) die Temperaturerhöhung scheinbar linear (zumindest im Mittel) fortgesetzt hat. Der Mittelwert über alle Messstellen ergab damals (Betrachtungszeitraum 1984-2004) einen Temperaturanstieg von 0.041°C pro Jahr (Seeausrinne und offensichtlich anthropogen thermisch beeinträchtigte Messstellen exklusive). Die Temperaturerhöhungen in den einzelnen Fischbioregionen zeigen jedoch kleinere Abweichungen – so waren in J damals $0.036^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$, in M $0.029^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$ und in K $0.05^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$ festgestellt worden. Dies bedeutet, dass sich im Mittel die Erhöhung in J und M gesteigert hat, wohingegen in K ein leichter Rückgang der Steigung zu vermerken ist.

Die Fischregionen Epirhithral (codiert 10), Hyporhithral klein (codiert 40) und Epiptamal groß (codiert 80) werden in den zur Verfügung stehenden Daten in lediglich geringer Messstellenanzahl repräsentiert (vgl. Tabelle 3), weshalb hier die Ergebnisse (Abbildung 7-b) wohl etwas vorsichtiger zu betrachten sind. Die höchste Steigung, also die höchste Temperaturveränderung pro Jahr, wurde in der Fischregion Hyporhithral ($0.049^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$) festgestellt, die geringsten an Messstellen in den Fischregionen Epi- und Metarhithral (0.028 bzw. $0.038^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$). Die Ergebnisse sind im Boxplot-Graph in Abbildung 7-C abgebildet und zeigen auch die hohe Streuung der Einzelergebnisse.

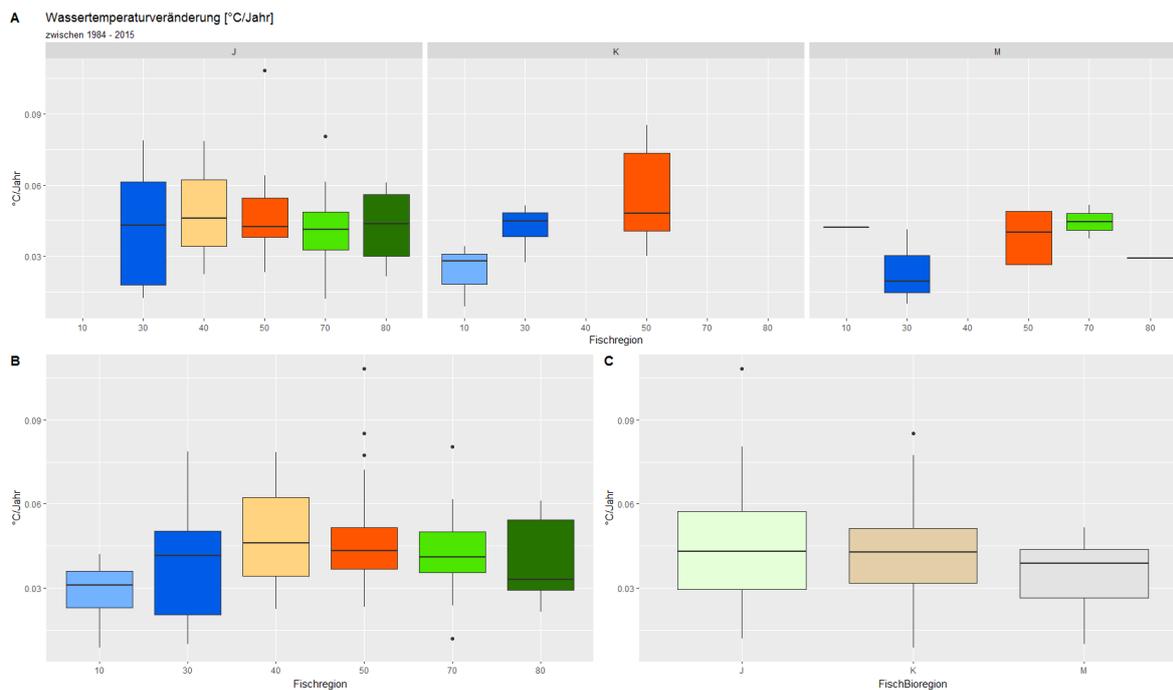


Abbildung 7 Boxplots der Temperaturerhöhungen an den 59 Wassertemperaturmessstellen, wobei jeweils die Einzelwerte jeder Messstelle aufgesplittet wurden in Fischregion und Fischbioregion (A), nur Fischregion (B) und nur Fischbioregion (C)

Tabelle 3 mittlere jährliche Temperaturänderung [°C/Jahr] nach Fischbioregionen (J... Bayer. Österreichisches Alpenvorland und Flysch, K... Granit- und Gneisgebiet der Böhm. Masse; M... Kalkvoralpen und Nördliche Kalkhochalpen) und Fischregionen (10... Epirhithral; 30... Metarhithral; 40... Hyporhithral klein; 50... Hyporhithral groß; 70... Epipotamal mittel; 80... Epipotamal groß)

Fischbioregion	n	mean	sd	min	max	se
J	32	0.0450	0.0223	0.0119	0.1084	0.0039
K	15	0.0451	0.0205	0.0086	0.0852	0.0053
M	12	0.0351	0.0129	0.0098	0.0515	0.0037
FischRegion	n	mean	sd	min	max	se
10	4	0.028	0.014	0.009	0.042	0.007
30	14	0.038	0.021	0.010	0.079	0.006
40	3	0.049	0.028	0.022	0.079	0.016
50	21	0.049	0.021	0.023	0.108	0.005
70	12	0.043	0.018	0.012	0.081	0.005
80	5	0.040	0.017	0.021	0.061	0.008

Die Steigungen der Regressionsgeraden (Temperaturveränderung pro Jahr) wurden weiters einem Bootstrap-Verfahren unterzogen. Dabei wurde jeweils der Mittelwert aus Zufallsziehungen der Einzelwerte jeder Fischbioregion gebildet und selbiges 1000-fach wiederholt. Das Ergebnis ist in den Häufigkeitsdiagrammen in Abbildung 8 dargestellt.

Ein solches Bootstrap-Verfahren ermöglicht eine bessere Abschätzung der Varianz der Daten, ausgedrückt als 95%-ige Vertrauensgrenzen. So ist erkennbar, dass die Fischbioregionen J und K zwar im Mittel gleiche Temperatursteigerungen aufweisen, jedoch die Varianz in K eine etwas höhere ist. Die Fischbioregion „Kalkvoralpen und Nördlichen Kalkhochalpen (M)“ unterscheidet sich hochsignifikant hinsichtlich Temperaturerhöhung von den anderen beiden.

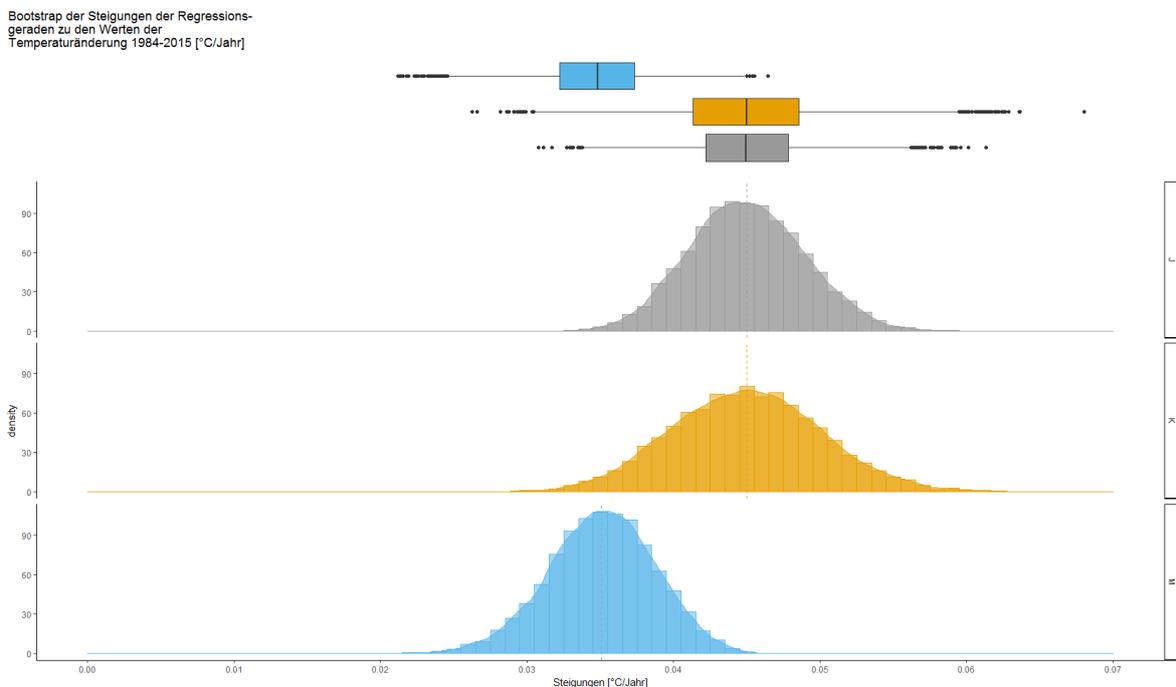


Abbildung 8 mittlere Temperaturerhöhung der analysierten Fischbioregionen in Oberösterreich; zur besseren Einschätzung der Varianz der Ergebnisse wurden diese einem Bootstrapping-Verfahren unterzogen

Hinsichtlich Zeitpunkt der Temperaturerhöhung kamen Prinz et al. (2009) zu dem Schluss, dass in den 2. und 3. Quartalen (Monate April bis September) die Temperaturzunahmen von 1984-2004 stärker waren als in den Quartalen 1 und 2. Auch in den hier zugrundeliegenden längeren Datenreihen der Jahre 1984-2015 zeigte sich, dass dies in den einzelnen Fischbioregionen tendenziell so bestätigt werden konnte (höherer Temperaturanstieg in den Sommermonaten, siehe Abbildung 9). Auffällig in den neueren Datenreihen sind die

vergleichsweise starken Temperaturanstiege in den Monaten April und November im Bayer.-Österreichischen Alpenvorland und Flysch sowie im Granit- und Gneisgebiet der Böhm. Masse. Erklärungsversuche diesbezüglich wäre ein späterer Winterbeginn (Regen statt Schnee) im November, während im April eine bereits früher eintretende Schneeschmelze für den Wassertemperaturanstieg verantwortlich sein könnte (kein kühles Schmelzwasser im April). Hierbei handelt es sich jedoch lediglich um Erklärungsversuche, denen keine dahingehend indizierenden sonstigen Daten zugrunde liegen. Auch eine weitere Auftrennung der Daten nach Fischregionen (Abbildung 10) ermöglicht keine detailliertere Diskussion hinsichtlich der Ursachen, wenngleich erkennbar ist, dass durchaus Unterschiede in den Monaten, in denen Temperaturerhöhungen größer ausfallen, gegeben sind.

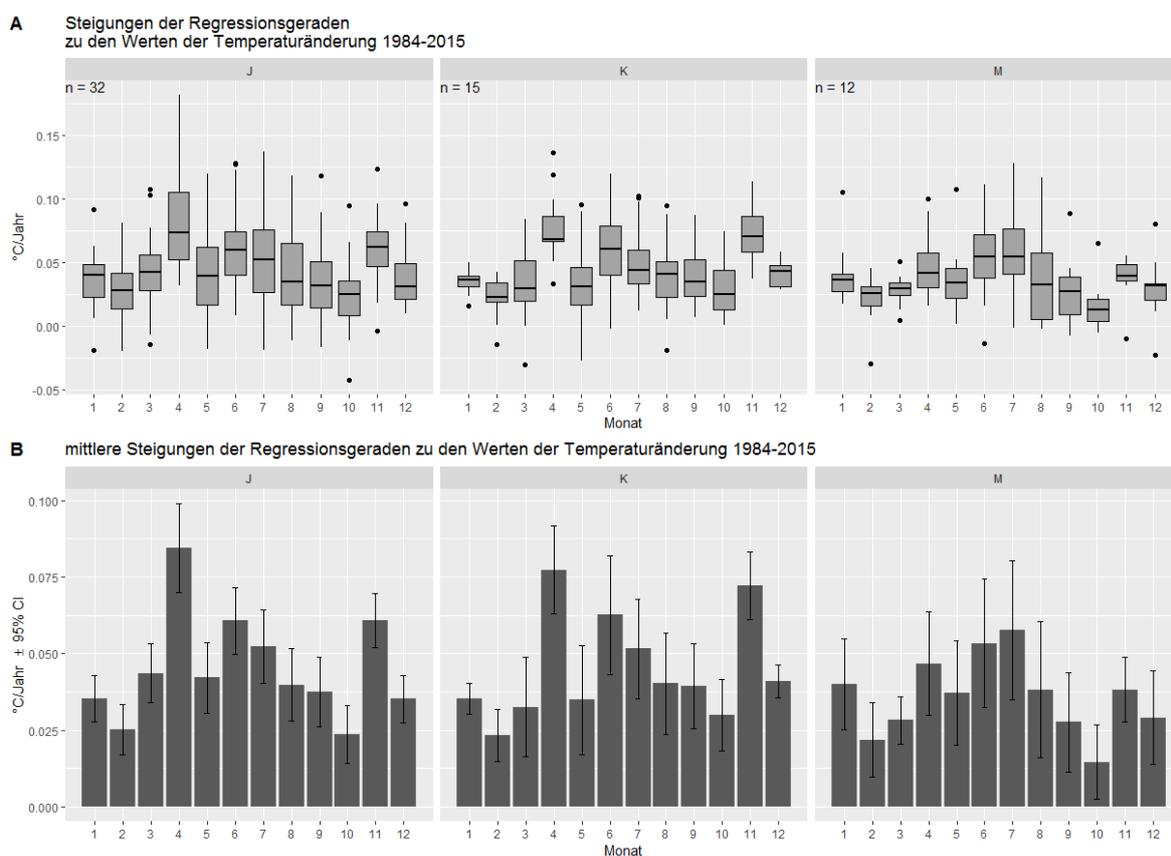


Abbildung 9 Temperaturerhöhungen nach Fischbioregion und Monat getrennt; A: Boxplots aller Messstellen; B: mittlere Temperaturerhöhung pro Monat inkl. 95%igem Konfidenzintervall

Steigungen der Regressionsgeraden zu den Werten der Temperaturänderung 1984-2015

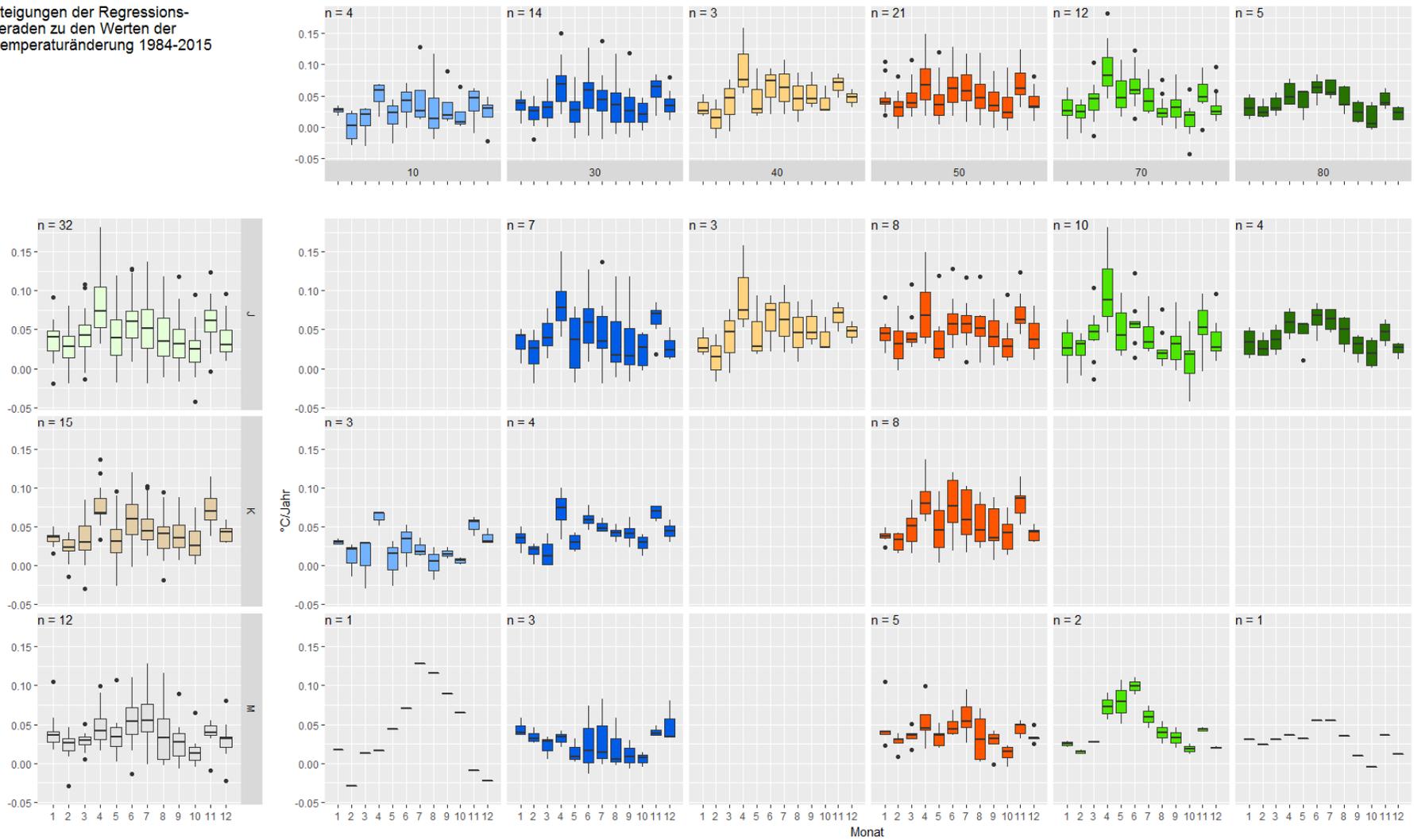


Abbildung 10 Kreuztabelle als Boxplot, Temperaturerhöhung nach Fischbioregion, Fischregion und Monat

4.3 Korrelation von Luft-/Wassertemperaturmessdaten und retrospektive Analysen

Das Bestimmtheitsmaß r^2 der Korrelation zwischen Wassertemperatur und Lufttemperatur war bei den gewählten Messstellen-Kombinationen im Mittel 0.78. Die beste mittlere Korrelation liegt im Granit und Gneisgebiet (K) vor ($r^2 = 0.86$), die geringste mittlere Korrelation in den Kalkvoralpen und Nördl. Kalkhochalpen (M, $r^2 = 0.69$), im Bayer.-Österr. Alpenvorland und Flysch (J) liegt das Bestimmtheitsmaß dazwischen ($r^2 = 0.78$). Auffällig sind die Varianzen des Bestimmtheitsmaßes. Die Varianz ist in K sehr niedrig, wohingegen die Varianz in den Fischbioregionen J und vor allem in M höher ausfallen. Gesamt gesehen ist festzuhalten, dass gute Korrelationen zwischen Luft- und Wassertemperaturen bei den zugrundeliegenden Messstellen vorliegen ($r^2 = 0.78 \pm 0.035$ 95% CI). Nur in Ausnahmefällen (z.B. Seeausrinne, anthropogene Beeinflussung) wurden Bestimmtheitsmaße von <0.7 festgestellt. Die Korrelation der Wasser- und Lufttemperaturen ist beispielhaft in Abbildung 11 angeführt, es handelt sich dabei um die Korrelation mit dem höchsten Bestimmtheitsmaß.

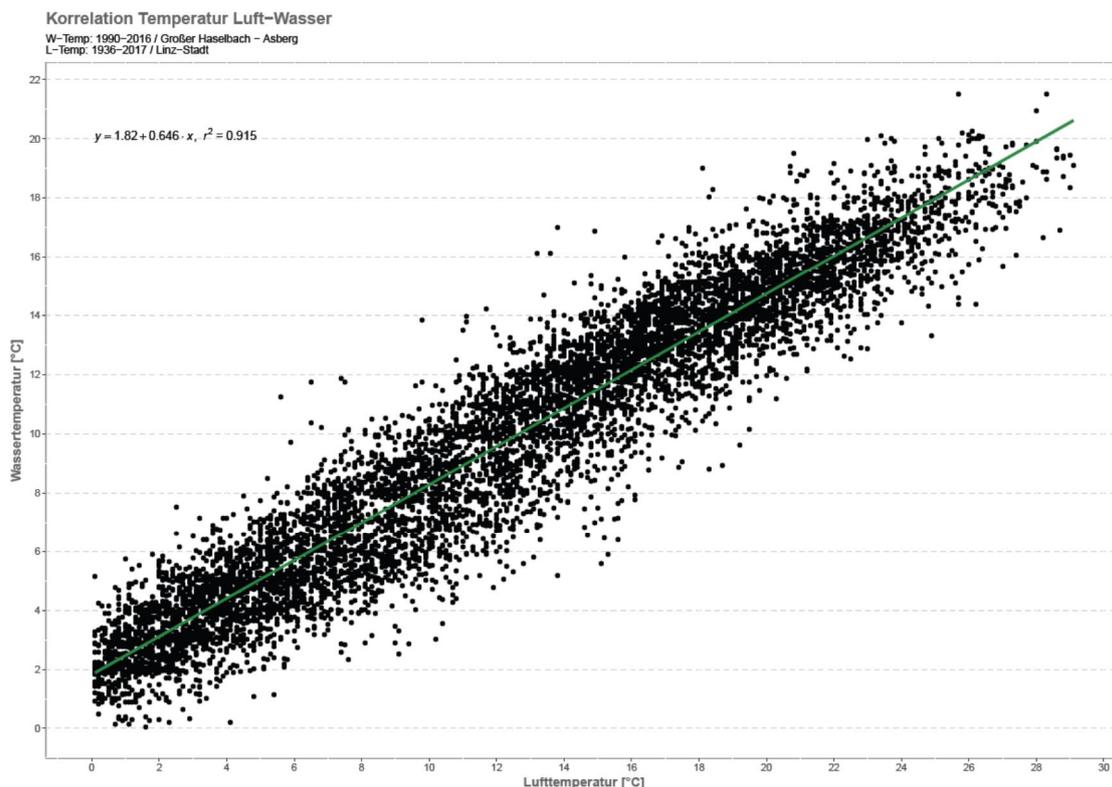


Abbildung 11 Korrelation zwischen Lufttemperatur und Wassertemperatur am Beispiel Haselbach (HZB-Messstelle „Großer Haselbach – Asberg“, ZAMG-Messstelle „Linz-Stadt“)

Die gute Korrelation zwischen Wasser- und Lufttemperaturdaten erlaubt die plausible Ermittlung von Wassertemperaturen via Lufttemperaturwerte. Somit können Wassertemperaturen, auch wenn diese nicht direkt gemessen wurden, retrospektiv bestimmt werden und diese bis maximal ins Jahr 1876 zurückreichend für die weiteren Auswertungen herangezogen werden (siehe beispielhaft Abbildung 12).

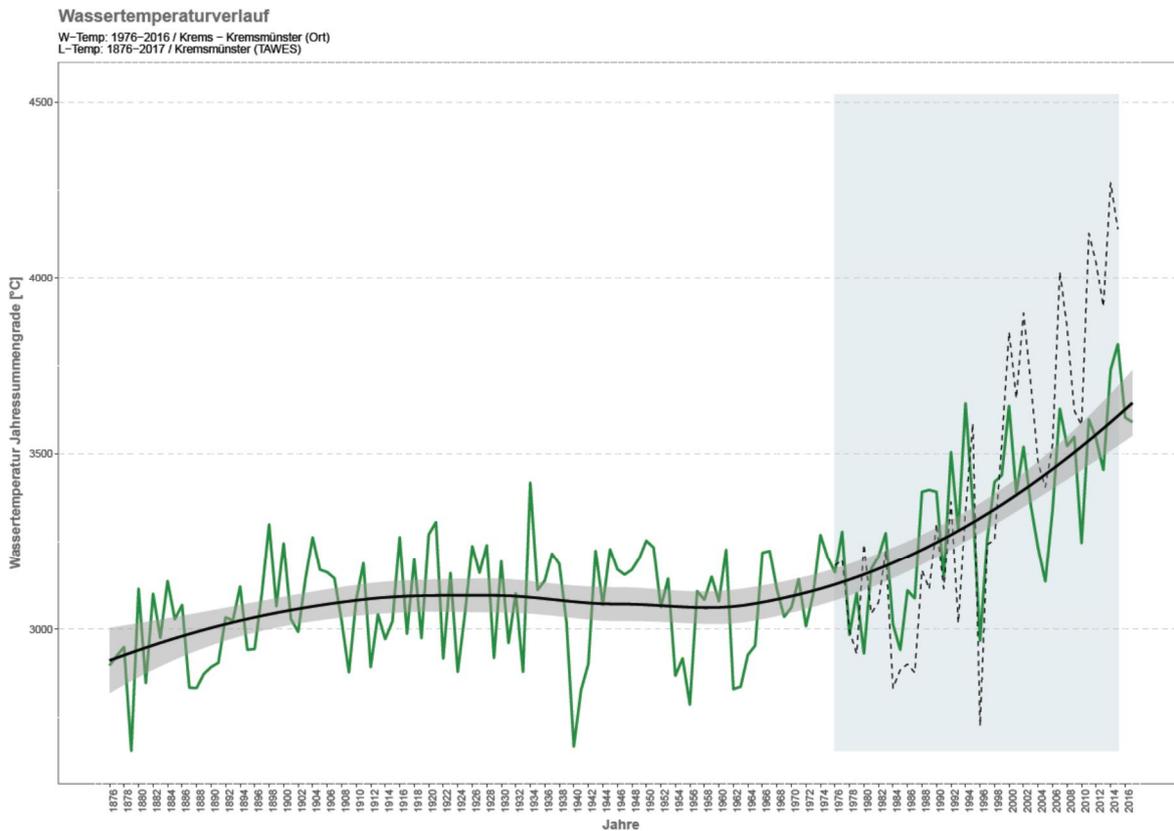


Abbildung 12 Messstelle Krems bei Kremsmünster, grüne Linie: anhand der Luft-Wasser-Korrelationen rückgerechnete Wassertemperatur-Jahressummengrade; schwarz-strichlierte Linie: gemessene Wassertemperatur-Jahressummengrade, grauer Bereich: Vorliegen von Wasser- und Lufttemperaturdaten; schwarze Linie: lokal gewichtete Glättung nach LOESS inkl. 95%-iger Konfidenzlimits)

Wie bereits in Prinz et al. (2009) zeigt sich klar, dass bei quasi allen Messstellen vor 1980 ein (mehr oder weniger) konstantes Niveau hinsichtlich Jahressummengrade (JSG) vorliegt, ab ca. 1980-85 kommt es bei allen Messstellen zu einem starken Anstieg der JSG. Der „Beginn“ des Anstieges korreliert dabei zeitlich mit internationalen Studien, welche ab den 1980ern eine Abnahme des „Global Dimmings“ und einen damit einhergehenden Temperaturanstieg in Folge der Treibhausgasemissionen beschreiben (Verheggen & Weijers, 2010; Wild, Ohmura, & Makowski, 2007). Wild et al. (2007) beispielsweise beschreiben eine Abnahme von Aerosol-Konzentrationen in der Atmosphäre in Europa, was zu einem Temperaturanstieg in

relativ kurzer Zeit geführt habe. Dabei sei der Temperaturanstieg im globalen Vergleich am europäischen Festland überdurchschnittlich ausgefallen, i.e. 0.38°C pro Dekade im Vergleich zu 0.18°C pro Dekade im globalen Mittel. Diese Ergebnisse unterstreichen aus Sicht der Autoren die bereits von Prinz et al. (2009) veröffentlichten und in dieser Studie aktualisierten Ergebnisse.

Am Beispiel Krems bei Kremsmünster (Abbildung 12) ist des Weiteren erkennbar, dass die tatsächlich gemessene Wassertemperatur (strichlierte Linie) von den via Lufttemperatur errechneten Wassertemperaturen (grüne Linie) zunehmend abweicht. Die Abweichung für die Messstelle Kremsmünster ist in Abbildung 13 dargestellt; ein positiver Wert bedeutet, dass die tatsächlich gemessene Wassertemperatur höher als die errechnete Wassertemperatur war. An der Krems bei Kremsmünster kommt es ab den 2000er-Jahren zu einer Unterschätzung um bis zu über einem Grad Celsius bei Berechnen der Wassertemperatur aus der Lufttemperatur.

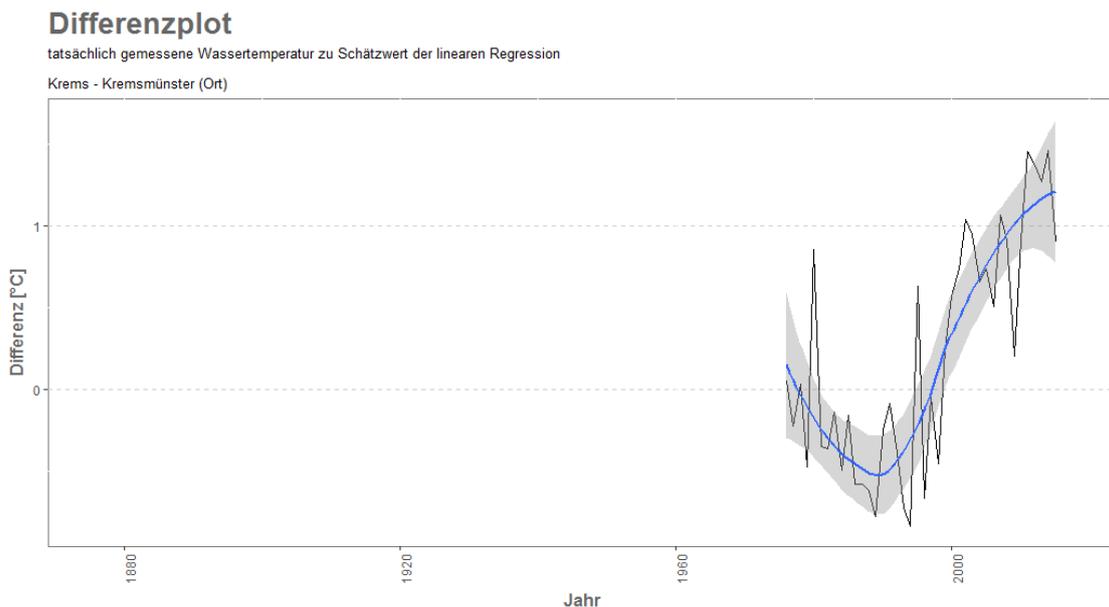


Abbildung 13 Differenz der tatsächlich gemessenen Wassertemperatur zur aus Lufttemperaturdaten errechneten Wassertemperatur am Beispiel Krems – Kremsmünster (Ort)

Eine solche Abweichung ist bei einigen Messstellen zu beobachten, wenngleich sie unterschiedlich hoch ausfällt. Ein wichtiger Hinweis dieser Tatsache ist allerdings für die weiteren Ergebnisse festzuhalten: basierend auf den errechneten Wassertemperaturdaten dürfte es an manchen Stellen zu einer Unterschätzung kommen.

Abbildung 15 gibt einen Überblick über alle retrospektiven Datenreihen; die Dauer der Zeitreihen richtet sich dabei jeweils nach den Zeitreihen der gewählten Lufttemperaturmessstelle, mit welcher die Wassertemperaturen korreliert werden.

Abbildung 14 setzt die Temperaturen in ein historisches Verhältnis, indem die Abweichung der mittleren Jahrestemperaturen (bzw. mittlere Sommertemperaturen von Mai – September) eines jeden Jahres zur mittleren Wassertemperatur im Referenzzeitraum 1961–1990 dargestellt wird. Datengrundlage waren jeweils die über die retrospektive Analyse errechneten Wassertemperaturdaten sowohl für die Jahresmittelwerte als auch für den Referenzmittelwert. Man erkennt dabei in der retrospektiven Betrachtung am Beispiel der Messstelle „Krems - Kremsmünster (Ort)“ im Zeitraum vor 1980 ein Schwanken rund um den Referenzwert. Ab 1980 liegen die Abweichungen immer jeweils über dem Referenzmittelwert - mit steigender Tendenz. Das Bild ähnelt sich hinsichtlich der Tendenz sowohl in der Jahres- als auch in der Sommerbetrachtung. Die letzten Jahre der Messreihe lagen dabei bereits um bis zu ca. 1.8°C im Jahresverlauf über dem langjährigen Mittel, in den Sommermonaten bereits um bis zu 2°C über dem Mittel.

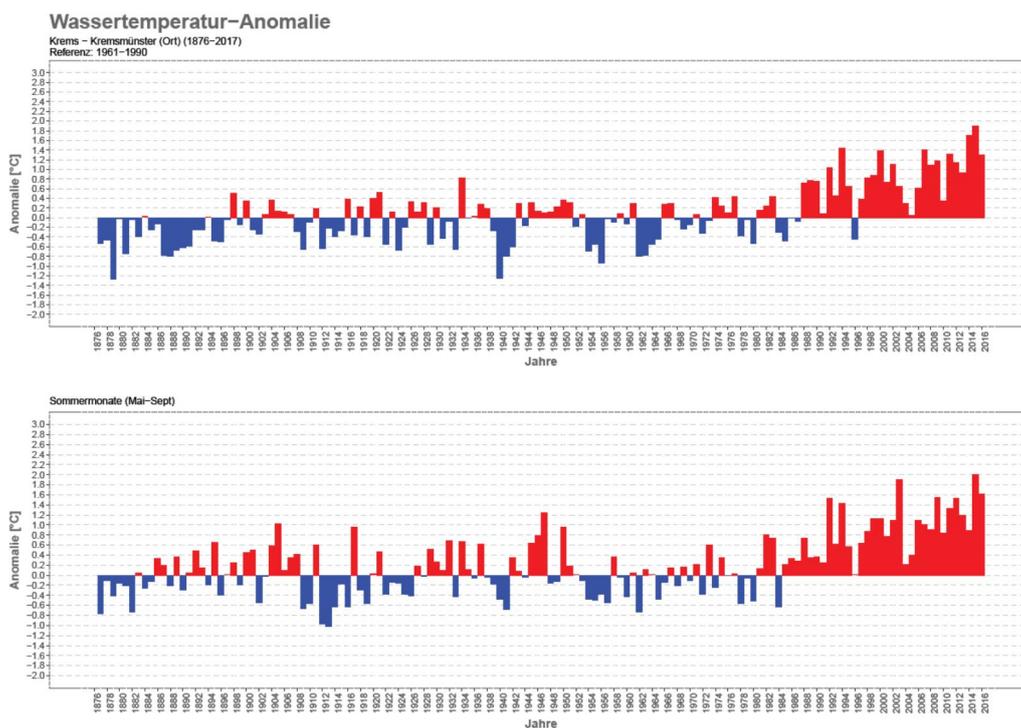


Abbildung 14 Wassertemperatur-Anomalien am Beispiel der Messstelle Krems – Kremsmünster (Ort). Anomalie beschreibt die Abweichung in °C der Jahresmittelwert (oberer Graph) bzw. der Mittelwert der Monate Mai bis September (unterer Graph) vom langjährigen Mittel (Referenzzeitraum 1961-1990)

Überblick Jahressummengrade
für ausgewählte Fließgewässer im verfügbaren Zeitraum

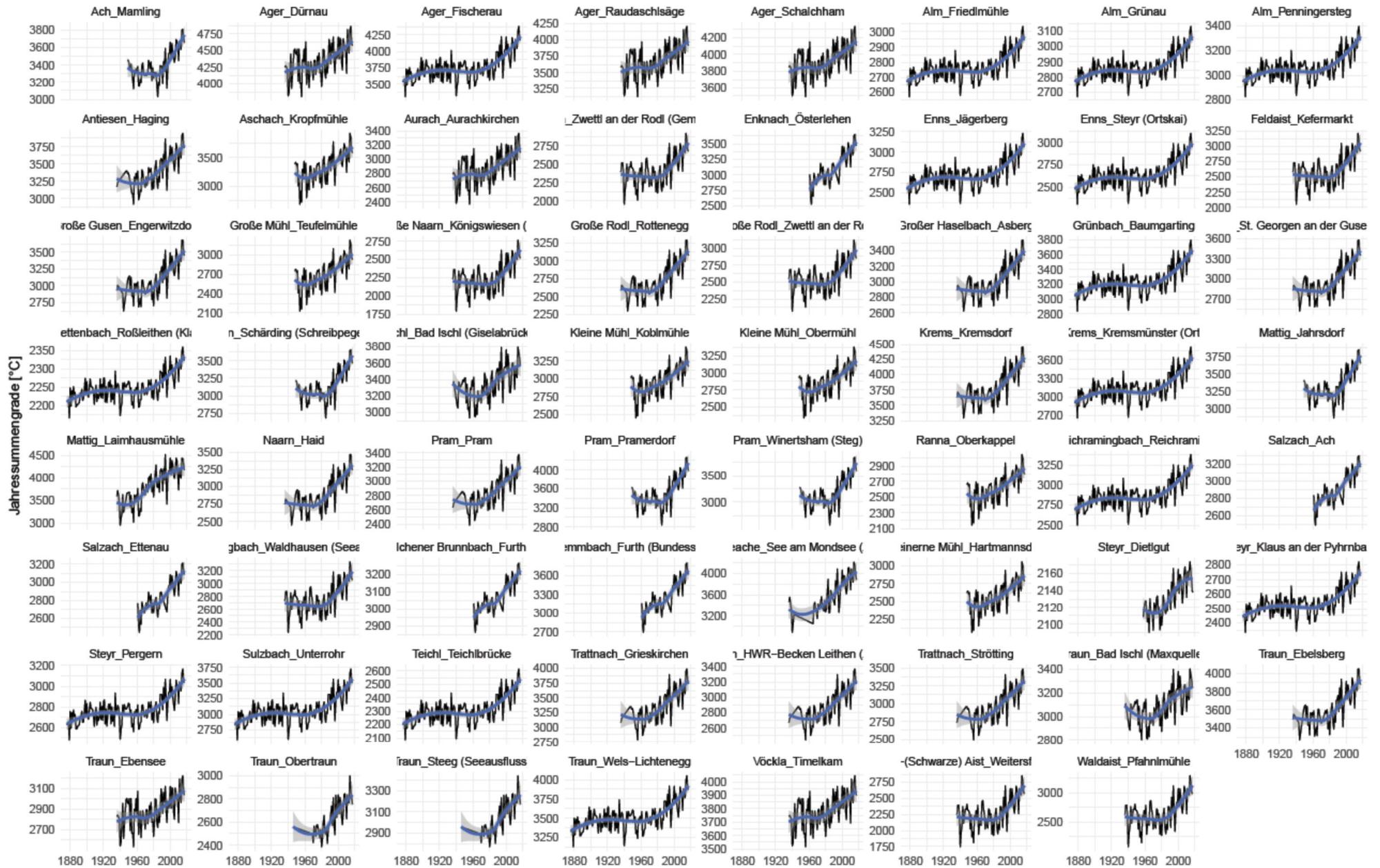


Abbildung 15 Überblick über retrospektive Analysen der Wassertemperatur-Jahressummengrade

4.4 Analyse der Temperaturgrenzwerte gem. WRG (i.e. Überschreitung von fischregionsspezifischen Wassertemperaturgrenzwerten)

Die steigenden Temperaturdaten am Beispiel „Krems – Kremsmünster (Ort)“ lassen bereits erahnen, dass eine Überschreitung der in Tabelle 1 angeführten Temperatur-Grenzwerte wahrscheinlicher und häufiger wird. In den letzten Jahren, etwa ab den 2000-ern, kommt es zu einer augenscheinlichen Häufung der Überschreitungstage. Wie bereits in Prinz et al. (2009) beschrieben wurde, hat die Überschreitung der optimalen Wassertemperaturen eine kumulative negative Wirkung auf Fische, der Anzahl der Überschreitungstage wird dabei eine große Bedeutung in der Auswirkung auf den Fischbestand zugemessen. Dabei ist des Weiteren entscheidend, ob die Tage mit hohen Wassertemperaturen zusammenhängend auftreten, oder ob zwischenzeitliche Abkühlungen und somit physiologische „Entspannungsphasen“ für die Fischfauna bestehen. In der Graphik (siehe beispielhaft Abbildung 16) ist jedoch ersichtlich, dass es zum Beispiel im Jahr 2015 zu >25 Überschreitungstagen gekommen ist – hier ist offensichtlich, dass lange Warmwasserperioden ohne längere Unterbrechungen bestanden haben dürfen.

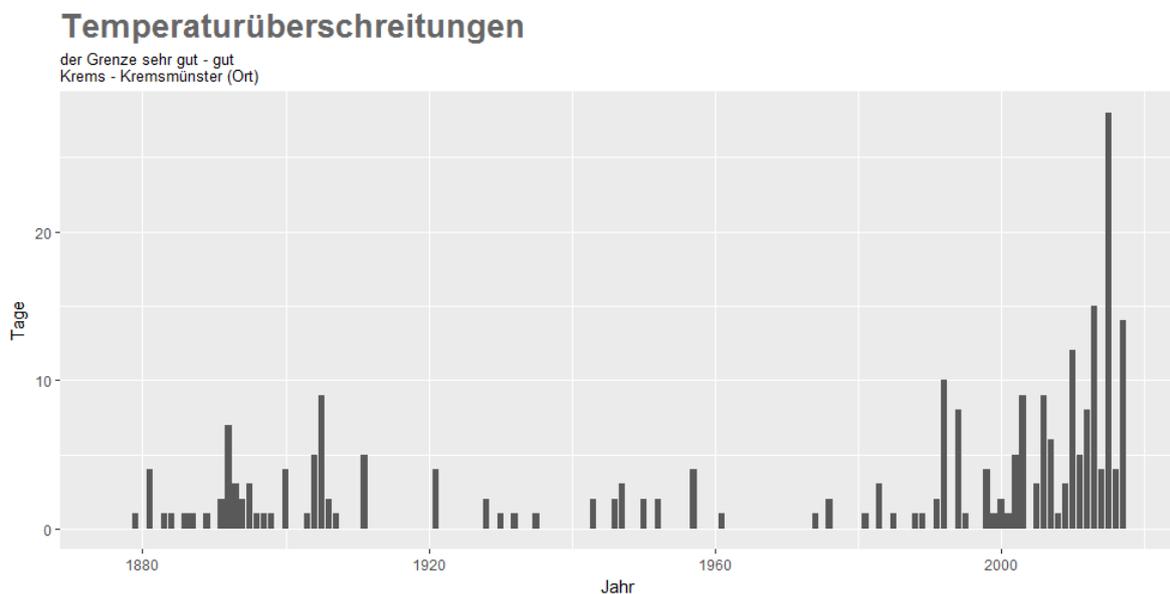


Abbildung 16 Anzahl der Tage pro Jahr, an denen der Temperaturgrenzwert „sehr gut – gut“ an der Wassertemperaturmessstelle „Krems - Kremsmünster (Ort)“ überschritten wurden

Einen Überblick über die Überschreitungstage an allen Messstellen in den einzelnen Fischregionen gibt Abbildung 17, wobei die Datengrundlage die tatsächlich gemessenen

Wassertemperaturen mit der Beschränkung auf den Zeitraum 1984 – 2015 bilden. In dieser Betrachtung scheint es, als wäre die mittlere Anzahl der Überschreitungstage für jede Fischregion in Prozent mehr oder weniger konstant, es sind keine klaren Trends in Richtung häufigere Überschreitung der Grenzwerte zu erkennen.

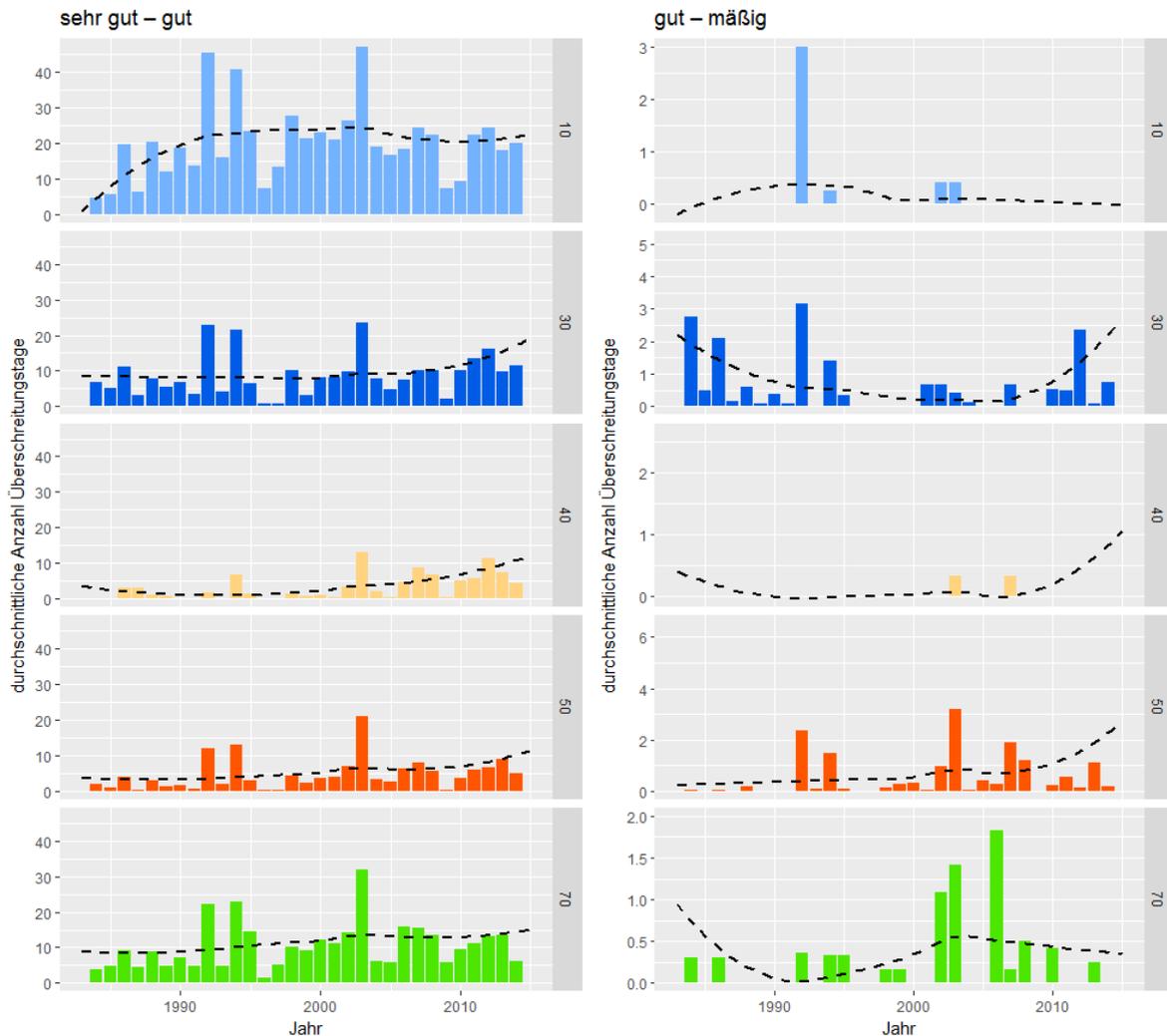


Abbildung 17 Überschreitungen des Temperaturgrenzwertes für die Grenzen „sehr gut – gut“ (links) und „gut – mäßig“ (rechts) in den einzelnen Fischregionen; Datengrundlage: Wassertemperaturmesswerte der einzelnen Messstellen des Hydrographischen Dienst Oberösterreich.

Hier wird ersichtlich, wie entscheidend die Verfügbarkeit von Langzeit-Daten ist, bildet doch dieselbe Graphik unter Verwendung der retrospektiven Wassertemperaturdaten ein anderes Bild hinsichtlich Trend (siehe Abbildung 18). Dabei reichen die verwendeten Daten jeweils soweit zurück, als an den einzelnen Messstellen die Lufttemperaturdaten verfügbar waren. So sind im Epirithral die am weitesten zurückreichenden Lufttemperaturdaten aus den

1930ern, wohingegen im Hyporhithral durch die Verfügbarkeit der Lufttemperatur-Messstelle Kremsmünster Daten bis vor 1900 zurückreichend vorliegen.

Im Vergleich der einzelnen Fischregionen ist ersichtlich, dass offensichtlich ein stärkerer Trend in Gewässern des Metarhithron und flussab besteht. Dies erscheint nachvollziehbar, ist doch auch die Temperaturerhöhung in diesen Gewässern höher als im Epirhithron (vgl. Abbildung 7).

Nicht nur die mittlere Anzahl der Tage, an denen die Temperaturgrenzwerte für die Grenze „sehr gut – gut“ in den einzelnen Fischregionen überschritten werden, nehmen zu. Abbildung 18 zeigt in der rechten Spalte auch die mittlere Anzahl der Tage, an denen die Temperaturgrenzwerte für die Grenze „gut – mäßig“ überschritten werden. Auch hier ist ein Trend erkennbar, i.e. hin zu mehr Tagen, an denen diese – im Hinblick auf die Erfüllung oder Erreichung der Ziele der Wasserrahmenrichtlinie entscheidende – Grenze überschritten wird. Zwar handelt es sich lediglich um Einzeltage, an denen dies im Mittel geschieht, doch auch die damit wohl einhergehenden längeren Phasen an den entsprechenden Messstellen können bereits akkumulierende Effekte auf die Fischzönose erzeugen.

Betrachtet man die durchschnittliche Dauer der Grenzwert-Überschreitungen, so sind starke Unterschiede erkennbar (siehe Abbildung 19). Am mit Abstand häufigsten kommt es zu Grenzwertüberschreitungen an der Messstelle „Großer Haselbach – Asberg“. Dieses Gewässer ist an der Messstelle der epirhithralen Fischregion zugeordnet und befindet sich im Granit und Gneisgebiet der Böhm. Masse. Im Schnitt kam es an dieser Messstelle in der Zeit zwischen 2000 und 2015 zu >50 Tagen pro Jahr, an denen die Grenze „sehr gut – gut“ hinsichtlich Temperatur überschritten wurde. Die in der Haselbachschlucht nördlich von Linz auf einer Seehöhe von ~350 m ü.A. gelegene Messstelle weist dabei ein nur geringes Einzugsgebiet (ca. 30 km²) auf. Rezente Befischungen im Zuge der GZÜV ergaben im Bereich der Wassertemperaturmessstelle einen guten Zustand, wobei die einzige im Leitbild enthaltene Fischart Bachforelle mit einer „lediglich“ guten Altersstruktur für diese Bewertung verantwortlich ist.

An der „Großen Rodl bei Zwettl an der Rodl“ ergaben Befischungen 2008 und 2009 im Zuge der GZÜV ein FIA-Ergebnis von „mäßig“ und „gut“, wobei wesentliches Metric bei beiden Ergebnissen der Fischregionsindex war – dieser zeigt eine Rhithralisierung an. Dies wäre genau der gegenteilige Effekt, den man von einer Gewässererwärmung erwarten würde. Es zeigt somit auf, dass die Beeinflussung der Fischzönose durch Wassertemperaturerhöhungen nicht in jedem Fall durch Befischungen im Zuge der GZÜV abbildbar ist.

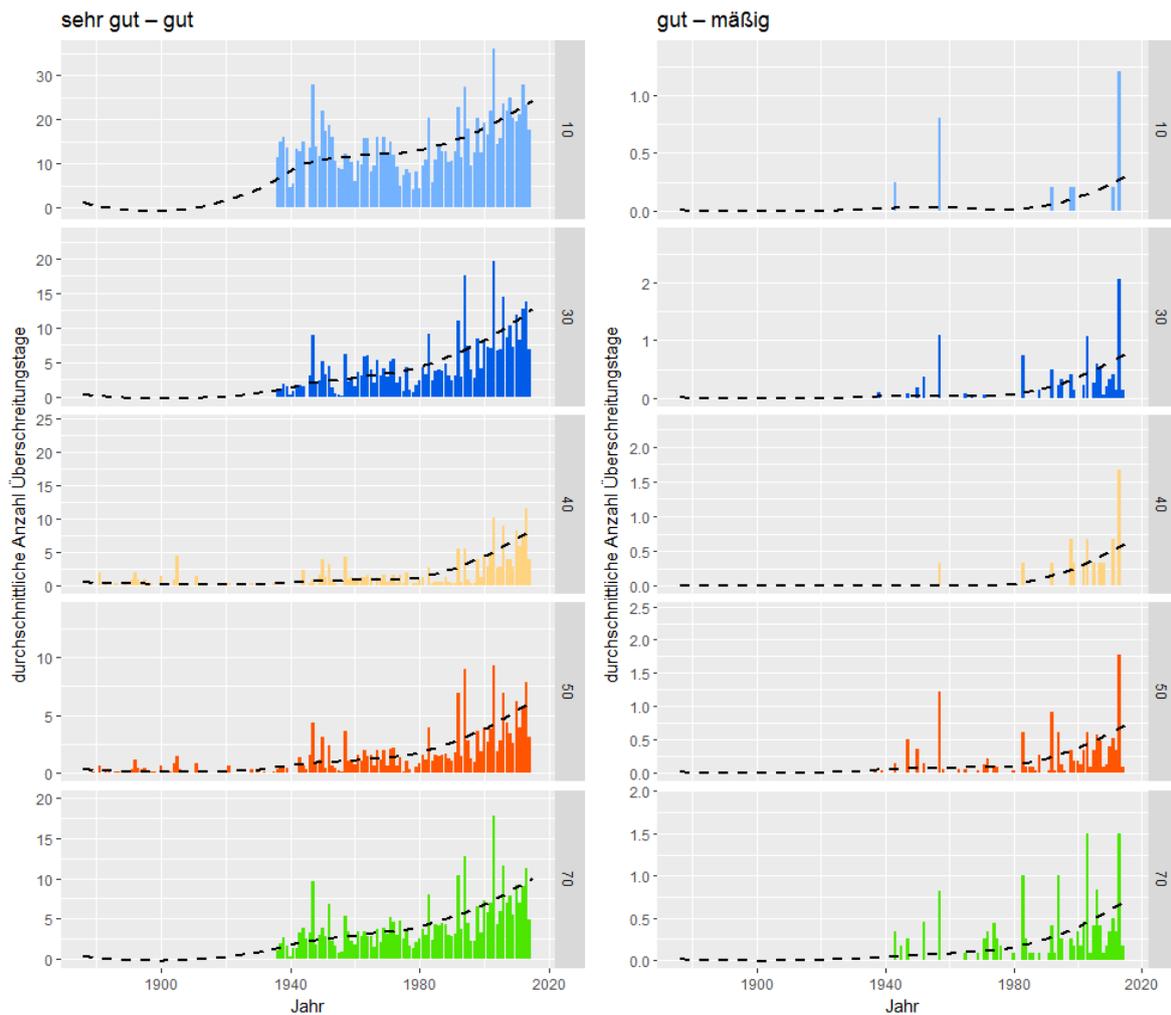


Abbildung 18 Übersreitungen des Temperaturgrenzwertes für die Grenzen „sehr gut – gut“ (links) und „gut – mäßig“ (rechts) in den einzelnen Fischregionen; Datengrundlage: retrospektiv errechnete Wassertemperaturen basierend auf den Luft-Wassertemperatur-Korrelationen der einzelnen Messstellen.

mittlere Anzahl der Überschreitungstage an den Messstellen pro Jahr für den Zeitraum 2000-2015

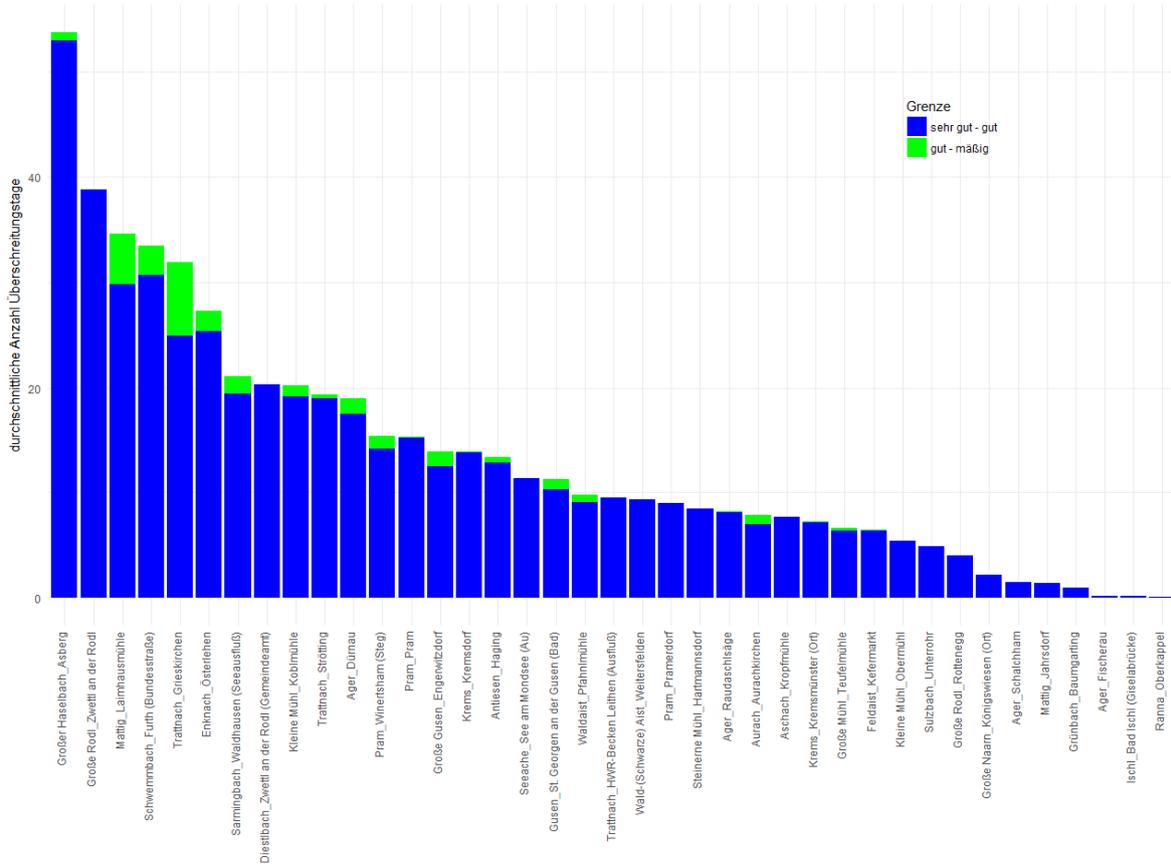
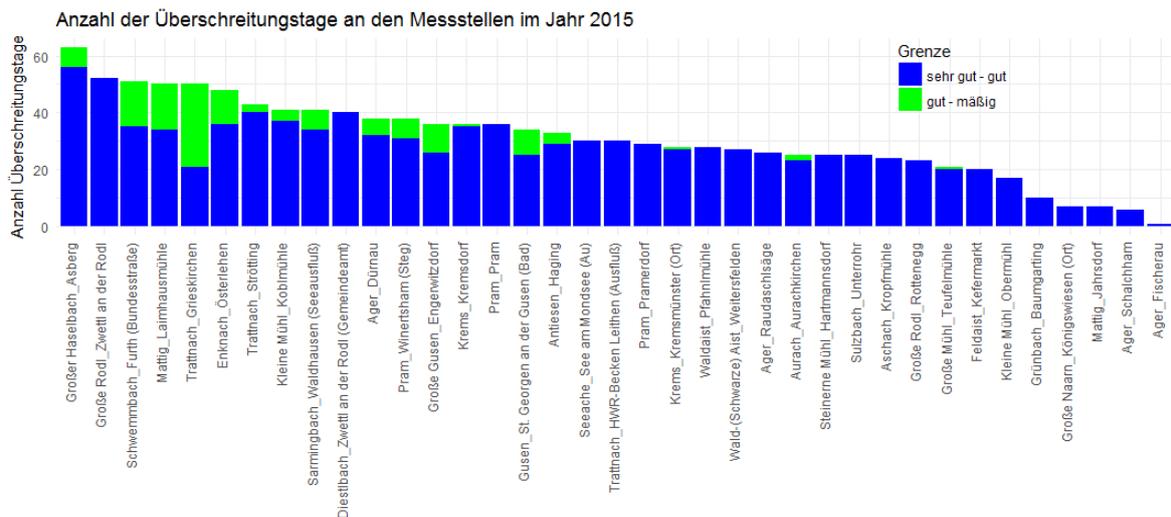


Abbildung 19 oben: durchschnittliche Überschreitungsdauer (in Tagen) der jeweiligen Temperaturgrenzwerte je Messstelle für den Zeitraum 2000 – 2015; blau: Überschreitung der Grenze „sehr gut – gut“, grün: Überschreitung der Grenze „gut – mäßig“; unten: Anzahl Überschreitungstage im Beobachtungsjahr 2015



4.5 Seehöhenmodell und Fischartengemeinschaft

Seehöhe und Jahressummengrade korrelieren hoch signifikant; dies konnte bereits in Prinz et al. (2009) gezeigt werden. Sowohl die Wassertemperatur als auch die Lufttemperatur nehmen erwartungsgemäß mit zunehmender Seehöhe ab, wobei die Abnahme unterschiedlich in den drei Fischbioregionen erfolgt. Abbildung 20 zeigt die Korrelation der Seehöhe mit den Wassertemperatur-Jahressummengraden in den drei Fischbioregionen.

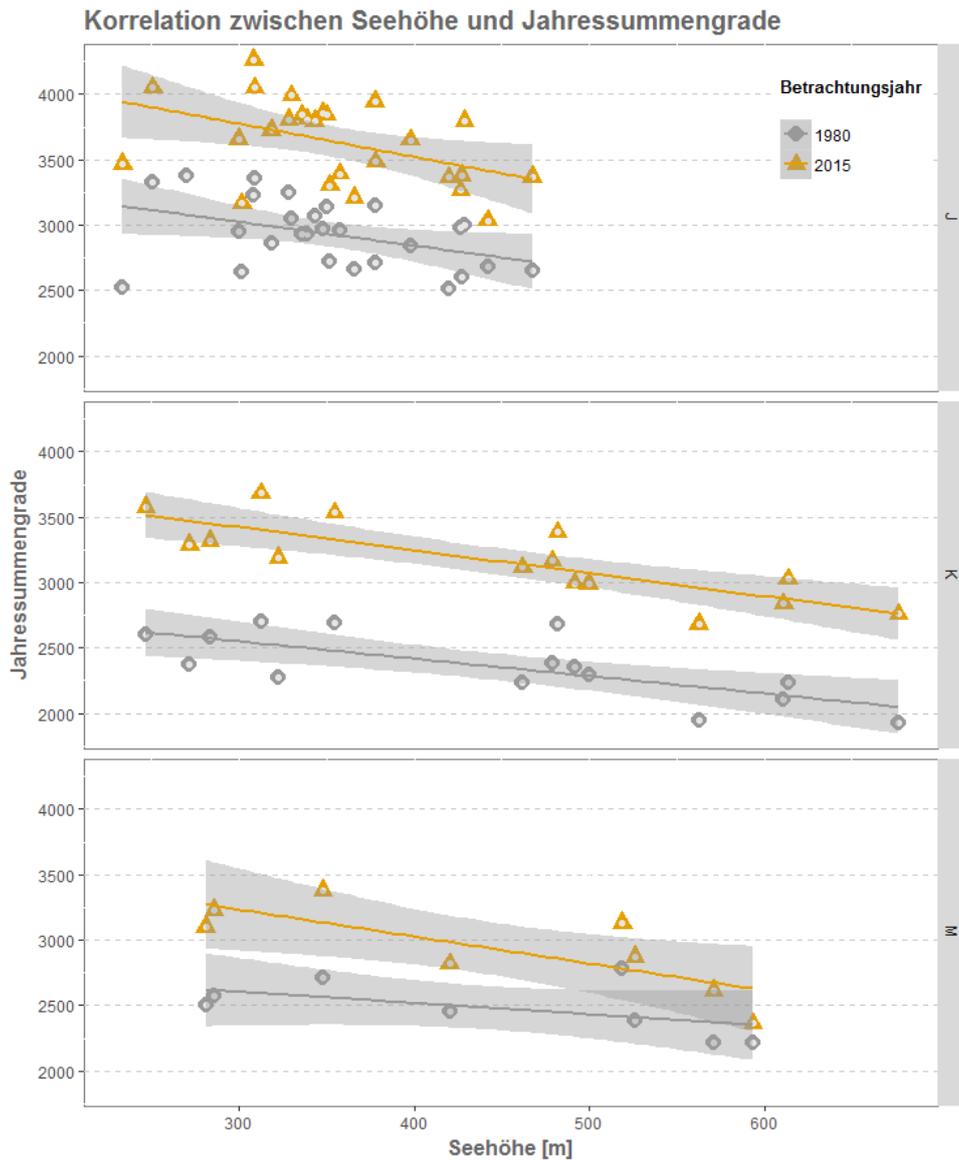


Abbildung 20 Zusammenhang zwischen Seehöhe und Wassertemperatur-Jahressummengrade in den drei betrachteten Fischbioregionen für die einzelnen Jahre 1980 (grau) sowie 2015 (gelb)

In grau dargestellt ist die Korrelation der Werte des Jahres 1980, in orange sind die Werte des Jahres 2015 angeführt. Es ist sehr deutlich erkennbar, dass sich die Korrelationsgeraden mit der Zeit verschoben haben – dieselben Messstellen weisen 2015 deutlich höhere Jahressummengrade in einer bestimmten Seehöhe auf, als sie das noch 1980 getan hatten.

In einem weiteren Schritt wurde nun versucht, die in Abbildung 20 dargestellte Erhöhung der Jahressummengrade in einer bestimmten Seehöhe so umzurechnen, dass eine theoretische Verschiebung der Seehöhe dargestellt werden kann. Unter der Annahme, dass Fische einer bestimmten Fischregion auf ein bestimmtes Temperaturniveau angepasst sind, muss eine Erhöhung der Temperatur in einem Habitat dazu führen, dass die Fischzönose neue Habitate zu erschließen versucht, welche wieder das optimale Temperaturniveau aufweisen. Dies kann einerseits lateral über kühlere Zubringerbäche erfolgen, oder aber über eine Wanderung in Richtung flussauf – solange, bis das Temperaturregime wieder mit den Ansprüchen der Zönose übereinstimmt.

Betrachtet man also die Auswirkungen der Erhöhung der Wassertemperaturen auf die bestehenden Fischregionen mit deren Fischleitbildern, so könnten diese - zumindest theoretisch - zur Verschiebung der Fischregionen in Richtung flussauf führen. Theoretisch deshalb, da andere Parameter wie Strömungsgeschwindigkeit, Nahrungsverfügbarkeit, etc. die Ausprägung einer Fischartengemeinschaft steuern.

Abbildung 21 zeigt die errechnete, theoretische Verschiebung bestimmter Temperaturregime in Richtung flussauf, wobei der Letztwert (i.e. 2017) ebendieser Seehöhenverschiebung entspricht. In den einzelnen Fischbioregionen verhält sich diese unterschiedlich, so wurde in der Fischbioregion Granit und Gneisgebiet der Böhm. Masse (K) eine deutlich höhere Seehöhenverschiebung errechnet, als in den Fischbioregionen Bayerisch-Österreichisches Alpenvorland und Flysch (J) sowie Kalkvoralpen und nördliche Kalkalpen (M). Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 aufgelistet; Abbildung 21 zeigt den zeitlichen Verlauf der Seehöhenverschiebung. Im Vergleich zu den in Prinz et al. (2009) prognostizierten Seehöhenverschiebungen wird deutlich, dass diese in allen Fischbioregionen bereits vor 2020 übertroffen worden sein dürften. Die Prognosen für 2020 erfolgten damals anhand der stärksten Temperaturzunahme, also der pessimistischen Schätzung für 2020 (siehe Bericht 2009, S.44).

In der vorliegenden Studie übersteigt die Seehöhenverschiebung in den Kalkvoralpen und Nördlichen Kalkalpen am weitesten die Schätzung jener der Studie Prinz et al. (2009). Damals wurde eine Seehöhenverschiebung bis 2020 um im Mittel 138 m prognostiziert – die hier vorliegenden und für die Berechnungen herangezogenen Daten lassen auf eine Seehöhenverschiebung bis Ende 2017 von bereits durchschnittlich 247 m schließen.

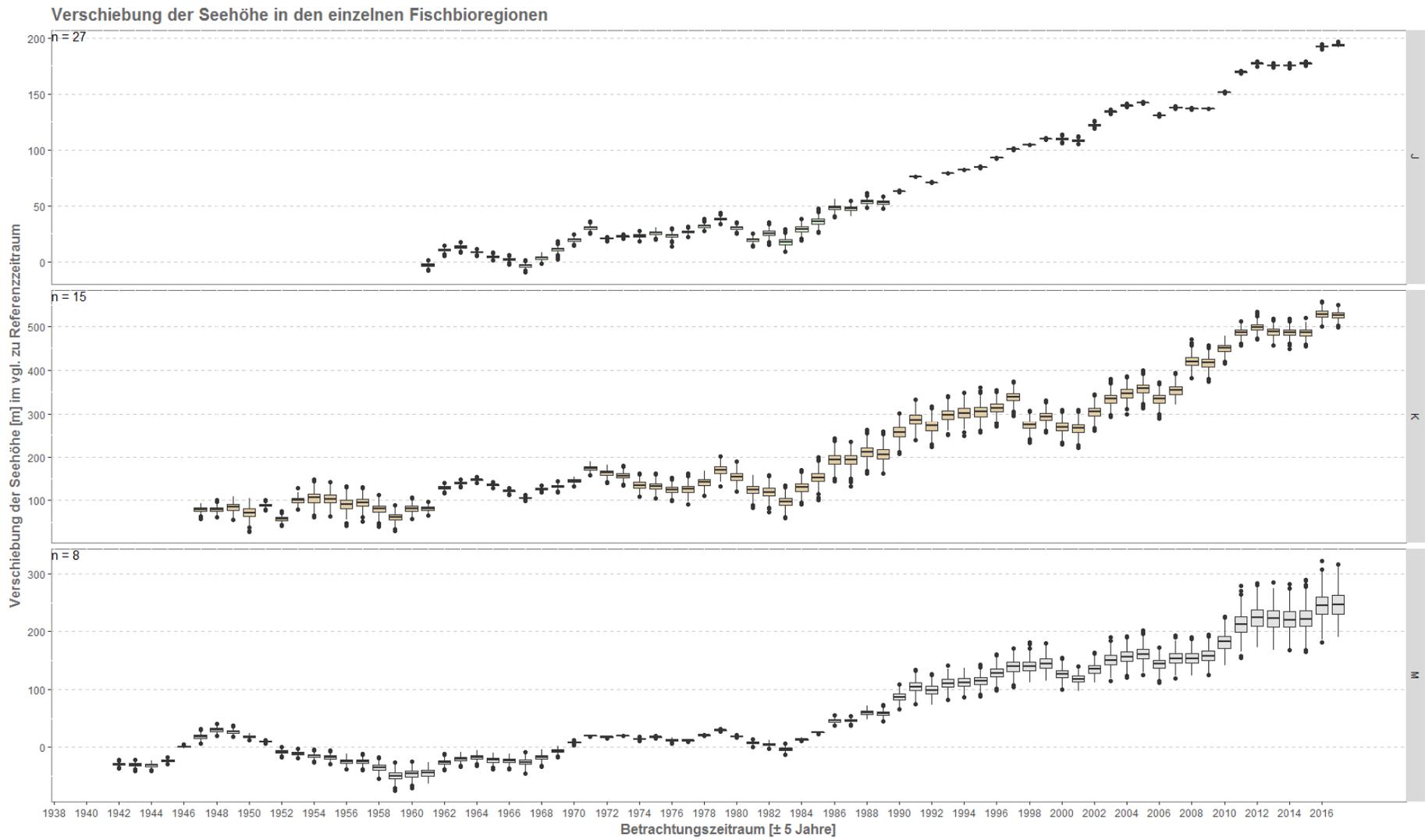


Abbildung 21 zeitlicher Verlauf der Seehöhenverschiebung [m] basierend auf den errechneten Wassertemperaturdaten.

Tabelle 4 errechnete Seehöhenverschiebung in [m] in den einzelnen Fischbioregionen

Fischbioregion	Spannweite [min-max]	Mittelwert (inkl. 95% CI)	Mittelwert aus Prinz et al. (2009)
Bayerisch- Österreichisches Alpenvorland und Flysch (J)	185 - 203	194 (± 2)	124 (118 – 128)
Granit und Gneisgebiet der böhm. Masse (K)	468 – 574	525 (± 19)	436 (367 – 509)
Kalkvoralpen und nördliche Kalkhochalpen (M)	166 – 335	247 (± 57)	138 (122 – 147)

An dieser Stelle soll zum besseren Verständnis dieser Berechnungen und Überlegungen ein konkretes Beispiel angeführt werden:

Die Messstelle Alm - Penningersteg (FKm 4.7, Fischregion Hyporhithral groß) liegt auf einer Seehöhe von 358 m, die Messstelle Alm – Friedlmühle (FKm 22.8, Fischregion Metarhithral) auf einer Seehöhe von 442 m. Gemäß Abbildung 22 wurde die mittlere jährliche Wassertemperatur des Jahres 1984 der ersteren, im Unterlauf der Alm liegenden Messstelle Penningersteg an der im Oberlauf liegenden Messstelle Friedlmühle bereits im Jahr 2005 erreicht und in den Folgejahren meist überschritten.

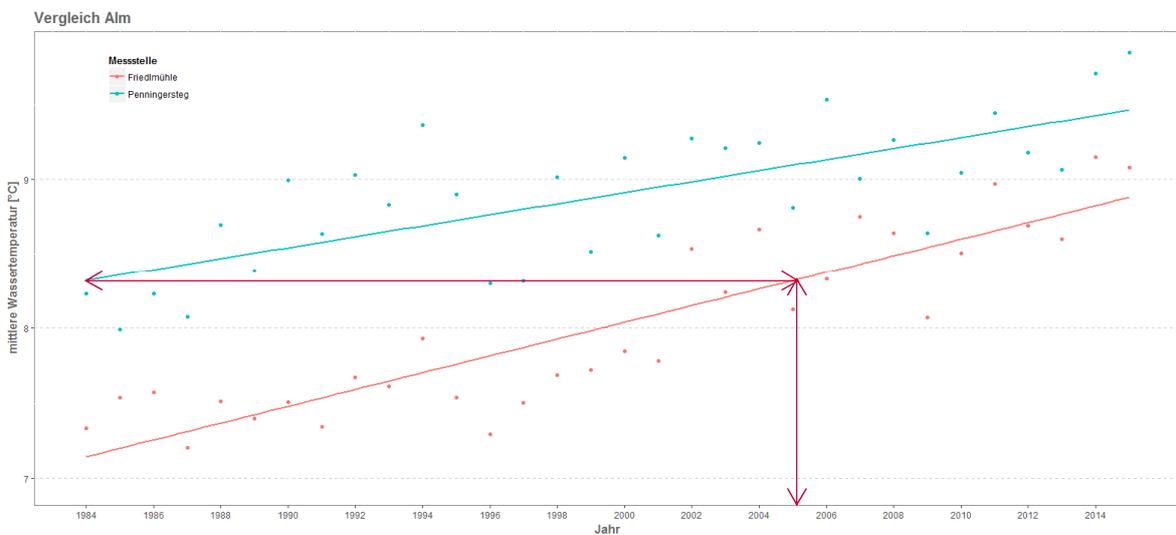


Abbildung 22 Temperaturverlauf seit 1984 an den beiden Messstellen Friedlmühle (rot) und Penningersteg (blau) an der Alm

Eine Lineare zwischen Jahresmittelwert und Seehöhe ergibt, dass die mittlere Jahrestemperatur von Penningersteg vom Jahr 1984 (i.e. 8.23°C) im Jahr 2015 auf einer Seehöhe von 605 Meter im Mittel vorherrscht. Dies entspricht somit einer Seehöhenverschiebung von 248 m. Gemäß ÖK-Geländemodell weist die Alm diese Seehöhe erst oberhalb des Almsees bei FKm 52.7 auf, somit oberhalb des oberen Endes der epirhithralen Fischregion (siehe Abbildung 23). Diese Seehöhenverschiebung würde einer Fließlängenverschiebung von 48 Kilometern entsprechen.

Damit wäre theoretisch hinsichtlich der Temperaturverhältnisse an der Messstelle Friedlmühle eine Änderung der Fischregion von Metarhithral auf zumindest Hyporhithral groß, von Hyporhithral groß im Unterlauf vermutlich auf Epipotamal mittel zu erwarten. Es sei aber nochmals darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um ein stark vereinfachtes Gedankenexperiment handelt, welches sämtliche abiotischen Parameter (Morphologie, Abfluss, etc.) ausklammert.

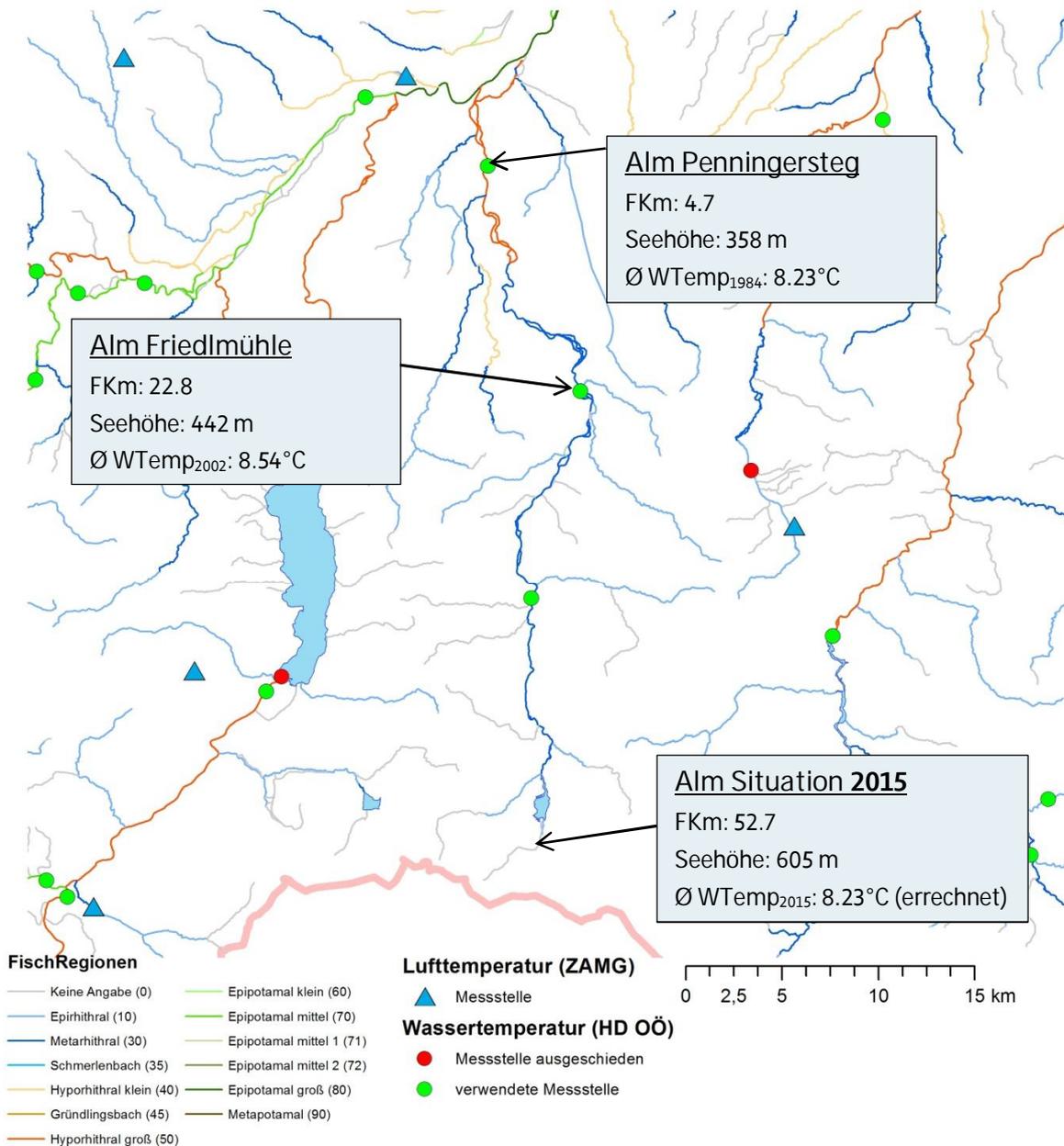


Abbildung 23 Seehöhenverschiebung der Wassertemperatur-Jahresmittelwerte am Beispiel der Alm

Fließlängenverschiebung

In der Studie Prinz et al. (2009) wurden die Überlegungen hinsichtlich der Seehöhenverschiebung weiter ausgewertet und basierend auf der Seehöhenverschiebung der Wassertemperaturen eine Verschiebung der Fischregionen errechnet, wie am Beispiel der Alm (siehe oben) bereits beispielhaft dargestellt wurde. Auch Schmutz & Matulla (2004) haben eine Verlagerung der Fischregion an der Mur von 40-50 km flussauf berechnet. In Prinz et al. (2009) wurde erkannt, dass in allen Fischbioregionen die Äschenregion unter starker Beeinflussung leidet, aber auch für die Forellenregion wurde eine starke Veränderung der Temperaturen festgehalten. Damit einhergehend kann theoretisch auch von einer Zunahme der Länge der Barbenregion ausgegangen werden. Auch hier ist wieder auf andere Habitatfaktoren hinzuweisen, welche eine (gewichtige) Rolle bei Habitatverfügbarkeit spielen.

Bei Prinz et al. (2009) wurden die Fließkilometer-Verschiebungen in Richtung flussauf mit 43 km im Granit und Gneis (K), mit 27 km im Alpenvorland und Fylsch (J) sowie 10 km in den Kalkvor- und -hochalpen (M) errechnet.

An dieser Stelle ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass es sich hierbei um theoretische Berechnungen handelt, deren Ergebnis stark von den zur Berechnung herangezogenen Fließgewässern abhängt und der geographischen Lage des Ausgangspunktes der Verschiebung. Hier wurden nunmehr die oberen Grenzen der Fischregionen aller im Gewässernetz Oberösterreich liegenden Fließgewässer als Grundlage herangezogen und diese um die für die Fischbioregion errechneten Seehöhenverschiebungen in Verschiebung der Fließkilometer umgelegt. Bei einem Großteil der Gewässer in den Fischbioregionen K und M führt dies oft zu einem „Leerwert“ (i.e. die errechnete Seehöhe der Fischregionsgrenze inkl. Verschiebung liegt über dem Krenalbereich des betrachteten Gewässers). Zur Erweiterung des Datenpools wurden daher die Stationierungen der Wassertemperaturmessstellen hinzugezogen, um so die Stichprobe etwas zu vergrößern. Mittels Bootstrap-Verfahren (1000 Zufallsziehungen pro Fischbioregion) wurden in weiterer Folge mittlere Fließkilometerverschiebungen für die jeweiligen Fischbioregionen errechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 24 sowie Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5 Verschiebung der Fließkilometer in Richtung flussauf (bootstrap) basierend auf den errechneten Seehöhenverschiebungen in den jeweiligen Fischbioregionen

Fischbioregion	Stichproben- größe	Seehöhen- verschiebung [m] Mittelwert	FKm- verschiebung [km] Mittelwert (inkl. 95% CI)	FKm- verschiebung [km] Spannweite
Bayerisch- Österreichisches Alpenvorland und Flysch (J)	52	194	21.3 (16.7 – 25.9)	4.5 – 84.6
Granit und Gneisgebiet der Böhm. Masse (K)	8	525	33.5 (21.3 – 45.7)	17.6 – 54.3
Kalkvoralpen und nördliche Kalkhochalpen (M)	10	247	41.6 (17.6 – 66.8)	4.6 – 90.8

Hervorgehoben wird an dieser Stelle die einerseits geringere Verschiebung der Fließkilometer in den Fischbioregionen J und K sowie die höhere Verschiebung flussauf in M (jeweils im Vergleich zu 2009). Dabei ist anzumerken, dass (wie in Tabelle 5 ersichtlich) einerseits eine geringere Stichprobenzahl in den Fischbioregionen K und M vorliegen und die Ergebnisse eine hohe Streuung aufweisen.

Die genannten Bedenken hinsichtlich einer Schlussfolgerung von Seehöhenverschiebung auf Fließkilometerverschiebung und weiter auf eine Verschiebung von Fischregionen in höhere Lagen wurden bereits genannt; die Ergebnisse sind somit keinesfalls 1:1 umzulegen. Abbildung 25 zeigt nichtsdestotrotz neuerlich die mittleren Wassertemperaturen der einzelnen Fischregionen und Fischbioregionen über die Zeit, jeweils als Mittelwert der Jahresmittelwerte aller zugrundeliegenden Messstellen. Dabei wird ersichtlich, dass z.B. die Fischregion Hyporhithral groß im Jahr 2015 in etwa Temperaturen aufwies, wie sie im Jahr 1984 in der Fischregion Epipotamal mittel vorherrschten. Des Weiteren kommen im Metarhithral in rezenter Zeit Temperaturen vor, welche in den 1980iger Jahren des letzten Jahrhunderts selbst für Hyporhithral groß zugeordneten Gewässern im Mittel untypisch hoch waren. Wenngleich also die Seehöhenverschiebung mit Vorsicht zu betrachten ist, so kann zumindest davon ausgegangen werden, dass die in bestimmten Habitaten vorherrschenden Temperaturen, an welche sich Fischarten und deren Lebenszyklus über Jahrtausende angepasst haben, in Zeiten der Klimaveränderung bedeutend höher sind.

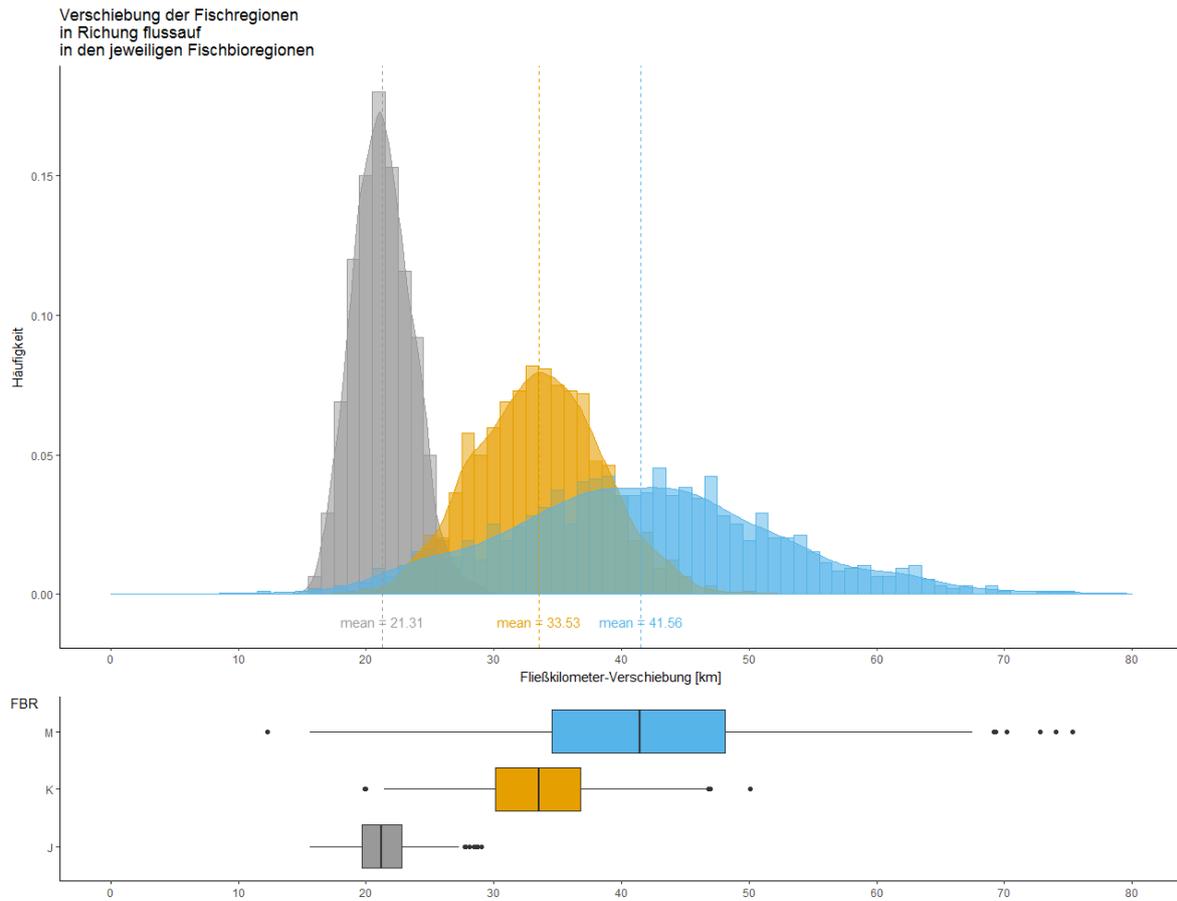


Abbildung 24 Verschiebung der Fließkilometer flussauf (bootstrap, [km]) in den einzelnen Fischbioregionen.

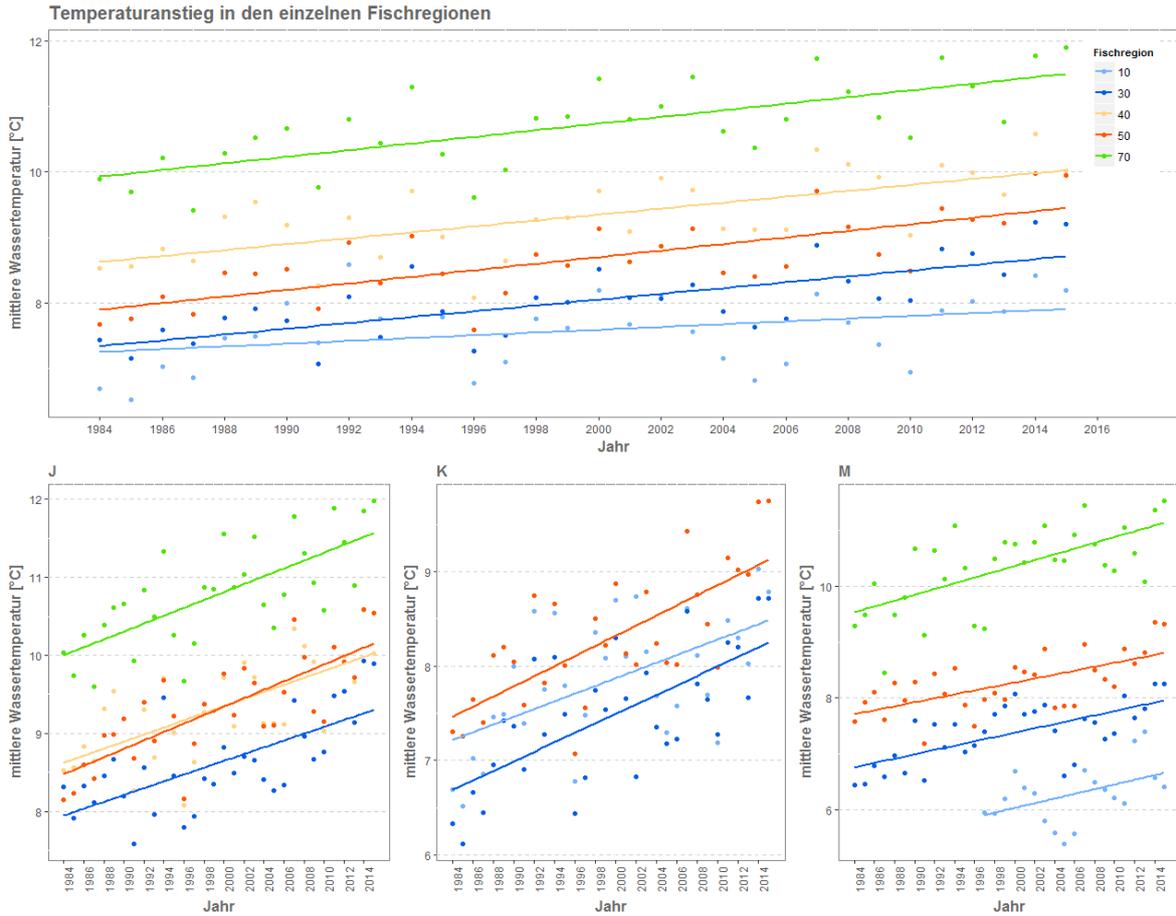


Abbildung 25 mittlere Wassertemperatur aller zugrundeliegenden Messstellen in den einzelnen Fischregionen und –bioregionen über die Zeit; Punkte beschreiben Mittelwert der Jahresmittelwerte.

4.6 Prognosemodelle

Basierend auf den linearen Regressionsmodellen für den Zeitraum 1984 bis 2015 wurde die mittlere Jahrestemperatur der zugrundeliegenden Wassertemperaturmessstellen für die Jahre 2020, 2030 und 2050 errechnet. Die Ergebnisse wurden deskriptiv aufbereitet, die jeweiligen prognostizierten Wassertemperaturen in den Graphen dargestellt (siehe beispielhaft Abbildung 26).

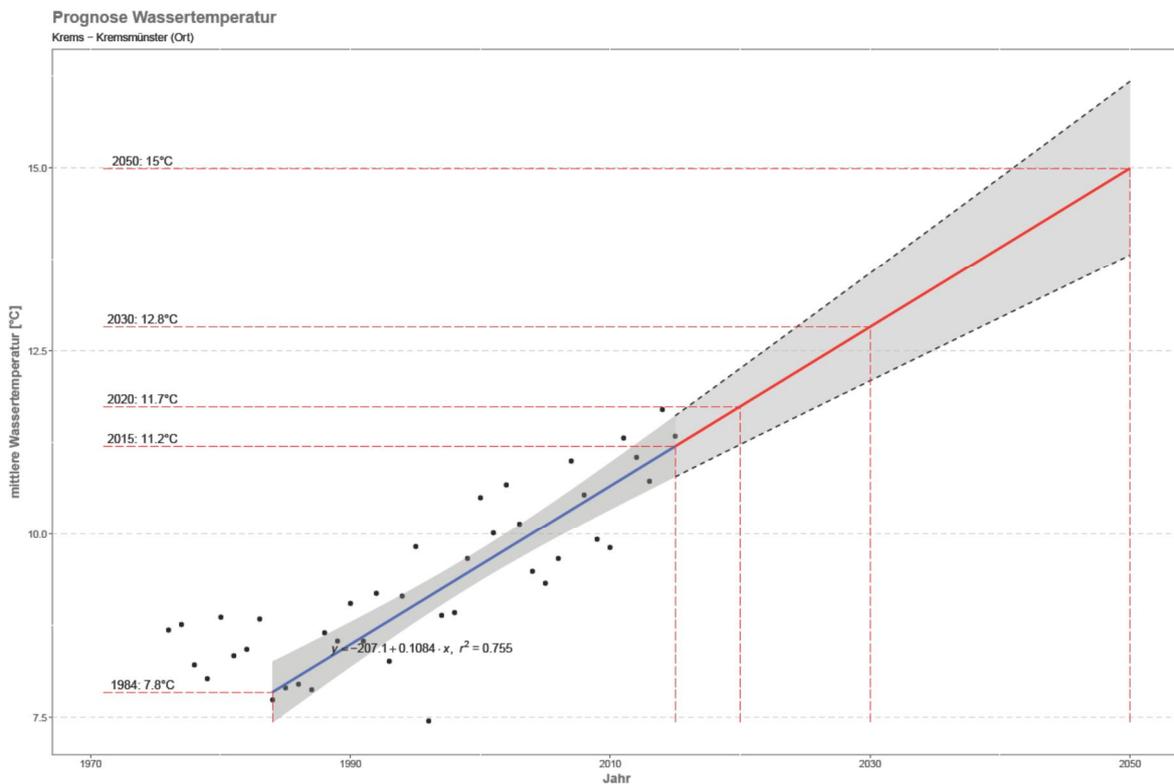


Abbildung 26 Prognose der Wassertemperaturentwicklung der Messstelle Kremsmünster basierend auf der linearen Regression der Wassertemperatur-Messwerte zwischen 1984 und 2015; rote Linie stellt die Prognose dar, grauer Bereich bildet die 95%ige Konfidenzintervalle ab

Ausgehend vom Jahresmittelwert der einzelnen Wassertemperaturmessstellen wurden Mittelwerte der Temperaturerhöhung in den einzelnen Fischbioregionen seit 1984 errechnet. Für 2050 werden anhand dieser Prognosen Temperaturwerte errechnet, welche um 2.84°C im Mittel höher liegen als noch 1984 (siehe Tabelle 6). Bereits 2020 ist in weiten Teilen

Oberösterreichs mit Wassertemperaturen zu rechnen, welche im Schnitt um über 2°C höher liegen als noch vor 40 Jahren, in den Kalkvoralpen immerhin um 2.3°C mehr.

Tabelle 6 Mittlere Temperaturänderung des Wassertemperatur-Jahresmittelwertes in den einzelnen Fischbioregionen aktuell sowie anhand der (linearen) Prognose für die Jahre 2020 und 2050

Prognose Temperatur-Differenz zu 1984	2015	2020	2050
Bayerisch-Österreichisches Alpenvorland und Flysch (J)	1.40	2.07	2.97
Granit und Gneisgebiet der böhm. Masse (K)	1.40	2.07	2.97
Kalkvoralpen und nördliche Kalkhochalpen (M)	1.09	1.61	2.32
Mittel	1.33	1.98	2.84

4.7 Temperaturpräferenz am Beispiel der Äsche (*Thymallus thymallus*)

Die bisherigen Ergebnisse haben in der weiteren Bearbeitung des Projektes unweigerlich die Frage aufgeworfen, ob es durch die steigende Wassertemperatur zur Einschränkung der Lebensraumeignung von heimischen Fischarten kommt. Hinweise darauf liefern bereits die theoretische Seehöhenverschiebung sowie die Verschiebung der Fischregionen, mit all ihren Einschränkungen. Um sich dieser Fragestellung weiter zu nähern wird im Folgenden die Äsche beispielhaft als kälteliebende Art herangezogen.

Die Äsche ist Leitart in der Fischregion Hyporhithral groß, kommt aber auch im Hyporhithral klein (in der FBR J) sowie im Epipotamal mittel (J und M) und Epipotamal groß (in M) als typische Begleitfischart in den jeweiligen Leitbildern vor (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7 Vorkommen der Äsche gemäß Standardleitbilder zur Bewertung des fischökologischen Zustandes in Österreich

Äsche	J	K	M
Epirhithral			
Metarhithral	s	s	s
Hyporhithral klein	s	b	
Hyporhithral groß	l	l	l
Epipotamal klein	s		
Epipotamal mittel	b	s	b
Epipotamal groß	s	s	b

Unter Heranziehung der Befischungsdaten der Fischdatenbank Austria (FDA) konnten insgesamt 96 Befischungen mit Äschen zur weiteren Analyse herangezogen werden. Dabei handelt es sich um Aufnahmen, welche im Zuge der Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV) beprobt wurden, also nach 2005 und damit in bereits gegenüber den frühen 1980iger Jahren erwärmten Gewässern. Es wurden ausschließlich bestandsbildende Äschenbestände herangezogen, also solche Aufnahmen, bei denen der Art eine Altersstrukturbewertung von 1 oder 2 zugeschrieben wurde. Dies ist dann gegeben, wenn alle Altersklassen vorhanden sind, bei Bewertung 2 sind die Jungfische unter- oder adulte überrepräsentiert.

Es zeigt sich, dass die Äsche hinsichtlich Seehöhenverteilung in etwa zwischen 300 und 600 m Seehöhe bestandsbildend nachgewiesen wurde (vgl. Abbildung 27).

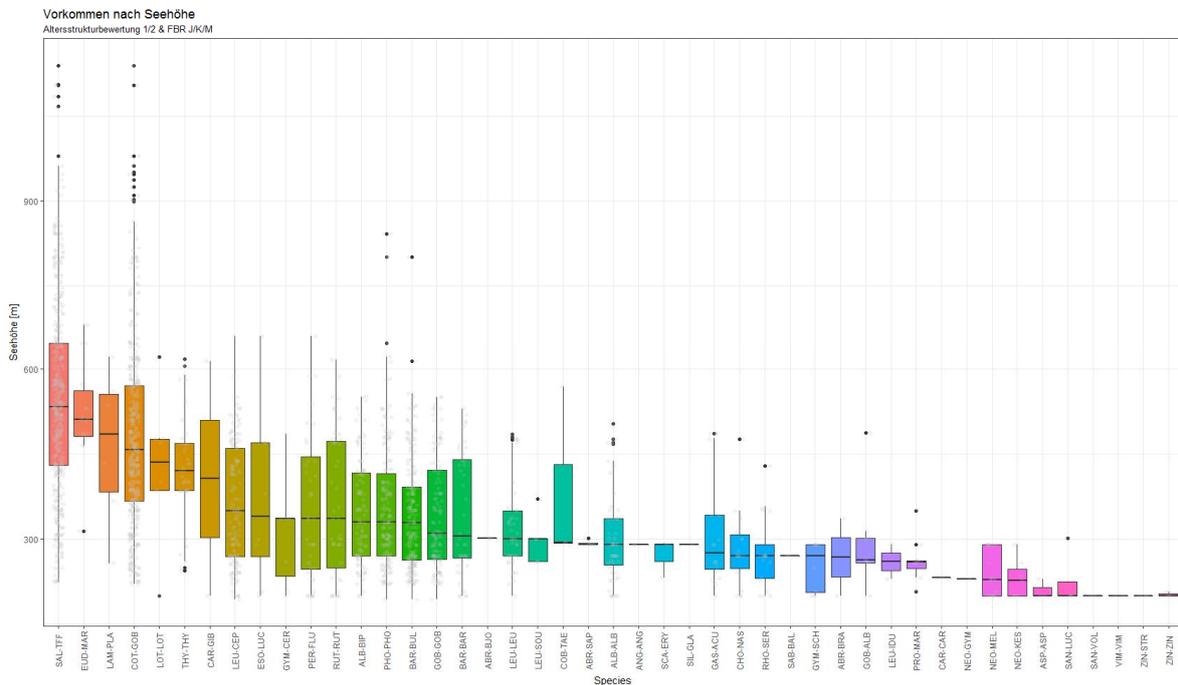


Abbildung 27 bestandsbildendes Vorkommen (= Bewertung der Altersstruktur mit 1-2) von Fischarten nach Seehöhe in den Fischbioregionen J/K/M

Will man die bei diesen Befischungsstellen vorherrschenden Temperaturverhältnisse in den Fischbioregionen J/K/M betrachten, so bieten sich hier zwei Varianten. Eine Rückrechnung auf die Wassertemperatur über die Seehöhe oder die Verwendung der mittleren jährlichen Lufttemperatur an den Stellen, welche im Zuge der GZÜV mitaufgenommen wird. Wie bereits oben abgehandelt korrelieren Luft- und Wassertemperatur sehr gut miteinander, weshalb hier letztere Variante weiterverfolgt wird.

Es wird angenommen, dass basierend auf den vorliegenden Daten mit hoher Wahrscheinlichkeit bei Temperaturen zwischen dem 25%- und 75%-Quartilen der mittleren jährlichen Lufttemperatur davon auszugehen ist, dass (bei Vorhandensein der dafür notwendigen sonstigen abiotischen Habitatstrukturen) sämtliche Altersstadien und damit stabile Bestände vorgefunden werden können. Für die Äsche ergibt sich dafür eine mittlere jährliche Lufttemperatur von circa also 7 - 8.34°C (Abbildung 28).

Korrelationen zwischen den Jahresmittelwerten (Korrelation Luft-Wasser) lassen darauf schließen, dass die entsprechenden mittleren jährlichen Wassertemperaturen zwischen 6.4 und 9.8°C über alle Fischregionen hinweg, im Hyporhithral groß zwischen 7.8 – 8.5°C liegen.

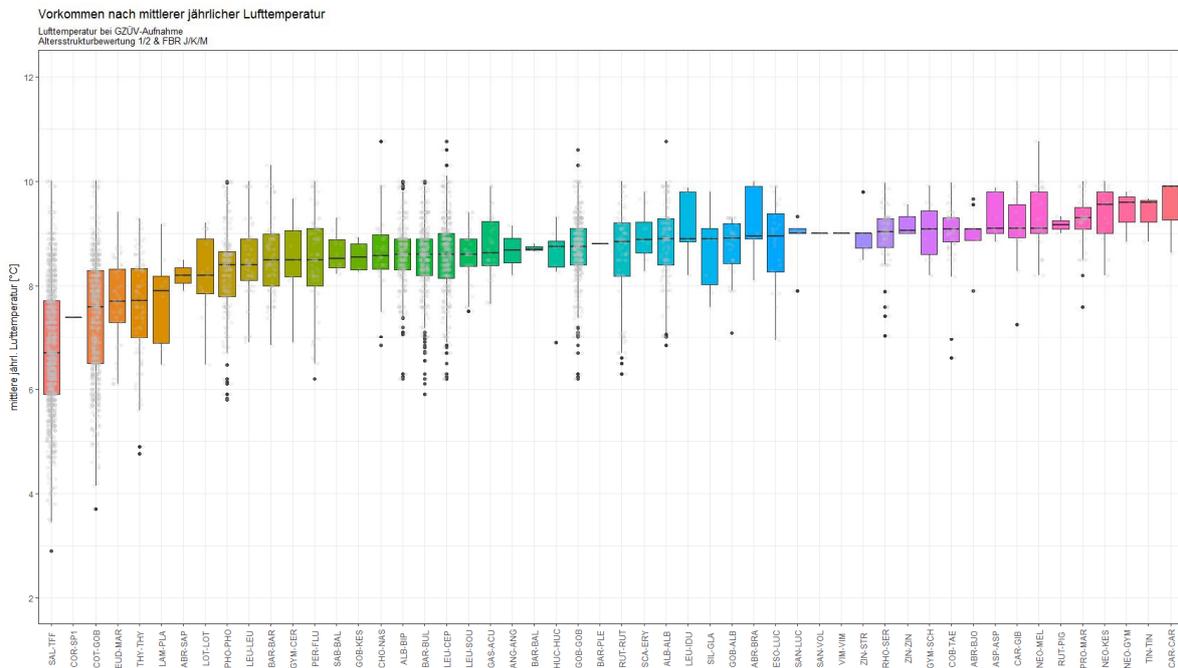


Abbildung 28 Vorkommen autochthoner Fischarten (z.B. Äsche codiert als THY-THY) nach mittlerer jährlicher Lufttemperatur in GZÜV-Befischungen seit 2005 (Altersstrukturbewertung 1-2; Fischbioregionen J/K/M)

Abbildung 29 zeigt die mittleren jährlichen Wassertemperaturen der einzelnen Fischregionen im zeitlichen Verlauf als etwa 10-Jahresintervall. Als Datengrundlage wurden die vom Amt der OÖ Landesregierung zur Verfügung gestellten Wassertemperaturdaten verwendet. So zeigt sich für das Hyporhithral groß die in diesem Bericht bereits beschriebene Temperaturerhöhung seit 1984. In Grau mit Rotem Rand eingezeichnet ist die bei den GZÜV-Befischungen angeführte mittlere jährliche Lufttemperatur bei bestandsbildenden Äschenvorkommen. Es zeigt sich, dass das Hyporhithral groß diesen – für die Äsche betrachteten – Idealbereich zunehmend überschreitet.

Es soll anhand dieses Beispiels nicht suggeriert werden, dass Äschen keine adäquaten Habitate mehr vorfinden, in denen sie ausreichend große Bestände bilden können – dafür ist die vorhandene Datenlage zu gering. Vielmehr soll darauf hingewiesen werden, dass für kaltstenotherme Fischarten wie die Äsche im Zuge der Klimaerwärmung es zunehmend schwieriger werden wird Habitate zu finden, in denen sowohl die morphologischen

Parameter als auch die Temperatur sämtlichen Altersstadien des Lebenszyklus einen idealen Lebensraum bieten. In weiterer Konsequenz ist auch aufgrund der Temperaturveränderung mit dem Rückgang von einzelnen Fischarten zu rechnen.

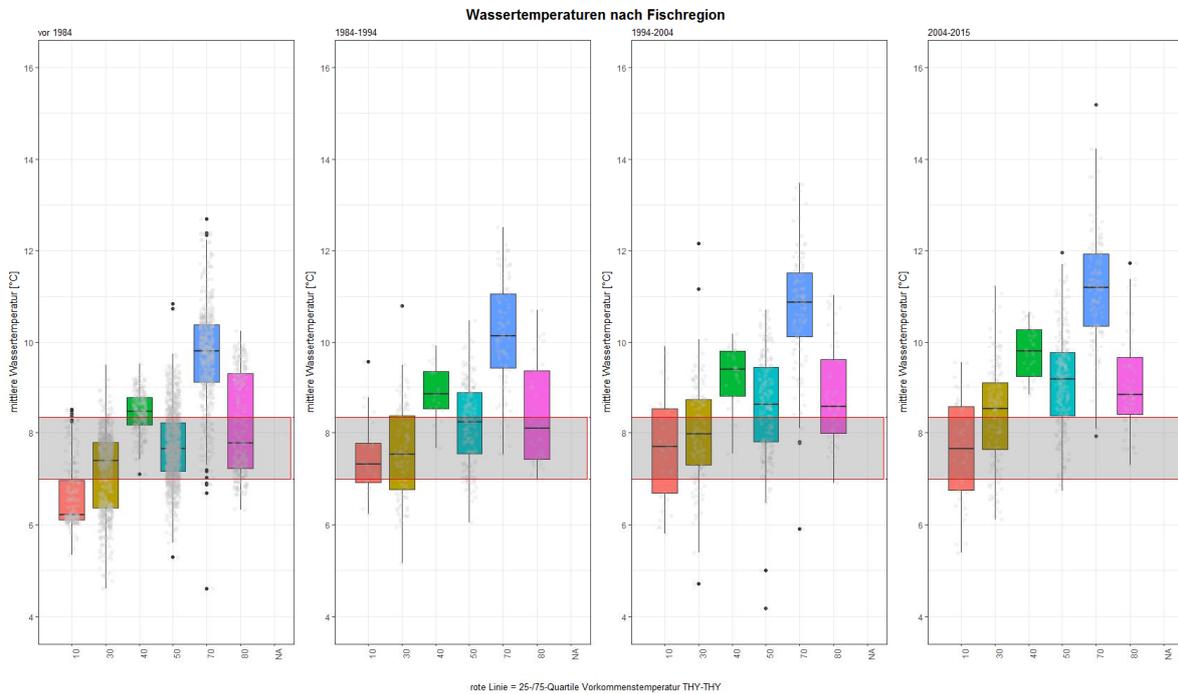


Abbildung 29 mittlere jährliche Wassertemperatur basierend auf den Daten des Hydrographischen Dienst OÖ nach Fischregionen und im zeitlichen Verlauf; roter Bereich entspricht dem Q25-75-Bereich der Äsche hinsichtlich mittlerer jährlicher Lufttemperatur (siehe Erläuterungen im Text)

5 Zusammenfassung

Die Temperaturen in den oberösterreichischen Fließgewässern nehmen seit ca. 1980 relativ konstant zu und entsprechen damit dem internationalen und nationalen Trend. Die Ergebnisse der Studie Prinz et al. (2009) wurden bestätigt bzw. aktualisiert. Der mittlere Temperaturanstieg beträgt in den OÖ. Fließgewässern 0.043°C pro Jahr, wobei stärkere Zunahmen in den Sommermonaten beobachtet werden konnten. Diese Temperaturanstiege summieren sich in OÖ. Fließgewässern seit 1984 im Schnitt auf 1.33°C (Datenbetrachtung bis 2015), wobei in den drei Fischbioregionen Unterschiede festgestellt werden konnten. In der Fischbioregion „Kalkvoralpen und Nördliche Kalkhochalpen“ nahm die durchschnittliche Temperatur um etwa 1.09°C zu, wohingegen in den Fischbioregionen „Bayerisch-Österreichisches Alpenvorland und Flysch“ und nördlich der Donau, im „Granit und Gneisgebiet der Böhmisches Masse“, Wassertemperaturanstiege von durchschnittlich 1.4°C gemessen werden konnten. Dieser Unterschied in der Zunahme der Wassertemperaturen ist wohl durch ein höheres Puffervermögen der Karstquellen der Alpen hinsichtlich Temperatur erklärbar, sowie durch den Einfluss der abschmelzenden Gletscher.

Über Luft-/Wassertemperatur-Korrelationen konnten Rückschlüsse auf Wassertemperaturen vor Beginn der Wassertemperaturaufzeichnungen gewonnen werden, da Lufttemperaturen teilweise viel länger zurückreichend vorliegen. Dabei zeigte sich, dass – wie in der internationalen und nationalen Literatur beschrieben – auch in den OÖ. Fließgewässern die Temperaturzunahme in Folge der Klimaerwärmung in etwa Mitte der 1980er begann.

Diese Ergebnisse ordnen sich insgesamt in die Ergebnisse des Austrian Assessment Report 2014 (AAR14) ein. Demzufolge ist seit 1880 die (Luft)Temperatur in Österreich um fast 2°C gestiegen, wobei hier ein beschleunigter Anstieg (in etwa 1°C) für die Zeit ab 1980 beobachtet wurde (Auer et al., 2014). Demnach hat seit Mitte der 1970er bis Anfang der 2010 die Lufttemperatur um 1.5°C zugenommen.

Diese Erwärmung der Luft- und Wassertemperaturen in den letzten 30-40 Jahren hat naturgemäß Effekte auf Lebewesen und deren Umwelt, wenngleich solche Effekte teilweise nur schwer „dingfest“ zu machen sind, da oftmals äquivalente Langzeitdaten, wie sie bei Wasser- und Lufttemperaturen vorliegen, fehlen. So existieren z.B. standardisierte Befischungsergebnisse, wie sie zum Beispiel im Rahmen der Gewässerzustandsüberwachung erfolgen, erst seit dem Jahr 2005. Nähert man sich dem Nachweis jedoch über Indiziensammlung, so ergibt sich nichtsdestotrotz ein Bild, welches auf eine sich aufgrund der erhöhten Temperaturen ändernde Umwelt schließen lässt. Die Analyse der Überschreitungen

von fischregionsspezifischen Temperaturgrenzwerten zeigt klar eine Zunahme der Überschreitungstage auf, wobei nicht nur die Grenzwerte zwischen sehr gut und gut in den einzelnen Fischregionen immer häufiger überschritten werden, sondern auch jene zwischen gut und mäßig. Nicht nur aufgrund dieser Überschreitungen ist mit einer Veränderung der Fischartengemeinschaften zu rechnen, sondern auch aufgrund der Dauer dieser Überschreitungen, welche an vielen Messstellen im Schnitt über mehrere Tage, an wenigen sogar bis zu mehreren Wochen andauern.

Fische vermögen Temperaturunterschiede von etwa 0,5 °C wahrzunehmen. Jede Fischart besiedelt jenes Gewässer oder jenen Gewässerabschnitt, in welchem die Temperaturverhältnisse für den Ablauf der Lebensprozesse, wie z. B. Stoffwechsel, Wachstum, Fortpflanzung, Eientwicklung geeignet sind. Im Bereich der Vorzugstemperaturen verlaufen die Lebensprozesse hinsichtlich der Temperatur normal ab. An diesen optimalen Temperaturbereich schließt eine obere und untere kritische Temperaturzone an, welche Fische bereits unter physiologischem Stress aber noch für eine gewisse Zeit zu tolerieren imstande sind. Dieser Stress äußert sich in einer Hemmung von Nahrungsaufnahme, Stoffwechsel, Wachstum, Abbläuen, Eientwicklung sowie Intensivierung der Atmung, Veränderung des Schwimmverhaltens, wobei die Fische auszuweichen versuchen. Eine weitere Zunahme oder Abnahme der Temperatur über den Toleranzbereich hinaus ist für Fische tödlich (Butz, 1981).

Im längszonalen System der Gewässer liegt somit der Schluss nahe, dass Fische aufgrund der steigenden Temperaturen gezwungen sein werden in höhere Abschnitte des Fließgewässers bzw. in kühlere Zubringergewässer zu emigrieren. Diese These wird von den Auswertungen der Temperatur im Längsverlauf von Gewässern untermauert, welche eine Verschiebung der Wassertemperaturen von um bis zu 525 Seehöhenmeter flussauf annehmen lassen, wobei auch hier regionspezifische Unterschiede ausgemacht werden konnten. So ergaben die Auswertungen in dieser Studie, dass im alpinen Bereich diese Seehöhenverschiebung geringer ausfallen dürfte als im Granit und Gneisgebiet. Aufgrund unterschiedlicher Gefällsgegebenheiten wirkt sich diese Seehöhenverschiebung in Form eines möglichen Habitats-Verlustes durch Verschiebung der Fließkilometer allerdings in den Kalkvoralpen und nördlichen Kalkhochalpen am stärksten aus – hier wurden Fließlängenverschiebungen von bis zu 91 km errechnet, im Mittel wurden ~42 km errechnet. Das bedeutet, dass ein Fischindividuum, welches einen bestimmten Wassertemperatur-Jahresmittelwert (stellvertretend für ein Temperaturspektrum eines Habitats) bevorzugt, im Jahr 2017 im Mittel 42 km flussauf schwimmen müsste, um Temperaturverhältnisse wie sie vor dem Jahr 1984 vorlagen, vorzufinden.

Bereits in Prinz et al. (2009) wurde ausgeführt, dass verschiedene Fischarten aber an das Habitat auch unterschiedliche Ansprüche stellen, wobei sich die Ansprüche verschiedener Lebensstadien innerhalb einer Art auch unterscheiden. So können flussaufwärts gelegene Gewässerabschnitte zwar momentan dem Temperaturanspruch gerecht werden, aber nicht anderen Habitatansprüchen. Dementsprechend kann es zu unmittelbarem Ausfall gewisser Arten kommen. Die Barbenregion und deren Vertreter könnten zwar flussauf zunehmen, jedoch wirken andere Parameter wie Fließgewässerbreite, Abfluss, Gefälle und andere Faktoren begrenzend. Zudem wirkt die Situation durch Wanderhindernisse wie z.B. Wasserkraftwerke nicht begünstigend. Dadurch lassen sich die kühleren Bereiche flussauf oftmals nicht erreichen.

Am Beispiel der Äsche konnte gezeigt werden, welche Einschränkungen der Habitatverfügbarkeit die Temperaturerhöhung haben dürfte. So ist von einer Veränderung der Temperatur in der Äschenregion auszugehen. Hier werden öfter Temperaturwerte erreicht, welche hinsichtlich der namensgebenden Fischart dieser Fischregion häufiger suboptimale Bedingungen aufweisen werden.

Generell betreffen diese Temperaturveränderungen nicht nur das adulte Fischindividuum, welches bei suboptimalen Temperaturen physiologischen Stress erfährt. Auch der Zeitpunkt des Laichgeschehens vieler Fischarten ist temperaturabhängig, ebenso wie die sich dadurch ergebende Eientwicklungsdauer, Schlupfzeitpunkt, Nahrungsverfügbarkeit für Larven und Juvenile, Wachstumsraten, etc. Weiters sind hier hydrologische Bedingungen zu den jeweiligen Stadien mit zu berücksichtigen. Abnehmende Populationsgrößen von diversen Fischarten, so dies beobachtet wird, könnten in einer Reaktionskaskade auf diese höheren Temperaturen begründet sein. Hier erschweren jedoch derzeit die Vielzahl der Belastungen in österreichischen Fließgewässern sowie die zu geringe Stichprobenzahl klare Analysen.

Eine Analyse basierend auf den Befischungsdaten der vergangenen Jahre beinhaltet weiters das Problem, dass nicht nur von direkten, sondern auch indirekten Beeinträchtigungen von Fischpopulationen auszugehen ist. Fischarten unterliegen beispielsweise einer Wechselbeziehung zu Parasiten und Bakterien, die bei physiologischem Stress durch Temperatur Auswirkungen auf Fischbestände haben können. Die Furunkulose ist etwa eine bakteriell bedingte Infektionskrankheit (*Aeromonas salmonicida*), welche Salmoniden aller Altersklassen betreffen kann und gehäuft im Sommer bei hohen Wassertemperaturen, Sauerstoffmangel und anderen Stressfaktoren ausbricht sowie zu Ausfällen führen kann. Bei anderen Parasiten ist in der Literatur beschrieben, dass bei Überschreitungen über das Temperaturoptimum einer Parasitenart hinaus eine Reduktion der Vermehrung dieser erfolgen kann. Dies zeigt, wie sensibel das Gesamtsystem auf sich ändernde Temperaturbedingungen reagieren kann und in weiterer Folge wie schwierig Prognosen

aufgrund dieser multifaktoriellen Reaktionen hinsichtlich Auswirkungen auf Fischpopulationen sind.

In Kombination mit anthropogenen Einflüssen (insbesondere Morphologie) ergeben sich weitere Risikofaktoren, welche auf die Erwärmung der Gewässer Einfluss nehmen können.

Zu erwarten ist, so wie bereits in Prinz et al. (2009) beschrieben, ein Ausfall der kälteliebenden Fischarten (z.B. Salmonidae, Thymallidae, Cottidae, ...) und eine Zunahme der wärmeliebenden (z.B. Cyprinidae) oder Neobiota. Hinsichtlich allochthoner Fischarten ist davon auszugehen, dass frei werdende Habitatnischen bei Vorhandensein geeigneter abiotischer Bedingungen auch von diesen vermehrt genutzt werden und somit einzelne, gut an die neuen Verhältnisse angepasste Arten, sich (weiter) ausbreiten.

Empfehlungen aus fachlicher Sicht können aus Prinz et al. (2009) direkt übernommen werden. Diese beinhalten lokal wirksame Maßnahmen wie Beschattung durch Ufervegetation, morphologische Renaturierungen zur Schaffung thermisch günstiger Refugien (tiefe Bereiche, Gumpen, Anbindung an hyporheisches Interstitial), Herstellung der Durchgängigkeit in longitudinaler sowie lateraler (i.e. Zubringergewässer) Richtung, Reduktion der Staubereiche, Sicherstellung ausreichend dotierter Restwasserbereiche, Erhöhung der Mindestdotierung, Maßnahmen zur Erhaltung und Sanierung der Grundwasserreservoirs, und so weiter. Diese Maßnahmen dürften jedoch bestenfalls kurzfristige Effekte gegen eine Temperaturerhöhung haben.

Langfristige Maßnahmen zur Bekämpfung der Ursachen anthropogen bedingter Klimaveränderungen sind bekannt und benötigen ein politisches wie gesellschaftlich drastisches Umdenken bzw. Handeln.

Literaturverzeichnis

Auer, I., Foelsche, U., Böhm, R., Chimani, B., Haimberger, L., Kerschner, H., ... Spötl, C. (2014). Vergangene Klimaänderung in Österreich. In Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14) (Vol. 1, pp. 227–300). Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

Becker, C. D., & Genoway, R. G. (1979). Evaluation of the critical thermal maximum for determining thermal tolerance of freshwater fish. *Env. Biol. Fish*, 4(3), 245–256.
<https://doi.org/10.1007/BF00005481>

Benyahya, L., Caissie, D., St-Hilaire, A., Ouarda, T. B. M. ., & Bobée, B. (2007). A Review of Statistical Water Temperature Models. *Canadian Water Resources Journal*, 32(3), 179–192. <https://doi.org/10.4296/cwrj3203179>

Blöschl, G., Schöner, W., Helmut Kroiß, Wilfried, S., & Ludwig, L. (2011). Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. *Osterreichische Wasser- Und Abfallwirtschaft*, 63(1), 19–20.
<https://doi.org/10.1007/s00506-011-0280-z>

Bogan, T., Mohseni, O., & Stefan, H. G. (2003). Stream temperature-equilibrium temperature relationship. *Water Resources Research*, 39(9), 1–12.
<https://doi.org/10.1029/2003WR002034>

Böhm, R., Godina, R., Nachtnebel, H. P., & Pirker, O. (2008). Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. BMLFUW. Wien.

Butz, I. (1981). Wassertemperatur und Gewässer. *Österreichs Fischerei*, (38), 241–244.

Caissie, D. (2006). The thermal regime of rivers: A review. *Freshwater Biology*, 51(8), 1389–1406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>

Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E., & Terpenning, I. (1990). STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*.
<https://doi.org/citeulike-article-id:1435502>

Deutsch, K., Haunschmid, R., Kreuzinger, N., & Prinz, H. (2015). Bewertung Gemäss Wrrl Allgemein Physikalisch-Chemische Parameter in Fließgewässern.

- Graham, C. T., & Harrod, C. (2009). Implications of climate change for the fishes of the British Isles. *Journal of Fish Biology*, 74(6), 1143–1205. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2009.02180.x>
- Hari, R., & Januar, E. (2004). Temperaturverlauf in Schweizer Flüssen 1978-2002 Auswertungen und grafische Darstellungen fischrelevanter Parameter, (01).
- IPCC. (2014). Climate Change 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Vol. 5). Retrieved from www.cambridge.org/9781107661820
- Jeppesen, E., & Iversen, T. M. (1987). Two simple models for estimating daily mean water temperatures and diel variations in a Danish low gradient stream. *Oikos*, 49(2), 149–155. <https://doi.org/10.2307/3566020>
- Kaushal, S. S., Likens, G. E., Jaworski, N. A., Pace, M. L., Sides, A. M., Seekell, D., ... Wingate, R. L. (2010). Rising stream and river temperatures in the United States. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(9), 461–466. <https://doi.org/10.1890/090037>
- Lyons, J., Stewart, J. S., & Mitro, M. (2010). Predicted effects of climate warming on the distribution of 50 stream fishes in Wisconsin, U.S.A. *Journal of Fish Biology*, 77(8), 1867–1898. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02763.x>
- Meili, M., Scheurer, K., Schipper, O., & Holm, P. (2004). Dem Fischrückgang auf der Spur Schlussbericht des Projekts Netzwerk Fischrückgang Schweiz - "Fischnetz," 184.
- Mohseni, O., & Stefan, H. G. (1999). Stream temperature/air temperature relationship: A physical interpretation. *Journal of Hydrology*, 218(3–4), 128–141. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00034-7)
- Mohseni, O., Stefan, H. G., & Erickson, T. R. (1998). A nonlinear regression model for weekay stream temperatures. *Water Resources Research*, 34(10), 2685–2692. <https://doi.org/10.1029/98WR01877>
- Morrill, J. C., Bales, R. C., & Conklin, M. H. (2005). Estimating Stream Temperature from Air Temperature: Implications for Future Water Quality. *Journal of Environmental*

Engineering, 131(1), 139–146. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:1\(139\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:1(139))

Prinz, H., Lahnsteiner, F., Haunschmid, R., Jagsch, A., & Sasano, B. (2009). Reaktion ausgewählter Fischarten auf verschiedene Wassertemperaturen in OÖ Fließgewässern, (September).

Rice, K. C., & Jastram, J. D. (2015). Rising air and stream-water temperatures in Chesapeake Bay region, USA. *Climatic Change*, 128(1–2), 127–138. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1295-9>

Schmutz, S., Jungwirth, M., & Boku, I. F. M. U. P. (2003). Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Tierwelt: Fische. Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Tierwelt - derzeitiger Wissensstand, fokussiert auf den Alpenraum und Österreich.

Schöner, W., Böhm, R., Haslinger, K., Blöschl, G., Merz, R., Blaschke, A. P., ... Kreuzinger, N. (2010). Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft - Kurzfassung. Wien.

Verheggen, B., & Weijers, E. P. (2010). Climate change and the impact of aerosol A literature review, (February). Retrieved from <https://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-E--09-095>

Wild, M., Ohmura, A., & Makowski, K. (2007). Impact of global dimming and brightening on global warming. *Geophysical Research Letters*, 34(4), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2006GL028031>



Bundesamt für Wasserwirtschaft
Institut für Gewässerökologie und Fischereiwirtschaft
Scharfling 18, 5310 Mondsee
+43 6232 3847 - 0
office.igf@baw.at
baw.at