

Praxistest der Empfehlungen des LAWA-Projekts LFP O 10.20 zur Anwendung von Wassertemperatur- Orientierungswerten zum Schutz von Fischgemeinschaften

LAWA-Projekt LFP O 4.23

Juni 2025

Impressum

Auftraggeber:

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)

Auftragnehmer:

umweltbüro essen Bolle und Partner GbR, Rellinghauser Str 334 f, 45136 Essen
chromgruen Planungs- und Beratungs- GmbH & Co. KG, Gröndelle 3, 42555 Velbert
LimnoPlan – Fisch- und Gewässerökologie, Bonner Ring 22, 50374 Erftstadt

Bearbeitung durch:

Martin Halle (umweltbüro essen Bolle und Partner GbR)
Dr. Andreas Müller (chromgruen Planungs- und Beratungs- GmbH & Co. KG)
Dr. Stefan Staas, Florian Kreische (LimnoPlan – Fisch- und Gewässerökologie)

Fachliche Begleitung durch

Expertenkreis Biologie Fließgewässer,
Obfrau Dr. Yvonne Sakka (Nds. Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz)
Projektbeirat bestehend aus Mitgliedern des EK Biologie Fließgewässer, Mitglieder des AK Fische und weiteren Experten für Fischökologie der Landesämter

Federführung:

Dr. Thomas Wanke (Hess. Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie)

Stand:

Juni 2025

Zitiervorschlag:

Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) [Hrsg] (2025): Praxistest der Empfehlungen des LAWA-Projekts LFP O 10.20 zur Anwendung von Wassertemperatur-Orientierungswerten zum Schutz von Fischgemeinschaften. Projekt O 8.17 des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“. Auftragnehmer Projektteam „umweltbüro essen – chromgruen – LimnoPlan“. Essen/Velbert/Erftstadt, Juni 2025.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis.....	v
1 Einleitung	1
2 Datenakquisition, -prüfung und -aufbereitung.....	2
2.1 Temperaturdaten aus dem WRRL-Monitoring	2
2.2 Daten für Fallbeispiele	5
3 Korrekturfaktoren für die Temperaturüberwachung im Rahmen des WRRL-ACP-Monitorings	6
3.1 Zielstellung	6
3.2 Aufgabenstellung und Vorgehensweisen	6
3.3 Datengrundlage	7
3.4 Ansatz 1: Bildung und Eignungsprüfung von Fallgruppen für die Ableitung der gesuchten Korrekturfaktoren basierend auf Ähnlichkeitsanalysen der Wassertemperaturverläufe	7
3.4.1 Bildung von Fallgruppen mit ähnlichen Jahresverläufen der Wassertemperatur basierend auf monatlichen Stichprobendaten	9
3.4.2 Bildung von Fallgruppen mit ähnlichen Jahresverläufen der Wassertemperatur basierend auf kontinuierlich erhobenen Messwerten	30
3.4.3 Analyse der Jahresverläufe der Wassertemperatur hinsichtlich interanueller Variabilitäten	43
3.4.4 Analyse der Tagesgänge im langjährigen Verlauf	45
3.4.5 Schlussfolgerungen zu Ansatz 1	51
3.5 Ansatz 2: Abweichungsanalysen von a priori gruppierten Stichprobendaten der Wassertemperaturen von unterschiedlichen Maximalwerten	51
3.5.1 Korrektur von Stichprobenwerten zur Annäherung an Tagesmaxima, Monatsmaxima sowie an Sommer- und Wintermaxima	51
3.5.2 Vorschläge für Korrekturfaktoren zur Annäherung von Stichproben....	73
3.5.3 Anwendungstest der abgeleiteten Korrektur- bzw. Umrechnungsfaktoren anhand von Beispielfällen	74
3.5.4 Schlussfolgerungen zu Ansatz 2	77
4 Erprobung der Konsequenzen einer niedrigeren zulässigen Wassertemperaturerhöhung (ΔT) im Potamal während der Wintermonate anhand realer Fallbeispiele	78
4.1 Zielstellung	78
4.2 Datengrundlage	78

4.3	Analyse.....	79
4.4	Fazit.....	79
5	Sensitivitätsprüfung des Neuregelungsvorschlags zum Verzicht auf Tmax-Vorgaben für die Übergangsmonate April/Mai und Oktober/November	81
5.1	Zielstellung	81
5.2	Datengrundlage.....	82
5.3	Analyse.....	83
5.4	Fazit.....	87
6	Überprüfung der Praktikabilität der vorgeschlagenen Referenzmessstellenregelung zur kumulativen ΔT-Wertbestimmung bei mehreren aufeinander folgenden Einleitungen	88
6.1	Zielstellung	88
6.2	Datenakquisition zu Beispielfällen	89
6.3	Diskussion anwendungsrelevanter Aspekte des Neuregelungsvorschlags anhand eines konstruierten Beispielfalls mit verschiedenen Einleitungsszenarien	90
6.4	Antworten auf die gestellten Projektfragen	100
6.5	Fazit.....	101
7	Erprobung der Neuregelung für Kaltwassereinleitungen	103
7.1	Zielstellung	103
7.2	Datenakquisition zu Fallbeispielen	103
7.3	Anwendungserprobung des Neuregelungsvorschlags für Kaltwassereinleitungen.....	104
8	Literaturauswertung zu Ursachen und Gegenmaßnahmen diffuser Temperaturveränderungen in Fließgewässern	106
8.1	Methodik.....	106
8.2	Zusammenhänge zwischen anthropogenen, thermischen Belastungsursachen und den daraus resultierenden Wassertemperaturveränderungen	107
8.2.1	Steigende Lufttemperaturen	111
8.2.2	Rodung und Beschattung	112
8.2.3	Reduzierte Wasserführung.....	115
8.2.4	Grundwasser	115
8.2.5	Urbanisierung	116
8.2.6	Thermische Nutzung von Oberflächengewässern	116
8.2.7	Staubereiche	116

8.3	Maßnahmenpotenziale zur Verbesserung der Wassertemperaturverhältnisse	118
9	Zusammenfassung der Projektergebnisse und Verschneidung mit den ursprünglichen Empfehlungen des Projekts O 10.20 zur Änderung der Temperaturvorgaben der OGewV	121
9.1	Zusammenfassung der Projektergebnisse und Fazits	121
9.1.1	Korrekturfaktoren für die Temperaturüberwachung im Rahmen des WRRL-ACP-Monitorings (Kapitel 3)	121
9.1.2	Erprobung der Konsequenzen einer niedrigeren zulässigen Temperaturerhöhung im Potamal während der Wintermonate anhand von Fallbeispielen realer Einleitungen (Kapitel 4).....	121
9.1.3	Sensitivitätsprüfung des Neuregelungsvorschlags zum Verzicht auf Tmax-Vorgaben für die Übergangsmonate April/Mai bzw. Oktober/November (Kapitel 5).....	122
9.1.4	Überprüfung der Praktikabilität der vorgeschlagenen Referenzmessstellenregelung zur kumulativen ΔT -Wertbestimmung bei mehreren aufeinander folgenden Einleitungen (Kapitel 6)	122
9.1.5	Erprobung der Neuregelung für Kaltwassereinleitungen (Kapitel 7)..	122
9.1.6	Literaturauswertung zu Ursachen und Gegenmaßnahmen diffuser Temperaturveränderungen in Fließgewässern (Kapitel 8)	123
9.2	Prüfung und ggf. Modifikation der Änderungsvorschläge für die Temperaturvorgaben der OGewV aus O 10.20	123
	Literaturverzeichnis.....	127
	Anhang	I

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Reproduzierbarer Datenfluss von der Datenlieferung zur Auswertung	2
Abbildung 2:	Wertebereiche je OGewV-Fischgemeinschaft (Stichprobenmessungen)	4
Abbildung 3:	Wertebereiche je OGewV-Fischgemeinschaft (kontinuierliche Messungen, n = Anzahl der Stundenmittelwerte der Gewässertemperatur).....	5
Abbildung 4:	Regressionsmodell der langjährigen mittleren Monatsmesswerte einer Stichprobenmessstelle.	8
Abbildung 5:	Regressionsmodell der langjährigen mittleren Tagesmaxima einer Messstelle mit kontinuierlicher Temperaturerhebung.	9
Abbildung 6:	Verteilung der Koeffizienten der Cosinus-Funktionen in den sinusoidalen Regressionsmodellen der Monatstemperaturen. ...	11
Abbildung 7:	Verteilung der Koeffizienten der Sinus-Funktionen in den sinusoidalen Regressionsmodellen der Monatstemperaturen. ...	12
Abbildung 8:	Verteilung der Konstanten in den sinusoidalen Regressionsmodellen der Monatstemperaturen.	12
Abbildung 9:	Boxplots der Verteilung der cos-Terme der Regressionsfunktionen differenziert nach den LAWA-Typen.....	13
Abbildung 10:	Boxplots der Verteilung der sin-Terme der Regressionsfunktionen differenziert nach den LAWA-Typen.....	14
Abbildung 11:	Boxplots der Verteilung der Konstanten der Regressionsfunktionen differenziert nach den LAWA-Typen. ...	14
Abbildung 12:	Boxplots der Verteilung der cos-Terme der Regressionsfunktionen differenziert nach LAWA-Typgruppen.	17
Abbildung 13:	Boxplots der Verteilung der sin-Terme der Regressionsfunktionen differenziert nach LAWA-Typgruppen.	17
Abbildung 14:	Boxplots der Verteilung der Konstanten der Regressionsfunktionen differenziert nach LAWA-Typgruppen. .	18
Abbildung 15:	Streudiagramm der Koeffizienten (Cosinus- und Sinus-Term) der Sinusoidal-Regressionen (N = 3.086).....	19
Abbildung 16:	Streudiagramm der Koeffizienten (Cosinus-Term und Konstante) der Sinusoidal-Regressionen (N = 3.086).	19
Abbildung 17:	Streudiagramm der Koeffizienten (Sinus-Term und Konstante) der Sinusoidal-Regressionen (N = 3.086).....	20
Abbildung 18:	Ermittlung der optimalen Cluster-Zahl mit dem Elbow-Kriterium.	21
Abbildung 19:	Ermittlung der optimalen Cluster-Zahl mit der Silhouette-Methode.	22
Abbildung 20:	Ergebnis der k-Means-Clusteranalyse mit 2 Clustern.	23
Abbildung 21:	Ergebnis der k-Means-Clusteranalyse mit 4 Clustern.	23
Abbildung 22:	Verteilung der Regressionskonstanten auf die beiden Cluster der Analyse mit zwei Kernen.	26
Abbildung 23:	Boxplots der Verteilung der Konstanten der Regressionsfunktionen von Messstellen des LAWA-Typs 5 und	

	der Fischgemeinschaft Sa-ER differenziert nach Beschattungsgrad.	28
Abbildung 24:	Boxplots der Verteilung der Konstanten der Regressionsfunktionen von Messstellen des LAWA-Typs 5 und der Fischgemeinschaft Sa-ER differenziert nach aggregiertem Beschattungsgrad.	29
Abbildung 25:	Streudiagramm der Koeffizienten (Cosinus- und Sinus-Term) der Sinusoidal-Regressionen (N = 653).....	33
Abbildung 26:	Streudiagramm der Koeffizienten (Cosinus-Term und Konstante) der Sinusoidal-Regressionen (N = 653)	34
Abbildung 27:	Streudiagramm der Koeffizienten (Sinus-Term und Konstante) der Sinusoidal-Regressionen (N = 653).....	34
Abbildung 28:	Ermittlung der optimalen Cluster-Zahl mit dem Elbow-Kriterium	35
Abbildung 29:	Ermittlung der optimalen Cluster-Zahl mit der Silhouette-Methode	36
Abbildung 30:	Ergebnis der k-Means-Clusteranalyse mit 2 Kernen	36
Abbildung 31:	Ergebnis der k-Means-Clusteranalyse mit 3 Kernen	37
Abbildung 32:	Ergebnis der k-Means-Clusteranalyse mit 4 Kernen	37
Abbildung 33:	Verteilung der Regressionskonstanten auf die beiden Cluster der Analyse mit zwei Kernen	40
Abbildung 34:	Verteilung der Regressionskonstanten auf die drei Cluster der Analyse mit drei Kernen	40
Abbildung 35:	Verteilung der Regressionskonstanten auf die beiden Cluster der Analyse mit vier Kernen.....	41
Abbildung 36:	Boxplots der Verteilung der Konstanten der Regressionsfunktionen von kontinuierlichen Messstellen differenziert nach Beschattungsgrad	42
Abbildung 37:	Temperaturjahresgang an der Messstelle CAZ008 im Jahr 2016	44
Abbildung 38:	Temperaturjahresgang an der Messstelle CAZ008 im Jahr 2017	44
Abbildung 39:	Temperaturtagesgänge an einer Messstelle am 10. Januar in zwei verschiedenen Jahren	48
Abbildung 40:	Temperaturtagesgänge an einer Messstelle am 200. Tag des Jahres in zwei verschiedenen Jahren	49
Abbildung 41:	Fallbeispiel Bruchgraben (NI) mit Einleitung und Pegel	78
Abbildung 42:	Verteilungen der Messwerte im Zeitraum Juni bis September auf die Fischgemeinschaften (Stichprobendaten)	83
Abbildung 43:	Verteilung der Tmax-Überschreitungen (Sommer gemäß LFP-Projekt O 10.20) in den jeweiligen Fischgemeinschaften	85
Abbildung 44:	Verteilung der Tmax-Überschreitungen der abweichenden Fälle in den jeweiligen Fischgemeinschaften	86
Abbildung 45:	Nicht maßstäbliches Funktionsschema eines konstruierten Beispielfalls zum Test der Konsequenzen verschiedener Prinzip-Szenarien für ΔT mittels serieller Mischungsrechnungen; Gewässer (schwarz): G1 bis G3; Messstellen (rot): M1 bis M8; Einleitstellen (blau): E1 bis E3.....	90

Abbildung 46:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E1 im Ausgangsszenario	95
Abbildung 47:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E2 im Ausgangsszenario	96
Abbildung 48:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E3 im Ausgangsszenario	96
Abbildung 49:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1 und E2 im Ausgangsszenario	97
Abbildung 50:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E2 und E3 im Ausgangsszenario	97
Abbildung 51:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1, E2 und E3 im Ausgangsszenario	98
Abbildung 52:	Jahresmaximale mittlere Tages-Wassertemperaturen an den Messstellen von G1 im Ausgangsszenario	98
Abbildung 53:	Einflussfaktoren des Temperaturregimes von Fließgewässern (nach Caissie 2006)	106
Abbildung 54:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E1 im Einzel- ΔT -Szenario	VIII
Abbildung 55:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E2 im Einzel- ΔT -Szenario	IX
Abbildung 56:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E3 im Einzel- ΔT -Szenario	IX
Abbildung 57:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1 und E2 im Einzel- ΔT -Szenario	X
Abbildung 58:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E2 und E3 im Einzel- ΔT -Szenario	X
Abbildung 59:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1, E2 und E3 im Einzel- ΔT -Szenario	XI
Abbildung 60:	Jahresmaximale mittlere Tages-Wassertemperaturen an den Messstellen von G1 im Einzel- ΔT -Szenario	XI
Abbildung 61:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E1 im Kumulativ- ΔT -Szenario	XII
Abbildung 62:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E2 im Kumulativ- ΔT -Szenario	XIII
Abbildung 63:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E3 im Kumulativ- ΔT -Szenario	XIII
Abbildung 64:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1 und E2 im Kumulativ- ΔT -Szenario	XIV
Abbildung 65:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E2 und E3 im Kumulativ- ΔT -Szenario	XIV

Abbildung 66:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1, E2 und E3 im Kumulativ- ΔT -Szenario	XV
Abbildung 67:	Jahresmaximale mittlere Tages-Wassertemperaturen an den Messstellen von G1 im Kumulativ- ΔT -Szenario	XV
Abbildung 68:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E1 im Einzel-Max-T-Szenario	XVI
Abbildung 69:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E2 im Einzel-Max-T-Szenario	XVII
Abbildung 70:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E3 im Einzel-Max-T-Szenario	XVII
Abbildung 71:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1 und E2 im Einzel-Max-T-Szenario	XVIII
Abbildung 72:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E2 und E3 im Einzel-Max-T-Szenario	XVIII
Abbildung 73:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1, E2 und E3 im Einzel-Max-T-Szenario	XIX
Abbildung 74:	Jahresmaximale mittlere Tages-Wassertemperaturen an den Messstellen von G1 im Einzel-Max-T-Szenario	XIX
Abbildung 75:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E1 im Gleichverteilungs-Max-T-Szenario	XX
Abbildung 76:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E2 im Gleichverteilungs-Max-T-Szenario	XXI
Abbildung 77:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E3 im Gleichverteilungs-Max-T-Szenario	XXI
Abbildung 78:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1 und E2 im Gleichverteilungs-Max-T-Szenario	XXII
Abbildung 79:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E2 und E3 im Gleichverteilungs-Max-T-Szenario	XXII
Abbildung 80:	Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1, E2 und E3 im Gleichverteilungs-Max-T-Szenario	XXIII
Abbildung 81:	Jahresmaximale mittlere Tages-Wassertemperaturen an den Messstellen von G1 im Gleichverteilungs-Max-T-Szenario	XXIII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verteilung von Messstellen auf Bundesländer (Stichprobenmessungen)	3
Tabelle 2:	Verteilung kontinuierlicher Messstellen auf Bundesländer	4
Tabelle 3:	Ergebnisse paarweiser Wilcoxon-Tests der Koeffizienten der Regressionsfunktionen der nach Fischgemeinschaften (FG) gruppierten Messstellen mit Stichprobenmessungen.	10
Tabelle 4:	Gruppierung von LAWA-Typen für die Verteilungsanalyse.	15
Tabelle 5:	Ergebnisse paarweiser Wilcoxon-Tests der Koeffizienten der Regressionsfunktionen der nach LAWA-Typgruppen aggregierten Messstellen.	15
Tabelle 6:	Verteilung der Fischgemeinschaften auf die Cluster der k-Means-Clusteranalyse mit zwei Clustern.	24
Tabelle 7:	Anteilssummen der Gruppen Potamal und Rhithral der Cluster aus Tabelle 6.....	24
Tabelle 8:	Verteilung der Fischgemeinschaften auf die Cluster der k-Means-Clusteranalyse mit vier Clustern.....	24
Tabelle 9:	Anteilssummen der Gruppen Potamal und Rhithral der Cluster aus Tabelle 8.....	25
Tabelle 10:	Bonferroni-korrigierte p-Werte der Wilcoxon-Tests für die Regressionskonstanten (Mitteltemperaturen) der drei nach Beschattung unterschiedenen Gruppen.	27
Tabelle 11:	Kennwerte der Boxplots in Abbildung 23.....	28
Tabelle 12:	Kennwerte der Boxplots in Abbildung 24.....	29
Tabelle 13:	Ergebnisse paarweiser Wilcoxon-Tests der Koeffizienten der Regressionsfunktionen der nach Fischgemeinschaften gruppierten Messstellen mit kontinuierlichen Messungen	31
Tabelle 14:	Ergebnisse paarweiser Wilcoxon-Tests der Regressionskonstanten der nach LAWA-Typen gruppierten Messstellen mit kontinuierlichen Messungen – nur signifikante Unterschiede	32
Tabelle 15:	Verteilung der Fischgemeinschaften auf die Cluster der k-Means-Clusteranalyse mit 2 Clustern, C1 und C2.....	38
Tabelle 16:	Verteilung der Fischgemeinschaften auf die Cluster der k-Means-Clusteranalyse mit 3 Clustern, C1, C2 und C3	38
Tabelle 17:	Anteilssummen der drei Cluster in den Gruppen "Potamal" und "Rhithral"	38
Tabelle 18:	Verteilung der Fischgemeinschaften auf die Cluster der k-Means-Clusteranalyse mit vier Clustern (C1 bis C4).....	38
Tabelle 19:	Anteilssummen der vier Cluster in den Gruppen "Potamal" und "Rhithral"	39

Tabelle 20:	Bonferroni-korrigierte p-Werte der Wilcoxon-Tests für die Regressionskonstanten (Mitteltemperaturen) der drei nach Beschattung unterschiedenen Gruppen 42
Tabelle 21:	Modellierte und gemessene Kenngrößen von Temperaturjahresverläufen der Messstelle CAZ008 aus Baden-Württemberg in verschiedenen Jahren..... 43
Tabelle 22:	Statistische Auswertung der Kenngrößen mehrjähriger Temperaturverläufe 45
Tabelle 23:	Kenngrößen von Temperaturtagesverläufen der Messstelle CAZ008 aus Baden-Württemberg am 10.1. in verschiedenen Jahren 46
Tabelle 24:	Verhältnis Maximal- zu Minimalwert der Daten aus Tabelle 23. 46
Tabelle 25:	Kenngrößen von Temperaturtagesverläufen der Messstelle CAZ008 aus Baden-Württemberg am 200. Tag des Jahres in verschiedenen Jahren 46
Tabelle 26:	Verhältnis Maximal- zu Minimalwert der Daten aus Tabelle 25. 47
Tabelle 27:	Statistische Auswertung des mehrjährigen Vergleichs der Kenngrößen von Temperaturverläufen für den 10. Tag im Jahr 50
Tabelle 28:	Statistische Auswertung des mehrjährigen Vergleichs der Kenngrößen von Temperaturverläufen für den 200. Tag im Jahr 50
Tabelle 29:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur..... 52
Tabelle 30:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Frühjahr..... 52
Tabelle 31:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Sommer 53
Tabelle 32:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Herbst 53
Tabelle 33:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Winter..... 53
Tabelle 34:	Ergebnis der Wilcoxon-Tests monatsbezogener Korrekturwerte für Stundenmessungen 53
Tabelle 35:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Frühjahr (April – Mai), Fischgemeinschaft Sa-ER..... 54
Tabelle 36:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Frühjahr (April – Mai), Fischgemeinschaft Sa-MR 54
Tabelle 37:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Frühjahr (April – Mai), Fischgemeinschaft Sa-HR..... 54
Tabelle 38:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Frühjahr (April – Mai), Fischgemeinschaft Cyp-R 55
Tabelle 39:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Frühjahr (April – Mai), Fischgemeinschaft EP..... 55

Tabelle 40:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Sommer (Juni – September), Fischgemeinschaft Sa-ER.....	55
Tabelle 41:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Sommer (Juni – September), Fischgemeinschaft Sa-MR	55
Tabelle 42:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Sommer (Juni – September), Fischgemeinschaft Sa-HR.....	55
Tabelle 43:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Sommer (Juni – September), Fischgemeinschaft Cyp-R	56
Tabelle 44:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Sommer (Juni – September), Fischgemeinschaft EP.....	56
Tabelle 45:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Herbst (Oktober – November), Fischgemeinschaft Sa-ER.....	56
Tabelle 46:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Herbst (Oktober – November), Fischgemeinschaft Sa-MR	56
Tabelle 47:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Herbst (Oktober – November), Fischgemeinschaft Sa-HR.....	57
Tabelle 48:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Herbst (Oktober – November), Fischgemeinschaft Cyp-R	57
Tabelle 49:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Herbst (Oktober – November), Fischgemeinschaft EP.....	57
Tabelle 50:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Winter (Dezember – März), Fischgemeinschaft Sa-ER.....	57
Tabelle 51:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Winter (Dezember – März), Fischgemeinschaft Sa-MR	58
Tabelle 52:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Winter (Dezember – März), Fischgemeinschaft Sa-HR.....	58
Tabelle 53:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Winter (Dezember – März), Fischgemeinschaft Cyp-R	58
Tabelle 54:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Winter (Dezember – März), Fischgemeinschaft EP.....	58
Tabelle 55:	Ergebnis der Wilcoxon-Tests jahreszeitlich und nach Fischgemeinschaften differenzierter Korrekturwerte für Stundenmessungen	59

Tabelle 56:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Monatsmaximaltemperatur.....	59
Tabelle 57:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Monatsmaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-ER.....	60
Tabelle 58:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Monatsmaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-MR.....	60
Tabelle 59:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Monatsmaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-HR.....	60
Tabelle 60:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Monatsmaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Cyp-R.....	60
Tabelle 61:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Monatsmaximaltemperatur, Fischgemeinschaft EP.....	60
Tabelle 62:	Ergebnis der Wilcoxon-Tests der nach Fischgemeinschaften differenzierten Korrekturwerte für Stundenmessungen und Monatsmaximaltemperaturen.....	61
Tabelle 63:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur.....	62
Tabelle 64:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, Juni.....	62
Tabelle 65:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, Juli.....	62
Tabelle 66:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, August.....	62
Tabelle 67:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, September.....	63
Tabelle 68:	Ergebnis der Wilcoxon-Tests der nach Monaten differenzierten Korrekturwerte für Stundenmessungen und Sommermaximaltemperaturen.....	63
Tabelle 69:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-ER.....	63
Tabelle 70:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-MR.....	63
Tabelle 71:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-HR.....	64
Tabelle 72:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Cyp-R.....	64
Tabelle 73:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft EP.....	64
Tabelle 74:	Ergebnis der Wilcoxon-Tests der nach Fischgemeinschaften differenzierten Korrekturwerte für Stundenmessungen und Sommermaximaltemperaturen.....	64
Tabelle 75:	Ergebnis der Wilcoxon-Tests der nach Fischgemeinschaften und Monaten differenzierten Korrekturwerte für Stundenmessungen und Sommermaximaltemperaturen.....	65
Tabelle 76:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur.....	65
Tabelle 77:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Dezember.....	65

Tabelle 78:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Januar 66
Tabelle 79:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Februar..... 66
Tabelle 80:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, März 66
Tabelle 81:	Ergebnis der Wilcoxon-Tests der nach Monaten differenzierten Korrekturwerte für Stundenmessungen und Wintermaximaltemperaturen 66
Tabelle 82:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-ER 67
Tabelle 83:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-MR 67
Tabelle 84:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-HR..... 67
Tabelle 85:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Cyp-R 67
Tabelle 86:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft EP..... 67
Tabelle 87:	Ergebnis der Wilcoxon-Tests der nach Fischgemeinschaften differenzierten Korrekturwerte für Stundenmessungen und Wintermaximaltemperaturen 68
Tabelle 88:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Dezember, Fischgemeinschaft Sa-ER 68
Tabelle 89:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Dezember, Fischgemeinschaft Sa-MR..... 68
Tabelle 90:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Dezember, Fischgemeinschaft Sa-HR..... 68
Tabelle 91:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Dezember, Fischgemeinschaft Cyp-R..... 69
Tabelle 92:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Dezember, Fischgemeinschaft EP 69
Tabelle 93:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Januar, Fischgemeinschaft Sa-ER 69
Tabelle 94:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Januar, Fischgemeinschaft Sa-MR 69
Tabelle 95:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Januar, Fischgemeinschaft Sa-HR 70

Tabelle 96:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Januar, Fischgemeinschaft Cyp-R	70
Tabelle 97:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Januar, Fischgemeinschaft EP ...	70
Tabelle 98:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Februar, Fischgemeinschaft Sa-ER	70
Tabelle 99:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Februar, Fischgemeinschaft Sa-MR	71
Tabelle 100:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Februar, Fischgemeinschaft Sa-HR	71
Tabelle 101:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Februar, Fischgemeinschaft Cyp-R	71
Tabelle 102:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Februar, Fischgemeinschaft EP..	71
Tabelle 103:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im März, Fischgemeinschaft Sa-ER	72
Tabelle 104:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im März, Fischgemeinschaft Sa-MR	72
Tabelle 105:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im März, Fischgemeinschaft Sa-HR	72
Tabelle 106:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im März, Fischgemeinschaft Cyp-R.	72
Tabelle 107:	Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im März, Fischgemeinschaft EP	73
Tabelle 108:	Ergebnis der Wilcoxon-Tests der nach Fischgemeinschaften und Monaten differenzierten Korrekturwerte für Stundenmessungen und Wintermaximaltemperaturen	73
Tabelle 109:	Tatsächliche und korrigierte Differenzen zwischen Tagesmaxima und gemessenen Stundenwerten, gruppiert nach Fischgemeinschaften	75
Tabelle 110:	Tatsächliche und korrigierte Differenzen zwischen Tagesmaxima und gemessenen Stundenwerten, gruppiert nach Monaten	75
Tabelle 111:	Tatsächliche und korrigierte Differenzen zwischen Monatsmaxima und gemessenen Stundenwerten	76
Tabelle 112:	Auswirkung der Korrektur auf die mittlere Differenz zum Sommermaximum	77
Tabelle 113:	Eckdaten des Fallbeispiels	79
Tabelle 114:	Orientierungswerte für Tmax und ΔT gemäß OGewV (2016)....	81
Tabelle 115:	Modifikationsvorschläge zu den Orientierungswerten für Tmax und ΔT gemäß OGewV (aus van Treeck & Wolter, 2021).....	81
Tabelle 116:	Überschreitungen von Sommer-Tmax-Orientierungswerten (Stichprobenmessungen)	83

Tabelle 117:	Überschreitungen von Winter-Tmax-Orientierungswerten (Stichprobenmessungen)	84
Tabelle 118:	Fälle mit Tmax-Überschreitungen ausschließlich in Übergangsmonaten	86
Tabelle 119:	Eingangsdaten der Einleitungen im Ausgangsszenario	95
Tabelle 120:	Wirkung von thermischer Verschmutzung durch menschliche Aktivitäten (übernommen aus Gaudard et al. 2018)	108
Tabelle 121:	Anthropogene Einflüsse auf die Fließgewässertemperatur (ΔT , °C) erweitert nach Hester & Doyle 2011	109
Tabelle 122:	Detailbeispiele zur Verdeutlichung von Temperaturveränderungen für den Parameter Beschattung	113
Tabelle 123:	Detailbeispiele zur Verdeutlichung von Temperaturveränderungen am Beispiel kleiner Staudämme	117
Tabelle 124:	Fortschreibungsempfehlung für die OGewV hinsichtlich der Wassertemperaturanforderungen des guten ökologischen Zustands bzw. Potenzials der biologischen Qualitätskomponente Fische	125
Tabelle 125:	p-Werte der Wilcoxon-Tests der Koeffizienten der Sinusoidal-Regression, gruppiert nach LAWA-Typen	II
Tabelle 126:	Eingangsdaten der Einleitungen im Einzel- ΔT -Szenario	VIII
Tabelle 127:	Eingangsdaten der Einleitungen im Kumulativ- ΔT -Szenario	XII
Tabelle 128:	Eingangsdaten der Einleitungen im Einzel-Max-T-Szenario	XVI
Tabelle 129:	Eingangsdaten der Einleitungen im Gesamt-Max-T-Szenario	XX

1 Einleitung

Im Auftrag der LAWA wurde in den Jahren 2020 bis Mitte 2021 das Projekt „Temperaturempfindlichkeiten der Fischgemeinschaften in deutschen Fließgewässern – Überprüfung der Orientierungswerte für die Temperatur“ (LFP-Projekt O 10.20) durchgeführt. Die Ergebnisse und Empfehlungen des Projekts wurden nach Zustimmung durch den LAWA-AO (65. Sitzung) in einem Projektbericht auf der LFP-Homepage veröffentlicht (<http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/projektberichte/lawa/#lawa-ao-O-10-20>).

Im Rahmen des Projekts wurden die in Anhang 7 der Oberflächengewässerverordnung — OGewV (2016) genannten Anforderungen an den guten ökologischen Zustand („Orientierungswerte“) für die Temperatur anhand aktueller Literaturangaben zu den Temperaturempfindlichkeiten der Fischarten und ihrer Lebensstadien überprüft. Hierzu wurden in mehreren Schritten die Referenzfischzönosen der Bundesländer zu einem bundesweiten Datensatz aggregiert, mit den Ergebnissen der Literaturrecherche verschnitten und unter besonderer Berücksichtigung der Ansprüche abgeleiteter Schirmarten (sensitivste Arten, die die Temperaturanforderungen anderer Arten mit abdecken) ausgewertet. Neben Änderungsvorschlägen für die Orientierungswerte und deren Anwendungs- bzw. Geltungszeiträume wurden auch fachliche Empfehlungen für die Temperaturerfassung im Rahmen des WRRL-Monitorings der ACP-Parameter und zur Einleitungsregelung erarbeitet.

Aufgabe des hier beschriebenen Vorhabens ist es, die Praktikabilität der fachlich abgeleiteten Empfehlungen für die Temperaturerfassung im Rahmen des WRRL-Monitorings der ACP-Parameter und zur Einleitungsregelung zu überprüfen und die Anwendung dieser Empfehlungen im Projekt anhand von Beispielgewässern zu erproben. Die Ergebnisse dieses Praxistests sollen mit den ursprünglichen Empfehlungen und Vorschlägen des Projekts O 10.20 zusammengeführt und ggf. modifizierte Vorschläge für die Änderung bestehender Regelungen zur Gewässertemperatur in der OGewV (2016) formuliert werden.

Somit lassen sich die Projektziele wie folgt zusammenfassen:

- Verifikation der Praktikabilität der Empfehlungen des LFP-Projekts O 10.20 für die Temperaturerfassung im Rahmen des WRRL-Monitorings und zur Einleitungsregelung.
- Verbesserung der Umsetzbarkeit der Regelungen, u. a. durch Korrekturfaktoren für Stichprobendaten.
- Überprüfung der empfohlenen Anwendung anhand von Beispielgewässern.
- Schlussfolgerungen aus den Projektergebnissen zur Verifizierung oder Modifizierung der Empfehlungen des LFP-Projekts O 10.20.

2 Datenakquisition, -prüfung und -aufbereitung

2.1 Temperaturdaten aus dem WRRL-Monitoring

In den Bundesländern liegen aus verschiedensten Messkampagnen zahlreiche Datensätze kontinuierlicher und stichprobenhafter Temperaturmessreihen vor. Im Vorfeld der Projektbearbeitung war dazu eine Datenanforderung durch den federführenden Projektbetreuer erfolgt, wobei noch nicht alle Daten zum Projektbeginn vorlagen. Seitens der Auftragnehmer wurden daher – beginnend im September 2023 diejenigen Bundesländer (ggf. mehrfach) angeschrieben, die aufgrund der Datenabfrage des Auftraggebers (noch) keine Daten geliefert hatten.

Die Daten wurden sukzessive vom Auftragnehmer aufbereitet und in eine PostgreSQL-Geodatenbank importiert. Dabei wurden Messergebnisse aus Stichproben sowie solche aus kontinuierlichen Messungen gesondert verarbeitet.

Messergebnisse aus Stichproben wiesen weitgehend eine einheitliche Tabellenstruktur auf, in vielen Fällen wurden jedoch eigene Blattnamen vergeben. Diese mussten für eine automatische Verarbeitung manuell vereinheitlicht werden. Datensätze, die abweichende Strukturen aufwiesen, wurden unverändert in die Datenbank importiert und dann über einen SQL-View in die einheitliche Struktur überführt. Bei den Ergebnissen aus kontinuierlichen Messungen waren in vielen Fällen eigene Blattnamen vergeben worden. Diese mussten für eine automatische Verarbeitung manuell vereinheitlicht werden. In einigen Fällen wurden zusätzlich Makros erstellt, die die Daten aufteilten, da aufgrund der Datensatzgrößen ein direkter Import nicht möglich war (Speicherüberlauf). Der weitgehend automatisierte und damit leicht reproduzierbare Datenfluss ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

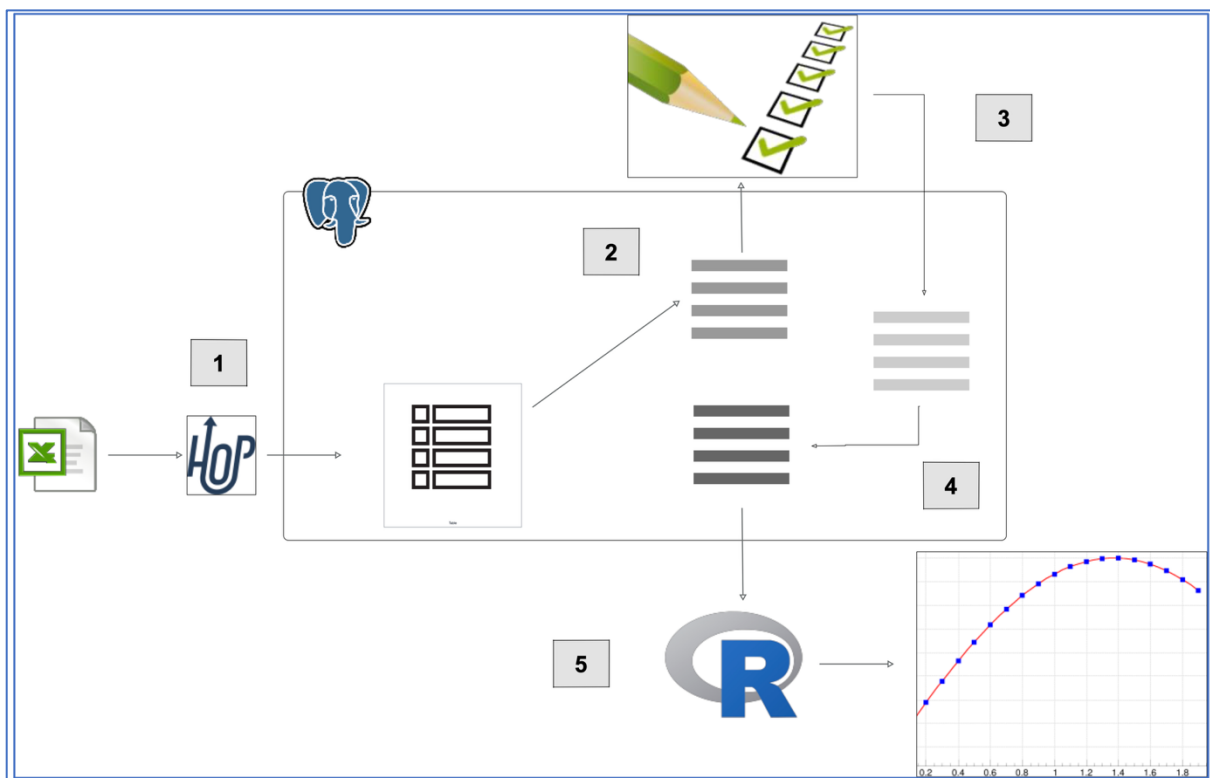


Abbildung 1: Reproduzierbarer Datenfluss von der Datenlieferung zur Auswertung

Der Ablauf kann wie folgt beschrieben werden:

- Die Daten werden aus Excel- in eine Hop-Pipeline eingelesen und von dort in Datenbank-Tabellen geschrieben.
- Mit Hilfe von SQL-Statements wurden die Daten geprüft (Vollständigkeit, Plausibilität, einheitliche Struktur, einheitliche Typbezeichnungen).
- Entsprechend der Prüfergebnisse wurden auffällige Datensätze (z.B. $T \gg 30^{\circ}\text{C}$) geprüft und ggf. entfernt.
- Zum Abschluss dieser weitgehend manuellen Arbeiten liegen die bereinigten Daten in Datenbank-Views vor, die bei Import weiterer Daten weitgehend automatisch aktualisiert werden.
- Auf diese Views wird mit R zugegriffen, um geeignete Auswertungen und Analysen durchzuführen.

Manuelle Nacharbeiten betrafen insbesondere die Vereinheitlichung der Angaben zu LAWA-Typen und OGewV-Fischgemeinschaften.

Die Messstellenanzahlen der Stichprobenmessungen verteilt auf Bundesländer sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Verteilung von Messstellen auf Bundesländer (Stichprobenmessungen)

Bundesland	Anzahl Messstellen
BE	46
BW	175
HB	23
HE	1026
HH	63
MV	573
NI	377
NW	2885
RP	121
SH	530
SN	726
ST	10

Die folgende Abbildung 2 zeigt die Wertebereiche der insgesamt 118.336 Stichprobenmessungen in den verschiedenen Fischgemeinschaften gemäß OGewV.

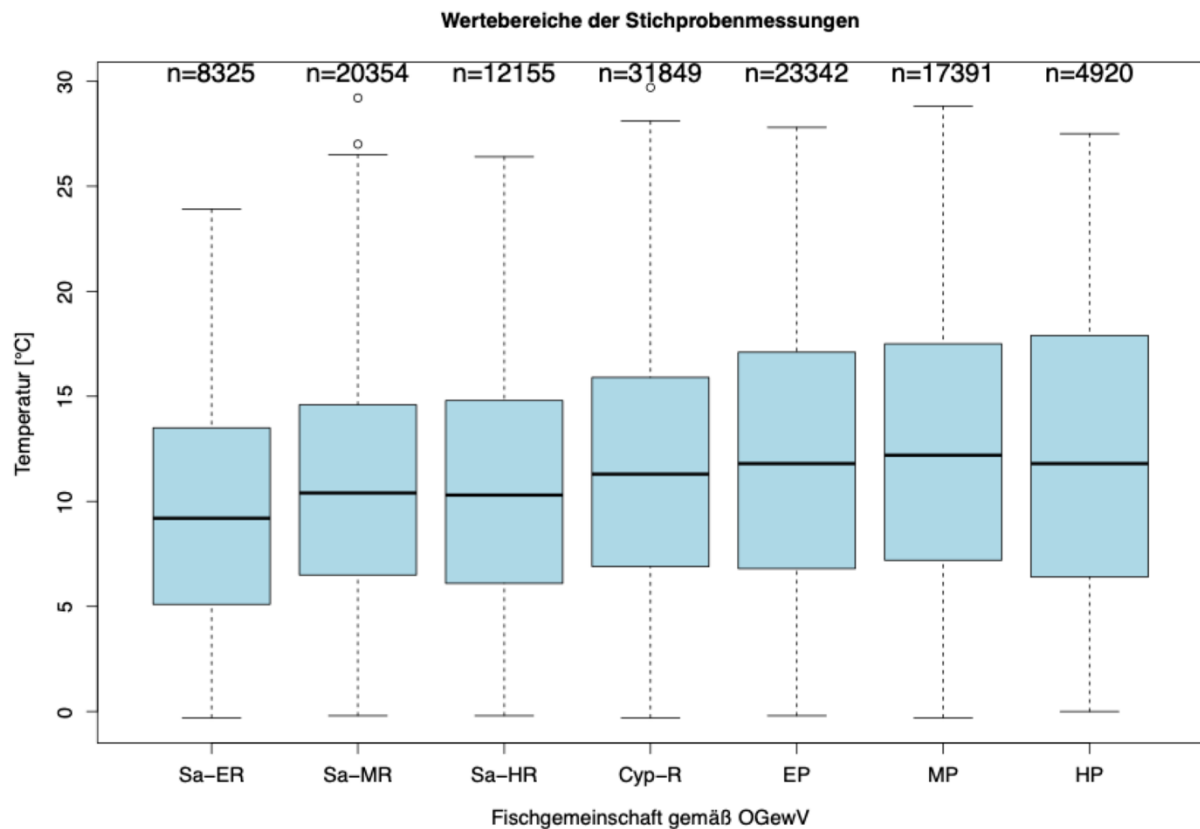


Abbildung 2: Wertebereiche je OGewV-Fischgemeinschaft (Stichprobenmessungen)

Die Messstellenanzahlen der kontinuierlichen Messungen verteilt auf Bundesländer sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Verteilung kontinuierlicher Messstellen auf Bundesländer

Bundesland	Anzahl Messstellen
BW	32
BY	86
HB	2
HE	67
RP	9

Die Abbildung 3 zeigt die Wertebereiche der kontinuierlichen Messungen in den verschiedenen Fischgemeinschaften gemäß OGewV. Außerdem wird erkennbar, dass zu den Fischgemeinschaften Salmoniden-Epirhithral, Salmoniden-Metarhithral und Hypopotamal keine Daten vorliegen.

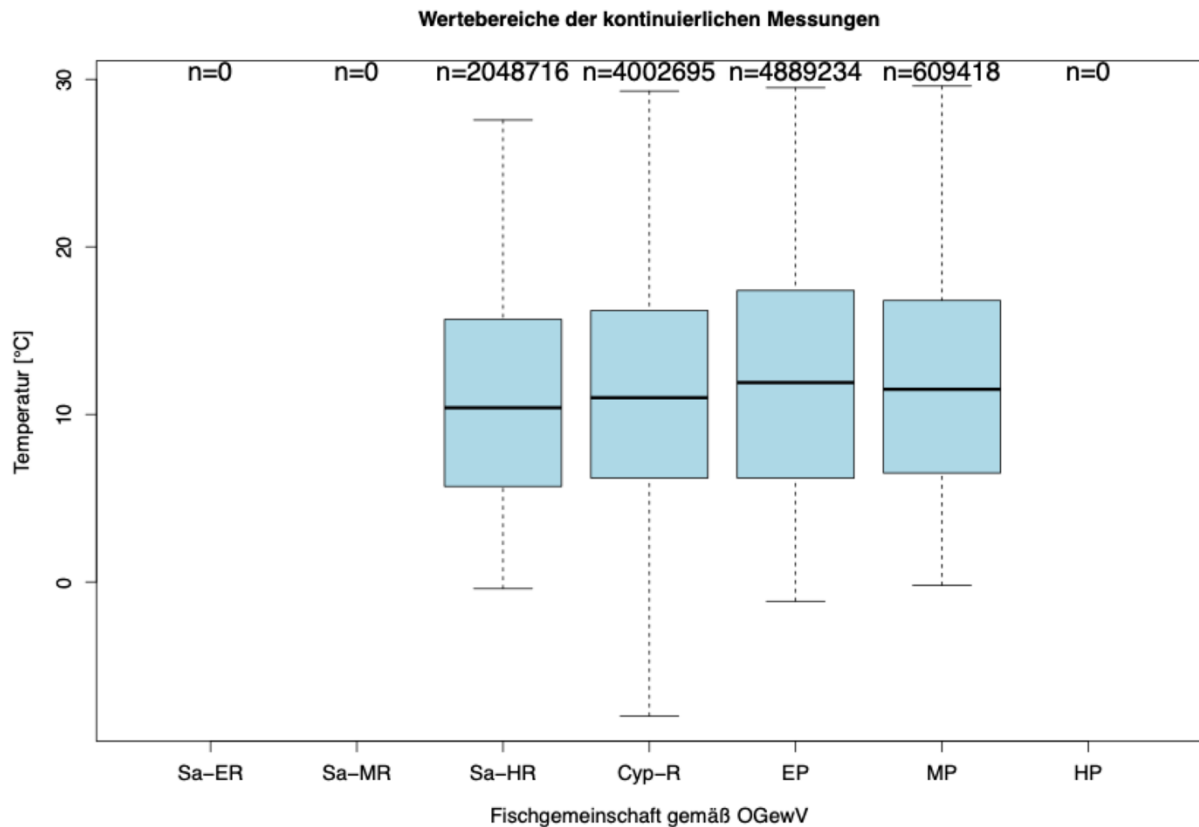


Abbildung 3: Wertebereiche je OGewV-Fischgemeinschaft (kontinuierliche Messungen, n = Anzahl der Stundenmittelwerte der Gewässertemperatur)

2.2 Daten für Fallbeispiele

Für verschiedene Fragestellungen (siehe Kapitel 4, 6 und 7) wurden weitere Daten, insbesondere von Einleitern bzw. aus Einleitgenehmigungen benötigt.

Im Vorfeld der Projektbearbeitung war eine Anfrage durch den federführenden Projektbetreuer erfolgt, wobei nur sehr wenige Rückläufe erfolgt waren. Seitens der Auftragnehmer wurden daher im Projektverlauf weitere Recherchen durchgeführt, die auch durch die begleitende Arbeitsgruppe unterstützt wurden.

3 Korrekturfaktoren für die Temperaturüberwachung im Rahmen des WRRL-ACP-Monitorings

3.1 Zielstellung

Wie die Datenlieferungen der Bundesländer (Kap. 2) belegen, findet die behördliche Temperaturüberwachung überwiegend auf Basis von Stichprobenmessungen und nur in geringem Umfang auf Basis von kontinuierlichen Temperaturmessungen statt. Der Zeitpunkt der Stichprobenmessung ist dabei vorrangig nach den Arbeitszeiten und Abläufen der Probennehmenden und nicht auf den optimalen Zeitpunkt für das Auftreten der Maximaltemperatur (später Nachmittag) des Gewässers ausgerichtet. Da der Tmax-Orientierungswert für die Temperatur sich jedoch auf die maximale Gewässertemperatur bezieht, kann es bei Stichprobenmessungen zu einer systematischen Unterschätzung des Temperaturproblems eines Oberflächenwasserkörpers kommen, wenn dort z.B. immer früh morgens gemessen wird, da die Probestelle am Anfang der Probenahmeroute liegt.

Um dieses Problem bei der weitverbreiteten Praxis des behördlichen Stichprobenmonitorings zu lösen, sollten Korrekturfaktoren abgeleitet werden, mit denen ein, an einem bestimmten Gewässer (Fallgruppe) zu einem beliebigen (aber bekannten) Datum und variabler Uhrzeit erhobener Gewässertemperaturwert in den mit hoher Wahrscheinlichkeit zutreffenden Maximaltemperaturwert des Tages oder des Monats umgerechnet werden kann.

3.2 Aufgabenstellung und Vorgehensweisen

Unter Verwendung vorliegender kontinuierlicher Temperaturmessdaten sollten für verschiedene Tages- und Jahreszeiten, Gewässertypen, Fischregionen, und ggf. weitere Einflussfaktoren (z. B. Beschattung), Korrekturfaktoren entwickelt und getestet werden, die dabei helfen, die Überschreitungen der tatsächlichen Maximalwassertemperatur eines Gewässers anhand diskontinuierlicher Messungen besser abschätzen und beurteilen zu können. Zusätzlich sollten aus den Messreihen mittlere Jahrestemperaturverläufe (inkl. Schwankungsbreite) abgeleitet und als Anhang des Endberichts veröffentlicht werden. Diese sollten mangels Daten zu natürlichen (anthropogen unbeeinflussten) Temperaturverläufen eine Orientierung geben, wie sich im Mittel die Temperatur in durchschnittlich anthropogen veränderten Fließgewässern über das Jahr hin entwickelt.

Die geplante Bearbeitung umfasste

- Bildung von Gewässer- bzw. Gewässerabschnittsfallgruppen mit ähnlichen Wassertemperaturverläufen
- Herleitung fallgruppenspezifischer Regressionsfunktionen der Jahres- und Tageswassertemperaturverläufe und deren Spannweiten
- Ableitung fallgruppenspezifischer Korrektur- bzw. Umrechnungsfaktoren
- Anwendungstest anhand von Beispielfällen

Im Zuge der Projektbearbeitung zeigte sich, dass das angestrebte Ziel der Ableitung belastbarer Korrekturfaktoren für Stichprobenmessungen der Wassertemperaturen mit diesem zunächst verfolgten Herleitungsansatz nicht erreichbar war. Daher wurde noch

ein zweiter alternativer Lösungsansatz entwickelt und getestet. Beide Ansätze sind in den anschließenden Unterkapiteln gemäß folgender Untergliederung dargestellt:

ANSATZ 1: Bildung und Eignungsprüfung von Fallgruppen für die Ableitung der gesuchten Korrekturfaktoren basierend auf Ähnlichkeitsanalysen der Wassertemperaturverläufe

- Bildung von Fallgruppen mit ähnlichen Jahresverläufen der Wassertemperatur basierend auf monatlichen Stichprobendaten
- Bildung von Fallgruppen mit ähnlichen Jahresverläufen der Wassertemperatur basierend auf kontinuierlich erhobenen Messwerten
- Analyse der Jahresverläufe der Wassertemperatur hinsichtlich interanueller Variabilitäten
- Analyse der Tagesverläufe der Wassertemperatur hinsichtlich interanueller Variabilitäten

ANSATZ 2: Abweichungsanalysen von a priori gruppierten Stichprobendaten der Wassertemperaturen von unterschiedlichen Maximalwerten

- Ableitung bestmöglicher Korrekturfaktoren für nach Fischgemeinschaften, Kalendermonaten und/oder Jahreszeiten gruppierte Stichprobendaten zur Annäherung an Tages-, Monats- und saisonale Maximaltemperaturen
- Anwendungstest der abgeleiteten Korrektur- bzw. Umrechnungsfaktoren anhand von Beispielfällen

3.3 Datengrundlage

Die wesentlichen Datengrundlagen wurden bereits in Kapitel 2.1 beschrieben. Für die Bildung von Fallgruppen wurden typologische Attribute hinzugezogen, die weitgehend bereits den Messstellen zugeordnet waren (Fischgemeinschaft nach OGewV, LAWA-Typ). Als weiteres, eher Degradationssituationen beschreibendes Attribut, wurde aus Gewässerstrukturdaten der Länder Sachsen und Hessen die Beschattung an und oberhalb der Messstelle ermittelt. Da die entsprechenden „proofs of concept“ nicht erfolgsversprechend waren, wurden keine weiteren Daten aus anderen Bundesländern angefordert.

3.4 Ansatz 1: Bildung und Eignungsprüfung von Fallgruppen für die Ableitung der gesuchten Korrekturfaktoren basierend auf Ähnlichkeitsanalysen der Wassertemperaturverläufe

Es wurden für jede Messstelle langjährige Mittelwerte der monatlich oder täglich erhobenen, Werte gebildet und darüber lineare Regressionsanalysen durchgeführt.

Der Regressionsansatz wurde dabei aufgrund des periodischen Charakters der Temperaturjahresverläufe wie folgt gebildet:

Formel 1: Sinusoidale Regressionsformel

$$y = a \times \sin \frac{2\pi}{\omega} x + b \times \cos \frac{2\pi}{\omega} x + c$$

Dabei ist ω die Frequenz, mit der die trigonometrischen Terme sin und cos skaliert werden. Bei monatlich erhobenen Daten gilt $\omega = 12$, bei täglichen Messungen ist $\omega = 365$.

Die Temperaturverläufe einer Messstelle sind durch die obigen Funktionsgleichungen des Regressionsmodells und somit durch die drei Koeffizienten a, b und c vollständig beschrieben. Voraussetzung ist eine hinreichende Güte des Modells bei hoher Signifikanz.

Für Stichprobendaten und für kontinuierlich erhobene Daten wurden die Regressionsmodelle erstellt. Bei den Stichprobendaten wurden die Messstellen berücksichtigt, an denen Werte für mindestens 6 Monate vorlagen.

Beispiele für derartige Regressionsmodelle sind in den beiden folgenden Abbildungen dargestellt. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel für eine Stichprobenmessstelle, Abbildung 5 stellt exemplarisch das Ergebnis für eine kontinuierliche Messstelle dar.

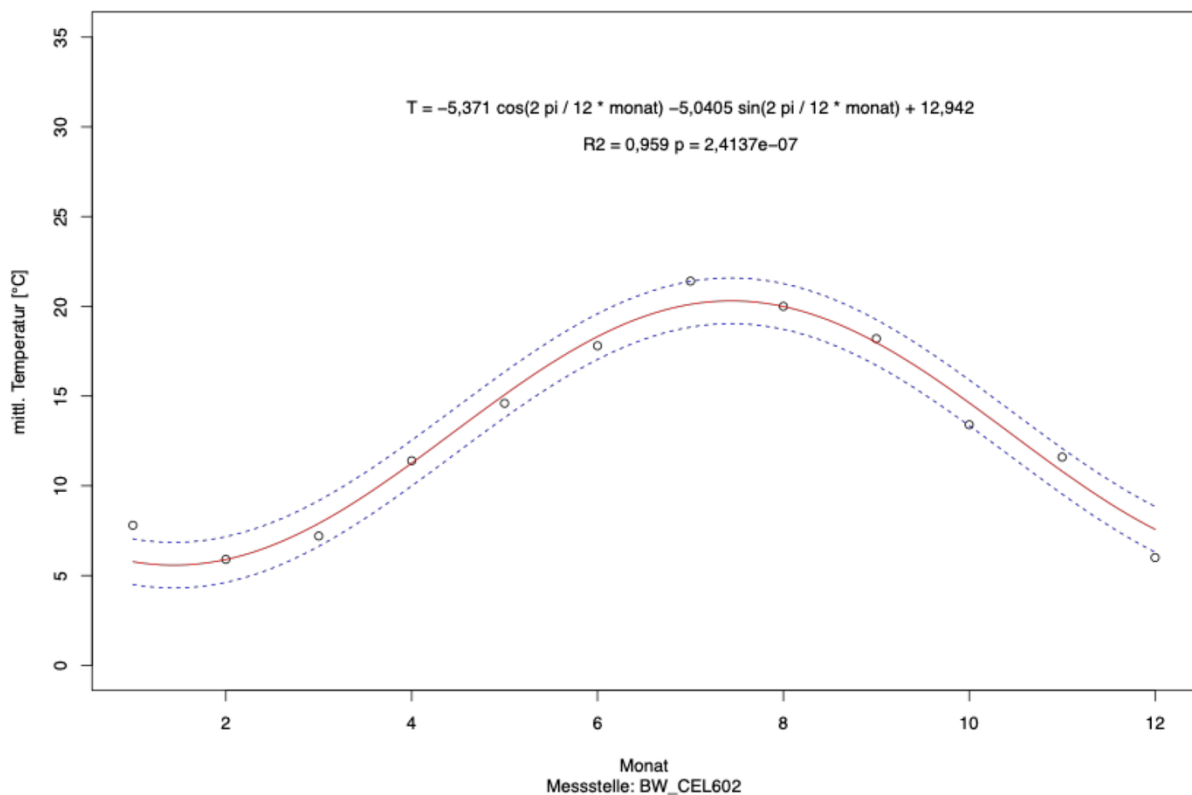


Abbildung 4: Regressionsmodell der langjährigen mittleren Monatsmesswerte einer Stichprobenmessstelle.

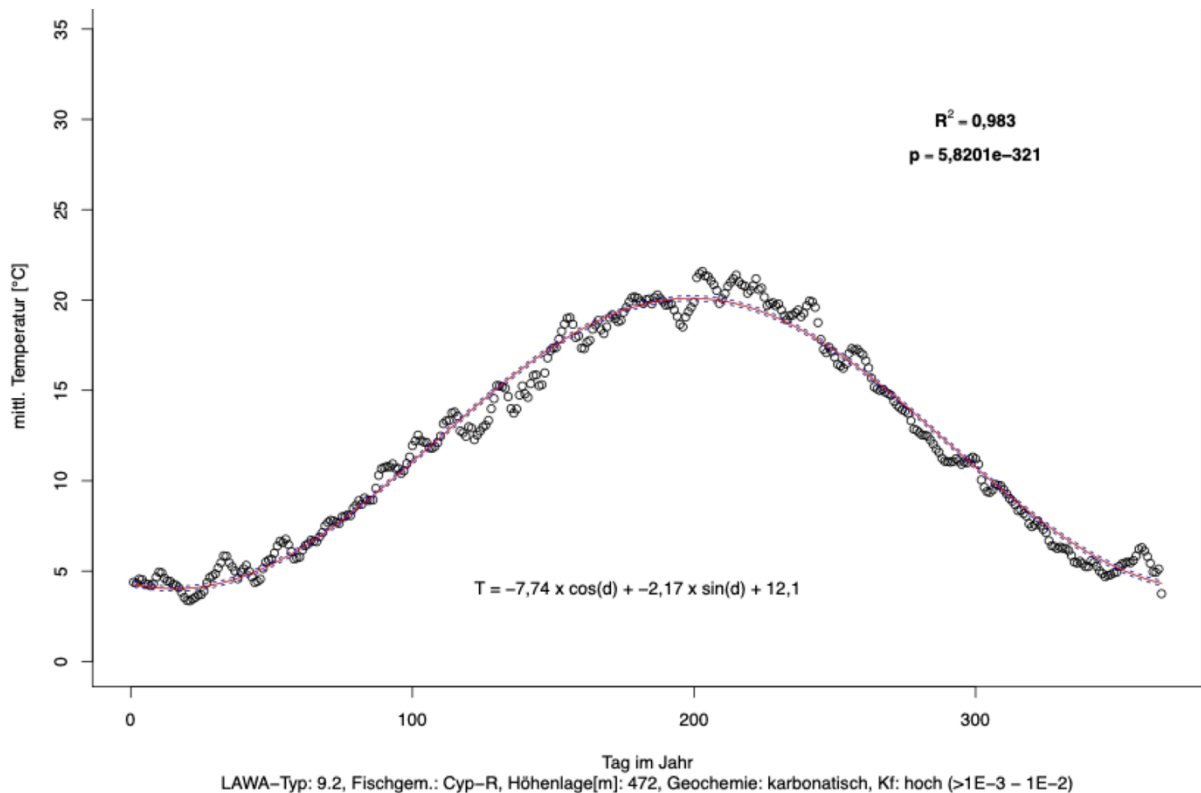


Abbildung 5: Regressionsmodell der langjährigen mittleren Tagesmaxima einer Messstelle mit kontinuierlicher Temperaturerhebung.

Beide Diagramme zeigen die Eingangswerte als Punkte, die Regressionskurve mit 95 %-Konfidenzintervallen, die Gleichungen der Regressionsmodelle sowie Bestimmtheitsmaße und p-Werte der Modelle. Die Qualität der Näherungen zeigt sich bereits daran, dass das Regressionsmodell der langjährigen mittleren Tagesmaxima (Abbildung 5) mit 362 Freiheitsgraden (365 Eingangswerte — 3 Modellparameter) ein etwas höheres Bestimmtheitsmaß aufweist als das Regressionsmodell der langjährigen mittleren monatlichen Stichprobenmesswerte (Abbildung 4) mit nur 9 Freiheitsgraden (12 – 3).

3.4.1 Bildung von Fallgruppen mit ähnlichen Jahresverläufen der Wassertemperatur basierend auf monatlichen Stichprobendaten

Gruppierung der Messstellen anhand der Fischgemeinschaften nach OGewV

Inwieweit eine Gruppierung der Messstellen hinsichtlich ihrer Temperaturverläufe in ausreichender Genauigkeit auf Basis der Fischgemeinschaften nach OGewV möglich ist, wurde für monatliche Stichprobendaten geprüft. Dazu wurde untersucht, ob sich die drei Koeffizienten der für die einzelnen Messstellen bestimmten Regressionsmodelle zwischen je zwei Fischgemeinschaften signifikant unterscheiden.

Dazu wurden alle Regressionskoeffizienten nach den Fischgemeinschaften nach OGewV gruppiert. Dabei wurden nur solche Messstellen berücksichtigt, bei denen das Regressionsmodell ein Bestimmtheitsmaß von mehr als 0,9 und einen p-Wert < 0,05 aufweist.

Paarweise Wilcoxon-Tests der Daten der Fischgemeinschaften zeigen, dass die Werteverteilungen der jeweiligen drei Koeffizienten sehr oft signifikante Unterschiede zwischen den Fischgemeinschaften aufweisen. Die in Tabelle 3 fett hervorgehobenen Einträge zeigen die, in denen die Null-Hypothese, dass sich zwei Gruppen nicht signifikant unterscheiden, nicht abgelehnt werden kann ($p > 0,05$). Dabei ist zu beachten, dass die p-Werte wegen der 21-fachen Wiederholung statistischer Tests einer Bonferroni-Korrektur unterzogen wurden, d. h. die unkorrigierten p-Werte wurden jeweils mit dem Faktor 21 korrigiert.

Die Aggregation der Fischgemeinschaften zu zwei Gruppen „Rhitral“ (bestehend aus Sa-ER, Sa-MR, Sa-HR und Cyp-R) und „Potamal“ (bestehend aus EP, MP und HP) erscheint sinnvoll, da sich für Paarungen zweier Fischgemeinschaften aus der jeweils gleichen Gruppe Funktionsterme in 7 Fällen nicht signifikant unterscheiden. Dies ist ebenfalls an den grau hinterlegten Fällen zu erkennen.

Tabelle 3: Ergebnisse paarweiser Wilcoxon-Tests der Koeffizienten der Regressionsfunktionen der nach Fischgemeinschaften (FG) gruppierten Messstellen mit Stichprobenmessungen.

FG 1	FG 2	Bonferroni - korrigierte p- Werte - cos-Terme	Bonferroni - korrigierte p- Werte - sin-Terme	Bonferroni - korrigierte p- Werte - Konstanten
Sa-ER	Sa-HR	< 0,0001	0,637	< 0,0001
Sa-ER	Sa-MR	1,581	1,316	< 0,0001
Sa-HR	Sa-MR	< 0,0001	11,738	2,401
Cyp-R	Sa-ER	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Cyp-R	Sa-HR	14,319	0,628	< 0,0001
Cyp-R	Sa-MR	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Cyp-R	EP	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Cyp-R	HP	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Cyp-R	MP	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
EP	Sa-ER	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
EP	Sa-HR	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
EP	Sa-MR	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
EP	HP	< 0,0001	< 0,0001	1,694
EP	MP	6,960	< 0,0001	0,135
HP	Sa-ER	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
HP	Sa-HR	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
HP	Sa-MR	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

FG 1	FG 2	Bonferroni - korrigierte p- Werte - cos-Terme	Bonferroni - korrigierte p- Werte - sin-Terme	Bonferroni - korrigierte p- Werte - Konstanten
HP	MP	< 0,0001	0,154	17,130
MP	Sa-ER	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
MP	Sa-HR	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
MP	Sa-MR	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Wenn die Daten, wie oben beschrieben, in die Gruppen

- „Potamal“: EP, MP, HP und
- „Rhithral“: Sa-ER, Sa-MR, Sa-HR, Cyp-R

aggregiert werden, kann anhand von Wilcoxon-Tests gezeigt werden, dass sich die Koeffizienten der Regressionsgleichungen zwischen den beiden Gruppen hochsignifikant ($p < 10^{-16}$ in allen drei Fällen) unterscheiden. Die Verteilungen der Koeffizienten bzw. der Konstanten der Regressionsmodelle dieser beiden Gruppen wurden in Boxplots visualisiert (siehe Abbildung 6 bis Abbildung 8).

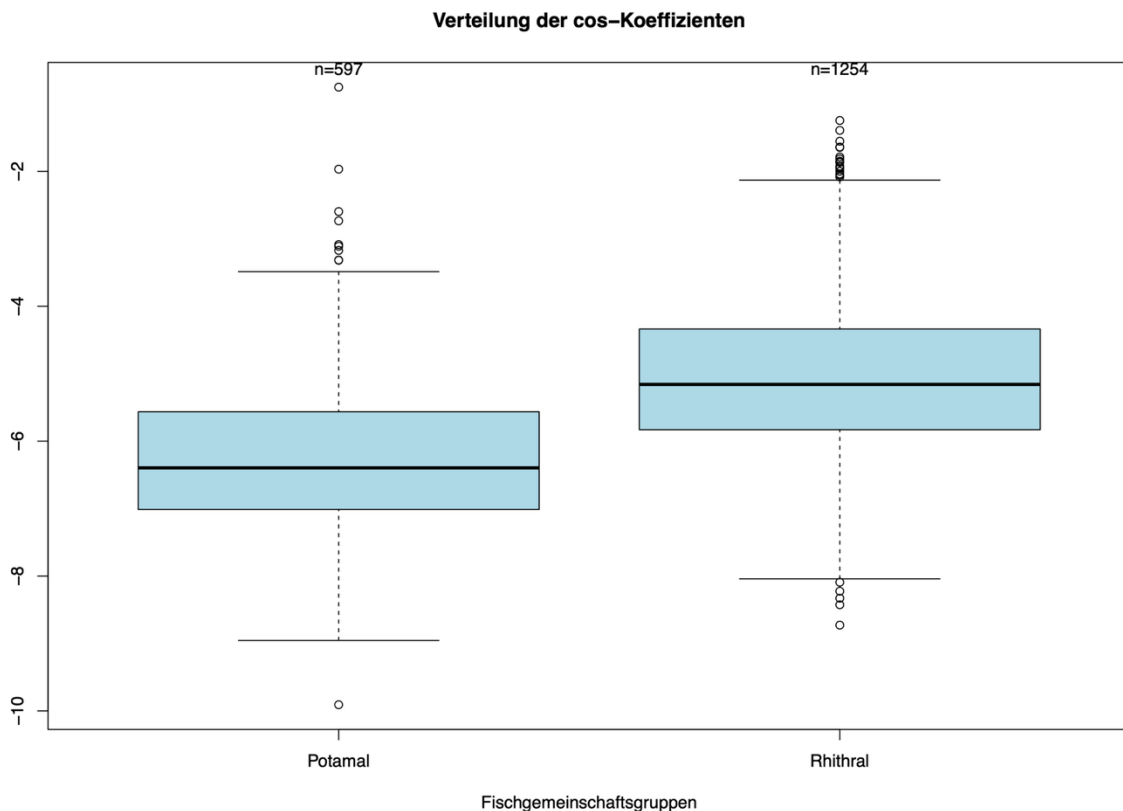


Abbildung 6: Verteilung der Koeffizienten der Cosinus-Funktionen in den sinusoidalen Regressionsmodellen der Monatstemperaturen.

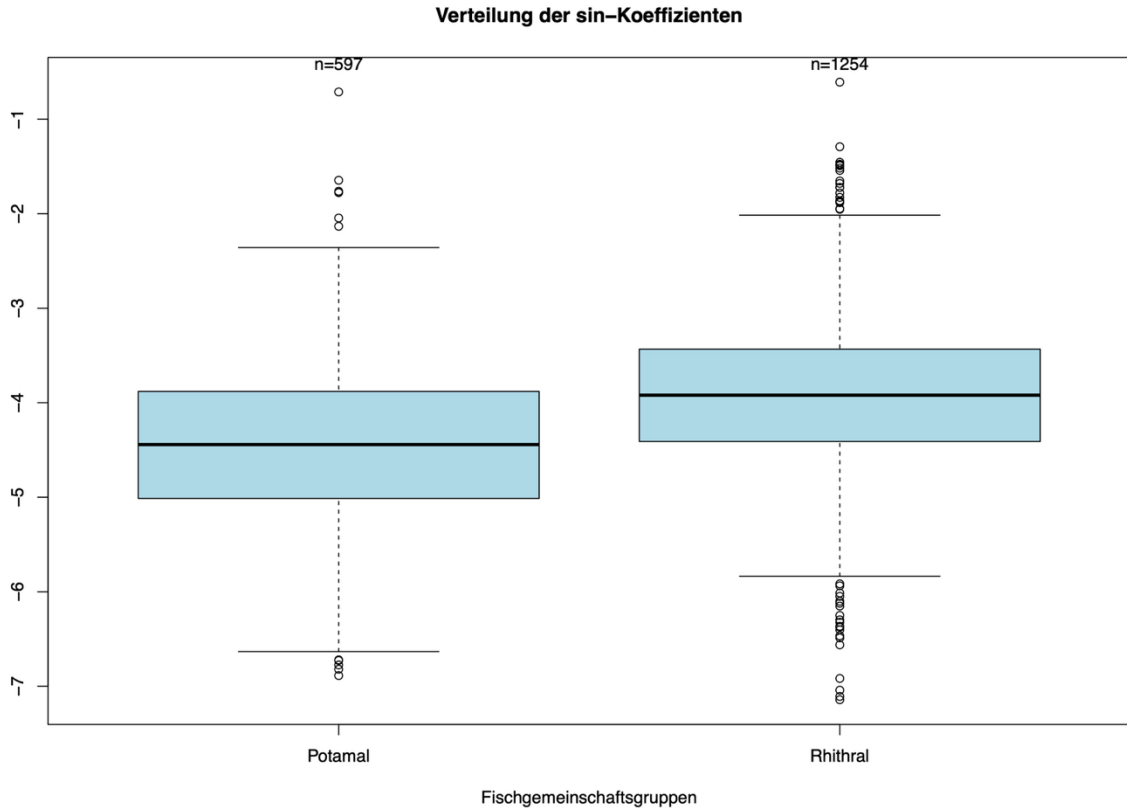


Abbildung 7: Verteilung der Koeffizienten der Sinus-Funktionen in den sinusoidalen Regressionsmodellen der Monatstemperaturen.

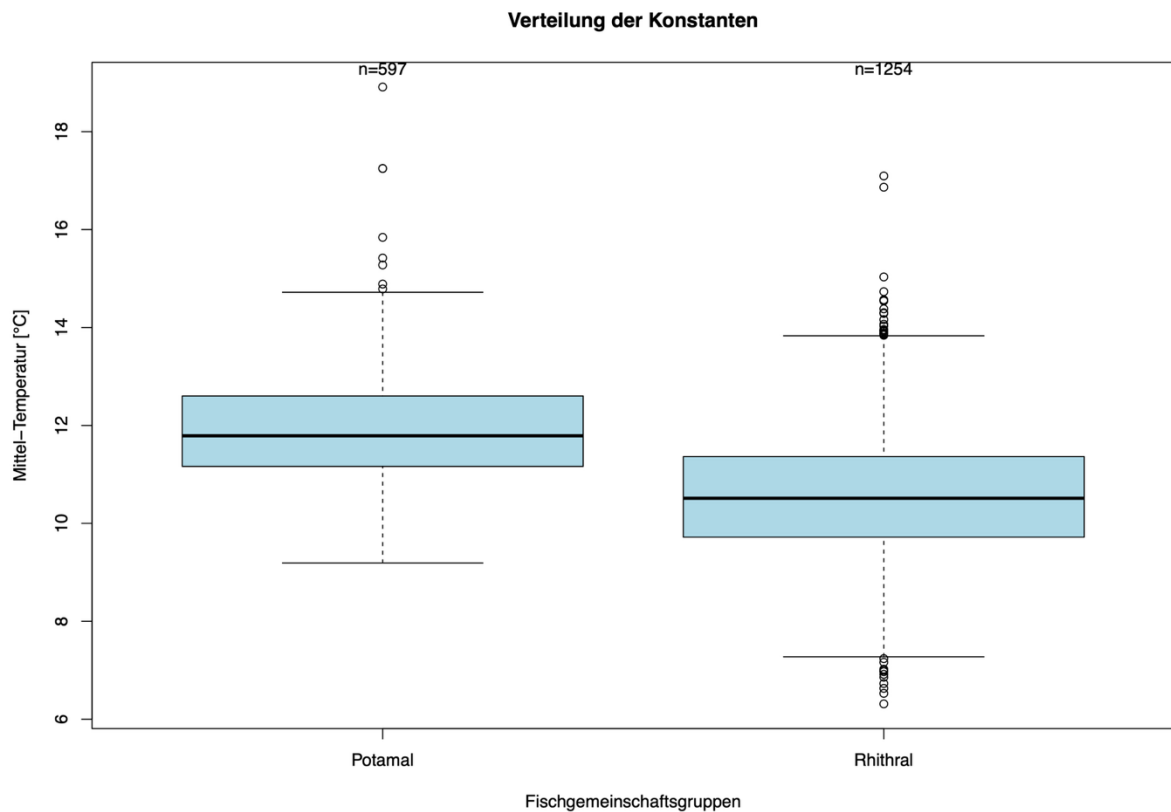


Abbildung 8: Verteilung der Konstanten in den sinusoidalen Regressionsmodellen der Monatstemperaturen.

In den Diagrammen ist zu erkennen, wie deutlich sich die beiden Gruppen bei allen drei Kenngrößen unterscheiden. Allerdings ist auch erkennbar, dass die Streuung innerhalb der Gruppen recht groß ist. Dies kann besonders gut anhand von Abbildung 8 verdeutlicht werden, welche die Verteilungen der Konstanten darstellt. Diese Konstanten beschreiben das mittlere Temperaturniveau, um das die Temperaturverläufe periodisch oszillieren. Betrachtet man nur die Werte zwischen den Whiskern gilt für die potamalen Gewässer also, dass die Mitten ihrer jährlichen Ganglinien Werte zwischen ca. 9 und ca. 15° Celsius aufweisen. Im rhithralen Bereich erstreckt sich diese Spanne zwischen ca. 7 und ca. 14° Celsius, ist also noch ein Grad breiter.

Fazit

- Es ist statistisch belegbar, dass sich die Temperaturverläufe der langjährigen Monatswerte von Messstellen auf Ebene der einzelnen Fischgemeinschaften häufig, bzw. bei Gruppierung in allen Fällen signifikant unterscheiden.
- Dies belegt die Eignung der Fischgemeinschaften zur Gruppierung der Daten.
- Allerdings streuen die Kennwerte der Regressionsmodelle innerhalb der jeweiligen Gruppen zu stark, um damit eine für dieses Vorhaben verwertbare Differenzierung bilden zu können.

Gruppierung der Messstellen anhand von LAWA-Typen

Analog zur Vorgehensweise bei den Fischgemeinschaften können die Koeffizienten der Sinusoidal-Regressionen auch differenziert nach LAWA-Typen in Box-Whisker-Plots dargestellt werden.

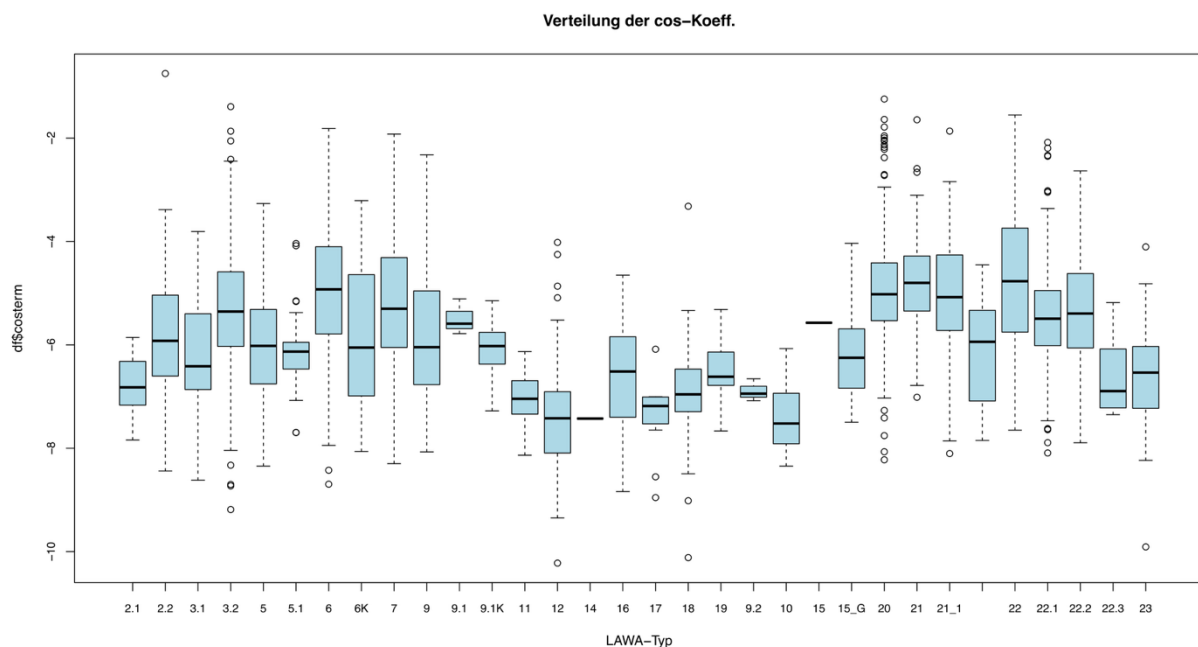


Abbildung 9: Boxplots der Verteilung der cos-Terme der Regressionsfunktionen differenziert nach den LAWA-Typen.

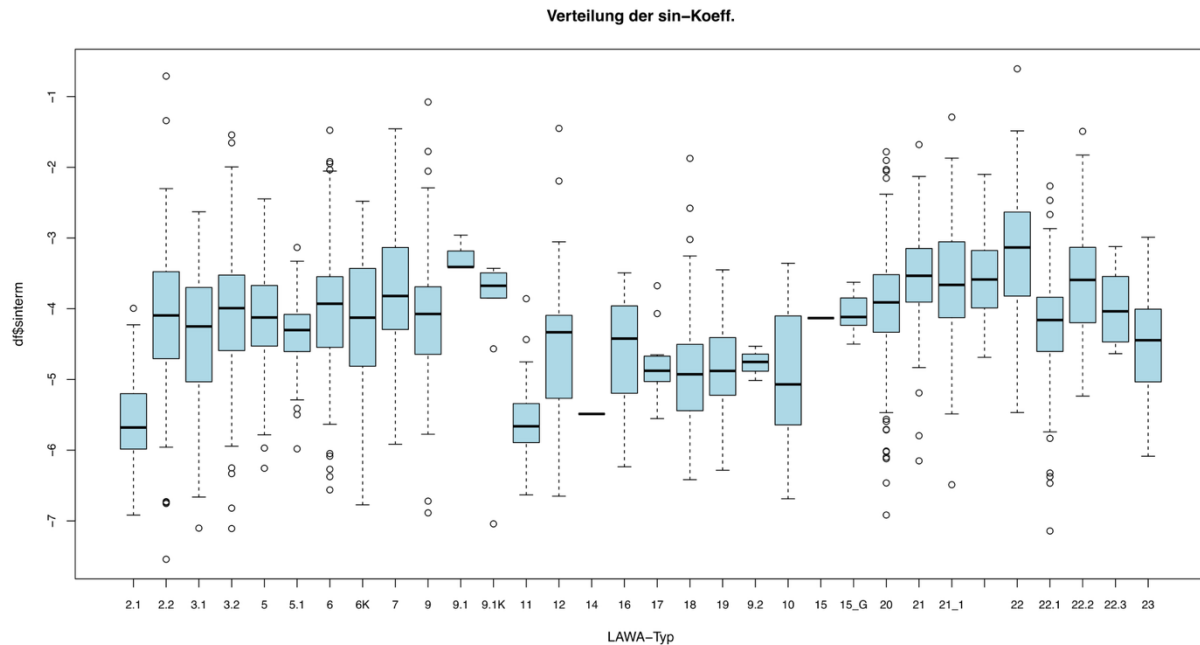


Abbildung 10: Boxplots der Verteilung der sin-Terme der Regressionsfunktionen differenziert nach den LAWA-Typen.

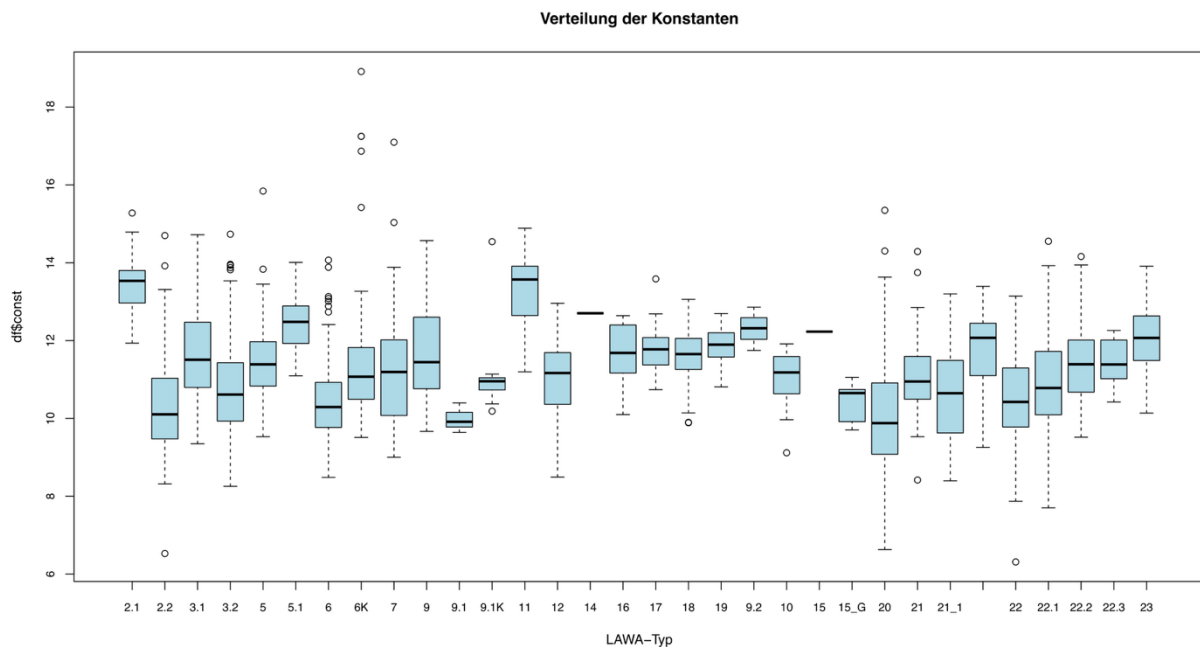


Abbildung 11: Boxplots der Verteilung der Konstanten der Regressionsfunktionen differenziert nach den LAWA-Typen.

Paarweise Wilcoxon-Tests der Daten der LAWA-Typen zeigen für 179 der 496 möglichen Kombinationen (ca. 36%), dass die Werteverteilungen der jeweiligen Teilmengen für alle drei Koeffizienten signifikante Unterschiede aufweisen. Diese Fälle, in denen die Null-Hypothese, dass sich zwei Gruppen nicht signifikant unterscheiden, nicht abgelehnt werden kann ($p > 0,05$) sind in Anhang I tabellarisch dargestellt. Die Boxplots zeigen allerdings auch hier, dass die Verteilungen der einzelnen LAWA-Typen für alle drei Koeffizienten jeweils relativ stark überlappen.

In einem weiteren Schritt wurde daher geprüft, ob durch Gruppierung von LAWA-Typen eine bessere Differenzierung erreicht werden kann. Es wurden die in Tabelle 4 dargestellten Gruppen gebildet, welche die LAWA-Typen berücksichtigen und aufgrund naturräumlicher Verteilung und Größenhomogenität gut zu aggregieren sind.

Tabelle 4: Gruppierung von LAWA-Typen für die Verteilungsanalyse.

Typgruppe	Gruppierte Typen	Fallzahl
Alpenvorlandgewässer	2.1, 2.2, 3.1, 3.2	20
Mittelgebirgsbäche	5, 5.1, 6, 6K, 7	742
Mittelgebirgsflüsse	9, 9.1, 9.1K, 9.2, 10	380
Tieflandbäche	14, 16, 18	749
Tieflandflüsse	17, 15, 15_G, 20	342
Sonstige Bäche	11, 19	250
Sonstige Flüsse	12	75

Analog zum bisherigen Vorgehen wurden wiederum paarweise Wilcoxon-Tests zur Analyse der Verteilungen der Funktionsterme durchgeführt. Die p-Werte wurde der Bonferroni-Korrektur unterzogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt. Fälle, in denen kein signifikanter Unterschied der Koeffizienten angenommen werden kann, sind fett gedruckt und grau hinterlegt dargestellt.

Es wird deutlich, dass Mittelgebirgsgewässer gut von Tieflandgewässer unterschieden werden können. Außerdem ist der Einfluss der Gewässergröße gut zu erkennen. Alpenvorlandgewässer lassen sich dagegen nicht gut von den übrigen Gewässern abgrenzen. Dabei ist jedoch die geringe Fallzahl der Alpenvorlandgewässer zu berücksichtigen. Die „sonstigen“ Gewässer können nur von Mittelgebirgsgewässern signifikant differenziert werden.

Tabelle 5: Ergebnisse paarweiser Wilcoxon-Tests der Koeffizienten der Regressionsfunktionen der nach LAWA-Typgruppen aggregierten Messstellen.

Typgruppe 1	Typgruppe 2	Bonferroni-korrigierte p-Werte - cos-Terme	Bonferroni-korrigierte p-Werte - sin-Terme	Bonferroni-korrigierte p-Werte - Konstanten
Alpenvorland	Mittelgebirgsbäche	< 0,0001	12,96897	2,67162
Alpenvorland	Mittelgebirgsflüsse	9,93657	0,55556	0,03105
Alpenvorland	Tieflandbäche	0,01206	7,06419	14,01225
Alpenvorland	Tieflandflüsse	9,39792	0,21840	0,00050

Typgruppe 1	Typgruppe 2	Bonferroni-korrigierte p-Werte - cos-Terme	Bonferroni-korrigierte p-Werte - sin-Terme	Bonferroni-korrigierte p-Werte - Konstanten
Alpenvorland	Sonstige Bäche	13,15797	2,76633	15,35226
Alpenvorland	Sonstige Flüsse	9,13689	0,43388	0,01640
Mittelgebirgs-bäche	Mittelgebirgs-flüsse	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Mittelgebirgs-bäche	Tiefland-bäche	< 0,0001	< 0,0001	0,00001
Mittelgebirgs-bäche	Tieflandflüsse	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Mittelgebirgs-bäche	Sonstige Bäche	< 0,0001	< 0,0001	0,00001
Mittelgebirgs-bäche	Sonstige Flüsse	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Mittelgebirgs-flüsse	Tiefland-bäche	< 0,0001	0,00026	< 0,0001
Mittelgebirgs-flüsse	Tieflandflüsse	0,00322	7,76811	< 0,0001
Mittelgebirgs-flüsse	Sonstige Bäche	13,76298	1,61759	< 0,0001
Mittelgebirgs-flüsse	Sonstige Flüsse	0,11743	10,07412	18,25908
Tiefland-bäche	Tieflandflüsse	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Tiefland-bäche	Sonstige Bäche	< 0,0001	1,74901	1,53602
Tiefland-bäche	Sonstige Flüsse	< 0,0001	0,05699	< 0,0001
Tieflandflüsse	Sonstige Bäche	0,13922	0,21347	< 0,0001
Tieflandflüsse	Sonstige Flüsse	14,27790	17,61123	8,56296
Sonstige Bäche	Sonstige Flüsse	0,45885	1,69514	< 0,0001

Werden die Wertebereiche innerhalb der verschiedenen aggregierten LAWA-Typgruppen betrachtet, zeigen sich relativ große Spannweiten (siehe Abbildung 12 bis Abbildung 14). Besonders anschaulich ist dies in Abbildung 14, die die konstanten Terme

der Regressionsfunktionen darstellt, welche der mittleren Temperatur entsprechen, um die die sinusoidalen Funktionen im Zeitverlauf oszillieren. Die Spannweiten zwischen den äußeren Whiskern liegen – außer bei den Alpenvorlandgewässern, die jedoch nur mit sehr geringer Fallzahl vertreten sind – bei mindestens 5 K, bei den Mittelgebirgs-
gewässern bei rund 7 K.

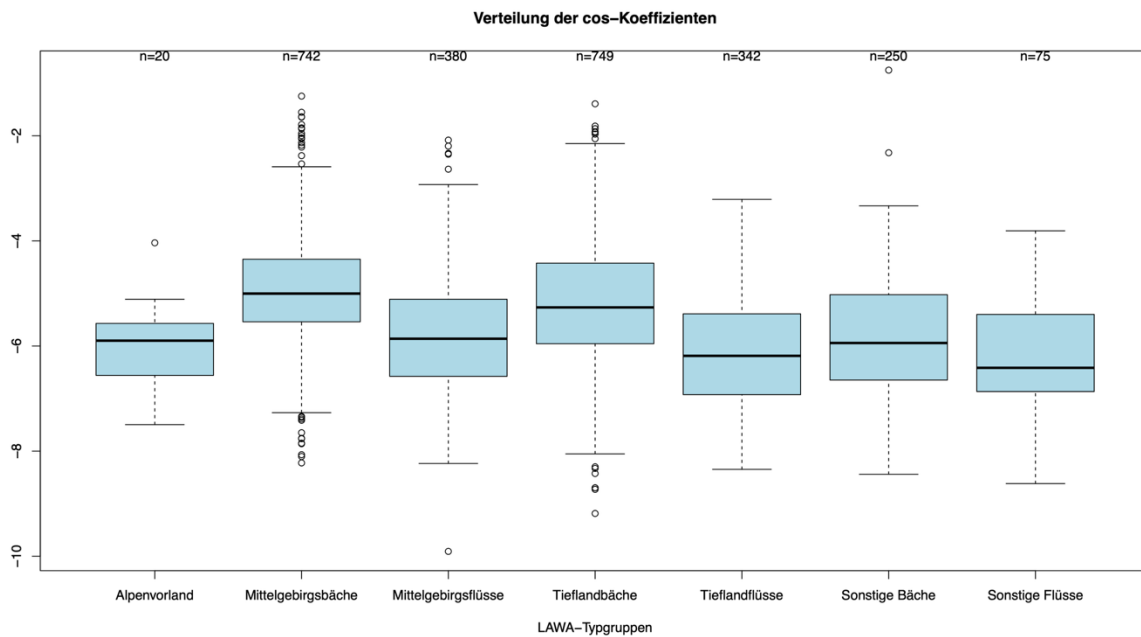


Abbildung 12: Boxplots der Verteilung der cos-Terme der Regressionsfunktionen differenziert nach LAWA-Typgruppen.

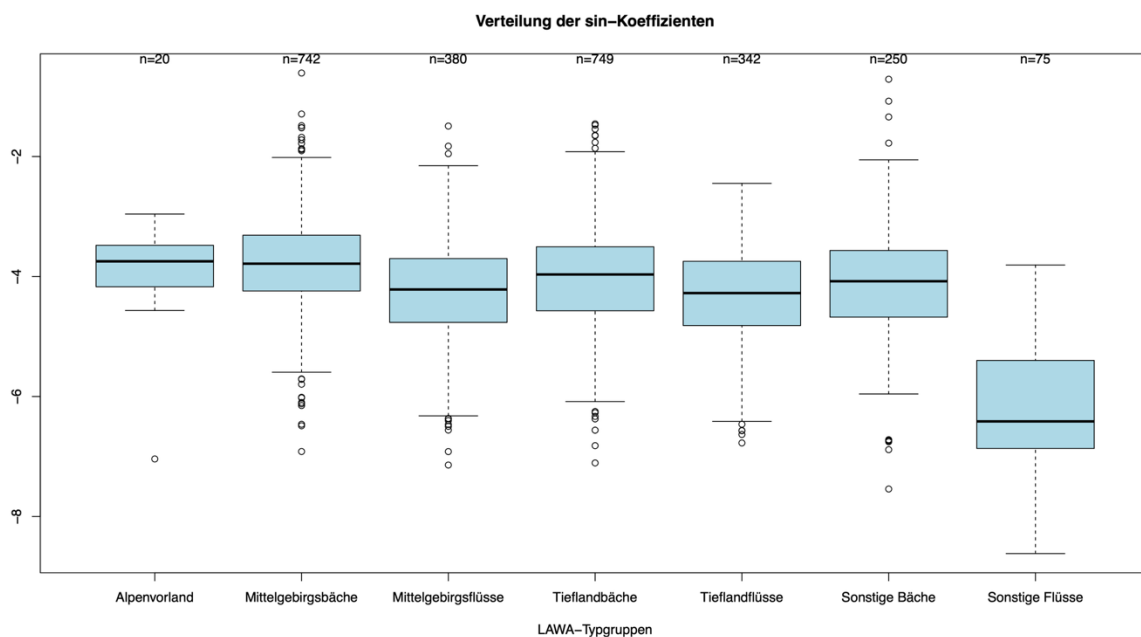


Abbildung 13: Boxplots der Verteilung der sin-Terme der Regressionsfunktionen differenziert nach LAWA-Typgruppen.

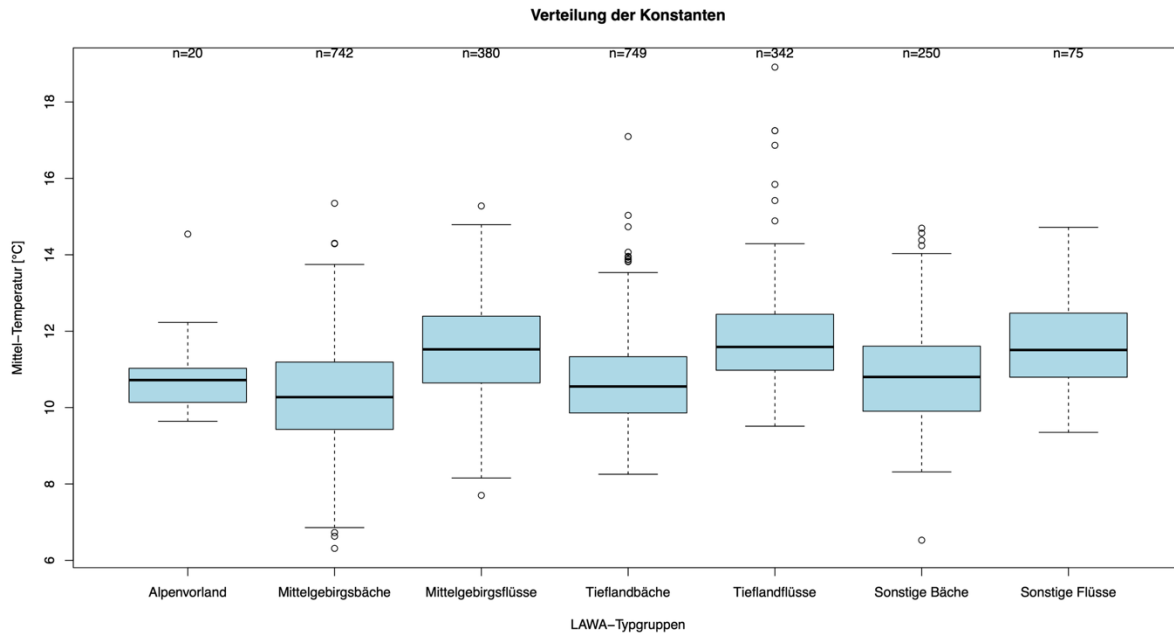


Abbildung 14: Boxplots der Verteilung der Konstanten der Regressionsfunktionen differenziert nach LAWA-Typgruppen.

Fazit:

- Die Temperaturverläufe der langjährigen Monatswerte von Messstellen unterscheiden sich auf Ebene der einzelnen LAWA-Typen bei etwa einem Drittel der möglichen Kombinationen.
- Bei den Gruppierungen gilt dies nur für die Mittelgebirgsbäche und -flüsse.
- Damit ist die Eignung der LAWA-Typen zur Gruppierung der Daten eingeschränkt.
- Die Kennwerte der Regressionsmodelle streuen innerhalb der jeweiligen Gruppen zu stark, um damit eine für dieses Vorhaben verwertbare Differenzierung bilden zu können.

Gruppierung der Messstellen durch Clusterung

Ein weiterer Gruppierungsansatz kommt dagegen zunächst völlig ohne weitere Informationen zu den Messstellen aus. Für den Gesamtbestand aller Datensätze (Messstelle mit Koeffizienten der Regressionsfunktion) wurde eine Cluster-Analyse durchgeführt. Jedes Cluster ist über die Wertebereiche der drei Koeffizienten charakterisiert. Während es – hinreichend gute Auftrennung der Cluster vorausgesetzt – möglich wäre, jede Messstelle dann anhand ihrer Regressionsfunktion einem Cluster zuzuordnen, war es das Ziel des Vorhabens, fachlich begründete Gruppen zu bilden. Daher wurde geprüft, ob die Cluster durch bestimmte, für alle Messstellen vorliegende, die Temperaturverläufe beeinflussende Parameter zu charakterisieren sind, wie z.B. gemeinsame typologische Eigenschaften.

Vor Durchführung der Clusteranalyse wurde geprüft, ob die Variablen miteinander zu stark korreliert sind, um diese Methode anzuwenden. Der Cosinus-Term ist mit dem Sinus-Term – allerdings nur schwach – positiv korreliert ($R = 0,39$, Abbildung 15). Mit

dem konstanten Term besteht eine schwach negative Korrelation ($R = -0,36$, Abbildung 16). Das Gleiche gilt für die Beziehung zwischen Sinus-Term und Konstante ($R = -0,28$, Abbildung 17).

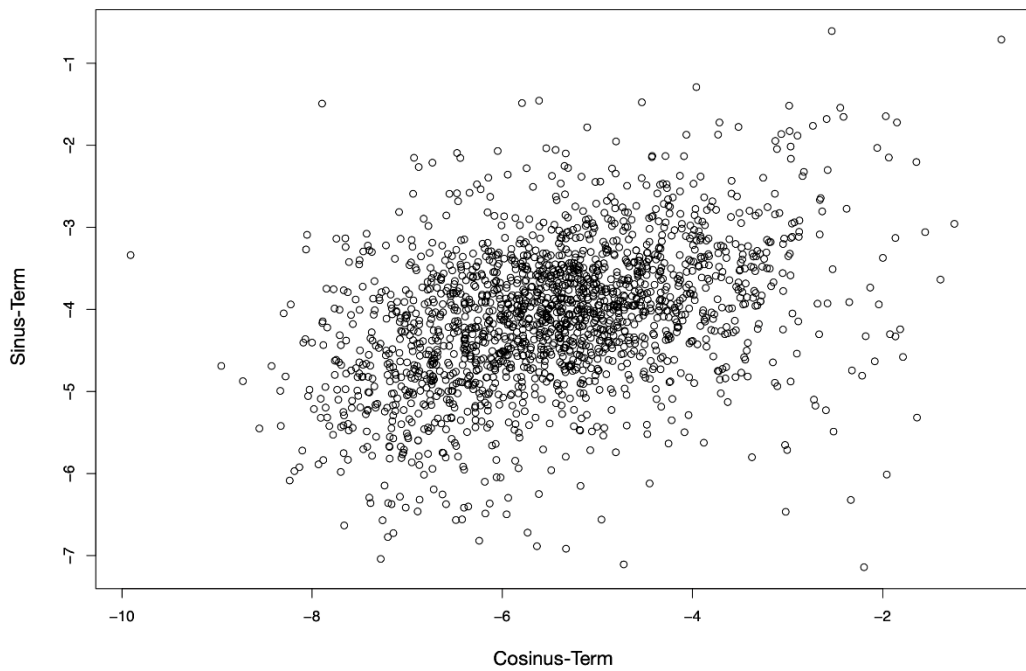


Abbildung 15: Streudiagramm der Koeffizienten (Cosinus- und Sinus-Term) der Sinusoidal-Regressionen ($N = 3.086$).

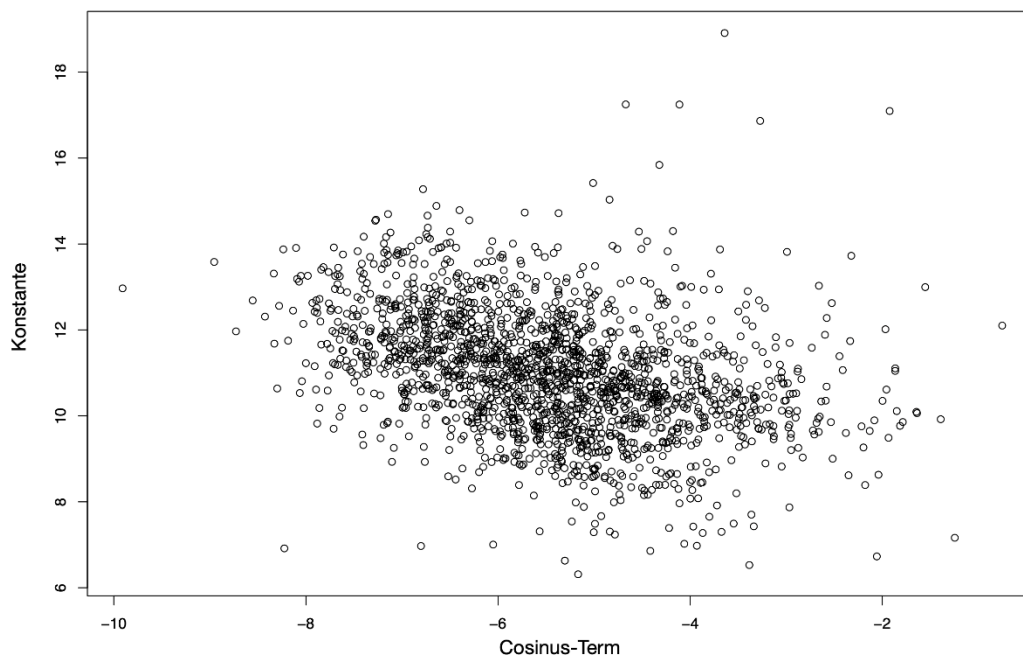


Abbildung 16: Streudiagramm der Koeffizienten (Cosinus-Term und Konstante) der Sinusoidal-Regressionen ($N = 3.086$).

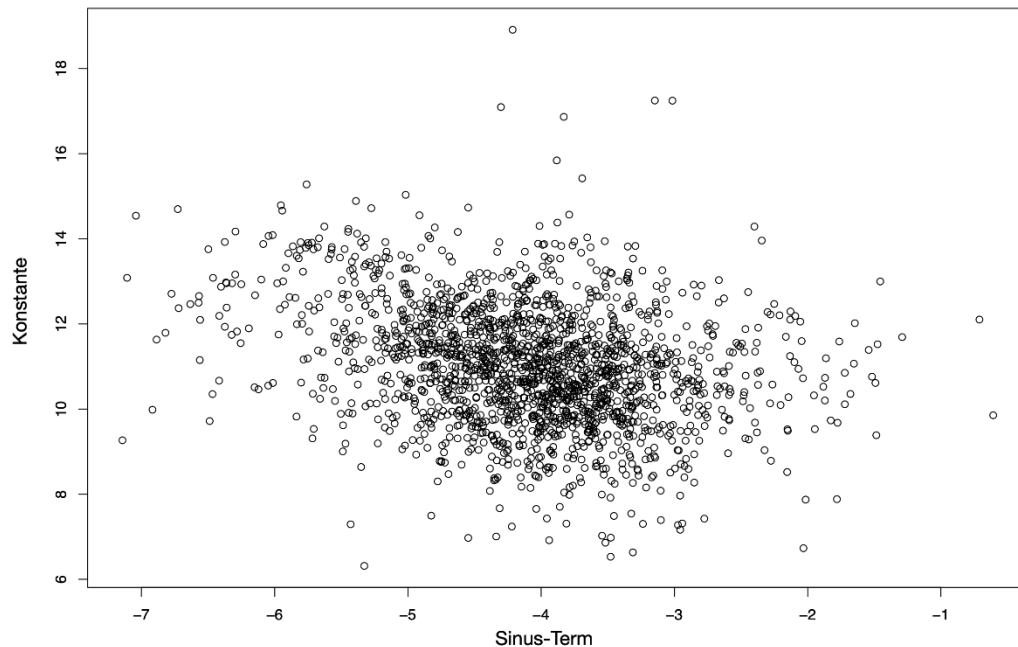


Abbildung 17: Streudiagramm der Koeffizienten (Sinus-Term und Konstante) der Sinusoidal-Regressionen (N = 3.086).

Da die drei Variablen nur geringfügig miteinander korreliert sind, können sie als Variablen einer Cluster-Analyse verwendet werden.

Zur Durchführung der Analyse wurden die drei Variablen zunächst skaliert. Jede Spalte wurde auf den Spaltenmittelwert zentriert und durch die Standardabweichung dividiert. Alle Variablen wurden dadurch in die gleiche Größenordnung gebracht, damit bei der Bestimmung von Distanzmaßen kein Bias in Richtung einer besonders großen Variable entsteht.

Anschließend wurde die optimale Clusterzahl bestimmt. Das sogenannte Elbow („Ellbogen“)-Kriterium ist eine graphische Methode, bei der für verschiedene Clusterzahlen (1, 2, ...) jeweils die Summe der Distanzquadrate innerhalb der Cluster ermittelt werden. Dieser Wert nimmt mit der Zahl der Cluster mehr oder weniger stark ab. Der „Ellbogen“ ist die Clusterzahl bei der die Summe der Distanzquadrate zur nächstgrößeren Zahl weniger stark abnimmt. Das Ergebnis ist in Abbildung 18 dargestellt. Danach ist die optimale Clusterzahl 4.

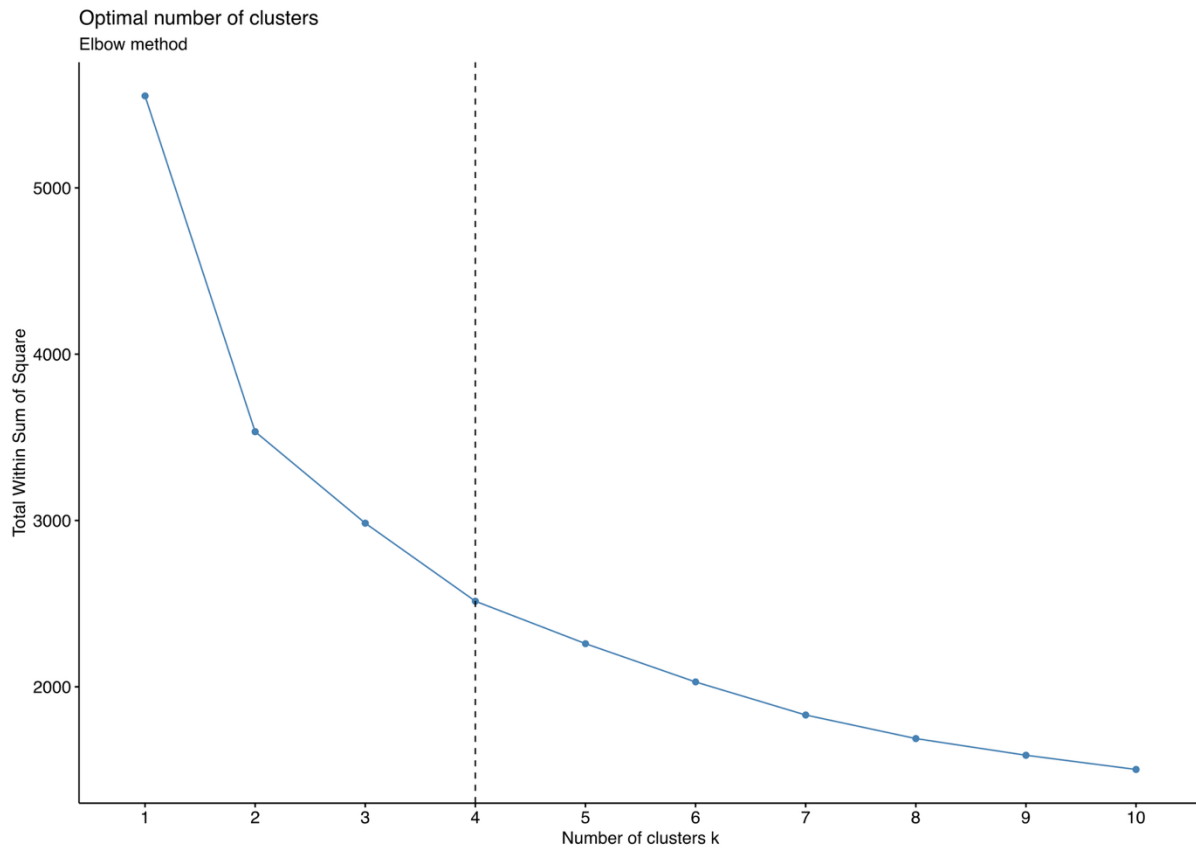


Abbildung 18: Ermittlung der optimalen Cluster-Zahl mit dem Elbow-Kriterium.

Das Elbow-Kriterium weist nicht immer die genaue Abschätzung der optimalen Clusterzahl auf (keine deutlichen Sprünge). Ergänzend wurden noch zwei weitere Methoden angewendet, die Silhouette-Methode und die k-Means-Methode.

Die Silhouette-Methode bestimmt die mittlere Entfernung zwischen Clustern. Hier wird ein Gütemaß durch sukzessive Erhöhung der Clusterzahl maximiert. Diese Methode liefert einen Wert von 2 (Abbildung 19).

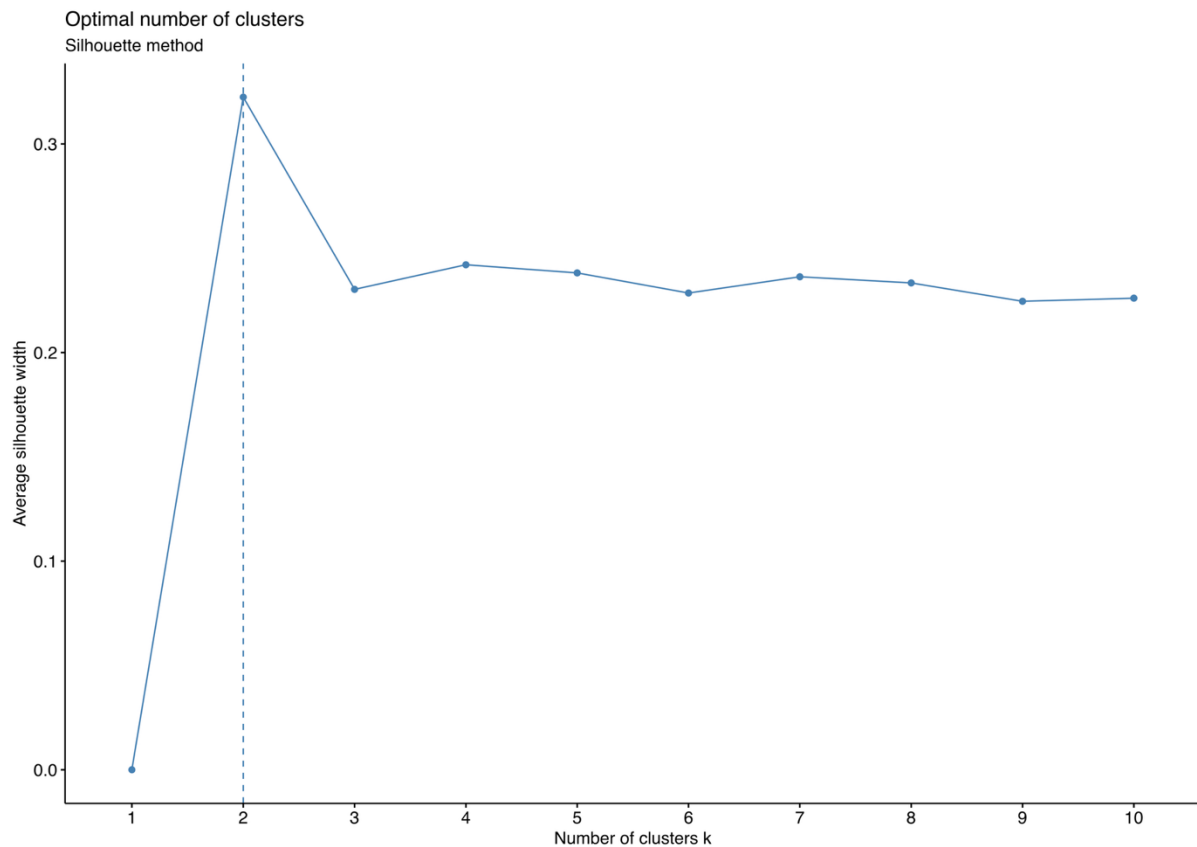


Abbildung 19: Ermittlung der optimalen Cluster-Zahl mit der Silhouette-Methode.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurden zwei Cluster-Analysen mit der k-Means-Methode durchgeführt, mit Zielgrößen von 2 und 4 Clustern. Bei dieser Methode der Clusteranalyse wird im Ausgangspunkt eine Anzahl von k Clustern gebildet, denen dann die Menge der betrachteten Datenpunkte anhand der betrachteten Variablen zugeordnet wird. k-Means prüft anschließend, ob durch den Tausch von Objekten zwischen den Clustern oder auch die Neubildung von Clustern eine Clusterlösung verbessert werden kann. Als Zielkriterium für die Aufteilung der Daten auf die Cluster dient dabei eine möglichst geringe Erhöhung der Varianz innerhalb der Cluster.

Im Folgenden werden die Ergebnisse für diese Varianten dargestellt. Von dem ursprünglichen Datensatz mit 3.086 Datensätzen verbleiben durch das Filterkriterium $R^2 > 0,9$ noch 1.852 Fälle. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen visualisiert.

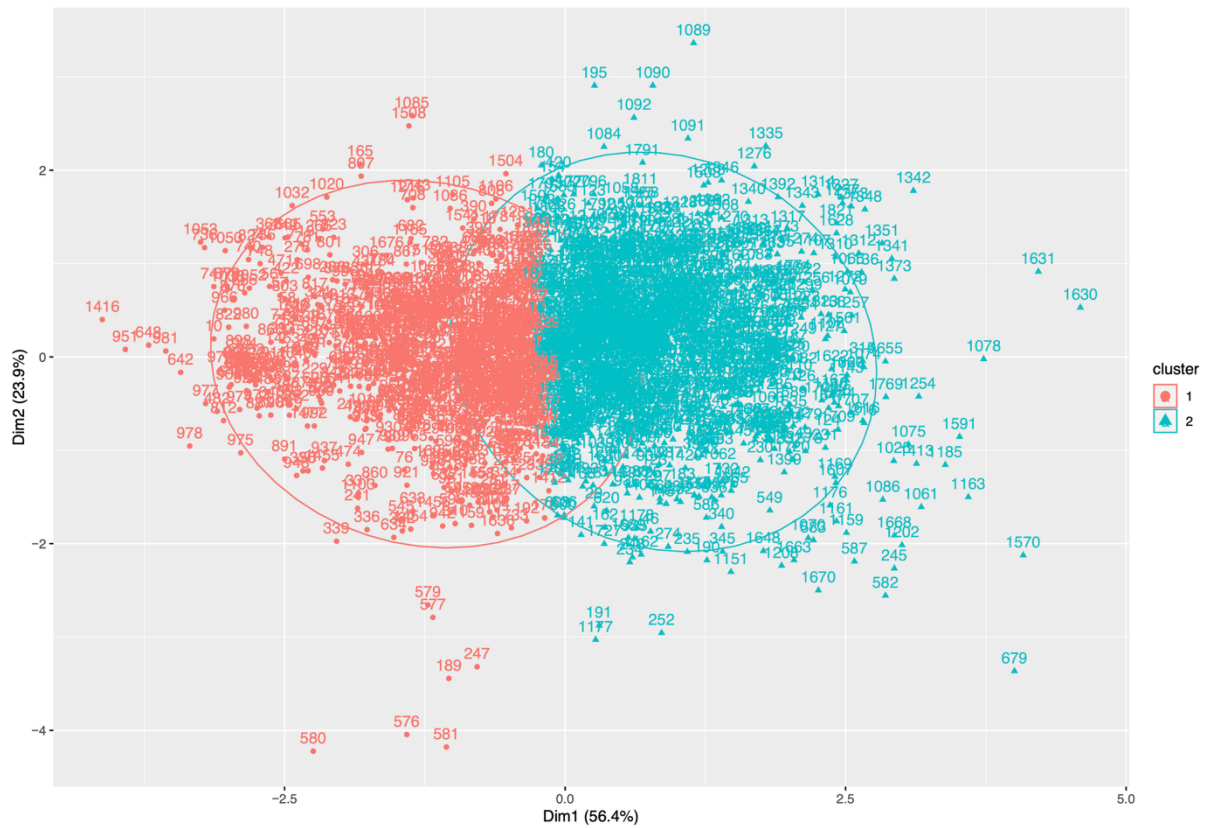


Abbildung 20: Ergebnis der k-Means-Clusteranalyse mit 2 Clustern.

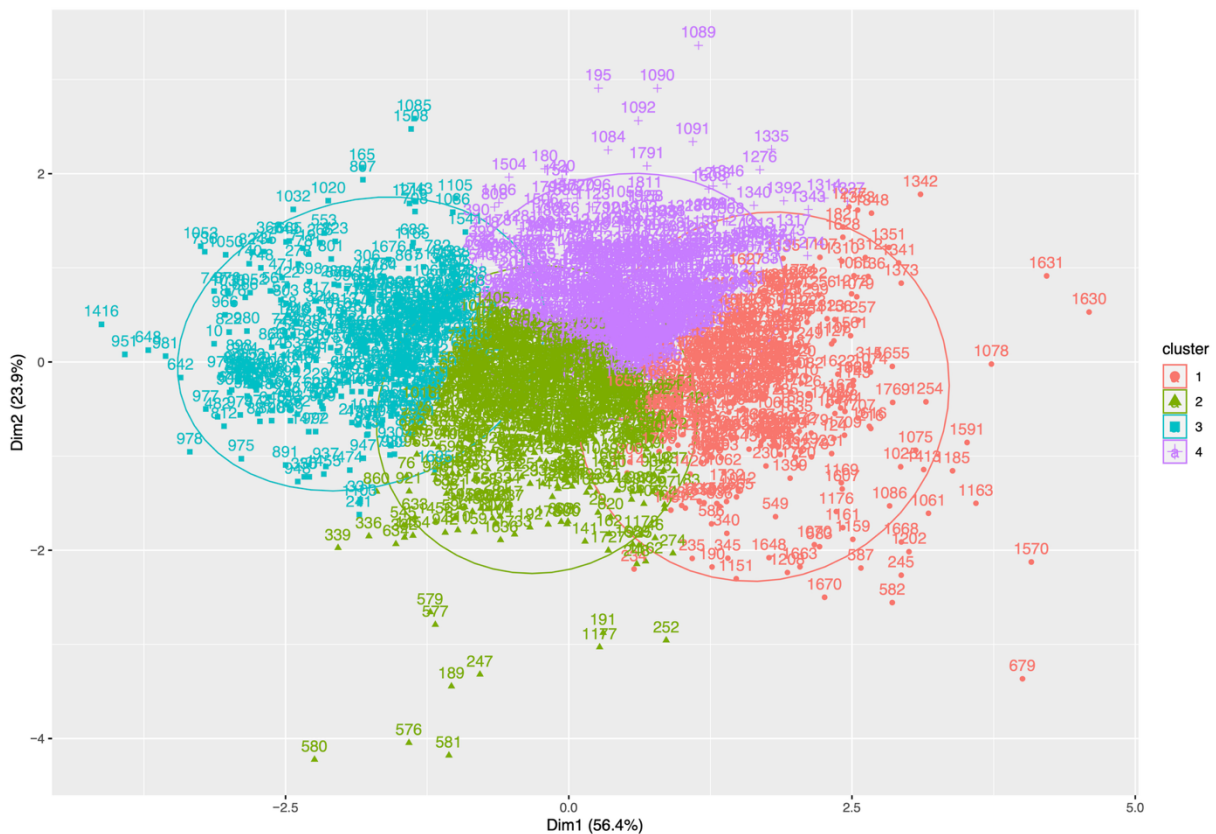


Abbildung 21: Ergebnis der k-Means-Clusteranalyse mit 4 Clustern.

Um die resultierenden Cluster zu charakterisieren, ist in den folgenden Tabellen dargestellt, wie sich die verschiedenen Fischgemeinschaften auf die jeweiligen Cluster verteilen.

Tabelle 6: Verteilung der Fischgemeinschaften auf die Cluster der k-Means-Clusteranalyse mit zwei Clustern.

	HP	MP	EP	Cyp-R	Sa-HR	Sa-MR	Sa-ER
Cluster 1: Anzahl	52	194	200	195	50	47	30
Cluster 1: Anteil [%]	6,8	25,3	26	25,4	6,5	6,1	3,9
Cluster 2: Anzahl	3	64	84	261	120	238	313
Cluster 2: Anteil [%]	0,3	5,9	7,7	24,1	11,1	22	28,9

Abweichungen von 100 % sind Rundungsfehler.

Tabelle 7: Anteilssummen der Gruppen Potamal und Rhithral der Cluster aus Tabelle 6

Kenngroße	Potamal	Rhithral
Summe [%] (C1)	58,1	41,9
Summe [%] (C2)	13,2	86,1

Abweichungen von 100 % sind Rundungsfehler.

Tabelle 8: Verteilung der Fischgemeinschaften auf die Cluster der k-Means-Clusteranalyse mit vier Clustern.

	HP	MP	EP	Cyp-R	Sa-HR	Sa-MR	Sa-ER
Cluster 1: Anzahl	196	124	9	90	33	56	58
Cluster 1: Anteil [%]	34,6	21,9	1,6	15,9	5,8	9,9	10,2
Cluster 2: Anzahl	133	46	2	25	171	72	122
Cluster 2: Anteil [%]	23,3	8,1	0,4	4,4	29,9	12,6	21,4
Cluster 3: Anzahl	61	104	44	129	11	16	14
Cluster 3: Anteil [%]	16,1	27,4	11,6	34,0	2,9	4,2	3,7

	HP	MP	EP	Cyp-R	Sa-HR	Sa-MR	Sa-ER
Cluster 4: Anzahl	66	10		14	128	26	91
Cluster 4: Anteil [%]	19,6	3,0		4,2	38,1	7,7	27,1

*: Abweichungen von 100 % sind Rundungsfehler.

Tabelle 9: Anteilssummen der Gruppen Potamal und Rhithral der Cluster aus Tabelle 8

Kenngroße	Potamal	Rhithral
Summe [%] (C1)	58,1	41,8
Summe [%] (C2)	31,8	68,3
Summe [%] (C3)	55,1	44,8
Summe [%] (C4)	22,6	77,1

Abweichungen von 100 % sind Rundungsfehler.

Es zeigt sich, dass die Clusterung mit zwei Clustern aus fachlicher Sicht deutlich sinnvoller ist als die mit vier Clustern. In Tabelle 6 ist erkennbar, dass im Cluster 1 die potamalen Fischgemeinschaften rund 58 % ausmachen, die rhithralen Gemeinschaften rund 42 %. Im Cluster 2 überwiegen die rhithralen Gemeinschaften deutlich. Während Cluster 2 näherungsweise als „Cluster der rhithralen Fischgemeinschaften“ charakterisieren werden könnte, sind die Verhältnisse in Cluster 1 annähernd ausgeglichen. Problematisch wirkt sich dabei der Umstand aus, dass die rhithralen Cypriniden-Gemeinschaften in beiden Clustern praktisch gleich stark vertreten sind. Dies spiegelt den „Übergangstatus“ dieser Fischgemeinschaft wider, zeigt aber gleichzeitig, dass eine Aufteilung in rhithrale und potamale Fischgemeinschaften anhand der Temperaturkurvenverläufe nicht hinreichend klar möglich ist. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Analysen zur Gruppierung anhand von Fischgemeinschaften.

Die Verteilungen bei der Clusterung mit vier Clustern sind aus fachlicher Sicht wenig befriedigend. Es ergeben sich jeweils zwei Cluster, in denen die rhithralen Fischgemeinschaften deutlich überwiegen sowie zwei weitere mit annähernd gleich starken Anteilen der beiden übergeordneten Gruppen „potamal“ und „rhithral“.

Beide Cluster-Analysen ergeben keine für die betrachtete Fragestellung geeignete Gruppierungen. Dies wird außerdem bekräftigt, wenn die Streuung der Regressionskoeffizienten innerhalb der Cluster betrachtet werden. Exemplarisch wird dies im Folgenden nur anhand eines Boxplot-Diagramms der 2-Kern-Clusterung gezeigt. In Abbildung 22 werden die Regressionskonstanten, welche die „Mitteltemperaturen“ beschreiben, dargestellt. Es ist bereits visuell erkennbar, dass sich die Verteilungen zwischen den beiden Gruppen deutlich unterscheiden. Allerdings betragen die Spannweiten der Mitteltemperaturen in beiden Gruppen jeweils rund 6 K. Diese Streuung ist zu groß, als dass eine solche Gruppierung zur Lösung der Problemstellung geeignet wäre.

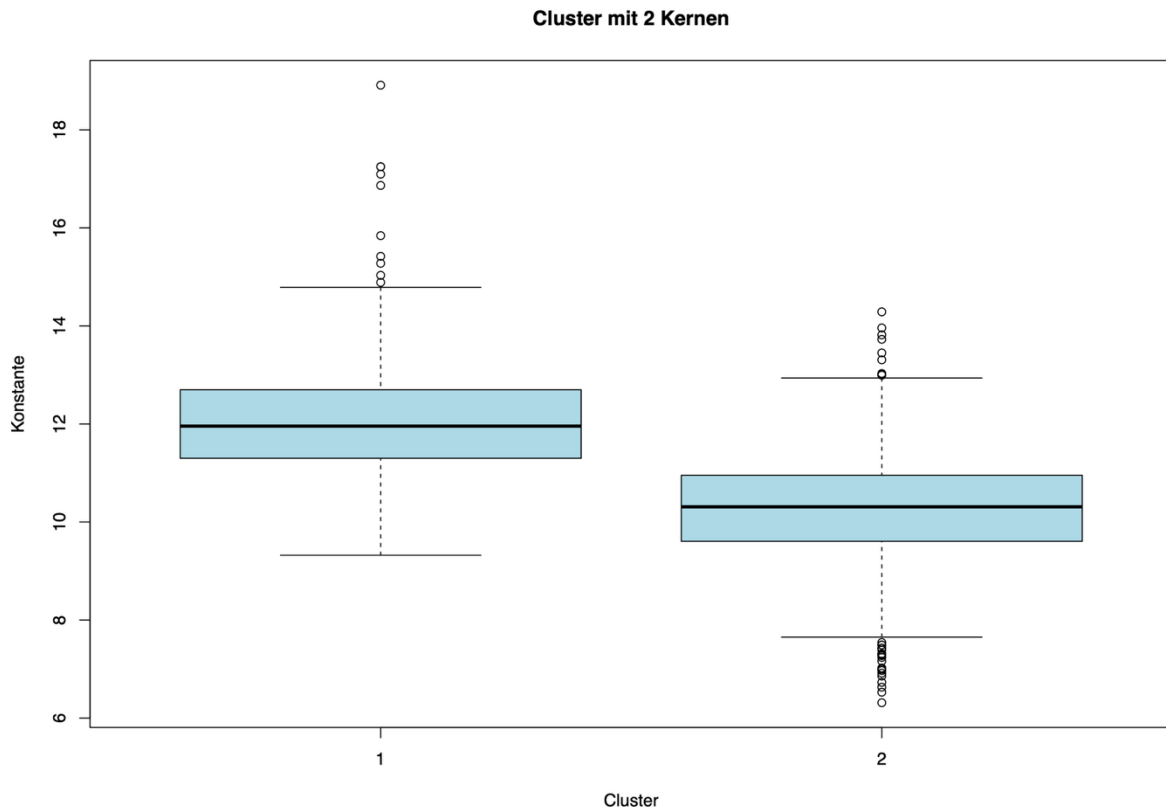


Abbildung 22: Verteilung der Regressionskonstanten auf die beiden Cluster der Analyse mit zwei Kernen.

Fazit:

- k-Means-Clusteranalysen teilen die Grundgesamtheit in Teilmengen auf, die fachlich nicht sauber zu trennen sind.
- Außerdem ist die Streuung innerhalb der Gruppen zu groß, um mit dieser Gruppierung die Problemstellung bearbeiten zu können.

Gruppierung der Messstellen anhand der Beschattung

Für 362 Stichproben-Messstellen aus Sachsen wurden Informationen zum Grad der Beschattung aus der Gewässerstrukturkartierung zugeordnet. Das Kartierverfahren unterscheidet bei diesem Einzelparameter die Zustandsmerkmale „sonnig“, „halbschattig“ und „schattig“. Dabei wurde – ausgehend von dem Gewässerstrukturabschnitt, an dem sich die Messstelle befand – die Beschattung einer 1 Kilometer langen Fließstrecke oberhalb der Messstelle ermittelt. Um die kategoriellen Attribute zu aggregieren, wurde der Modalwert der i.d.R. zehn 100 m langen Kartierabschnitte ermittelt. Als relevante Beschattung wurde also das Attribut herangezogen, welches am häufigsten auf dieser Strecke auftrat.

Für diese Messstellen wurden anhand der Monatswerte sinusoidale Regressionsmodelle erstellt. In 323 Fällen ergaben sich Modelle mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,9$.

Mittels nach Bonferroni korrigierter Wilcoxon-Tests wurde geprüft, ob sich die Koeffizienten der Regressionsmodelle zwischen den drei anhand der Beschattung gebilde-

ten Gruppen signifikant unterscheiden. Das Ergebnis war, dass für keine der drei möglichen Kombinationen signifikante Unterschiede auf dem Niveau 0,05 angenommen werden können. Allerdings unterscheiden sich die Koeffizienten der beiden Gruppen „schattig“ und „halbschattig“ auf dem Signifikanzniveau 0,1 von der Gruppe „sonnig“. Dies ist exemplarisch in Tabelle 10 für die Konstanten der Sinusoidal-Regressionen („Mitteltemperatur“) dargestellt.

Tabelle 10: Bonferroni-korrigierte p-Werte der Wilcoxon-Tests für die Regressionskonstanten (Mitteltemperaturen) der drei nach Beschattung unterschiedenen Gruppen.

	halbschattig	schattig
schattig	1	-
sonnig	0,069	0,056

Es wurde versucht, durch zusätzliche typologische Differenzierungen eine Verbesserung herbeizuführen.

Wird die obige Analyse z.B. nur für Gewässer der Fischgemeinschaft Sa-MR durchgeführt (N = 65), ergeben sich für keinen der Koeffizienten signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen. Das gleiche gilt, wenn z.B. nur Fälle des LAWA-Typs 5 betrachtet werden (N = 150). Auch wenn man die beiden Kriterien kombiniert (LAWA-Typ 5 und Fischgemeinschaft Sa-MR, N = 33) resultieren keine signifikanten Unterschiede.

Wenn bspw. die Kriterien LAWA-Typ 5 und Fischgemeinschaft Sa-ER (N = 87) kombiniert werden, resultieren für die sin- und cos-Terme ebenfalls keine signifikanten Unterschiede. Die Konstanten (also die mittleren Temperaturwerte) der drei Gruppen unterscheiden sich jedoch signifikant. Die Verteilung dieser Konstanten innerhalb der jeweiligen Gruppen, zeigt sich immer noch Spannweiten von 2,2 K bei besonnten und 4 K bei schattigen oder als halbschattig eingestuftten Messstellen (siehe Abbildung 23 und Tabelle 11).

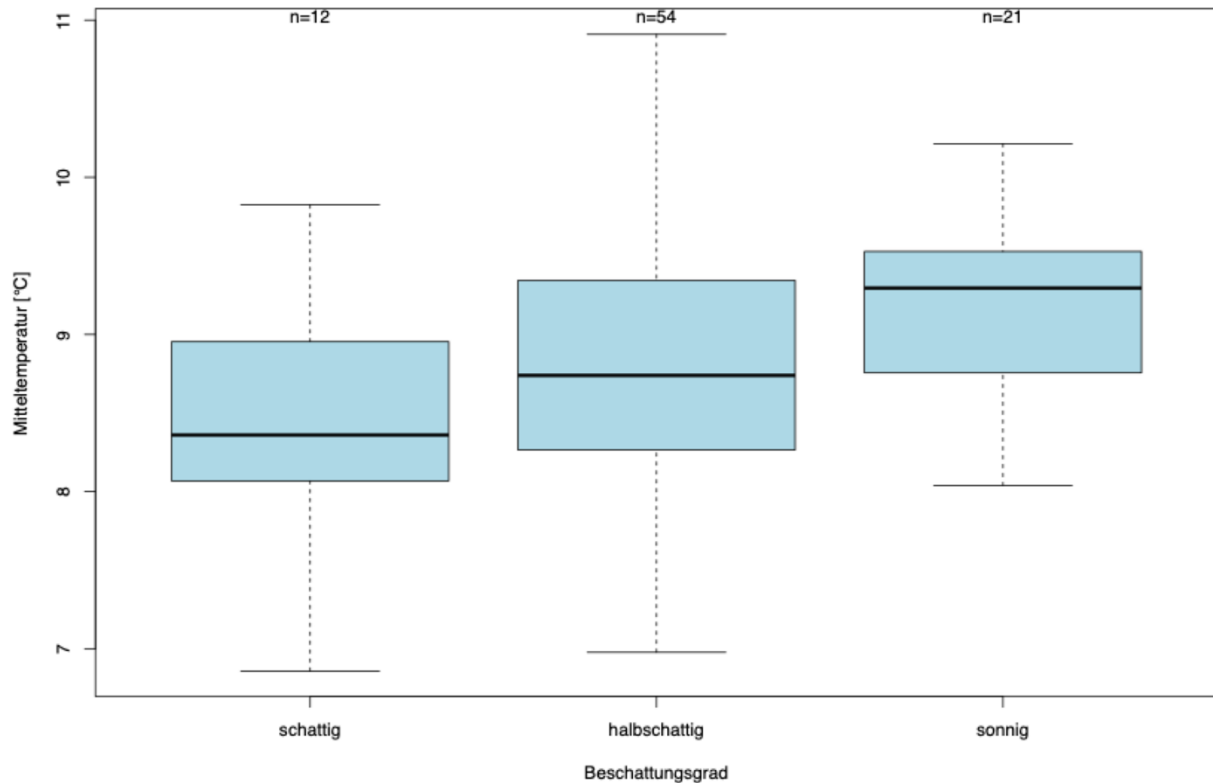


Abbildung 23: Boxplots der Verteilung der Konstanten der Regressionsfunktionen von Messstellen des LAWA-Typs 5 und der Fischgemeinschaft Sa-ER differenziert nach Beschattungsgrad.

Tabelle 11: Kennwerte der Boxplots in Abbildung 23.

Kennwert	Beschattungsgrad Schattig	Beschattungsgrad Halbschattig	Beschattungsgrad Sonnig
Unterer Whisker [°C]	6,86	6,98	8,04
25-Perzentil [°C]	8,17	8,27	8,76
Median [°C]	8,69	8,74	9,30
75-Perzentil [°C]	9,23	9,34	9,53
Oberer Whisker [°C]	10,6	10,9	10,2

Da sich die Regressionskoeffizienten zwischen den als halbschattig und den als schattig eingestuftten Messstellen nicht signifikant unterscheiden (siehe Tabelle 10), wurden diese beiden Gruppen zusammengeführt und die gemeinsame Gruppe als „schattig und halbschattig“ tituliert. Ein Wilcoxon-Test zeigt, dass sich auch hier nur die Regressionskonstanten signifikant unterscheiden. Das Ergebnis ist als Boxplot in Abbildung 24 visualisiert.

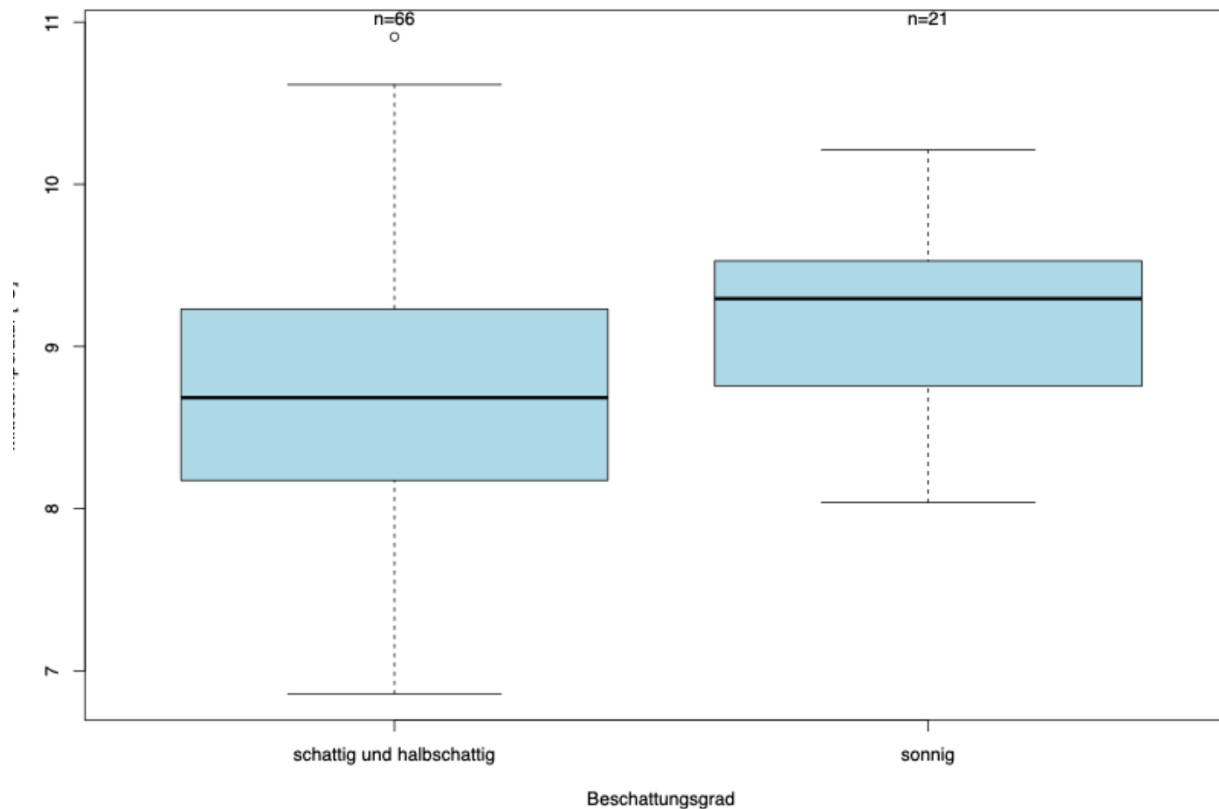


Abbildung 24: Boxplots der Verteilung der Konstanten der Regressionsfunktionen von Messstellen des LAWA-Typs 5 und der Fischgemeinschaft Sa-ER differenziert nach aggregiertem Beschattungsgrad.

Die Kennwerte der Boxplots sind in Tabelle 12 dargestellt. Da sich die Werteverteilungen in den beiden zusammengeführten Teilmengen „schattig“ und „halbschattig“ nicht signifikant unterscheiden, ergeben sich keine Veränderungen in den Kennwerten.

Tabelle 12: Kennwerte der Boxplots in Abbildung 24.

Kennwert	Schattig und Halbschattig	Sonnig
Unterer Whisker [°C]	6,86	8,04
25-Perzentil [°C]	8,17	8,76
Median [°C]	8,69	9,30
75-Perzentil [°C]	9,23	9,53
Oberer Whisker [°C]	10,6	10,2

Fazit:

- Die Mitteltemperaturen der Regressionsmodelle der langjährigen Monatswerte von Messstellen unterscheiden sich signifikant in Abhängigkeit von der Beschattung.

- Eine Verfeinerung des Ergebnisses durch zusätzliche Gruppierung anhand der Fischgemeinschaften oder der LAWA-Typen war nicht möglich.
- Erst bei Kombination der beiden Kriterien (Fischgemeinschaft und LAWA-Typ) ergaben sich wieder signifikante Unterschiede zwischen den nach Beschattungsgraden gruppierten Messstellen.
- Allerdings streuen die Kennwerte der Regressionsmodelle innerhalb der jeweiligen Gruppen zu stark, um damit eine für dieses Vorhaben verwertbare Differenzierung bilden zu können.

3.4.2 Bildung von Fallgruppen mit ähnlichen Jahresverläufen der Wassertemperatur basierend auf kontinuierlich erhobenen Messwerten

Die im Kapitel 3.4.1 beschriebenen Untersuchungen und Auswertungen wurden mit den kontinuierlichen Messdaten wiederholt.

Die folgenden Regressionsmodelle der kontinuierlichen Messdaten sind diesem Bericht als Anlage beigefügt:

- Sinusoidal-Regressionen der Jahresgänge
- Sinusoidal-Regressionen ausgewählter Tagesgänge (Tag 10 und Tag 200)

Dies umfasst

- Diagramme als PDF-Dateien
- Kenndaten der Messstellen und der Regressionsmodelle als Excel-Dateien

Gruppierung der Messstellen anhand der Fischgemeinschaften nach OGewV

Für die kontinuierlichen Temperaturdaten wurde geprüft, ob eine Gruppierung der Messstellen hinsichtlich ihrer Temperaturverläufe in ausreichender Genauigkeit auf Basis der Fischgemeinschaften nach OGewV möglich ist. Entscheidend ist dabei, ob sich die drei Koeffizienten der für die einzelnen Messstellen bestimmten Regressionsmodelle zwischen je zwei Fischgemeinschaften signifikant unterscheiden.

Alle Regressionskoeffizienten sind entsprechend den Fischgemeinschaften nach OGewV gruppiert worden. Es wurden lediglich Messstellen berücksichtigt, bei denen das Regressionsmodell ein Bestimmtheitsmaß von mehr als 0,9 und einen p-Wert $< 0,05$ aufweist.

Paarweise Wilcoxon-Tests der Daten der Fischgemeinschaften zeigen, dass die Werteverteilungen der jeweiligen drei Koeffizienten sehr oft signifikante Unterschiede zwischen den Fischgemeinschaften aufweisen. Die in Tabelle 13 fett hervorgehobenen Einträge stellen die Fälle dar, in denen die Null-Hypothese, dass sich zwei Gruppen nicht signifikant unterscheiden, nicht abgelehnt werden kann ($p > 0,05$). Dabei ist zu beachten, dass die p-Werte wegen der Wiederholung statistischer Tests einer Bonferroni-Korrektur unterzogen wurden.

Tabelle 13: Ergebnisse paarweiser Wilcoxon-Tests der Koeffizienten der Regressionsfunktionen der nach Fischgemeinschaften gruppierten Messstellen mit kontinuierlichen Messungen

FG1	FG 2	p-Werte cos-Terme	p-Werte sin-Terme	p-Werte Konstanten
Sa-ER	Sa-HR	0,03	0,16	< 0,01
Sa-ER	Sa-MR	0,24	1	1
Sa-HR	Sa-MR	1	0,12	1
Cyp-R	Sa-ER	< 0,01	1	< 0,01
Cyp-R	Sa-HR	< 0,01	1	0,01
Cyp-R	Sa-MR	0,36	0,99	0,22
Cyp-R	EP	0,87	0,95	1
Cyp-R	MP	1	1	1
EP	Sa-ER	< 0,01	0,03	< 0,01
EP	Sa-HR	< 0,01	1	0,07
EP	Sa-MR	1	0,03	0,56
EP	MP	1	0,95	1
MP	Sa-ER	< 0,01	1	< 0,01
MP	Sa-HR	0,004	1	0,15
MP	Sa-MR	0,44	1	0,39

Fazit:

- Da es lediglich eine Paarung gibt (EP – Sa-ER), bei der sich alle Verteilungen der Regressionskoeffizienten signifikant unterscheiden, erscheint eine weitergehende Aggregation (in Analogie zum Vorgehen bei den Stichprobendaten) nicht sinnvoll.
- Eine sinnvolle Gruppierung anhand der Kriteriums Fischgemeinschaft ist nicht möglich.

Gruppierung der Messstellen anhand von LAWA-Typen

Paarweise Wilcoxon-Tests der Daten der LAWA-Typen zeigen nur für 89 der 570 möglichen Kombinationen (ca. 16 %), dass die Werteverteilungen der jeweiligen Teilmen- gen für einen Koeffizienten signifikante Unterschiede aufweisen.

Exemplarisch ist dies anhand der Beziehungen zwischen den Regressionskonstanten der Beziehungen zwischen den einzelnen Typen dargestellt (Tabelle 14). P-Werte, die signifikante Unterschiede zwischen Regressionskonstanten verschiedener LAWA-Typen anzeigen, scheinen sich fast zufällig zu ergeben. So ist beispielweise weder eine durchgängige Systematik hinsichtlich einer Aggregation anhand von Ökoregionen noch bzgl. der Gewässergrößen zu erkennen.

Tabelle 14: Ergebnisse paarweiser Wilcoxon-Tests der Regressionskonstanten der nach LAWA-Typen gruppierten Messstellen mit kontinuierlichen Messungen – nur signifikante Unterschiede

Typ1	Typ2	p-Wert
2.1	1.2	0,0109
2.2	1.1	0,0413
2.2	1.2	< 0,0001
2.2	10	< 0,0001
3.1	2.2	0,0004
3.1	10	0,0006
3.2	2.2	< 0,0001
3.2	10	< 0,0001
3.2	19	0,0167
3.2	20	0,0180
3.2	21	0,0050
5	1.2	0,0093
5	2.2	0,0002
5	10	< 0,0001
5.1	2.2	0,0406
5.1	10	0,0025
9	1.2	0,0003
9	3.2	0,0001
9	10	< 0,0001
9.1	1.2	0,0020
9.1	3.2	0,0313
9.1	10	0,0004
9.1_K	1.2	< 0,0001
9.1_K	3.1	0,0002
9.1_K	3.2	< 0,0001
9.1_K	5	0,0002
9.1_K	5.1	0,0212
9.1_K	9	0,0134
9.2	1.2	< 0,0001
9.2	3.1	0,0029
9.2	3.2	< 0,0001
9.2	5	< 0,0001
9.2	9	< 0,0001

Typ1	Typ2	p-Wert
9.2	10	< 0,0001
10	1.2	< 0,0001
19	1.2	0,0139
20	1.2	0,0187
21	1.2	0,0187

Fazit:

- Da hinsichtlich der signifikanten Unterschiede zwischen den LAWA-Typen keine Systematik erkennbar ist, erscheint eine weitergehende Aggregation nicht sinnvoll.
- Eine sinnvolle Gruppierung anhand der Kriteriums LAWA-Typ ist nicht möglich.

Gruppierung der Messstellen durch Clusterung

Für den Gesamtbestand aller kontinuierlichen Datensätze (Messstelle mit Koeffizienten der Regressionsfunktion) wurde analog zum Vorgehen in Abschnitt 0 eine Cluster-Analyse durchgeführt. Von dem ursprünglichen Datensatz mit 664 Datensätzen verbleiben durch das Filterkriterium $R^2 > 0,9$ noch 653 Fälle. Vor Durchführung der Clusteranalyse wurde geprüft, ob die Variablen miteinander zu stark korreliert sind, da sonst diese Methode nicht sinnvoll anwendbar ist. Der Cosinus-Term ist mit dem Sinus-Term nur sehr schwach positiv korreliert ($R = 0,17$, Abbildung 15). Mit dem konstanten Term besteht eine negative Korrelation ($R = -0,59$, Abbildung 16).

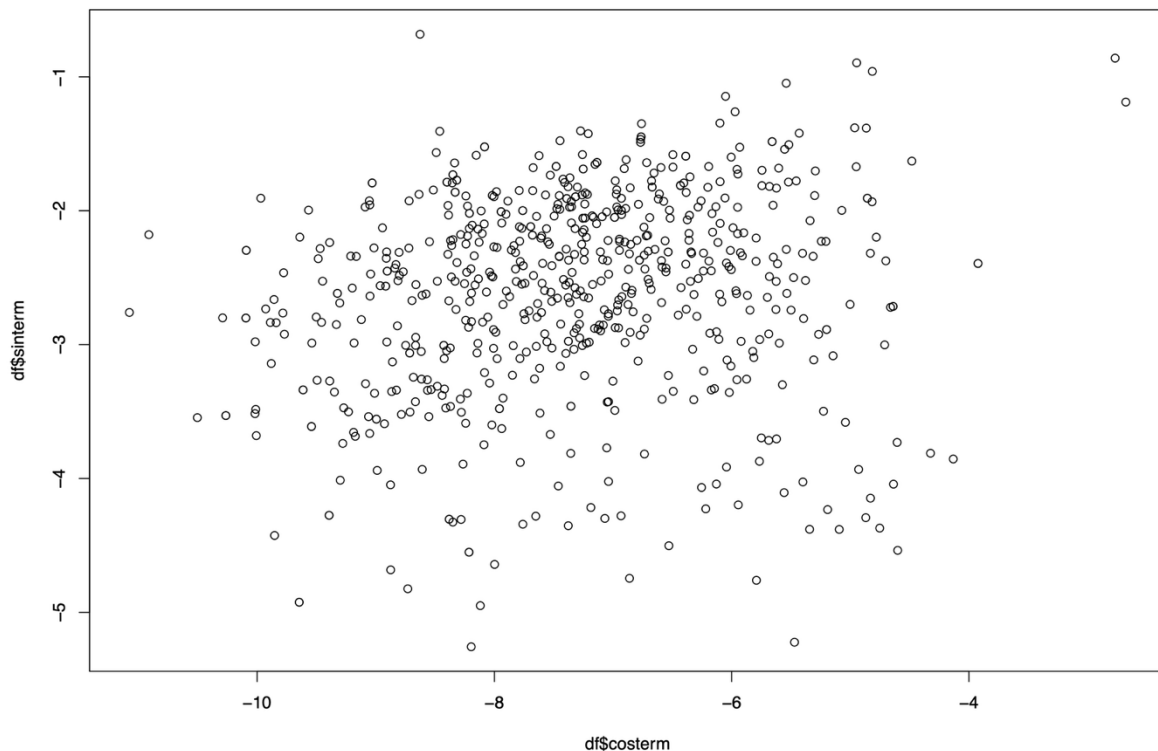


Abbildung 25: Streudiagramm der Koeffizienten (Cosinus- und Sinus-Term) der Sinusoidal-Regressionen (N = 653)

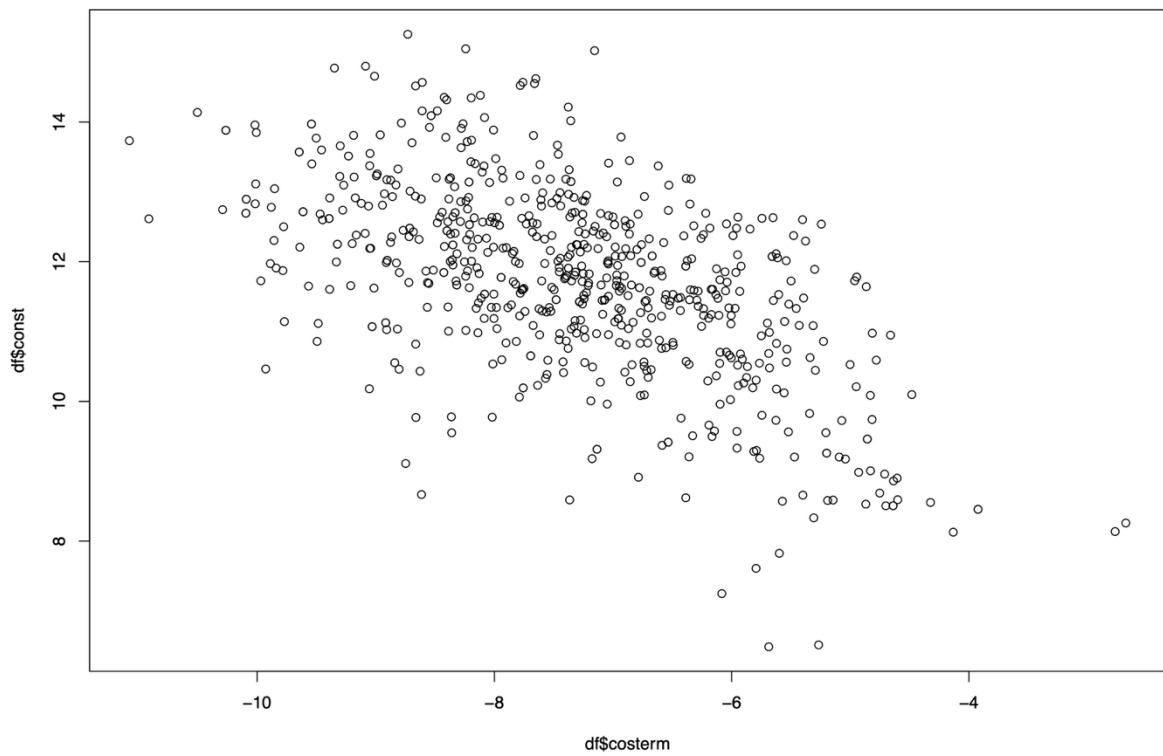


Abbildung 26: Streudiagramm der Koeffizienten (Cosinus-Term und Konstante) der Sinusoidal-Regressionen (N = 653)

Sinus-Term und Konstante sind nur schwach negativ miteinander korreliert ($R = -0,20$, Abbildung 27).

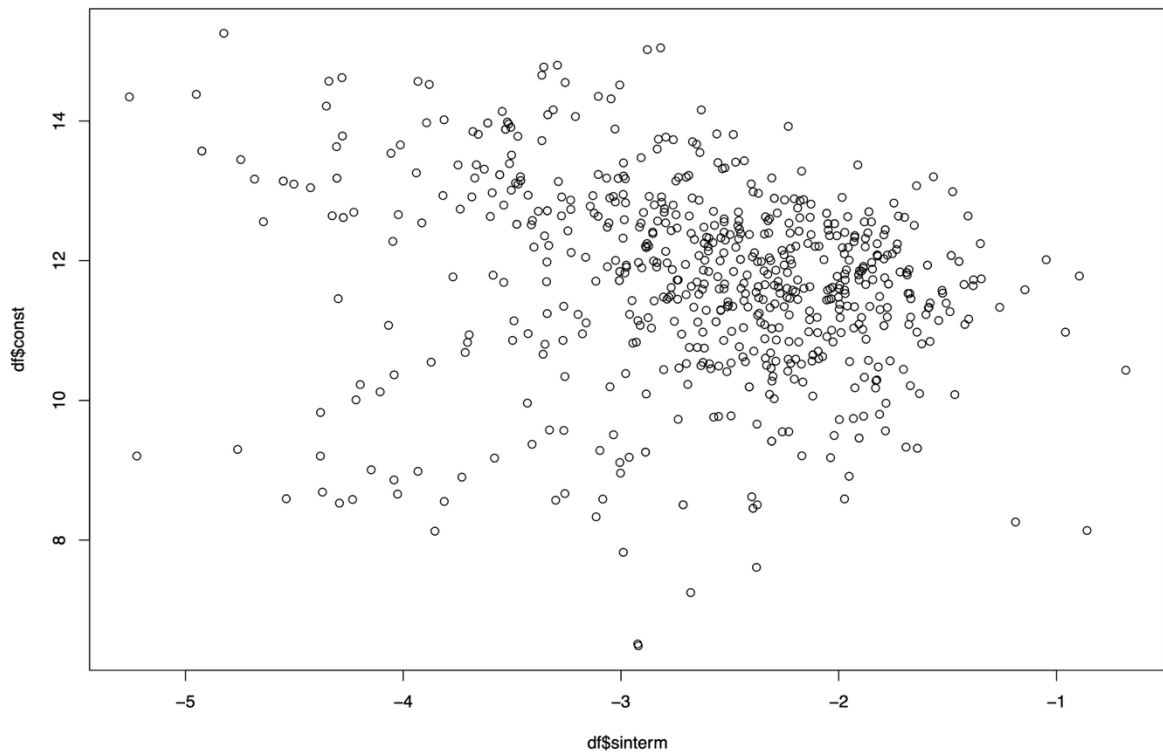


Abbildung 27: Streudiagramm der Koeffizienten (Sinus-Term und Konstante) der Sinusoidal-Regressionen (N = 653)

Obwohl zwei der drei Variablen miteinander korreliert sind, wurde aus Vergleichsgründen ebenfalls eine Cluster-Analyse durchgeführt. Nach Skalierung ergab das Elbow-Kriterium auch hier als optimale Cluster-Zahl 4 (Abbildung 28).

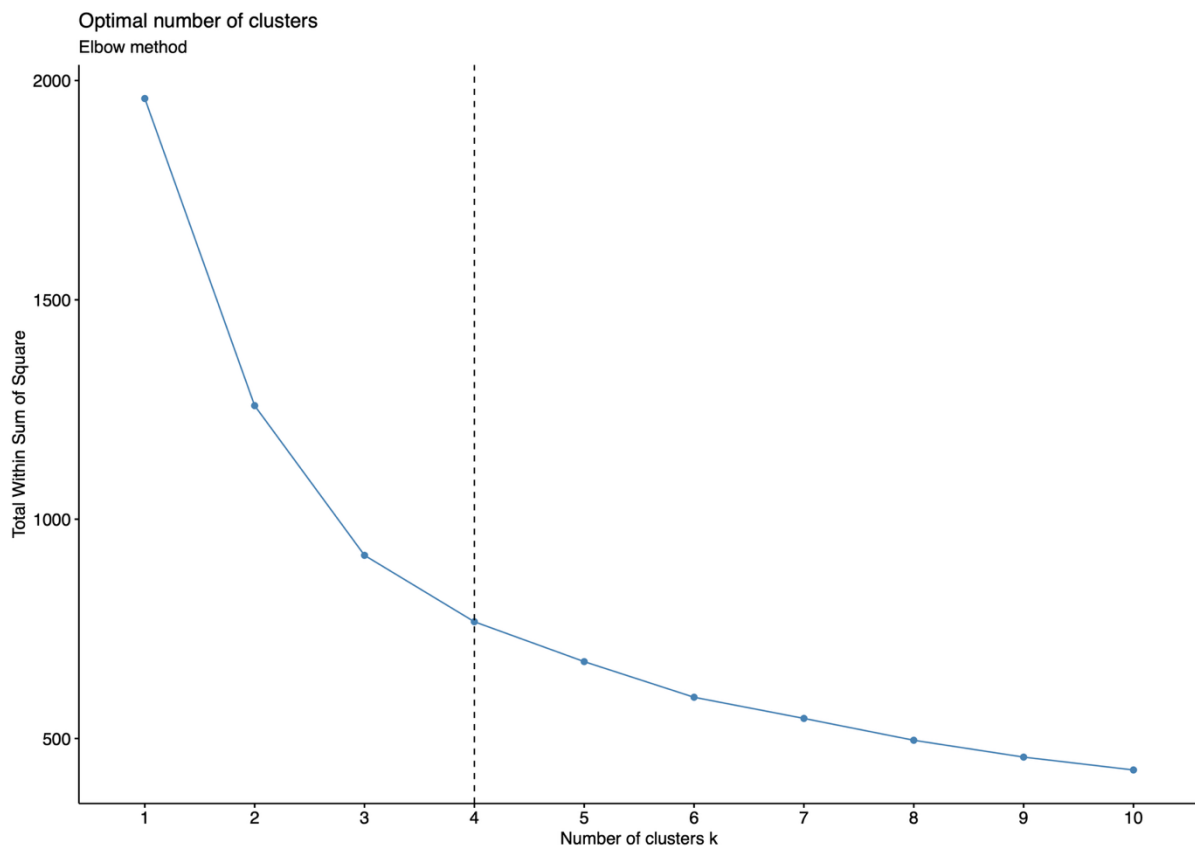


Abbildung 28: Ermittlung der optimalen Cluster-Zahl mit dem Elbow-Kriterium

Die Silhouette-Methode lieferte als Wert für die optimale Clusterzahl von 3. Da der Anstieg von $N = 2$ zu $N = 3$ aber bereits deutlich abnimmt (siehe Abbildung 19), wurden drei Clusteranalysen mit der k-Means-Methode mit 2, 3 und 4 Clustern durchgeführt.

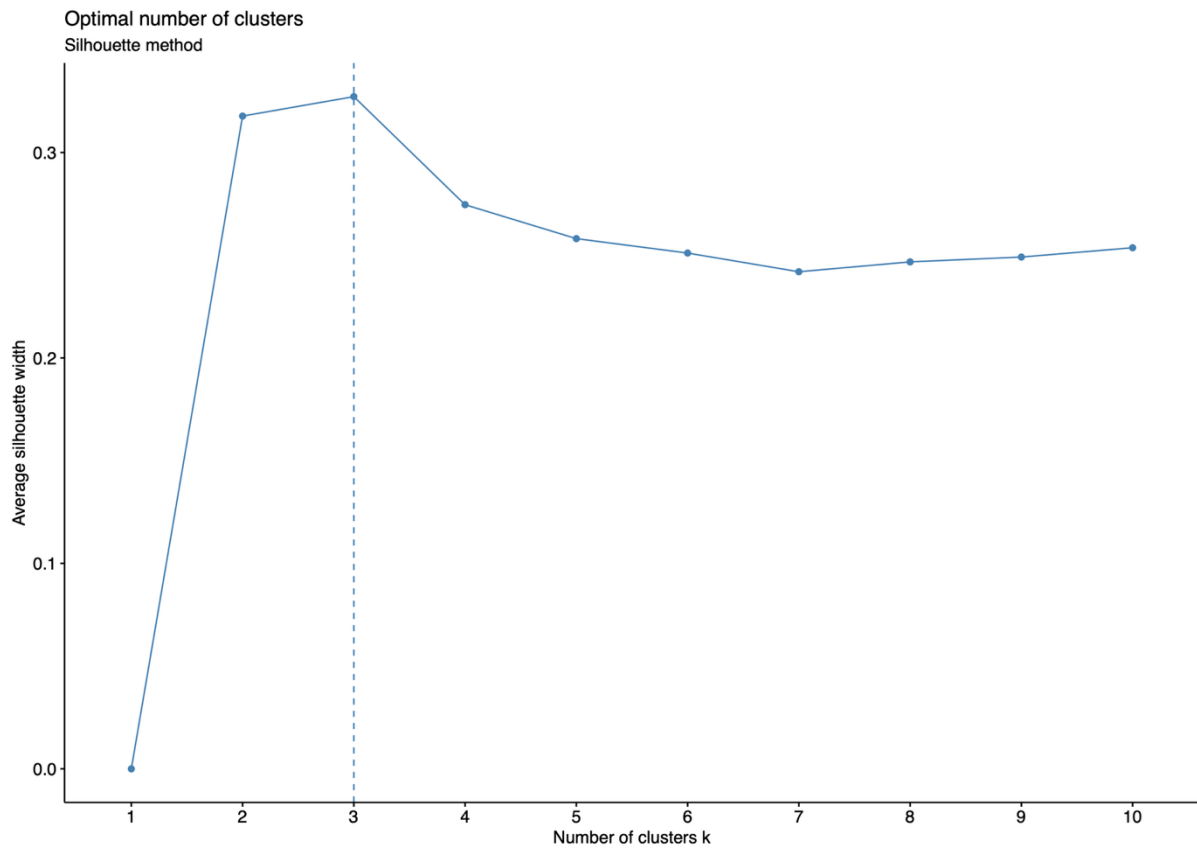


Abbildung 29: Ermittlung der optimalen Cluster-Zahl mit der Silhouette-Methode

Im Folgenden werden die Ergebnisse für diese Varianten dargestellt, u.a. siehe Abbildung 30 bis Abbildung 32.



Abbildung 30: Ergebnis der k-Means-Clusteranalyse mit 2 Kernen

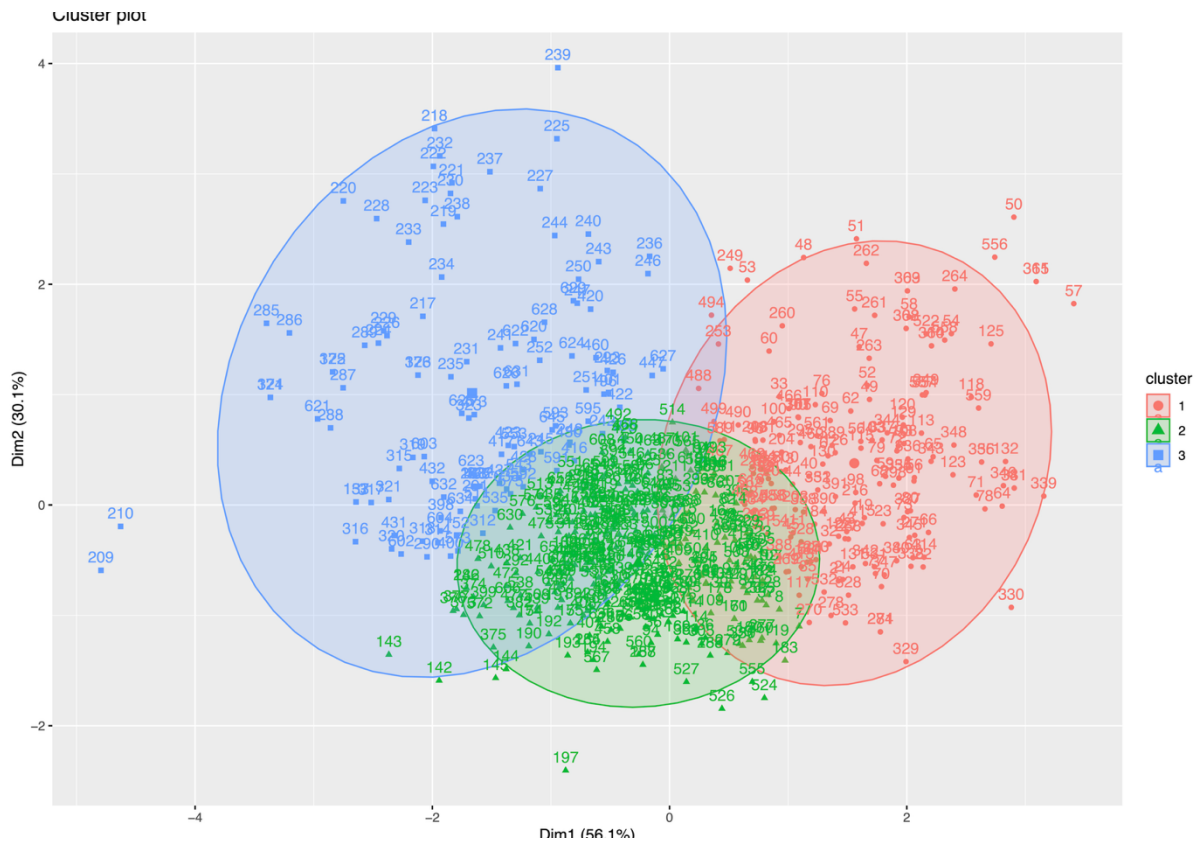


Abbildung 31: Ergebnis der k-Means-Clusteranalyse mit 3 Kernen



Abbildung 32: Ergebnis der k-Means-Clusteranalyse mit 4 Kernen

Um die resultierenden Cluster zu charakterisieren, ist in den folgenden Tabellen dargestellt, wie sich die verschiedenen Fischgemeinschaften auf die jeweiligen Cluster verteilen.

Tabelle 15: Verteilung der Fischgemeinschaften auf die Cluster der k-Means-Clusteranalyse mit 2 Clustern, C1 und C2

Kenngröße	HP	MP	EP	Cyp-R	Sa-HR	Sa-MR	Sa-ER
Anzahl (C1)		2	89	27	55	9	15
Anteil [%] (C1)		1,0	45,2	13,7	27,9	4,6	7,6
Anzahl (C2)		4	84	33	15		
Anteil [%] (C2)		2,9	61,8	24,3	11,0		

Die Summen der Gruppen "Potamal" und Rhithral" betragen im Cluster 1 46,2 bzw. 53,8 %. Die Summen der Gruppen "Potamal" und Rhithral" betragen im Cluster 2 64,7 bzw. 35,3 %.

Tabelle 16: Verteilung der Fischgemeinschaften auf die Cluster der k-Means-Clusteranalyse mit 3 Clustern, C1, C2 und C3

Kenngröße	HP	MP	EP	Cyp-R	Sa-HR	Sa-MR	Sa-ER
Anzahl (C1)		5	114	48	17		
Anteil [%] (C1)		2,7	62,0	26,1	9,2		
Anzahl (C2)		9	190	80	57	12	6
Anteil [%] (C2)		2,5	53,7	22,6	16,1	3,4	1,7
Anzahl (C3)			57	9	31	5	14
Anteil [%] (C3)			49,1	7,8	26,7	4,3	12,1

Tabelle 17: Anteilssummen der drei Cluster in den Gruppen "Potamal" und "Rhithral"

Kenngröße	Potamal	Rhithral
Summe [%] (C1)	64,7	35,3
Summe [%] (C2)	56,2	43,8
Summe [%] (C3)	49,1	50,9

Tabelle 18: Verteilung der Fischgemeinschaften auf die Cluster der k-Means-Clusteranalyse mit vier Clustern (C1 bis C4)

Kenngröße	HP	MP	EP	Cyp-R	Sa-HR	Sa-MR	Sa-ER
Anzahl (C1)	196	124	9	90	33	56	58
Anteil [%] (C1)	34,6	21,9	1,6	15,9	5,8	9,9	10,2
Anzahl (C2)	133	46	2	25	171	72	122
Anteil [%] (C2)	23,3	8,1	0,4	4,4	29,9	12,6	21,4

Kenngröße	HP	MP	EP	Cyp-R	Sa-HR	Sa-MR	Sa-ER
Anzahl (C3)	61	104	44	129	11	16	14
Anteil [%] (C3)	16,1	27,4	11,6	34,0	2,9	4,2	3,7
Anzahl (C4)	66	10		14	128	26	91
Anteil [%] (C4)	19,6	3,0		4,2	38,1	7,7	27,1

*: Abweichungen von 100% sind Rundungsfehler.

Tabelle 19: Anteilssummen der vier Cluster in den Gruppen "Potamal" und "Rhithral"

Kenngröße	Potamal	Rhithral
Summe [%] (C1)	58,1	41,8
Summe [%] (C2)	31,8	68,3
Summe [%] (C3)	55,1	44,8
Summe [%] (C4)	22,6	77,1

Keine der Clusterungen liefert eine, aus fachlicher Sicht sinnvolle Aufteilung.

Außerdem sind die Streuungen der Regressionskoeffizienten innerhalb der Cluster zu groß, als dass die zugrunde liegenden Gruppierungen zur Lösung der Aufgabe geeignet wären. Dies wird im Folgenden für alle drei Analysen anhand der Boxplot-Diagramme der Regressionskonstanten („Mitteltemperaturen“) dargestellt.

In Abbildung 33 und Abbildung 34 ist erkennbar, dass sich die Verteilungen zwischen den zwei bzw. drei Gruppen deutlich unterscheiden. Dagegen liefert die Cluster-Analyse mit vier Kernen eine Gruppe, die hinsichtlich der Mitteltemperaturen relativ stark mit einer zweiten Gruppe überlappt (Cluster 1 und 3 in Abbildung 35). Dies muss nicht zwangsläufig ein Problem darstellen, falls für mindestens einen der beiden anderen Regressionskoeffizienten ausreichend große Unterschiede der Wertebereiche bestehen. Dies ist aber nicht der Fall.

Außerdem sind auch hier die Spannweiten der Mitteltemperaturen innerhalb der jeweiligen Gruppen zu groß, als dass die Gruppierungen zur Lösung der Problemstellung geeignet wären.

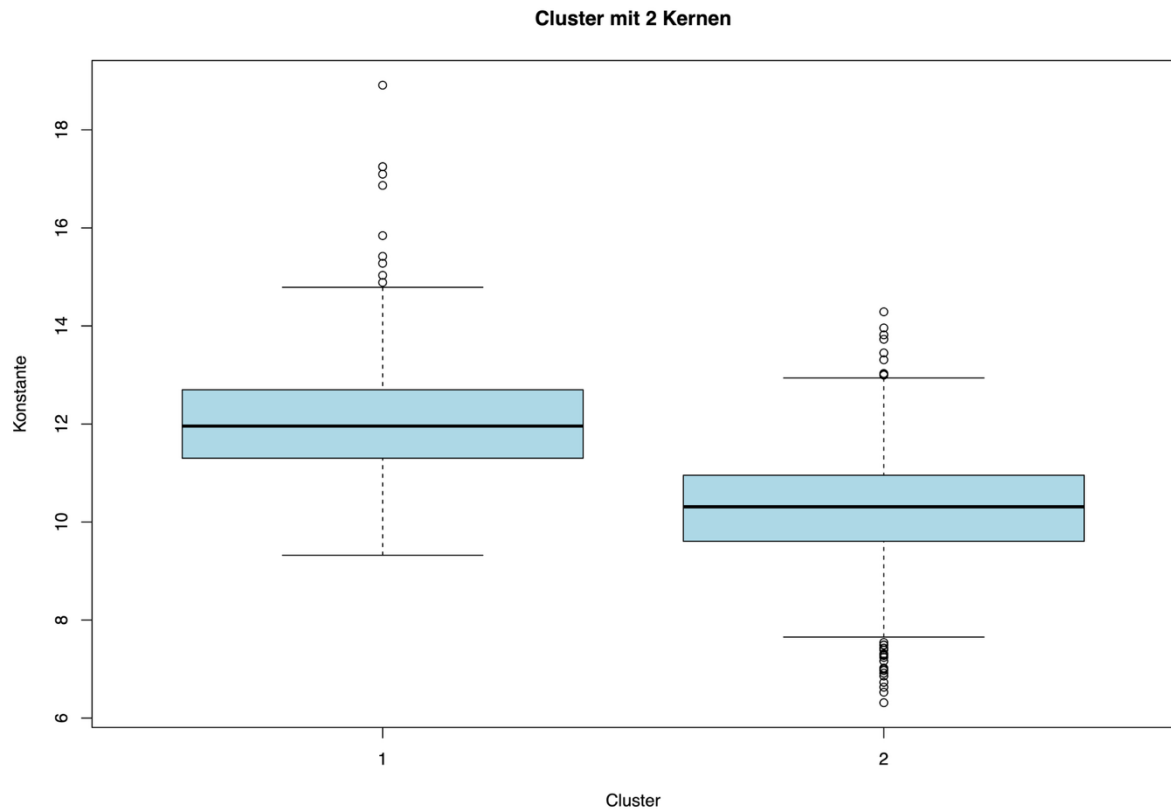


Abbildung 33: Verteilung der Regressionskonstanten auf die beiden Cluster der Analyse mit zwei Kernen

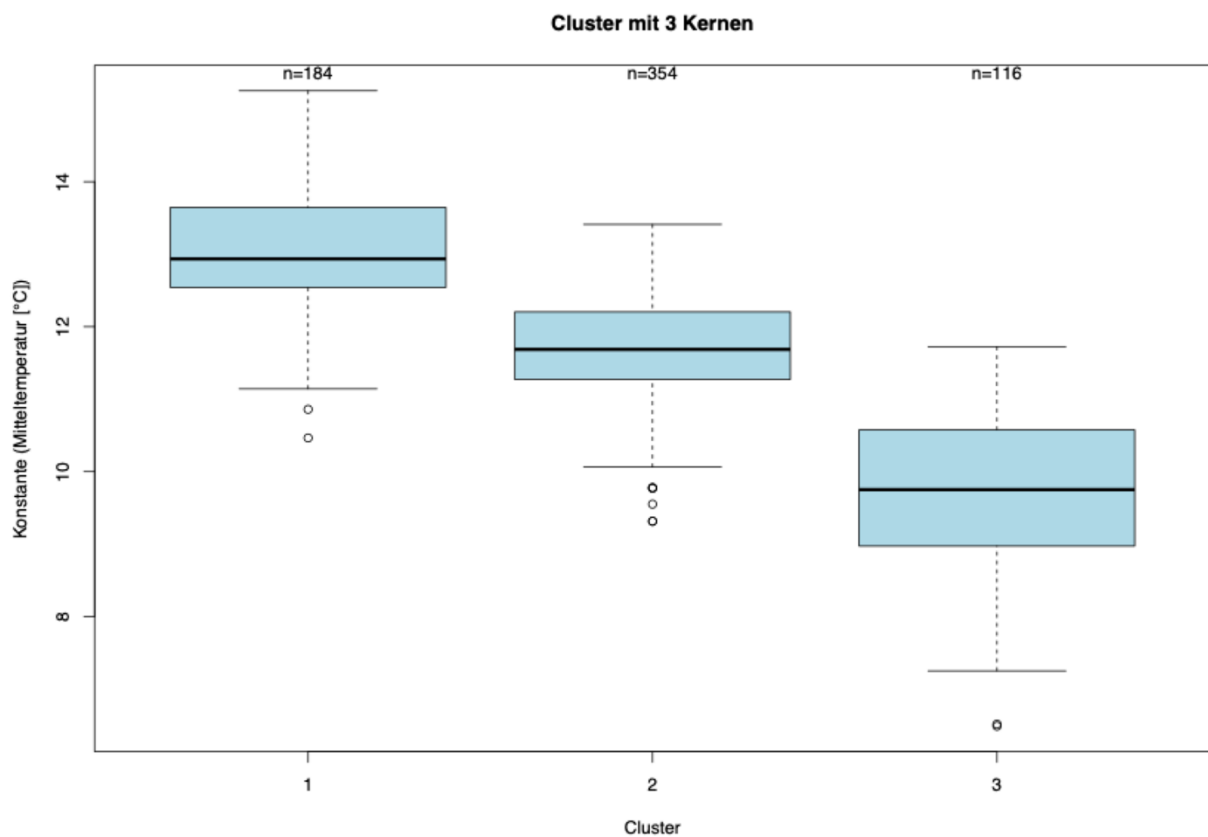


Abbildung 34: Verteilung der Regressionskonstanten auf die drei Cluster der Analyse mit drei Kernen

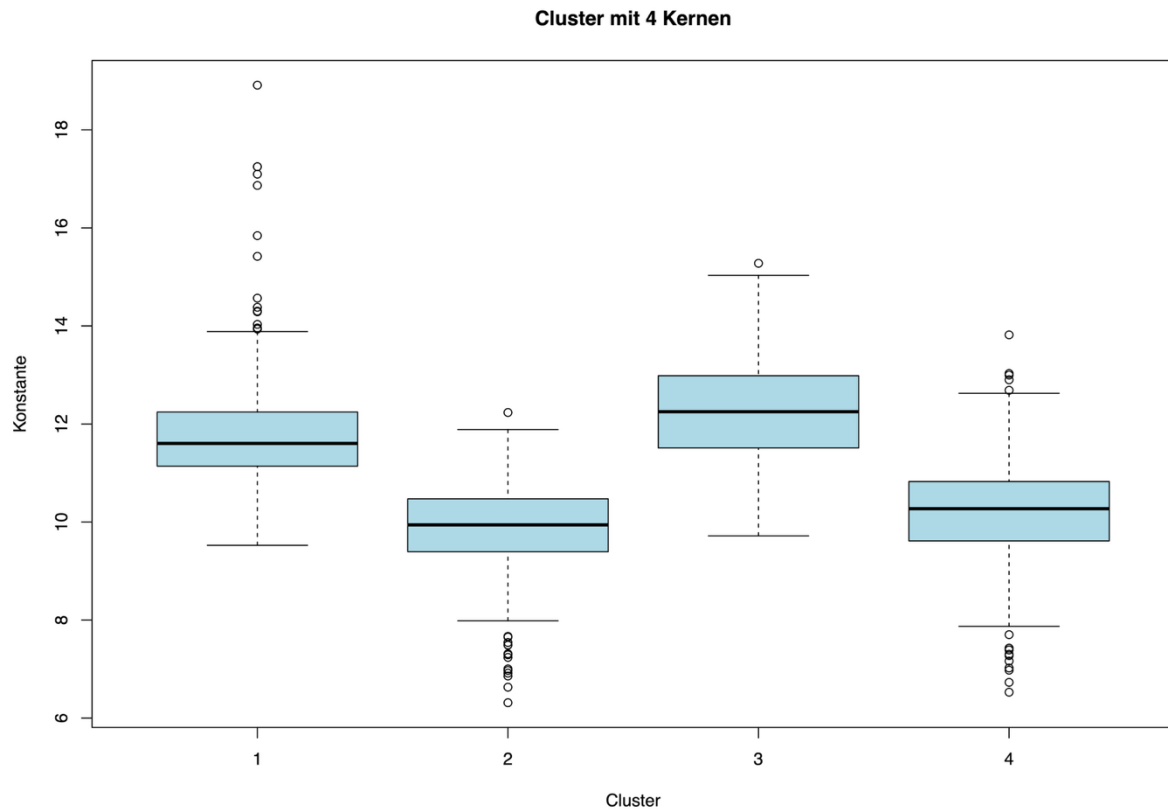


Abbildung 35: Verteilung der Regressionskonstanten auf die beiden Cluster der Analyse mit vier Kernen

Fazit:

- Auch bei kontinuierlichen Messstellen teilen k-Means-Clusteranalysen die Grundgesamtheit in Teilmengen auf, die fachlich nicht sauber zu trennen sind.
- Ebenso ist die Streuung innerhalb der Gruppen zu groß, um mit diesen Gruppierungen die Problemstellung lösen zu können.

Gruppierung der Messstellen anhand der Beschattung

62 Pegel aus Hessen, für die langjährige Temperaturtageswerte (Minima, Maxima, Mittelwerte) vorlagen, wurden Informationen zum Grad der Beschattung aus der Gewässerstrukturkartierung zugeordnet. Das Kartierverfahren unterscheidet bei diesem Einzelparameter die Zustandsmerkmale „sonnig“, „vollsonnig“ und „absonnig“. Dabei wurde – ausgehend von dem Gewässerstrukturabschnitt, an dem sich die Messstelle befand – die Beschattung einer 1 Kilometer langen Fließstrecke oberhalb der Messstelle ermittelt. Um die kategoriellen Attribute zu aggregieren, wurde der Modalwert der i.d.R. zehn 100 m langen Kartierabschnitte ermittelt. Als relevante Beschattung wurde also das Attribut herangezogen, welches am häufigsten auf dieser Strecke auftrat. Für diese Messstellen wurden anhand der Monatswerte sinusoidale Regressionsmodelle erstellt. In 58 Fällen ergaben sich Modelle mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,9$.

Mittels nach Bonferroni korrigierter Wilcoxon-Tests wurde geprüft, ob sich die Koeffizienten der Regressionsmodelle zwischen den drei anhand der Beschattung gebildeten Gruppen signifikant unterscheiden. Das Ergebnis war, dass für keine der drei möglichen Kombinationen signifikante Unterschiede auf dem Niveau 0,05 angenommen

werden können. Dies ist exemplarisch in Tabelle 20 für die Konstanten der Sinusoidal-Regressionen („Mitteltemperatur“) dargestellt.

Tabelle 20: Bonferroni-korrigierte p-Werte der Wilcoxon-Tests für die Regressionskonstanten (Mitteltemperaturen) der drei nach Beschattung unterschiedenen Gruppen

	absonnig	sonnig
sonnig	0,43	-
vollsonnig	1	0,66

Es wurde versucht, durch zusätzliche typologische Differenzierungen eine Verbesserung herbeizuführen. Wird die obige Analyse z.B. nur für Gewässer der Fischgemeinschaft EP durchgeführt (N = 21), ergeben sich für keinen der Koeffizienten signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen. Das gleiche gilt, wenn z.B. nur Messstellen an Salmonidengewässern (N = 36) betrachtet werden. Auch eine Aufteilung anhand von LAWA-Typen zeigt keine Verbesserungen. Dies gilt

- wenn nur Fälle des LAWA-Typs 5 (N = 25) betrachtet werden,
- wenn der LAWA-Typ 5.1 hinzugenommen wird (N = 31) und auch
- wenn nur Fälle der Typen 9, 9.1 und 9.2 (N = 24) berücksichtigt werden.

Werden die Kategorien „sonnig“ und „vollsonnig“ aggregiert, zeigt sich zwar ein signifikanter Unterschied der Verteilungen der cos-Terme, die Temperaturspannen der beiden Gruppen (Abbildung 36) überlappen jedoch vollständig.

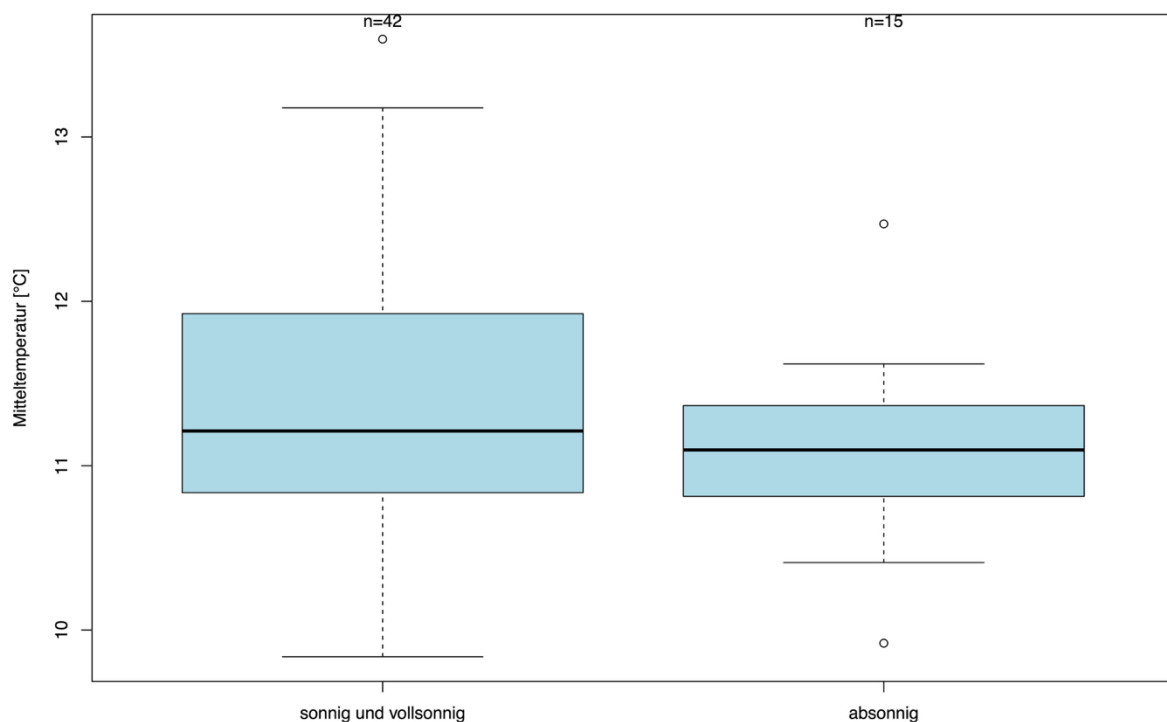


Abbildung 36: Boxplots der Verteilung der Konstanten der Regressionsfunktionen von kontinuierlichen Messstellen differenziert nach Beschattungsgrad

Aufgrund der geringen Fallzahlen ist eine weitere Aufteilung nicht sinnvoll.

Fazit:

- Die Mitteltemperaturen der Regressionsmodelle der langjährigen Tageswerte von Messstellen unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Beschattung nicht signifikant.
- Eine Verfeinerung des Ergebnisses durch zusätzliche Gruppierung anhand der Fischgemeinschaften oder der LAWA-Typen war nicht möglich.
- Außerdem streuen die Kennwerte der Regressionsmodelle innerhalb der jeweiligen Gruppen zu stark, um damit eine für dieses Vorhaben verwertbare Differenzierung bilden zu können.

3.4.3 Analyse der Jahresverläufe der Wassertemperatur hinsichtlich interanrueller Variabilitäten

Da die Ergebnisse der oben beschriebenen Fallgruppenbildungen keine befriedigenden Ergebnisse zeigten, wurde eine genauere Analyse der Jahresgänge vorgenommen, bevor weitere Kriterien (z.B. hydrogeologische Abgrenzungen, Höhenlagen, Quellabstand o.ä.) geprüft wurden, für die noch weitere Daten hätten beschafft werden müssen. Es wurde daher anhand der vorliegenden kontinuierlichen Messdaten analysiert, ob bzw. wie stark sich Jahrestemperaturverläufe an denselben Messstellen in verschiedenen Messjahren unterschieden.

Tabelle 21 zeigt exemplarisch die Verhältnisse an einer willkürlich ausgewählten Messstelle.

Tabelle 21: Modellierte und gemessene Kenngrößen von Temperaturjahresverläufen der Messstelle CAZ008 aus Baden-Württemberg in verschiedenen Jahren

Jahr	R2	cos-Term	sin-Term	const	Max-G	Max-M	Max-Tag	Min-G	Min-M	Min-Tag
2015	0,90	-5,45	-2,55	12,4	22	18	202	4,5	6,4	37
2016	0,88	-4,57	-2,18	11,7	18	17	241	4,7	6,6	366
2017	0,93	-6,37	-2,07	12,0	21	19	174	2,5	5,3	25
2018	0,94	-6,34	-2,31	13,2	22	20	218	5,2	6,4	57
2020	0,93	-6,35	-1,75	12,8	22	19	213	5,5	6,2	346
2021	0,89	-4,40	-1,61	11,2	18	16	172	4,4	6,5	16

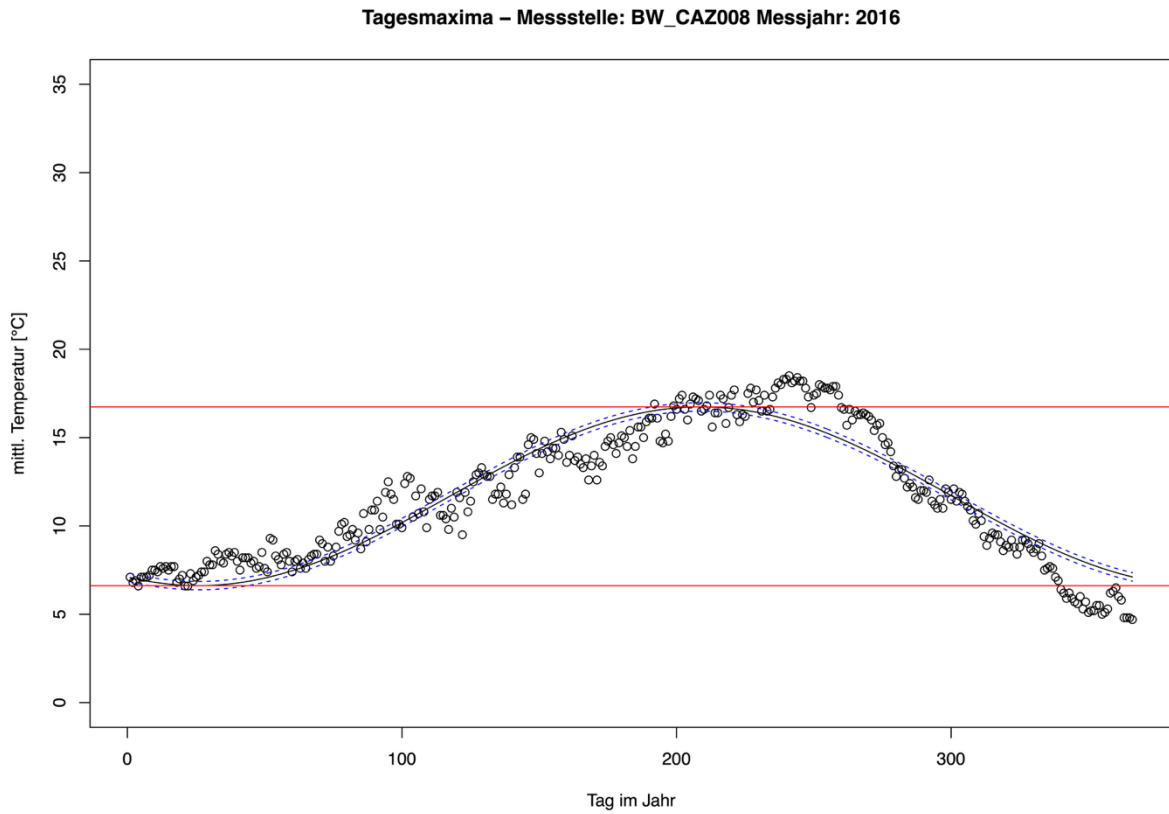


Abbildung 37: Temperaturjahresgang an der Messstelle CAZ008 im Jahr 2016

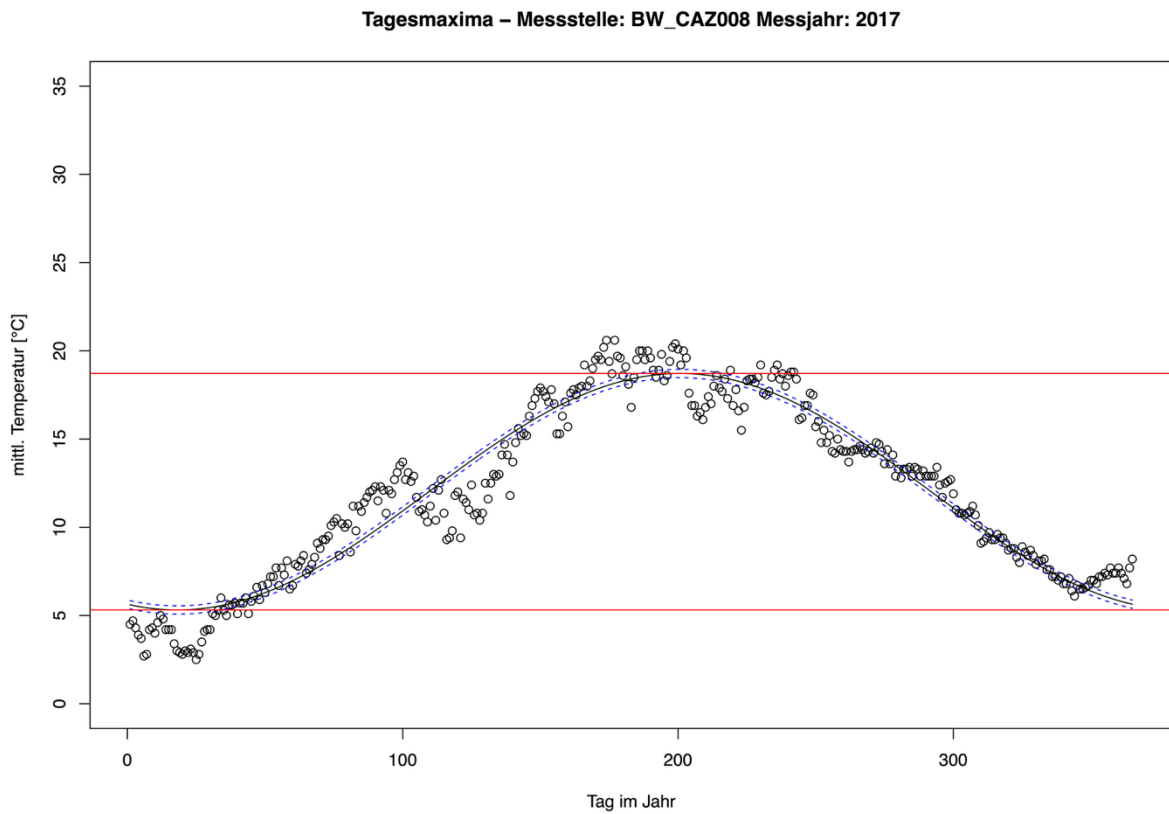


Abbildung 38: Temperaturjahresgang an der Messstelle CAZ008 im Jahr 2017

Diese Auswertung wurde für die Messstellen durchgeführt, für die Daten zu mindestens fünf vollständigen Jahresverläufen vorlagen (N = 117). In Tabelle 22 sind die mehrjährigen Mittelwerte der absoluten Spannen, der mittleren Spannen und der Standardabweichungen dargestellt.

Tabelle 22: Statistische Auswertung der Kenngrößen mehrjähriger Temperaturverläufe

Kenngröße	cos-Term	sin-Term	const	Max-G	Max-M	Max-Tag	Min-G	Min-M
MW (max-min)	1,6	1,3	1,6	3,6	2,6	62,2	2,6	2,1
MW (MW)	-7,1	-2,4	11,6	22,3	19,1	197,3	1,6	4,1
MW(Stdabw.)	0,6	0,4	0,5	1,3	0,9	22,4	0,9	0,7

Eine Auswertung der Minimums-Tage erfolgte nicht, da hier häufig Tage aus verschiedenen Jahren auftraten, was zu falschen Berechnungsergebnissen geführt hätte.

G: gemessen, M: modelliert

Fazit:

- Die Wertebereiche einzelner Messstellen streuen zwischen verschiedenen Jahren in vergleichbarer Größenordnung wie zwischen verschiedenen Messstellen in unterschiedlichen Naturräumen und/oder unterschiedlicher anthropogener Beeinflussung.
- Aus diesem Grund können die in Kapitel 3.4.1 und 3.4.2 gebildeten Messstellengruppierungen anhand ihrer langjährigen Jahrestemperaturverläufe nicht in ausreichender Trennschärfe durch naturräumliche und/oder anthropogene Einflüsse erklärt werden.
- Es erscheint daher nicht möglich, naturräumlich-anthropogene Gruppierungskriterien zur Bildung von „Jahrestemperaturverlaufs-Gruppen“ zu formulieren, um Korrekturfaktoren in ausreichender Genauigkeit ableiten zu können.

3.4.4 Analyse der Tagesgänge im langjährigen Verlauf

Die Gruppierung von Messstellen einheitlicher Tagesgänge ist ein wesentlich komplexeres Unterfangen als die Gruppierung anhand einheitlicher Jahresgänge, da neben der interanuellen Variabilität noch die jahreszeitabhängige Variation des Tagesgangs hinzukommt. Die Kurvenverläufe, die diese Oszillationen beschreiben, hängen somit – neben naturräumlichen und anthropogenen Faktoren – von zwei Zeitebenen ab: vom Tag-Nacht-Zyklus und von der Lage im Jahreszyklus. Um zu entscheiden, ob zwei Messstellen „ähnliche“ Temperaturkurven aufweisen und somit zu einer Gruppe zusammengefasst werden können, ist dies zu berücksichtigen. Allerdings zeigen auch hier schon einzelne Messstellen zwischen verschiedenen Jahren erhebliche Variabilität. Dies soll anhand folgender exemplarischer Auswertung verdeutlicht werden.

Tabelle 23 zeigt die statistischen Kenndaten der sinusoidalen Regressionskurven der Temperaturverläufe einer Messstelle am selben Tag (10.1.) in fünf verschiedenen Jahren (2015 bis 2020, fehlende Daten in 2016).

Tabelle 23: Kenngrößen von Temperaturtagesverläufen der Messstelle CAZ008 aus Baden-Württemberg am 10.1. in verschiedenen Jahren

Jahr	R2	p-Wert	cos-Term	sin-Term	const	Max-G	Min-G	Max-M	Min-M
2015	0,88	< 0,01	-0,269	-0,334	7,98	8,6	7,5	8,4	7,6
2017	0,81	< 0,01	0,038	-0,147	3,87	4	3,7	4,0	3,7
2018	0,91	< 0,01	-0,039	-0,287	7,96	8,3	7,7	8,2	7,7
2019	0,96	< 0,01	-0,075	-0,470	5,79	6,3	5,4	6,3	5,3
2020	0,89	< 0,01	-0,193	-0,572	6,43	7,1	5,8	7,0	5,8

G: gemessen, M: modelliert

Tabelle 24: Verhältnis Maximal- zu Minimalwert der Daten aus Tabelle 23

Kenngröße	cos-Term	sin-Term	const	Max-G	Min-G	Max-M	Min-M
max:min	7:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1

G: gemessen, M: modelliert

Das betragsmäßige Verhältnis des jeweils größten zum kleinsten Wert beträgt in den meisten Fällen 2:1, in einem Fall sogar 7:1. Die Verläufe an derselben Messstelle am selben Tag des Jahres unterscheiden sich also nicht nur hinsichtlich ihrer relativen Höhe, sondern auch hinsichtlich der Kurvenform. Es wird deutlich, dass sich die tagesbezogenen Daten in ähnlicher Größenordnung wie die Jahresverläufe (vgl. Kapitel 3.4.3) zwischen den verschiedenen Jahren unterscheiden. Abbildung 39 zeigt exemplarisch die betreffenden Temperaturverläufe in 2015 und 2017. Die horizontalen roten Linien stellen dabei die modellierten Minimal- und Maximaltemperaturen dar. Die vertikalen roten Linien deuten das Zeitfenster für Probenahmen bei Stichproben an (7 – 17 Uhr).

Für eine weitere Stichprobe an der gleichen Messstelle, z.B. am 200. Tag des Jahres (ca. 19.7.), ergibt sich ein ähnliches Bild. Hier ist allerdings die Streuung der Regressionskoeffizienten, die die Kurvenform bestimmen größer als die Werte, die die Kurvenlage steuern. Dennoch sind auch hier die Unterschiede erheblich. Dies zeigt auch Abbildung 40 deutlich, in der die Verläufe der Jahre 2017 und 2020 dargestellt sind.

Tabelle 25: Kenngrößen von Temperaturtagesverläufen der Messstelle CAZ008 aus Baden-Württemberg am 200. Tag des Jahres in verschiedenen Jahren

Jahr	R2	p-Wert	cos-Term	sin-Term	const	Max-G	Min-G	Max-M	Min-M
2015	0,87	< 0,01	-0,429	-0,706	16,6	17,6	15,8	17,4	15,8
2017	0,79	< 0,01	0,853	-0,409	17,5	19,2	16,5	18,4	16,5
2018	0,93	< 0,01	0,158	-1,188	17,03	18,6	15,9	18,2	15,9

Jahr	R2	p-Wert	cos-Term	sin-Term	const	Max-G	Min-G	Max-M	Min-M
2019	0,87	< 0,01	0,371	-1,39	18,96	21,4	17,5	20,4	17,5
2020	0,96	< 0,01	-0,0813	-0,815	16,20	17,1	15,5	17,0	15,4

G: gemessen, M: modelliert

Tabelle 26: Verhältnis Maximal- zu Minimalwert der Daten aus Tabelle 25

Kenngroße	cos-Term	sin-Term	const	Max-G	Min-G	Max-M	Min-M
max:min	10:1	3:1	1,2:1	1,3:1	1,1:1	1,2:1	1,1:1

G: gemessen, M: modelliert

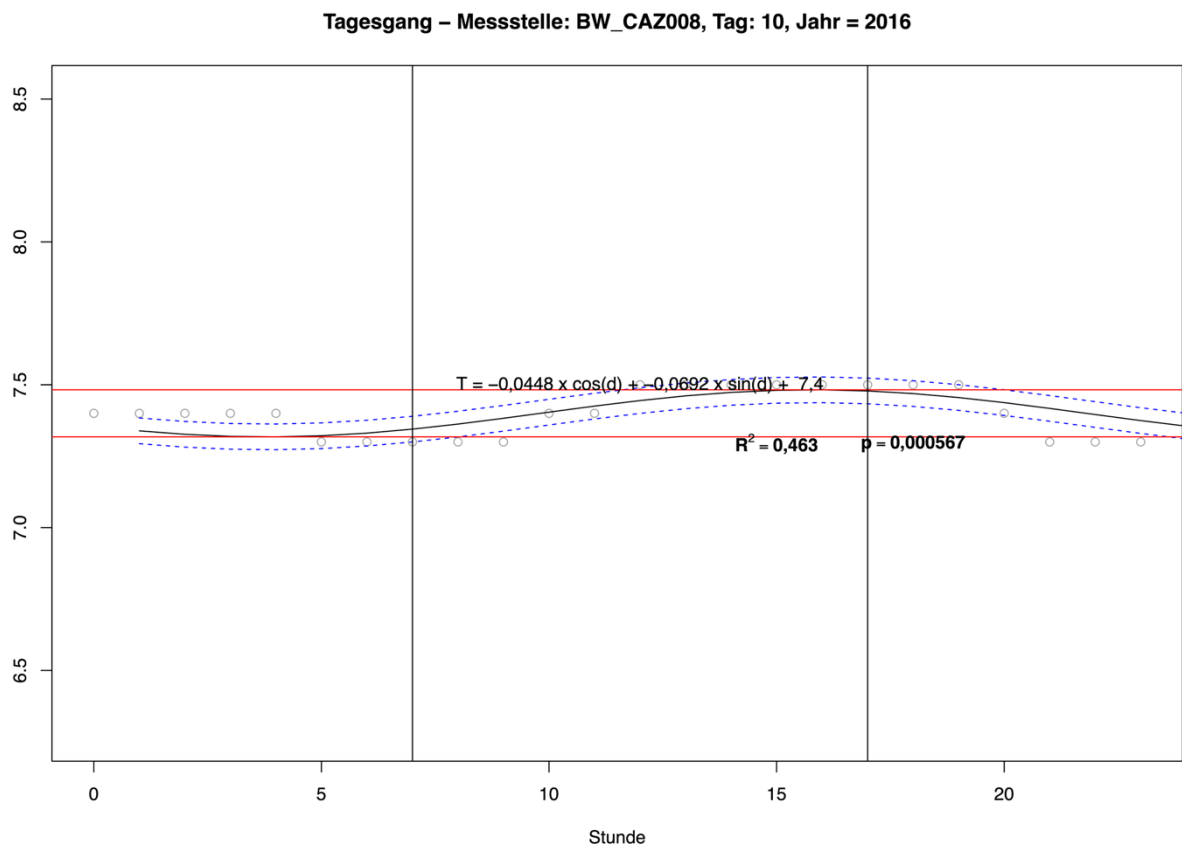
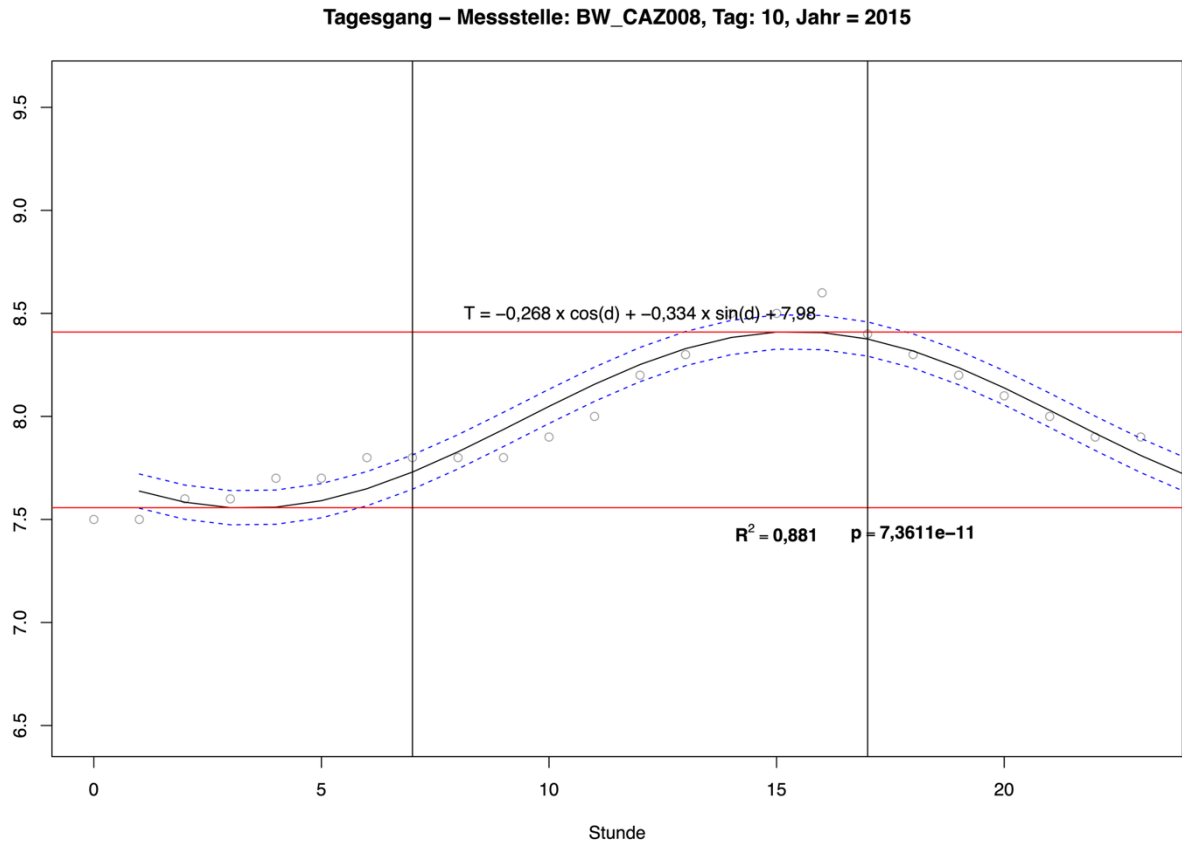


Abbildung 39: Temperaturtagesgänge an einer Messstelle am 10. Januar in zwei verschiedenen Jahren

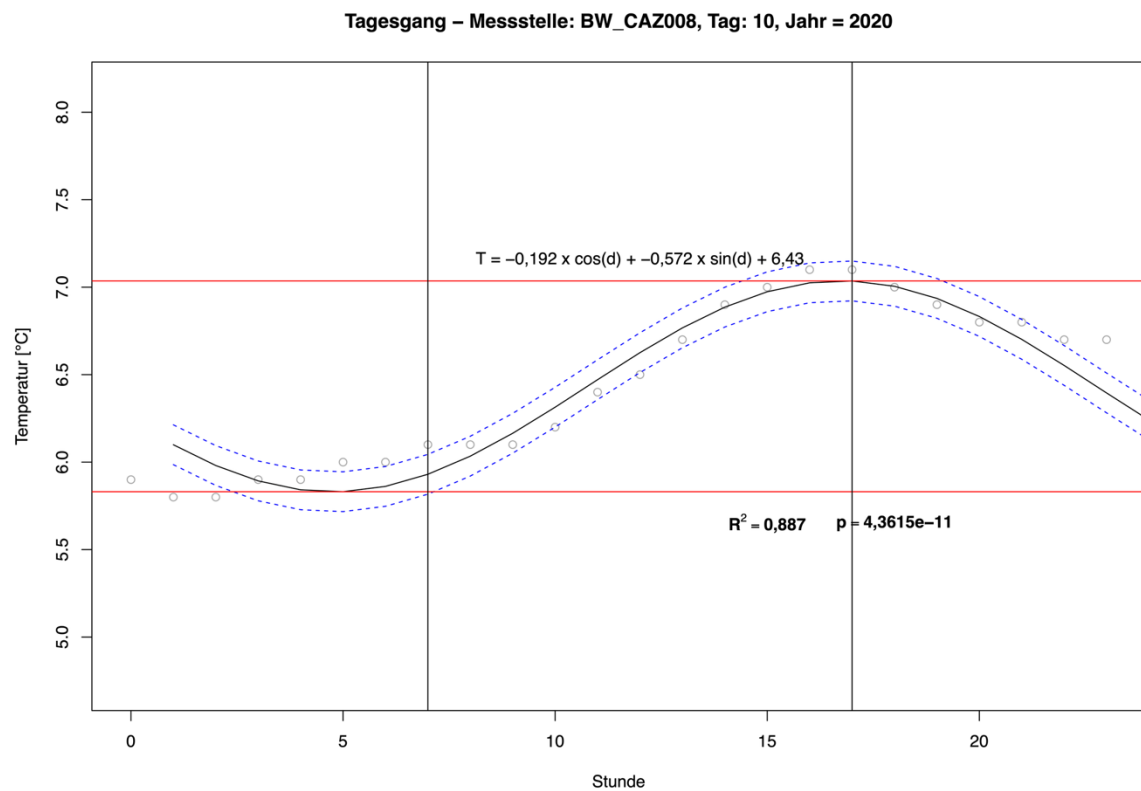
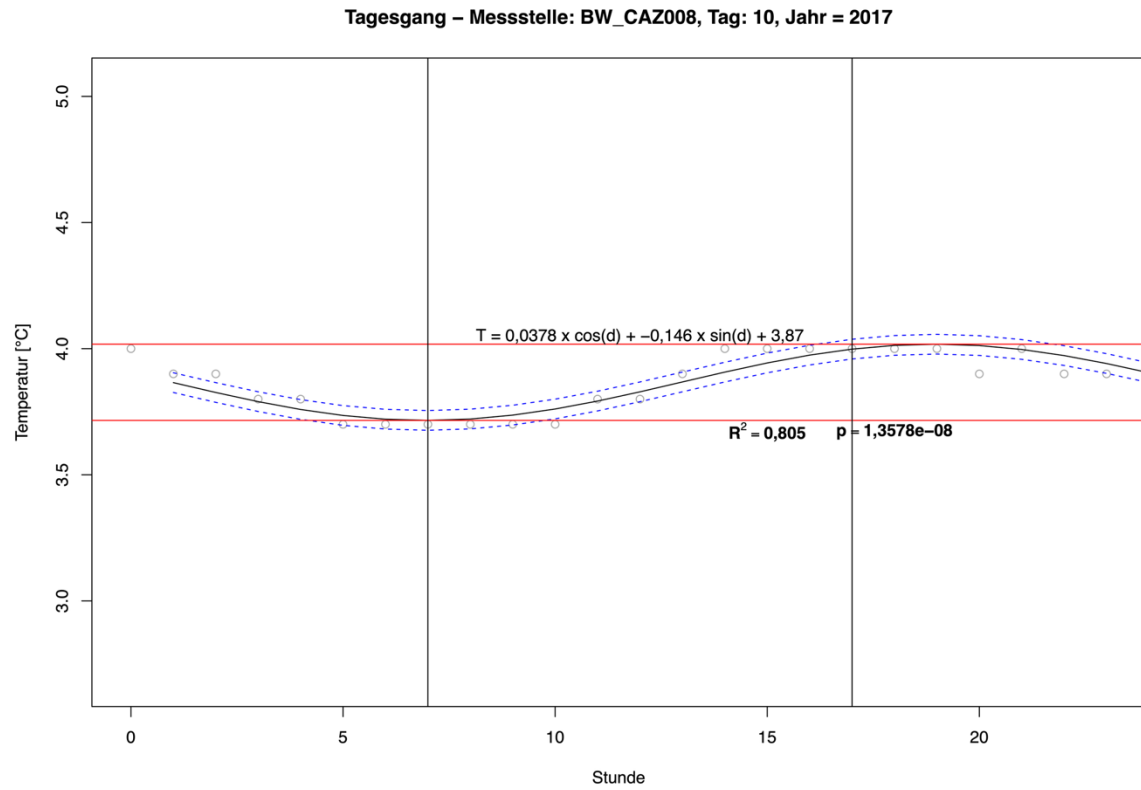


Abbildung 40: Temperaturtagesgänge an einer Messstelle am 200. Tag des Jahres in zwei verschiedenen Jahren

Zur weiteren Absicherung wurden die Tagesverläufe aller Messstellen ausgewertet, für die in mindestens 5 verschiedenen Jahren ein kompletter Tagesgang (24 Stundenmesswerte oder zu Stundenmesswerten aggregierbare Viertel- oder Halbstundenmesswerte) vorlag. Für Tag 10 eines Jahres waren es 94 Messstellen, für Tag 200 97 Messstellen. Die Ergebnisse der statistischen Auswertungen des mehrjährigen Vergleichs von Kenngrößen entsprechenden Temperaturverläufe sind für den 10. Tag eines Jahrs in Tabelle 27 und den 200. Tag in Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 27: Statistische Auswertung des mehrjährigen Vergleichs der Kenngrößen von Temperaturverläufen für den 10. Tag im Jahr

	cos-Term	sin-Term	const	Max-G	Max-M	Min-G	Min-M
MW (max-min)	0,64	0,98	5,19	5,40	5,49	5,06	5,17
MW (MW)	0,00	-0,10	4,76	5,18	5,08	4,37	4,44
MW(Stdabw.)	0,20	0,31	1,76	1,83	1,83	1,72	1,76

G: gemessen, M: modelliert

Tabelle 28: Statistische Auswertung des mehrjährigen Vergleichs der Kenngrößen von Temperaturverläufen für den 200. Tag im Jahr

	cos-Term	sin-Term	const	Max-G	Max-M	Min-G	Min-M
MW (max-min)	1,11	1,71	4,30	4,93	5,17	4,01	4,14
MW (MW)	-0,14	-0,92	17,22	18,39	18,44	15,99	16,01
MW(Stdabw.)	0,37	0,54	1,43	1,66	1,72	1,31	1,35

G: gemessen, M: modelliert

Es zeigt sich, dass an dem betrachteten Wintertag die Differenzen zwischen den an denselben Messstellen gemessenen Tageshöchstwerten in der gleichen Größenordnung liegen wie die Höchstwerte selber. Bei den Tagesminima liegen sie nur geringfügig darüber. Am betrachteten Sommertag liegen die Spannweiten in der gleichen Größenordnung wie an dem Wintertag. Die Streuung, dargestellt über die Standardabweichungen, liegen sommers wie winters in der gleichen Größenordnung (ein direkter Vergleich erscheint zulässig, da die zugrundeliegenden Fallzahlen annähernd identisch sind).

Fazit:

- Die interanuellen wetterbedingten Unterschiede zwischen verschiedenen Jahren beeinflussen die Temperaturverläufe an einer Messstelle in der gleichen Größenordnung wie naturräumliche oder anthropogene Faktoren.
- Es erscheint daher nicht möglich, naturräumlich-anthropogene Gruppierungskriterien zur Bildung von „Tagestemperaturverlaufs-Gruppen“ zu formulieren, um Korrekturfaktoren in ausreichender Genauigkeit ableiten zu können.

3.4.5 Schlussfolgerungen zu Ansatz 1

Die wesentlichen Ergebnisse des Ansatzes 1 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für verschiedene Aggregationen konnte zwar gezeigt werden, dass sich die Temperaturverläufe zwischen den Gruppen signifikant unterscheiden.
- Die Streuung der Kennwerte innerhalb der jeweils gebildeten Gruppen war aber so groß, dass damit keine fachlich sinnvollen Korrekturgrößen ableitbar erschienen.
- Weder eine langjährige Aggregation, noch eine zusätzliche "typologische" Aggregation konnten das Problem lösen.
- Eine Ursache dafür ist, dass bereits an jeder einzelnen Messstelle die Wetter bedingten Unterschiede zwischen den Jahren zu groß sind.
- Dies betraf sowohl Jahrestemperaturverläufe als auch Tagesgänge.

3.5 Ansatz 2: Abweichungsanalysen von a priori gruppierten Stichprobendaten der Wassertemperaturen von unterschiedlichen Maximalwerten

Vor dem Hintergrund, dass der Lösungsansatz 1 nicht die erfolgversprechenden Ergebnisse liefern konnte, wurde ein zweiter alternativer Ansatz entwickelt, um geeignete Korrekturfaktoren für Tages- und Jahresmaximalwerte ableiten zu können. Dazu wurde die Ableitung bestmöglicher Korrekturfaktoren für a priori nach Fischgemeinschaften, Kalendermonaten und/oder Jahreszeiten gruppierte Stichprobendaten zur Annäherung an Tages-, Monats- und saisonale Maximaltemperaturen vorgenommen und anschließend die so abgeleiteten Korrektur- bzw. Umrechnungsfaktoren anhand von Beispielfällen getestet.

3.5.1 Korrektur von Stichprobenwerten zur Annäherung an Tagesmaxima, Monatsmaxima sowie an Sommer- und Wintermaxima

Korrektur von Stichprobenwerten zur Annäherung an Tagesmaxima

Es wurden für die kontinuierlichen Messdaten für jeden Tag Tagesmaxima und Differenzen zu den jeweiligen Stundenwerten ermittelt. Anschließend wurden die prozentualen Anteile der Stundenwerte an den Tagesmaxima, sowie die absolute Differenz zwischen Tagesmaxima und Stundenwerten bestimmt. Die Daten wurden mittels geeigneter Perzentile aggregiert. Das arithmetische Mittel ist für die Aggregation nicht geeignet, da die Daten nicht normalverteilt sind, sondern eine erhebliche Linksschiefe aufweisen.

Es wurden für jede Stunde folgende Kenngrößen ermittelt:

- **5-Perzentil der prozentualen Anteile am Tagesmaximum („5-Perz. Anteil T-Max [%]“)** gibt an, wie groß der prozentuale Anteil am Tagesmaximum ist, der von höchstens 5 % aller Fälle unterschritten wird
- **Median der prozentualen Anteile am Tagesmaximum („50-Perz. Anteil T-Max [%]“)** gibt an, wie groß der prozentuale Anteil am Tagesmaximum ist, der von der Hälfte aller Fälle unterschritten wird

- **Median der absoluten Differenz zum Tagesmaximum („50-Perz. abs. [K]“)** gibt an, um wieviel Kelvin die Hälfte aller Fälle mindestens unter dem Tagesmaximum liegen
- **95-Perzentil der absoluten Differenz zum Tagesmaximum („95-Perz. abs. [K]“)** gibt an, um wieviel Kelvin 95 % aller Fälle höchstens unter dem Tagesmaximum liegen

Diese Analysen wurden auf verschiedenen Differenzierungsebenen durchgeführt.

Tabelle 29 zeigt die Ergebnisse ohne jegliche zeitliche oder typologische Differenzierung für Zeiten zwischen 7 und 17 Uhr. Konkret besagt die Tabelle, dass bei Messungen, die an einer beliebigen Messstelle an einem beliebigen Tag durchgeführt werden, um 7 Uhr morgens 5 % der Messwerte (Zeile „5-Perz. Anteil T-Max [%]“) höchstens 60 % des Tagesmaximums und 50 % der Messwerte mindestens 89 % des Tagesmaximums (Zeile „50-Perz. Anteil T-Max [%]“) erreichen. Bezogen auf absolute Differenzen gilt, dass der Median der absoluten Differenzen von um 7 Uhr durchgeführten Messungen bei 1,1 K liegt (Zeile „50-Perz. abs. [K]“), während 5 % der um 7 Uhr gewonnenen Messwerte mindestens 4,2 K unterhalb des Tagesmaximums liegen (Zeile „95-Perz. abs. [K]“). Diese Differenzen verringern sich im Laufe des Tages, so dass ab ca. 13 Uhr 95% der Messwerte nur noch um 20% und weniger vom Tagesmaximum abweichen.

Tabelle 29: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	60	60	61	64	69	74	80	84	86	87	87
50-Perz. Anteil T-Max [%]	89	88	89	90	91	93	95	96	98	98	99
50-Perz. abs. [K]	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9	0,7	0,5	0,4	0,2	0,2	0,1
95-Perz. abs. [K]	4,2	4,1	3,8	3,4	2,8	2,3	1,8	1,4	1,1	1,0	1,0

Führt man diese Analysen differenziert nach Jahreszeiten durch (Tabelle 30 bis Tabelle 33) und prüft dann mittels Wilcoxon-Tests, ob sich die Reihen der Korrekturwerte zwischen den Jahreszeiten signifikant unterscheiden. Dadurch kann lediglich für die 5-Perzentile der relativen Anteile am Tagesmaximum (Zeile „5-Perz. Anteil T-Max [%]“) die Nullhypothese, dass es keinen Unterschied gibt, auf dem 5 %- Niveau verworfen werden (nach Bonferroni-Korrektur).

Tabelle 30: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Frühjahr

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	64	65	67	71	75	80	84	87	89	90	89
50-Perz. Anteil T-Max [%]	81	81	82	84	87	90	93	95	97	98	98
50-Perz. abs. [K]	2,2	2,1	2,0	1,8	1,5	1,2	0,9	0,6	0,4	0,3	0,3
95-Perz. abs. [K]	4,7	4,6	4,2	3,8	3,2	2,6	2,1	1,7	1,5	1,4	1,4

Tabelle 31: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Sommer

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	79	79	80	83	85	88	90	92	93	94	94
50-Perz. Anteil T-Max [%]	88	88	89	90	92	93	95	97	98	98	99
50-Perz. abs. [K]	2,1	2,1	2,0	1,8	1,5	1,2	0,9	0,6	0,4	0,3	0,3
95-Perz. abs. [K]	4,1	4,0	3,7	3,3	2,8	2,3	1,8	1,5	1,2	1,2	1,2

Tabelle 32: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Herbst

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	82	81	82	83	85	87	89	90	91	91	90
50-Perz. Anteil T-Max [%]	92	92	92	93	94	95	97	98	99	99	98
50-Perz. abs. [K]	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
95-Perz. abs. [K]	1,7	1,8	1,6	1,5	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	1,0	1,0

Tabelle 33: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Winter

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	59	58	59	62	65	69	74	78	80	80	79
50-Perz. Anteil T-Max [%]	84	84	84	85	87	90	92	95	96	97	96
50-Perz. abs. [K]	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,3
95-Perz. abs. [K]	2,0	2,0	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	1,0	0,9	1,0

Anders formuliert bedeutet dies, dass es statistisch keinen signifikanten Unterschied macht, ob man die nur nach Tageszeit differenzierten Abweichungskenngrößen der Tabelle 29 heranzieht oder zusätzlich nach Jahreszeiten differenziert.

Eine analoge Aufteilung nach Monaten wurde ebenfalls berechnet (aber hier nicht dargestellt). Bonferroni-korrigierte Wilcoxon-Tests zeigten, dass nur sehr wenige paarweise Vergleiche signifikante Unterschiede erwarten lassen (Tabelle 34). Daraus lässt sich schließen, dass auch eine monatsweise Differenzierung von Korrekturfaktoren keine signifikante Verbesserung einer möglichen Korrektur von Einzelmessungen erwarten lässt.

Tabelle 34: Ergebnis der Wilcoxon-Tests monatsbezogener Korrekturwerte für Stundenmessungen

Kenngröße	Anzahl Vergleiche mit signifikanten Unterschieden
5-Perz. Anteil T-Max [%]	17 von 121 Vergleichen
50-Perz. Anteil T-Max [%]	0 von 121 Vergleichen
50-Perz. abs. [K]	6 von 121 Vergleichen

Kenngröße	Anzahl Vergleiche mit signifikanten Unterschieden
95-Perz. abs. [K]	11 von 121 Vergleichen

Anschließend wurde geprüft, ob durch eine Differenzierung nach Fischgemeinschaften eine Verbesserung erzielt werden kann. Wie bereits in Abschnitt 3.4.4 erläutert, lagen Daten zu den Fischgemeinschaften EP, Cyp-R, Sap-HR, Sap-MR und Sap-ER vor. Bonferroni-korrigierte Wilcoxon-Tests zeigten in keinem Fall signifikante Unterschiede zwischen den Korrekturwerten. Eine Aufteilung allein nach Fischgemeinschaften ergibt also gegenüber dem einfachsten Fall (nur stundenweise Aufteilung) keine Verbesserung. Um die Kombination von jahreszeitlicher Differenzierung und Gruppierung nach Fischgemeinschaften zu prüfen, wurde die Gruppierung nach Fischgemeinschaften zusätzlich nach Jahreszeiten differenziert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 35 bis Tabelle 54 dargestellt.

Tabelle 35: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Frühjahr (April – Mai), Fischgemeinschaft Sa-ER

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	51	53	57	62	67	74	80	84	86	85	83
50-Perz. Anteil T-Max [%]	78	79	80	83	86	90	93	96	97	98	98
50-Perz. abs. [K]	2,3	2,2	2,1	1,8	1,4	1,1	0,7	0,5	0,3	0,2	0,2
95-Perz. abs. [K]	6,2	6,0	5,5	4,8	3,9	3,0	2,3	1,8	1,6	1,7	1,9

Tabelle 36: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Frühjahr (April – Mai), Fischgemeinschaft Sa-MR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	49	51	55	61	67	73	79	84	86	87	87
50-Perz. Anteil T-Max [%]	74	75	76	79	83	87	91	95	97	99	99
50-Perz. abs. [K]	2,9	2,8	2,6	2,3	1,9	1,5	1,0	0,6	0,3	0,2	0,1
95-Perz. abs. [K]	7,5	7,2	6,7	5,8	4,8	3,6	2,6	1,9	1,7	1,6	1,7

Tabelle 37: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Frühjahr (April – Mai), Fischgemeinschaft Sa-HR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	59	60	63	67	73	78	83	87	89	91	91
50-Perz. Anteil T-Max [%]	80	80	81	83	86	89	92	95	97	99	99
50-Perz. abs. [K]	2,2	2,2	2,0	1,8	1,5	1,2	0,9	0,6	0,3	0,2	0,1
95-Perz. abs. [K]	4,7	4,6	4,3	3,8	3,2	2,6	2,0	1,5	1,2	1,0	1,0

Tabelle 38: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Frühjahr (April – Mai), Fischgemeinschaft Cyp-R

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	60	60	62	65	71	76	82	87	91	91	91
50-Perz. Anteil T-Max [%]	82	82	83	85	88	90	93	95	97	99	99
50-Perz. abs. [K]	2,1	2,1	2,0	1,7	1,5	1,2	0,9	0,6	0,4	0,2	0,1
95-Perz. abs. [K]	5,3	5,2	5,0	4,6	3,9	3,1	2,3	1,6	1,2	1,0	1,1

Tabelle 39: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Frühjahr (April – Mai), Fischgemeinschaft EP

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	74	73	74	75	78	81	84	87	89	91	92
50-Perz. Anteil T-Max [%]	90	90	90	90	91	92	94	95	97	98	99
50-Perz. abs. [K]	1,2	1,2	1,2	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,4	0,3	0,2
95-Perz. abs. [K]	3,3	3,3	3,2	3,0	2,7	2,3	1,9	1,5	1,2	1,0	1,0

Tabelle 40: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Sommer (Juni – September), Fischgemeinschaft Sa-ER

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	73	74	76	79	83	87	90	92	93	93	92
50-Perz. Anteil T-Max [%]	86	87	87	89	91	93	95	97	98	99	99
50-Perz. abs. [K]	2,1	2,1	2,0	1,8	1,5	1,1	0,8	0,5	0,3	0,2	0,2
95-Perz. abs. [K]	4,8	4,6	4,2	3,5	2,9	2,3	1,7	1,3	1,0	1,1	1,2

Tabelle 41: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Sommer (Juni – September), Fischgemeinschaft Sa-MR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	69	70	73	76	80	83	87	90	92	93	93
50-Perz. Anteil T-Max [%]	85	85	86	88	90	92	95	97	98	99	99
50-Perz. abs. [K]	2,4	2,3	2,2	1,9	1,6	1,2	0,9	0,6	0,3	0,2	0,1
95-Perz. abs. [K]	6,0	5,8	5,4	4,6	3,8	3,1	2,4	1,7	1,4	1,2	1,2

Tabelle 42: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Sommer (Juni – September), Fischgemeinschaft Sa-HR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	75	76	78	81	85	88	91	93	94	95	95

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
50-Perz. Anteil T-Max [%]	88	88	89	91	92	94	96	98	99	99	99
50-Perz. abs. [K]	1,9	1,9	1,8	1,6	1,3	1,0	0,7	0,4	0,2	0,1	0,2
95-Perz. abs. [K]	4,2	4,0	3,7	3,2	2,7	2,2	1,6	1,2	1,0	0,9	0,9

Tabelle 43: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Sommer (Juni – September), Fischgemeinschaft Cyp-R

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	76	76	77	78	81	84	87	90	93	94	94
50-Perz. Anteil T-Max [%]	89	89	89	90	91	93	95	96	97	99	99
50-Perz. abs. [K]	2,1	2,1	2,1	1,9	1,6	1,3	1,0	0,7	0,5	0,3	0,2
95-Perz. abs. [K]	4,5	4,6	4,5	4,3	3,8	3,3	2,6	1,9	1,4	1,1	1,2

Tabelle 44: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Sommer (Juni – September), Fischgemeinschaft EP

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	85	85	85	86	87	89	91	92	93	94	94
50-Perz. Anteil T-Max [%]	94	94	94	94	95	95	96	97	98	99	99
50-Perz. abs. [K]	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,8	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2
95-Perz. abs. [K]	2,8	2,8	2,7	2,5	2,2	2,0	1,7	1,4	1,2	1,1	1,0

Tabelle 45: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Herbst (Oktober – November), Fischgemeinschaft Sa-ER

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	76	75	76	79	82	85	87	89	90	91	91
50-Perz. Anteil T-Max [%]	90	90	90	91	93	95	97	98	99	99	98
50-Perz. abs. [K]	0,9	1,0	0,9	0,8	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2
95-Perz. abs. [K]	2,2	2,3	2,2	2,0	1,6	1,3	1,2	1,0	0,8	0,8	0,9

Tabelle 46: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Herbst (Oktober – November), Fischgemeinschaft Sa-MR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	72	71	72	74	78	83	86	89	90	90	89
50-Perz. Anteil T-Max [%]	89	89	89	90	92	94	96	98	99	99	99
50-Perz. abs. [K]	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,6	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
95-Perz. abs. [K]	2,4	2,4	2,4	2,1	1,8	1,4	1,2	1,0	0,9	0,9	0,9

Tabelle 47: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Herbst (Oktober – November), Fischgemeinschaft Sa-HR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	77	77	77	79	82	84	87	89	90	90	90
50-Perz. Anteil T-Max [%]	92	91	91	92	93	95	96	98	99	99	99
50-Perz. abs. [K]	0,8	0,9	0,9	0,8	0,7	0,5	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1
95-Perz. abs. [K]	1,9	2,0	1,9	1,8	1,6	1,4	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9

Tabelle 48: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Herbst (Oktober – November), Fischgemeinschaft Cyp-R

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	80	79	79	79	81	84	86	88	90	91	91
50-Perz. Anteil T-Max [%]	92	92	92	92	93	95	96	97	98	99	99
50-Perz. abs. [K]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1
95-Perz. abs. [K]	1,7	1,8	1,8	1,7	1,6	1,3	1,1	1,0	0,8	0,8	0,8

Tabelle 49: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Herbst (Oktober – November), Fischgemeinschaft EP

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	88	87	87	87	88	89	89	90	91	91	91
50-Perz. Anteil T-Max [%]	96	96	95	96	96	96	97	98	98	98	98
50-Perz. abs. [K]	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
95-Perz. abs. [K]	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9

Tabelle 50: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Winter (Dezember – März), Fischgemeinschaft Sa-ER

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	41	41	42	45	50	58	65	70	71	69	67
50-Perz. Anteil T-Max [%]	82	82	83	85	87	90	93	96	97	97	96
50-Perz. abs. [K]	1,1	1,0	1,0	0,9	0,7	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
95-Perz. abs. [K]	2,7	2,7	2,6	2,4	2,1	1,9	1,5	1,3	1,3	1,3	1,4

Tabelle 51: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Winter (Dezember – März), Fischgemeinschaft Sa-MR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	41	40	41	45	51	60	68	73	77	77	76
50-Perz. Anteil T-Max [%]	81	80	81	82	84	88	91	95	97	98	97
50-Perz. abs. [K]	1,1	1,1	1,0	1,0	0,8	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1
95-Perz. abs. [K]	2,7	2,7	2,6	2,4	2,1	1,8	1,4	1,1	1,0	0,9	0,9

Tabelle 52: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Winter (Dezember – März), Fischgemeinschaft Sa-HR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	52	51	51	53	57	63	70	75	78	80	80
50-Perz. Anteil T-Max [%]	84	83	83	84	86	88	91	94	96	98	97
50-Perz. abs. [K]	0,9	1,0	0,9	0,9	0,8	0,6	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1
95-Perz. abs. [K]	2,2	2,2	2,2	2,0	1,9	1,6	1,3	1,1	1,0	0,9	0,9

Tabelle 53: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Winter (Dezember – März), Fischgemeinschaft Cyp-R

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	49	49	49	51	54	61	69	76	79	80	79
50-Perz. Anteil T-Max [%]	86	85	85	86	88	90	92	94	96	97	98
50-Perz. abs. [K]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1
95-Perz. abs. [K]	1,9	2,0	2,0	1,9	1,7	1,4	1,2	1,0	0,8	0,8	0,8

Tabelle 54: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Tagesmaximaltemperatur im Winter (Dezember – März), Fischgemeinschaft EP

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	72	71	70	70	71	73	77	79	82	83	83
50-Perz. Anteil T-Max [%]	91	91	91	91	91	92	93	94	95	96	97
50-Perz. abs. [K]	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2
95-Perz. abs. [K]	1,5	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4	1,2	1,1	0,9	0,9	0,9

Auch hier wurden wiederum Bonferroni-korrigierte Wilcoxon-Tests der Korrekturwerte der verschiedenen Gruppen durchgeführt. Die Ergebnisse lassen nicht vermuten, dass diese Differenzierung eine statistisch signifikante Verbesserung ergibt (Tabelle 55).

Tabelle 55: Ergebnis der Wilcoxon-Tests jahreszeitlich und nach Fischgemeinschaften differenzierter Korrekturwerte für Stundenmessungen

Kenngröße	Anzahl Vergleiche mit signifikanten Unterschieden
5-Perz. Anteil T-Max [%]	31 von 400 Vergleichen
50-Perz. Anteil T-Max [%]	0 von 400 Vergleichen
50-Perz. abs. [K]	0 von 400 Vergleichen
95-Perz. abs. [K]	5 von 400 Vergleichen

Fazit:

- Durch Auswertung der kontinuierlichen Messdaten wurden die mittleren relativen und absoluten Abweichungen zwischen einzelnen Messwerten und dem jeweiligen Tagesmaximum als 5-, 50- und 95-Perzentile ermittelt.
- Gegenüber den über alle Messstellen und Messzeiträumen ermittelten Korrekturgrößen ergibt eine weitergehende Differenzierung – sei es jahreszeitlich/monatlich oder nach typologischen Kriterien – keine statistisch nachweisbare Verbesserung der ermittelten Näherungswerte.
- Die auf den Stunden basierenden Korrekturgrößen stellen damit die optimale Unterteilung zur Bestimmung der Tagesmaxima dar.

Korrektur von Stichprobenwerten zur Annäherung an Monatsmaxima

Es wurden für die kontinuierlichen Messdaten für jedes Jahr Monatsmaxima und die Differenzen zu den jeweiligen Stundenwerten ermittelt. Anschließend wurden die absoluten Abweichungen zwischen Stundenwerten und Monatsmaxima sowie die absolute Differenz zwischen den Monatsmaxima und den Stundenwerten bestimmt. Die Daten wurden analog zum Vorgehen zur Annäherung an Tagesmaxima aggregiert.

Tabelle 56: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Monatsmaximaltemperatur

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	43	43	43	44	46	47	48	49	50	50	50
50-Perz. Anteil T-Max [%]	67	67	67	68	70	71	73	74	75	75	75
50-Perz. abs. [K]	4,3	4,3	4,2	4,0	3,9	3,7	3,5	3,3	3,2	3,1	3,1
95-Perz. abs. [K]	7,6	7,6	7,5	7,3	7,1	6,9	6,7	6,6	6,5	6,4	6,4

In Tabelle 57 bis Tabelle 61 sind die Auswertungen für die nach Fischgemeinschaften differenzierten Korrekturwerte dargestellt. Aufgrund der Ergebnisse der Bonferroni-korrigierten Wilcoxon-Tests lässt sich gegenüber den nur nach Stunden differenzierten Korrekturgrößen eine Verbesserung vermuten (Tabelle 62), weil etwas mehr als die Hälfte der Tests signifikante Unterschiede anzeigen. Diese Annahme erscheint zulässig, weil die Bonferroni-Korrektur gemeinhin als sehr konservativ angesehen wird (Van der Weele und Mathur, 2019) und sie somit tendenziell eher zu wenig Tests als signifikant einstuft.

Tabelle 57: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Monatsmaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-ER

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	38	38	39	41	43	44	45	46	47	47	47
50-Perz. Anteil T-Max [%]	62	62	63	64	66	67	69	70	71	71	71
50-Perz. abs. [K]	4,5	4,5	4,4	4,2	4,0	3,9	3,7	3,6	3,5	3,4	3,5
95-Perz. abs. [K]	7,5	7,4	7,3	7,1	6,9	6,8	6,6	6,4	6,3	6,3	6,4

Tabelle 58: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Monatsmaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-MR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	36	36	37	38	40	42	44	45	46	46	46
50-Perz. Anteil T-Max [%]	61	61	62	63	65	67	69	71	72	73	72
50-Perz. abs. [K]	5,3	5,3	5,1	4,9	4,6	4,3	4,0	3,8	3,6	3,6	3,6
95-Perz. abs. [K]	8,8	8,7	8,6	8,3	8,0	7,7	7,5	7,3	7,2	7,1	7,1

Tabelle 59: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Monatsmaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-HR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	42	42	42	43	44	46	47	49	49	50	50
50-Perz. Anteil T-Max [%]	67	67	67	68	70	72	73	75	76	76	76
50-Perz. abs. [K]	4,3	4,3	4,2	4,1	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	2,9	2,9
95-Perz. abs. [K]	7,8	7,8	7,7	7,5	7,3	7,1	6,8	6,6	6,5	6,4	6,4

Tabelle 60: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Monatsmaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Cyp-R

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	48	48	48	49	50	51	52	53	54	54	54
50-Perz. Anteil T-Max [%]	71	71	71	72	73	74	76	77	78	78	78
50-Perz. abs. [K]	3,9	3,9	3,9	3,7	3,6	3,4	3,2	3,0	2,9	2,9	2,8
95-Perz. abs. [K]	7,3	7,3	7,2	7,1	6,9	6,7	6,6	6,4	6,3	6,3	6,3

Tabelle 61: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Monatsmaximaltemperatur, Fischgemeinschaft EP

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	52	52	52	52	53	53	54	54	55	55	56
50-Perz. Anteil T-Max [%]	75	75	75	75	76	76	77	78	79	79	79

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
50-Perz. abs. [K]	3,1	3,1	3,2	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,6	2,5
95-Perz. abs. [K]	6,3	6,3	6,3	6,3	6,2	6,1	6,0	5,9	5,8	5,7	5,7

Tabelle 62: Ergebnis der Wilcoxon-Tests der nach Fischgemeinschaften differenzierten Korrekturwerte für Stundenmessungen und Monatsmaximaltemperaturen

Kenngroße	Anzahl Vergleiche mit signifikanten Unterschieden
5-Perz. Anteil T-Max [%]	6 von 10 Vergleichen
50-Perz. Anteil T-Max [%]	5 von 10 Vergleichen
50-Perz. abs. [K]	4 von 10 Vergleichen
95-Perz. abs. [K]	6 von 10 Vergleichen

Korrektur von Stichprobenwerten zur Annäherung an Sommer bzw. Wintermaxima

Es wurden für die kontinuierlichen Messdaten für jedes Jahr Sommer- und Wintermaxima und die Differenzen zu den jeweiligen Stundenwerten ermittelt. Anschließend wurden die absoluten Abweichungen zwischen Stundenwerten und Sommer- bzw. Wintermaxima sowie die absolute Differenz zwischen den Saisonmaxima und den Stundenwerten bestimmt. Die Daten wurden analog zum Vorgehen in Kapitel 0 aggregiert.

Diese Analysen wurden ebenfalls auf verschiedenen Differenzierungsebenen durchgeführt, wobei sich bereits aus den Vorgaben der OGewV bzgl. der Vorschläge des LFP-Projekts O 10.20 jahreszeitliche Differenzierungen ergeben. Da im LFP-Projekt O 10.20 vorgeschlagen wurde, Sommermaxima nur in dem Zeitraum von Juni bis September zu betrachten, wurde dieses Zeitfenster im Folgenden als „Sommer“ behandelt.

Tabelle 63 zeigt die Ergebnisse für die Sommermonate ohne jegliche zeitliche oder typologische Differenzierung für Zeiten zwischen 7 und 17 Uhr.

Konkret besagt die Tabelle, dass bei Messungen, die an einer beliebigen Messstelle an einem beliebigen Tag durchgeführt werden, um 7 Uhr morgens 5 % der Messwerte (Zeile „5-Perz. Anteil T-Max [%]“) mindestens 43 % unter dem Sommermaximum liegen und 50 % der Messwerte mindestens 70 % des Sommermaximums (Zeile „50-Perz. Anteil T-Max [%]“) erreichen. Bezogen auf absolute Differenzen gilt, dass der Median der absoluten Differenzen von um 7 Uhr durchgeführten Messungen bei 6,7 K liegt (Zeile „50-Perz. abs. [K]“), während 5 % der um 7 Uhr gewonnenen Messwerte mindestens 10 K unterhalb des Sommermaximums liegen (Zeile „95-Perz. abs. [K]“). Diese Differenzen verringern sich im Laufe des Tages geringfügig, so dass ab ca. 13 Uhr 95% der Messwerte nur noch um höchstens 37 % vom Sommermaximum abweichen.

Tabelle 63: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	57	57	58	59	60	61	62	62	63	63	63
50-Perz. Anteil T-Max [%]	70	70	71	72	73	74	76	77	78	78	78
50-Perz. abs. [K]	6,7	6,6	6,5	6,3	6,0	5,7	5,4	5,1	4,9	4,8	4,8
95-Perz. abs. [K]	10	10	9,9	9,6	9,4	9,1	8,9	8,7	8,6	8,5	8,5

Diese Auswertung wurde anschließend nach Monaten differenziert. In Tabelle 64 bis Tabelle 67 sind die entsprechenden Resultate dargestellt.

Tabelle 64: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, Juni

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	54	55	56	57	58	59	60	61	61	61	62
50-Perz. Anteil T-Max [%]	67	67	68	69	71	72	74	75	76	77	77
50-Perz. abs. [K]	7,5	7,4	7,2	6,9	6,6	6,3	5,9	5,6	5,4	5,3	5,3
95-Perz. abs. [K]	11	11	11	10	10	9,7	9,5	9,2	9,1	9,0	9,0

Tabelle 65: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, Juli

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	62	63	64	65	66	67	68	68	69	69	69
50-Perz. Anteil T-Max [%]	74	75	75	76	77	79	80	82	82	83	83
50-Perz. abs. [K]	5,6	5,5	5,4	5,2	4,9	4,6	4,3	4,0	3,8	3,7	3,6
95-Perz. abs. [K]	8,7	8,6	8,4	8,1	7,9	7,6	7,4	7,2	7,0	7,0	6,9

Tabelle 66: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, August

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	62	62	63	64	65	66	67	67	68	68	68
50-Perz. Anteil T-Max [%]	75	75	75	76	77	78	80	81	82	82	82
50-Perz. abs. [K]	5,5	5,5	5,4	5,2	5,0	4,7	4,4	4,1	4,0	3,8	3,8
95-Perz. abs. [K]	8,7	8,7	8,6	8,4	8,2	7,9	7,7	7,5	7,4	7,3	7,3

Tabelle 67: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, September

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	49	49	49	50	50	51	52	53	54	54	54
50-Perz. Anteil T-Max [%]	64	64	64	65	66	67	68	69	70	70	70
50-Perz. abs. [K]	8,0	8,0	7,9	7,7	7,5	7,2	7,0	6,7	6,6	6,5	6,5
95-Perz. abs. [K]	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11	11

Es wurden wiederum Bonferroni-korrigierte Wilcoxon-Tests der Korrekturwerte der verschiedenen Gruppen durchgeführt. Resultierend kann bei der monatlichen Differenzierung eine statistisch signifikante Verbesserung angenommen werden (Tabelle 68).

Tabelle 68: Ergebnis der Wilcoxon-Tests der nach Monaten differenzierten Korrekturwerte für Stundenmessungen und Sommermaximaltemperaturen

Kenngroße	Anzahl Vergleiche mit signifikanten Unterschieden
5-Perz. Anteil T-Max [%]	5 von 6 Vergleichen
50-Perz. Anteil T-Max [%]	5 von 6 Vergleichen
50-Perz. abs. [K]	4 von 6 Vergleichen
95-Perz. abs. [K]	5 von 6 Vergleichen

Die Ergebnisse einer nach Fischgemeinschaften differenzierten Auswertung sind in Tabelle 69 bis Tabelle 73 dargestellt.

Tabelle 69: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-ER

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	56	56	57	58	59	61	62	62	63	63	63
50-Perz. Anteil T-Max [%]	68	68	69	70	72	73	75	76	77	77	77
50-Perz. abs. [K]	6,2	6,1	6,0	5,8	5,5	5,1	4,8	4,6	4,4	4,4	4,4
95-Perz. abs. [K]	9,0	8,8	8,7	8,4	8,1	7,9	7,6	7,5	7,4	7,3	7,3

Tabelle 70: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-MR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	52	52	53	55	56	57	59	60	60	61	61
50-Perz. Anteil T-Max [%]	65	65	66	68	69	71	73	75	76	77	77
50-Perz. abs. [K]	7,8	7,7	7,5	7,2	6,7	6,3	5,8	5,5	5,2	5,1	5,1
95-Perz. abs. [K]	12	11	11	10	10	10	9,7	9,5	9,3	9,2	9,2

Tabelle 71: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-HR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	55	55	56	57	59	60	61	61	62	62	62
50-Perz. Anteil T-Max [%]	69	69	70	71	72	74	75	77	78	78	78
50-Perz. abs. [K]	6,7	6,7	6,5	6,2	5,9	5,6	5,3	5,0	4,8	4,7	4,7
95-Perz. abs. [K]	10	10	9,9	9,7	9,4	9,1	8,9	8,7	8,6	8,5	8,5

Tabelle 72: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Cyp-R

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	59	60	60	61	61	62	63	64	64	64	65
50-Perz. Anteil T-Max [%]	72	72	72	73	74	75	76	77	78	79	79
50-Perz. abs. [K]	6,7	6,7	6,6	6,5	6,2	6,0	5,7	5,5	5,3	5,2	5,2
95-Perz. abs. [K]	10	10	10	9,9	9,7	9,5	9,3	9,1	9,0	8,9	8,9

Tabelle 73: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Sommermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft EP

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	62	62	62	63	63	64	64	65	65	65	66
50-Perz. Anteil T-Max [%]	76	76	76	76	77	77	78	79	79	80	80
50-Perz. abs. [K]	5,3	5,3	5,3	5,2	5,1	5,0	4,9	4,7	4,6	4,5	4,4
95-Perz. abs. [K]	8,7	8,7	8,7	8,6	8,5	8,4	8,3	8,1	8,0	7,9	7,9

Die Ergebnisse der Bonferroni-korrigierten Wilcoxon-Tests der Korrekturwerte der verschiedenen Gruppen lassen eher nicht auf eine statistisch signifikante Verbesserung durch diese Differenzierung schließen, da in deutlich weniger als der Hälfte aller Fälle signifikante Unterschiede angenommen werden können (Tabelle 74).

Tabelle 74: Ergebnis der Wilcoxon-Tests der nach Fischgemeinschaften differenzierten Korrekturwerte für Stundenmessungen und Sommermaximaltemperaturen

Kenngroße	Anzahl Vergleiche mit signifikanten Unterschieden
5-Perz. Anteil T-Max [%]	5 von 10 Vergleichen
50-Perz. Anteil T-Max [%]	2 von 10 Vergleichen
50-Perz. abs. [K]	2 von 10 Vergleichen
95-Perz. abs. [K]	6 von 10 Vergleichen

Die Differenzierung nach Fischgemeinschaften und Monaten (nicht dargestellt) lässt aufgrund der Ergebnisse der Bonferroni-korrigierten Wilcoxon-Tests ebenfalls keine eindeutige Verbesserung vermuten (Tabelle 75).

Tabelle 75: Ergebnis der Wilcoxon-Tests der nach Fischgemeinschaften und Monaten differenzierten Korrekturwerte für Stundenmessungen und Sommermaximaltemperaturen

Kenngröße	Anzahl Vergleiche mit signifikanten Unterschieden
5-Perz. Anteil T-Max [%]	112 von 200 Vergleichen
50-Perz. Anteil T-Max [%]	75 von 200 Vergleichen
50-Perz. abs. [K]	72 von 200 Vergleichen
95-Perz. abs. [K]	108 von 200 Vergleichen

Tabelle 76 zeigt die Ergebnisse für die Wintermonate ohne jegliche zeitliche oder typologische Differenzierung für Zeiten zwischen 7 und 17 Uhr. Bei Messungen, die an einer beliebigen Messstelle an einem beliebigen Tag durchgeführt werden, erreichen um 7 Uhr morgens 5 % der Messwerte (Zeile „5-Perz. Anteil T-Max [%]“) höchstens 15 % des Wintermaximums und 50 % der Messwerte höchstens 36 % des Wintermaximums (Zeile „50-Perz. Anteil T-Max [%]“). Bezogen auf absolute Differenzen gilt, dass der Median der absoluten Differenzen von um 7 Uhr durchgeführten Messungen bei 8,9 K liegt (Zeile „50-Perz. abs. [K]“), während 5 % der um 7 Uhr gewonnenen Messwerte mindestens 12 K unterhalb des Tagesmaximums liegen (Zeile „95-Perz. abs. [K]“). Diese Differenzen verringern sich im Laufe des Tages geringfügig, so dass ab ca. 13 Uhr 95% der Messwerte höchstens 20 % des Wintermaximums erreichen.

Tabelle 76: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	15	15	16	16	17	17	18	19	20	20	20
50-Perz. Anteil T-Max [%]	36	36	36	37	37	38	39	40	40	40	40
50-Perz. abs. [K]	8,9	8,9	8,8	8,8	8,7	8,6	8,5	8,4	8,3	8,3	8,3
95-Perz. abs. [K]	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Diese Auswertung wurde anschließend nach Monaten differenziert. In Tabelle 77 bis Tabelle 80 sind die entsprechenden Resultate dargestellt.

Tabelle 77: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Dezember

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	15	15	15	15	15	16	16	17	17	17	17
50-Perz. Anteil T-Max [%]	34	34	34	34	34	35	35	36	36	36	36
50-Perz. abs. [K]	9,6	9,6	9,6	9,6	9,5	9,5	9,4	9,3	9,3	9,3	9,3
95-Perz. abs. [K]	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13

Tabelle 78: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Januar

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	13	12	13	13	13	14	14	15	15	15	15
50-Perz. Anteil T-Max [%]	33	33	33	33	34	34	35	36	36	36	36
50-Perz. abs. [K]	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	8,9	8,9	8,8	8,7	8,7	8,7
95-Perz. abs. [K]	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Tabelle 79: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Februar

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	12	11	13	14	15	14	15	16	16	16	16
50-Perz. Anteil T-Max [%]	32	32	33	34	35	35	35	36	36	37	37
50-Perz. abs. [K]	9,1	9,1	9,0	8,9	8,7	8,9	8,9	8,8	8,7	8,7	8,7
95-Perz. abs. [K]	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Tabelle 80: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, März

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	21	21	22	23	24	26	27	29	30	30	30
50-Perz. Anteil T-Max [%]	42	42	43	44	45	47	49	51	52	52	52
50-Perz. abs. [K]	7,9	7,9	7,9	7,7	7,5	7,3	7,1	6,9	6,8	6,7	6,7
95-Perz. abs. [K]	11	11	11	11	11	11	10	10	10	10	10

Die Bonferroni-korrigierten Wilcoxon-Tests lassen annehmen, dass bei monatlicher Differenzierung auch hier eine statistisch signifikante Verbesserung angenommen werden kann (Tabelle 81).

Tabelle 81: Ergebnis der Wilcoxon-Tests der nach Monaten differenzierten Korrekturwerte für Stundenmessungen und Wintermaximaltemperaturen

Kenngroße	Anzahl Vergleiche mit signifikanten Unterschieden
5-Perz. Anteil T-Max [%]	4 von 6 Vergleichen
50-Perz. Anteil T-Max [%]	3 von 6 Vergleichen
50-Perz. abs. [K]	5 von 6 Vergleichen
95-Perz. abs. [K]	5 von 6 Vergleichen

Die Ergebnisse einer nach Fischgemeinschaften differenzierten Auswertung sind in Tabelle 82 bis Tabelle 86 dargestellt.

Tabelle 82: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-ER

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	19	19	21	22	24	23	24	25	25	25	25
50-Perz. Anteil T-Max [%]	41	41	43	44	45	45	45	46	47	47	46
50-Perz. abs. [K]	6,8	6,8	6,7	6,5	6,4	6,6	6,6	6,4	6,4	6,4	6,4
95-Perz. abs. [K]	9,5	9,5	9,3	9,2	9,0	9,3	9,2	9,0	9,0	9,0	9,1

Tabelle 83: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-MR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	13	12	13	14	15	16	17	18	19	19	19
50-Perz. Anteil T-Max [%]	36	36	36	37	38	39	41	42	43	43	43
50-Perz. abs. [K]	8,3	8,3	8,3	8,2	8,1	7,9	7,7	7,6	7,5	7,5	7,5
95-Perz. abs. [K]	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	12

Tabelle 84: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Sa-HR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	13	13	13	14	14	15	16	16	17	17	17
50-Perz. Anteil T-Max [%]	34	33	33	34	35	36	37	38	39	39	39
50-Perz. abs. [K]	9,4	9,4	9,4	9,3	9,2	9,1	9,0	8,8	8,7	8,7	8,7
95-Perz. abs. [K]	13	13	13	13	13	13	13	13	13	12	12

Tabelle 85: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft Cyp-R

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	15	15	15	15	16	16	17	18	18	18	18
50-Perz. Anteil T-Max [%]	33	32	32	33	33	34	35	35	36	36	36
50-Perz. abs. [K]	10	10	10	10	10	10	10	9,9	9,9	9,8	9,8
95-Perz. abs. [K]	14	14	14	14	14	13	13	13	13	13	13

Tabelle 86: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur, Fischgemeinschaft EP

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	16	16	16	16	17	17	17	18	18	18	18
50-Perz. Anteil T-Max [%]	35	34	35	35	35	35	36	36	37	37	37
50-Perz. abs. [K]	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,5	9,5	9,4	9,4	9,3	9,3
95-Perz. abs. [K]	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	12

Die Ergebnisse der Bonferroni-korrigierten Wilcoxon-Tests der Korrekturwerte der verschiedenen Gruppen lassen eine statistisch signifikante Verbesserung durch diese Differenzierung annehmen, da in mehr als zwei Drittel aller Fälle signifikante Unterschiede angenommen werden können (Tabelle 87).

Tabelle 87: Ergebnis der Wilcoxon-Tests der nach Fischgemeinschaften differenzierten Korrekturwerte für Stundenmessungen und Wintermaximaltemperaturen

Kenngroße	Anzahl Vergleiche mit signifikanten Unterschieden
5-Perz. Anteil T-Max [%]	4 von 10 Vergleichen
50-Perz. Anteil T-Max [%]	6 von 10 Vergleichen
50-Perz. abs. [K]	10 von 10 Vergleichen
95-Perz. abs. [K]	9 von 10 Vergleichen

In Tabelle 88 bis Tabelle 107 sind die Ergebnisse einer nach Fischgemeinschaften und Monaten differenzierten Auswertung dargestellt.

Tabelle 88: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Dezember, Fischgemeinschaft Sa-ER

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	17	16	17	17	17	18	19	19	20	20	19
50-Perz. Anteil T-Max [%]	34	34	34	34	35	36	37	37	38	37	37
50-Perz. abs. [K]	8,1	8,2	8,2	8,1	8,1	7,9	7,8	7,8	7,8	7,7	7,8
95-Perz. abs. [K]	11	11	11	11	11	10	10	10	10	10	10

Tabelle 89: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Dezember, Fischgemeinschaft Sa-MR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	7	7	7	7	7	7	8	9	10	10	9
50-Perz. Anteil T-Max [%]	32	32	32	32	32	33	34	34	35	35	35
50-Perz. abs. [K]	10	10	10	10	10	9,9	9,8	9,7	9,7	9,7	9,7
95-Perz. abs. [K]	15	15	15	15	15	15	15	15	14	14	14

Tabelle 90: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Dezember, Fischgemeinschaft Sa-HR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	14	14	14	14	14	15	15	15	16	16	16
50-Perz. Anteil T-Max [%]	34	34	34	34	34	35	36	36	36	36	36
50-Perz. abs. [K]	9,6	9,5	9,6	9,5	9,5	9,4	9,3	9,3	9,2	9,2	9,2
95-Perz. abs. [K]	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

Tabelle 91: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Dezember, Fischgemeinschaft Cyp-R

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	18	18	18	18	18	19	19	20	20	20	20
50-Perz. Anteil T-Max [%]	34	34	34	34	35	35	35	36	36	36	36
50-Perz. abs. [K]	10	10	10	10	10	10	9,9	9,9	9,8	9,8	9,8
95-Perz. abs. [K]	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13

Tabelle 92: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Dezember, Fischgemeinschaft EP

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	19	19	19	19	19	19	19	20	20	20	20
50-Perz. Anteil T-Max [%]	37	36	36	36	36	37	37	37	37	37	37
50-Perz. abs. [K]	9,4	9,3	9,4	9,4	9,4	9,4	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3
95-Perz. abs. [K]	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Tabelle 93: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Januar, Fischgemeinschaft Sa-ER

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	20	20	20	20	21	22	23	23	24	24	24
50-Perz. Anteil T-Max [%]	43	43	43	43	44	44	45	46	46	46	46
50-Perz. abs. [K]	6,4	6,4	6,4	6,4	6,3	6,3	6,2	6,1	6,1	6,1	6,1
95-Perz. abs. [K]	9,0	9,1	9,1	9,0	8,9	8,8	8,7	8,6	8,6	8,6	8,6

Tabelle 94: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Januar, Fischgemeinschaft Sa-MR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	11	11	11	11	12	12	13	13	13	14	14
50-Perz. Anteil T-Max [%]	33	33	33	33	34	35	35	36	36	36	36
50-Perz. abs. [K]	8,4	8,4	8,4	8,4	8,3	8,2	8,2	8,1	8,0	8,0	8,0
95-Perz. abs. [K]	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Tabelle 95: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Januar, Fischgemeinschaft Sa-HR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	11	11	11	11	11	12	12	13	13	13	13
50-Perz. Anteil T-Max [%]	31	31	30	30	31	32	32	33	33	34	34
50-Perz. abs. [K]	9,8	9,8	9,8	9,7	9,7	9,6	9,6	9,5	9,4	9,4	9,4
95-Perz. abs. [K]	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13

Tabelle 96: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Januar, Fischgemeinschaft Cyp-R

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	10	10	10	10	10	10	11	11	11	11	11
50-Perz. Anteil T-Max [%]	28	28	28	28	28	29	29	30	30	30	30
50-Perz. abs. [K]	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
95-Perz. abs. [K]	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

Tabelle 97: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Januar, Fischgemeinschaft EP

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	11	10	11	11	11	11	11	11	12	12	12
50-Perz. Anteil T-Max [%]	31	30	31	30	31	31	31	31	31	31	31
50-Perz. abs. [K]	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
95-Perz. abs. [K]	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

Tabelle 98: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Februar, Fischgemeinschaft Sa-ER

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	15	15	21	23	25	18	19	20	20	20	19
50-Perz. Anteil T-Max [%]	36	36	41	43	45	39	38	39	39	39	39
50-Perz. abs. [K]	7,0	7,0	6,7	6,4	6,2	7,2	7,5	7,4	7,4	7,4	7,4
95-Perz. abs. [K]	9,7	9,7	9,2	8,9	8,6	10,0	9,9	9,8	9,8	9,8	9,9

Tabelle 99: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Februar, Fischgemeinschaft Sa-MR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	10	10	10	11	13	15	17	19	19	20	19
50-Perz. Anteil T-Max [%]	34	34	34	35	36	37	39	40	41	41	41
50-Perz. abs. [K]	8,2	8,2	8,2	8,1	8,0	7,8	7,7	7,5	7,4	7,4	7,4
95-Perz. abs. [K]	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11

Tabelle 100: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Februar, Fischgemeinschaft Sa-HR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	9	9	9	10	9	10	11	12	13	13	13
50-Perz. Anteil T-Max [%]	31	30	30	31	31	33	34	35	36	36	36
50-Perz. abs. [K]	9,6	9,7	9,7	9,6	9,5	9,5	9,3	9,2	9,0	9,0	9,0
95-Perz. abs. [K]	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13

Tabelle 101: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Februar, Fischgemeinschaft Cyp-R

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	11	11	11	11	12	13	13	14	14	14	14
50-Perz. Anteil T-Max [%]	29	29	29	29	30	30	31	32	32	33	33
50-Perz. abs. [K]	11	11	11	11	11	11	11	10	10	10	10
95-Perz. abs. [K]	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

Tabelle 102: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im Februar, Fischgemeinschaft EP

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	12	11	12	12	12	12	13	13	14	14	14
50-Perz. Anteil T-Max [%]	31	30	31	31	31	31	32	32	33	33	33
50-Perz. abs. [K]	10	10	100	10	10	10	10	10	9,9	9,9	9,8
95-Perz. abs. [K]	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13

Tabelle 103: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im März, Fischgemeinschaft Sa-ER

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	23	23	24	26	28	30	32	34	35	35	35
50-Perz. Anteil T-Max [%]	47	47	48	50	52	54	56	58	59	59	58
50-Perz. abs. [K]	6,5	6,5	6,3	6,2	5,9	5,7	5,4	5,2	5,1	5,1	5,2
95-Perz. abs. [K]	9,4	9,4	9,3	9,1	8,8	8,6	8,4	8,2	8,1	8,1	8,2

Tabelle 104: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im März, Fischgemeinschaft Sa-MR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	20	21	21	23	25	27	29	30	31	32	32
50-Perz. Anteil T-Max [%]	44	44	45	47	49	51	54	56	57	58	57
50-Perz. abs. [K]	7,0	6,9	6,9	6,7	6,5	6,2	5,9	5,6	5,5	5,4	5,4
95-Perz. abs. [K]	11	11	11	11	10	10	9,8	9,6	9,4	9,4	9,4

Tabelle 105: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im März, Fischgemeinschaft Sa-HR

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	19	19	19	20	21	23	24	26	27	27	27
50-Perz. Anteil T-Max [%]	39	39	39	40	42	44	46	48	49	50	50
50-Perz. abs. [K]	8,6	8,6	8,6	8,4	8,2	7,9	7,7	7,4	7,3	7,2	7,2
95-Perz. abs. [K]	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11	11

Tabelle 106: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im März, Fischgemeinschaft Cyp-R

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	21	21	21	22	23	24	25	26	27	27	27
50-Perz. Anteil T-Max [%]	39	39	39	39	40	41	42	44	45	45	45
50-Perz. abs. [K]	9,4	9,4	9,4	9,3	9,2	9,0	8,8	8,7	8,6	8,4	8,4
95-Perz. abs. [K]	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12	12

Tabelle 107: Mittlere stundenabhängige Abweichung von gemessener zur Wintermaximaltemperatur im März, Fischgemeinschaft EP

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5-Perz. Anteil T-Max [%]	24	23	23	24	24	25	25	26	27	27	28
50-Perz. Anteil T-Max [%]	42	41	42	42	42	43	44	45	45	46	46
50-Perz. abs. [K]	8,5	8,6	8,6	8,5	8,5	8,4	8,2	8,1	8,0	7,9	7,9
95-Perz. abs. [K]	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	11

Die Differenzierung nach Fischgemeinschaften und Monaten lässt aufgrund der Ergebnisse der Bonferroni-korrigierten Wilcoxon-Tests eine Verbesserung vermuten (Tabelle 108).

Tabelle 108: Ergebnis der Wilcoxon-Tests der nach Fischgemeinschaften und Monaten differenzierten Korrekturwerte für Stundenmessungen und Wintermaximaltemperaturen

Kenngroße	Anzahl Vergleiche mit signifikanten Unterschieden
5-Perz. Anteil T-Max [%]	129 von 200 Vergleichen
50-Perz. Anteil T-Max [%]	133 von 200 Vergleichen
50-Perz. abs. [K]	156 von 200 Vergleichen
95-Perz. abs. [K]	162 von 200 Vergleichen

3.5.2 Vorschläge für Korrekturfaktoren zur Annäherung von Stichproben

Um zu geeigneten Korrekturfaktoren zu kommen, wurde jeweils das höchste Differenzierungsniveau gewählt, bei dem noch statistisch signifikante Unterscheidungen zwischen den Gruppen feststellbar waren.

- Für die Tagesmaximaltemperatur ergibt sich daher der lediglich nach Stunden differenzierte Ansatz (Tabelle 29).
- Für die Monatsmaximaltemperaturen ergibt sich der nach Fischgemeinschaften differenzierte Ansatz (Tabelle 61).
- Für die Sommermaximaltemperatur ergibt sich der nach Monaten differenzierte Ansatz (Tabelle 64).
- Für die Wintermaximaltemperatur ergibt sich der nach Monaten und Fischgemeinschaften differenzierte Ansatz (Tabelle 92 bis Tabelle 107).

Es werden jeweils die Medianwerte der relativen Abweichungen als Grundlage für Korrekturfaktoren verwendet, im Falle der Tagesmaximaltemperaturen z.B.

Stunde	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
50-Perz. Anteil T-Max [%]	89	88	89	90	91	93	95	96	98	98	99

D.h., jeder um 7 Uhr erhobene Messwert wird durch den der Stunde der Probenahme entsprechenden Wert dividiert und das Ergebnis mit 100 multipliziert. In Kapitel 3.5.3 werden die Ergebnisse von Anwendungstests dargestellt.

3.5.3 Anwendungstest der abgeleiteten Korrektur- bzw. Umrechnungsfaktoren anhand von Beispielfällen

Zur exemplarischen Erprobung des abgeleiteten Korrekturansatzes wurden auf alle Stundenwerte die Korrekturfaktoren für die Annäherung an die Tagesmaxima angewendet.

Zur Bewertung wurde über alle Datensätze jeweils der Mittelwert der absoluten Abweichung des mit dem Korrekturfaktor ergänzten und des unkorrigierten Wertes vom Tagesmaximum ermittelt.

Dieser Wert beträgt für die unkorrigierte Temperatur 0,89 K und für die korrigierte Temperatur 0,57 K. Im Mittel hat die Korrektur dazu geführt, dass die Abweichung um mehr als ein Drittel geringer geworden ist.

Dieses Vorgehen ist mit einem Nachteil verbunden. Während vor der Korrektur kein Messwert über dem Tagesmaximum lag (dies ist natürlich der Definition eines Maximums geschuldet), führt die Korrektur bei rund 48% der Fälle dazu, dass der korrigierte Stundenwert über dem Tagesmaximum liegt.

Dieser logische Fehler sollte idealerweise vermieden werden. Daher wurde geprüft, wie sich das Ergebnis ändert, wenn nicht der volle Medianwert der relativen Abweichung (korr) zur Korrektur herangezogen wird, sondern ein etwas größerer Wert. In einem zweiten Ansatz wurde daher statt

$$T_{\text{korr}} = \frac{T}{\text{korr}} \times 100$$

Die folgende Formel verwendet:

$$T_{\text{korr}} = \frac{T}{\left(\text{korr} + \frac{100 - \text{korr}}{2}\right)} \times 100$$

Bei einem hypothetischen Korrekturfaktor von 80 würde im ersten Fall eine Erhöhung um 25% erfolgen, also z.B. von 10 auf 12,5. Im zweiten Fall resultiert nur eine Erhöhung um ca. 11%, also analog auf 11,1.

Wird diese Formel angewandt, ändert sich der Mittelwert der absoluten Abweichung des korrigierten Wertes vom Tagesmaximum um 0,64 K. Das liegt immer noch sehr

nah an der oben ermittelten mittleren Verbesserung um etwa ein Drittel. Gleichzeitig wird aber der Anteil der zu stark – also über das Tagesmaximum hinausgehend – korrigierten Fälle auf 25 % vermindert.

Differenziert nach Fischgemeinschaften (Tabelle 109) bzw. Monaten (Tabelle 110) ergeben sich im Durchschnitt bei Verringerungen der Differenzen Werte um rund 0,4 Kelvin. Allerdings führt die Korrektur im Extremfall dazu, dass das tatsächliche Monatsmaximum um bis zu 1,6 K überschätzt wird. Dies zeigt sich in Spalte „Max. korr. Diff. [K]“ durch negative Vorzeichen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die maximale Unterschätzung (Spalte „Max. reale Diff. [K]“) durchgängig um ein Vielfaches größer ist.

Tabelle 109: Tatsächliche und korrigierte Differenzen zwischen Tagesmaxima und gemessenen Stundenwerten, gruppiert nach Fischgemeinschaften

OGewV-Fischgemeinschaft	Mittl. reale Differenz [K]	Mittl. korr. Differenz [K]	Max. reale Diff. [K]	Max. korr. Diff. [K]
Sa-ER	1,0	0,7	17,9	-1,3
Sa-MR	1,1	0,8	24,3	-1,3
Sa-HR	0,9	0,6	12,1	-1,5
Cyp-R	0,8	0,4	8,4	-1,6
EP	0,7	0,3	7,8	-1,6

Tabelle 110: Tatsächliche und korrigierte Differenzen zwischen Tagesmaxima und gemessenen Stundenwerten, gruppiert nach Monaten

Monat	Mittl. reale Differenz [K]	Mittl. korr. Differenz [K]	Max. reale Diff. [K]	Max. korr. Diff. [K]
1	0,4	0,3	8,6	-0,7
2	0,7	0,5	17,0	-0,7
3	1,0	0,8	23,0	-0,7
4	1,3	1,0	17,7	-1,0
5	1,2	0,8	22,1	-1,2
6	1,3	0,7	24,3	-1,3
7	1,1	0,6	13,6	-1,6
8	1,0	0,4	13,2	-1,6
9	0,9	0,4	8,5	-1,3
10	0,6	0,2	12,1	-1,2
11	0,5	0,2	14,2	-1,3
12	0,4	0,3	6,7	-0,7

Mit den modifizierten Korrekturfaktoren wurde auch eine Auswertung für Monatsmaxima durchgeführt. Es wurden, wie in Kapitel 3.5.2 beschrieben, die nach Fischgemeinschaften gruppierten Mediane der relativen Anteile verwendet. Die Auswertung erfolgte analog zu den Tagesmaxima. Nach Anwendung der Korrekturfaktoren verbessert sich der Mittelwert der absoluten Abweichung des korrigierten Wertes vom Monatsmaximum von 3,9 K auf 2,1 K, was etwa einer Halbierung entspricht. Zu berücksichtigen ist dabei, dass nunmehr etwa 33 % der korrigierten Werte über dem Monatsmaximum liegen. Differenziert nach Fischgemeinschaften und Monaten ergeben sich folgende durchschnittliche Werte (Tabelle 111). Im Durchschnitt ergeben sich Verringerungen der Differenzen um rund 3 Kelvin. Allerdings führt die Korrektur im Extremfall dazu, dass das tatsächliche Monatsmaximum um bis zu 6,5 K überschätzt wird (Spalte „Min. korr. Diff. [K]“). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die maximale Unterschätzung (Spalte „Max. reale Diff. [K]“) durchgängig mehr als doppelt so groß ist.

Tabelle 111: Tatsächliche und korrigierte Differenzen zwischen Monatsmaxima und gemessenen Stundenwerten

OGewV-Fischgemeinschaft	Monat	Mittl. reale Differenz [K]	Mittl. korr. Differenz [K]	Max. reale Diff. [K]	Max. korr. Diff. [K]
Sa-ER	6	4,4	2,1	13,6	-4,0
Sa-ER	7	4,1	1,5	12,7	-4,3
Sa-ER	8	3,6	1,0	12,0	-4,2
Sa-ER	9	3,6	1,4	13,3	-3,8
Sa-MR	6	4,8	2,3	28,0	-4,3
Sa-MR	7	4,0	1,4	18,8	-4,9
Sa-MR	8	4,0	1,4	16,8	-6,5
Sa-MR	9	3,7	1,6	14,8	-3,9
Sa-HR	6	4,5	1,9	13,9	-5,0
Sa-HR	7	3,9	1,1	21,2	-5,2
Sa-HR	8	3,6	0,9	16,4	-4,9
Sa-HR	9	3,8	1,5	18,4	-4,4
Cyp-R	6	5,0	2,2	15,3	-5,8
Cyp-R	7	4,2	1,1	12,9	-6,0
Cyp-R	8	4,1	1,0	13,4	-5,8
Cyp-R	9	4,0	1,4	16,0	-5,1
EP	6	4,0	1,2	12,0	-5,3
EP	7	3,3	0,2	11,7	-5,6
EP	8	3,1	0,1	10,5	-5,8
EP	9	3,4	0,8	12,5	-5,3

Zusätzlich wurde für die Sommermonate verglichen, wie gut sich nun eine Annäherung an das Sommermaximum ergeben hat. Das Ergebnis ist in Tabelle 112 dargestellt. Die Ergebnisse liegen nun im Mittel rund 40% näher am jeweiligen Sommermaximum. Gleichzeitig wurden zwischen 10 % und 15 % der Fälle „überkorrigiert“. Sie liegen dadurch über dem jeweiligen Sommermaximum.

Tabelle 112: Auswirkung der Korrektur auf die mittlere Differenz zum Sommermaximum

OGewV-Fischgemeinschaft	T unkor.	T kor.	Verbesserung	Anteil > max
Sa-ER	5,52	3,03	45%	15%
Sa-MR	5,96	3,34	44%	13%
Sa-HR	5,40	3,18	41%	13%
Cyp-R	6,47	4,08	37%	10%
EP	5,12	3,16	38%	16%

Fazit:

- Es wurden Korrekturfaktoren für eine Annäherung von Stichprobenwerten an tatsächliche Tages-, Monats-, Winter- und Sommermaxima abgeleitet und erprobt.
- Es kann im Mittel eine Verbesserung zwischen 30 und 50 Prozent erreicht werden.
- Gleichzeitig erfolgt eine gewisse „Überkorrektur“, da nun nennenswerte Anteile der korrigierten Werte (zwischen 10 und 33 %) über den jeweiligen Maxima liegen.
- Diese „Überkorrektur“ ist aber betragsmäßig deutlich geringer als die Unterschätzung bei der Verwendung unkorrigierter Stichprobenwerte.

3.5.4 Schlussfolgerungen zu Ansatz 2

Die wesentlichen Ergebnisse des Ansatzes 2 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Es wurden Korrekturfaktoren für eine Annäherung von Stichprobenwerten an tatsächliche Tages-, Monats-, Winter- und Sommermaxima mit einem Perzentilwert von 50 (Median) abgeleitet und erprobt.
- Es wird im Mittel eine Verbesserung im Sinne einer Verringerung der mittleren Abweichung von den tatsächlichen Maxima zwischen 30 und 50 Prozent erreicht.
- Gleichzeitig erfolgt eine unvermeidbare „Überkorrektur“ bei 10 bis 33 % der Fälle über die jeweiligen Maxima hinaus.
- Grundsätzlich könnten auch andere als der getestete 50-Perzentilwert zur Korrektur herangezogen werden, aber eine Verringerung der mittleren Abweichung wird stets die Wahrscheinlichkeit einer „Überkorrektur“ erhöhen. => D.h. die Beurteilung wird strenger mit abnehmenden Perzentilen!

4 Erprobung der Konsequenzen einer niedrigeren zulässigen Wassertemperaturerhöhung (ΔT) im Potamal während der Wintermonate anhand realer Fallbeispiele

4.1 Zielstellung

Für die Wintermonate (Dezember bis März) wurden im LFP-Projekt O 10.20 für das Potamal niedrigere zulässige Temperaturerhöhungen infolge einer Einleitung vorgeschlagen (2 K statt bisher 3 K). Die Auswirkungen dieses weitreichenderen Maßstabs wurden bisher nicht an realen Wärmeeinleitungen erprobt.

Es ist z. B. nicht geklärt, wie stark die Möglichkeit von Wärmeeinleitungen im Einzelfall reduziert wird (z.B. an wie vielen Tagen ist im Vergleich zur bestehenden Regelung keine oder nur eine geringere Wärmeeinleitung möglich; wird die einleitbare Wärmeenergie/Jahr reduziert?)

4.2 Datengrundlage

Es wurden gezielt Daten von Wärmeeinleitungen und entsprechenden Überwachungsmessungen in Gewässern des Potamals recherchiert.

Hierzu wurden Beispieldaten aus Niedersachsen geliefert. Dabei handelte es sich um Kombinationen von Stichprobendaten oberhalb und unterhalb von Wärmeeinleitungen (Kläranlagen). Von diesen gelieferten Daten befand sich jedoch nur ein Fall in einem Potamal-Gewässer. Dieser wurde ausgewertet und wird im Folgenden beschrieben. Über das Internet-Portal des NLWKN wurden außerdem geeignete Pegel-Daten recherchiert. Die Gesamtsituation ist in Abbildung 41 dargestellt (die genaue Lage der oberhalb und unterhalb der Einleitung positionierten Stichprobenmessstellen ist nicht bekannt).

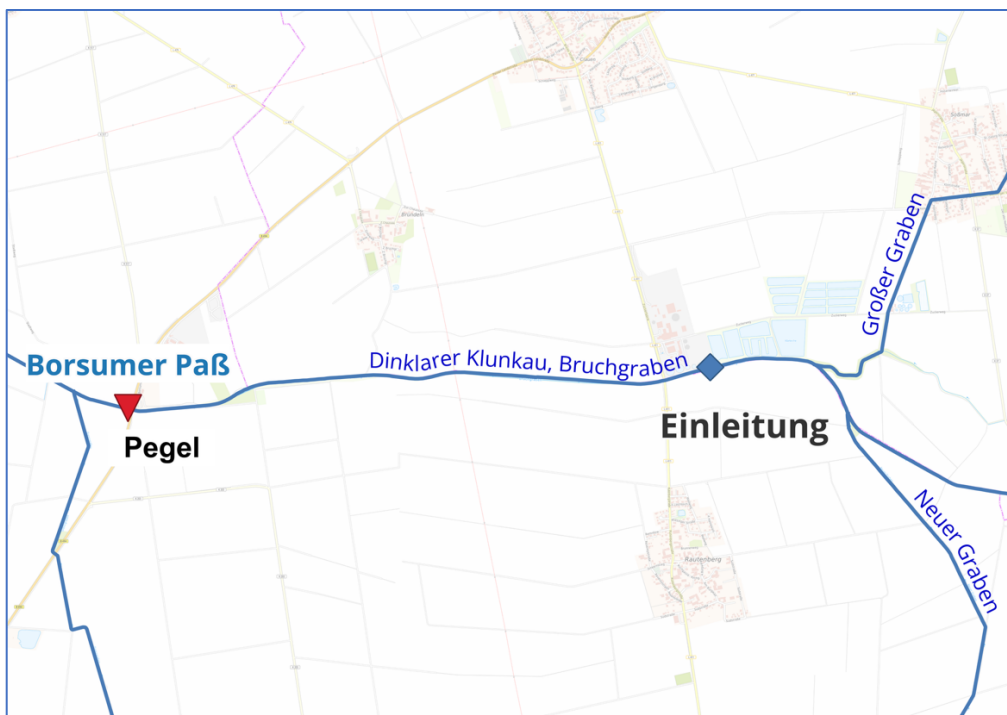


Abbildung 41: Fallbeispiel Bruchgraben (NI) mit Einleitung und Pegel

Die Wärmeeinleitung erfolgt aus einer Kläranlage in den Bruchgraben, ein Epipotamal-Gewässer. Es lagen Daten zu 27 Stichprobenmessungen aus Wintermonaten zwischen 2014 und 2024 vor. Bei zweien davon wurden Temperaturerhöhungen von etwas mehr als 2 K festgestellt. Ca. 3,5 km unterhalb der Einleitung befindet sich der Pegel „Borsumer Pass“ mit einem oberirdischen Einzugsgebiet $A_{Eo} = 126 \text{ km}^2$. Er ist seit 2018 nicht mehr in Betrieb. Für diesen Pegel konnten daher nur Tagesmittelwerte von 2014 – 2017 ermittelt werden (www.wasserdaten.niedersachsen.de). Gewässerkundliche Hauptwerte liegen nicht vor. Der Median-Abfluss des betrachteten Zeitraums liegt bei 0,158 m³/s. Die Eckdaten dieser Beispielfälle sind in Tabelle 113 dargestellt.

Tabelle 113: Eckdaten des Fallbeispiels

Kenngröße	Messung 1	Messung 2
Datum	10.12.14	07.01.21
T oberhalb [°C]	3	2,9
T Abwasser [°C]	8,5	7,9
T unterhalb [°C]	5,3	5,3
Erwärmung [K]	2,3	2,4
Genehmigte Abwassermenge [m ³ /s]	0,125	0,125
Abfluss Pegel [m ³ /s]	0,127	?

4.3 Analyse

Wird von einer vollständigen Durchmischung ausgegangen, lässt sich für Messung 1 errechnen, dass 0,053 m³ Abwasser in eine Vorflut von 0,074 m³/s eingeleitet wurde. Um eine maximale Erwärmung von 2 K einzuhalten, müsste der Abwasserabfluss bei gleicher Einleit-Temperatur auf 0,049 m³/s gedrosselt werden, also um ca. 7,5 %.

Für den zweiten Messtag lässt sich eine vergleichbare Abschätzung nicht vornehmen, da keine Pegeldaten vorliegen. Sofern exemplarisch unterstellt wird, dass die genehmigte Abwassermenge eingeleitet wurde, müsste der Abfluss oberhalb der Einleitung ca. 0,135 m³/s betragen haben, damit eine Erwärmung um 2,4 K resultiert. Der Abfluss unterhalb der Einleitung läge dann bei 0,26 m³/s, was etwa dem 70-Perzentil der Abflüsse entspricht. Um eine maximale Erwärmung von 2 K einzuhalten, müsste der Abwasserabfluss bei gleicher Einleit-Temperatur auf 0,1 m³/s gedrosselt werden, also um ca. 20 %.

4.4 Fazit

Für eine abschließende Bewertung ist die Datengrundlage zu gering.

Dennoch wurden bereits innerhalb der wenigen auswertbaren Stichprobenmesswerte zwei Messtage identifiziert, bei denen eine Reduktion des genehmigten Einleitungszuflusses zwischen 7,5 und 20 % zur Einhaltung des ΔT -Grenzwertes von 2 K in den

Wintermonaten erforderlich wäre. Auf Basis einer Mischungsrechnung mit den Wassertemperaturwerten oberhalb der Einleitung ergibt sich für Messung 1 ein Abwasseranteil von 41,9 % unterhalb der Einleitung. Für Messung 2 lässt sich so ein Abwasseranteil von 47,9 % abschätzen.

Somit ist nicht auszuschließen, dass der fachlich abgeleitete Verschärfungsvorschlag für den ΔT -Grenzwert zum Schutz der Gewässerökologie im Potamal durchaus spürbare Konsequenzen für Einleiter bedingen könnte. Dies dürfte insbesondere dann zutreffen, wenn der Anteil der Einleitung am Gesamtabfluss ähnlich hoch ist, wie im hier gezeigten Beispiel.

5 Sensitivitätsprüfung des Neuregelungsvorschlags zum Verzicht auf T_{max}-Vorgaben für die Übergangsmonate April/Mai und Oktober/November

5.1 Zielstellung

Im Rahmen des LFP-Projektes O 10.20 wurde vorgeschlagen, in den „Übergangsmonaten“ (April–Mai bzw. Oktober–November) auf T_{max}-Vorgaben zu verzichten und die maximal zulässige Erwärmung bzw. Abkühlung des Gewässers lediglich anhand der ΔT -Grenzwerte zu regeln (siehe Tabelle 114 und Tabelle 115).

Tabelle 114: Orientierungswerte für T_{max} und ΔT gemäß OGewV (2016)

	ff/tempff	Sa-ER	Sa-MR	Sa-HR	CypR	EP	MP	HP
T _{max} Sommer (April bis November) [°C]		≤ 20	≤ 20	≤ 21,5	≤ 23	≤ 25	≤ 28	≤ 28
Temperaturerhöhung Sommer [ΔT in K]		≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 2	≤ 3	≤ 3	≤ 3
T _{max} Winter (Dezember bis März) [°C]		≤ 8	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Temperaturerhöhung Winter [ΔT in K]		≤ 1	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 2	≤ 3	≤ 3	≤ 3

Tabelle 115: Modifikationsvorschläge zu den Orientierungswerten für T_{max} und ΔT gemäß OGewV (aus van Treeck & Wolter, 2021)

	Sa-ER	Sa-MR	Sa-HR	Cyp-R	EP	MP	HP
T _{max} Sommer (Juni bis September) [°C]	≤ 20	≤ 20	≤ 21,5	≤ 23	≤ 25	≤ 28	≤ 28
Temperaturerhöhung und -absenkung Sommer (Juni bis September) [ΔT in K]*	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 2	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Temperaturerhöhung und -absenkung Herbst (Oktober bis November) [ΔT in K]*	≤ 1	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2
T _{max} Winter (Dezember bis März) [°C]	≤ 8	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Temperaturerhöhung und -absenkung Winter (Dezember bis März) [ΔT in K]*	≤ 1	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2

	Sa- ER	Sa- MR	Sa- HR	Cyp -R	EP	MP	HP
Temperaturerhöhung und - absenkung Frühjahr (April bis Mai) [ΔT in K]*	≤ 1	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2

Grund für den Änderungsvorschlag ist die hochdynamische und von Jahr zu Jahr unterschiedlich verlaufende Wassertemperaturentwicklung während der Übergangsmonate, die eine starre, fachlich sinnvolle T_{max}-Vorgabe für diesen Zeitraum unmöglich macht. Die starken natürlichen Temperaturveränderungen in Frühjahr und Herbst sind ein wichtiger Auslöser für viele ökologische Prozesse (z. B. Gonadenreifung, Laichwanderung etc.) und werden durch die ausschließliche Vorgabe von ΔT -Grenzwerten ausreichend vor anthropogener Überprägung geschützt. Durch den vorgeschlagenen Verzicht von T_{max}-Vorgaben während der Übergangsmonate wird gleichzeitig die Problematik des Temperatursprungs in der bisherigen Regelung (z. B. im HP von T_{max} 10 °C am 31.03. auf T_{max} 28 °C am 01.04.), welcher bei kumulativen Wärmeinleitungen und starker Ausschöpfung der ΔT -Grenzwerte der einzelnen Einleiter zu einem unnatürlich starken Temperatursprung im Gewässer führen könnte, entschärft.

Durch den vorgeschlagenen Verzicht von T_{max}-Vorgaben in den Übergangsmonaten stünden jedoch für diese Monate keine Orientierungswerte für die Überprüfung von Temperaturüberschreitungen im Rahmen des WRRL ACP-Monitorings zur Verfügung. Ob dies eine Regelungslücke darstellt, ist davon abhängig, ob in Wasserkörpern mit T_{max}-Überschreitungen in den Übergangsmonaten auch in den verbliebenen Sommer- bzw. Wintermonaten eine Überschreitung festgestellt wird. Wäre dies der Fall, so würden Wasserkörper mit „Temperaturproblem“ weiterhin sicher identifiziert werden können. Zu klären ist in diesem Zusammenhang:

- Stellt die Beschränkung auf ΔT in den Übergangsmonaten eine ausreichende und praktikable Regelung dar?
- Kamen bisher und wenn ja, wie häufig in den Übergangsmonaten (Apr/Mai bzw. Okt/Nov) Überschreitungen von T_{max} vor?

5.2 Datengrundlage

Um die Auswirkungen dieser Änderung auf das ACP-Temperaturmonitoring zu beurteilen, wurden die Temperaturmessdaten, welche von den Bundesländern zur Aufstellung des BP 2021-2027 hinsichtlich Temperaturüberschreitungen ausgewertet wurden, erneut ausgewertet und die bisherige Regelung mit der neu vorgeschlagenen Regelung verglichen.

12 Bundesländer¹ haben Temperaturmessdaten aus den Jahren 2015-2021, wie sie zur Auswertung von Temperatur-Orientierungswertüberschreitungen zur Erstellung des BP 2021-2027 herangezogen wurden, zur Verfügung gestellt. Insgesamt liegen

¹ Baden-Württemberg, Bayern, Bremen, Hamburg, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein

124.727 Stichprobenmessungen vor, bei denen den Messstellen eine Fischgemeinschaft zugeordnet ist. Davon fallen 87.736 in den Zeitraum April bis November („Sommer“ gemäß OGewV), 36.991 in den Zeitraum Dezember bis März („Winter“ gemäß OGewV).

Von den insgesamt 124.727 vorliegenden Stichprobenmessungen, bei denen den Messstellen eine Fischgemeinschaft zugeordnet ist, fallen 44.767 in den Zeitraum Juni bis September. Die Messwerte verteilen sich wie in Abbildung 42 dargestellt auf die Fischgemeinschaften.

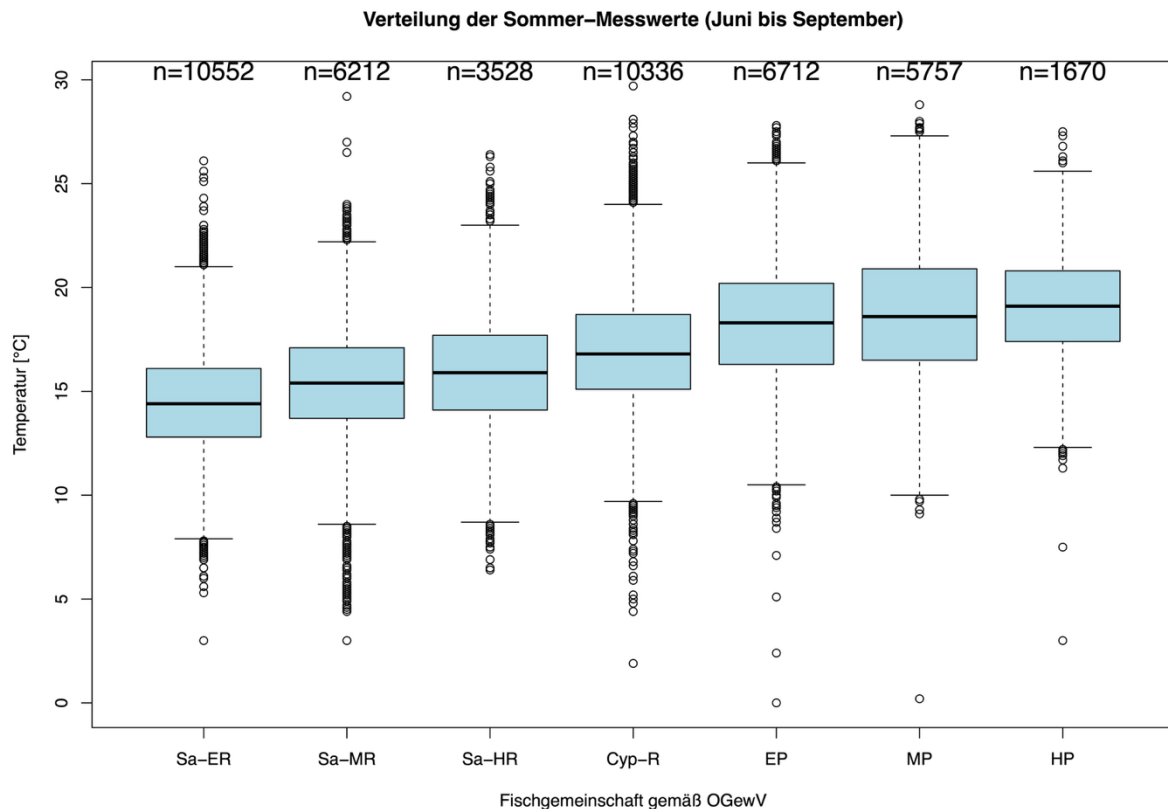


Abbildung 42: Verteilungen der Messwerte im Zeitraum Juni bis September auf die Fischgemeinschaften (Stichprobendaten)

5.3 Analyse

Aus den oben beschriebenen Daten ergeben sich 845 Fälle, bei denen für den Zeitraum April bis November eine Überschreitung des Sommer-T_{max}-Orientierungswertes verzeichnet wird (Tabelle 116).

Tabelle 116: Überschreitungen von Sommer-T_{max}-Orientierungswerten (Stichprobenmessungen)

OGewV-Fischgemeinschaft	Messwerte Sommer	Überschreitungen Sommer	Anteil
Sa-ER	20.235	216	1,1%
Sa-MR	12.098	280	2,3%
Sa-HR	6.992	82	1,2%

OGewV-Fischgemeinschaft	Messwerte Sommer	Überschreitungen Sommer	Anteil
Cyp-R	20.510	192	0,9%
EP	13.316	74	0,6%
MP	11.239	1	0,01%
HP	3.346	0	0%

Die Winter-T_{max}-Orientierungswerte werden in 1.301 Fällen überschritten (siehe Tabelle 117).

Tabelle 117: Überschreitungen von Winter-T_{max}-Orientierungswerten (Stichprobenmessungen)

OGewV-Fischgemeinschaft	Messwerte Winter	Überschreitungen Winter	Anteil
Sa-ER	8.012	619	7,7%
Sa-MR	5.014	76	1,5%
Sa-HR	3.213	42	1,3%
Cyp-R	8.471	226	2,7%
EP	5.862	180	3,1%
MP	4.852	157	3,2%
HP	1.567	1	0,1%

Bei der betrachteten Datengrundlage waren Überschreitungen der Winter-T_{max}-Orientierungswerte mehr als dreimal so häufig wie Überschreitungen der Sommer-T_{max}-Orientierungswerte (3 % im Winter gegenüber 0,9 % im Sommer).

Um zu prüfen, ob die Beschränkung auf ΔT in den Übergangsmonaten eine ausreichende und praktikable Regelung darstellt, wurde untersucht, ob bisher und wenn ja, wie häufig in den Übergangsmonaten (Apr/Mai bzw. Okt/Nov) Überschreitungen von T_{max} vorkamen. Dazu wurde folgendermaßen vorgegangen:

- Datengrundlage bestimmen
- Ermittlung der Fälle (Stichprobendaten) bei denen es in April–November zu Verletzungen von T_{max} kommt
- Ermittlung der Fälle (Stichprobendaten) bei denen es in Juni–September zu Verletzungen von T_{max} kommt
- Ermittlung der Fälle (Stichprobendaten) bei denen es in „Übergangsmonaten“ zu Verletzungen von T_{max} kommt

Bei 808 Messungen wurde im Zeitraum Juni bis September eine Verletzung des T_{max}-Orientierungswertes festgestellt (Abbildung 43).

Es resultieren 37 Fälle (4,6%), bei denen im Zeitraum April/Mai oder Oktober/November Verletzungen des T-Orientierungswertes zu verzeichnen sind. Diese sind in Abbildung 44 dargestellt.

Aus diesen 37 Messungen resultieren wiederum 17 Fälle (2,1%), bei denen an den betroffenen Messstellen im jeweils gleichen Jahr nur in diesen Monaten, also außerhalb des Zeitfensters Juni–September und Dezember–März Verletzungen des T_{max}-Orientierungswertes zu verzeichnen sind.

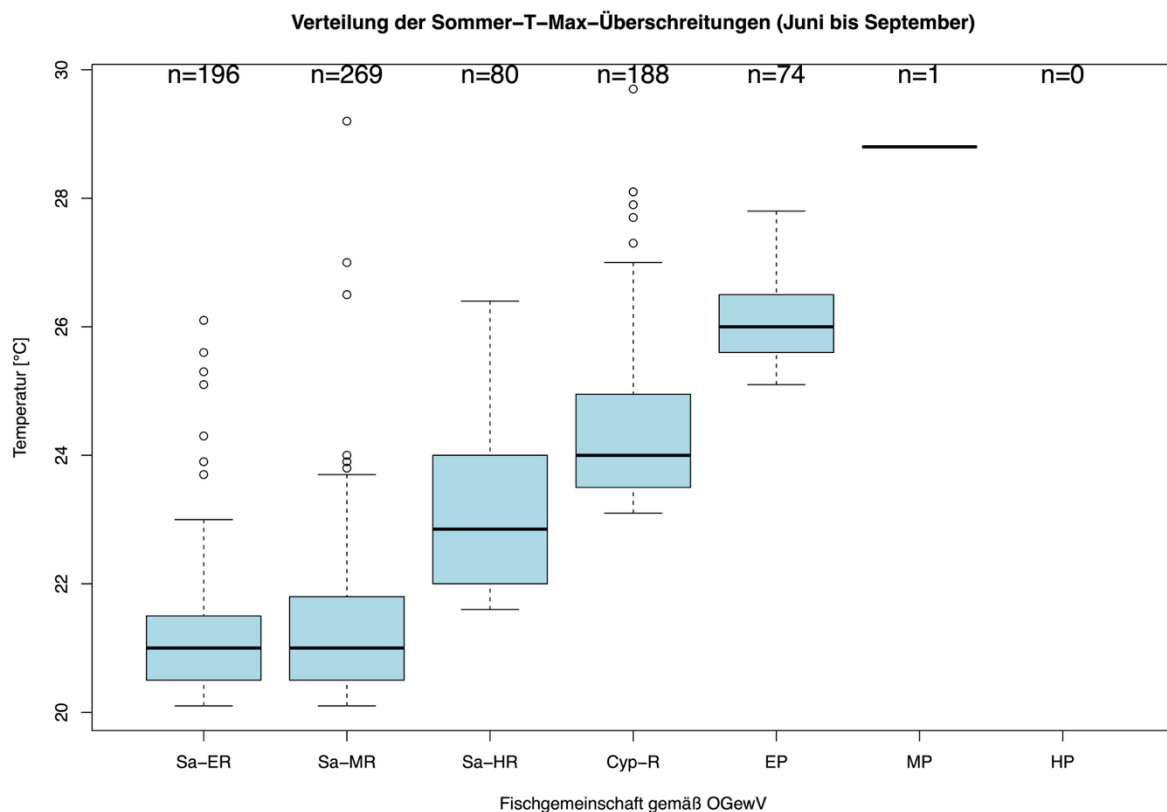


Abbildung 43: Verteilung der T_{max}-Überschreitungen (Sommer gemäß LFP-Projekt O 10.20) in den jeweiligen Fischgemeinschaften

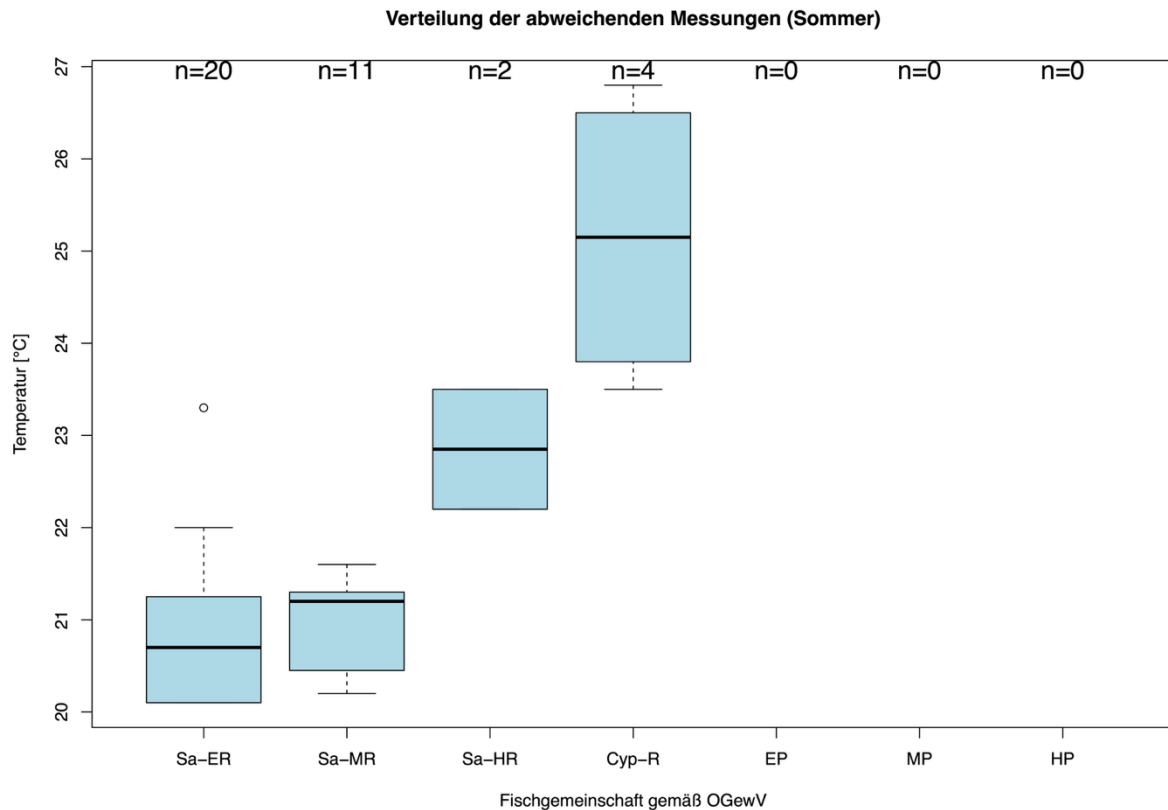


Abbildung 44: Verteilung der Tmax-Überschreitungen der abweichenden Fälle in den jeweiligen Fischgemeinschaften

Betrachtet man nun noch, ob in diesen Fällen ein "Temperaturproblem" im Winter identifiziert werden konnte, also im gleichen Jahr im Winter (mindestens) eine Orientierungswertüberschreitung zu verzeichnen ist, so verbleiben nur noch 11 Fälle (1,4%), bei denen Tmax-Überschreitungen ausschließlich in den Übergangsmonaten zu verzeichnen sind. Diese 11 Fälle betreffen 7 Messstellen in NRW, 2 Messstellen in Bayern und jeweils eine Messstelle in Baden-Württemberg und Sachsen (Tabelle 118).

Tabelle 118: Fälle mit Tmax-Überschreitungen ausschließlich in Übergangsmonaten

Bundesland	Messstelle	OGewV-Fischgemeinschaft	Jahr
Baden-Württemberg	CKO735	Cyp-R	2017
NRW	808076	Cyp-R	2017
NRW	431450	Sa-ER	2017
NRW	632200	Sa-ER	2018
BY	23397	Sa-HR	2017
BY	103107	Sa-MR	2017
NRW	125600	Sa-MR	2018
NRW	611323	Sa-MR	2018
NRW	631504	Sa-MR	2018
NRW	791544	Sa-MR	2016

Bundesland	Messstelle	OGewV-Fischgemeinschaft	Jahr
Sachsen	OBF32901	Sa-MR	2017

Die vergleichsweise hohe Anzahl von Fällen aus NRW ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass das dortige Monitoringkonzept eine relativ hohe räumliche Dichte (große Zahl von OWK und damit Messstellen) aufweist, aber gleichzeitig deutlich seltener Beprobungen erfolgen (4 – 6 Stichproben pro Jahr).

5.4 Fazit

Die Sensitivitätsprüfung des Neuregelungsvorschlags zum Verzicht auf T_{max}-Vorgaben für die Übergangsmonate April/Mai und Oktober/November ergab:

- Für die T_{max}-Regelung ist die Betrachtung des Zeitraums Juni bis September hinreichend, weil T_{max}-OW-Verletzungen praktisch nie ausschließlich in den „Übergangsmonaten“ auftreten und
- OWK mit „Temperaturproblem“ können bei einer ausreichenden Anzahl von Messungen in den Sommer- und Wintermonaten (im Sinne des Projekts O 10.20) identifiziert werden.
- Somit wird der Neuregelungsvorschlag zum Verzicht auf T_{max}-Vorgaben für die Übergangsmonate April/Mai und Oktober/November von den Auswertungsergebnissen unterstützt.

6 Überprüfung der Praktikabilität der vorgeschlagenen Referenzmessstellenregelung zur kumulativen ΔT -Wertbestimmung bei mehreren aufeinander folgenden Einleitungen

6.1 Zielstellung

Die Zielstellung dieses Arbeitspakets ist in der Leistungsbeschreibung wie folgt umrissen:

„Um die schädliche Wirkung starker anthropogener Erwärmung eines Gewässers, wie sie durch kumulative Erwärmung bei dicht aufeinanderfolgenden thermischen Einleitungen (um jeweils ΔT) derzeit möglich ist, zu begrenzen, wurde in O 10.20 vorgeschlagen, sich bei mehreren aufeinanderfolgenden Einleitungen in Zukunft auf eine durch thermische Einleitungen möglichst unbeeinflusste Referenzmessstelle zu beziehen und zusammen maximal eine Erwärmung um ΔT zuzulassen.

Die Auswirkungen dieser Regelung sollten möglichst an mehreren Gewässerabschnitten untersucht werden.

Falls sich nicht genügend Gewässerabschnitte finden lassen, an denen bereits 2023 die vorgeschlagene Regelung für kumulative Wärmeeinleitungen praktisch erprobt werden kann, müsste die Praktikabilität der vorgeschlagenen Regelung zusätzlich an weiteren Gewässerabschnitten durch zusammenfassende Analyse der Einzeldaten aufeinanderfolgender Wärmeeinleiter erfolgen.“

Die Frage, was genau unter der zu prüfenden Praktikabilität dieser Regelung verstanden werden soll, ist in der Leistungsbeschreibung nicht weiter konkretisiert. Prinzipiell kann sich die Praktikabilitätsprüfung beziehen auf:

- **Abstimmungsprozesse** zwischen allen an der Bewirtschaftungsplanung und/oder Einleitungsgenehmigungsverfahren beteiligten Akteuren (Gewässernutzer, Unterhaltungsträger, Behörden),
- **genehmigungsrechtliche,**
- **technische,**
- **nachweisbezogene** und
- **allgemein logische Aspekte,**

die entweder die praktische Umsetzbarkeit der angestrebten Neuregelung selbst oder der Erreichbarkeit ihres Ziels der Vermeidung einer für die Fischzönose nicht mehr verträglichen Gesamterwärmung eines Gewässerabschnitts durch mehrere, jeweils für sich beurteilt, unkritische Wärmequellen einschränken oder verhindern könnten.

Innerhalb des beauftragten Angebots wurde die Aufgabenstellung auftragnehmerseitig durch folgende Projektfragen konkretisiert:

„Es müssen Lösungsvorschläge für Fragen wie diese erarbeitet werden:

Frage 1 Wie ist vorzugehen, wenn im Längsverlauf eines Fließgewässers zwar mehrere Wärmeeinleiter aufeinander folgen, zwischen Ihnen aber auch Seitengewässer einmünden oder Gewässeraufteilungen auftreten?

Frage 2 Wie ist die Referenzmessstelle zu wählen, wenn die oberste Wärmeeinleitung direkt unterhalb eines Zusammenflusses zweier Fließgewässer liegt?

Frage 3 Wie sind natürliche und andere anthropogene Wassertemperaturveränderungen im Längsverlauf einer Wärmeeinleiterkette zu berücksichtigen?

Frage 4 Wo liegen Fallstricke des Neuregelungsvorschlags hinsichtlich der WRRL-Vorgaben zum Verschlechterungsverbot sowie zur Nichtgefährdung des Verbesserungsgebots?“

Die Aufgabenstellung wurde in erster Linie als Praktikabilitätsprüfung des Neuregelungsvorschlags hinsichtlich technischer, nachweisbezogener und allgemein logischer Kriterien verstanden, während rechtliche Aspekte nur im Hinblick auf die Ver- und Gebotstatbestände gem. WRRL ins Spiel kommen und die Frage der Abstimmung zwischen beteiligten Akteuren keine Rolle spielte.

6.2 Datenakquisition zu Beispielfällen

Vor dem Hintergrund der Projektziele wurden Fallbeispiele bei den Ländern angefragt, die entsprechend komplexe Situationen widerspiegeln. Erforderlich waren

- Gewässer mit mindestens zwei Wärmeeinleitern in ausreichender räumlicher Nähe
- Messstellen oberhalb, zwischen und unterhalb der Einleiter
- Verwendbare Emissions- und Immissionsdaten

Obwohl bereits deutlich vor der Projektbearbeitung Anfragen an den LAWA-Expertenkreis „Biologische Bewertung Fließgewässer und Interkalibrierung“ gestellt worden waren, gestaltete sich die Datenakquisition sehr schwierig.

Von mehreren Bundesländern sind Daten und Literatur bereitgestellt worden. Im Projektverlauf stellte sich heraus, dass die Datensätze nicht als potenziell geeignete Fallbeispiele nutzbar waren, um die hier zu betrachtende Situation adäquat zu beleuchten.

Aus einem Bundesland wurden zwar vielfältige potenziell geeignete Gewässer genannt. Allerdings gestaltete sich die Datenbereitstellung aufgrund unterschiedlicher Zuständigkeiten so langwierig, dass eine Liste mit Einleitern und deren Temperaturvorgaben erst verspätet einging. Fortführend hätten die entsprechenden Immissions- und Emissionsdaten zusammengestellt werden müssen, was nicht mehr innerhalb des Projektzeitraums erfolgen konnte.

Andere Kontakte, z.B. zu einem großen Abwasserentsorger in NRW, kamen zu spät im Projektverlauf zustande, so dass auch hier keine Fallbeispiele mehr gewonnen werden konnten.

In einem weiteren Fall, bei dem für die Erstellung eines Wärmelastplans räumlich sehr gut aufgelöste Immissionsdaten vorlagen, teilten kurz vor Erstellung dieses Berichts die Einleiter mit, dass sie ihre Emissionsdaten nicht für das Projekt zur Verfügung stellen würden.

Aus diesem Grund konnte im engen Zeitrahmen des Projektes kein Fallbeispiel mit Realdaten beschrieben und ausgewertet werden.

6.3 Diskussion anwendungsrelevanter Aspekte des Neuregelungsvorschlags anhand eines konstruierten Beispielfalls mit verschiedenen Einleitungsszenarien

Da innerhalb des Projektrahmens keine hinreichenden Beispielfälle im Sinne von realen Testfällen mit den dafür erforderlichen Datengrundlagen ermittelt werden konnten, um daraus konkrete Konsequenzen des Neuregelungsvorschlags für dessen praktische Umsetzbarkeit und für die verfolgte Zielsetzung ableiten und prüfen zu können, wurde entschieden, alternativ dazu, die eingangs formulierten Projektfragen mittels eines konstruierten Beispielfalls zu diskutieren.

Für eine kumulative Betrachtung und Beurteilung mehrerer benachbarter Wärmeeinleiter wurde ein hypothetisches Fallbeispiel konstruiert und als serielltes Mischungsrechnungsmodell in Excel angelegt, so dass daran verschiedene Szenarien durchgespielt werden konnten. Auf diese Weise wurden verschiedene theoretisch mögliche Extremfälle durchgespielt, um so die Spannweite der möglichen Konsequenzen des Neuregelungsvorschlags zu veranschaulichen.

Die grundsätzliche Struktur des konstruierten Beispielfalls ist in Abbildung 45 dargestellt.

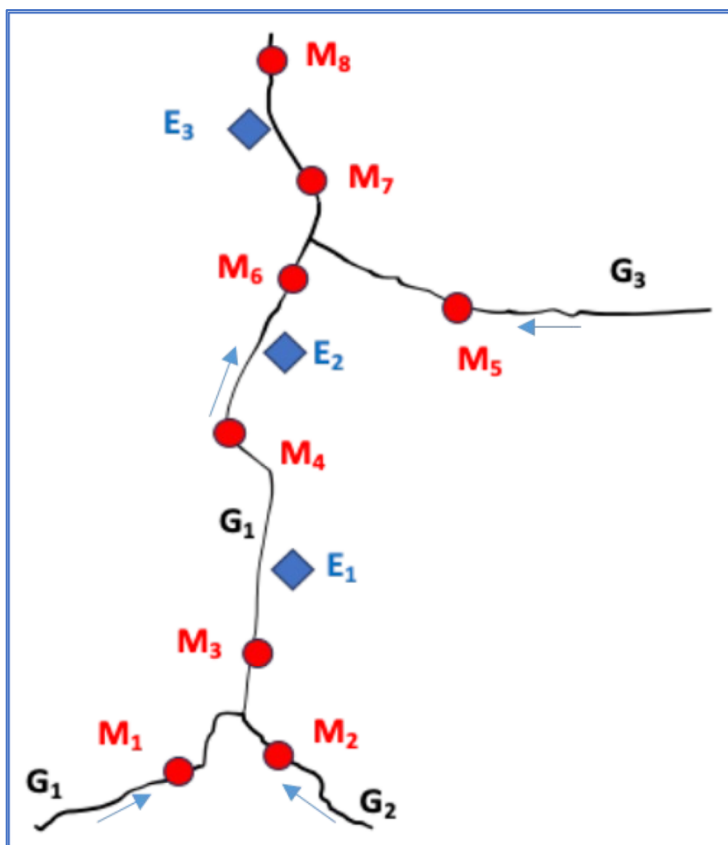


Abbildung 45: Nicht maßstäbliches Funktionsschema eines konstruierten Beispielfalls zum Test der Konsequenzen verschiedener Prinzip-Szenarien für ΔT mittels serieller Mischungsrechnungen; Gewässer (schwarz): G1 bis G3; Messstellen (rot): M1 bis M8; Einleitstellen (blau): E1 bis E3

Angenommen wurde ein Fall, bei dem einem, von drei Wärmeeinleitern (E1 bis E3) betroffenen Fließgewässer G1, zwei weitere Fließgewässer (G2 und G3) zufließen. Dabei leitet die erste Wärmequelle E1 in das Hauptgewässer G1 unterhalb der Einmündung des obersten Zuflusses G2 ein. Die zweite Wärmeeinleitung E2 erfolgt oberhalb und die dritte E3 unterhalb der Einmündung des zweiten Zuflusses G3 in das Hauptgewässer G1.

Um die Gewässertemperaturen oberhalb und unterhalb jeder Einleitung und jedes Zuflusses abbilden zu können, wurden insgesamt acht Messstellen (M1 bis M8) festgelegt, an denen sowohl die jeweilige Einzelwirkung, als auch die kumulative Gesamtwirkung mehrerer bis aller Einleitungen und Zuflüsse auf die Wassertemperaturen (ΔT) des aufnehmenden Hauptgewässers G1 (bei grundsätzlich angenommener Volldurchmischung) ermittelt werden können.

Die konstruierte Fallsituation von Gewässern und Einleitungen wurde so gewählt, dass auch in der Realität häufig vorhandene Einflüsse von Zuflüssen oberhalb und unterhalb von Einleitungen auf die jeweils bei hypothetischer Volldurchmischung anzunehmenden Wassertemperaturen innerhalb des aufnehmenden Gewässers mitberücksichtigt werden können. Dies ist besonders dann von Bedeutung, wenn Einleitungsstellen so unmittelbar unterhalb von Gewässerzusammenflüssen liegen, dass es in der Praxis nicht möglich ist, eine geeignete reale Bezugsmessstelle für einen oberhalb-zu-unterhalb-Vergleich einzurichten. Durch Einsetzen von Nullwerten für das einmündende Gewässer lässt sich das Modell an Situationen anpassen, in denen keine Seitengewässer einmünden.

Für die seriellen Mischungsrechnungen von Modellszenarien dieses hypothetischen Gewässer- und Einleitungsfallbeispiels bedurfte es gewässerseitig lediglich Eingangsdaten zu Durchflüssen und Wassertemperaturen der obersten Messstellen M1, M2 und M5 in den drei Gewässern G1 bis G3. Um prinzipiell realistische Daten zu verwenden, wurden dafür echte online-Daten von insgesamt drei Pegeln unterschiedlicher Fließgewässer aus Hessen (HLNUG – WISKI-Web) verwendet:

M1: Fulda (Kämmerzell)

M2: Altefeldbach (Bad Salzschlirf)

M5: Altefeldbach (Schlechtenwegen)

Dabei handelt es sich jeweils um Tagesmittelwerte der Durchflüsse und Wassertemperaturen aus den Jahren 2023 und 2024, mit denen für jeden Einzelkalendertag eine gesonderte Mischungsberechnung mit den Einleitungsdaten durchgeführt wurde.

Für die Wärmeeinleitungen wurden dagegen im Sinne einer worst-case-Betrachtung die genehmigten maximalen Einleitungszuflüsse und Einleitungswassertemperaturen aus einem unveröffentlichten (vom LANUV bereitgestellten) NRW-Projekt zu Wärmebelastungen von Fließgewässern für Fische aus dem Jahr 2013 als Eingangsdaten für die Mischungsberechnungen verwendet.

Somit wurden die Tagesmittelwerte der Gewässerdurchflüsse und -wassertemperaturen also jeweils mit den über den gesamten Zeitraum einheitlichen Genehmigungswerten für jeden Kalendertag gesondert verrechnet. Also so, als ob auf einen sich von Tag zu Tag verändernden durchschnittlichen Tages-Gewässerdurchfluss mit einer

ebenfalls variierenden Tagesdurchschnittstemperatur durchgängig derselbe Einleitungszufluss mit einer ebenso unveränderlichen Einleitungswassertemperatur über den gesamten Zeitraum treffen würde. Folglich werden damit die rein theoretisch maximal möglichen Gewässertemperaturbelastungen bei Volldurchmischung an den verschiedenen Messstellen des Fallbeispiels für jeden Kalendertag ermittelt. In der Realität werden aber die tatsächlichen Einleitungsmengen und -wassertemperaturen nie gleichverteilt auf jeden Zeitpunkt innerhalb eines Kalenderjahres sein, noch insgesamt die maximal genehmigten Werte vollkommen ausreizen. Insofern liegen die so durchgeführten Mischungsrechnungen aus gewässerökologischer Perspektive im Vergleich zur tatsächlichen Einleitungspraxis stets auf der „sicheren Seite“, sofern Verletzungen der Genehmigungsvorgaben ausgeschlossen werden.

Zudem ist hier klarzustellen, dass die verwendeten Genehmigungswerte, die für den Schutz anderer Gewässer, als die im Beispielfall simulierten, festgelegt worden sind, keinen Anspruch auf repräsentative Realitätsnähe haben. Daher wurden diese auch nur als mehr oder weniger zufällige Eingangswerte für das Ausgangsszenario verwendet, während sie für die durchgespielten anderen Szenarien als veränderliche Variablen nach unten oder oben angepasst wurden.

Neben der für jede Stelle des betroffenen Gewässers G1 angenommenen Volldurchmischung wurde auch jedweder andere Einfluss auf die Gewässerdurchflüsse und -temperaturen aus den Modellberechnungen ausgeschlossen (also weder Berücksichtigung erhöhender noch senkender Einflüsse). Daher entspricht auch die Darstellung der Gewässer, Einleit- und Messstellen in Abbildung 45 nicht etwa einer maßstäblichen Gewässerdarstellung, sondern lediglich einem Funktionsschema, nach dem die seriellen Mischungsrechnungen für die Werte der Messstellen M3, M4, M6, M7 und M8 erfolgten. Das bedeutet, dass trotz der Liniensymbolik nicht die Gewässerstrecken zwischen Messstellen und Einmündungs- und/oder Einleitstellen selbst dargestellt sind, sondern nur die Abfolgen der Mischpunkte im Gewässersystem wie sie den Modellberechnungen zugrunde liegen.

Durchgeführt wurden die seriellen Mischungsrechnungen gemäß den folgenden Berechnungsformeln:

Durchfluss: $Q_n = Q_{n-1} + Q_{n-2}$

Temperatur:
$$T_n = \frac{T_{n-1} \times Q_{n-1} + T_{n-2} \times Q_{n-2}}{Q_n}$$

D.h. es wurden für jede der Messstellen M3, M4, M6, M7 und M8, die tagesdurchschnittlichen Gewässerdurchflüsse und Wassertemperaturen unterschiedlicher Szenarien berechnet, die sich bei Volldurchmischung aus den jeweils vorausgehenden Gewässerdurchflüssen (und ggf. Zuflüssen) und Einleitungen ergeben würden.

Dazu wurden Szenarien konstruiert, die gewässerseitig alle mit den, den Messstellen M1, M2 und M5 zugewiesenen Tagesmittelwerten der hessischen Pegeldata (aus den Jahren 2023 und 2024) und einleiterseitig mit unterschiedlichen Maximalansätzen der Einleitungszuflüsse und -wassertemperaturen als Eingangsdaten berechnet wurden.

Ziel dieser Szenarien-Konzeptionierung war es, die aus gewässerökologischer Sicht für einen betroffenen Gewässerabschnitt pessimal möglichen Konsequenzen beider Regelungsvarianten für ΔT -Grenzwerte (d.h. Bezug auf Einzeleinleitungen oder Bezug auf die kumulative Gesamtwirkung mehrerer Einleitungen) zu bestimmen und die jeweiligen Konsequenzen diskutieren zu können.

Folgende Einleitungsszenarien wurden für den konstruierten Beispielfall durchgerechnet:

Ausgangsszenario:

Maximal genehmigte Jahreseinleitmengen umgerechnet auf m³/s und Einleitungswassertemperaturen in °C aus dem NRW-Projekt zu Wärmebelastungen von Fließgewässern für Fische aus dem Jahr 2013:

E1: Einleiter-ID „2.1 & 2.2 & 2.3“

E2: Einleiter-ID „45.1“

E3: Einleiter-ID „46.1“

Einzel- ΔT -Szenario:

Jeder Wärmeeinleiter trägt gerade so viel Wärme ein, dass es an keinem Tag des Jahres zu einer Überschreitung des auf die Einzeleinleiter bezogenen ΔT -Grenzwertes von 2 K für den Wassertemperaturunterschied zwischen den unmittelbar oberhalb und unterhalb gelegenen Bezugsmessstellen jeder der drei Einleitstellen kommt (M3 zu M4; M4 zu M6; M7 zu M8).

Folglich wäre dieses Szenario eines, das hinsichtlich einer einleitungsindividuellen ΔT -Grenzwertregelung theoretisch für alle drei Einleitungen genehmigungsfähig wäre (ohne Berücksichtigung der Einhaltung einer maximal zulässigen Wassertemperatur).

Kumulativ- ΔT -Szenario:

Alle Wärmeeinleiter tragen jeder für sich identisch viel und in Summe so viel Wärme ein, dass es gerade eben an keinem Tag des Jahres zu einer Überschreitung des den kumulativen ΔT -Grenzwert von 2 K für den Wassertemperaturunterschied zwischen der untersten und der obersten Bezugsmessstelle kommt (M3 zu M8).

Folglich wäre dieses Szenario eines, das hinsichtlich einer kumulativen ΔT -Grenzwertregelung theoretisch für alle drei Einleitungen genehmigungsfähig wäre (ohne Berücksichtigung der Einhaltung einer maximal zulässigen Wassertemperatur).

Da sich zeigte, dass die als gewässerseitige Eingangsdaten für alle Szenarien verwendeten mittleren Tages-Wassertemperaturen der hessischen Pegel in dem verwendeten Zeitraum auch Tage mit Spitzenwerten über 20 °C aufwiesen, traten folglich auch an den verschiedenen einleitungsbeeinflussten Messstellen in beiden ΔT -Szenarien Werte über diesem Wert auf. Werden beispielsweise 21 °C als Grenzwert für die maximale Tageswassertemperatur der Beispielgewässer angesetzt und wird weiterhin

davon ausgegangen, dass es in den kritischen Sommermonaten zu mittleren Tageswassertemperaturschwankungen von 1K über und unter der Tagesmittelwassertemperatur kommt, dann leitet sich daraus ein Schwellenwert für die jahresmaximale Tagesmittelwassertemperatur von 20 °C ab. Wenn das Gewässer von sich aus (d.h. ohne jeden Einleitungseinfluss) bereits diese Marke überschreitet, dürfte also zu diesem Zeitpunkt gar keine weitere Wärme eingeleitet werden.

Um zu testen, ob überhaupt eine der beiden ΔT -Regelungsvarianten bei einem ΔT -Grenzwert von 2 K eine sensiblere Begrenzungswirkung auf die resultierenden Gewässertemperaturen als ein Grenzwert für die jahresmaximale Wassertemperatur hat, wurden in einem zweiten Ansatz die ins Berechnungsmodell eingespeisten Wassertemperaturwerte gemäß folgender Regel prozentual abgesenkt bzw. „gestaucht“:

- Alle mittleren Tageswassertemperaturen > 15 °C wurden um 15 % und
- Werte zwischen 10 und 15 °C um 5 % abgesenkt.
- Werte < 10 °C blieben unverändert.

Mit diesen neu generierten gewässerseitigen mittleren Tageswassertemperatur-Eingangsdaten lagen alle jahresmaximalen mittleren Tageswassertemperaturen an der noch nicht einleitungsbelasteten Messstelle M3 bei 19,1 °C und somit noch unter der angesetzten 20°C-Grenze für jahresmaximale mittlere Tageswassertemperaturen. Damit wurden anschließend folgende Einleitungsszenarien getestet:

Einzel-Max-T-Szenario:

Jeder Wärmeeinleiter trägt so viel Wärme ein, dass es gerade eben an keinem Tag des Jahres zu einer Überschreitung des Jahresmaximal-Grenzwertes der mittleren Tageswassertemperatur von 20 °C an allen einleitungsbeeinflussten Messstellen von G1 kommt.

Folglich wäre dieses Szenario eines, das hinsichtlich einer einleitungsindividuellen Tmax-Grenzwertregelung theoretisch für alle drei Einleitungen genehmigungsfähig wäre (ohne Berücksichtigung einer der beiden ΔT -Regelvarianten).

Gleichverteilungs-Max-T-Szenario:

Alle Wärmeeinleiter tragen jeder für sich identisch viel und in Summe so viel Wärme ein, dass es gerade eben an keinem Tag des Jahres zu einer Überschreitung des Jahresmaximal-Grenzwertes der mittleren Tageswassertemperatur von 20 °C an allen einleitungsbeeinflussten Messstellen von G1 kommt.

Folglich wäre auch dieses Szenario eines, das hinsichtlich einer kumulativen Tmax-Grenzwertregelung theoretisch für alle drei Einleitungen genehmigungsfähig wäre. (ohne Berücksichtigung einer der beiden ΔT -Regelungen).

Auch für diese getesteten Einleitungsszenarien wurden parallel die Auswirkungen auf die Einzel- sowie die Kumulativ- ΔT -Wassertemperaturen geprüft, um herauszufinden, ob eher eine der ΔT -Regelungen oder die Tmax-Begrenzung die theoretische Genehmigungsfähigkeit der Einleitungen der durchgespielten Szenarien verhindern könnte.

Die Ergebnisse des Ausgangsszenarios sind im Folgenden anhand der variierenden Eingangsdaten der Einleitungen und der daraus resultierenden Konsequenzen für die

Wassertemperaturen der verschiedenen Messstellen in Tabellen und Diagrammen dargestellt.

Für alle anderen durchgespielten Szenarien befinden sich die gleichen Tabellen und Diagramme im Anhang.

Ausgangsszenario

Tabelle 119: Eingangsdaten der Einleitungen im Ausgangsszenario

Einleitungen	E1	E2	E3
Genehmigtes Tmax [°C] des Einleitwassers	30	30	33
Gen. max. Volumenstrom [m ³ /a]	470.000	60.000	8.935.200
Gen. max. Volumenstrom [m ³ /s]	0,0149	0,0019	0,2833

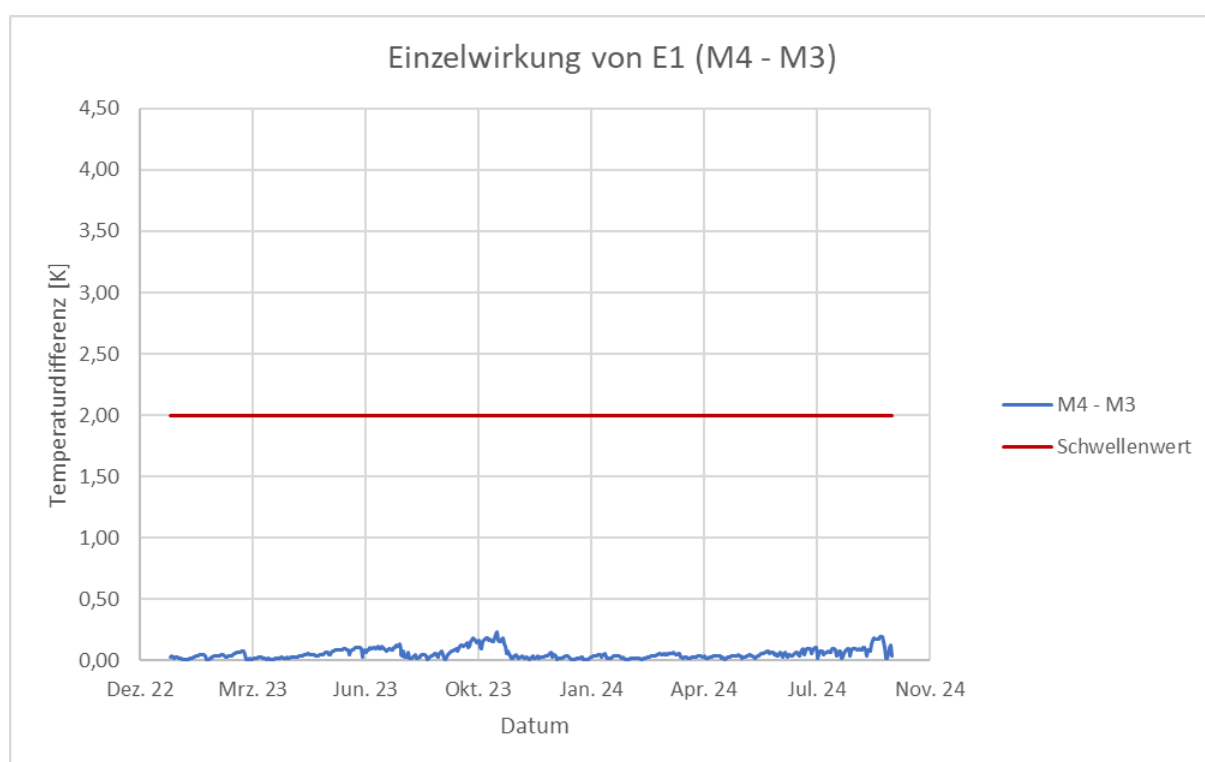


Abbildung 46: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E1 im Ausgangsszenario

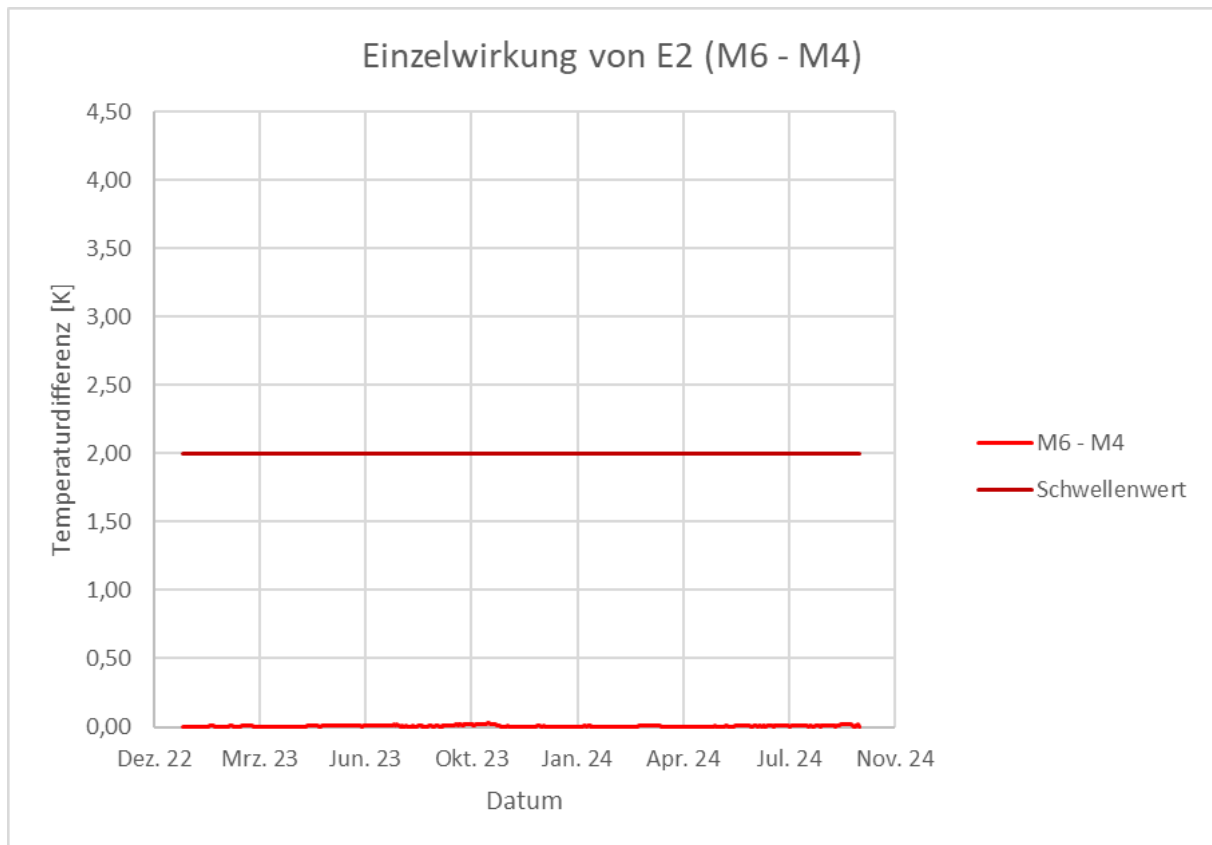


Abbildung 47: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E2 im Ausgangsszenario

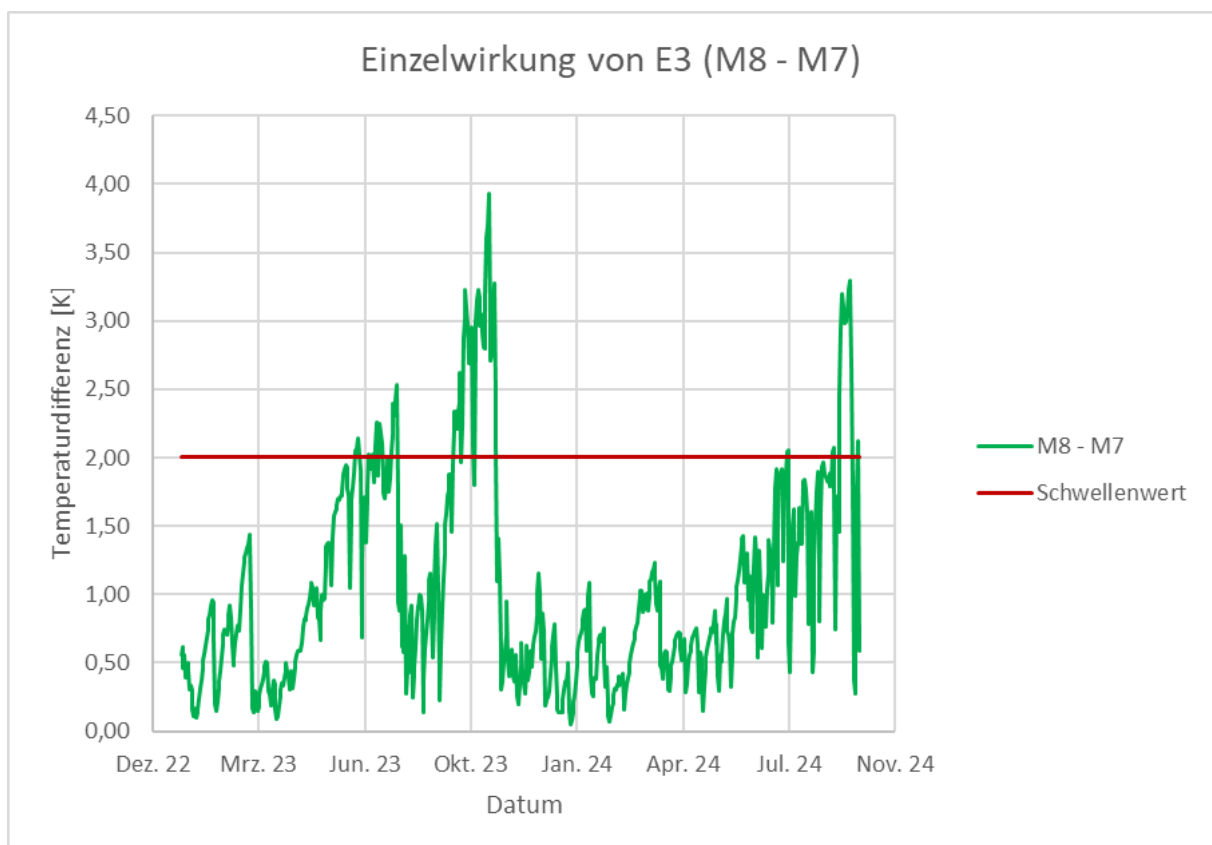


Abbildung 48: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E3 im Ausgangsszenario

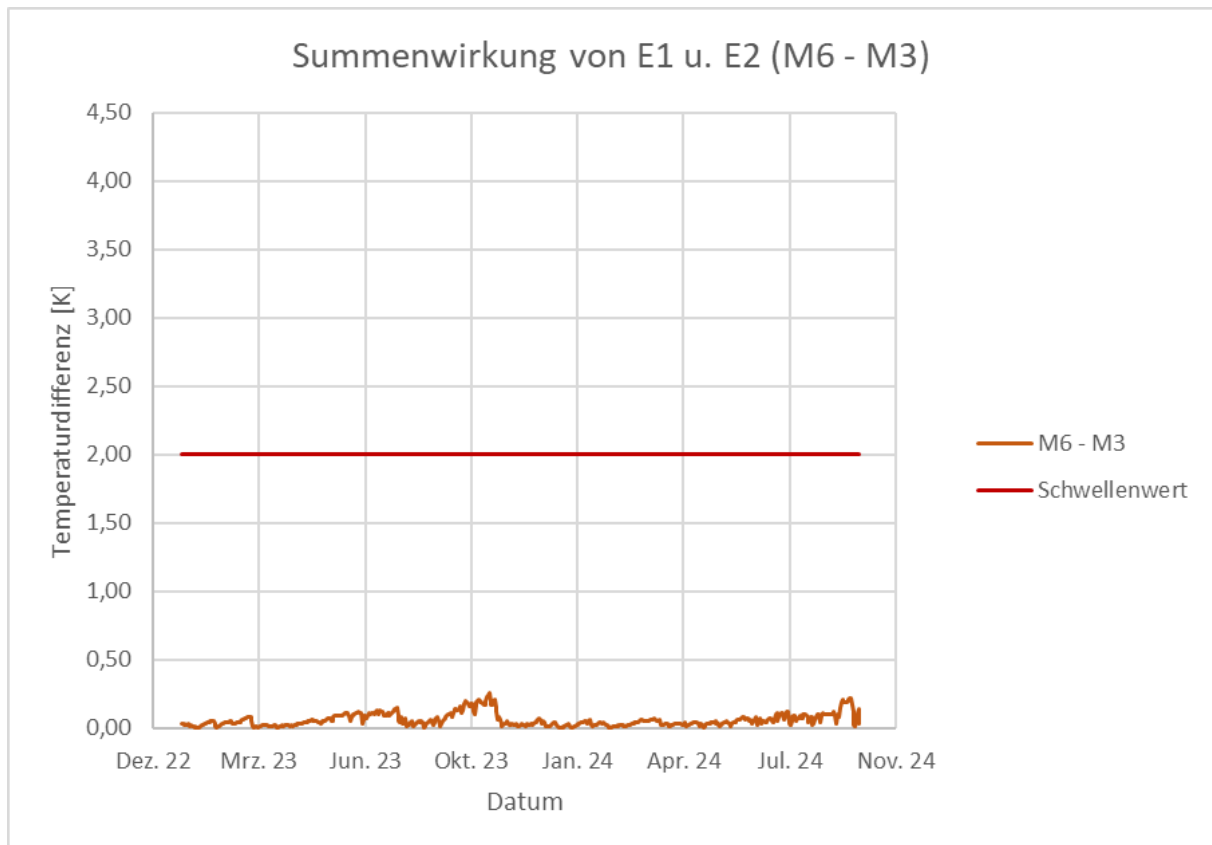


Abbildung 49: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1 und E2 im Ausgangsszenario

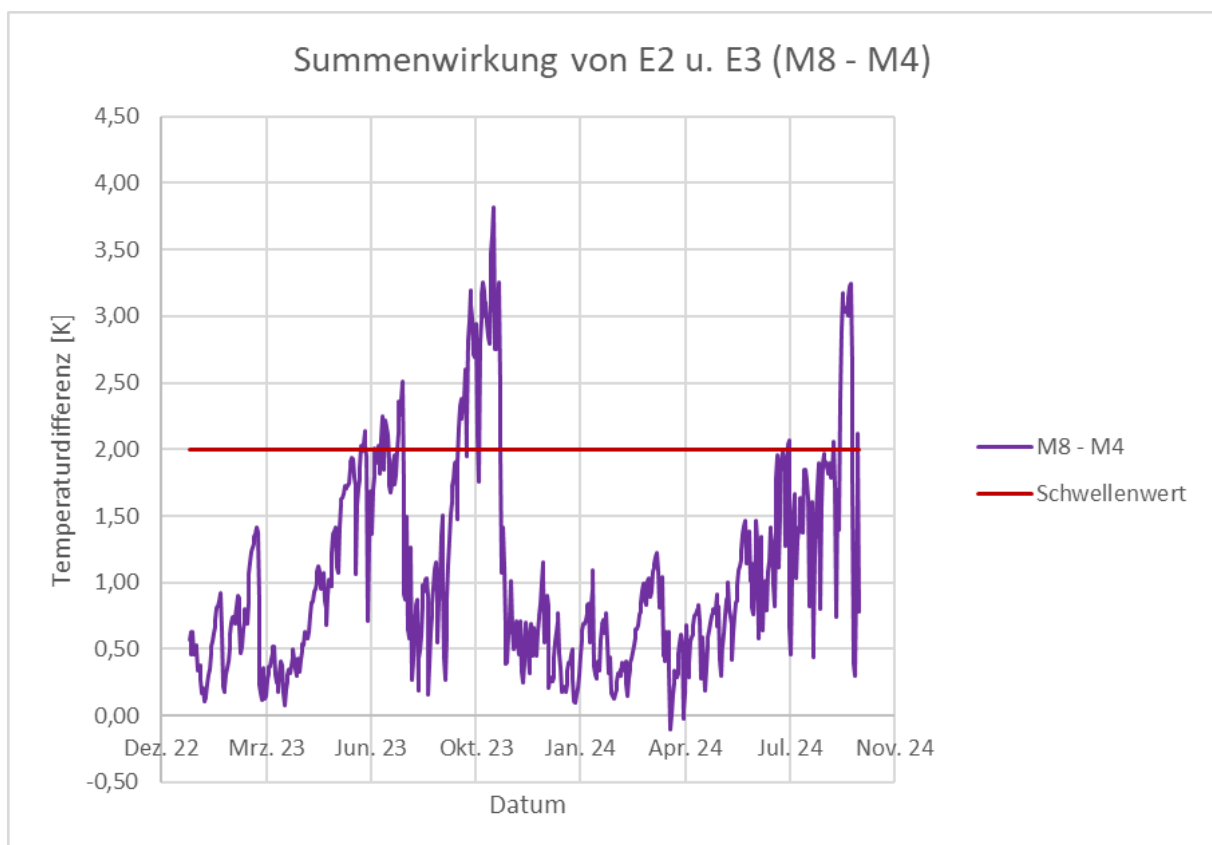


Abbildung 50: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E2 und E3 im Ausgangsszenario

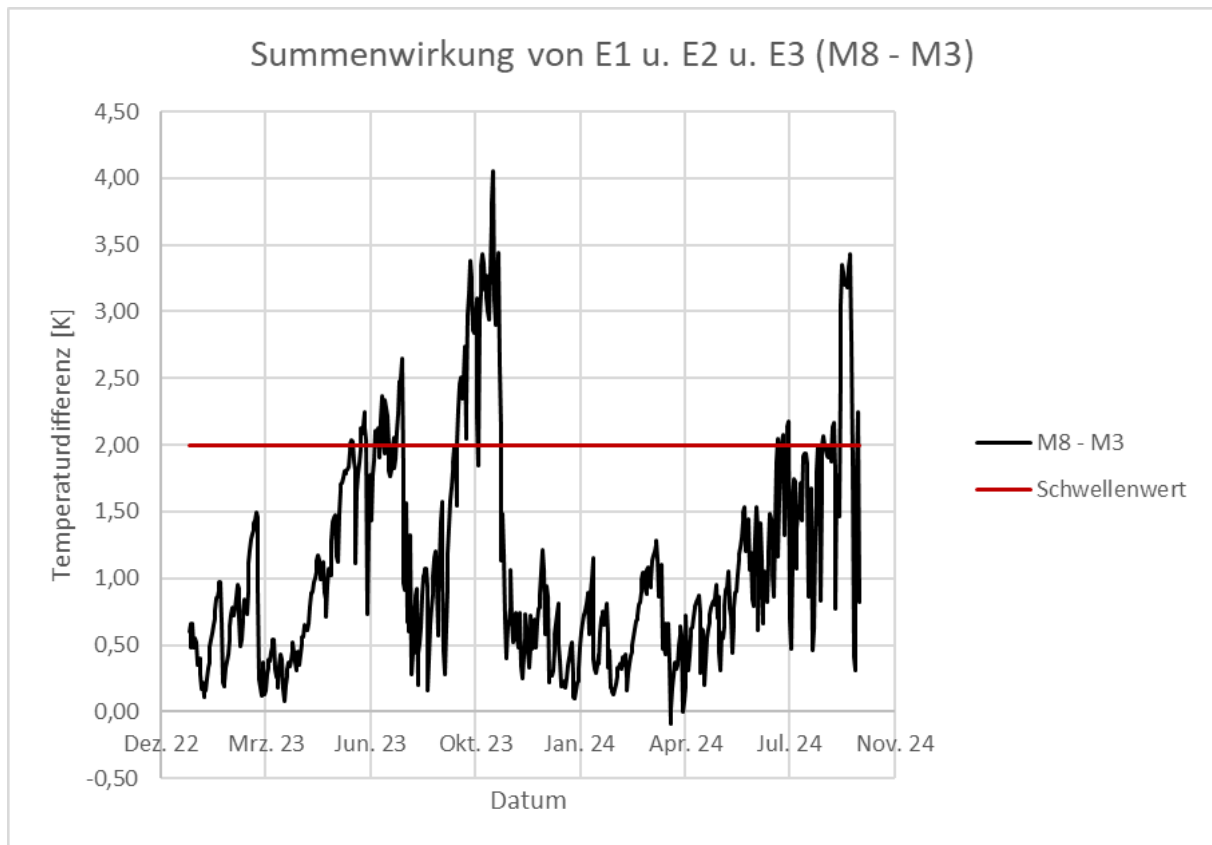


Abbildung 51: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1, E2 und E3 im Ausgangsszenario

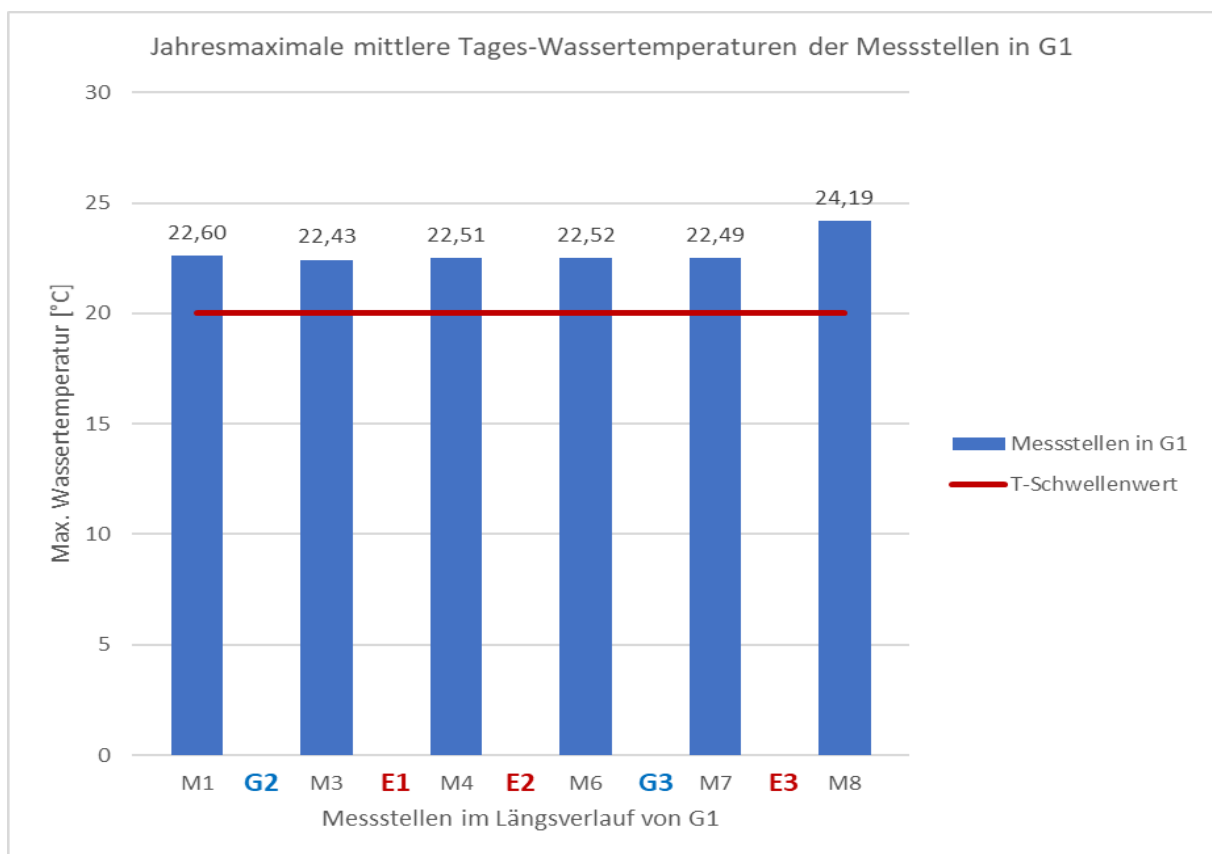


Abbildung 52: Jahresmaximale mittlere Tages-Wassertemperaturen an den Messstellen von G1 im Ausgangsszenario

Vergleichende Ergebnisdiskussion der seriellen Mischungsrechnungen für die geprüften Einleitungs-Szenarien

Ein Vergleich der in den vorangegangenen Diagrammen dargestellten Ergebnisse der verschiedenen Einleitungs-Szenarien zeigt anschaulich, dass die kumulative ΔT -Grenzwertregelung eindeutig mehr Schutz für die insgesamt betroffenen Gewässerabschnitte gegenüber anthropogenen Gewässererwärmungen bietet, als die Einzeleinleiter bezogene ΔT -Grenzwertregelung. Anders ausgedrückt heißt das, dass nur die kumulative ΔT -Grenzwertregelung sicherstellen kann, dass es nicht in Folge mehrerer hintereinander liegender Wärmequellen zu einer zu starken Erhöhung gegenüber den Ausgangswassertemperaturen und ihren jahreszeitlichen Verläufen kommen kann.

Für beide Regelungsvarianten stellt sich jedoch die Frage, welche Ausgangswassertemperaturen und -verläufe für die verschiedenen Fischgemeinschaften als hinreichend naturnah einzustufen sind, um sie noch um einen ΔT -Grenzwert von 2 K erhöhen zu können, so dass die daraus resultierende Wassertemperatur noch als fischverträglich gelten kann.

Außerdem ist fraglich, ob überhaupt davon ausgegangen werden kann, dass im Normalfall tatsächlich Bezugsmessstellen mit potenziell naturnahen Wassertemperaturverhältnissen oberhalb anthropogener Wärmequellen existieren? Und selbst wenn, wie weit wären die für diese Stellen passenden thermischen Verhältnisse auf stromabwärts gelegene Messstellen übertragbar? Um das zu beantworten, müssten letztlich die zeitlichen und räumlichen potenziell natürlichen und aktuellen Wassertemperaturentwicklungen im Längsverlauf der betroffenen Fließgewässer modelltechnisch abgebildet werden. Auf dieser Basis wäre dann jedoch kein räumlicher Wassertemperaturvergleich zwischen zwei Messstellen mehr erforderlich, sondern der ΔT -Grenzwert könnte direkt auf die Temperaturunterschiede zwischen den aus jeder Wärmeeinleitung resultierenden und den potenziell natürlichen Wassertemperaturen derselben Stellen angewandt werden.

Eine weitere Aussage, die sich aus den Szenarien mit den herunter gerechneten („gestauchten“) Eingangswassertemperaturen (Maximale mittlere Tageswassertemperatur 19,1 °C) ziehen lässt, ist die, dass bei einer an allen einleitungsbeeinflussten Messstellen gerade noch gewährleisteten Einhaltung eines Grenzwertes von 20 °C für die jahresmaximalen mittleren Tageswassertemperaturen alle Einleitungen den ΔT -Grenzwert von 2 K sowohl bei Einzel- als auch bei kumulativer Regelanwendung stark unterschreiten.

Der ΔT -Grenzwert von 2 K beginnt erst bei deutlich niedrigeren Ausgangswassertemperaturen gegenüber einem auf die maximalen mittleren Tagestemperaturen ausgerichteten Grenzwert von 20 °C an Bedeutung. Für die Modellszenarien war erst ab einer ca. 30-prozentigen Senkung der Wassertemperaturen oberhalb von 15 °C und bei einer 15-prozentigen Senkung für Werte zwischen 10 °C und 15 °C der Spielraum für den ΔT -Grenzwert ausgereizt. Das bedeutete an der Messstelle M1 einen jahresmaximalen mittleren Tageswassertemperaturwert von nur noch 15,8 °C, statt 22,6 °C. Erst unterhalb dieses Wertes führte eine weitere Absenkung der ins Berechnungsmodell eingespeisten Wassertemperaturwerte unweigerlich zu Verletzungen des ΔT -Grenzwerts sowohl bei Einzel- als auch bei kumulativer Regelanwendung.

Somit wird deutlich, dass die ΔT -Grenzwertregeln in erster Linie nur dann Bedeutung erlangen, wenn es um den besonderen Schutz thermisch sehr naturnaher bzw. besonders sommerkühler Gewässer vor punktuellen anthropogenen Veränderungen der Wassertemperaturen geht. In der vermutlich weit überwiegenden Zahl der Fälle, in denen bereits oberhalb aller anthropogenen Wärmeeinleitungsstellen die jahresmaximalen mittleren Tageswassertemperaturen nur wenige K unter dem zulässigen Maximalwert liegen, wird dagegen meist allein der Maximal-T-Grenzwert ausschlaggebend sein, da der ΔT -Grenzwert dann deutlich unterschritten wird.

6.4 Antworten auf die gestellten Projektfragen

Antworten zu Frage Nr. 1:

Wie ist vorzugehen, wenn im Längsverlauf eines Fließgewässers zwar mehrere Wärmeeinleiter aufeinander folgen, zwischen Ihnen aber auch Seitengewässer einmünden (a) oder Gewässeraufteilungen (b) auftreten?

Als Eingangsdaten können online verfügbare Durchflüsse (Tages- oder Stundenmittelwerte) geeigneter Pegel, die per Dreisatz über die langjährigen Durchflussskennwerte MNQ und MQ der Pegelstationen und die entsprechenden regionalisierten Durchflussskennwerte der einzelnen Gewässerabschnitte für diese berechnet werden.

Auf diese Weise können die Pegeldurchflüsse auf die relevanten Abschnitte näherungsweise als Zufluss-Eingangsgrößen der Seitengewässer ermittelt werden und für Mischungsrechnungen mit Wassertemperaturdaten von Loggern, die oberhalb der Einmündungsstellen in den Seitengewässern liegen sollten, verwendet werden.

Im Ergebnis kann so der Wärmeeinfluss der Seitengewässer auf die Wassertemperatur des von den Wärmeeinleitern beeinflussten Durchflusses des Hauptgewässers mittels einer weiteren Mischungsrechnung berücksichtigt werden.

Es ist gemäß der für (a) beschriebenen Methodik der stündliche Durchfluss des Hauptgewässers vor seinem Zusammenfluss zu bestimmen.

Es müssen Informationen zur prozentualen Aufteilung des Hauptgewässers in zwei Arme bei verschiedenen Wasserständen vorliegen, um damit die Durchflüsse für beide Arme ermitteln zu können.

Die Mischungsrechnungen zur Bestimmung der aus den Wärmeeinleitungen resultierenden Wassertemperaturen wird für den jeweils betroffenen Gewässerarm zwar mit gleichen Eingangswassertemperaturen aber unterschiedlichen Durchflusswerten in Kombination mit den entsprechenden Einleitungsmengen und -wassertemperaturen durchgeführt.

Antworten zu Frage Nr. 2:

Wie ist die Referenzmessstelle zu wählen, wenn die oberste Wärmeeinleitung direkt unterhalb eines Zusammenflusses zweier Fließgewässer liegt?

Wenn die oberste Wärmeeinleitung direkt unterhalb eines Zusammenflusses zweier Fließgewässer erfolgt, ist jeweils eine Referenzmessstelle für die Wassertemperatur pro Zufluss erforderlich.

Durch Mischungsrechnung mit den Temperatur- und Durchflussdaten beider Zuflüsse wird dann quasi eine virtuelle Referenzstelle zur Weiterverrechnung mit den Einleitungsdaten berechnet.

Antworten zu Frage Nr. 3:

Wie sind natürliche und andere anthropogene Wassertemperaturveränderungen im Längsverlauf einer Wärmeeinleiterkette zu berücksichtigen?

Es hängt davon ab, welcher Art und wie stark die anderen Einflüsse auf die Wassertemperatur im Längsverlauf der Wärmeeinleiterkette sind und welche Messwerte dafür (hinsichtlich Temperatur und Durchfluss) vorliegen, ob und wie diese in die Mischungsrechnungen einfließen können.

Idealerweise werden auch andere Einflüsse analog zu Seitenzuflüssen oder Einleitungen in den abschnittswisen Mischungsrechnungen berücksichtigt.

Es sei darauf hingewiesen, dass die natürliche sukzessive (jahreszeit- und wetterabhängige) Wassertemperaturveränderung pro Fließstrecke eines Fließgewässers von seiner Quelle bis zur Mündung in den seriellen Mischungsrechnungen der von einer Einleiterkette betroffenen Gewässerabschnitte vernachlässigt wird.

Antworten zu Frage Nr. 4:

Wo liegen Fallstricke des Neuregelungsvorschlags hinsichtlich der WRRL-Vorgaben zum Verschlechterungsverbot sowie zur Nichtgefährdung des Verbesserungsgebots?

Für die Nachweisführung der Einhaltung der Ver- und Gebotstatbestände der WRRL durch einen Vorhabenträger (hier Wärmeeinleiter) ist es erforderlich, sowohl die Nichtgefährdung der Zielerreichbarkeit eines guten ökologischen Zustands, bzw. Potenzials für die betroffenen Wasserkörper als Ganzes nachzuweisen als auch mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Verschlechterung jeder der biologischen Qualitätskomponenten der betroffenen Wasserkörper um eine ökologische Bewertungsklasse ausschließen zu können.

Auch die ΔT -Grenzwertregeln sollten daher sicherstellen, dass bei ihrer Einhaltung diese Vorgaben für den gesamten Wasserkörper erfüllt werden. Dies kann aber nur mit der kumulativen ΔT -Regelung gewährleistet werden, da sich die auf Einzeleinleitungen bezogenen Prüfungen nur auf die lokalen Verhältnisse unterhalb der Einleitungen beziehen.

6.5 Fazit

Aus dem als serielles Mischungsrechnungsmodell angelegten konstruierten Fallbeispiel ließen sich die folgenden Erkenntnisse gewinnen:

- Nur die kumulative ΔT -Grenzwertregelung kann sicherstellen, dass es nicht in Folge mehrerer hintereinander liegender Wärmequellen zu einer zu starken Veränderung gegenüber den Ausgangswassertemperaturen und ihren jahreszeitlichen Verläufen kommen kann.
- Wie anthropogen unbeeinflusst die Ausgangswassertemperaturen allerdings sind oder überhaupt nur sein können, ist eine andere Grundsatzfrage, die zu beantworten nicht Aufgabe des Praxistests war. Sie sollte sich im Prinzip aber in

gleicher Weise sowohl für kumulative als auch für auf Einzeleinleiter bezogene ΔT -Betrachtungen stellen.

- Der ΔT -Grenzwert von 2 K gewinnt erst bei deutlich niedrigeren Ausgangswassertemperaturen gegenüber einem auf die maximalen Wassertemperaturen ausgerichteten Grenzwert an Bedeutung.
- Das bedeutet im konstruierten und durchgespielten Beispielfall, dass an der Messstelle M1 erst stark herabgesetzte, ins Berechnungsmodell eingespeiste Wassertemperaturen mit jahresmaximalen mittleren Tageswassertemperaturen unter 15,8 °C zu Verletzungen des ΔT -Grenzwerts sowohl bei Einzel- als auch bei kumulativer Regelanwendung führten.
- Serielle Mischungsrechnungen dieser Art eignen sich auch zur Festlegung emissionsseitiger Genehmigungsgrenzwerte für hintereinander liegende und geplante Einleitungen, da sie auch die hypothetischen Volldurchmischungs-Wassertemperaturen von Stellen ohne tatsächliche Volldurchmischung abbilden können.

7 Erprobung der Neuregelung für Kaltwassereinleitungen

7.1 Zielstellung

Wegen der zunehmenden Bedeutung von Einleitungen kälterer Wässer, z. B. durch Wärmepumpen, wurden in dem LFP-Projekt O 10.20 Regelungen für die Begrenzung von Gewässerabkühlung durch Kaltwassereinleitungen analog zur Begrenzung der Gewässererwärmung durch Wärmeeinleitungen vorgeschlagen. Die Umsetzung dieser vorgeschlagenen Regelungen sollten anhand von Temperaturdaten von zehn Fallbeispielen realer Kaltwassereinleitungen oder anhand von Informationen von in Planung oder Beantragung befindlichen Kaltwassereinleitungen ausgewertet werden. Hierbei standen ausdrücklich Kaltwassereinleitungen im Zusammenhang mit Wärmepumpen im Vordergrund. Gewässerabkühlungen, wie sie durch den Grundablass von Talsperren entstehen, sollten nicht betrachtet werden.

7.2 Datenakquisition zu Fallbeispielen

Bereits vor der Projektbearbeitung sind Anfragen an den LAWA-Expertenkreis „Biologische Bewertung Fließgewässer und Interkalibrierung“ gestellt worden. Der Rücklauf dazu deutete bereits an, dass sich auch hier die Beschaffung geeigneter Realdaten schwierig gestalten könnte.

Das Problem der Datenakquisition wurde daher auch regelmäßig im begleitenden Arbeitskreis erörtert, es konnte aber letztlich nicht gelöst werden.

Eine erweiterte Abfrage durch die Auftragnehmer – insbesondere aufgrund von Publikationen zu im Betrieb befindlichen Flusswärmepumpen in Deutschland – an die betreffenden Bundesländer (Bayern, Baden-Württemberg) wurde zwar zeitnah, aber negativ beantwortet. In den allermeisten Fällen lagen keine aussagefähigen Messdaten vor. In einem Fall wurden die erwarteten Auswirkungen als so gering beschrieben (0,006 K bei NQ, Flusswärmepumpe Mannheim), dass sie messtechnisch nicht erfassbar sind.

Außerdem wurde auf der Website des Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. nach möglichen Anlagen recherchiert, und es wurde der dort genannte Referent Technik und Normung, mit konkreten Fragen zu Temperaturmessdaten, konkreten Anlagen, Genehmigungsunterlagen, technischen Standards, üblichen Auflagen bei der Genehmigung, evtl. regionale Unterschiede in der Genehmigungspraxis angeschrieben. Leider erfolgte daraufhin keine Antwort.

Ein Grundproblem ist, dass es deutschlandweit bisher nur sehr wenige Anlagen gibt, die aus Fließgewässern Wärme entnehmen. Diese wenigen Anlagen werden noch nicht lange genug betrieben, so dass keine geeigneten Monitoringdaten vorliegen.

7.3 Anwendungserprobung des Neuregelungsvorschlags für Kaltwassereinleitungen

Die thermische Nutzung von Gewässern für den Betrieb von Wasserwärmepumpen gewinnt zunehmend an Bedeutung und damit auch die Frage nach den gewässerökologischen Auswirkungen der resultierenden Kaltwassereinleitungen. Im Rahmen des vorliegenden Projektes sollten daher auch Fallbeispiele zur Regelung von Kaltwassereinleitungen aus Wärmepumpen betrachtet und bewertet werden. Trotz intensiver Bemühungen konnten hierzu jedoch keine Fallbeispiele mit Regelungsvorschriften oder Überwachungs- und Monitoringdaten recherchiert werden.

Die Thematik der thermischen Nutzung wurde jedoch in einem Parallelprojekt (LAWA – LFP 2023, Projekt O 5.23) bearbeitet, wobei mit Bezug zur vorliegenden Studie folgende Punkte hervorzuheben sind:

Aquatische Organismen reagieren auf Temperaturabsenkungen vielfach anders und empfindlicher als auf Temperaturerhöhungen. Die für Temperaturerhöhungen geltenden Regelungen zu zulässigen Maximalspannen von Temperaturänderungen oder Temperaturänderungsraten können nicht einfach auf Temperaturabsenkungen übertragen werden. Hier sind neue und schärfere Regelungen zu finden, die der empfindlicheren Reaktion der Organismen Rechnung tragen. Hierzu werden in der zitierten Studie Vorschläge gemacht.

In der Praxis dürfte von einem sehr diskontinuierlichen Betrieb von Gewässerwärmepumpen ausgegangen werden, mit sowohl jahres- als auch tageszeitlich stark variierenden Kaltwassereinleitungen und Temperaturänderungen. Hierdurch werden Anpassungsreaktionen der Biozöten auf veränderte Temperaturbedingungen im Gewässer massiv erschwert bis unmöglich. Die diskontinuierlichen Temperaturänderungen erfordern daher andere Regelungsvorschriften als längerfristig gleichbleibende Wärme- oder Kaltwassereinleitungen mit geringerer Dynamik. Bei häufigem Wechsel der Betriebszustände ist auch der Frage zulässiger Temperaturänderungsraten besonders Rechnung zu tragen. Im zitierten Projekt wird eine zulässige Temperaturänderungsrate von 0,5 bis maximal 1 K/h vorgeschlagen.

Die Ausbildung von Kälteinseln unterhalb von Kaltwassereinleitungen wird für das Gewässerökosystem als besonders kritisch bewertet, besonders gravierende Temperaturverringerungen können bei Fischen einen „Kälteschock“ auslösen. Damit sind auch die Festlegungen der zulässigen räumlichen Ausdehnung von Durchmischungszonen zu hinterfragen und eventuell neu festzulegen. Im zitierten Projekt wird ein „innerer Durchmischungsbereich“ empfohlen, in dem Abweichungen von den Anforderungswerten an ökologisch maximal verträgliche Temperaturveränderungen tolerierbar sind. Seine Ausdehnung beträgt maximal 1/3 der Gewässerbreite in der Breite und maximal zweifacher Gewässerbreite in der Länge. Vorgeschlagen wird zudem eine maximal zulässige Temperaturspreizung von 5 K (zwischen Entnahme und Rückleitung), unter der Voraussetzung, dass die Einleitung des abgekühlten Wassers mit technischen Maßnahmen zur raschen Durchmischung verbunden wird.

Vor dem Hintergrund der allgemeinen Klimaerwärmung und der vorherrschenden thermischen Belastung von Gewässern werden durch Wärmepumpen erzeugte Kaltwassereinleitungen und ihr Kühlungseffekt häufig als positive Auswirkung betrachtet, die

insbesondere im Sommer mit den klimatisch bedingten Erwärmungen dazu beitragen kann, dass die zulässigen Maximaltemperaturen nicht überschritten werden. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde gezeigt, dass es in den Gewässern jedoch gerade im Winter besonders häufig zu Überschreitungen der zulässigen Maximaltemperaturen kommt. Auch hier kann der Kühlungseffekt von Kaltwassereinleitungen dazu beitragen, dass die zulässigen Maximaltemperaturen nicht überschritten werden, wobei die schädigende Wirkung einer Grenzwertüberschreitung hier physiologisch anders begründet ist als im Sommer. Dabei ist jedoch auch zu beachten, dass winterliche Temperaturabsenkungen nicht so stark sind, dass die Gewässertemperaturen in den für Fische physiologisch kritischen Bereich von 4 °C abfallen oder sogar eine Grundeisbildung begünstigen.

Die Auswirkungen einer verstärkten thermischen Nutzung von Fließgewässern und die damit verbundenen, eventuell sehr dynamisch und mit hohen Änderungsraten erfolgenden Kaltwassereinleitungen auf die Gewässerbiozönosen und insbesondere auf die Fischfauna sind kaum untersucht und entsprechend schwierig zu prognostizieren. Vor diesem Hintergrund erscheint es fachlich geboten, aufgrund des Vorsorgeprinzips die im zitierten Projekt vorgeschlagenen weitreichenderen Regelungen und Grenzwerte in anstehenden Genehmigungsverfahren anzuwenden und in den Nebenbestimmungen von Bescheiden ein entsprechendes Monitoring (Temperaturmessprogramm im Gewässer und Untersuchung biologischer Qualitätskomponenten) zu verankern.

Monitoringdaten von realen Kaltwassereinleitungen aus Wärmepumpen fehlen derzeit, sind aber die Voraussetzung, um die ökologischen Auswirkungen dieser Anlagen und deren Betriebsweisen zu erforschen und Regelungsmechanismen abzuleiten.

8 Literaturlauswertung zu Ursachen und Gegenmaßnahmen diffuser Temperaturveränderungen in Fließgewässern

8.1 Methodik

Die Literaturrecherche erfolgte nach den Methoden einer systematischen Literaturrecherche mittels passender Schlagwörter in den gängigen Rechercheportalen (ResearchGate, Google Scholar etc.), dem eigenen Datenbestand sowie mittels Schneeballmethode in geeigneten Fachpublikationen. Die recherchierten Publikationen umfassen wissenschaftliche Arbeiten und andere Veröffentlichungen (behördliche Veröffentlichungen, Bücher und Reporte). Insgesamt wurden 93 Publikationen in die Auswertung einbezogen und eine Vielzahl weiterer Publikationen gesichtet, ohne dass diese Studien in die finale Ergebnisdarstellung dieses Berichtes einfließen.

In den letzten Jahren hat es vor dem Hintergrund der zunehmenden Beschleunigung des anthropogenen Klimawandels auch eine Zunahme wissenschaftlicher Publikationen zur Erfassung und Quantifizierung der verschiedenen relevanten anthropogenen und natürlichen Einflussfaktoren auf die Wassertemperaturverhältnisse in Fließgewässern gegeben. Die hier erfolgte Recherche der aktuellen internationalen Fachliteratur versucht Zusammenhänge zwischen thermischen Belastungsursachen und den daraus resultierenden Wassertemperaturveränderungen in Fließgewässern sowie mögliche Gegenmaßnahmen darzustellen.

Die Wassertemperatur ist einer der maßgebenden Parameter zur Bestimmung des allgemeinen Zustands eines aquatischen Systems (Coutant 1999) mit vielfältigen Auswirkungen auf die darin lebenden Organismen.

In einem nicht anthropogen geprägten Umfeld wird das Temperaturregime eines Fließgewässers durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren bestimmt, welche sich in vier Kategorien einteilen lassen (Caissie 2006): Topografie, Abflussbedingungen, Gewässerbett und Witterungsverhältnisse (siehe Abbildung 53).

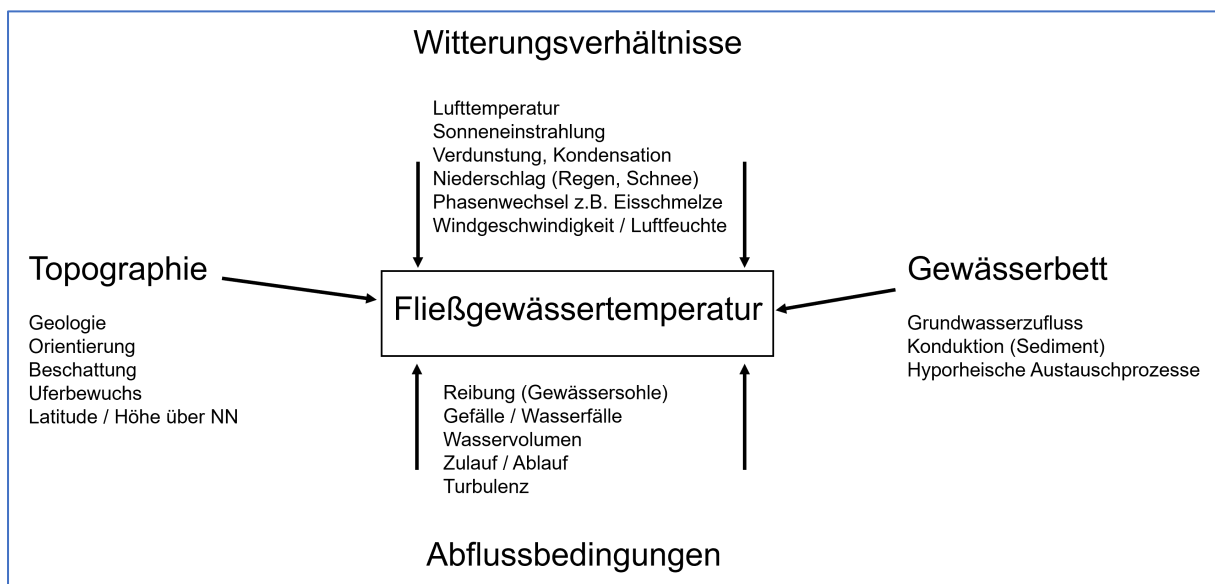


Abbildung 53: Einflussfaktoren des Temperaturregimes von Fließgewässern (nach Caissie 2006)

Ferner schwankt die Temperatur eines natürlichen Fließgewässers sowohl im Jahres-, Tages- und Längsverlauf. Im Tagesverlauf wird die niedrigste Temperatur in der Regel am frühen Morgen, um den Sonnenaufgang, erreicht und die Tageshöchsttemperatur am späten Nachmittag oder in den frühen Abendstunden. Im Quellbereich entspricht die Wassertemperatur in etwa der des Grundwassers (Benson 1953) und nimmt im Längsverlauf in Richtung Mündung im Allgemeinen kontinuierlich zu. Zwierniecki & Newton (1999) beobachteten in einem kleinen Fließgewässer eine Temperaturerhöhung in der Größenordnung von $0,6 \text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}$ an, wohingegen Mende & Sieber (2021) berichten, dass bei kleinen Fließgewässern diese Temperaturdrift durch andere Faktoren (z. B. Beschattung) überlagert wird und von untergeordneter Rolle ist. Da größere Flüsse aufgrund des größeren Volumens eine höhere Temperaturstabilität aufweisen, wird die Temperaturzunahme in Fließrichtung mit deutlich niedrigeren Werten von $0,09 \text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}$ beschrieben (Torgersen et al. 2001). Die thermischen Prozesse sind jedoch sehr komplex (Jeppesen & Iversen 1987) und von zu vielen Faktoren abhängig (Ward 1985) als das eine Klassifizierung der Gewässer auf Grundlage des Wärmeregimes sinnvoll wäre.

Im Vergleich der einzelnen Energiekomponenten hat sich jedoch gezeigt, dass die Sonneneinstrahlung die dominierende Komponente des Gesamtenergieflusses ist (Webb & Zhang 1997), gefolgt von der effektiven Ausstrahlung und dem Verdunstungswärmestrom (Morin & Couillard 1990). Webb & Zhang (1999) berichten darüber hinaus für zwei Flüsse in Großbritannien, dass die Nettostrahlung (Sonneneinstrahlung und effektive Ausstrahlung) 85 % des gesamten Energiegewinns und 27 % der Verluste ausmachte. Als wichtigste Energieverlustkomponente wird von Ihnen der Verdunstungswärmestrom genannt, welcher auf 40 % geschätzt wurde.

Bei einer vergleichenden Betrachtung des Wärmeaustausches an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser mit der Grenzfläche zwischen Gewässerbett und Wasser fanden Evans, McGregor & Petts (1998) heraus, dass 82 % des Energieaustauschs an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser stattfand, 15 % entfielen auf die Grenzfläche zwischen Gewässerbett und Wasser und die restlichen 3 % der Energie wurden durch andere Prozesse begründet. Schwoerbel und Brendelberger (2022) berichten darüber hinaus, dass sich der Wärmeaustausch zwischen Gewässerbett und Wasser langsamer vollzieht als der Wärmeaustausch zwischen Wasser und Atmosphäre.

8.2 Zusammenhänge zwischen anthropogenen, thermischen Belastungsursachen und den daraus resultierenden Wassertemperaturveränderungen

Neben natürlichen Prozessen und direkten Einleitungen von Warm- und Kaltwasser sind vor allen Dingen anthropogene Veränderungen, welche diffuse Einflüsse auf die Wassertemperatur von Fließgewässern haben, von zunehmender Bedeutung, insbesondere vor dem Kontext eines fortschreitenden Klimawandels. Da häufig mehrere diffuse Einflussfaktoren gleichzeitig auftreten ist eine genaue Auswertung und Abschätzung der Einzelparameter schwierig.

Tabelle 120 gibt eine Übersicht über die häufigsten anthropogenen Quellen für Wärmebelastungen in Fließgewässern und differenziert ihre räumliche Wirkung. Gemäß

Gaudard et al. (2018) gelten Staubereiche als Punktquellen, im Zuge dieser Literaturrecherche zu diffusen Temperaturveränderungen wird dennoch auf Staubereiche eingegangen.

Tabelle 120: Wirkung von thermischer Verschmutzung durch menschliche Aktivitäten (übernommen aus Gaudard et al. 2018)

Einflussfaktor	Räumliche Wirkung	Veränderungsrichtung	Grad der Veränderung
Thermische Einleitungen (Langford, 1990)	Punkt	Erwärmung und Abkühlung	Hoch
Abwassereinleitungen (Kinouchi, Yagi & Miyamoto, 2007)	Punkt	Erwärmung (Winter) und Abkühlung (Sommer)	Mittel
Landwirtschaftliche Entwässerung (Blann, Anderson, Sands & Vondracek, 2009)	Punkt	Erwärmung	Niedrig
Grubenentwässerung	Punkt und diffus	Erwärmung und Abkühlung	Mittel
Städtischer Oberflächenabfluss (Nelson & Palmer, 2007)	Punkt und diffus	Erwärmung	Mittel
Wasserentnahmen (Frutiger, 2004)	Diffus	Erwärmung (Sommer) und Abkühlung (Winter)	Mittel
Wasserabgabe z.B. aus Staubereichen (Frutiger, 2004)	Punkt	Erwärmung (Winter) und Abkühlung (Sommer)	Hoch
Veränderung der Flussmorphologie z.B. Kanalisierung (Caissie, 2006; Poole & Berman, 2001)	Diffus	Erwärmung und Abkühlung	Mittel
Veränderung der Beschattung (Broadmeadow et al., 2011)	Diffus	Erwärmung und Abkühlung	Mittel
Klimawandel (Poff, Brinson & Day, 2002)	Diffus	Erwärmung	Niedrig

„Die meisten typischen menschlichen Einflüsse verändern die Temperatur von Bächen und Flüssen um etwa 5 °C oder weniger. Das Gesamtausmaß variiert jedoch beträchtlich: Im Sommer haben Staudämme das größte Abkühlungspotenzial und der Verlust der Beschattung von Flussufern das größte Erwärmungspotenzial, wobei beide Einflüsse die Temperaturen um mehr als 10 °C verändern können“
(Hester & Doyle 2011).

Eine Darstellung der häufigsten anthropogenen Einflüsse auf die Fließgewässertemperatur mit dazugehörigen Literaturangaben findet sich in Tabelle 121.

Tabelle 121: Anthropogene Einflüsse auf die Fließgewässertemperatur (ΔT , °C) erweitert nach Hester & Doyle 2011

Einflussfaktor	Änderungsrichtung	Typisch ΔT	Max ΔT	Saison	Literatur
Klimawandel (steigende Lufttemperatur)	Erwärmung	3,2 2,8*2	8,4 7,0*	Sommer	Review: Webb, 1996 Individuelle Studien: Pilgrim et al. 1998; Mohseni et al. 1999; Morrison et al. 2002; Ferrari et al., 2007; Pedersen and Sand-Jensen, 2007; Kaushal et al., 2010; Bäse et al., 2013; Arora et al., 2016; Zavarisky & Duyster, 2020; Mende & Sieber, 2021

² Mit * markierte Werte betreffen saisonale Effekte

Einflussfaktor	Änderungs- richtung	Typisch ΔT	Max ΔT	Saison	Literatur
Verlust von Beschattung	Erwärmung	4,1*	13,0*	Sommer	Reviews: Smith, 1972; Ward, 1985; Beschta et al., 1987; Allan, 1995; Webb, 1996; Moore et al., 2005; Caissie, 2006 Individuelle Studien: Lynch et al., 1984; LeBlanc et al., 1997; Mitchell, 1999; Ebersole et al., 2003; Johnson, 2004; Rutherford et al., 2004; Dunham et al., 2007; Freiberger & Windisch 2020; Mende & Sieber, 2021; Haag et al. 2022
Vorhandene Beschattung	Abkühlung		-4*	Sommer	Mossmann, Schmid & Wüest 2005; Freiberger & Windisch 2020; Kail et al. 2020; Haag et al. 2022
Veränderung des Mikroklimas in Folge von Waldverlust	Erwärmung	1,1*	2,6*	Sommer	Review: Moore et al., 2005 Individuelle Studien: Bourque and Pomeroy, 2001
Große Staudämme mit Grundablass	Abkühlung	- 8,4*	-14,0*	Sommer	Review: Allan, 1995
Große Staudämme mit Grundablass	Erwärmung		4,0*	Winter	Reviews: Smith, 1972; Allan, 1995

Einflussfaktor	Änderungsrichtung	Typisch ΔT	Max ΔT	Saison	Literatur
Kleine Dämme mit geringer Stauhöhe, Streichwehre	Erwärmung	0,2 – 3	8,4	Sommer	Review: Mbaka & Wanjiru Mwaniki 2015 Individuelle Studien: Dripps & Granger 2013, Chandesris et al. 2019, Zaidel et al. 2021

8.2.1 Steigende Lufttemperaturen

In der Fachliteratur werden erhöhte Wassertemperaturen in Fließgewässern häufig mit dem Klimawandel und dem damit einhergehenden Anstieg der Lufttemperatur in Verbindung gebracht. Dies liegt sowohl daran, dass die Lufttemperatur in vielen Studien als der entscheidendste Faktor bezüglich der Wassertemperatur erachtet wird, als auch an der weit verbreiteten Verfügbarkeit von Lufttemperaturdaten und der einfachen Möglichkeit diese mit Wassertemperaturdaten zu korrelieren (Worrall et al. 2022). Da der Wärmeaustausch an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser besonders ausgeprägt ist, liegt die Schlussfolgerung, dass erhöhte Lufttemperaturen zu einer direkten Erwärmung des Wassers führen, nahe. Des Weiteren sind detaillierte Informationen zu Wärmeströmen in vielen Fällen nicht erhältlich und die Lufttemperatur dient stellvertretend als Proxy für den Nettowärmeaustausch (Webb et al. 2008).

Auch im deutschsprachigen Raum bringt eine Reihe von Studien Veränderungen der Fließgewässertemperaturen mit steigenden Lufttemperaturen in Verbindung (Markovic et al. 2013, Bäse et al. 2013, Arora et al. 2016, Zavarsky & Duester 2020), wobei auch die Reduktion der Wärmeinleitung von Atomkraftwerken (Zavarsky & Duester 2020) sowie Bebauungsgrad und Versickerungsraten Erwähnung finden (Bäse et al. 2013).

Für die Schweizer Alpen fanden Michel et al. (2020) eine schlechte Korrelation zwischen Wasser- und Lufttemperatur. Die Autoren schlussfolgerten, dass steigende Fließgewässertemperaturen durch eine Kombination aus Luft-, Abfluss- und Niederschlagstrends erklärt werden. Worrall et al. (2022) konnte bei Auswertung einer 45-jährigen Datenreihe im Vereinigten Königreich, pro 1 °C Anstieg der Lufttemperatur lediglich einen Anstieg der mittleren Wassertemperatur um 0,37 °C feststellen. Die Autoren vermuten, dass Fließgewässer im Vereinigten Königreich eher auf Veränderungen der hydrologischen Pfade in Folge der Landnutzung reagieren und daher vom atmosphärischen Wärmestrom zum Teil abgekoppelt sind.

Ferner weisen Mohseni & Stefan (1999) darauf hin, dass Veränderungen der maximalen Wassertemperaturen nicht linear mit den Lufttemperaturen korrelieren, da bei hohen Lufttemperaturen der abkühlende Einfluss der Verdunstungskälte die Wassertemperatur reduziert.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass in vielen Studien die Lufttemperatur als wichtige Einflussgröße für die Erhöhung der Fließgewässertemperatur angesehen wird und dass im Zuge des Klimawandels eine Erhöhung der Lufttemperatur zu einer Erhöhung

der Fließgewässertemperatur führen wird. Der Zusammenhang zwischen Luft- und Fließgewässertemperatur ist jedoch nicht linear und die Effekte können durch andere Faktoren (z.B. Beschattung, Mikroklima) abgepuffert werden.

8.2.2 Rodung und Beschattung

Bereits seit den 1960-70er Jahren ist hinreichend bekannt, dass die Entwaldung im Gewässerumfeld ohne ausreichende Pufferzonen entlang des Gewässerstreifens zu Störungen des Temperaturregimes führt (Brown, 1970; Brown & Krygier, 1970; Beschta et al., 1987; Johnson & Jones, 2000, Michel et al. 2021). Insbesondere kleinere Gewässer sind aufgrund ihrer geringeren Wärmekapazität stark betroffen (Brown & Krygier 1967). Auf der Grundlage einer Zusammenstellung von Daten aus zahlreichen Studien an der Westküste der Vereinigten Staaten zeigte Mitchell (1999), dass die Entfernung der Ufervegetation bei hoher Lufttemperatur zu einer größeren Anstiegsrate der Wassertemperatur führte. Schmid & Wüest 2005 beschreiben, dass im Anschluss an eine beschattete Strecke die Wassertemperatur bei Niedrigabfluss innerhalb weniger Kilometer wieder die ursprünglichen hohen Werte erreicht. Einige konkrete Beispiele zu dieser Thematik sind in Tabelle 122 aufgeführt. Haag et al. (2022) konnten zeigen, dass für spätsommerliche Perioden mit hohen Wassertemperaturen die Kühlwirkung einer optimalen Beschattung in der Regel zwischen 5,5 °C und 7 °C liegt.

*„Aus fischökologischer Sicht ist es wertvoller, einzelne Abschnitte von mehreren 100 m intensiv zu beschatten (um stellenweise möglichst niedrige Temperaturen zu erhalten), statt eine teilweise Beschattung über die gesamte Flussstrecke zu verteilen“
(Mossmann, Schmid & Wüest 2005).*

Mende & Sieber (2021) berichten, dass großflächige, oft standortfremde Nadelbaumforste sich schneller erwärmen als naturnahe Laubwälder und durch die höhere Lufttemperatur wiederum die Wassertemperatur beeinflussen. Die Autoren nennen ergänzend fehlende oder unzureichende Beschattung der Gewässer als den wichtigsten Einflussfaktor für steigende Wassertemperaturen in kleineren Fließgewässern der Schweiz.

Mit Hilfe eines weiterentwickelten Beschattungsmoduls für die LARSIM-Wassertemperaturmodelle in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz wurden von Haag et al. (2022) Untersuchungen zur Wirkung zusätzlicher Ufervegetation auf die Fließgewässertemperatur durchgeführt. Derzeit sind in Baden-Württemberg 20 % und in Rheinland-Pfalz 30 % der Fließgewässerstrecken gut beschattet. Im modellierten Maximal-Szenario (100 % Laubbaumbestand am Ufer) wäre eine gute Beschattung in BW auf 80 % und in RLP auf 90 % der Fließgewässerstrecken möglich. Ein realistischeres Ziel-Szenario (75 % Laubbaumbestand am Ufer) sieht eine gute Beschattung in BW auf 45 % und in RLP auf 70 % der Fließgewässerstrecken vor.

*„Die größten Potenziale für zusätzliche Beschattung [...] ergeben sich für die im Ist-Zustand schlecht beschatteten kleinen und mittleren Gewässer“
(Haag, Teltscher & Aigner 2023).*

Die Auswertungen von Haag et al. (2022) zeigen, dass für die Gewässer in Baden-Württemberg, für die eine Zuordnung der Fischartengemeinschaft vorlag (5.535 von 9.545 Gewässern), in den Jahren 2002 bis 2010 (Ist-Zustand) in ca. 45 % der ausgewerteten Strecken der Orientierungswert für den guten ökologischen Zustand gemäß OGewV durch die simulierten Tagesmittelwerte nie überschritten wurde. Im modellierten Maximal-Szenario erhöht sich der Anteil der Strecken, die die Orientierungswerte nicht überschreiten, auf 85 % und im Ziel-Szenario auf ca. 60 %. Der Anteil der Gewässerstrecken, die durchschnittlich an zwei oder mehr Tagen im Jahr die Orientierungswerte überschreiten, kann im Maximal-Szenario auf 5 % und im Ziel-Szenario auf 15 % reduziert werden.

Für Rheinland-Pfalz ergaben die Auswertungen von Haag et al. (2022), dass die Orientierungswerte im neunjährigen Auswertungszeitraum in 40 % der Gewässerstrecken nicht überschritten wurden. Im modellierten Maximal-Szenario erhöht sich dieser Wert auf 70 % und im Ziel-Szenario noch auf 50 %. Im Ist-Zustand überschreiten jedoch 40 % der Strecken in Rheinland-Pfalz an durchschnittlich zwei oder mehr Tagen pro Jahr die Orientierungswerte. Der Anteil dieser Strecken kann im Maximal-Szenario auf 5 % und im Ziel-Szenario auf 20 % reduziert werden.

Tabelle 122: Detailbeispiele zur Verdeutlichung von Temperaturveränderungen für den Parameter Beschattung

Einflussfaktor	Veränderungsrichtung	Effekt	Methodenansatz	Gewässer	Literatur
Beschattung	Abkühlung	-4°C auf 400m bei Niedrigabfluss (40 - 80 l/s); -1°C bis -2°C auf „mehreren hundert Metern“ (120 - 200 l/s)	Modellierung	Orbe, Schweiz	Mossman n, Schmid & Wüest 2005

Einflussfaktor	Veränderungsrichtung	Effekt	Methodenansatz	Gewässer	Literatur
Beschattung	Abkühlung	-4°C auf 210 m Länge bei einer „Canopy Openness ³ “ von 10,2 %	Feldmessungen	Diete, Deutschland	Freiberger & Windisch 2020
fehlende Beschattung	Erwärmung	+5°C auf 800 m Länge bei einer „Canopy Openness ¹ “ von 61 %	Feldmessungen	Diete, Deutschland	Freiberger & Windisch 2020
fehlende Beschattung	Erwärmung	+2.4 °C bis +3.9 °C Auf 1 – 2 km Länge 0 – 40 % Beschattung	Feldmessungen	6 Gewässer, Schweiz	Mende & Sieber 2020
Beschattung	Stabil	Keine Temperaturänderung 40 – 60 % Beschattung	Feldmessungen	6 Gewässer, Schweiz	Mende & Sieber 2020
Beschattung	Abkühlung	Leichte Abkühlung bei hohen Wassertemperaturen 50 – 70 % Beschattung	Feldmessungen	6 Gewässer, Schweiz	Mende & Sieber 2020
Beschattung	Abkühlung	-3,8°C auf 300 m Strecke in einem Waldgebiet 70 – 100 % Beschattung	Feldmessungen	6 Gewässer, Schweiz	Mende & Sieber 2020

³ „Canopy Openness quantifiziert den Teil des Himmels, welcher bei Betrachtung von unten nicht durch das Kronendach der Ufervegetation bedeckt ist und eine direkte Sonneneinstrahlung zulässt“ (Freiberger & Windisch 2020).

8.2.3 Reduzierte Wasserführung

Verringerungen oder Veränderungen des Abflussregimes sind potentielle Ursachen für Veränderungen der Wassertemperatur in Flüssen (Sinokrot & Gulliver 2000). Mögliche Gründe sind Wasserentnahmen (z. B. durch Landwirtschaft), Ausleitungen für Wasserkraftanlagen oder veränderte Niederschlagsmuster im Zuge des Klimawandels. Insbesondere bei überbreiteten Niedrig- und Mittelwasserprofilen und der damit zusammenhängenden geringen Gewässertiefe erwärmt sich das Fließgewässer stark (Mende & Sieber 2021). In Verbindung mit ausgebauten Gewässerstrecken und Abflussregulierungen ergeben sich erhebliche Einflüsse auf den Wärmestrom in Fließgewässern (Łaszewski 2017), welche teilweise durch andere Maßnahmen wie z.B. Beschattung stark abgemildert werden können.

8.2.4 Grundwasser

Die Absenkung der Grundwasserspiegel aufgrund großflächiger künstlicher Entwässerung der Böden (z. B. durch Versiegelung, Drainagen und Entwässerungsgräben) sind laut Mende & Sieber (2021) einer der Gründe für unnatürlich hohe Wassertemperaturen. Gleichzeitig erhöht sich vielerorts die Temperatur des Grundwassers angesichts steigender Lufttemperaturen und fortschreitender Urbanisierung.

Kurylyk et al. (2014) haben die Auswirkungen von Klimawandelszenarien und die Bedeutung des Grundwassers auf die Temperatur von Flüssen untersucht und gezeigt, dass sich das oberflächennahe Grundwasser im Einklang mit der Veränderung der Lufttemperatur zu erwärmen beginnt, was sich wiederum auf die Flüsse im Einzugsgebiet auswirkt. Die Studie von Kurylyk et al. (2014) zeigt, dass das Potenzial des Grundwassers zur Wärmepufferung von Fließgewässern mit dem fortschreitenden Klimawandel zusammenbrechen kann. Mende & Sieber (2021) konnten bei ihren Untersuchungen in der Schweiz auf einem Abschnitt des Erusbachs, trotz fehlender Beschattung, im Sommer eine Abkühlung um 1,7 °C feststellen, die sich nur durch den Einfluss von Grundwasser erklären ließ.

Die Erwärmung des Grundwassers wurden bislang von einer Vielzahl von Autoren beschrieben. Eine Untersuchung von Eggleston & McCoy (2014) aus den USA dokumentierte eine Erwärmung eines flachen Grundwasserleiters um +4,1 °C relativ zu tieferen Schichten, wobei 30 % auf atmosphärische Erwärmung und 70 % auf Urbanisierung zurückzuführen waren. Bucci et al. (2017) berichtet, dass die Temperaturen eines Grundwasserleiters im Stadtgebiet von Turin um 0,6 bis 1,6 °C höher sind als in den umliegenden ländlichen Regionen. Die Temperaturerhöhung wird auf den Effekt einer städtischen Hitzeinsel („urban heat island effect“) und Verbauung zurückgeführt. Benz et al. (2017) konnten den Effekt einer städtischen Hitzeinsel in Deutschland bereits für Gemeinden > 5000 Einwohnern feststellen. Dieselben Autoren berichten, dass das Grundwasser unter versiegelten Oberflächen in Deutschland mit einem Mittelwert von $2,0 \pm 0,7$ K die höchste anthropogene Wärmeintensität aufweist, noch vor der Landoberflächentemperatur. Es konnte zusätzlich festgestellt werden, dass sich das Grundwasser auch unter landwirtschaftlich genutzten Flächen mit im Schnitt $0,2 \pm 0,8$ K leicht erwärmte.

Als konkrete Ursachen für eine Erwärmung des Grundwassers gelten die Reinjektion thermischer Abwässer und unterirdische Infrastruktur wie Keller, Tiefgaragen, Tunnel,

Fernwärmenetze, Abwassersysteme und Erdkabelsysteme (Benz et al., 2015; Menberg et al., 2013; Stegner, 2016, Noethen et al. 2023) als Ursachen von erheblich veränderten Grundwassertemperaturen. Für landwirtschaftlich genutzte Flächen stellt die Bewässerung mit warmem Oberflächenwasser einen möglichen Eintragspfad für Wärme in das Grundwasser dar (Benz et al. 2017).

8.2.5 Urbanisierung

Neben Einflüssen auf das Grundwasser wirkt sich die Urbanisierung auch in anderer Form auf Fließgewässer aus. Der Anstieg der Oberflächentemperatur in städtischen Hitzeinseln korrespondiert mit dem Anstieg der Temperatur in Fließgewässern (Brazel et al. 2000). Modellierungen von Zhi et al. (2023) zeigen, dass sich Flüsse in städtischen Gebieten in der jüngeren Vergangenheit am stärksten erwärmten, während Flüsse in landwirtschaftlich geprägten Gebieten die langsamste Erwärmung dafür jedoch die schnellste Sauerstoffabnahme aufwiesen. Lepori et al. (2015) berichten von mindestens 2 °C Temperaturunterschied zwischen urbanen und natürlich geprägten Gewässern in der Schweiz. Bei Briciu et al. (2020) finden sich konkrete Werte für den Fluss Suceava in Rumänien, welcher sich im Gebiet der gleichnamigen Stadt Suceava um 0,43 °C bzw. 3,7 % erwärmt. Die Autoren führen diese Erwärmung auf den Effekt einer städtischen Hitzeinsel zurück.

Lokal können sich Wassertemperaturen zudem stark erhöhen, wenn Regenwasser von undurchlässigen Oberflächen direkt in Gewässer eingeleitet wird (Nelson and Palmer 2007) oder warme Abwässer die Effekte der städtischen Hitzeinsel noch verstärken (Kinouchi et al. 2007).

Kaushal et al. (2010) fanden bei Untersuchungen in den USA heraus, dass der langfristige Anstieg der Wassertemperaturen mit dem Anstieg der Lufttemperaturen korrelierte. Zusätzlich waren diese Wassertemperaturanstiege in städtischen Gebieten am schnellsten, aber nicht auf diese beschränkt.

8.2.6 Thermische Nutzung von Oberflächengewässern

Die thermische Nutzung von Oberflächengewässern zum Betrieb von Wärmepumpen, sowohl als Wärmequelle als auch als Wärmesenke wird im Zuge der Umstellung von fossilen Energieträgern auf regenerative Energiequellen zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen. Eine Übersicht über die Potenziale von Wärmepumpen in deutschen Oberflächengewässern findet sich z.B. in Kammer (2017), Pflum (2017) und FfE (2024). Bei der Nutzung von Fließgewässern als Wärmequelle besteht bauartbedingt die Möglichkeit der Einleitung von Kühlwasser. Eine ausführliche Abhandlung zur Bewertung von Kühlwassereinleitungen findet sich in einem Leitfaden der LAWA (2012). Ökologische Chancen und Risiken sowie Empfehlungen für eine ökologisch verträgliche thermische Nutzung von Gewässern wurden von Leßmann und Riedmüller (2024) zusammengestellt.

8.2.7 Staubereiche

Große Staudämme mit Grundablässen haben im Sommer häufig einen abkühlenden und im Winter einen erwärmenden Effekt auf stromab gelegene Fließgewässerbereiche (Allen 1995). Die Effekte von kleinen Staudämmen mit niedriger Einstauhöhe sind weniger erforscht, jedoch ist diese Art von Damm deutlich häufiger anzutreffen. Die

Morphologie der Bauwerke scheint von grundlegender Bedeutung zu sein. Staudämme mit hoher Fallhöhe und einer kleinen Oberfläche haben häufig kühlere Temperaturen flussabwärts, während Staudämme mit niedriger Fallhöhe und einer großen Oberfläche tendenziell wärmere Temperaturen flussabwärts aufweisen (Fuller und Peckarsky, 2011, Rocky Mountains in Colorado; Means, 2018, oberer Columbia River).

Chandesris et al. (2019) bekräftigen mit den Ergebnissen aus ihren eigenen Messungen bisherige Reviews und Meta-Analysen zum generellen Trend, dass kleine Dämme einen Erwärmungseffekt von etwa 0 – 3 °C haben (Lessard and Hayes, 2003; Maxted et al., 2005; Mbaka and Mwaniki, 2015; Ecke et al., 2017, 27 Studien; Means, 2018, 24 Untersuchungsorte; Zaidel, 2018, 18 Untersuchungsorte). Gelegentlich erreichen die flussabwärts gerichteten Erwärmungseffekte bis zu 7 °C (Margolis et al., 2001; Carlisle et al., 2014) bzw. 3-6 °C (Fraley, 1987; Lessard und Hayes, 2003, für einen Teil ihrer Stichprobe; Dripps und Granger, 2013). Jacob (2023) berichtet für die Lippe von einem deutlichen Einfluss von Wehren auf die Gewässertemperatur, wobei der genaue Einfluss des jeweiligen Wehres von den Faktoren Länge und Tiefe des Wehrstaus, Art des Wehres (Überfall, Klappe) sowie weiteren Belastungsfaktoren in der Umgebung (Einleitungen, Wasserkraftanlagen etc.) abhängt. Einige Detailbeispiele finden sich in Tabelle 123. Chandesris et al. (2019) betont jedoch die hohe Variabilität der Reaktionen flussabwärts auf kleine Staudämme und die Schwierigkeit, die erklärenden Variablen für diese Reaktionen zu ermitteln, wobei die Dammhöhe allein ein schlechter Prädiktor ist. Als relevante Variablen genannt werden: die Größe und Ordnung des Flusses, die Größe des Einzugsgebiets, Beschattung bzw. die direkt der Strahlung ausgesetzte Oberfläche des Stausees, der klimatische Kontext, die Geologie, Grundwasseraustausch sowie die Verweilzeit des Wassers. Die Variabilität der flussabwärts gerichteten Reaktionen scheint im Oberlauf größer zu sein, was auf die schwache thermische Trägheit und die große Vielfalt dieser Gewässer zurückzuführen ist, insbesondere im Hinblick auf die lokalen Beschattungseffekte der Ufervegetation und die relative Bedeutung der Abflüsse von Quellen oder Nebenflüssen.

Zaidel et al. (2021) zeigten bei ihren Messungen an 18 kleinen Staudämmen in Massachusetts, dass sich bei 12 Dämmen die Wassertemperatur stromab um 0,21 – 5,24 °C (Durchschnitt = 2,14 °C) erwärmte. Die größten Erwärmungseffekte waren im Zeitraum von Juni bis September zu verzeichnen und geringere Effekte zwischen Mai und Oktober. Im Zeitraum von November bis April konnten keine signifikanten Temperaturunterschiede zwischen stromauf und stromab gelegenen Fließgewässerabschnitten festgestellt werden. Als maßgeblichen Faktor für die Erwärmung wird von den Autoren die Aufweitung des Aufstaus und dadurch der Verlust von Beschattung sowie die erhöhte Solareinstrahlung genannt. Die Staudämme mit der stärksten Erwärmung flussabwärts befanden sich im Allgemeinen an kleineren, bewaldeten Oberläufen, während Flüsse höherer Ordnung in größeren, stärker urbanisierten Einzugsgebieten geringere Auswirkungen auf die Temperaturen flussabwärts aufwiesen. Diese Ergebnisse stützen die Hypothese von Jones (2010), dass Staudämme an Oberläufen bei sonst gleichen Bedingungen eine stärkere Erwärmung bewirken würden als Dämme an größeren Flüssen.

Tabelle 123: Detailbeispiele zur Verdeutlichung von Temperaturveränderungen am Beispiel kleiner Staudämme

Umfang	Ort	Method e	Erwärmun g	Kein Effek t	Abkühlun g	Literatur
43 Studien	Global	Review	25 % (11)	73 % (31)	2 % (1)	Mbaka & Wanjiru Mwaniki 2015
11 kleine Dämme (0,23 – 5,7 ha) mit 13 Zeitreihen	Bresse, Frankreich	Eigene Messung	23 % > 1 °C 85 % > 0,5 °C max + 2,4 °C	77 % ± 1 °C		Chandesris et al. 2019
18 kleine Dämme	Massachusetts, USA	Eigene Messung	66 % (12) 0.21–5.24 °C	27,8 % (5)	5,6 % (1)	Zaidel et al. 2021
3 kleine Dämme (17 – 45 ha)	South Carolina, USA	Eigene Messung	100 % (3) max + 8,4 °C			Dripps & Granger 2013

8.3 Maßnahmenpotenziale zur Verbesserung der Wassertemperaturverhältnisse

In einer zunehmend urbanisierten und durch den Klimawandel veränderten Umwelt unterliegt das Temperaturregime von Fließgewässern neben Punktquellen (Warm- und Kaltwassereinleitungen, Stauhaltungen etc.) einer Vielzahl diffuser Einflussfaktoren, die häufig in Kombination auftreten. Global betrachtet wird die Begrenzung der weiteren Erhöhung der Lufttemperatur aufgrund des hohen Wärmeaustausches an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser von entscheidender Bedeutung sein.

Laut Michel et al. (2021) werden Projekte zur Ufervegetation und Renaturierung gegenwärtig als einzige wirksame Strategie zur Schadensbegrenzung angesehen. Die Kühlwirkung einer optimalen Beschattung bei hohen spätsommerlichen Temperaturen liegt in der Regel zwischen 5,5 °C und 7 °C (Haag et al. 2022). Hierbei ist zu bedenken, dass nicht jede Art von Vegetation dieselben Ergebnisse erzielt. Dugdale et al. (2018) zeigen, dass die Energieflüsse an der Luft-Wasser-Grenzfläche zwischen verschiedenen Waldtypen erheblich variieren und dass die Reaktion der Fließgewässertemperatur auf die Ufervegetation von der Art der vorhandenen Vegetation abhängt. Ferner zeigen Modellierungen von Trimmel et al. (2018), welche die Ufervegetation mit einbeziehen, dass die Beschattung durch die Vegetation den erwarteten Temperaturanstieg durch den Klimawandel nur teilweise abmildern kann.

Mende & Sieber (2021) gehen in ihrer Studie auf Maßnahmen ein, um eine Temperaturerhöhung im Zuge von Renaturierungsprojekten zu vermeiden. Die Autoren betonen

die Bedeutung der Beschattung des Süd- und Westufers, da die höchsten Temperaturanstiege im Tagesverlauf am Nachmittag und frühen Abend stattfinden. Je nach Gewässergröße, Hochwasserrisiko und lokalen Gegebenheiten empfehlen Sie sowohl die Etablierung von Hochstaudenfluren als auch hohen Baumreihen mit möglichst ausladenden Kronen. Außerdem sollte das Gewässerbett nicht übermäßig aufgeweitet und eine möglichst schattige Niederwasserrinne eingeplant werden um bei erhöhter Sonneneinstrahlung übermäßige Erwärmung zu vermeiden. Einbauten sind bevorzugt überspült zu gestalten um ein Aufheizen der Einbauten zu verhindern. Bei umspülten Einbauten ist Holz zu bevorzugen, da dieses im Gegensatz zu Steinen die Wassertemperatur nicht erhöht (Mende & Sieber 2021). Weitere entscheidende Faktoren sind die Gewässertiefe und die Fließgeschwindigkeit bzw. die Verweildauer im beschatteten Bereich. Identische Bedingungen vorausgesetzt, verdoppelt sich bei doppelter Wassertiefe oder doppelter Fließgeschwindigkeit die benötigte Fließstrecke um denselben Kühleffekt zu erreichen (Haag et al. 2022).

*„Grundsätzlich können bei niedrigeren Fließgeschwindigkeiten und geringen Wassertiefen also maximale Effekte durch beschattete Fließstrecken erreicht werden, wohingegen bei höheren Fließgeschwindigkeiten und größeren Wassertiefen gleich große Effekte erst nach entsprechend längeren Fließstrecken eintreten“
(Haag, Teltscher & Aigner 2023).*

Mossmann, Schmid & Wüest (2005) empfehlen, dass Baumreihen südlich des Bachbetts angepflanzt werden um die Solarstrahlung abzuhalten. Um die Effektivität der Maßnahme nicht zu verringern müssen die Bäume dicht genug stehen, damit kein oder nur sehr wenig direktes Sonnenlicht den Fluss erreicht. Kail et al. (2020) empfiehlt ebenfalls die Bäume möglichst dicht zu setzen und Baumreihen mehrere hundert Meter lang zu gestalten um den vollen Effekt der Abkühlung zu erreichen. Gemäß den Autoren ist die Breite des Vegetationsstreifens weniger wichtig als die Länge, jedoch hat ein breiter Vegetationsstreifen noch andere Funktionen wie z.B. Nährstoffrückhalt.

Es sollte zudem beachtet werden, dass durch die Beschattung eventuell vorhandene Wasserpflanzen zurückgehen, sodass die Fließgeschwindigkeit zunimmt und das Wasser weniger lange im beschatteten Abschnitt verbleibt als erwartet. Wie dies gewässerökologisch zu bewerten ist, hängt stark vom Gewässertyp ab. So können beispielsweise in silikatischen Mittelgebirgsbächen, die im potenziell natürlichen Zustand stark gehölzbeschattet wären, fehlende Ufergehölze eine unnatürlich starke Verkrautung des Gewässerbetts bedingen, die insbesondere in den Sommermonaten zu geringen Fließgeschwindigkeiten in Kombination mit überhöhten Wassertemperaturen führen. Die Folge davon ist eine Sauerstoffunterversorgung (insbesondere in den photosynthesefreien Nachtstunden) für die hier lebenden Organismen. Die hier beheimateten Fischarten präferieren auch als Unterstände eher Gehölzwurzeln und Totholz als Makrophyten. Anders sieht es beispielsweise bei organischen Fließgewässern aus, die schon im leitbildgemäßen Zustand nur wenig beschattet sind und hohe Deckungsgrade von Makrophytenbewuchs aufweisen können, an die die gesamte Biozönose angepasst ist. Daher sollte stets im Einzelfall unter Berücksichtigung der potenziell

natürlichen gewässertypologischen Referenzverhältnisse geprüft werden, ob ein mit Wasserpflanzen bewachsener Abschnitt beschattet wird oder nicht (Mossmann, Schmid & Wüest 2005). Um geeignete Fließstrecken für die Beschattung auszuwählen geben Mossmann, Schmid & Wüest (2005) folgende Kriterien an: „(a) Strecken mit geringer Fließgeschwindigkeit. (b) Von West nach Ost ausgerichtete Strecken (für eine effektive Beschattung auf der Südseite). (c) Strecken mit hohen Wassertemperaturen (d. h. nicht direkt unterhalb der kühlen Zuflüsse). (d) Aus fischökologischer Sicht wertvolle Strecken. (e) Strecken mit geringem Bewuchs von Wasserpflanzen (je nach Zielsetzung)“.

Für das Problem der städtischen Wärmeinseln sind technische Lösungen denkbar. Laut Noethen et al. (2023) entspricht die Energiemenge der Abwärme aus unterirdischer Infrastruktur, welche in ihrem Betrachtungsraum in Berlin an den Boden und das Grundwasser abgegeben wird, dem Heizbedarf von 14.660 deutschen Durchschnittshaushalten. Ein Teil dieser Abwärme könnte mittels geothermischer Wärmepumpen in den Fundamenten als Heizenergie genutzt werden und die an das umgebende Erdreich und Grundwasser abgegebene Energiemenge reduzieren und der städtischen Wärmeinsel durch Kühlung des Untergrundes entgegenwirken.

Sofern die Temperaturverhältnisse eines Gewässers nicht flächendeckend, sondern nur abschnittsweise verbessert werden können, ist die Durchwanderbarkeit des Gewässers von entscheidender Bedeutung für die Auswirkungen dieser Verbesserungen auf die Fischfauna. Denn nur wenn die Fische in Extremsituationen die kühleren und sauerstoffreicheren Gewässerabschnitte aufsuchen können, können sie dort überdauern und anschließend wieder in andere Bereiche zurückwandern.

9 Zusammenfassung der Projektergebnisse und Verschneidung mit den ursprünglichen Empfehlungen des Projekts O 10.20 zur Änderung der Temperaturvorgaben der OGewV

9.1 Zusammenfassung der Projektergebnisse und Fazits

Die wesentlichen Erkenntnisse der einzelnen Projektbearbeitungen sind in den folgenden Unterkapiteln noch einmal zusammenfassend dargestellt.

9.1.1 Korrekturfaktoren für die Temperaturüberwachung im Rahmen des WRRL-ACP-Monitorings (Kapitel 3)

Die Analysen der stichprobenhaften und der kontinuierlichen Temperaturdaten zeigen, dass die tatsächlich in den Gewässern auftretenden Maximaltemperaturen anhand der behördlichen Stichprobenmessungen je nach Tageszeitpunkt der Probenahme systematisch unterschätzt werden. Gleichzeitig können aufgrund der hohen interanuellen Variabilität der saisonalen Temperaturverläufe der Gewässer, sowie aufgrund der starken Überlappung und Schwankungsbreite der fachlich begründeten und/oder durch Clusteranalyse gefundenen Fallgruppen, nur mit den im Kapitel 3.5 dargestellten Einschränkungen Korrekturwerte abgeleitet werden.

Die ausführlichen Auswertungen des Datensatzes verdeutlichen, dass ein sicheres Monitoring der Maximaltemperatur eines Gewässers nur mit Hilfe kontinuierlicher Messungen (Einsatz von Temperaturloggern) erfolgen kann. Dieses Verfahren wird für alle OWK empfohlen, in denen mit Überschreitungen des Orientierungswertes für die Temperatur zu rechnen ist.

In Fällen, in denen das Temperaturmonitoring aber weiterhin stichprobenhaft erfolgen soll/muss, wird die Anwendung von Korrekturfaktoren empfohlen, um die systematische Unterschätzung zu korrigieren. Auch wenn es im Einzelfall zu Überkorrekturen (im Sinne einer erhöhten gewässerökologischen Sicherheitsmarge) kommen kann, wird die Mehrzahl der Stichprobenmessungen durch die Anwendung der fundiert hergeleiteten Korrekturfaktoren die tatsächlichen Wassertemperaturverhältnisse deutlich realitätsnäher abbilden können, als dies bei unkorrigierter Verwendung der Messwerte der Fall ist.

9.1.2 Erprobung der Konsequenzen einer niedrigeren zulässigen Temperaturerhöhung im Potamal während der Wintermonate anhand von Fallbeispielen realer Einleitungen (Kapitel 4)

Hierzu konnte leider nur ein Fallbeispiel ausgewertet werden, aus dem allein sich keine abschließende Bewertung der Neuregelungskonsequenzen ableiten lässt.

Es sei aber darauf hingewiesen, dass der Verschärfungsvorschlag für den ΔT -Grenzwert in diesem einen Fall bereits spürbare Konsequenzen für den Einleiter hätte, aber andererseits auch zu ggf. notwendigen Verbesserungen für die Gewässerökologie führen könnte.

Letzteres dürfte im betrachteten Fallbeispiel zutreffen, da der Anteil der Einleitung am Gesamteinfluss zwischen ca. 40 und 50 % lag und somit eine deutliche Beeinflussung des Gewässers darstellt.

9.1.3 Sensitivitätsprüfung des Neuregelungsvorschlags zum Verzicht auf Tmax-Vorgaben für die Übergangsmonate April/Mai bzw. Oktober/November (Kapitel 5)

Die Analyse des großen Datensatzes, welcher für die Auswertung von Temperatur-Orientierungswertüberschreitungen von 12 Bundesländern für den Bewirtschaftungsplan 2021-2027 genutzt wurde hat gezeigt, dass für das ACP-Monitoring der Verzicht auf Tmax-Vorgaben während der Übergangsmonate unschädlich ist, weil Tmax-OW-Verletzungen praktisch nie ausschließlich in den „Übergangsmonaten“ auftreten und daher OWK mit „Temperaturproblem“ bei monatlichen Messungen in den Sommer- und Wintermonaten (im Sinne des LFP-Projekt O 10.20) identifiziert werden können.

9.1.4 Überprüfung der Praktikabilität der vorgeschlagenen Referenzmessstellenregelung zur kumulativen ΔT -Wertbestimmung bei mehreren aufeinander folgenden Einleitungen (Kapitel 6)

Nur die kumulative ΔT -Grenzwertregelung kann sicherstellen, dass es nicht in Folge mehrerer hintereinander liegender Wärmequellen zu einer zu starken Veränderung gegenüber den Ausgangswassertemperaturen und ihren jahreszeitlichen Verläufen kommen kann.

Es zeigt sich allerdings, dass der ΔT -Grenzwert von 2 K erst bei deutlich niedrigeren Ausgangswassertemperaturen gegenüber einem auf die maximalen Wassertemperaturen ausgerichteten Grenzwert an Bedeutung gewinnt.

Das bedeutete für den konstruierten Beispielfall, dass an der Messstelle M1 erst stark herabgesetzte, ins Berechnungsmodell eingespeiste Wassertemperaturen mit jahresmaximalen mittleren Tageswassertemperaturen unter 15,8 °C zu Verletzungen des ΔT -Grenzwerts sowohl bei Einzel- als auch bei kumulativer Regelanwendung führten.

Serielle Mischungsrechnungen eignen sich auch zur Festlegung emissionsseitiger Genehmigungsgrenzwerte für hintereinander liegende und geplante Einleitungen.

9.1.5 Erprobung der Neuregelung für Kaltwassereinleitungen (Kapitel 7)

Die Umsetzung der im Projekt O 10.20 vorgeschlagenen Regelungen zur Begrenzung von Kaltwassereinleitungen sollte anhand von Praxisbeispielen erprobt und evaluiert werden, wobei geeignete Realdaten aus der Praxis nicht zu beschaffen waren, da weder zu bereits bestehenden Kaltwassereinleitungen noch aus Genehmigungsvorhaben entsprechende Daten recherchiert werden konnten.

Ursache ist der Umstand, dass es deutschlandweit bisher nur sehr wenige Anlagen gibt, die aus Fließgewässern Wärme entnehmen und diese wenigen Anlagen noch nicht sehr lange betrieben werden, so dass keine geeigneten Monitoringdaten vorliegen.

Die Auswirkungen einer verstärkten thermischen Nutzung von Fließgewässern und der damit verbundenen, ggf. sehr dynamisch und mit hohen Änderungsraten ablaufenden

Kaltwassereinleitungen auf die Gewässerbiozöten und insbesondere auf die Fischfauna sind kaum untersucht und entsprechend schwer zu prognostizieren.

Vor diesem Hintergrund erscheint es aufgrund des Vorsorgeprinzips fachlich geboten, die im LFP-Projekt O 5.23 vorgeschlagenen weitreichenderen Regelungen und Grenzwerte in den anstehenden Genehmigungsverfahren anzuwenden und ein entsprechendes Monitoring (Temperaturmessprogramm im Gewässer und Untersuchung der biologischen Qualitätskomponenten) in den Nebenbestimmungen der Bescheide zu verankern.

9.1.6 Literaturobwertung zu Ursachen und Gegenmaßnahmen diffuser Temperaturveränderungen in Fließgewässern (Kapitel 8)

Anhand der Literaturstudie konnte gezeigt werden, dass neben der direkten Wirkung punktueller Warm- und Kaltwassereinleitungen auch eine Vielzahl anthropogener Veränderungen des Gewässers und seines Umfelds diffus auf die Temperaturentwicklung eines Gewässers einwirken. Die unterschiedlichen Parameter stehen dabei in einer komplexen Wechselbeziehung und die Stärke der einzelnen Effekte und somit das Potenzial für Maßnahmen ist sehr von der individuellen Ausgangssituation des Gewässers (Staubereiche, Grundwasserzustrom, vorhandene Ausprägung der Ufervegetation etc.) abhängig.

Insgesamt kann jedoch festgestellt werden, dass die Beschattung derzeit die effektivste Maßnahme zur Temperaturregulierung darstellt.

Weitere Maßnahmen wie Renaturierungen, Sohlvertiefungen oder die technische Nutzung von Abwärme zur Absenkung der Grundwassertemperatur können in geringerem Umfang ebenfalls zur Temperaturregulierung beitragen.

9.2 Prüfung und ggf. Modifikation der Änderungsvorschläge für die Temperaturvorgaben der OGewV aus O 10.20

Abschließende Aufgabe dieses Praxistests war es, die fachlich abgeleiteten Vorschläge und Empfehlungen aus dem Endbericht des LAWA Projekts O 10.20 mit den Ergebnissen des Praxistests zusammenzuführen und ggf. modifizierte Vorschläge für notwendige Änderungen bestehender Regelungen zu formulieren. Die Ergebnisse dessen sind der folgenden Zusammenstellung zu entnehmen, in der dem Originaltext der fünf Vorschläge aus dem Endbericht O 10.20 Kap 7 (kursiv) jeweils ein abschließendes Fazit auf Grundlage der Ergebnisse des Praxistests angefügt ist.

- *Reduzierung der Sommer-Periode auf die Monate Juni bis September:*
Die Reduzierung der Sommer-Periode auf die Monate Juni bis September und die damit verbundene Implementierung von Übergangsjahreszeiten (iv) ist auch aus Sicht der Bearbeiter des Praxistests fachlich sinnvoll, um die künstlichen Sprünge der Tmax-Vorgaben, welche bei Einzelbetrachtung mehrerer hintereinander liegender Wärmeeinleitungen auch zu unnatürlich hohen Sprüngen der Gewässertemperatur führen können, zu vermeiden. Der damit unmittelbar in Zusammenhang stehende Vorschlag die Tmax-Vorgaben in den Übergangsmonaten weg zu lassen wurde im Praxistest geprüft und die Schlussfolgerungen sind unter iv) nachzulesen.

- *Berücksichtigung von Temperaturabsenkungen durch Kaltwassereinleitungen in gleichem Maße wie Temperaturanstiege. Eine bislang unregelte und de facto unbegrenzte Absenkung der Temperatur kann für viele Fischarten zum ernsthaften Problem werden, da diese als ektotherme Organismen nur wenig wärmer sind als ihre Umgebungstemperatur, und bei Kaltwassereinleitung in eine Starre fallen können, die es ihnen unmöglich macht in wärmere Bereiche der Fließgewässer zu fliehen.*

Eine fachliche Prüfung, ob die Höhe der zulässigen Abkühlungsspanne (der Betrag von ΔT) ausreichend ist, um die Flora und Fauna im Sinne der OGewV zu schützen, war nicht Aufgabe des Praxistests. Diese Fragestellung wurde allerdings im parallellaufenden und abgestimmten LFP-Projekt O 5.23 bearbeitet. Die differenzierten Empfehlungen zur Begrenzung der maximal zulässigen Abkühlungsspanne sind dem Endbericht des Projektes O 5.23 zu entnehmen. Aufgabe des Praxistests war es, den Vorschlag aus dem LFP-Projekt O 10.20 den ΔT -Wert nicht nur für Erwärmung, sondern auch für eine Abkühlung des Gewässers heranzuziehen, anhand von Fallbeispielen auf seine Praxistauglichkeit zu prüfen. Dies konnte im Praxistest mangels verfügbarer Daten nicht geprüft werden und es wird deshalb dringend angeraten, den Betrieb solcher Anlagen durch ein detailliertes Monitoring der Temperatur und der Gewässerorganismen zu begleiten.

- *Begrenzung der zulässigen Temperaturerhöhung im Winter (Dezember bis März) auf maximal 1 K (Sa-ER), 1,5 K (Sa-MR, Sa-HR) und 2 K (Cyp-R, EP, MP, HP). Lokal sind geringere ΔT festzulegen, wenn regionale Anpassungen der Fischfauna dies erfordern.*

Da nur ein Fallbeispiel ausgewertet werden konnte, sollte das Thema noch weiter geprüft werden.

- *Implementierung von Übergangszeiten im April/Mai und Oktober/November für die keine Temperaturmaxima festgelegt werden und Temperaturregelungen nur über die zulässige Temperaturerhöhung erfolgen, die fischgemeinschaftsspezifisch 1 K (Sa-ER), 1,5 K (Sa-MR, Sa-HR) bis maximal 2 K (Cyp-R, EP, MP, HP) beträgt. Eine Überwachung der Maximaltemperaturüberschreitung ist in den Übergangsmonaten mangels Maximaltemperaturvorgabe nicht möglich. Dies wird jedoch als unproblematisch betrachtet, da in den Übergangsmonaten witterungsbedingt keine Annäherung an fischökologisch kritische Maximaltemperaturen zu erwarten ist und die Begrenzung von Wärmeeinleitungen in diesen bzgl. der natürlichen Temperaturentwicklung besonders dynamischen Monaten durch die Vorgaben zur zulässigen Temperaturerhöhung hinreichend geregelt ist.*

Die Analyse hat gezeigt, dass für das ACP-Monitoring der Verzicht auf Tmax-Vorgaben während der Übergangsmonate unschädlich ist, weil Tmax-OW-Verletzungen praktisch nie ausschließlich in den „Übergangsmonaten“ auftreten und OWK mit „Temperaturproblem“ bei ausreichend Messungen in den verbleibenden Sommer- und Wintermonaten identifiziert werden können.

- *Zulässige Temperaturerhöhungen oder -absenkungen werden nur noch relativ zur durch thermische Einleitungen möglichst unbeeinflussten Temperaturanglinie des Gewässers/Gewässertyps bestimmt, um kumulative Effekte durch die Bezugnahme auf eine möglicherweise bereits durch thermische Einleitung innerhalb der Fischgemeinschaft erhöhte Temperatur oberhalb der Einleitungsstelle*

zu vermeiden. Die Orientierung der Temperaturwerte für GÖZ/GÖP an der realen, durch thermische Einleitungen möglichst unbeeinflussten Temperaturkurve eines Gewässers im Jahresverlauf wird dem ökologischen Zustand und den ökologischen Anforderungen der Arten besser gerecht (Abbildung 19–Abbildung 21). Nur die kumulative ΔT -Grenzwertregelung kann sicherstellen, dass es nicht in Folge mehrerer hintereinander liegender Wärmequellen zu einer zu starken Veränderung gegenüber den Ausgangswassertemperaturen und ihren jahreszeitlichen Verläufen kommen kann.

Fortschreibungsempfehlung für die OGewV

Für die Fortschreibung der OGewV wird als Ergebnis des vorliegend dokumentierten Projekts LFP O 4.23 sowie seines Vorgängerprojektes LFP O 10.20 unter Berücksichtigung der Ergebnisse des parallelen LFP-Projekts O 5.23 folgende Anpassungstabelle für die wassertemperaturbezogene Beurteilung des guten ökologischen Zustands bzw. Potenzials der biologischen Qualitätskomponente Fische vorgeschlagen (s. Tabelle 124):

Tabelle 124: Fortschreibungsempfehlung für die OGewV hinsichtlich der Wassertemperaturanforderungen des guten ökologischen Zustands bzw. Potenzials der biologischen Qualitätskomponente Fische.

Anforderung	Sa-ER	Sa-MR	Sa-HR	Cyp-R	EP	MP	HP	Anmerkung
Tmax Sommer (Juni bis September) [°C]	≤ 20	≤ 20	$\leq 21,5$	≤ 23	≤ 25	≤ 28	≤ 28	Keine Änderung der Werte, lediglich Änderung des Bezugszeitraums gegenüber OGewV 2016
Tmax Winter (Dezember bis März) [°C]	≤ 8	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	Keine Änderung gegenüber OGewV 2016
Temperaturerhöhung Juni bis September [ΔT in K]*	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	≤ 2	≤ 3	≤ 3	≤ 3	Entspricht Temperaturerhöhung Sommer nach OGewV 2016
Temperaturabsenkung Juni bis September [ΔT in K]*	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	Zusätzlich Temperaturabsenkung geregelt vgl. O 5.23 mit Verschärfung im Potamal

Anforderung	Sa-ER	Sa-MR	Sa-HR	Cyp-R	EP	MP	HP	Anmerkung
Temperaturerhöhung Oktober bis Mai [ΔT in K]*	≤ 1	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	Entspricht Temperaturerhöhung Winter nach OGewv 2016 mit Verschärfung im Potamal
Temperaturabsenkung Oktober bis Mai [ΔT in K]*	≤ 1	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	Zusätzlich Temperaturabsenkung geregelt vgl. 10.20 und O 5.23

* ΔT in Bezug zur durch thermische Einleitungen innerhalb der Fischgemeinschaft möglichst unbeeinflussten, aktuellen Gewässertemperatur. Tmax und ΔT können lokal weiter verringert werden, wenn regionale Anpassungen der Fischgemeinschaft dies erfordern. Sinkt die Wassertemperatur am Entnahmepunkt auf < 3° C ist der technische Wärmentzug einzustellen.

Literaturverzeichnis

- Allan, J.D., (1995). *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Arora, R., Tockner, K., & Venohr, M. (2016). Changing river temperatures in northern Germany: trends and drivers of change. *Hydrological Processes*, 30(17), 3084–3096.
- Bäse, F., Morscheid H. & Weber, J. (2013). *Langzeitverhalten der Wassertemperaturen bayerischer Fließgewässer*. Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg.
- Benson, N.G. (1953) The importance of ground water to trout populations in the Pigeon River, Michigan. (Ed J.B. Trefethen) In: *Transactions of the Eighteenth North American Wildlife Conference*, pp. 269–281, Washington, DC, March 9, 10, and 11, 1953. Wildlife Management Institute, Wire Building, Washington 5, DC.
- Benz, S.A., Bayer, P., Menberg, K., Jung, S., Blum, P. (2015). Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers. *Sci. Total Environ.* 524–525, 427–439.
- Benz, S. A., Bayer, P., & Blum, P. (2017). Identifying anthropogenic anomalies in air, surface and groundwater temperatures in Germany. *Science of the Total Environment*, 584, 145–153.
- Beschta, R.L., Bilby, R.E., Brown, G.W., Holtby, L.B. & Hofstra, T.D. (1987) Stream temperature and aquatic habitat: fisheries and forestry interactions. In: *Streamside Management: Forestry and Fishery Interactions* (Eds E.O. Salo & T.W. Cundy), pp. 191–232. Institute of Forest Resources, Contribution No. 57. University of Washington, Seattle, Washington.
- Beschta, R.L. (1997) Riparian shade and stream temperature: an alternative perspective. *Rangelands*, 19, 25–28.
- Blann, K. L., Anderson, J. L., Sands, G. R., & Vondracek, B. (2009). Effects of agricultural drainage on aquatic ecosystems: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(11), 909–1001.
- Bourque, C.P.A. and J.H. Pomeroy (2001). Effects of Forest Harvesting on Summer Stream Temperatures in New Brunswick, Canada: An Inter-Catchment, Multiple-Year Comparison. *Hydrology and Earth System Sciences* 5:599–613.
- Brazel, A., Selover, N., Vose, R., and Heisler, G. (2000). The tale of two climates – Baltimore and Phoenix urban LTER sites. *Clim Res* 15: 123–35.
- Briciu, A.-E.; Mihăilă, D.; Graur, A.; Oprea, D.I.; Prisăcariu, A.; Bistricean, P.I. (2020) Changes in the Water Temperature of Rivers Impacted by the Urban Heat Island: Case Study of Suceava City. *Water*, 12, 1343.
- Broadmeadow, S. B., Jones, J. G., Langford, T. E. L., Shaw, P. J., & Nisbet, T. R. (2011). The influence of riparian shade on lowland stream water temperatures in southern England and their viability for brown trout. *River Research and Applications*, 27(2), 226–237.

- Brown, G.W. (1970) Predicting the effect of clearcutting on stream temperature. *Journal of Soil and Water Conservation*, Jan–Feb, 11–13.
- Brown, G.W. & Krygier, J.T. (1967) Changing water temperatures in small mountain streams. *Journal of Soil and Water Conservation*, 22, 242–244.
- Brown, G.W. & Krygier, J.T. (1970) Effects of clear-cutting on stream temperature. *Water Resources Research*, 6, 1133–1139.
- Bucci, A., Barbero, D., Lasagna, M., Forno, M. G., & De Luca, D. A. (2017). Shallow groundwater temperature in the Turin area (NW Italy): vertical distribution and anthropogenic effects. *Environmental Earth Sciences*, 76, 1-14.
- Caissie, D. (2006) The thermal regime of rivers: A review. *Freshw. Biol.*, 51, 1389–1406.
- Carlisle, D. M., Nelson, S. M., and Eng, K. (2014) Macroinvertebrate community condition associated with the severity of streamflow alteration, *River Res. Appl.*, 30, 29–39.
- Chandesris, A., Van Looy, K., Diamond, J. S., & Souchon, Y. (2019). Small dams alter thermal regimes of downstream water. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11), 4509-4525.
- Coutant, C.C. (1999) Perspective on Temperature in the Pacific Northwest's Fresh Water. Environmental Sciences Division, Publication No. 4849, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-1999/44. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 109 p.
- Dripps, W., & Granger, S. R. (2013). The impact of artificially impounded, residential headwater lakes on downstream water temperature. *Environmental Earth Sciences*, 68, 2399-2407.
- Dugdale, S. J., Malcolm, I. A., Kantola, K., & Hannah, D. M. (2018). Stream temperature under contrasting riparian forest cover: Understanding thermal dynamics and heat exchange processes. *Science of the Total Environment*, 610, 1375-1389.
- Dunham, J.B., A.E. Rosenberger, C.H. Luce, and B.E. Rieman (2007). Influences of Wildfire and Channel Reorganization on Spatial and Temporal Variation in Stream Temperature and the Distribution of Fish and Amphibians. *Ecosystems* 10:335-346.
- Ebersole, J.L., W.J. Liss, and C.A. Frissell (2003). Cold Water Patches in Warm Streams: Physicochemical Characteristics and the Influence of Shading. *Journal of the American Water Resources Association* 39:355-368.
- Ecke, F., Levanoni, O., Audet, J., Carlson, P., Eklöf, K., Hartman, G., McKie, B., Ledesma, J., Segersten, J., and Truchy, A. (2017) Meta-analysis of environmental effects of beaver in relation to artificial dams, *Environ. Res. Lett.*, 12, 113002.
- Eggleston, J., & McCoy, K. J. (2015). Assessing the magnitude and timing of anthropogenic warming of a shallow aquifer: example from Virginia Beach, USA. *Hydrogeology Journal*, 23(1), 105-120.

- Evans E.C., McGregor G.R. & Petts G.E. (1998) River energy budgets with special reference to river bed processes. *Hydrological Processes*, 12, 575–595.
- Ferrari, M.R., J.R. Miller, and G.L. Russell (2007). Modeling Changes in Summer Temperature of the Fraser River During the Next Century. *Journal of Hydrology* 342:336–346.
- FfE (2024): Wärmepumpen an Fließgewässern – Analyse des theoretischen Potenzials in Bayern.
- Fraley, J. J. (1987) Effects of elevated stream temperatures below a shallow reservoir on a cold water macroinvertebrate fauna, in: *The ecology of regulated streams*, edited by: Ward, J. V. and Stanford, J. A., Plenum Press, New York, London, 257–272.
- Freiberger, L., & Windisch, U. (2020). Beschattende Wirkung von Ufergehölzen auf das Temperaturregime in Fließgewässern am Beispiel der Diete. *Wasserwirtschaft*, 110(6), 18–22.
- Frutiger, A. (2004). Ecological impacts of hydroelectric power production on the river Ticino. Part 1: Thermal effects. *Archiv für Hydrobiologie*, 159(1), 43–56.
- Fuller, M. R. and Peckarsky, B. L. (2011) Ecosystem engineering by beavers affects mayfly life histories, *Freshwater Biol.*, 56, 969–979.
- Gaudard, A., Weber, C., Alexander, T. J., Hunziker, S., & Schmid, M. (2018). Impacts of using lakes and rivers for extraction and disposal of heat. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(5), e1295.
- Haag, I., Teltscher, K., Regenauer, J. & Aigner, D. (2022): Zwei-Grad-Ziel für unsere Bäche – Wassertemperatur und Beschattung. Abschlussbericht der HYDRON GmbH im Auftrag der KLIWA AG Gewässerökologie.
- Haag, I., Teltscher, K. Aigner, D. (2023): 2-Grad-Ziel für unsere Bäche - Wassertemperatur und Beschattung. KLIWA-Kurzbericht 2023: 44 S.
- Hester E.T. & Doyle M.W. (2011). Human Impacts to River Temperature and Their Effects on Biological Processes: A Quantitative Synthesis, 47(3), 571–587.
- 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, 149–155.
- Jones, N. E. (2010). Incorporating lakes within the river discontinuum: longitudinal changes in ecological characteristics in stream–lake networks. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 67(8), 1350–1362.
- Johnson, S.L. & Jones, J.A. (2000) Stream temperature response to forest harvest and debris flows in western Cascades, Oregon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57 (Suppl. 2), 30–39.
- Johnson, S.L. (2004). Factors Influencing Stream Temperatures in Small Streams: Substrate Effects and a Shading Experiment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 61:913–923.

- Kail, J., Palt, M., Lorenz, A., & Hering, D. (2021). Woody buffer effects on water temperature: The role of spatial configuration and daily temperature fluctuations. *Hydrological Processes*, 35(1), e14008.
- Kammer, H. (2018). Thermische Seewassernutzung in Deutschland. Bestandsanalyse, Potential.
- 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.
- Kinouchi, T., Yagi, H., Miyamoto, M. (2007). Increase in stream temperature related to anthropogenic heat input from urban wastewater. *Journal of Hydrology* 335: 78–88.
- Kurylyk, B. L., MacQuarrie, K. T., & McKenzie, J. M. (2014). Climate change impacts on groundwater and soil temperatures in cold and temperate regions: Implications, mathematical theory, and emerging simulation tools. *Earth-Science Reviews*, 138, 313-334.
- Langford, T. E. L. (1990). Ecological effects of thermal discharges. London, England: Springer.
- Łaszewski, M. (2018). Human impact on spatial water temperature variability in low-land rivers: a case study from Central Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(1), 1-10.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA 2012), Grundlagen für die Beurteilungen von Kühlwassereinleitungen in Gewässer, Kulturbuch-Verlag, 119 S.
- LeBlanc, R.T., R.D. Brown, and J.E. FitzGibbon (1997). Modeling the Effects of Land Use Change on the Water Temperature in Unregulated Urban Streams. *Journal of Environmental Management* 49:445-469.
- Lepori, F., Pozzoni, M., & Pera, S. (2015). What drives warming trends in streams? A case study from the Alpine foothills. *River Research and Applications*, 31(6), 663-675.
- Lessard, J. L. and Hayes, D. B. (2003) Effects of elevated water temperature on fish and macroinvertebrate communities below small dams, *River Res. Appl.*, 19, 721–732.
- Lynch, J.A., G.B. Rishel, and E.S. Corbett (1984). Thermal Alteration of Streams Draining Clear-Cut Watersheds – Quantification and Biological Implications. *Hydrobiologia* 111:161-169.
- Margolis, B. E., Castro, M. S., and Raesly, R. L. (2001) The impact of beaver impoundments on the water chemistry of two Appalachian streams, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 58, 2271–2283.
- Markovic, D., Scharfenberger, U., Schmutz, S., Pletterbauer, F., & Wolter, C. (2013). Variability and alterations of water temperatures across the Elbe and Danube River Basins. *Climatic Change*, 119, 375-389.
- Maxted, J. R., McCready, C. H., & Scarsbrook, M. R. (2005). Effects of small ponds on stream water quality and macroinvertebrate communities. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 39(5), 1069-1084.

- Mbaka, J. G., & Wanjiru Mwaniki, M. (2015). A global review of the downstream effects of small impoundments on stream habitat conditions and macroinvertebrates. *Environmental Reviews*, 23(3), 257-262.
- Means, C. (2018). Stream temperature variability in headwater beaver dam complexes in relation to hydrologic and environmental factors, MSc thesis, University of Washington, Washington, USA, 48 pp.
- Menberg, K., Bayer, P., Zosseder, K., Rumohr, S., Blum, P. (2013). Subsurface urban heat islands in German cities. *Sci. Total Environ.* 442, 123–133.
- Mende, M., & Sieber, P. (2021). Wie halten wir unsere Fließgewässer kühl? Kurzbericht. 17 pp.
- Michel, A., Brauchli, T., Lehning, M., Schaefli, B., & Huwald, H. (2020). Stream temperature and discharge evolution in Switzerland over the last 50 years: annual and seasonal behaviour. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(1), 115-142.
- Michel A., Råman Vinnå L., Bouffard D., Epting J., Huwald H., Schaefli B., Schmid M., and Wüest A., (2021). Evolution of stream and lake water temperature under climate change. Hydro-CH2018 Project. Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), 3003 Bern, Switzerland. 71 pp, doi:10.16904/envidat.207
- Mitchell, S. (1999) A simple model for estimating mean monthly stream temperatures after riparian canopy removal. *Environmental Management*, 24, 77–83.
- Mohseni, O., & Stefan, H. G. (1999). Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation. *Journal of hydrology*, 218(3-4), 128-141.
- Moore, R.D., D.L. Spittlehouse, and A. Story (2005). Riparian Microclimate and Stream Temperature Response to Forest Harvesting: A Review. *Journal of the American Water Resources Association* 41:813-834.
- Moosmann, L., Schmid, M., & Wüest, A. (2005). Einfluss der Beschattung auf das Temperaturregime der Orbe. EAWAG, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz. 27 S.
- Morin, G. & Couillard, D. (1990) Predicting river temperatures with a hydrological model. In: Chapter 5, *Encyclopedia of Fluid Mechanic, Surface and Groundwater Flow Phenomena*, Vol. 10 (Ed. N.P. Cheremisinoff), pp. 171–209. Gulf Publishing Company, Houston, TX.
- Morrison, J., M.C. Quick, and M.G.G. Foreman (2002). Climate Change in the Fraser River Watershed: Flow and Temperature Projections. *Journal of Hydrology* 263:230-244.
- Nelson, K., & Palmer, M. A. (2007). Predicting stream temperature under urbanization and climate change: implications for stream biota. *J Am Water Resour As*, 43, 440-52.
- Noethen, M., Hemmerle, H., Menberg, K., Epting, J., Benz, S. A., Blum, P., & Bayer, P. (2023). Thermal impact of underground car parks on urban groundwater. *Science of the Total Environment*, 903, 166572.

Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), die zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873) geändert worden ist

Pedersen, N.L. and K. Sand-Jensen (2007). Temperature in Lowland Danish Streams: Contemporary Patterns, Empirical Models and Future Scenarios. *Hydrological Processes* 21:348-358.

Pflum, A. (2017): Wärmeenergetische Nutzung von Fließgewässern. Bachelorarbeit. Am Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Technischen Universität Darmstadt angefertigte und beim Fachgebiet für Wasserbau und Hydraulik vorgelegte Bachelorthesis.

Pilgrim, J.M., X. Fang, and H.G. Stefan (1998). Stream Temperature Correlations With Air Temperatures in Minnesota: Implications for Climate Warming. *Journal of the American Water Resources Association* 34:1109-1121.

Poff, N. L., Brinson, M. M., & Day, J. W. (2002). Aquatic ecosystems and global climate change (no. 44). Arlington, VA: Pew Center on Global Climate Change

Poole, G. C., & Berman, C. H. (2001). An ecological perspective on in-stream temperature: Natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation. *Environmental Management*, 27(6), 787–802.

Riedmüller, U. Leßmann, D. (2024, unveröff. Entwurf): Grundlagen und Leitlinien für eine ökologisch verträgliche thermische Nutzung von Gewässern. Teil 1: Literaturstudie und Auswertung von Monitoringdaten zur Ermittlung und Absicherung von Anforderungen an die thermische Gewässernutzung. Entwurf des Abschlussberichts zu Projekt O 5.23 des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“ 2023

Riedmüller, U. Leßmann, D. (2024, unveröff. Entwurf): Grundlagen und Leitlinien für eine ökologisch verträgliche thermische Nutzung von Gewässern. Teil 2: Empfehlungen für den behördlichen Vollzug. Entwurf des Abschlussberichts zu Projekt O 5.23 des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“ 2023

Rutherford, J.C., N.A. Marsh, P.M. Davies, and S.E. Bunn (2004). Effects of Patchy Shade on Stream Water Temperature: How Quickly Do Small Streams Heat and Cool? *Marine and Freshwater Research* 55:737-748.

Schwoerbel, J. und H. Brendelberger, (2022). Einführung in die Limnologie. Stoffhaushalt - Lebensgemeinschaften - Technologie. 11. Aufl. 2022: Springer Heidelberg.

Sinokrot B.A. & Gulliver J.S. (2000) In-stream flow impact on river water temperatures. *Journal of Hydraulic Research*, 38, 339–349.

Smith, K., (1972). River Water Temperatures – An Environmental Review. *Scottish Geographical Magazine* 88:211-220.

Stauffer, F., Bayer, P., Blum, P., Molina-Giraldo, N., Kinzelbach, W., 2013. Thermal Use of Shallow Groundwater.

Stegner, J. (2016). Bestimmung thermischer Materialkennwerte von Erdkabelbettungen. PhD. TU Darmstadt, Germany.

- Torgersen, C.E., Faux, R.N., McIntosh, B.A., Poage, N.J. & Norton, D.J. (2001) Airborne thermal sensing for water temperature assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment*, 76, 386–398.
- Trimmel, H., Weihs, P., Leidinger, D., Formayer, H., Kalny, G., and Melcher, A., (2018). Can riparian vegetation shade mitigate the expected rise in stream temperatures due to climate change during heat waves in a human-impacted pre-alpine river? *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 437–461, doi:10.5194/hess-22-437-2018
- van Treeck, R. & Wolter, Chr. (2021): Temperaturempfindlichkeiten der Fischgemeinschaften in deutschen Fließgewässern – Überprüfung der Orientierungswerte für die Temperatur. Abschlussbericht zu Projekt O 10.20 des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“ 2020
- Van der Weele T.J. & Mathur, M.B. (2019): Some Desirable Properties Of The Bonferroni Correction: Is The Bonferroni Correction Really So Bad? *Am J Epidemiol.*; 188(3): 617-618. doi:10.1093/aje/kwy250
- Ward, J.V. (1985) Thermal characteristics of running waters. *Hydrobiologia*, 125, 31–46.
- Webb, B.W. (1996). Trends in Stream and River Temperature. *Hydrological Processes* 10:205-226.
- Webb, B.W. & Zhang, Y. (1997) Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget. *Hydrological Processes*, 11, 79–101.
- Webb, B.W. & Zhang, Y. (1999) Water temperatures and heat budgets in Dorset chalk water courses. *Hydrological Processes*, 13, 309–321.
- Webb, B. W., Hannah, D. M., Moore, R. D., Brown, L. E., & Nobilis, F. (2008). Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(7), 902-918.
- Worrall, F., Howden, N. J., Burt, T. P., & Hannah, D. M. (2022). River water temperature demonstrates resistance to long-term air temperature change. *Hydrological Processes*, 36(11), e14732.
- Zaidel, P. (2018) Impacts of Small, Surface-Release Dams on Stream Temperature and Dissolved Oxygen in Massachusetts, University of Massachusetts, Amherst, 283 pp
- Zaidel, P. A., Roy, A. H., Houle, K. M., Lambert, B., Letcher, B. H., Nislow, K. H., & Smith, C. (2021). Impacts of small dams on stream temperature. *Ecological Indicators*, 120, 106878.
- Zavarsky, A. and Duester, L. (2020) Anthropogenic influence on the Rhine water temperatures, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 5027–5041.
- Zhi, W., Klingler, C., Liu, J. et al. (2023) Widespread deoxygenation in warming rivers. *Nat. Clim. Chang.* 13, 1105–1113.
- Zwieniecki, M.A. & Newton, M. (1999) Influence of streamside cover and stream features on temperature trends in forested streams of Western

Anhang

Ergebnisse der Wilcoxon-Tests der Koeffizienten der Sinusoidal-Regression, gruppiert nach LAWA-Typen

Dokumentation der Einleitungsszenarien

Einzel- ΔT -Szenario

Kumulativ- ΔT -Szenario

Einzel-Max-T-Szenario

Gleichverteilungs-Max-T-Szenario

Ergebnisse der Wilcoxon-Tests der Koeffizienten der Sinusoidal-Regression, gruppiert nach LAWA-Typen

Tabelle 125: p-Werte der Wilcoxon-Tests der Koeffizienten der Sinusoidal-Regression, gruppiert nach LAWA-Typen

Typ 1	Typ 2	cos-Terme	sin-Terme	Konstanten
2.1	9.2	0,044101	0,0089668	0,0038718
2.1	10	0,00017422	0,00017422	0,00017422
2.1	15_G	0,03579	0,0016611	0,00015101
2.1	20	0,00021884	0,00021884	0,0048048
2.1	21_N	0,046617	0,0015038	0,0030075
2.1	22	0,0054945	0,0054945	0,0054945
2.1	22.1	0,0087574	0,010698	0,005026
2.1	22.2	0,022393	0,00033422	0,00033422
2.1	23	0,00036657	0,0014663	0,020492
2.2	10	0,014345	0,00015185	< 0,0001
2.2	20	0,00028729	0,00015747	0,00033121
2.2	22	0,001155	0,0074422	0,02004
2.2	22.1	0,0090935	0,0055105	0,0035349
3.2	5.1	0,0025331	0,016395	0,03252
3.2	20	0,016183	< 0,0001	< 0,0001
3.2	22	0,011375	0,0082956	0,00043992
3.2	23	0,0019698	0,029064	0,016451
5	5.1	0,013346	< 0,0001	< 0,0001
5	9	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5	9.1	0,001446	0,0011319	< 0,0001
5	11	< 0,0001	0,023832	0,016168
5	12	< 0,0001	0,0001156	< 0,0001
5	14	< 0,0001	0,021189	< 0,0001
5	19	< 0,0001	0,0051848	< 0,0001
5	9.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5	10	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5	15	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5	15_G	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Typ 1	Typ 2	cos-Terme	sin-Terme	Konstanten
5	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5	21	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5	21_N	< 0,0001	0,00045047	< 0,0001
5	22	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5	22.1	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5	22.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5	22.3	0,0039709	0,017088	0,0080486
5	23	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5.1	11	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5.1	12	< 0,0001	< 0,0001	0,00047712
5.1	14	< 0,0001	< 0,0001	0,001872
5.1	19	< 0,0001	< 0,0001	0,0002119
5.1	9.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5.1	10	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5.1	15	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5.1	15_G	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5.1	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5.1	21_N	< 0,0001	< 0,0001	0,00063686
5.1	22	< 0,0001	< 0,0001	0,0025968
5.1	22.1	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5.1	22.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
5.1	22.3	0,0042151	0,0070408	0,012732
6	11	< 0,0001	< 0,0001	0,012534
6	12	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
6	17	0,00012898	0,00058804	0,0014246
6	19	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
6	9.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
6	10	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
6	15	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
6	15_G	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
6	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Typ 1	Typ 2	cos-Terme	sin-Terme	Konstanten
6	21	< 0,0001	< 0,0001	0,027529
6	21_N	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
6	22	< 0,0001	< 0,0001	0,0010479
6	22.1	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
6	22.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
6	22.3	0,0093597	0,016298	0,014773
6	23	< 0,0001	< 0,0001	0,027883
6K	14	0,020904	0,029779	0,0046205
6K	16	0,0019687	0,040282	0,00031023
6K	10	0,041464	< 0,0001	< 0,0001
6K	20	0,0077304	< 0,0001	< 0,0001
6K	23	0,00047415	< 0,0001	0,039299
7	9	0,00010437	< 0,0001	0,0069547
7	9.1	0,0044138	0,0015209	< 0,0001
7	9.1K	< 0,0001	0,0077301	0,0029517
7	12	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
7	17	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
7	19	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
7	9.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
7	10	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
7	15	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
7	15_G	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
7	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
7	21	< 0,0001	< 0,0001	0,0011531
7	21_N	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
7	22	< 0,0001	< 0,0001	0,00011615
7	22.1	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
7	22.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
7	22.3	0,0084584	0,016966	0,0084584
7	23	< 0,0001	< 0,0001	0,0009465
9	16	< 0,0001	0,0078383	< 0,0001

Typ 1	Typ 2	cos-Terme	sin-Terme	Konstanten
9	9.2	< 0,0001	0,0019943	< 0,0001
9	10	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
9	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
9	21_N	< 0,0001	0,046634	0,0015056
9	22	< 0,0001	0,0023917	0,0062569
9	22.1	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
9	22.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
9.1	11	0,001352	0,0001251	< 0,0001
9.1	16	0,0052965	0,00030502	< 0,0001
9.1	9.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
9.1	10	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
9.1	15_G	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
9.1	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
9.1	22.1	< 0,0001	< 0,0001	0,048845
9.1	22.2	< 0,0001	< 0,0001	0,010718
11	18	0,0084131	0,018903	< 0,0001
11	9.2	< 0,0001	0,001056	< 0,0001
11	10	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
11	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
11	21	< 0,0001	0,0024296	< 0,0001
11	21_N	0,0097719	0,025705	< 0,0001
11	22	< 0,0001	0,0047999	< 0,0001
11	22.1	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
11	22.2	0,0010098	0,00012089	< 0,0001
11	23	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
12	14	< 0,0001	0,0079042	< 0,0001
12	16	< 0,0001	0,005505	< 0,0001
12	10	0,0025591	< 0,0001	< 0,0001
12	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
14	9.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
14	10	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Typ 1	Typ 2	cos-Terme	sin-Terme	Konstanten
14	15_G	< 0,0001	0,0068361	< 0,0001
14	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
14	21	< 0,0001	< 0,0001	0,017843
14	21_N	< 0,0001	0,0057177	< 0,0001
14	22	< 0,0001	0,0009666	0,00053812
14	22.1	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
14	22.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
14	23	< 0,0001	< 0,0001	0,01808
16	9.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
16	10	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
16	15	< 0,0001	0,04491	< 0,0001
16	15_G	< 0,0001	0,0040693	< 0,0001
16	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
16	21	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
16	21_N	< 0,0001	0,0038029	< 0,0001
16	22	< 0,0001	0,00084386	< 0,0001
16	22.1	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
16	22.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
16	23	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
17	9.2	0,0020252	0,0059285	< 0,0001
17	10	0,0013904	< 0,0001	< 0,0001
17	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
17	21_N	0,043128	0,031271	0,018009
17	22	0,00026599	0,0065351	0,028101
17	22.1	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
18	9.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
18	10	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
18	15_G	0,00012556	0,00029286	< 0,0001
18	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
18	22.1	< 0,0001	< 0,0001	0,0063022
18	22.2	< 0,0001	< 0,0001	0,0038265

Typ 1	Typ 2	cos-Terme	sin-Terme	Konstanten
19	9.2	0,00056136	0,0015648	0,0016604
19	10	0,00010117	< 0,0001	< 0,0001
19	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
19	21	< 0,0001	0,0025326	0,021524
19	23	< 0,0001	< 0,0001	0,043951
9.2	15	0,00013809	0,00029188	< 0,0001
9.2	20	0,0020177	< 0,0001	< 0,0001
9.2	22.1	0,025476	0,00080715	0,0012784
9.2	23	< 0,0001	0,018811	< 0,0001
10	15	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
10	15_G	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
10	21	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
10	22	0,0079546	0,00030956	< 0,0001
10	23	< 0,0001	0,010573	< 0,0001
15	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
15	21	< 0,0001	0,0015424	0,032033
15	22.1	< 0,0001	< 0,0001	0,012733
15	22.2	0,016916	< 0,0001	0,0027885
15	23	< 0,0001	< 0,0001	0,031754
15_G	20	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
15_G	22	< 0,0001	0,0098996	0,012211
15_G	22.1	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
15_G	22.2	0,015254	0,0033222	< 0,0001
15_G	23	< 0,0001	0,0099944	< 0,0001
20	21	0,0084424	< 0,0001	< 0,0001
20	22.2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
20	23	0,026517	0,0054279	< 0,0001

Dokumentation der Einleitungsszenarien

Einzel- ΔT -Szenario

Tabelle 126: Eingangsdaten der Einleitungen im Einzel- ΔT -Szenario

Einleitungen	E1	E2	E3
Genehmigtes Tmax [°C]	30	30	30
Gen. max. Volumenstrom [m ³ /a]	4.400.000	5.500.000	7.400.000
Gen. max. Volumenstrom [m ³ /s]	0,1395	0,1744	0,2347

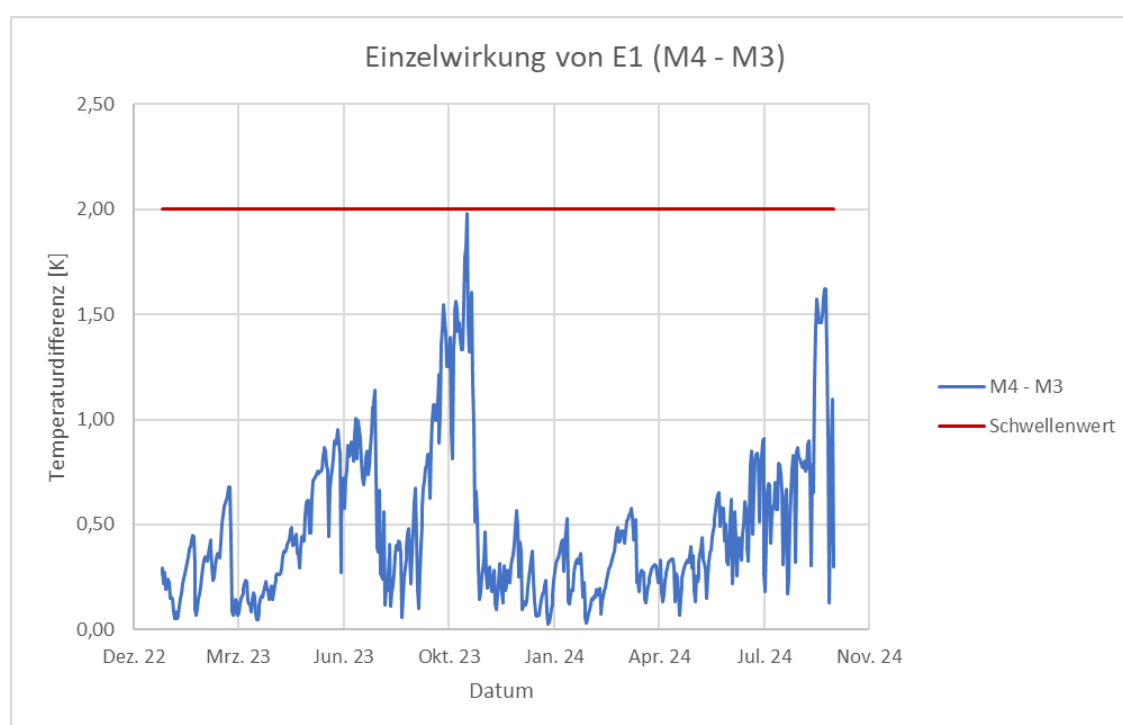


Abbildung 54: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E1 im Einzel- ΔT -Szenario

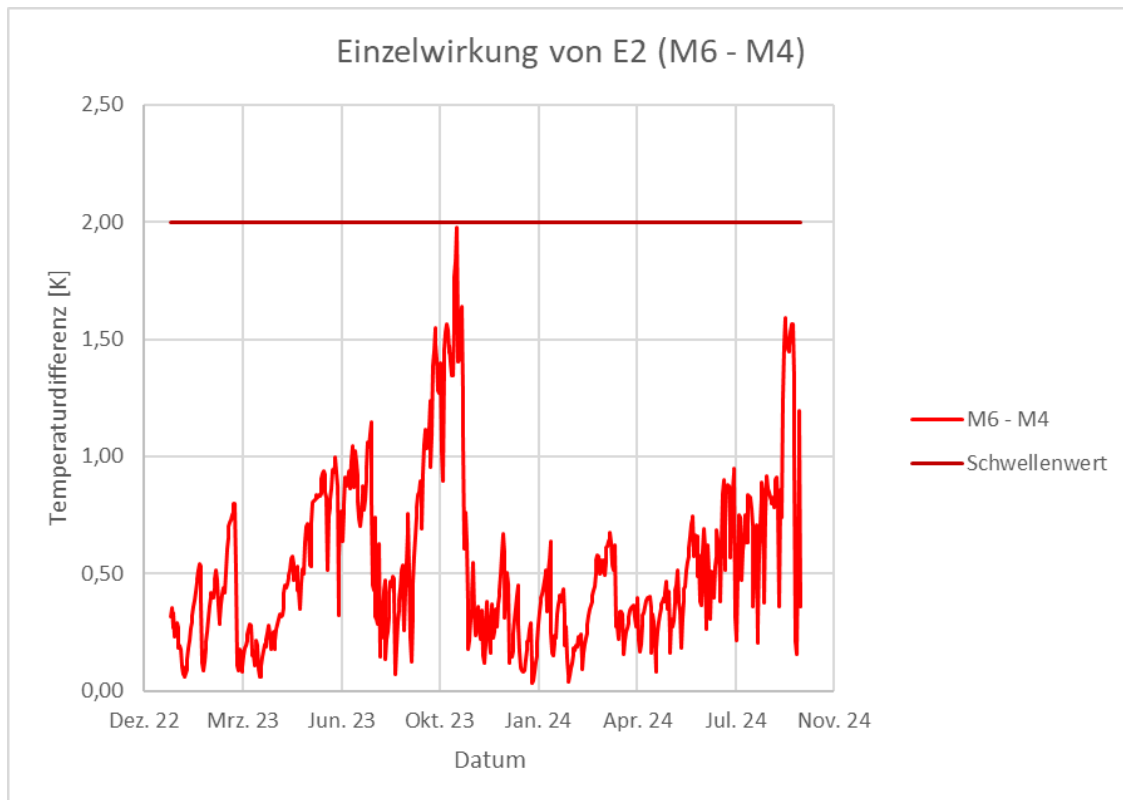


Abbildung 55: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E2 im Einzel- ΔT -Szenario

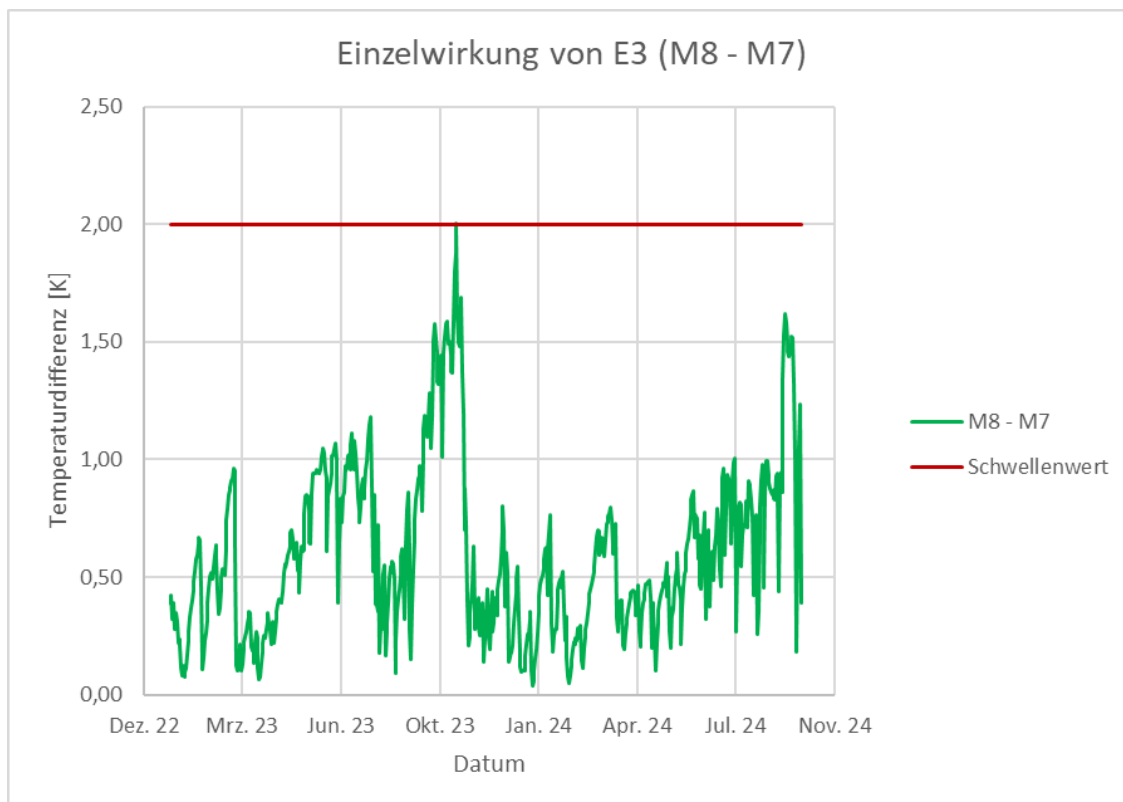


Abbildung 56: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E3 im Einzel- ΔT -Szenario

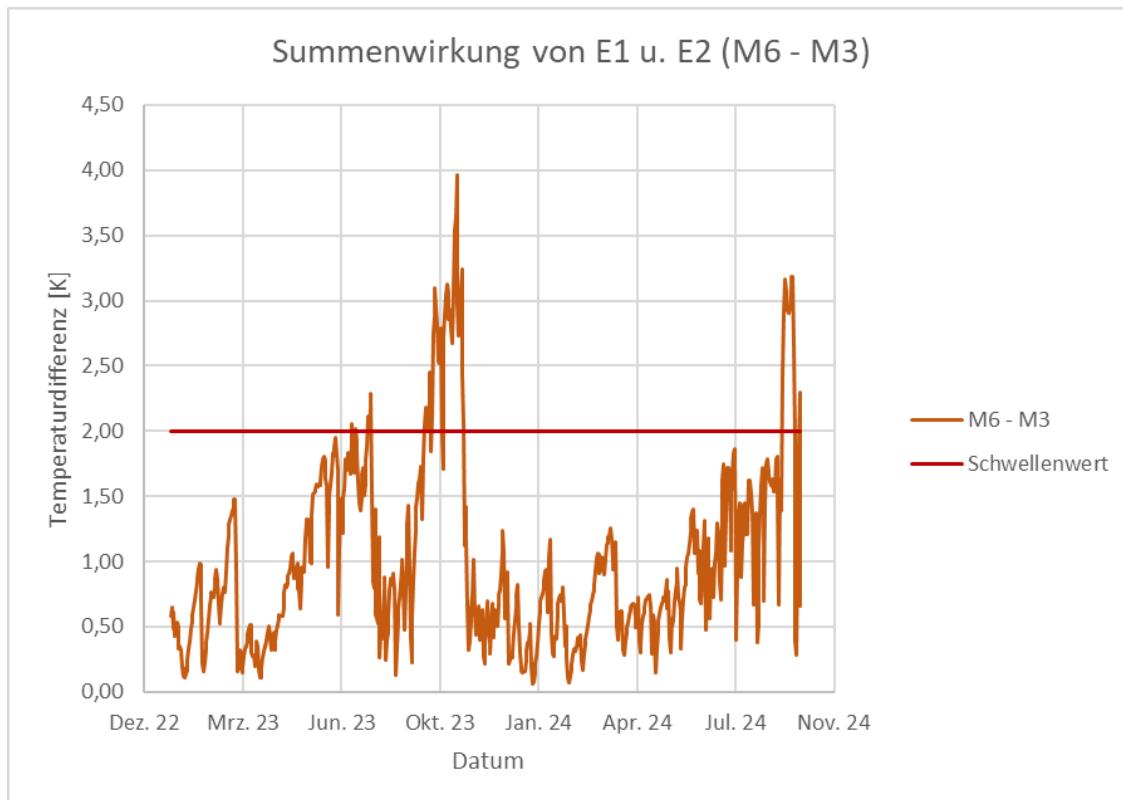


Abbildung 57: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1 und E2 im Einzel- ΔT -Szenario

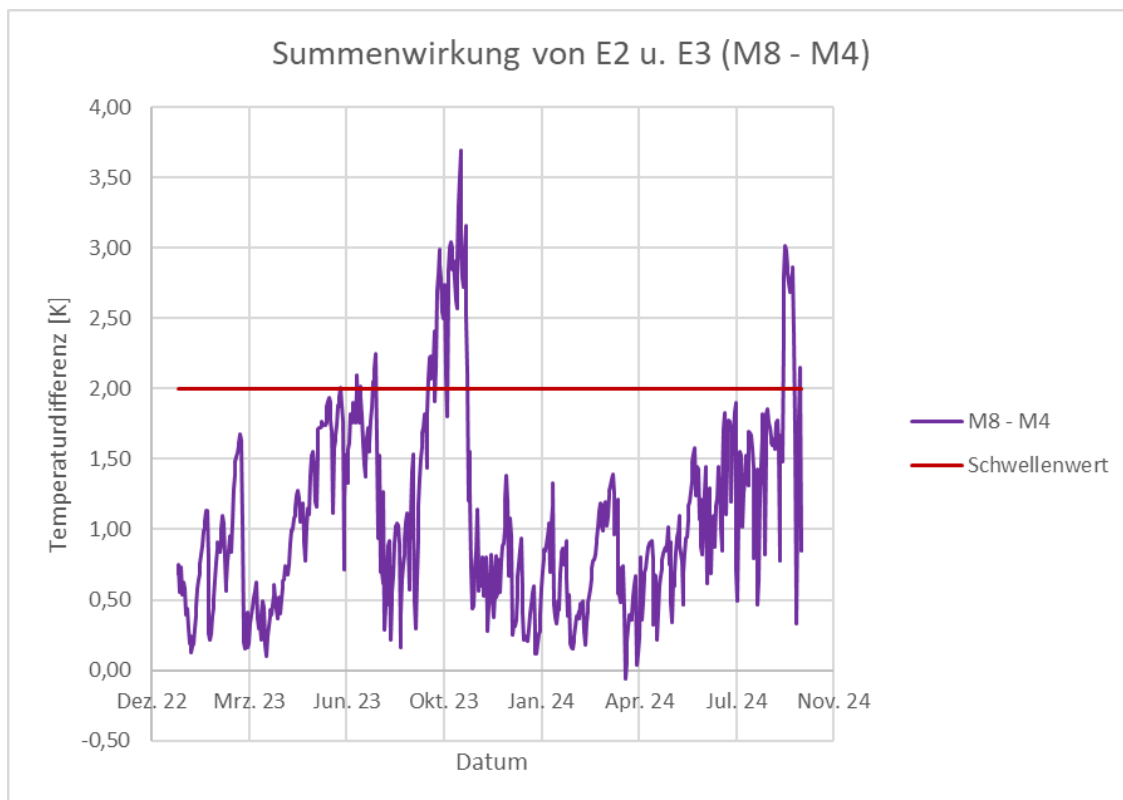


Abbildung 58: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E2 und E3 im Einzel- ΔT -Szenario

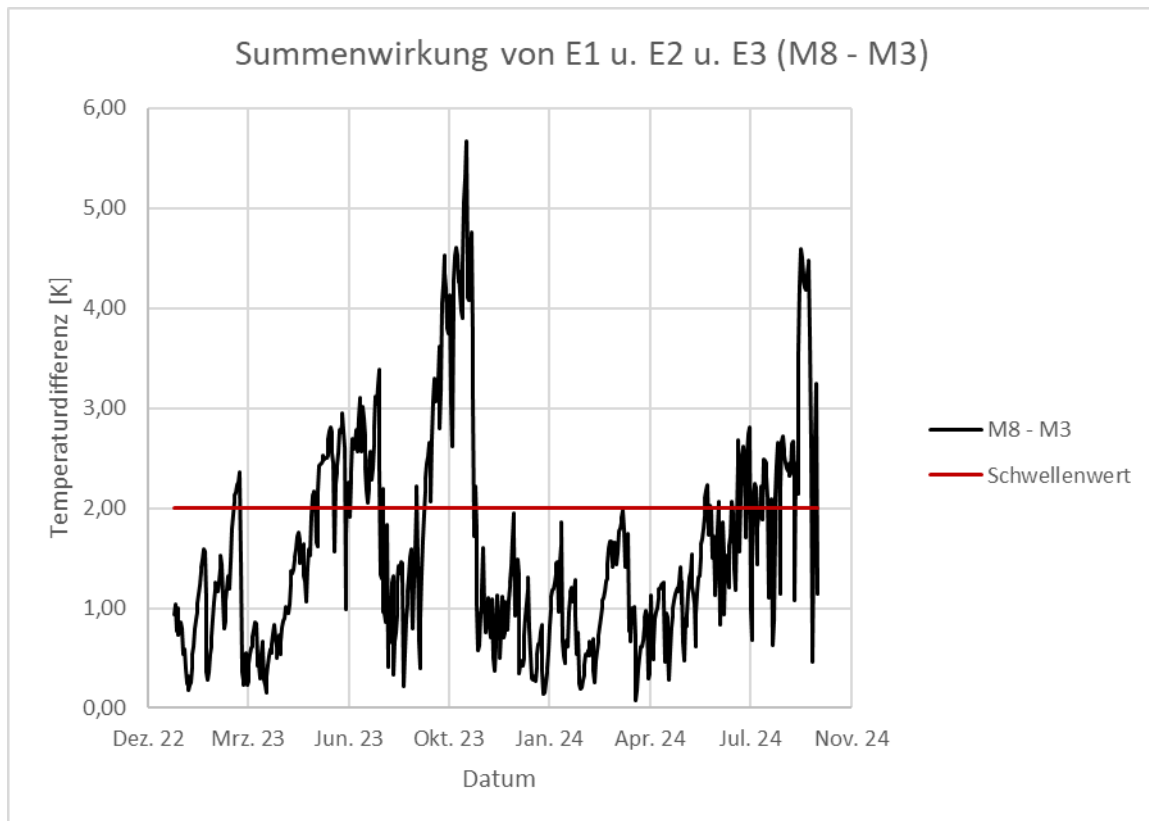


Abbildung 59: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1, E2 und E3 im Einzel- ΔT -Szenario

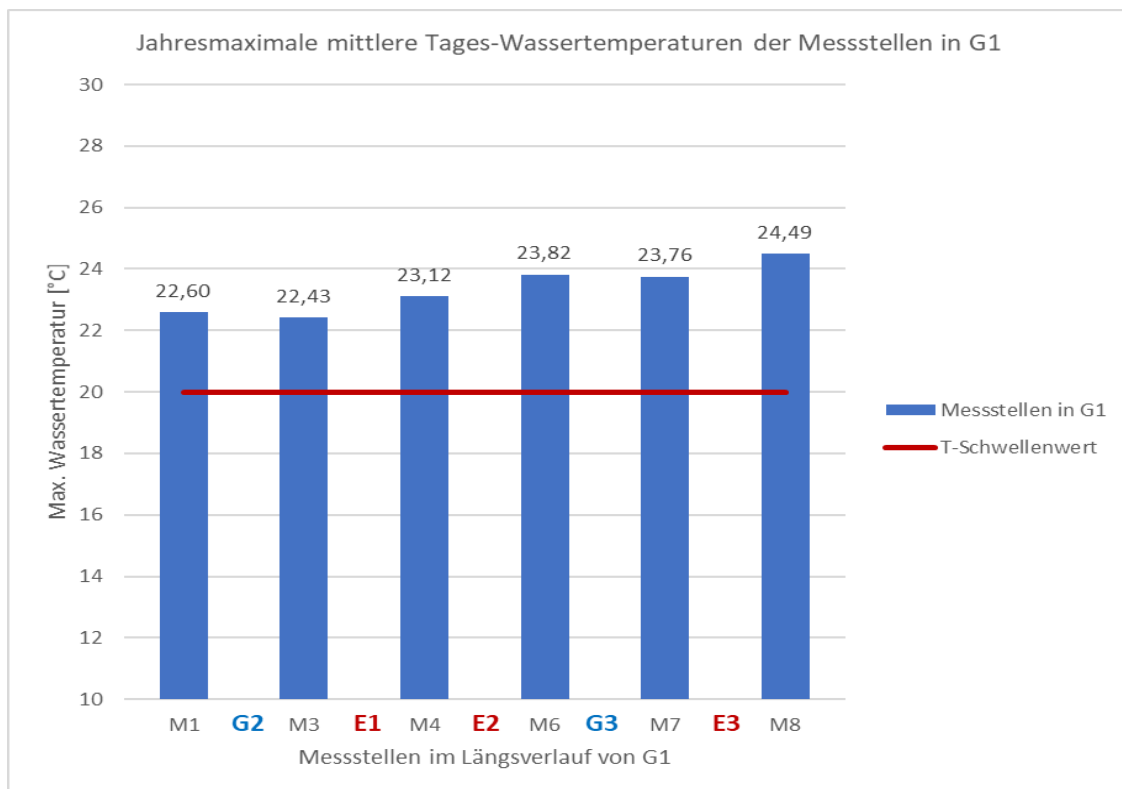


Abbildung 60: Jahresmaximale mittlere Tages-Wassertemperaturen an den Messstellen von G1 im Einzel- ΔT -Szenario

Kumulativ- ΔT -Szenario

Tabelle 127: Eingangsdaten der Einleitungen im Kumulativ- ΔT -Szenario

Einleitungen	E1	E2	E3
Genehmigtes Tmax [°C]	30	30	30
Gen. max. Volumenstrom [m ³ /a]	1.650.000	1.650.000	1.650.000
Gen. max. Volumenstrom [m ³ /s]	0,0523	0,0523	0,0523

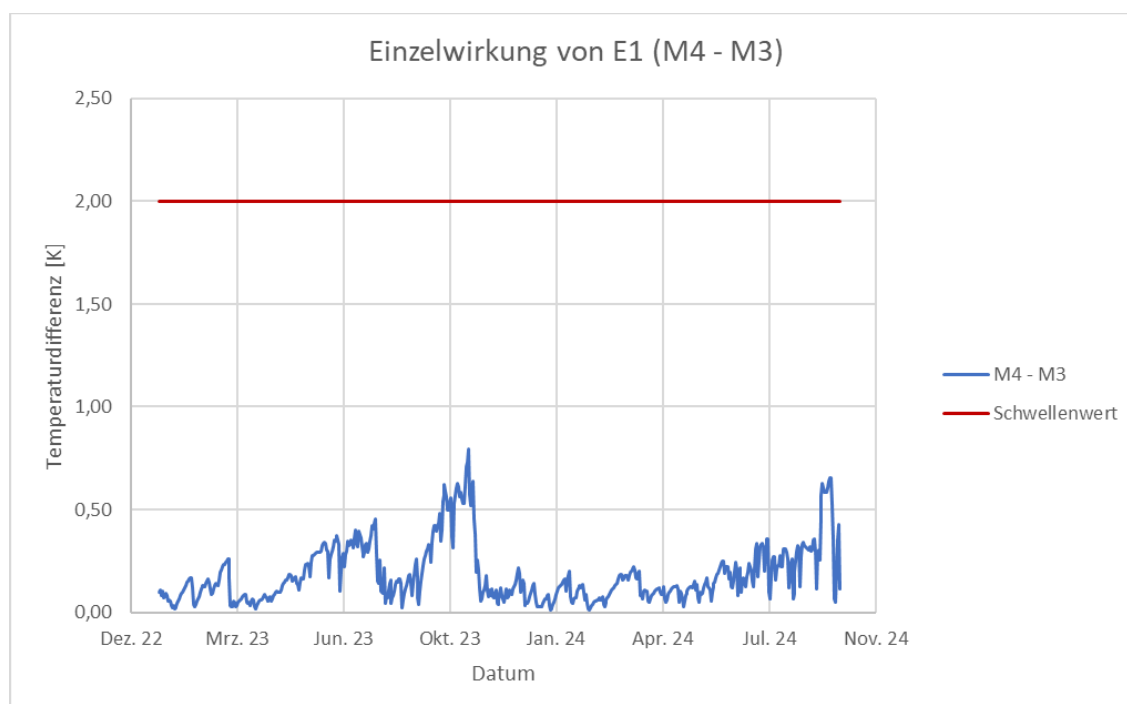


Abbildung 61: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E1 im Kumulativ- ΔT -Szenario

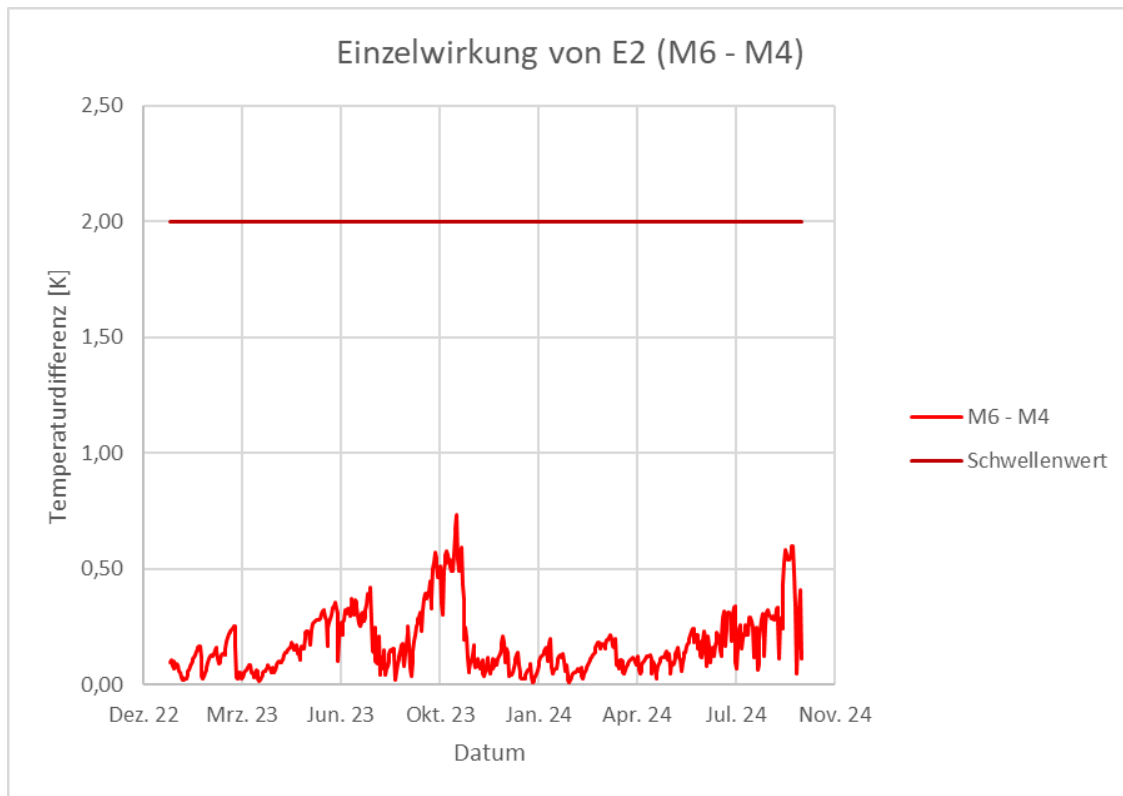


Abbildung 62: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E2 im Kumulativ- ΔT -Szenario

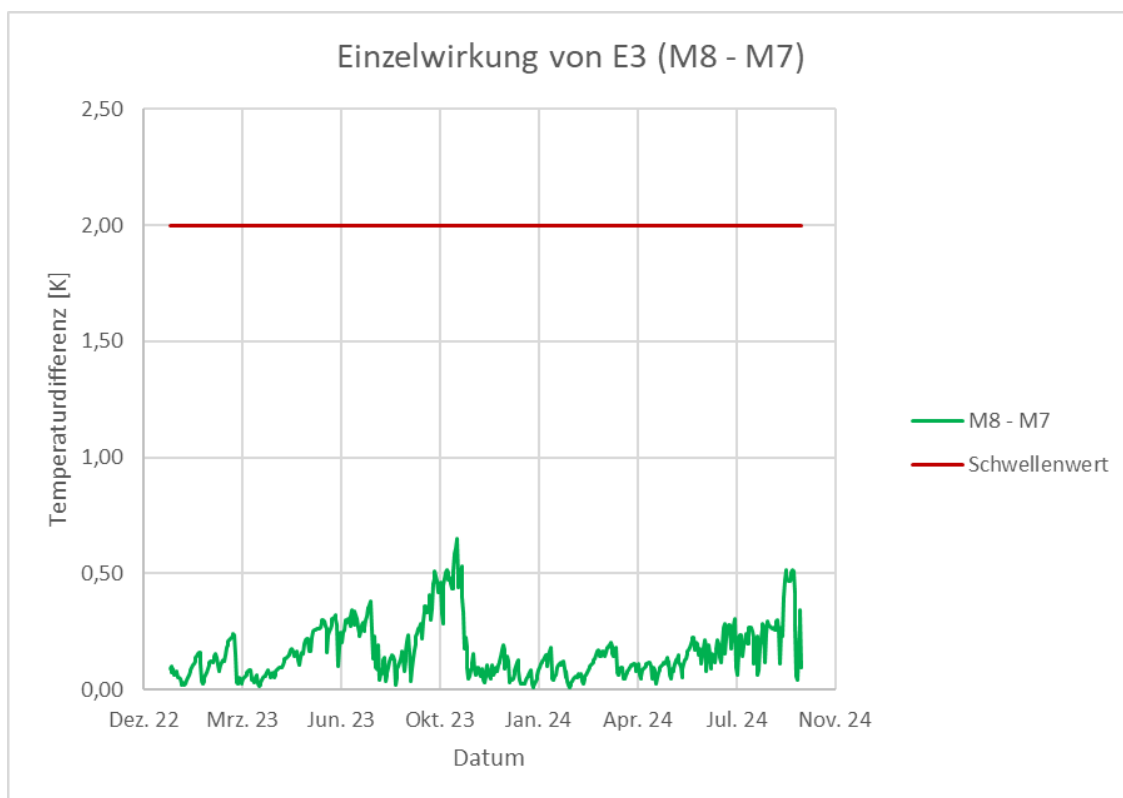


Abbildung 63: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E3 im Kumulativ- ΔT -Szenario

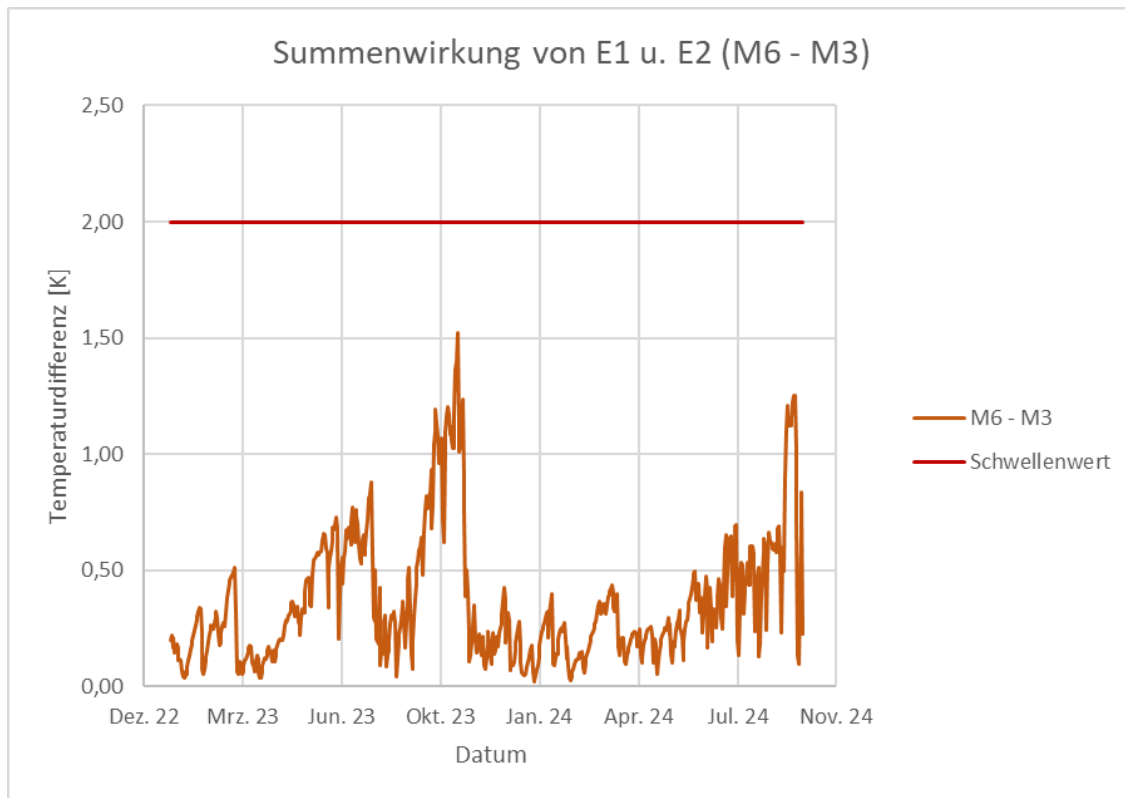


Abbildung 64: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1 und E2 im Kumulativ- ΔT -Szenario

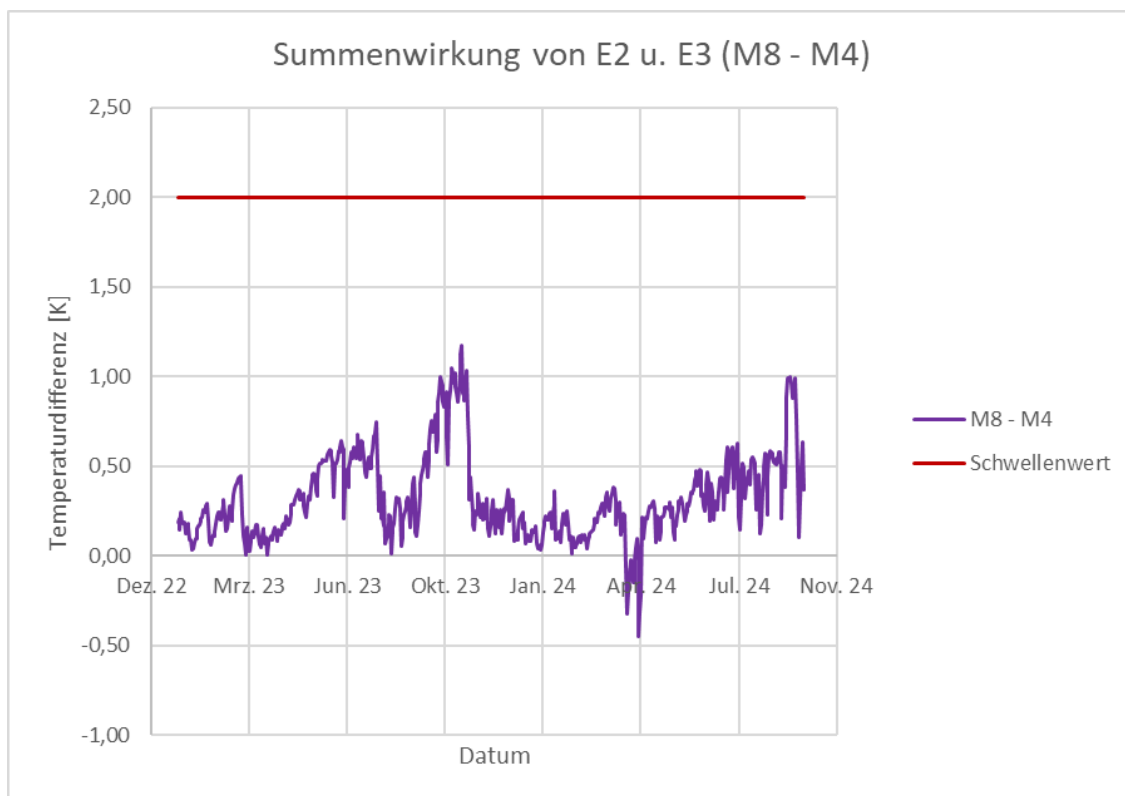


Abbildung 65: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E2 und E3 im Kumulativ- ΔT -Szenario

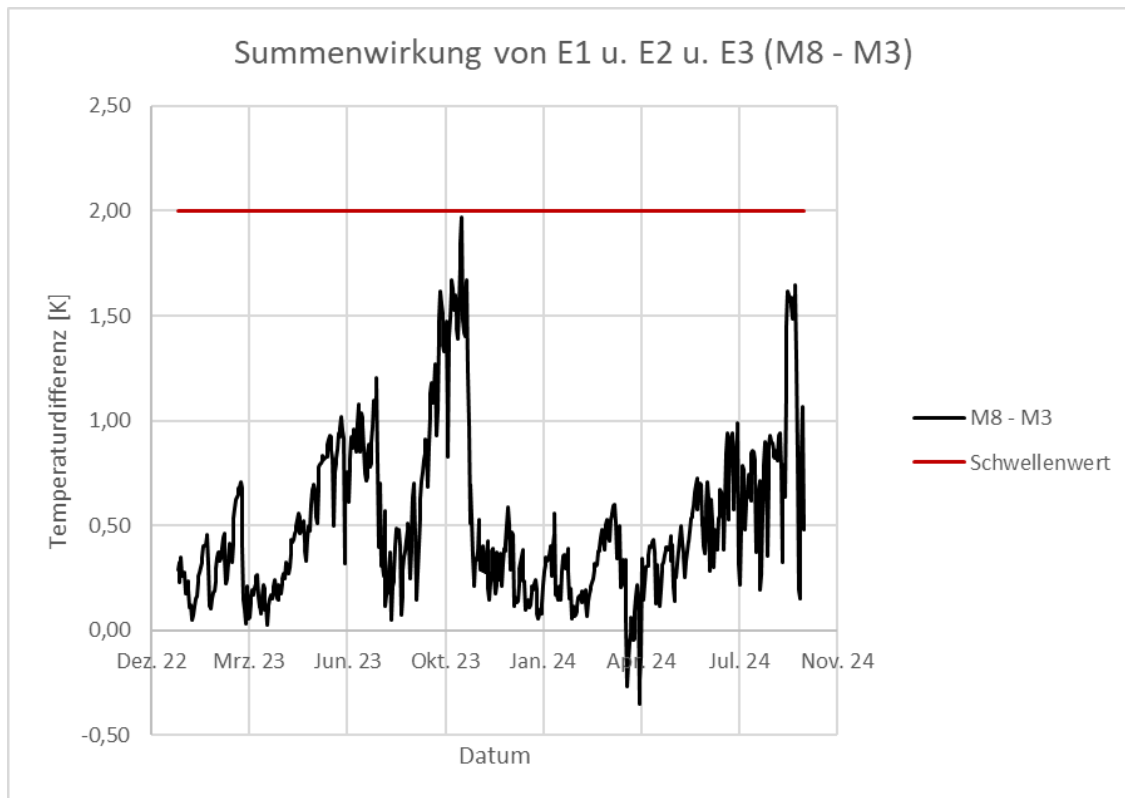


Abbildung 66: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1, E2 und E3 im Kumulativ- ΔT -Szenario

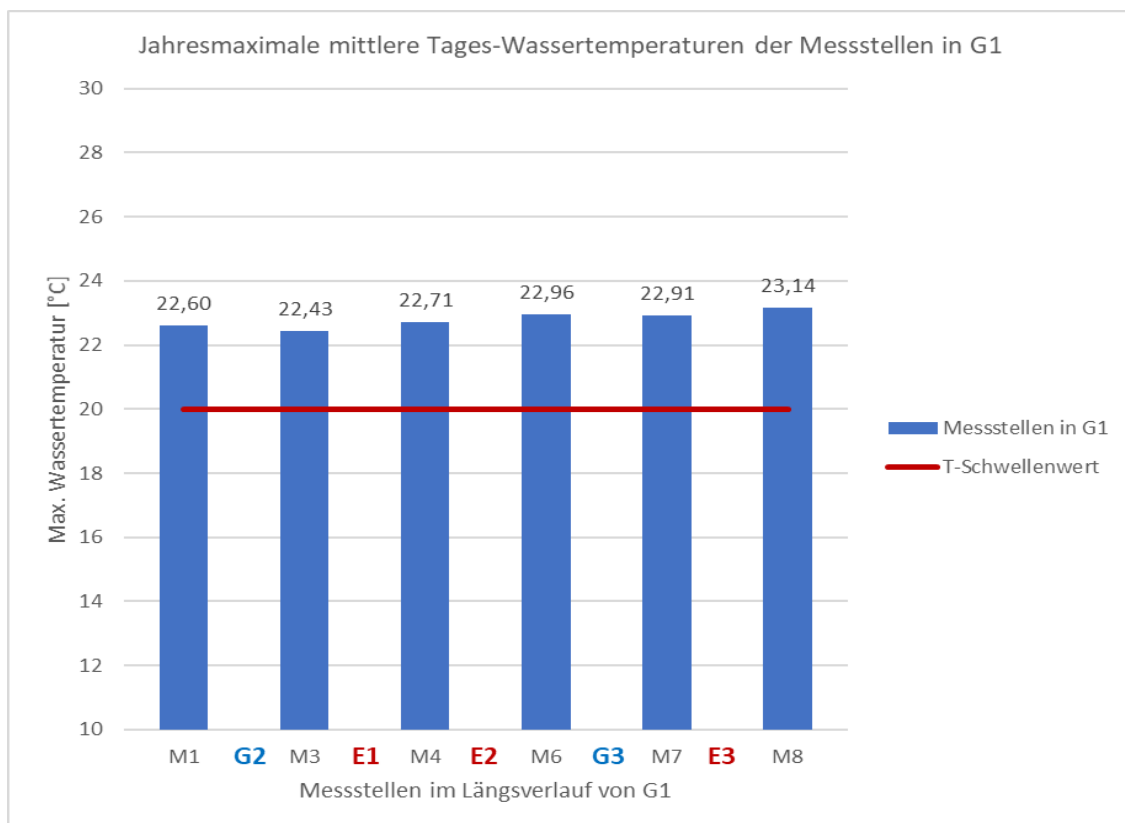


Abbildung 67: Jahresmaximale mittlere Tages-Wassertemperaturen an den Messstellen von G1 im Kumulativ- ΔT -Szenario

Einzel-Max-T-Szenario

Tabelle 128: Eingangsdaten der Einleitungen im Einzel-Max-T-Szenario

Einleitungen	E1	E2	E3
Genehmigtes Tmax [°C]	30	30	30
Gen. max. Volumenstrom [m3/a]	4.000.000	85.000	95.000
Gen. max. Volumenstrom [m3/s]	0,1268	0,0027	0,0030

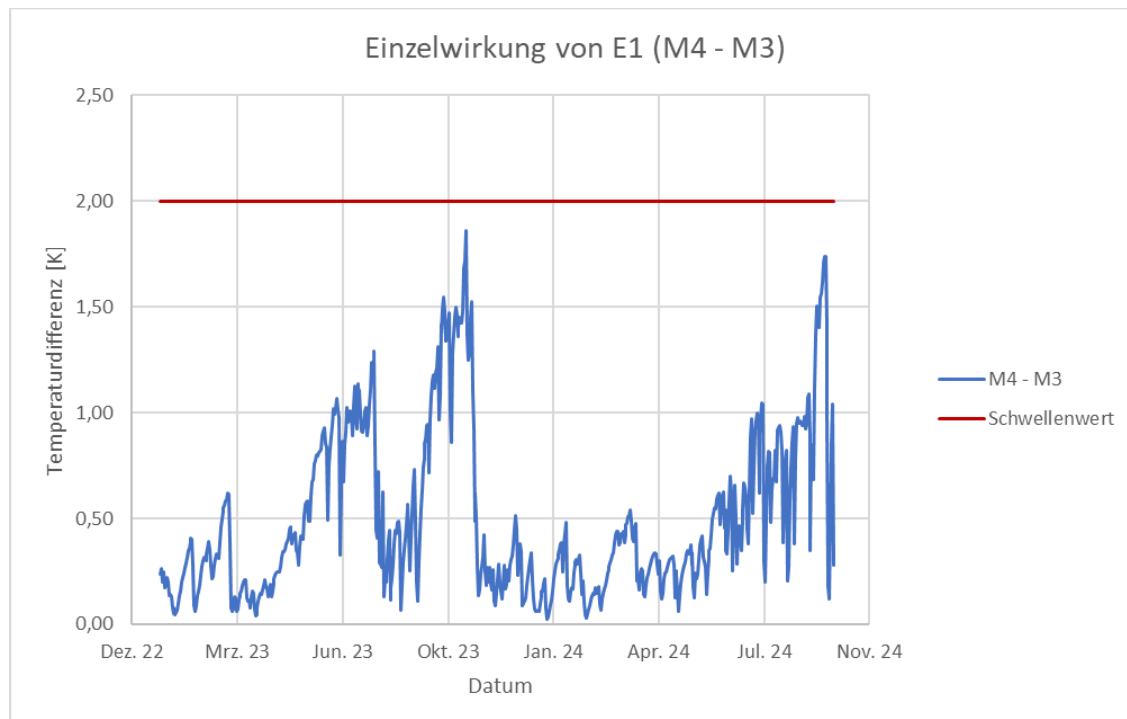


Abbildung 68: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E1 im Einzel-Max-T-Szenario

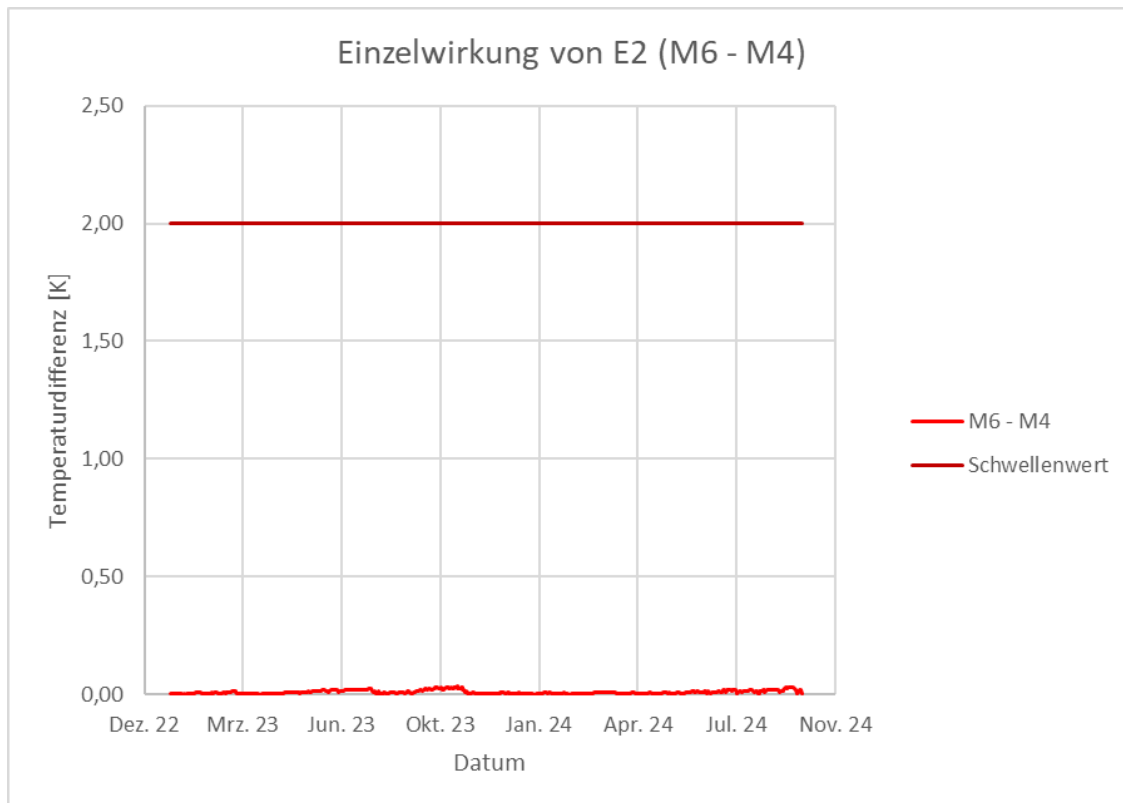


Abbildung 69: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E2 im Einzel-Max-T-Szenario

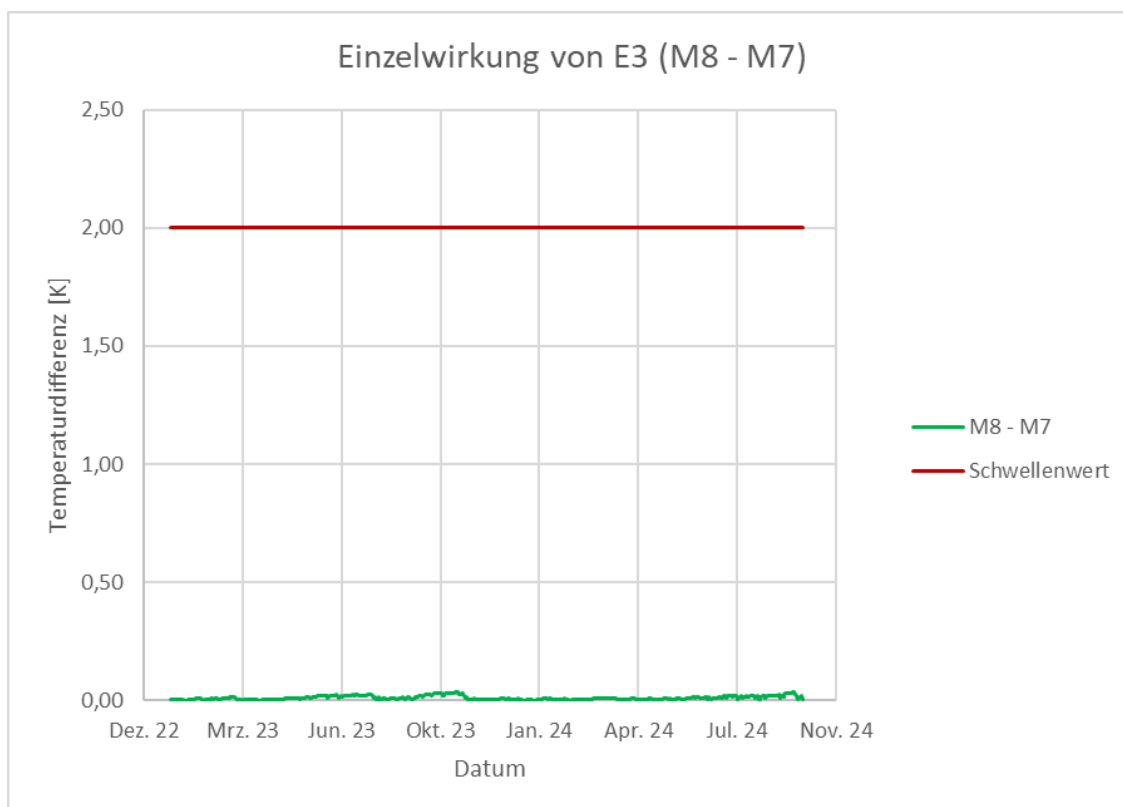


Abbildung 70: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E3 im Einzel-Max-T-Szenario

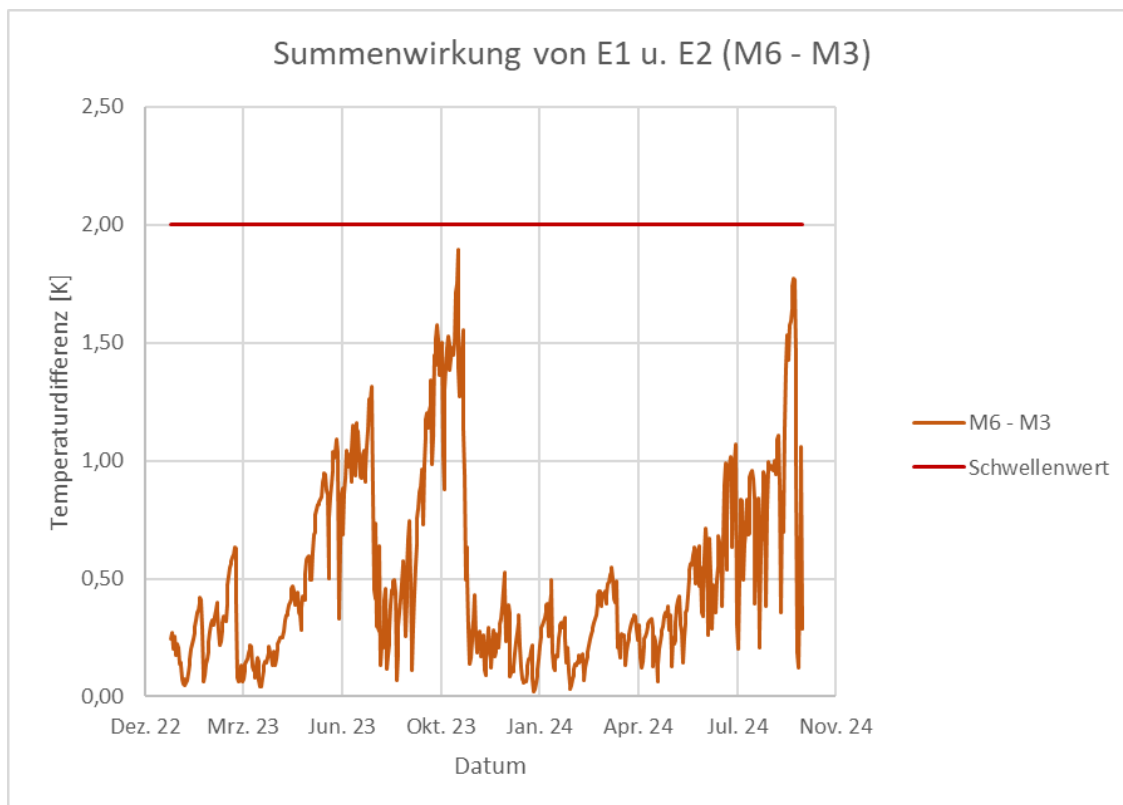


Abbildung 71: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1 und E2 im Einzel-Max-T-Szenario

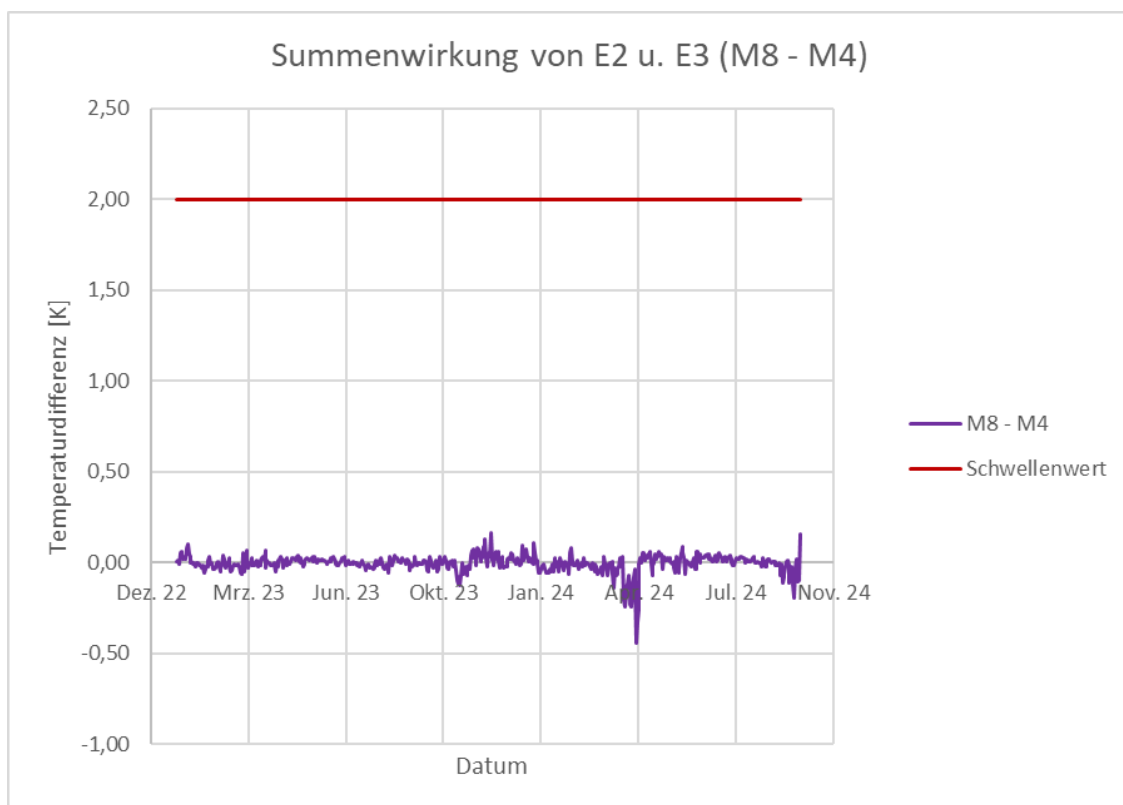


Abbildung 72: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E2 und E3 im Einzel-Max-T-Szenario

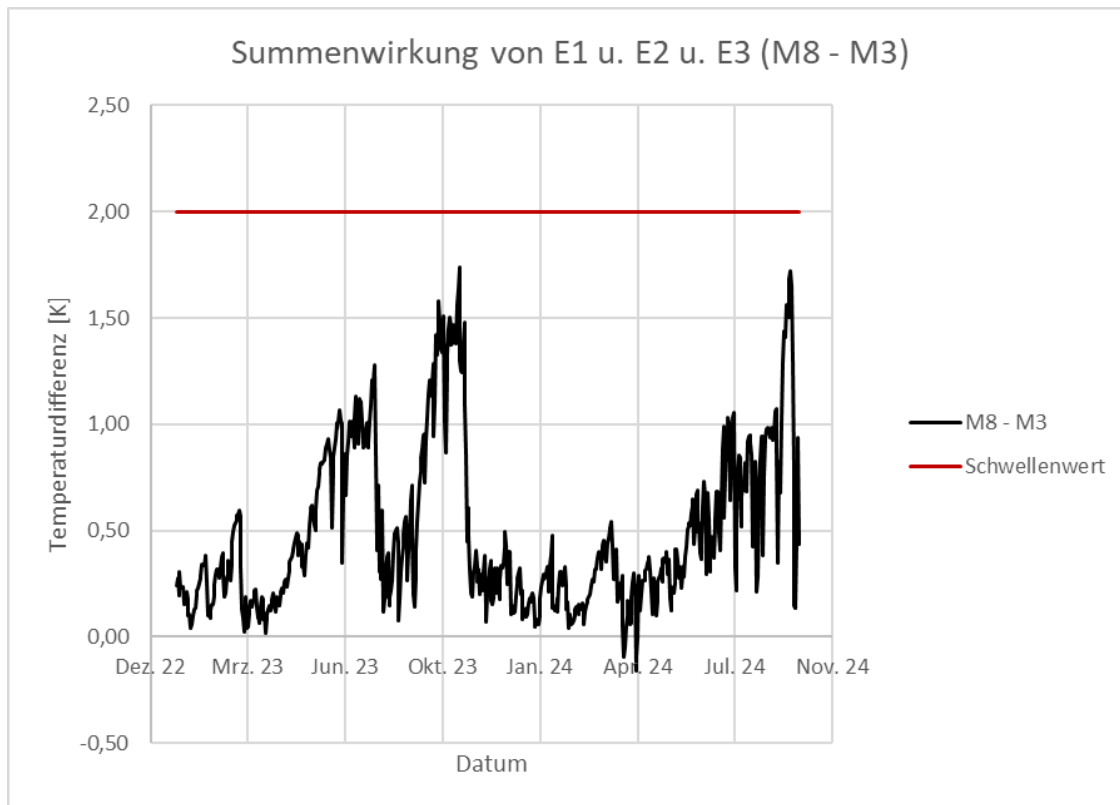


Abbildung 73: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1, E2 und E3 im Einzel-Max-T-Szenario

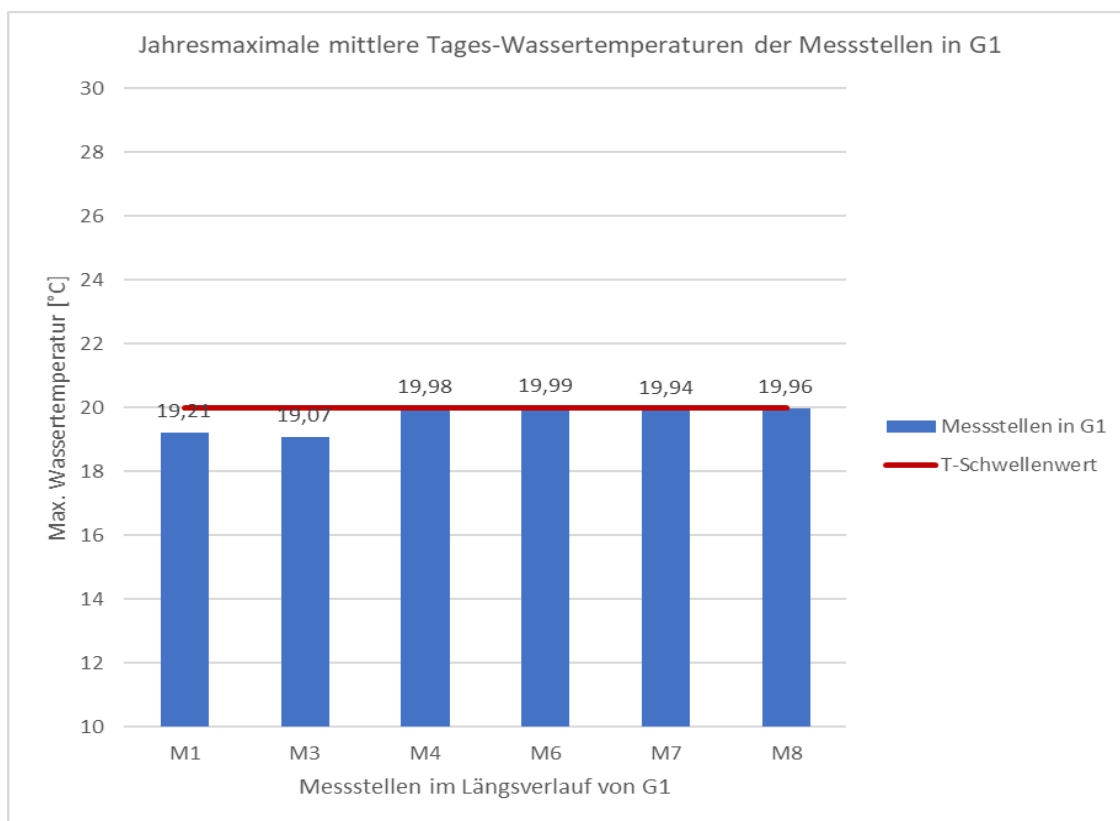


Abbildung 74: Jahresmaximale mittlere Tages-Wassertemperaturen an den Messstellen von G1 im Einzel-Max-T-Szenario

Gleichverteilungs-Max-T-Szenario

Tabelle 129: Eingangsdaten der Einleitungen im Gesamt-Max-T-Szenario

Einleitungen	E1	E2	E3
Genehmigtes Tmax [°C]	30	30	30
Gen. max. Volumenstrom [m ³ /a]	1.400.000	1.400.000	1.400.000
Gen. max. Volumenstrom [m ³ /s]	0,0444	0,0444	0,0444

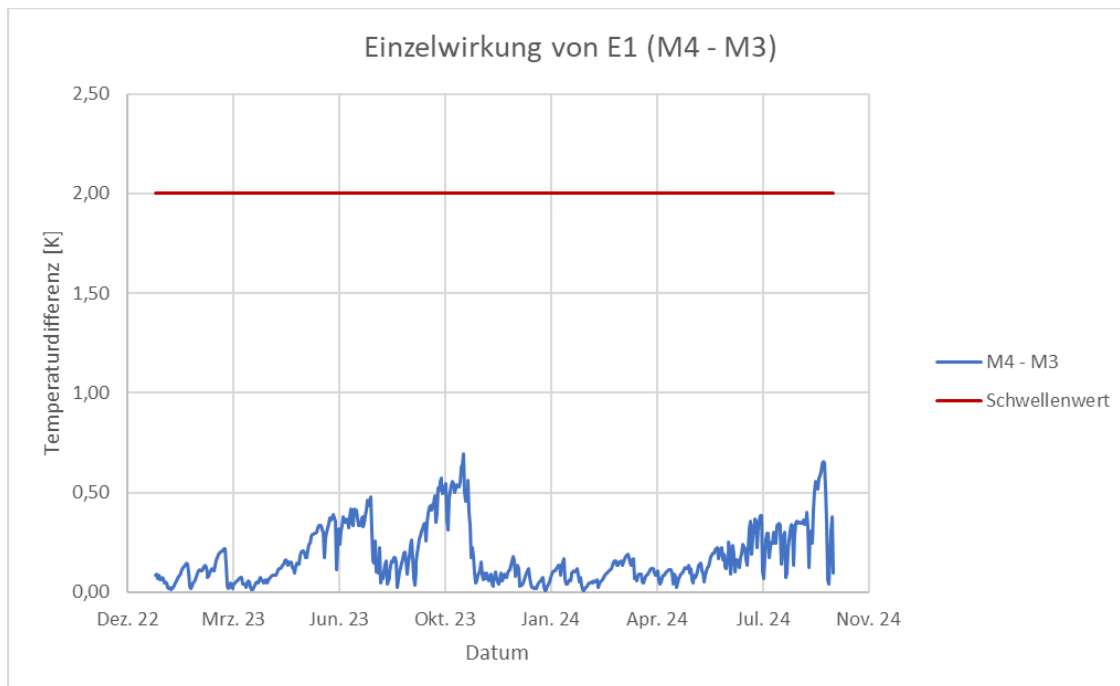


Abbildung 75: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E1 im Gleichverteilungs-Max-T-Szenario

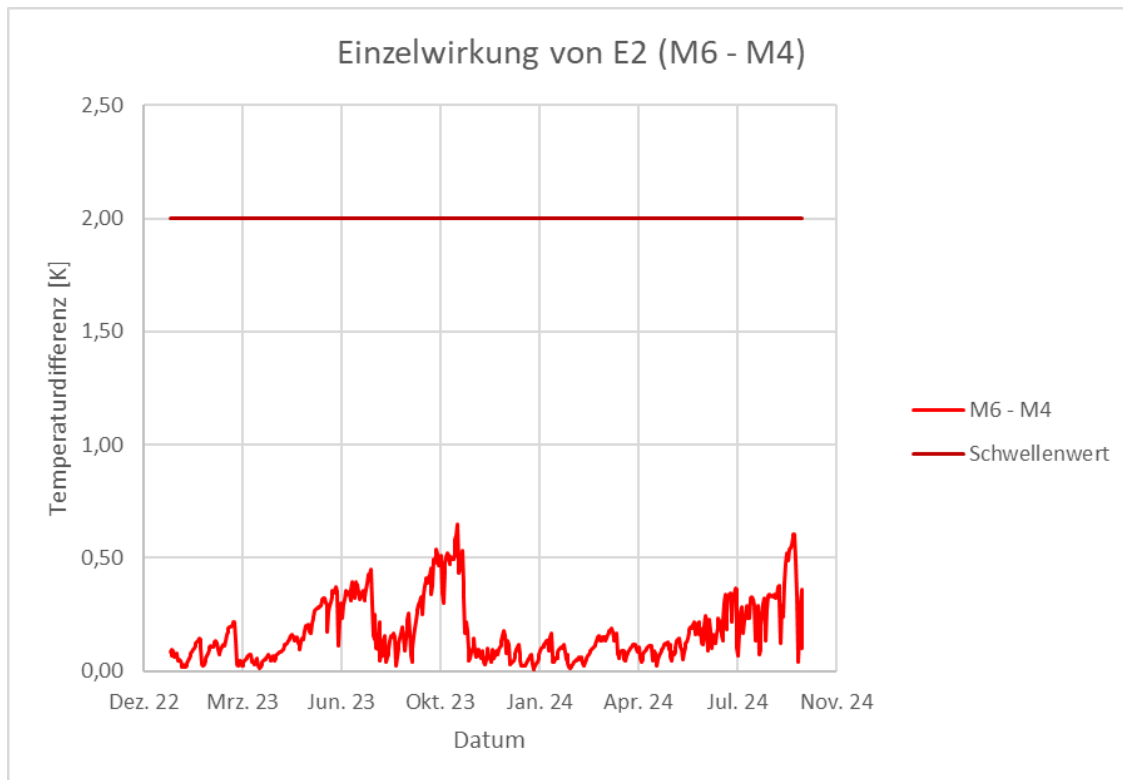


Abbildung 76: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E2 im Gleichverteilungs-Max-T-Szenario

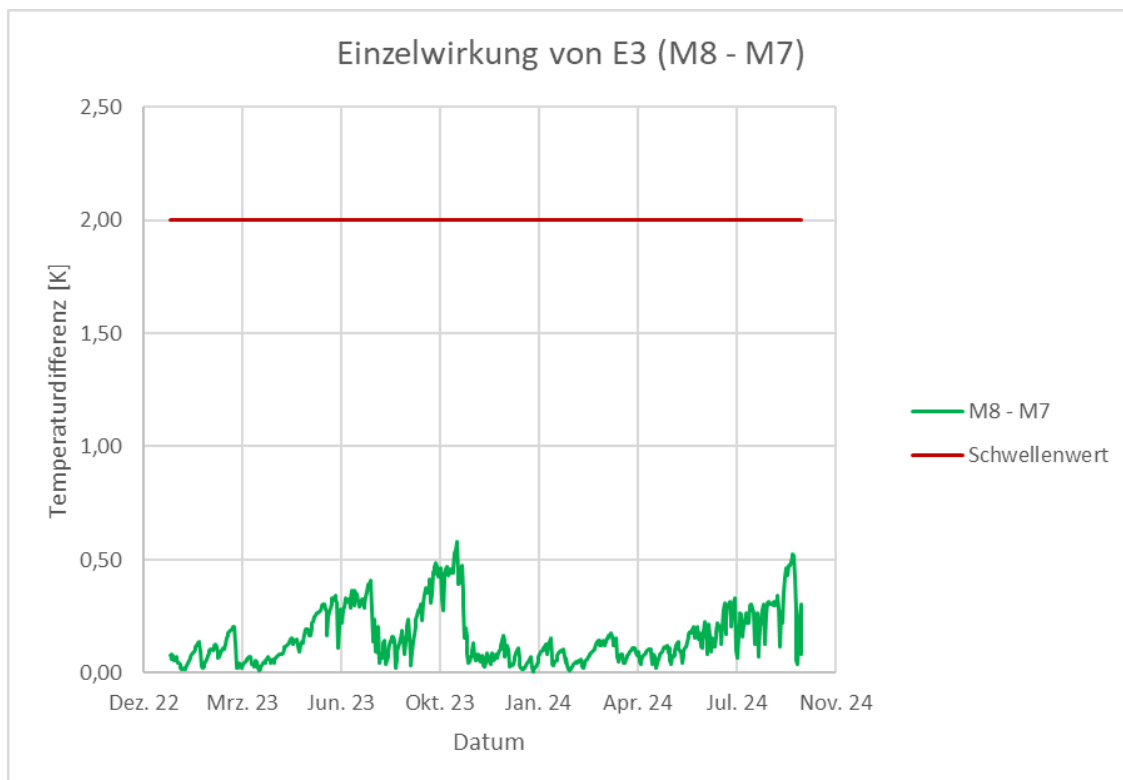


Abbildung 77: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Einzelwirkung der Einleitung E3 im Gleichverteilungs-Max-T-Szenario

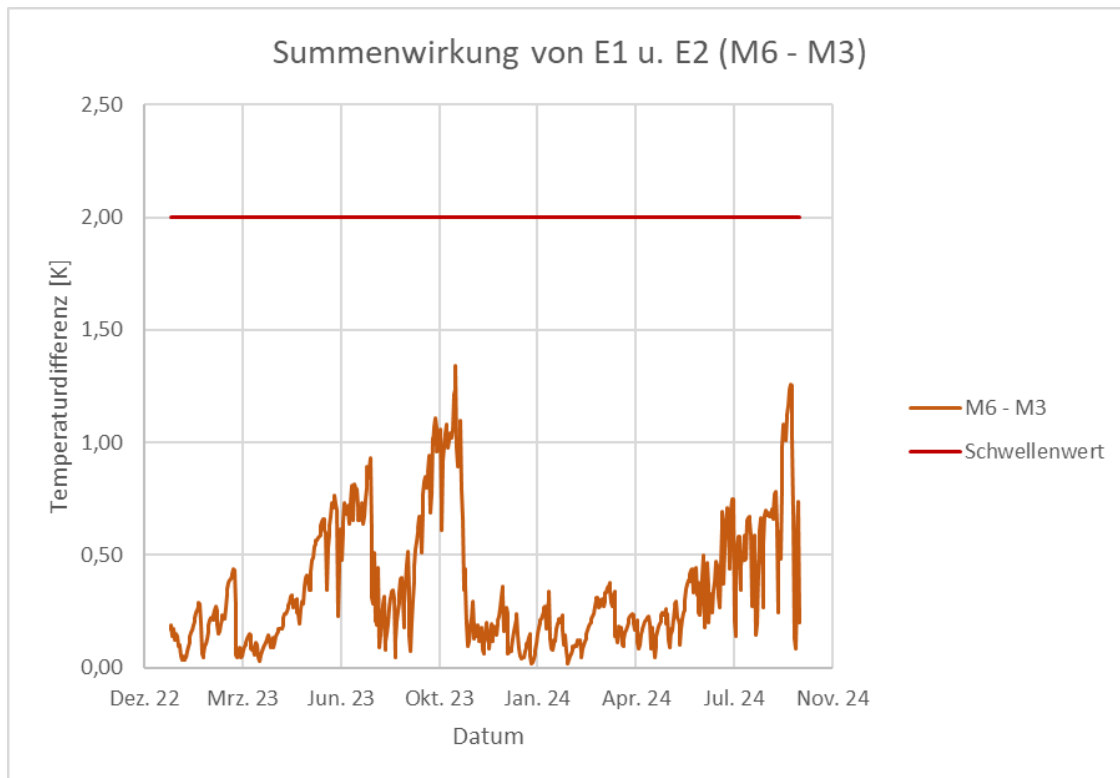


Abbildung 78: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1 und E2 im Gleichverteilungs-Max-T-Szenario

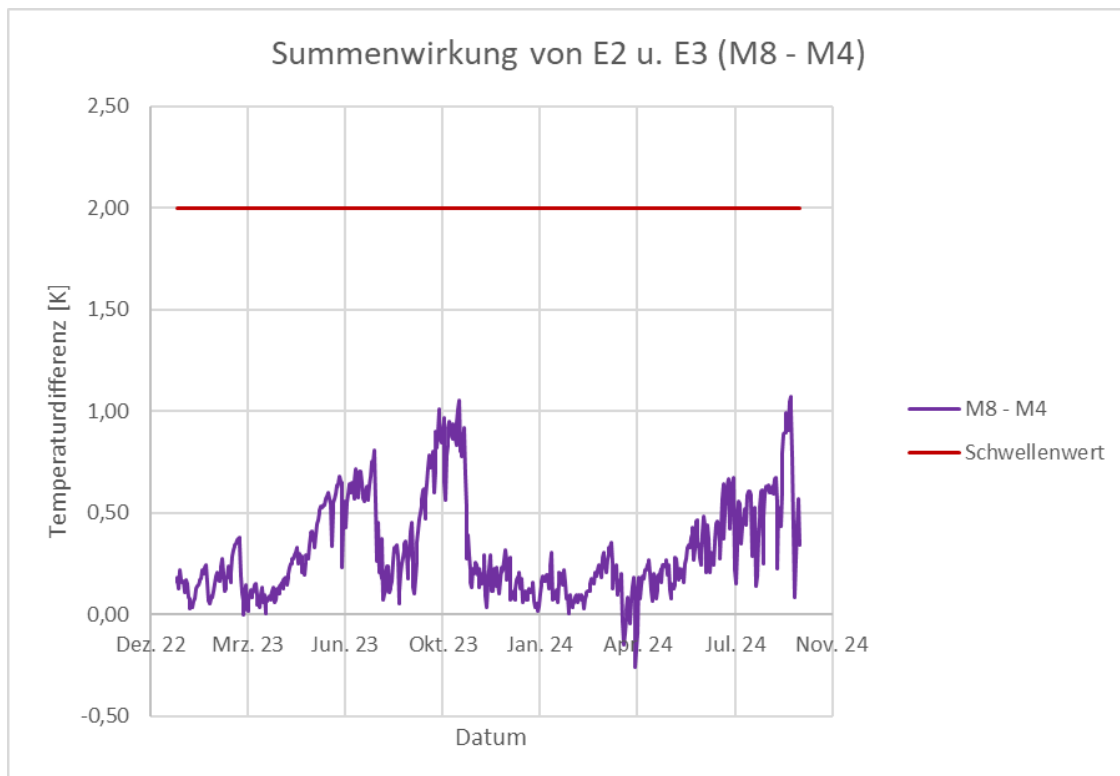


Abbildung 79: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E2 und E3 im Gleichverteilungs-Max-T-Szenario

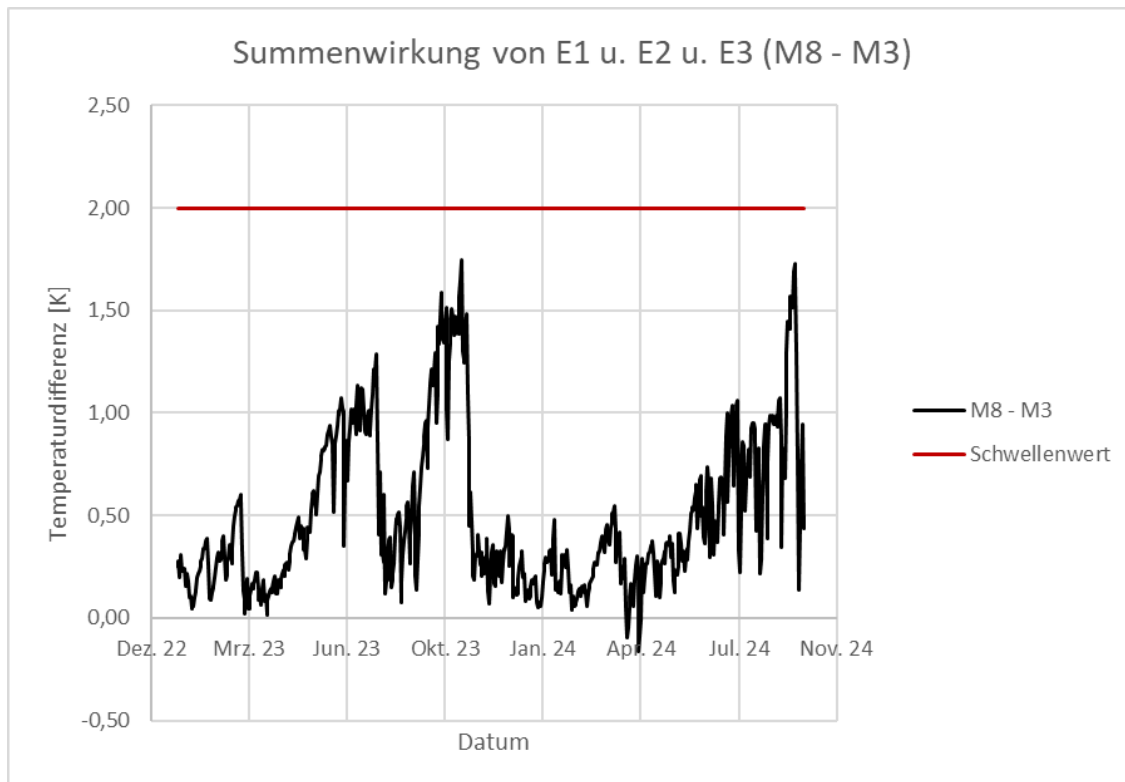


Abbildung 80: Tagesmittel- ΔT -Werte der Wassertemperaturen als Kumulativwirkung der Einleitungen E1, E2 und E3 im Gleichverteilungs-Max-T-Szenario

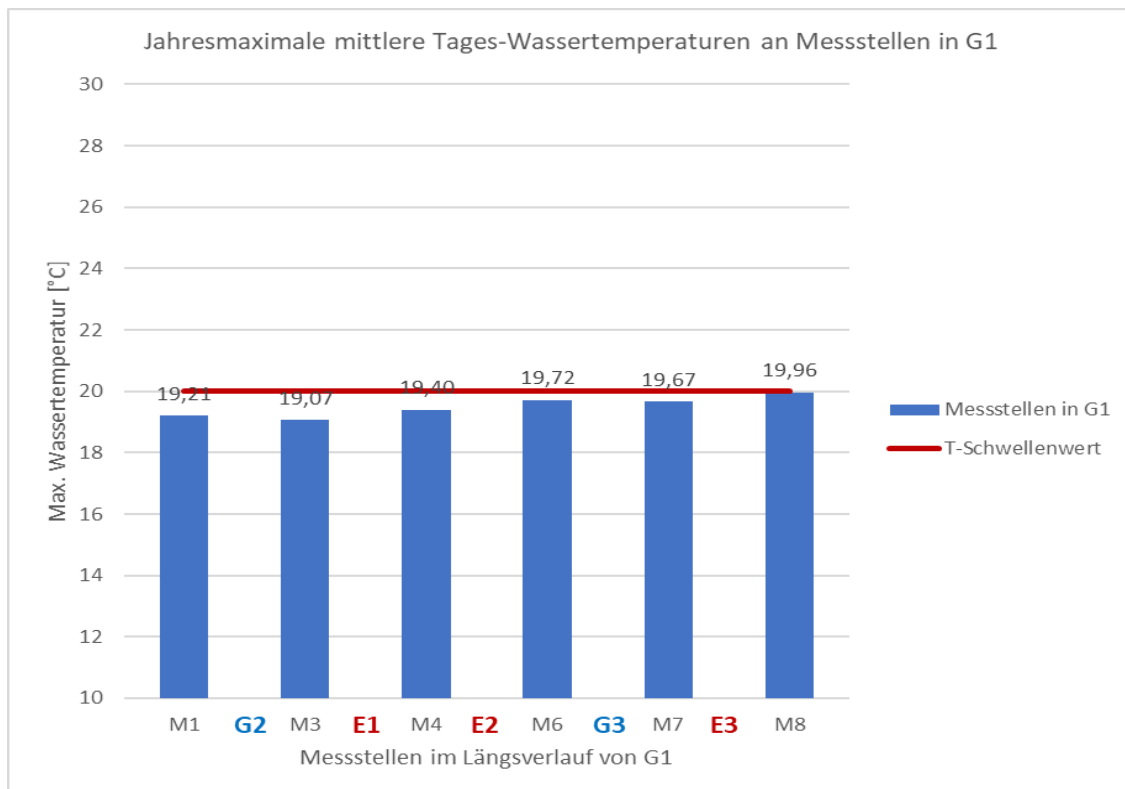


Abbildung 81: Jahresmaximale mittlere Tages-Wassertemperaturen an den Messstellen von G1 im Gleichverteilungs-Max-T-Szenario