



Entwicklung der Rheinwassertemperaturen von 1978 bis 2023

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins

Fachbericht Nr. 301

Haftungsausschluss zur Barrierefreiheit

Die IKSR ist bemüht, ihre Dokumente so barrierearm wie möglich zu gestalten. Aus Gründen der Effizienz ist es nicht immer möglich, sämtliche Dokumente in den verschiedenen Sprachversionen vollständig barrierefrei verfügbar zu machen (z. B. mit Alternativtexten für sämtliche Grafiken oder in leichter Sprache). Dieser Bericht enthält ggf. Abbildungen und Tabellen. Für weitere Erklärungen wenden Sie sich bitte an das IKSR-Sekretariat unter der Telefonnummer 0049261-94252-0 oder per E-Mail an sekretariat@iksr.de.

Impressum

Herausgeberin:

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR)
Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, D-56068 Koblenz
Postfach: 20 02 53, D-56002 Koblenz
Telefon: +49-(0)261-94252-0
Fax: +49-(0)261-94252-52
E-Mail: sekretariat@iksr.de
www.iksr.org

Entwicklung der Rheinwassertemperaturen von 1978 bis 2023

Federführung: Marieke Frassl (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Deutschland)
Alex Zavarsky (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Deutschland)

Mitwirkung: Tanja Bergfeld-Wiedemann (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Deutschland)
Pascal Boderie (Deltares, Niederlande)
Colet Eggermont (Rijkswaterstaat, Niederlande)
Thilo Herold (Bundesamt für Umwelt, Schweiz)
Sibylle Jacob (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Deutschland)
Carmen de Jong (Université Straßbourg, Frankreich)
Ulrich Kaul, Thomas Vergers (Bayerisches Landesamt für Umwelt, Deutschland)
Matthias Kremer (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Deutschland)
Mandy Praechter (Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat, Deutschland – Vorsitz EG STEMP)
Marc Steichen (Administration de la gestion de l'eau, Luxemburg)
Manoj Sanyasee Thapa (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Deutschland)
Carl Love Råman Vinnå (Universität Basel, Schweiz)
Beate Zedler (Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat, Deutschland)

Übersetzung: Dominique Falloux, Fabienne van Harten, Marianne Jacobs, Gwénaëlle Janiaud (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, IKSR)

Koordination und Redaktion:

Nikola Livrozet (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, IKSR)

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
2. Fachlicher Hintergrund	5
2.1 Physikalischer Hintergrund – Wärmehaushalt	5
2.2 Bisherige Studien zur Wassertemperatur des Rheins	6
3. Kontinuierliche Messung der Wassertemperatur	8
3.1 Messtechnik	8
3.2 Umgang mit Datenlücken und Homogenisierung der Zeitreihen	9
3.3 Zeitlicher Umfang der Datenbasis	9
4. Analyse der Wassertemperaturzeitreihen	12
4.1 Temperaturentwicklung im Längsverlauf des Rheins	12
4.2 Häufigkeitsanalyse (Extremwerte)	16
4.3 Trendanalyse	20
4.4 Einfluss von großen Nebenflüssen auf die Wassertemperatur des Rheins	28
4.5 Einfluss von großen Wärmeeinleitern auf die Wassertemperatur des Rheins	30
5. Einfluss von Niedrigwasser auf die Wassertemperatur	31
6. Schlussfolgerungen	34
7. Ausblick	34
Danksagung	35
Literaturverzeichnis	36
Anhang: Übersicht der Über- und Unterschreitungstage	38

1. Einleitung

Die Wassertemperatur ist eine zentrale Größe für chemische und biologische Prozesse, da sie sich auf chemische Umsatzraten sowie Reproduktion, Wachstum, Entwicklung und Verbreitung von Organismen auswirkt (IKSR 2013). Mögliche Auswirkungen von Änderungen der Wassertemperatur auf die aquatische Lebensgemeinschaft werden im [IKSR-Fachbericht Nr. 204](#) beschrieben.

Anlass für den vorliegenden Bericht ist der Auftrag der Rheinministerkonferenz 2020, die Klimawandelanpassungsstrategie der IKSR bis 2025 zu aktualisieren. Der Fokus liegt hierbei auf dem Abflussregime (Hoch- und Niedrigwasser) sowie der Wassertemperatur. Als Folge hat die Expertengruppe „Wassertemperaturen“ (EG STEMP) die Aufgabe erhalten, den [IKSR-Fachbericht Nr. 209](#) zur langjährigen Entwicklung der Wassertemperaturen des Rheins bis Ende 2024 zu aktualisieren.

Seit den 1970er Jahren wird die Wassertemperatur entlang des gesamten Rheins gemessen (an einzelnen Messstationen sogar regelmäßig seit Beginn des 20. Jahrhunderts) und protokolliert. Die Messfrequenz war zunächst meist täglich. Seit dem vermehrten Aufkommen von Messgeräten, die im Wasser belassen werden und automatisiert die Daten aufzeichnen, wird die Wassertemperatur vielerorts zeitlich auch höher aufgelöst erfasst. Neben den klimatischen Einflüssen sind Wärmeeinleitungen, zum Beispiel von Kläranlagen, Industrie und Kraftwerken, die Haupteinflussgrößen für den Wassertemperaturhaushalt des Rheins.

Seit dem letzten Bericht zur Langzeitentwicklung der Rheinwassertemperaturen (1978–2011) ([IKSR-Fachbericht Nr. 209](#)) aus dem Jahr 2013 haben sich die Haupteinflussgrößen weiter geändert. So wurden die Wärmeeinleitungen insgesamt verringert, da in Deutschland seit 2011 bis heute die letzten Kernkraftwerke vom Netz genommen wurden.¹ Zusätzlich ist der Klimawandel, unter anderem mit einem nachweisbaren Anstieg der durchschnittlichen Lufttemperatur, weiter fortgeschritten. In einigen besonders warmen Jahren der jüngeren Vergangenheit wurden erneut Höchststände der Wassertemperatur gemessen. Diese Änderungen und eine fundierte Analyse der entstandenen Trends bis 2023 werden im vorliegenden Bericht dokumentiert.

Die Entwicklung der zukünftigen Rheinwassertemperaturen wird im Bericht „Simulation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development“ beschrieben (Publikation als [IKSR-Fachbericht Nr. 302](#) im Frühjahr/Sommer 2025 geplant), der eine Aktualisierung des [IKSR-Fachberichts Nr. 214](#) darstellt. Die Änderungen des Abflussregimes des Rheins werden im [IKSR-Fachbericht Nr. 297](#) erläutert. Mit diesen drei Fachberichten wird ein umfangreiches Bild über den Wärmehaushalt und Wasserhaushalt des Rheins mit Projektionen für die Zukunft erstellt.

¹ Die EG STEMP hat für den internen Gebrauch ein Inventar mit den Wärmeeinleitungen 2010–2020 (genehmigte und tatsächliche Werte, > 200 MW) erstellt.

2. Fachlicher Hintergrund

Im Folgenden wird als kurzer physikalischer Hintergrund der Wärmehaushalt von Oberflächengewässern erläutert sowie auf bisherige Studien zur Rheinwassertemperatur eingegangen.

2.1 Physikalischer Hintergrund – Wärmehaushalt

Der Wärmehaushalt von Oberflächengewässern ist ausführlich in der Literatur beschrieben (z. B. CAISSIE 2006; LAWA 2012; WEBB & ZHANG 1997; WETZEL 2001) und wird im Folgenden nur kurz zusammengefasst. Die Wärmebilanz eines Fließgewässers wird von verschiedenen Strahlungskomponenten, Wärmeströmen und Wärmeeinträgen beeinflusst (Abbildung 1).

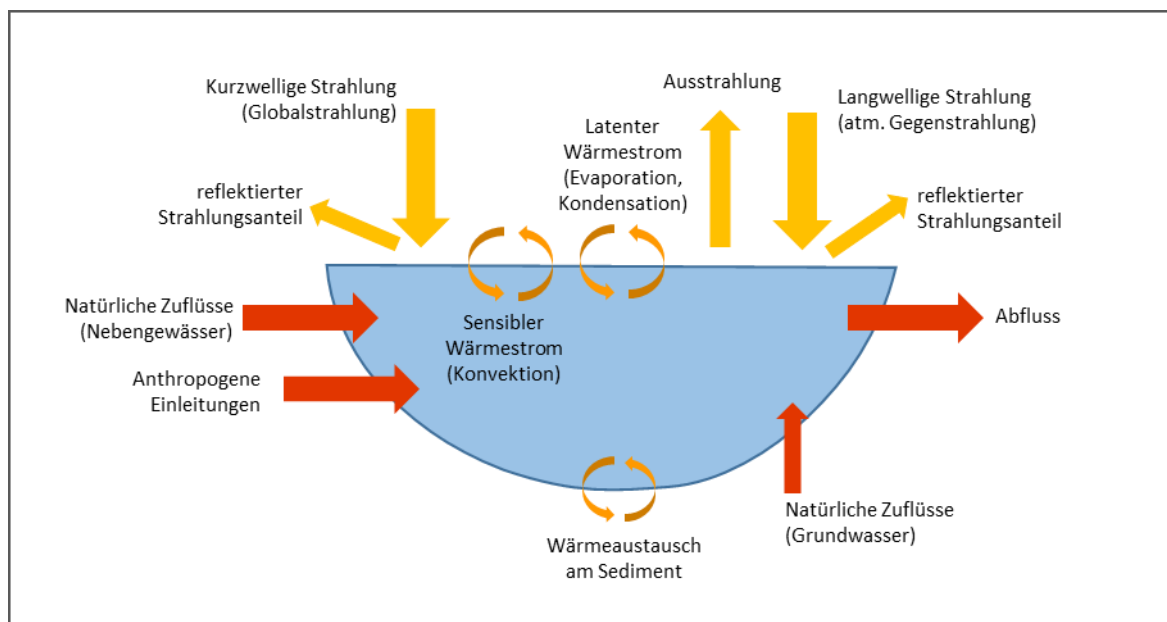


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Wärmebilanz von Oberflächengewässern, die von verschiedenen Strahlungskomponenten (gelb), Wärmeströmen (orange) und Wärmeeinträgen (rot) beeinflusst wird.

Eine wesentliche Wärmezufuhr erfolgt durch die kurzwellige (Globalstrahlung) und langwellige Strahlung (atmosphärische Gegenstrahlung). Beide Komponenten werden durch den Sonnenstand und die Bewölkung beeinflusst. Die langwellige Strahlung hängt zudem von der Gaszusammensetzung der Atmosphäre ab, zum Beispiel vom Wasserdampfgehalt. Von der einfallenden Strahlung wird ein Teil reflektiert, der restliche Teil erwärmt das Gewässer. Abhängig von der Wassertemperatur strahlt das Gewässer an der Wasseroberfläche Wärme ab. Eine weitere Erwärmung, aber auch Abkühlung, kann über den latenten und sensiblen Wärmestrom sowie den Wärmeaustausch mit dem Sediment stattfinden. Ob es zu einem Wärmeeintrag oder -austrag kommt, hängt von der Differenz zwischen Wassertemperatur und Lufttemperatur (sensibler Wärmestrom), zwischen Wassertemperatur und Sedimenttemperatur (Wärmeaustausch am Sediment), von der Windgeschwindigkeit (sensibler und latenter Wärmestrom) sowie vom Dampfdruck (latenter Wärmestrom) ab. Eine Veränderung der Wassertemperatur kann zudem durch direkte Einträge aus Nebengewässern, Grundwasser und anthropogenen Einleitungen erfolgen. Je nach Temperatur und Volumen dieser Einleitungen erfolgt eine Erwärmung oder Abkühlung des Fließgewässers.

2.2 Bisherige Studien zur Wassertemperatur des Rheins

Der [IKSR-Fachbericht Nr. 209](#) stellt die bis 2013 veröffentlichten Studien zu Untersuchungen der Rheinwassertemperatur zusammen (Tabelle 1). Die Auswertung fasst der Bericht wie folgt zusammen:

- Die Messdaten der Wassertemperaturen korrelieren mit den Messdaten der Lufttemperatur.
- Einzelne besonders warme Ereignisse treten in der Langzeitentwicklung hervor, wie zum Beispiel die Sommer 2003 und 2006.
- Über den untersuchten Zeitraum ist ein Erwärmungstrend zu erkennen, der jedoch nicht-linear verläuft.
- Die Erwärmung durch Wärmeeinleitungen ist regional begrenzt zu erkennen.
- Die großen Nebenflüsse Neckar, Main und Mosel haben in den Herbst- und Wintermonaten eine eher kühlende Wirkung.
- Bei den Überschreitungen der betrachteten Schwellenwerte 22 °C und 25 °C ist eine deutliche Zunahme im letzten Jahrzehnt zu beobachten.
- Durch die Abschaltung mehrerer Kernkraftwerke wird von einem Rückgang der Temperaturerhöhung ausgegangen.

Tabelle 1: Zusammenfassung berichteter Jahresmittelwerte und Erwärmungstrends ([IKSR-Fachbericht Nr. 209](#)).

Station	Fluss-km	Bezugszeitraum	Mittelwert	Trend	Art der Auswertung	Quelle
Kehl	292,2	1850–1859	10,9 °Re (13,6 °C)		10-Jahresmittelwert	IKSR 2013
Freiburg	ca. 220,0	1889–1892	10,8 °Re (13,5 °C)		4-Jahresmittelwert	FORSTNER 1894 (IKSR 2013)
Speyer	400,6	1889–1892	10,2 °Re (12,8 °C)			FORSTNER 1894 (IKSR 2013)
Maxau	362,3	1951–1960	11,8 °C		Mittelwert tägl. Einzelmessungen	WUNDT 1940 & 1967 (IKSR 2013)
Kaub	546,3	1946–1960	11,1 °C			WUNDT 1940 & 1967 (IKSR 2013)
Rees	837,4	1951–1960	11,2 °C			WUNDT 1940 & 1967 (IKSR 2013)
Basel	164,3	1954–2003		> 2 °C		BUWAL 2004 (IKSR 2013)
Bimmen	865,0	1977–2012		> 1 °C		MUNLV 2009 (IKSR 2013)
Lobith	862,2	1908–2000		> 3°C		LIEFVELD & POSTMA 2007 (IKSR 2013)
Rekingen	90,7	1978–2011		1,7 °C	Mann-Kendall-Trendtest, Jahresmittelwert	IKSR 2013
Mainz	498,5	1978–2011		1,3 °C		IKSR 2013
Koblenz	590,3	1978–2011		1,2 °C		IKSR 2013

Im Folgenden wird der Blick auf Studien geworfen, die nach 2013 veröffentlicht wurden. Mehrere Untersuchungen fokussieren sich auf einzelne, klimatisch besondere Jahre (BFG 2021; SCHWANDT et al. 2019) oder auf die Simulation der Erwärmungstrends durch den Klimawandel (HARDENBICKER et al. 2017; MANNFELD & FISCHER 2020; VINNÄ et al. 2023).

Im Bericht der BfG zur Niedrigwassersequenz der Jahre 2015–2018 (BFG 2021) wurden die beiden Stationen Koblenz und Lobith betrachtet. Es wurden die Messdaten der Niedrigwassersequenz 2015–2018 mit dem 10-jährigen Mittelwert der Jahre 2005–2014 verglichen. Betont wurden Effekte, die während Niedrigwasser eintreten, wie zum Beispiel die stärkere Erwärmung des Wassers, da die einfallende Strahlung ein relativ geringeres Wasservolumen erwärmt. Hervorgetreten ist bei dieser Analyse das besonders heiße Jahr 2018, in dem die Temperatur über mehrere Monate fast ununterbrochen über dem langjährigen Mittelwert lag. In anderen Jahren lag die Wassertemperatur jeweils im Herbst (2016) und im frühen Frühjahr/Frühsummer (2017) über dem langjährigen Mittelwert. Ein Vergleich der Wassertemperaturen in Abhängigkeit des sommerlichen Niedrigwasservorkommens zeigte im Rhein eine leichte Tendenz zu höheren Temperaturen bei Niedrigwasser, wobei der Mittelwert der Wassertemperaturen an der Station Koblenz während Niedrigwasser leicht niedriger war als in der Referenz. Zwischen den Monatsmittelwerten der Wassertemperatur und dem Abfluss bestand kein genereller Zusammenhang. Die Autoren schließen daraus, dass Niedrigwasser eine Erhöhung der Wassertemperatur nicht verursacht, diese aber begünstigt.

Einzelne extrem warme Jahre wurden ebenfalls im Zuge der Niedrigwassersequenz 2018–2020 für die Station Koblenz untersucht (SCHWANDT et al. 2019). Laut dieser Studie überschritt der Tagesmittelwert der Wassertemperatur in 2018 an 31 Tagen 25 °C. Dieser Wert wurden nur im sehr heißen Sommer 2003 überschritten, mit 38 Tagen über 25 °C (SCHWANDT et al. 2019).

Mehrere Studien haben die zukünftigen Entwicklungen der Wassertemperatur des Rheins aufgrund des Klimawandels untersucht. Für den Abschnitt Karlsruhe bis Bimmen wurde eine Projektion der mittleren Erwärmung von -0,2 °C bis +1,8 °C für die nahe Zukunft (2021–2050) und von +0,4 °C bis +3,4 °C für die ferne Zukunft (2071–2100) berechnet (HARDENBICKER et al. 2016). Diese Studie verwendete gemessene Wassertemperaturen von 2000 und 2008 für die Validierung des Modells. Der gleiche Flussabschnitt wurde in einem späteren Forschungsprojekt mit neueren Klimaeingangsdaten betrachtet (MANNFELD & FISCHER 2020). Dabei wurden die Erwärmungstrends von +1,1 °C bis 2,2 °C für die nahe Zukunft (2031–2060) und von +2,7 °C bis 3,8 °C für die ferne Zukunft (2070–2099) berechnet.

Für die Schweiz wurde die Vorhersage der Veränderung der Wassertemperatur mit einem semi-empirischen Modellansatz berechnet (VINNÄ et al. 2023). Kalibriert wurde das Modell anhand von gemessenen Wassertemperaturen von 1990–2020. Für den Rhein wurden sieben Stationen ausgewertet und die jeweiligen vorhergesagten Veränderungen zwischen Referenz (1990–2019) und naher Zukunft (2030–2059) bzw. Referenz und ferner Zukunft (2070–2099) für verschiedene Indizes betrachtet. Für zwei Rhein-Stationen ist der aus Messungen projizierte Erwärmungstrend über den Zeitraum 1990–2019 angegeben (Tabelle 2).

Tabelle 2: Aus Messungen berechnete Erwärmungstrends für zwei Schweizer Rhein-Stationen über den Zeitraum 1990–2019 (VINNÄ et al. 2023).

Trend (°C/Dekade)	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
Rheinau (Oberwasser)	0,18 °C	0,58 °C	0,54 °C	0,23 °C
Diepoldsau, Rietbrücke	0,20 °C	0,38 °C	0,31 °C	0,11 °C

Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) hat sich sehr ausführlich mit der Kühlwassereinleitung in Oberflächengewässer beschäftigt und in einer

Handlungsempfehlung sowohl die wesentlichen Treiber von Änderungen der Wassertemperatur als auch die gewässerökologischen Auswirkungen einer Temperaturveränderung beschrieben (LAWA 2013).

Den Effekt von Wärmeeinleitungen aus Kraftwerken und anderen industriellen Einleitern auf die Wassertemperatur des Rheins wurde durch ZAVARSKY & DÜSTER (2020) untersucht. Über ein Regressionsmodell wurden die natürlichen Treiber von den anthropogenen Treibern der Wassertemperaturänderungen getrennt. Die Studie nutzte Daten der Stationen Basel, Worms, Koblenz und Köln. Neben der Erwärmung der Lufttemperatur fand die Studie auch Effekte der abnehmenden Wärmeeinleitungen durch Kernkraftwerke und korrelierte kurzzeitige Änderungen der Wassertemperatur mit Kennwerten der industriellen Produktion.

In Zusammenhang mit dem vorliegenden Bericht stehen die IKSR-Fachberichte [Nr. 297](#) und Nr. 302 (Publikation im Frühjahr/Sommer 2025 geplant) zur Untersuchung der zukünftigen Änderungen der Wassermenge und der Wassertemperatur. Letzterer beschäftigt sich neben der Projektion zukünftiger Wassertemperaturen auch mit dem Effekt von Wärmeeinleitungen in den Rhein. Die Berechnungen zeigen eine durchschnittliche Erwärmung zwischen 0,5 °C und 1 °C. Der Effekt einer veränderten Wassertemperatur auf die Biologie ist im [IKSR-Fachbericht Nr. 204](#) zusammengefasst und wird bis Mitte 2025 ebenfalls aktualisiert.

3. Kontinuierliche Messung der Wassertemperatur

Nachfolgend wird auf die Messtechnik der Temperaturmessung, den Umgang mit Datenlücken und die Homogenisierung von Zeitreihen sowie den zeitlichen Umfang der zur Verfügung stehenden Datenbasis eingegangen.

3.1 Messtechnik

Die Wassertemperatur wird in der Regel über eine elektrische Widerstandsmessung gemessen. Zum Einsatz kommen Widerstandsthermometer wie Pt100 oder Pt1000. Dies sind Platinwiderstände, welche ihren elektrischen Widerstand in Abhängigkeit ihrer Temperatur ändern. Dazu gibt es genormte Funktionen, welche den gemessenen Widerstand in eine Temperatur umwandeln. Dies erfolgt jedoch automatisch in den gebräuchlichen Messsystemen. Typischerweise wird hier eine absolute Genauigkeit von 0,1 °C erreicht. Die relative Genauigkeit, das heißt bei Änderung der Temperatur, ist meist besser. Für die Auswertungen dieser Studie ist diese Genauigkeit ausreichend. Die genaue Ausstattung der Stationen mit Messtechnik ist nicht bekannt, jedoch ist die oben beschriebene Technik seit Jahrzehnten Standard und in den meisten Messsystemen verbaut.

Bei Messungen mit Flusswasser unterscheidet man Ex-Situ- von In-Situ-Messungen. In-Situ-Messungen sind Messungen direkt im Fluss. Ex-Situ-Messungen sind Messungen von Flusswasser, welches vorher aus einem Fluss entnommen wurde. Dies geschieht meist durch ein Pumpensystem. Für jede einzelne Messstation muss dieser mögliche Einfluss untersucht werden und ist standortabhängig. Es wird davon ausgegangen, dass die Messstationen mit Sorgfalt betrieben werden und keine nennenswerten Abweichungen durch den Messvorgang entstehen. Viel wichtiger sind die Positionierung und Lage der Mess- bzw. Entnahmepunkte. Die Temperaturverteilung im Fluss kann sowohl in der Tiefe (vertikal) als auch in der Breite (horizontal) sehr inhomogen sein. Änderungen der Lage können signifikante Temperaturänderungen nach sich ziehen. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Mess- bzw. Entnahmepunkt, wenn gesetzt und nicht verändert, eine gute Beschreibung des Temperaturumfelds und der Temperaturänderungen liefert.

Der Messpunkt ist ein Proxy² für den Wärmehaushalt des Flusses (Rhein) an dieser Stelle. Deswegen ist es wichtig, dass Messpunkte unverändert bleiben. Ist die Messreihe in sich stringent, können daraus Analysen zur Änderung des Wärmehaushaltes durchgeführt werden. Dies gilt nicht, wenn es punktuelle Wärmeeinleitungen im Umfeld des Messpunktes gibt. In diesem Fall ist eine einzelne Bewertung vorzunehmen.

Um den Problemen der oben genannten Überlegungen aus dem Weg zu gehen, werden in diesem Bericht, wo möglich, Temperaturänderungen anstatt der absoluten Temperaturen beschrieben. Bei einem Vergleich von Messstationen untereinander ist es aussagekräftiger, die Änderungen der Differenz zu untersuchen, da sich die absoluten Temperaturniveaus der Stationen untereinander stark unterscheiden können.

3.2 Umgang mit Datenlücken und Homogenisierung der Zeitreihen

Die Aggregation der originalen Daten ist in Tabelle 3 angegeben. Sie beträgt meistens einen Tag, wobei meistens kontinuierlich mit einer höheren Messfrequenz gemessen wird. Für die jeweiligen Analysen wurden die Daten bis zu Jahreswerten gemittelt. Fehlende Daten bis zu zwei Wochen wurden interpoliert. Eine Ausnahme bildet die Datenreihe Bimmen/Lobith, in der bis zu 30 Tage interpoliert wurden. Die Begründung ist, dass die Lücke in der Übergangszeit im Frühjahr aufgetreten ist und eine kontinuierliche Änderung der Wassertemperatur erwartet werden kann. Die Datenreihe Lobith (1911–2011) wurde mit der Datenreihe Bimmen (2005–2023) bis 2023 verlängert. Beide Messstationen sind nur 2,7 km voneinander entfernt (Tabelle 3) und im Überlappungszeitraum 2005–2011 konnte eine hinreichende Übereinstimmung der Messwerte belegt werden, welches dieses Vorgehen rechtfertigt.

3.3 Zeitlicher Umfang der Datenbasis

Aufgrund der verbesserten Datenverfügbarkeit seit dem letzten Bericht konnte die Datenbasis noch einmal deutlich erweitert werden (Tabelle 3). Somit können Langzeittrends verlässlicher berechnet und Langzeitentwicklungen besser abgeschätzt werden. Die Station Bimmen/Lobith hat die längste Zeitreihe (Messungen seit 1911). Ein großer Teil der Messungen an den Stationen startet um 1970. Mittlerweile sind für viele Stationen tägliche und zeitlich höher aufgelöste Daten vorhanden (Tabelle 3). Die Messstelle Düsseldorf-Flehe wurde nach 2011 ausgesetzt, sodass sie im vorliegenden Bericht nicht betrachtet wird. Weiterhin wurde die Messfrequenz an der Station Lobith verringert, welches mittels einer Verschmelzung der Datenreihen der Stationen Lobith und Bimmen abgefangen werden konnte (Kapitel 2.2).

Stationen im Alpenrhein (Rhein oberhalb des Bodensees, Abbildung 2) und im Bodensee wurden nicht berücksichtigt. Der Bodensee hat in Bezug auf den Wärmehaushalt und die Wassertemperatur eine andere Verhaltensweise als Flüsse. Mit einer mittleren Tiefe von 90 m hat der See durch das sehr große Volumen eine größere Trägheit bei Temperaturänderungen sowie durch die Durchmischung und Schichtung (Dichteanomalie des Wassers) eine sehr unterschiedliche Dynamik zu Fließgewässern. Der Alpenrhein ist vom Hochrhein durch den Bodensee getrennt. Die Verweildauer des Wassers im Bodensee ist so lang, dass die beiden Rheinabschnitte entkoppelt sind und getrennt betrachtet werden können.

² Proxy, auch „Stellvertreter“, ist eine indirekte Messgröße, welche sich im selben Maße verhält wie die eigentlich zu ermittelnde Größe.

Tabelle 3: Übersicht der Wassertemperaturzeitreihen.

Messstellen	Fluss	Fluss- km	Zeitlicher Umfang****	Daten- basis Auswert- ung	Quelle	Analysen
Neuhausen	Rhein	47	2009–2023	täglich	BAFU	1, 2
Rheinau	Rhein	56	1971–2023	täglich	BAFU	1, 2
Rekingen*	Rhein	90,7	1969–2023	täglich	BAFU	1, 2, 3
Laufenburg	Rhein	123	1970–2023	täglich	BAFU	1, 2
Rheinfelden (CH)	Rhein	149	1970–2023	täglich	BAFU	1, 2
Basel (<i>Weil am Rhein*</i>)	Rhein	174	1977–2023	täglich	BAFU, LUBW	1, 2, 3
Iffezheim	Rhein	334	1992–2023	täglich	LUBW	1, 2
Karlsruhe*	Rhein	359,2	1988–2023	täglich	LUBW	1, 2
Mannheim	Rhein		1975–2023	14-tägig	LUBW	4
Worms	Rhein	443,3	1971–2023	täglich	Lfu RLP	1, 2, 3
Mainz	Rhein	498,5	1980–2023	täglich	Lfu RLP	1, 2, 4
Koblenz, Rhein*	Rhein	590,3	1978–2023	täglich	BfG	1, 2, 3, 4
Bad Honnef	Rhein	640	2004–2023	täglich	LANUV	1, 2
Köln	Rhein		1985–2023	täglich	WSV	1, 2, 3
Düsseldorf-Flehe	Rhein	732,2	2004–2011	täglich	LANUV	
Lobith*	Rhein	862,3	1911–2011	täglich	RWS	1, 2
Lobith*	Rhein	862,3	1990–2022	14-tägig	RWS	
Bimmen	Rhein	865	2005–2023	täglich	LANUV	2
Bimmen*	Rhein	865	1978–2022	14-tägig	IKSR	1
Bimmen/Lobith**	Rhein		1911–2023	täglich		2, 3
Amerongen (1 m)***	Rhein, Nederrijn-Lek	975	1990–1992	monatlich	RWS	
Amerongen (3 m)***	Rhein, Nederrijn-Lek	975	2001–2023	täglich	RWS	1, 2
Kampen	Rhein, IJssel	992	2000–2021	monatlich	RWS	1
Brienoord brug	Rhein, Nieuwe Maas	995,2	2000–2021	monatlich	RWS	1
Beerenplaat (2 m)***	Rhein, Oude Maas	996,1	1994–2022	täglich	RWS	1, 2
Middelharnis (2 m)***	Rhein, Haringvliet	1005	2006–2021	täglich	RWS	1, 2
Hoek van Holland (2.5 m)***	Rhein, Nieuwe Waterweg	1030,1	1999–2021	täglich	RWS	1, 2
Bovensluis	Rhein, Haringvliet		1991–2021	monatlich	RWS	
Hollandsch Diep (mond Dordtsche Kil west)	Rhein, Hollands Diep		2010–2021	monatlich	RWS	

Brienoordbrug rechter oever	Rhein, Nieuwe Maas		1999–2021	täglich	RWS	
Maassluis	Rhein, Nieuwe Waterweg		1990–2021	14-tägig	RWS	
Puttershoek	Rhein, Oude Maas		1990–2021	monatlich	RWS	
Koblenz, Mosel*	Mosel	2	1978–2022	täglich	BfG	4
Mannheim, Neckar	Neckar	3	1985–2023	täglich	LUBW	4
Bischofsheim	Main	4	2004–2023	täglich	HLNUG	4

Legende:

- * Internationale Hauptmessstellen des IKSR-Rheinmessprogramms Chemie
- ** Verschmelzung der Datenreihe Lobith und Bimmen (Kapitel 2.2)
- *** Messtiefen der Stationen in Metern
- **** Der hier angegebene zeitliche Umfang umfasst die kompletten Jahre der Messzeitreihen, zum Teil beginnen die Messungen etwas früher/später.
- 1 Analyse zur Temperaturentwicklung im Längsverlauf des Rheins und „climate stripes“ (Kapitel 3.1)
- 2 Analyse zur Überschreitung von Schwellenwerten (Kapitel 3.2)
- 3 Trendanalyse (Kapitel 3.3)
- 4 Vergleich der Wassertemperatur der großen Nebenflüsse mit der des Rheins

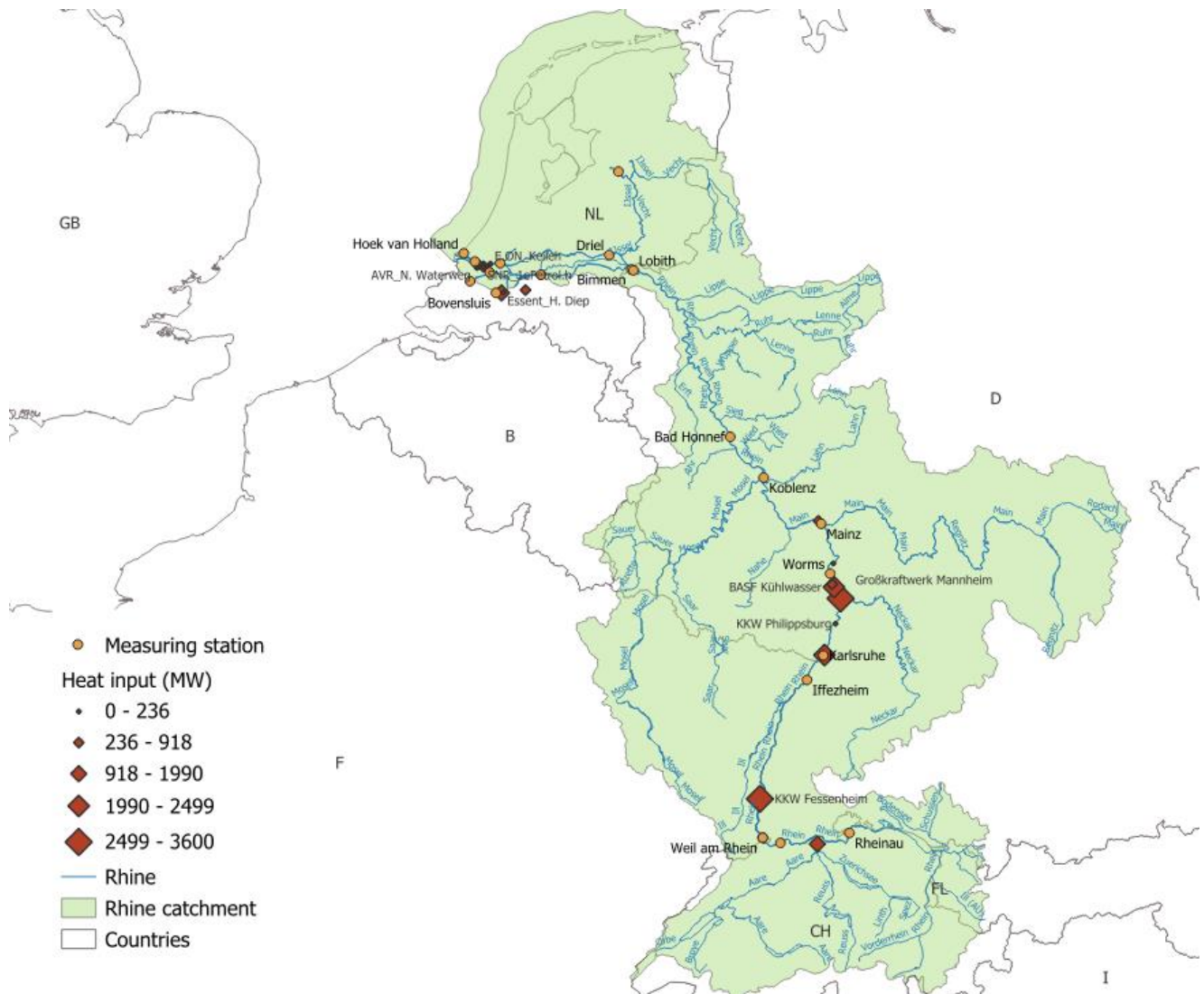


Abbildung 2: Rheineinzugsgebiet (grün) mit den Messtationen der Wassertemperatur (orange Punkte) und der genehmigten Wärmeinleitungen (2020) entlang des Rheins (rot). Quelle: Deltares (2024) im IKSR-Fachbericht Nr. 302 (Publikation im Frühjahr/Sommer 2025 geplant).

4. Analyse der Wassertemperaturzeitreihen

Die Wassertemperaturzeitreihen werden anhand einer Reihe von Faktoren analysiert.

4.1 Temperaturentwicklung im Längsverlauf des Rheins

Für die Betrachtung der Entwicklung der Wassertemperaturen im Längsverlauf des Rheins wurden die Jahresmittelwassertemperaturen rheinabschnittsweise für die Jahre 2009–2021 aggregiert (Abbildung 3). Der Hochrhein (Bodensee bis Basel) zeichnet sich durch vergleichsweise kalte Wassertemperaturen aus (Mittelwert: 12,6 °C). Der Oberrhein (Basel bis Bingen³) zeigt die höchsten Jahresmitteltemperaturen (Mittelwert: 14,3 °C). Dies lässt sich auf verschiedene Faktoren zurückführen. Der Oberrhein liegt in einer klimatisch relativ warmen Region. Dazu wird im Oberrhein durch die Stauregulierung die Fließgeschwindigkeit verringert, sodass das Wasser mehr Zeit hat, sich zu erwärmen. Im

³ nördlich von Mainz

Oberrhein zeigt sich auch die Auswirkung der Wärmeeinleitungen in den Rhein. Diese ist auch in den beiden folgenden Abschnitten Mittelrhein (Bingen bis Köln) und Niederrhein (Köln bis Lobith) zu messen (Mittelwerte: 13,9 °C und 13,8 °C), über deren Verlauf die Wassertemperatur generell aber abnimmt. Zur Mündung des Rheins hin, am Deltarhein (Lobith bis Hoek van Holland), kühlt sich der Rhein weiter ab (Mittelwert: 13,1 °C). Dort ist der Rhein zum Teil von der Seeseite her geprägt.

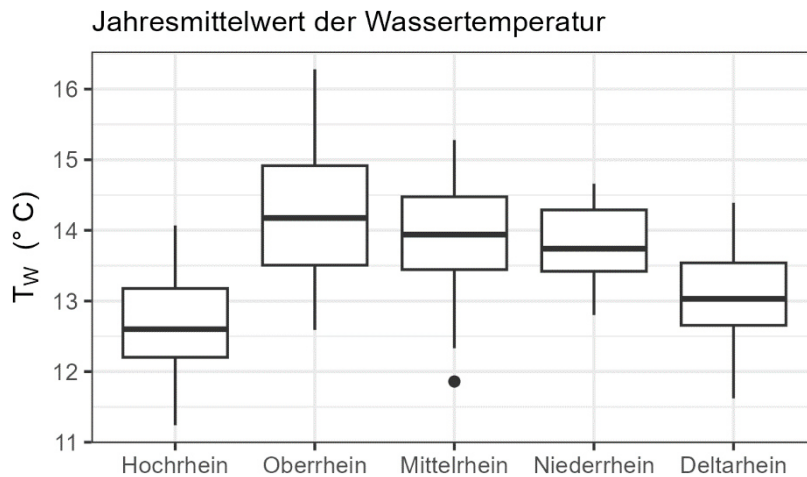


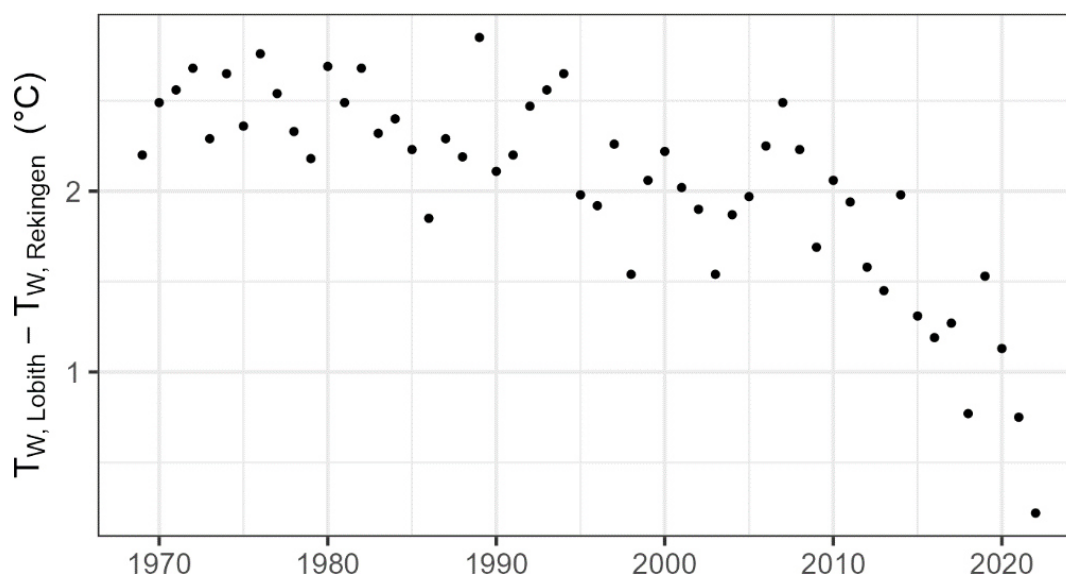
Abbildung 3: Jahresmitteltemperaturen (2009–2021) im Längsverlauf des Rheins. Hochrhein: Bodensee bis Basel, Oberrhein: Basel bis Bingen, Mittelrhein: Bingen bis Köln, Niederrhein: Köln bis Lobith, Deltarhein: Lobith bis Hoek van Holland. Die untere und obere Kante der Box sind das 25er und 75er Perzentil, die schwarze Linie in der Box ist der Median, der Punkt zeigt einen Ausreißer an (hier: Jahresmittelwert der Station Köln, 2021).

Von der ersten Station (Neuhausen) bis zur letzten Station (Hoek van Holland) im Zeitraum 2009-2021 steigt die durchschnittliche jährliche Wassertemperatur um 0,4 °C, im Maximum um 1,1 °C und im Minimum um -0,4 °C (Abkühlung) (Tabelle 4). Allerdings kann dieser Effekt der Abkühlung auch durch den seeseitigen Einfluss an der Station Hoek van Holland zustande kommen. Zwischen den Stationen Rekingen und Lobith liegt der Schwankungsbereich der Erwärmung zwischen 0,22 °C und 2,9 °C mit einer mittleren Erwärmung von 2,0 °C. Auffällig ist, dass die geringeren Temperaturdifferenzen zwischen diesen beiden Stationen vorwiegend in den letzten zehn Jahren zu beobachten sind (Abbildung 4). Dies liegt vermutlich an dem stärkeren Erwärmungstrend in Rekingen (Kapitel 3.1).

Insgesamt sind die Temperaturdifferenzen zwischen den Stationen vergleichbar zum [IKSR-Fachbericht Nr. 209](#) (Tabelle 1).

Tabelle 4: Temperaturdifferenz zwischen den Jahresmittelwerten der jeweils genannten zwei Messstationen.

Strecke	Zeitraum	Mittelwert (°C)	Minimum (°C)	Maximum (°C)
Neuhausen-Hoek van Holland	2009–2021	0,4	-0,4	1,1
Rekingen-Lobith	1969–2022	2,0	0,2	1,1
Rekingen-Karlsruhe	1988–2023	1,3	0,6	2,1
Karlsruhe-Mainz	1988–2023	1,2	0,5	2,1
Karlsruhe-Worms	1988–2023	1,6	0,7	2,3
Mainz-Koblenz	1980–2023	-0,4	-1,1	0,3
Koblenz-Bad-Honnef	2004–2023	-0,4	-1,1	0,0
Bad Honnef-Köln	2004–2023	-0,3	-1,7	0,5
Köln-Lobith	1985–2022	-0,1	-1,9	1,1
Lobith-Amerongen	2001–2022	-0,8	-2,5	0,1

**Abbildung 4:** Differenz der Jahresmittelwerte der Wassertemperatur (Lobith-Rekingen).

Für die Berechnung der relativen Veränderung wurde pro Station die Differenz zwischen der Jahresmitteltemperatur eines jeden Jahres und der Jahresmitteltemperatur des Jahres 2010 gebildet (Abbildung 5). Das Jahr 2010 wurde als Referenzjahr gewählt, da für dieses Jahr an allen Stationen Messungen für das gesamte Jahr vorhanden sind. Für die relativen Jahresmitteltemperaturen zeigen sich eine vergleichbare interannuelle Variabilität zwischen den Stationen und ein Erwärmungstrend über den Beobachtungszeitraum (Abbildung 5, Abschnitt 4.3). Stärkere Unterschiede zeigen sich für die Stationen Köln, Amerongen und Brienenoord brug, welche zum Teil eine höhere Variabilität mit stärkeren positiven Anomalien im Vergleich zu 2010 als die anderen Stationen aufweisen.

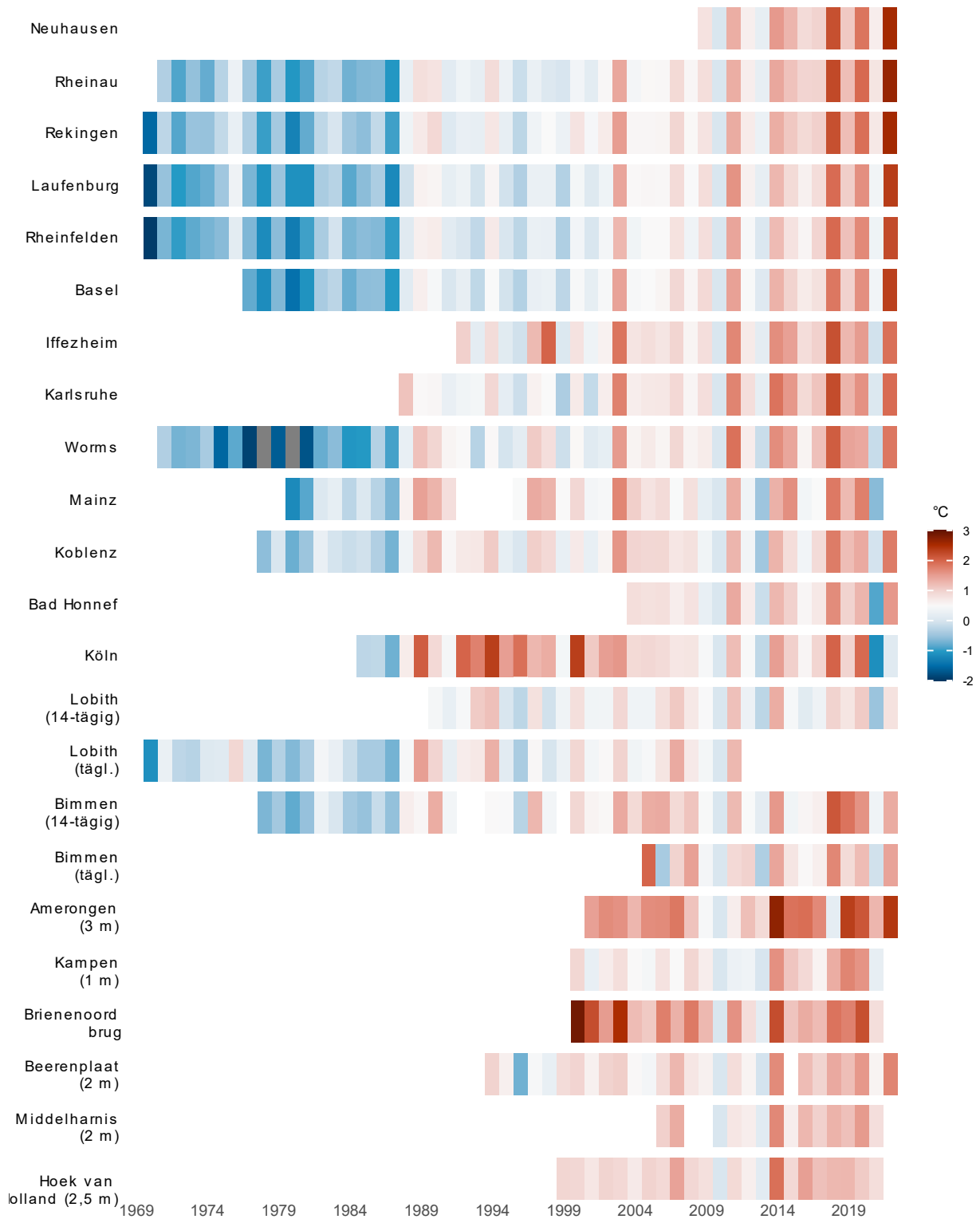


Abbildung 5: „Climate stripes“ der Wassertemperatur an den Rhein-Messstationen über die Zeit. Dargestellt ist die Differenz der Jahresmitteltemperatur zum Referenzjahr 2010. Es wurde gewählt, da für dieses Jahr an allen Stationen Messungen vorhanden sind.

4.2 Häufigkeitsanalyse (Extremwerte)

Für die Wärmeeinleitungen und für ökologische Fragestellungen ist die Anzahl an Tagen oberhalb von spezifischen Schwellenwerten eine relevante Kenngröße. Für die Bewertung der Ausbreitung von Neobiota sind Temperaturen im Winter relevant, zum Beispiel kann über die Tage $< 10\text{ °C}$ der Reproduktionserfolg abgeschätzt werden. Für eine Häufigkeitsanalyse werden die Tage pro Jahr aufsummiert, an denen die Tagesmitteltemperatur den jeweiligen Schwellenwert über- bzw. unterschreitet. Für diesen Bericht wurden, in Übereinstimmung mit der Wasserrahmenrichtlinie und den jeweiligen nationalen Verordnungen und Gesetzen, die Schwellenwerte 25 °C (Abbildung 6), 28 °C (Abbildung 8), 10 °C (Abbildung 9) sowie wegen der Relevanz für die Biologie 3 °C (Abbildung 10) und zusätzlich $21,5\text{ °C}$, 23 °C und 30 °C (Tabelle A.1) ausgewählt.

Eine Häufung von Überschreitungstagen für 25 °C , 28 °C und 10 °C zeigt sich für den nördlichen Oberrhein und den Mittelrhein (Abbildungen 6-9). Ebenso treten die besonders heißen Jahre (1994, 2003, 2006, 2018, 2020 und 2022) hervor, in denen fast über den gesamten Rhein hinweg Überschreitungen der Tagesmitteltemperatur von 25 °C beobachtet wurden (Abbildung 6).

Für die meisten Stationen lagen für den Bericht Tagesmittelwerte der Wassertemperatur vor. Für die Bewertung der Situation im Sommer wird häufig die Tagesmaximaltemperatur herangezogen. Daher wurden zum Vergleich für einige Stationen die Anzahl der Tage pro Jahr berechnet, an denen die Tagesmaximaltemperatur 25 °C überschreitet (Abbildung 7). Das generelle Muster verändert sich bei dieser Art der Auswertung nicht, allerdings nimmt die Anzahl der Überschreitungstage in warmen Jahren wie zu erwarten zu. Für eine Überschreitung der Tagesmaximaltemperatur reicht es aus, dass die Wassertemperatur während eines Messintervalls die 25 °C überschreitet, während die Wassertemperatur bei Betrachtung der Tagesmittelwerte über den Tag insgesamt deutlich wärmer sein muss.

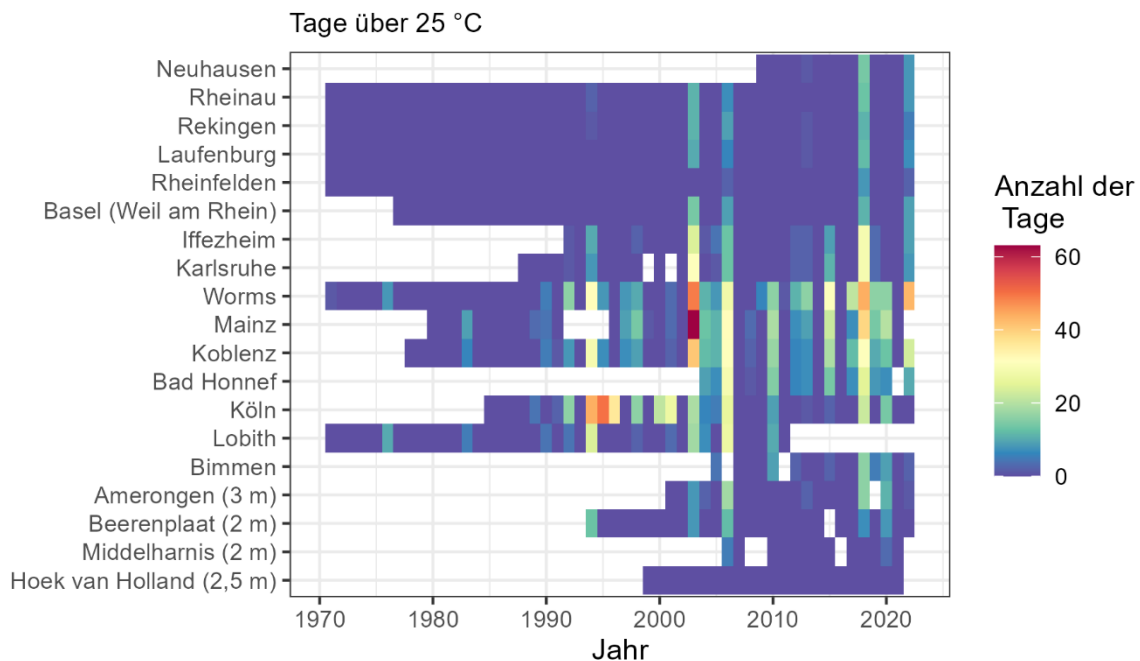


Abbildung 6: Anzahl der Tage mit Tagesmittelwerten der Temperatur $> 25\text{ °C}$.

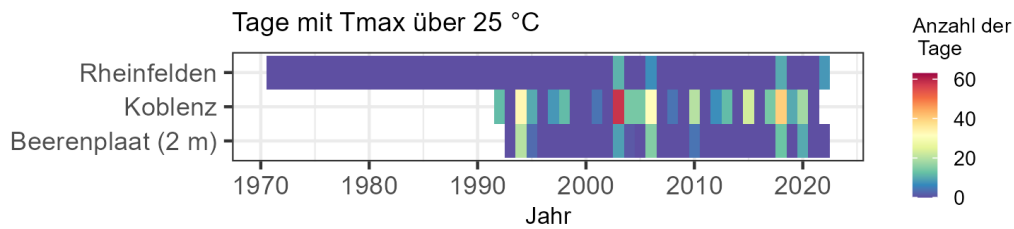


Abbildung 7: Anzahl der Tage mit Tagesmaximalwerten der Wassertemperatur > 25 °C.

Der Schwellenwert von 28 °C wurde bisher nur an wenigen Stationen (Worms bis Köln) und in wenigen Jahren (1994, 1995, 2003, 2006 und 2018) überschritten. Hier sei betont, dass es sich bei der Auswertung um Tagesmitteltemperaturen handelt. Stundenweise wurde der Schwellenwert 28 °C sehr wahrscheinlich an mehreren Stationen und in mehreren Jahren überschritten (Abbildung 8).

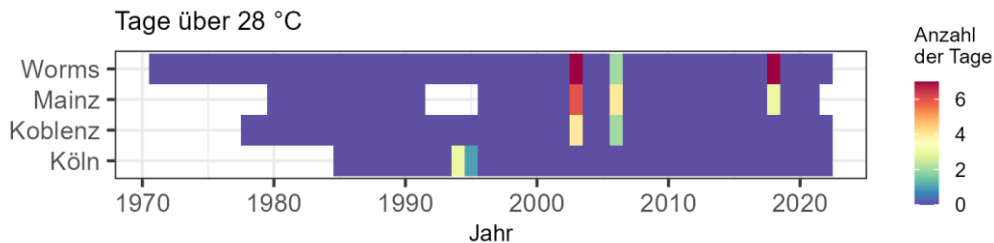


Abbildung 8: Anzahl der Tage mit Tagesmittelwerten der Temperatur > 28 °C. Dargestellt sind nur die Stationen, an denen es zu einer Überschreitung des Schwellenwertes gekommen ist. An allen anderen Stationen wurde der Schwellenwert nicht überschritten.

Das Muster bei den Schwellenwertunterschreitungen von 10 °C ist ähnlich zu den Überschreitungen von 25 °C mit einer häufigeren Unterschreitung im nördlichen Oberrhein und im Mittelrhein. Deutlich zu erkennen ist hier allerdings ein Trend zur selteneren Unterschreitung des Schwellenwertes im Hochrhein und südlichen Oberrhein in den letzten 15 Jahren. Als besonders warm tritt der Winter 2006/2007 hervor (Abbildung 9).

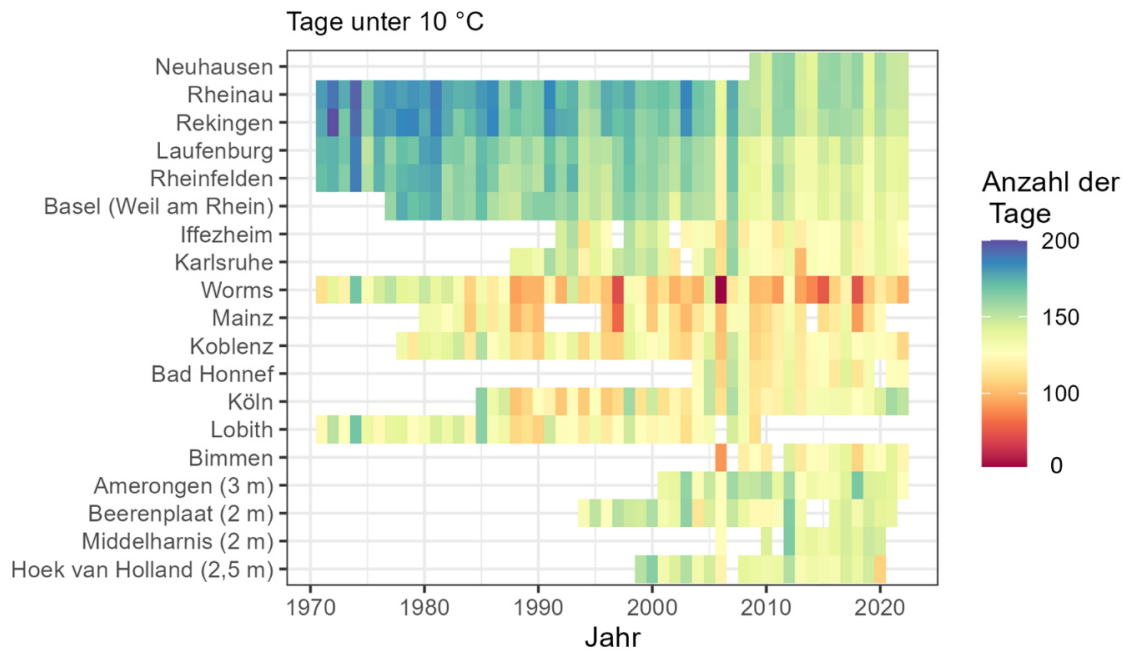


Abbildung 9: Anzahl der Tage im Winterhalbjahr (November-April) mit Tagesmittelwerten der Temperatur < 10 °C. Die Jahreszahl steht jeweils für das vorangegangene Jahr, zum Beispiel 2000 für den Winter 2000/2001. Jahre, in denen mehr als ein Viertel der Tagesmittelwerte des Winterhalbjahres fehlen, wurden nicht berücksichtigt.

Bei den Tagen mit Wassertemperaturen unter 3 °C zeigt sich ein abnehmender Trend (Abbildung 10). Tage unter 3 °C wurden in der Vergangenheit (1984/85–1986/87) zum Teil über den gesamten Rhein beobachtet (keine Messungen für den Deltarhein in dieser Messperiode). Nach 1990 (bzw. nach 1995 bis nach 2005) trat eine Anzahl über 20 Tage meist nur noch im Hochrhein und Deltarhein auf. Einzelne kalte Jahre traten weiterhin über den gesamten Rhein hervor (2011/12 und 2016/17). Es gab auch immer wieder warme Winter, in denen keine Tagesmitteltemperaturen unter 3 °C beobachtet wurden (1987/88–1989/90, 1994/95, 2003/04, 2006/07, 2013/14–2015/16, 2019/20 und 2021/22).

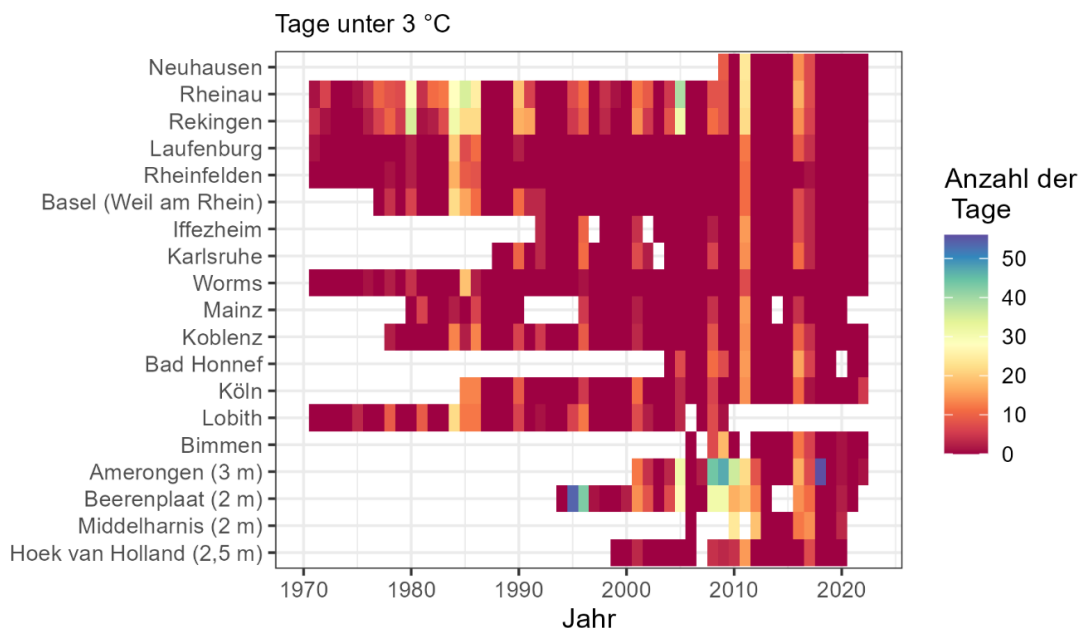


Abbildung 10: Anzahl der Tage im Winterhalbjahr (November-April) mit Tagesmittelwerten der Temperatur < 3 °C. Die Jahreszahl steht jeweils für das vorangegangene Jahr, zum Beispiel 2000 für den Winter 2000/2001.

Die Station Lobith nimmt eine besondere Rolle ein. Aufgrund der langen Messzeitreihe von Tagesmittelwerten können die Schwellenwertüberschreitungen über 99 Jahre hinweg berechnet werden (Abbildung 11). Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden 25 °C an der Station Lobith fast nie überschritten. Gerade in den letzten 20 Jahren der betrachteten Zeitreihe zeigt sich eine deutliche Zunahme der Überschreitungstage. Im heißen Sommer 2006 wurde der Schwellenwert von 25 °C insgesamt fast über einen Monat überschritten. Ein noch deutlicheres Muster ist für die Tage unter 10 °C und unter 3 °C erkennlich. Auch hier zeigt sich ein klarer Erwärmungstrend mit einer Abnahme der Tage unter dem jeweiligen Schwellenwert.

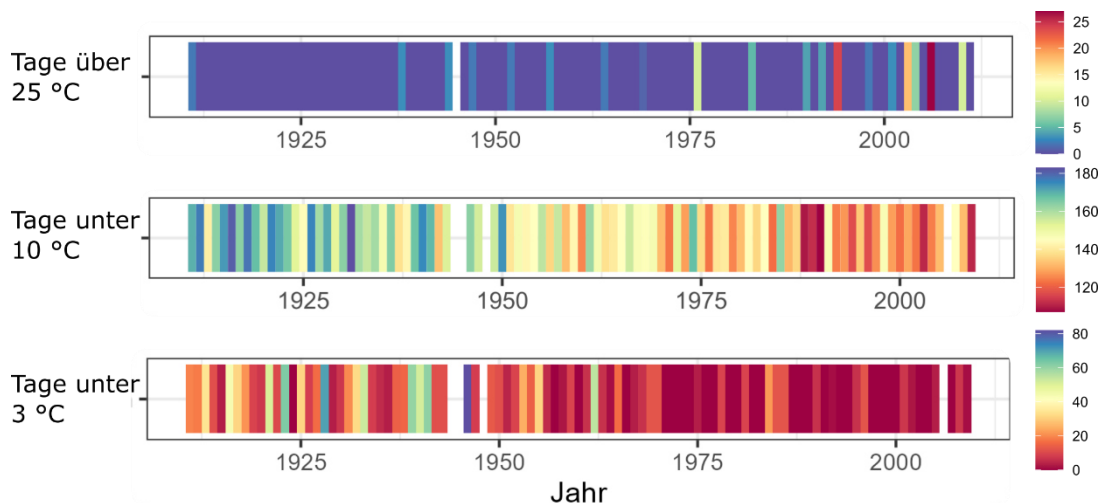


Abbildung 11: Anzahl der Über- und Unterschreitungstage an der Station Lobith. Anzahl der Tage mit Tagesmittelwerten der Temperatur > 25 °C (oben). Anzahl der Tage im Winterhalbjahr (November-April) mit Tagesmittelwerten der Temperatur < 10 °C (Mitte). Anzahl der Tage im Winterhalbjahr (November-April) mit Tagesmittelwerten der Temperatur < 3 °C (unten). Die Jahreszahl der Winterkennwerte steht jeweils für das vorangegangene Jahr, zum Beispiel 2000 für den Winter 2000/2001. Jahre, in denen mehr als ein Viertel der Tagesmittelwerte des Winterhalbjahres fehlen, wurden nicht berücksichtigt.

Die Dauer der 25 °C-Überschreitungen entspricht in den meisten Fällen der Anzahl der Überschreitungstage. Nur in relativ wenigen Jahren und an wenigen Stationen führen kurze Einbrüche der Temperatur zu mehreren kürzeren Ereignissen mit einer Überschreitung des Schwellenwerts.

Die dauerhaften Unterschreitungen der Wassertemperatur unter 10 °C schwanken entlang des Rheins (Abbildung 12). Im Oberrhein und Deltarhein beginnt die kalte Phase etwas früher als im Mittel- und Niederrhein. Deutlicher ist dieses Muster beim berechneten Enddatum der kalten Phase. Dieses liegt am spätesten im Hochrhein und am frühesten im Mittel- und Niederrhein. Dadurch kommt dasselbe Muster in der Dauer der kalten Phase zustande. Am längsten dauert die Phase im Hochrhein, während sie am kürzesten im Mittelrhein dauert. Hier könnte sich der Einfluss der Wärmeeinleitungen widerspiegeln.

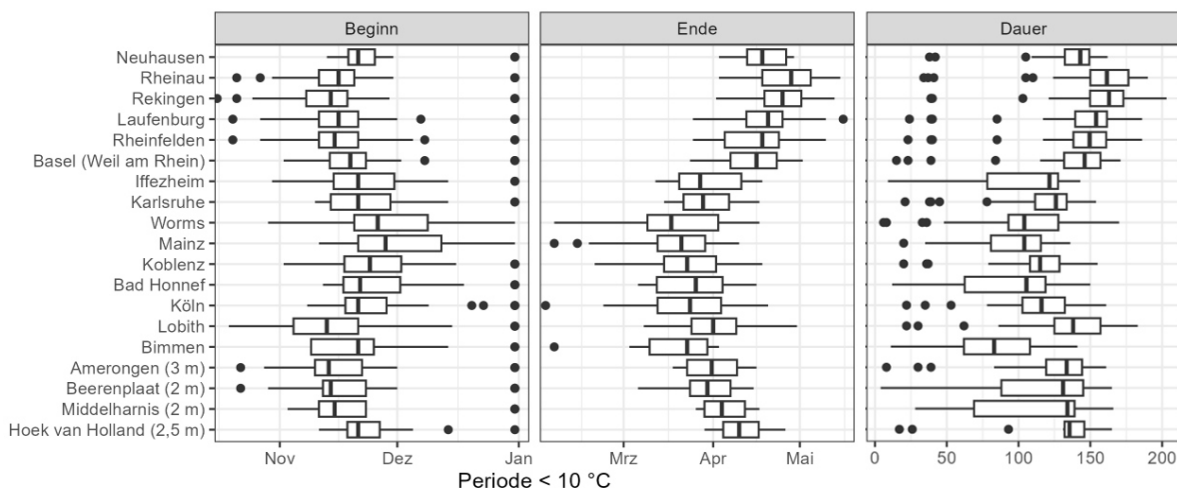


Abbildung 12: Beginn, Ende und Dauer der kalten Periode (< 10 °C) im Winter für die Jahre 2009–2021. Die linke und rechte Kante der Box sind das 25er und 75er Perzentil, die schwarze Linie innerhalb der Box ist der Median, die Punkte zeigen Ausreißer an.

4.3 Trendanalyse

Die über das Rheineinzugsgebiet gemittelte Lufttemperatur zeigt einen zunehmenden Trend über den betrachteten Zeitraum (Abbildung 13). Die Abbildungen 14–19 zeigen den relativen Verlauf der Wassertemperatur an den Messstellen entlang des Rheins. Der relative Verlauf beschreibt den Unterschied der gemessenen Temperatur zum Mittel der WMO⁴ Referenzperiode 1991–2020.

Die Verläufe der Temperaturkurven sind für jede einzelne Messstation unterschiedlich (Tabelle 5). Grundsätzlich ist die Lufttemperatur ein Proxy für die Interaktion des Flusswassers mit der Atmosphäre und der Strahlung (Kapitel 2.1). Anthropogene Wärmeeinleitungen sind häufig Industrie- und Kraftwerksabwärme.

Tabelle 5: Trends der Langzeitentwicklung der Wassertemperatur (WT) in °C pro Dekade. Für die Auswertung wurden Stationen entlang des Rheins mit möglichst langen Zeitreihen ausgewählt, welche die verschiedenen Rheinabschnitte abdecken.

		WT Rekingen	WT Basel	WT Worms	WT Koblenz	WT Köln	WT Bimmen/Lobith	Lufttemperatur
Zeitraum		1969–2023	1977–2023	1970–2023	1978–2023	1986–2023	1911–2023	1910–2023
ges. Zeitraum	min.	0,20	0,36	0,45	0,10	0,09	0,28	0,15
	mittel	0,44	0,50	0,54	0,29	-0,11	0,28	
	max.	0,58	0,66	0,69	0,61	-0,37	0,30	
1910–1930								-0,06
1920–1940							0,64	0,04
1930–1950							0,19	0,33
1940–1960							0,50	0,21
1950–1970							0,33	-0,14

⁴ Weltorganisation für Meteorologie (EN: World Meteorological Organization)

1960–1980						0,47	0,14
1970–1990	0,35					0,26	0,20
1980–2000	0,65	0,60	1,15	0,63		0,37	0,55
1990–2010	0,24	0,43	0,16	0,02	-0,41	0,06	0,29
2000–2020	0,40	0,32	0,53	0,12	-0,24	0,17	0,35

Die Lufttemperatur im Flussgebiet Rhein zeigt über den gesamten beobachteten Zeitraum einen zunehmenden Trend von $0,15 \text{ °C/Dekade}$ (Abbildung 13 oben). Betrachtet man die Zeiträume von 20 Jahren (Abbildung 13 unten), sind die Trends durchaus variabel. So gibt es über den Zeitraum von 1910–2023 sowohl Phasen der Abkühlung als auch der schwachen bis starken Erwärmung. Die Änderung der Lufttemperatur ist ein guter Vergleichsparameter für die Änderung der Wassertemperatur, da die Lufttemperatur ein zentraler Faktor im Wärmehaushalt von Gewässern ist, ein deutliches Klimasignal hat und dadurch die klimatischen Einflüsse auf die Wassertemperatur beschreibt.

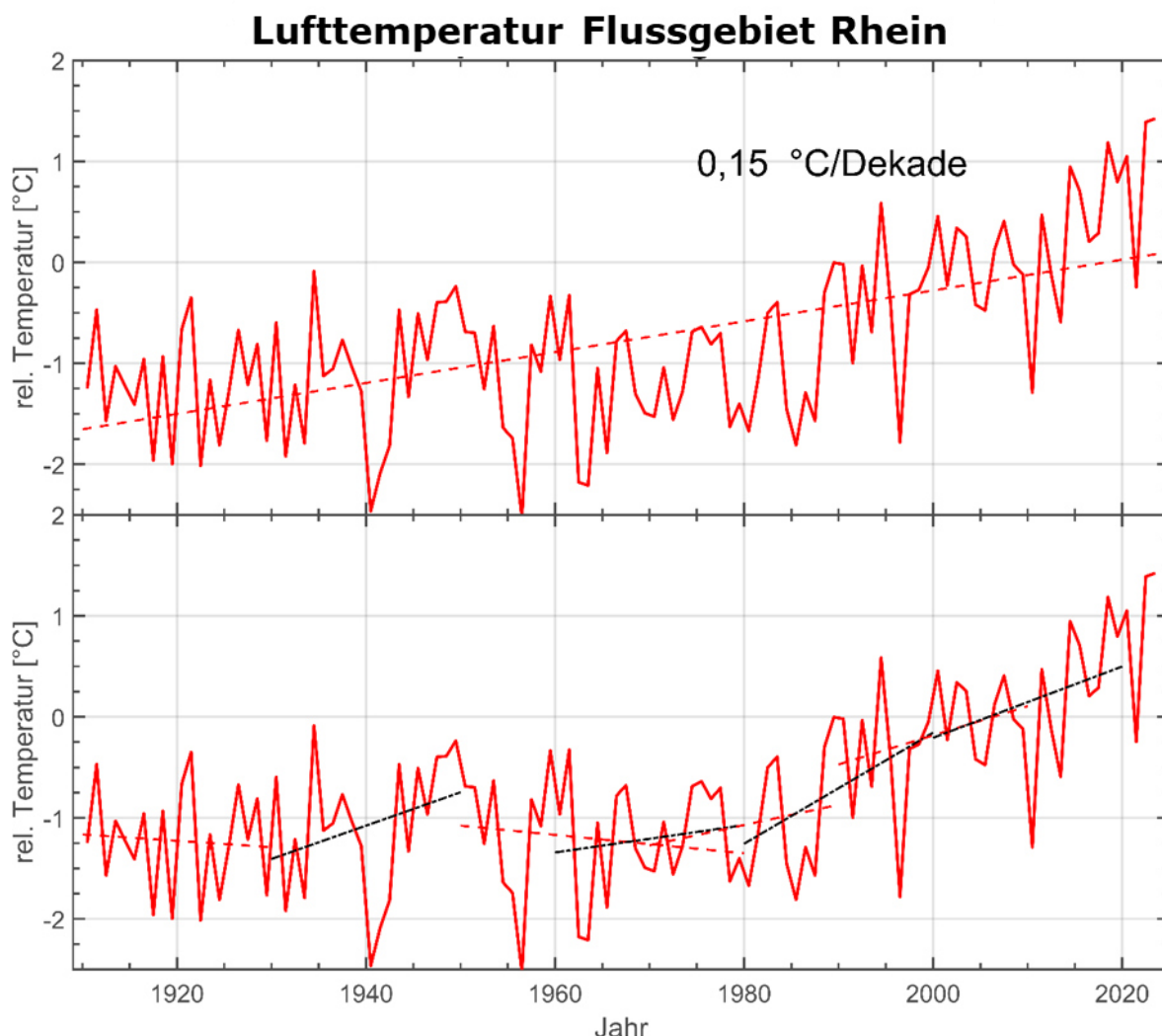


Abbildung 13: Oben: Entwicklung der Jahresdurchschnittslufttemperatur im Flussgebiet des Rhein seit 1900. Von der Absoluttemperatur wurde die Durchschnittstemperatur von 1990–2020 abgezogen. Die unterbrochene Linie zeigt den linearen Fit über den gesamten Datensatz an, mit der Steigung des Fits angegeben als $°\text{C}$ pro Dekade.

Unten: Die unterbrochenen Linien zeigen die lineare Änderung in dem jeweiligen Zeitabschnitt an. Die berechneten Steigungen des jeweiligen Fits sind in Tabelle 5 angegeben.

Abbildung 14 zeigt den Verlauf der Wassertemperatur in Rekingen, gelegen bei Rhein-km 90,7 oberhalb der großen Industriezentren am Rhein (Basel, Mannheim, Ludwigshafen, Frankfurt) und unterhalb des Bodensees. Für den Zeitraum von 1970 bis 2020 ergibt sich ein Trend von $0,40 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Dekade}$. In derselben Zeit erwärmte sich die Luft um $0,34 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Dekade}$. Im Vergleich zu den anderen Messstationen rheinabwärts ist der Rhein hier eher unbeeinflusst. Trotzdem kommt es zu unterschiedlichen Anstiegen zwischen Luft- und Wassertemperatur. Der Unterschied kann mit der Mittelung der Lufttemperatur über das gesamte Rheingebiet erklärt werden. Dies könnte nicht repräsentativ für den Oberrhein/Alpenrhein/Bodensee sein. Zudem können auch hier schon Wärmeeinleitungen die Wassertemperatur erhöhen.

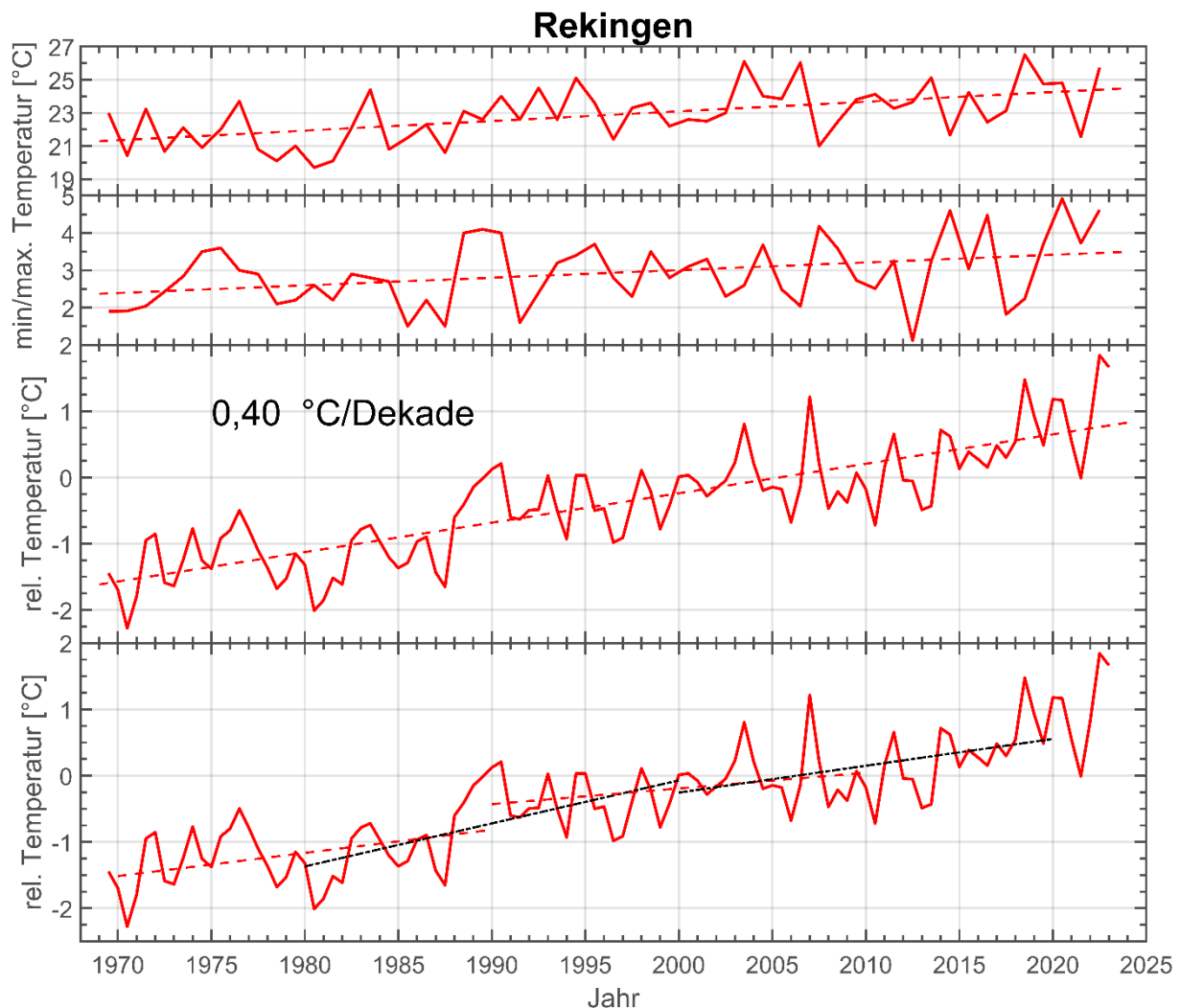


Abbildung 14: Wassertemperaturdaten der Station Rekingen, Rhein-km 90,7.

Oben: Verlauf der jährlichen Tagesmaximaltemperatur und Tagesminimaltemperatur.

In der Mitte: Entwicklung der relativen Jahresdurchschnittstemperatur. Von der Absoluttemperatur wurde die Durchschnittstemperatur von 1990–2020 abgezogen. Die unterbrochene Linie zeigt den linearen Fit über den gesamten Datensatz an. Die Steigung des Fits pro zehn Jahre ist angegeben.

Unten: Die unterbrochenen Linien zeigen die lineare Änderung in dem jeweiligen Zeitabschnitt an. Die berechneten Steigungen des jeweiligen Fits sind in Tabelle 5 angegeben.

Abbildung 15 zeigt den Verlauf der Wassertemperatur bei Basel. Hier zeigt der Trend einen Anstieg von $0,50\text{ °C/Dekade}$ seit 1978. Dies ist höher als der durchschnittliche Anstieg der Lufttemperatur. Vermutlich ist dies auf die steigende Anzahl an industriellen und kommunalen Wärmeeinleitungen zurückzuführen.

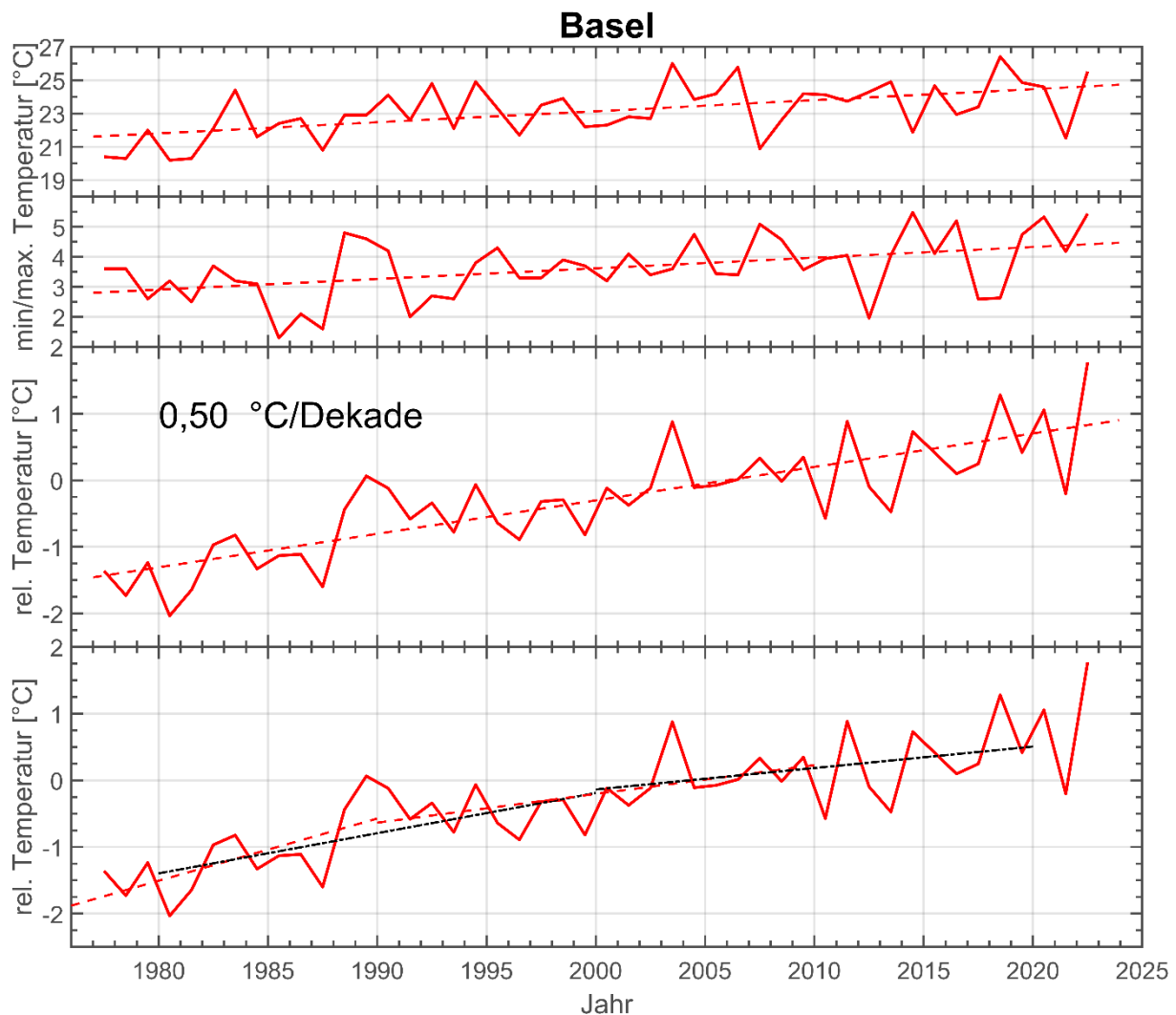


Abbildung 15: Wassertemperaturdaten der Station Basel, Rhein-km 174.

Oben: Verlauf der jährlichen Tagesmaximaltemperatur und Tagesminimaltemperatur.

In der Mitte: Entwicklung der relativen Jahresdurchschnittstemperatur. Von der Absoluttemperatur wurde die Durchschnittstemperatur von 1990–2020 abgezogen. Die unterbrochene Linie zeigt den linearen Fit über den gesamten Datensatz an. Die Steigung des Fits pro zehn Jahre ist angegeben.

Unten: Die unterbrochenen Linien zeigen die lineare Änderung in dem jeweiligen Zeitabschnitt an. Die berechneten Steigungen des jeweiligen Fits sind in Tabelle 5 angegeben.

Abbildung 16 zeigt den Verlauf der Wassertemperatur bei Worms. Interessant ist, dass vor allem zwischen dem Anfang der 1970er und dem Ende der 1980er Jahre ein großer Temperaturanstieg zu verzeichnen ist. Dies kann einerseits durch eine Änderung in den Klimaverhältnissen erklärt werden (HARI et al. 2006) und andererseits durch vermehrte Wärmeinleitungen von Kernkraftwerken, welche in diesem Zeitraum am Rhein in Betrieb genommen wurden (Abbildung 22).

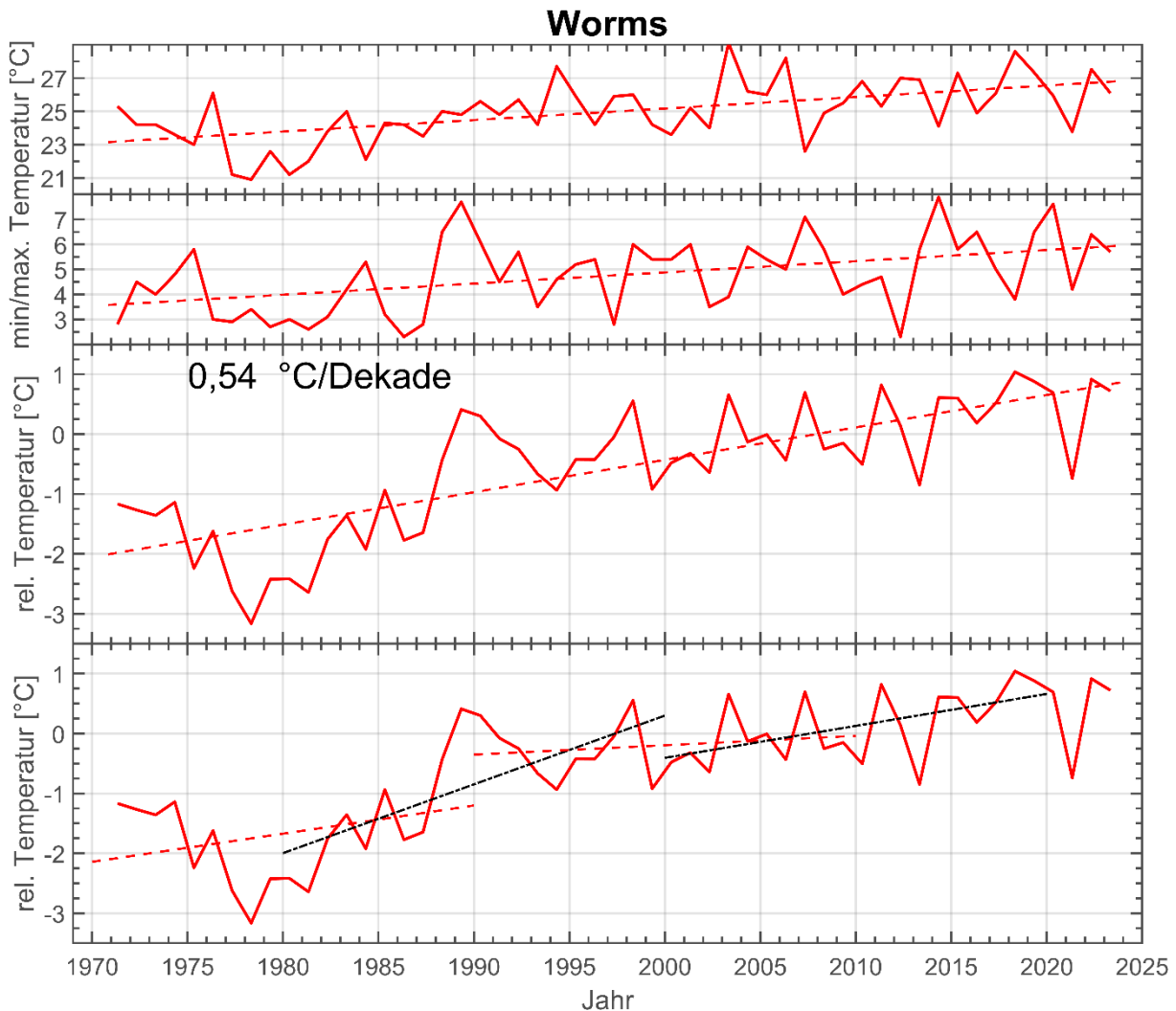


Abbildung 16: Wassertemperaturdaten der Station Worms, Rhein-km 443,3.

Oben: Verlauf der jährlichen Tagesmaximaltemperatur und Tagesminimaltemperatur.

In der Mitte: Entwicklung der relativen Jahresdurchschnittstemperatur. Von der Absoluttemperatur wurde die Durchschnittstemperatur von 1990–2020 abgezogen. Die unterbrochene Linie zeigt den linearen Fit über den gesamten Datensatz an. Die Steigung des Fits pro zehn Jahre ist angegeben.

Unten: Die unterbrochenen Linien zeigen die lineare Änderung in dem jeweiligen Zeitabschnitt an. Die berechneten Steigungen des jeweiligen Fits sind in Tabelle 5 angegeben.

Für Koblenz (Abbildung 17) zeigt sich ein ähnlicher Verlauf wie für Worms (Abbildung 16), wobei auch hier vermutlich durch eine Mischung aus Wärmeeinleitung und klimatischer Veränderung vor allem zwischen 1980 und 1990 eine stärkerer Trendanstieg sichtbar ist.

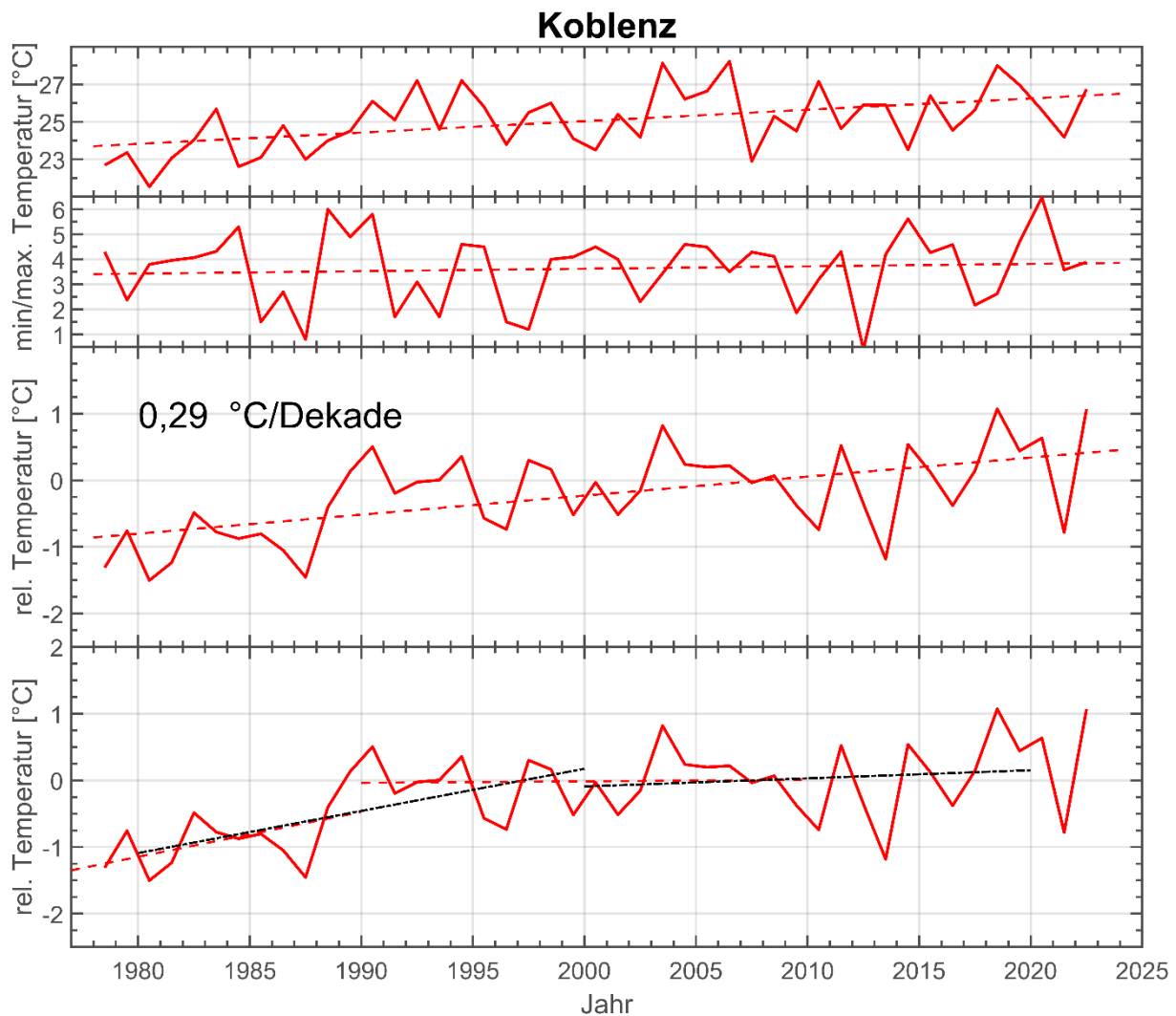


Abbildung 17: Wassertemperaturdaten der Station Koblenz, Rhein-km 590,3.

Oben: Verlauf der jährlichen Tagesmaximaltemperatur und Tagesminimaltemperatur.

In der Mitte: Entwicklung der relativen Jahresdurchschnittstemperatur. Von der Absoluttemperatur wurde die Durchschnittstemperatur von 1990–2020 abgezogen. Die unterbrochene Linie zeigt den linearen Fit über den gesamten Datensatz an. Die Steigung des Fits pro zehn Jahre ist angegeben.

Unten: Die unterbrochenen Linien zeigen die lineare Änderung in dem jeweiligen Zeitabschnitt an. Die berechneten Steigungen des jeweiligen Fits sind in Tabelle 5 angegeben.

Die Messungen in Köln (Abbildung 18) sind getrennt zu betrachten. Hier zeigt sich der einzige negative Trend der Messreihen am Rhein. Dies könnte mit der kurzen Zeitreihe begründet werden, da Daten vor 1985 nicht vorhanden sind und somit nur Daten nach dem Sprung der Lufttemperatur sowie dem Anschalten der Kernkraftwerke vorliegen. Diese Datenreihe beinhaltet den Zeitraum vom Produktionsmaximum des Kernkraftstroms bis hin zur Abschaltung der Kernkraftwerke. Zusätzlich wird vermutet, dass sich hier lokale Effekte zeigen. So könnte es Änderungen am Industriestandort Wesseling gegeben haben, welche sich im Wärmehaushalt an der Messtation in Köln zeigen.

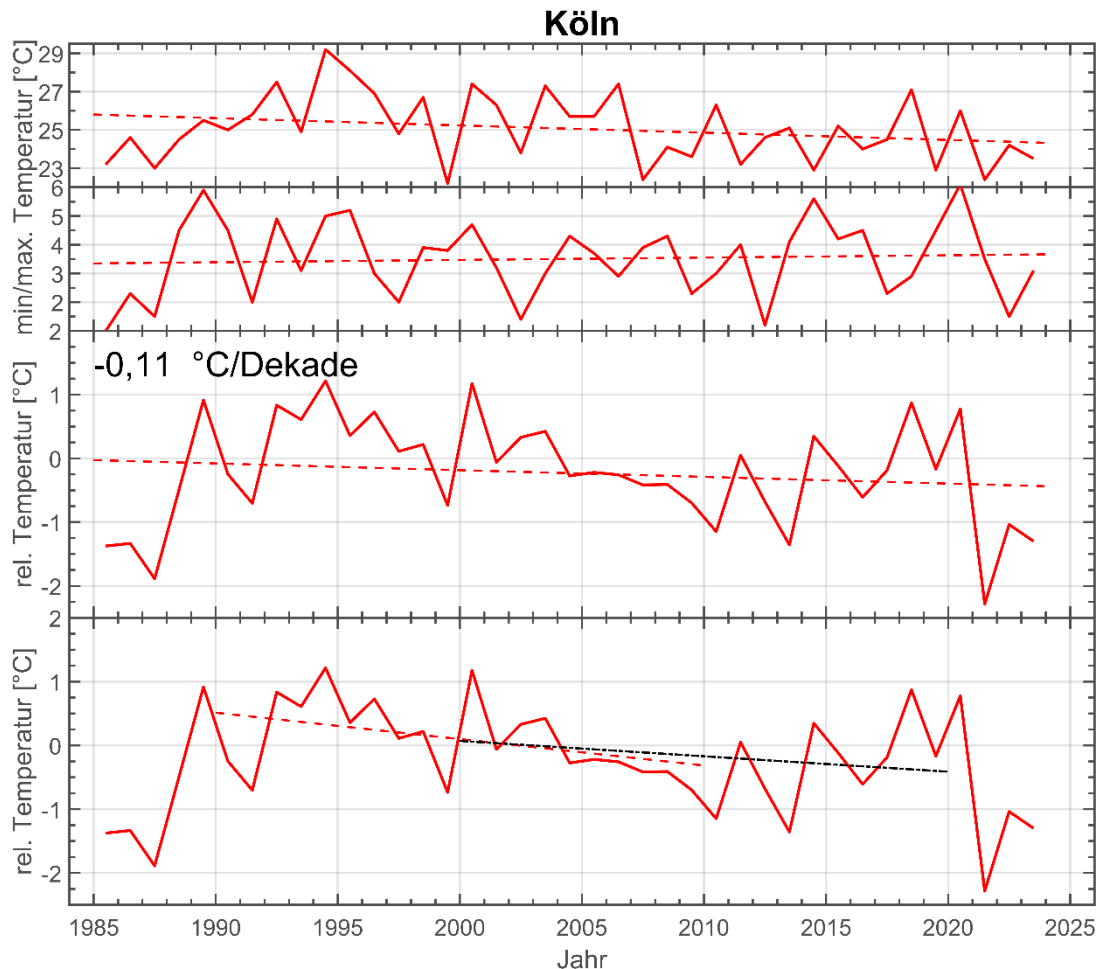


Abbildung 18: Wassertemperaturdaten der Station Köln, Rhein-km 688.

Oben: Verlauf der jährlichen Tagesmaximaltemperatur und Tagesminimaltemperatur.

In der Mitte: Entwicklung der relativen Jahresdurchschnittstemperatur. Von der Absoluttemperatur wurde die Durchschnittstemperatur von 1990–2020 abgezogen. Die unterbrochene Linie zeigt den linearen Fit über den gesamten Datensatz an. Die Steigung des Fits pro zehn Jahre ist angegeben.

Unten: Die unterbrochenen Linien zeigen die lineare Änderung in dem jeweiligen Zeitabschnitt an. Die berechneten Steigungen des jeweiligen Fits sind in Tabelle 5 angegeben.

Sehr interessant ist die Entwicklung der längsten verfügbaren Zeitreihe der Wassertemperatur im Rhein an der zusammengeführten Station Bimmen/Lobith (Abbildung 19, Kapitel 2.2). Im gesamten Zeitraum stieg die Wassertemperatur um $0,28 \text{ °C/Dekade}$ und die Lufttemperatur um $0,15 \text{ °C/Dekade}$. Der Unterschied kann wahrscheinlich durch industrielle Wärmeeinleitungen erklärt werden und auch hier müsste noch abgeschätzt werden, inwiefern die Lufttemperatur über das gesamte Rheingebiet repräsentativ für die Lufttemperatur bei Lobith ist. Seit 1990 erreichte die Wassertemperatur an diesem Messpunkt ein Plateau, obwohl die Lufttemperatur in diesem Zeitraum weiterhin ansteigt. Dies könnten die Auswirkungen von Kraftwerksabschaltungen, Energieeffizienzmaßnahmen bei Wärmeeinleitern und reduzierter Produktion an Industriestandorten entlang des Rhein sein.

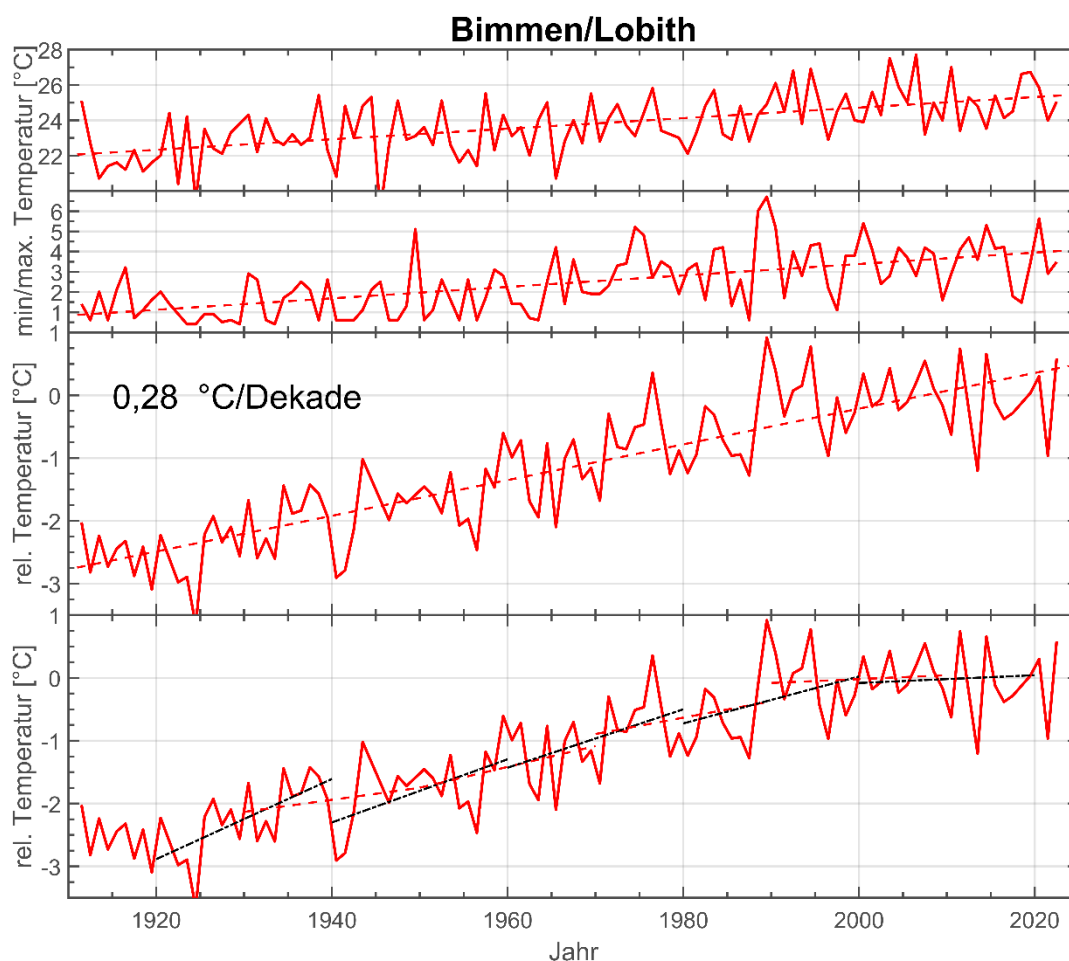


Abbildung 19: Wassertemperaturdaten der Station Bimmen/Lobith, Rhein-km 862,3.

Oben: Verlauf der jährlichen Tagesmaximaltemperatur und Tagesminimaltemperatur.

In der Mitte: Entwicklung der relativen Jahresdurchschnittstemperatur. Von der Absoluttemperatur wurde die Durchschnittstemperatur von 1990–2020 abgezogen. Die unterbrochene Linie zeigt den linearen Fit über den gesamten Datensatz an. Die Steigung des Fits pro zehn Jahre ist angegeben.

Unten: Die unterbrochenen Linien zeigen die lineare Änderung in dem jeweiligen Zeitabschnitt an. Die berechneten Steigungen des jeweiligen Fits sind in Tabelle 5 angegeben.

4.4 Einfluss von großen Nebenflüssen auf die Wassertemperatur des Rheins

Die mittlere Temperaturdifferenz der Jahresmitteltemperaturen von **Rhein und Neckar** für den Zeitraum 2004–2022 liegt bei rund 1,1 °C (Abbildung 20 oben), die kleinste Temperaturdifferenz ist 2020 0,4 °C und die größte ist 2009 1,7 °C. Über den gesamten Zeitraum betrachtet liegt die mittlere Temperaturdifferenz bei rund 0,8 °C, die kleinste Temperaturdifferenz wurde 1998 mit 0 °C gemessen, die höchste Temperaturdifferenz bleibt weiterhin bei 2009 mit 1,7 °C.

Die mittlere Temperaturdifferenz der Jahresmitteltemperaturen von **Rhein und Main** für den Zeitraum 2004–2022 liegt bei rund 0,7 °C (Abbildung 20 Mitte), die kleinste Temperaturdifferenz ist 2012 0,2 °C und die größte ist 2015 1,2 °C.

Die mittlere Temperaturdifferenz der Jahresmitteltemperaturen von **Rhein und Mosel** für den Zeitraum 2004–2022 liegt bei rund 1,0 °C (Abbildung 20 unten), die kleinste Temperaturdifferenz ist 2021 0,6 °C und die größte ist 2004 1,6 °C. Über den gesamten Zeitraum betrachtet liegt die mittlere Temperaturdifferenz bei rund 1 °C, die kleinste Temperaturdifferenz wurde 1999 mit 0,4 °C gemessen, die höchste Temperaturdifferenz 1993 mit 1,9 °C.

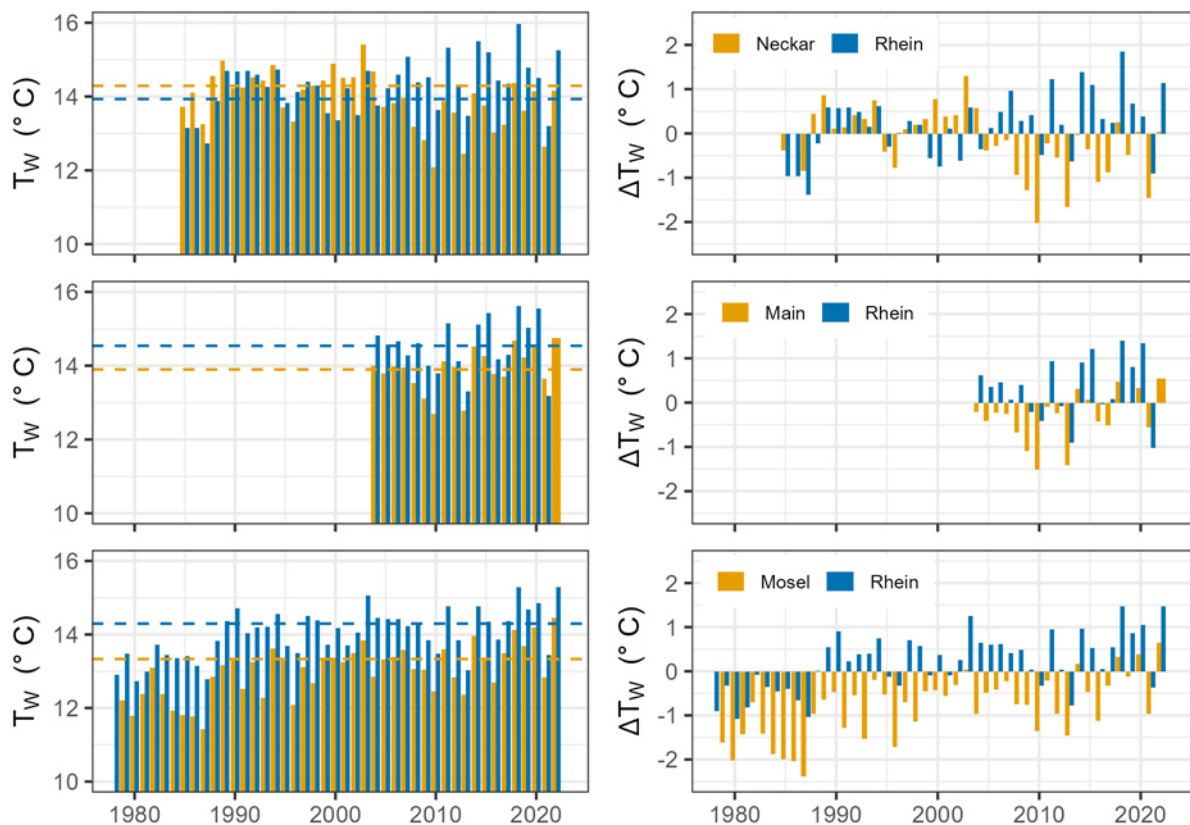


Abbildung 20: Vergleich der Wassertemperaturen von Rhein-Hauptstrom und Nebenflüssen (Neckar, Main, Mosel).

Links: Jahresmittelwerte der Wassertemperatur in Rhein (blau) und Nebenflüssen (orange). Die gestrichelten Linien zeigen die jeweiligen Mittelwerte über den Zeitraum 2004–2022 (dort sind für alle drei Stationen Daten vorhanden).

Rechts: Differenz der Jahresmitteltemperaturen zum Mittelwert beider Flüsse für den Zeitraum 2004–2022. Die Summe der Balken pro Jahr ergibt die Temperaturdifferenz zwischen Rhein und Nebenflüssen.

Die Verläufe der Temperaturdifferenz zwischen den Nebengewässern und dem Rhein unterscheiden sich deutlich. So fällt auf, dass der **Neckar** zu Beginn der Zeitreihe in den 1980er Jahren und später um 2000 herum meist wärmer war als der Rhein. In den 1990er Jahren zeigten beide Gewässer relativ ähnliche Wassertemperaturen auf. Seit 2005 hat sich die Differenz gedreht, und der Rhein ist in den meisten Jahren wärmer als der Neckar. Dies hängt, wie bereits im [IKSR-Fachbericht Nr. 209](#) beschrieben, mit der Stilllegung des Kernkraftwerks Obrigheim zusammen. Gegen Ende der Zeitreihe ist der Neckar kühler als das langjährige Mittel der Jahresmittelwerte beider Flüsse.

Relativ zum langjährigen Mittel der Jahresmittelwerte beider Flüsse (2004–2022) war die **Mosel** zu Beginn der Messzeitreihe relativ kühl (Abbildung 20 unten). Durch die Erwärmung der Mosel haben sich ihre Jahresmittelwerte dem langjährigen Mittel angenähert und lagen in den letzten Jahren häufig darüber. Der wärmere Rhein liegt deutlich früher, seit 1989, meist über dem langjährigen Mittel. Nur in einzelnen kalten Jahren ist die Temperaturdifferenz negativ.

Die tägliche Temperaturdifferenz zwischen Rhein und Mosel schwankt über das Jahr (Abbildung 21). Während des Winterhalbjahres ist die Mosel kühler als der Rhein, während sie im Frühsommer, um den Juni herum, leicht wärmer ist. Die Erklärung ist sicherlich in dem unterschiedlichen Wasservolumen der Flüsse zu sehen. Die Mosel kann sich aufgrund des geringeren Volumens und der langsameren Fließgeschwindigkeit schneller aufwärmen, während der Rhein träger reagiert und die Temperaturen länger hält. Im Winter ist der Effekt durch anthropogene Wärmeeinleitungen im Rhein eventuell höher als in der Mosel und verstärkt die Temperaturdifferenz zwischen beiden Flüssen.

Insgesamt zeigt sich, dass der Einfluss der Nebengewässer unterschiedlich ist. So hatten die Gewässer in der Vergangenheit sowohl einen wärmenden (Neckar bis ungefähr zur Jahrtausendwende) als auch kühlenden (Mosel und Neckar in den letzten beiden Jahrzehnten) Effekt. Zusätzlich schwankt die Temperaturdifferenz zwischen Zufluss und Rhein im Jahresverlauf (Abbildung 21), sodass die Nebengewässer je nach Jahreszeit einen wärmenden oder kühlenden Effekt haben können. Insgesamt haben die Nebenflüsse weiterhin einen leicht kühlenden Effekt auf den Rhein ([IKSR-Fachbericht Nr. 209](#)).

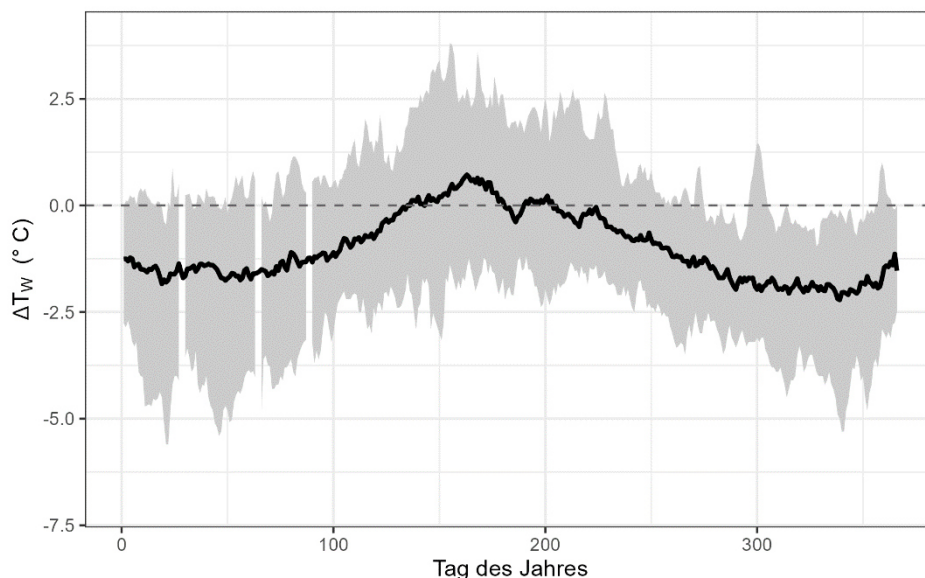


Abbildung 21: Schwankungsbereich der Temperaturdifferenz zwischen der Wassertemperatur in Mosel und Rhein pro Tag des Jahres über den Jahresverlauf (grau) und Mittelwert pro Tag des Jahres, jeweils über die betrachteten Jahre 1978–2022.

4.5 Einfluss von großen Wärmeeinleitern auf die Wassertemperatur des Rheins

Die Rahmenbedingungen für das Temperaturmanagement europäischer Gewässer wird durch die Wasserrahmenrichtlinie vorgegeben. Daraus abgeleitete Schwellenwerte für die Wassertemperatur aufgrund von Wärmeeinleitungen werden länderspezifisch geregelt. In Deutschland zum Beispiel gibt die Oberflächengewässerverordnung (OGewV) je nach Gewässertyp und vor allem Fischgemeinschaft die einzuhaltende Maximaltemperatur für Wärmeeinleitungen vor.

Am Rhein sind es meist Industrie- und Kraftwerksbetriebe, welche Rheinwasser zur Kühlung ihrer Prozesse verwenden. Durch die Gesetzgebungen der Rheinanliegerstaaten besteht die Möglichkeit, regulierend einzugreifen. Zum Beispiel kann über die Erteilung von Genehmigungen zur Wärmeeinleitung mittel- und langfristig auf die Nutzung des Rheinwassers zur Kühlung Einfluss genommen werden. Bei Ereignissen mit extremen Lufttemperaturen (Hitzewellen) und damit verbundener hoher Wassertemperatur bleibt dem Gesetzgeber nur die Möglichkeit, mittels Vorgaben zusammen mit der Industrie die Wärmeeinleitungen zu begrenzen. Dies dient dem Schutz von Flora und Fauna vor Hitzestress und hat meistens eine Reduzierung der Produktion oder die Nutzung alternativer Kühlmaßnahmen der Betriebe zur Folge.

Die umfangreichste Studie zu Wärmeeinleitungen in den Rhein wurde durch den BUND (2009) veröffentlicht. Zusätzlich haben ZAVARSKY & DÜSTER (2020) die Änderung der Wärmeeinleitungen der Kernkraftwerke anhand von Produktionsdaten abgeschätzt.

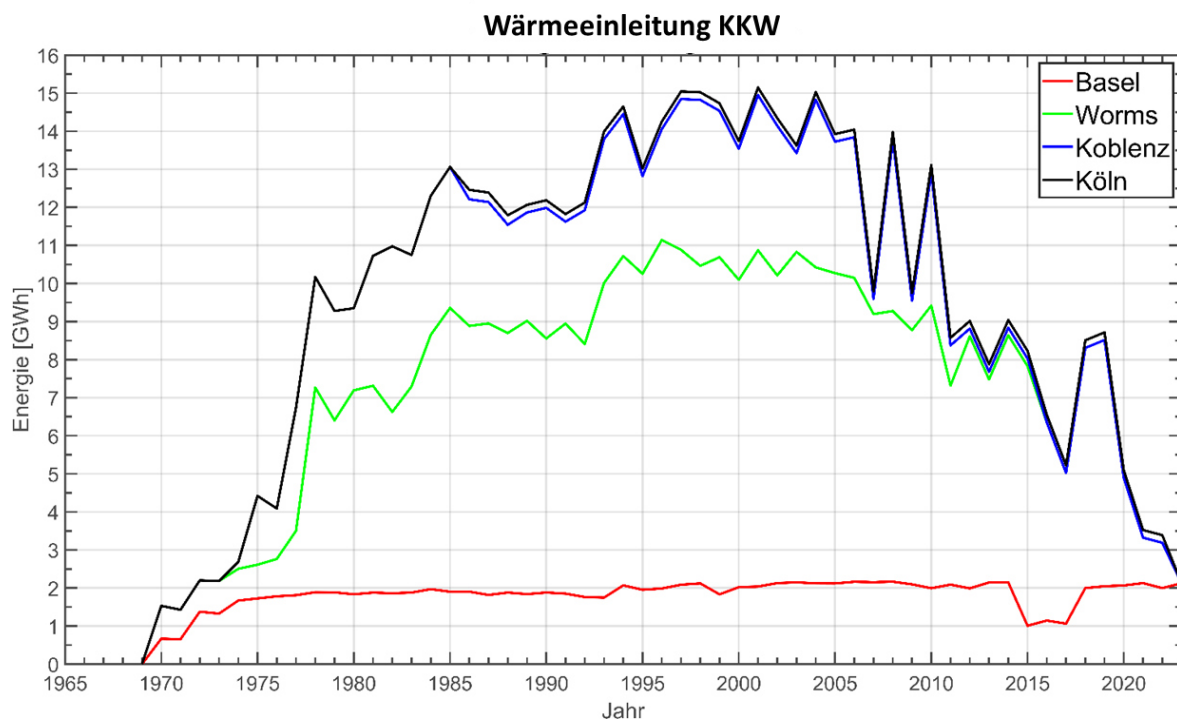


Abbildung 22: Wärmeeinleitungen der Kernkraftwerke (KKW) flussaufwärts der jeweiligen Messstation. Die Energie beschreibt die Einleitung von Wärmelast in GWh pro Jahr.

In Abbildung 22 werden die Wärmeeinleitungen der Kernkraftwerke flussaufwärts der jeweiligen Messstationen beschrieben. Das Maximum der Wärmeeinleitungen wurde zwischen 1995–2005 erreicht. Die Schweizer Kernkraftwerke tragen dabei konstant seit den 1970er Jahren zum Wärmebudget bei. Seit der Nuklearkatastrophe von Fukushima 2011 und dem beschlossenen deutschen Atomausstieg sinkt die Wärmeeinleitung der deutschen Kernkraftwerke kontinuierlich. Nachdem das französische Kernkraftwerk

Fessenheim im Juni 2020 abgeschaltet worden ist, verbleiben im Rheineinzugsgebiet nur noch die Schweizer Kernkraftwerke und das französische Kernkraftwerk Cattenom an der Mosel.

Durch die Abschaltung der deutschen Kernkraftwerke und die Transformation der Stromerzeugung und Industrie gab es vermutlich in den letzten Jahren eine deutliche Änderung der Wärmeeinleitmengen in den Rhein, sodass von einer geringeren Wärmebelastung in den letzten Jahren auszugehen ist.⁵ Aufgrund der veränderten Wärmeeinleitungen sollte eine Neuauflage im Umfang der Studie des BUND (2009) angestrebt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass meist nur auf die maximalen Einleitmengen der Genehmigungen zurückgegriffen werden kann, während die tatsächlich eingeleiteten Wärmemengen meist darunter liegen. Aus Sicht des natürlichen Wärmehaushalts ist die vermehrte Erzeugung von Solar- und Windstrom positiv zu sehen, da diese kein Kühlwasser benötigt. Generell kann durch die Abschaltung der Kernkraftwerke sowie durch die gestiegene Energieeffizienz der Industrie, bei gleichzeitig gestiegenen Energiekosten, erwartet werden, dass die Menge der Wärmeeinleitungen in den Rhein zurückgegangen ist.

5. Einfluss von Niedrigwasser auf die Wassertemperatur

Im vergangenen Jahrzehnt war der Rhein durch mehrere längere Niedrigwasserphasen geprägt (BFG 2021). Einzelne Niedrigwasserjahre wurden in verschiedenen Berichten untersucht (BFG 2021; [IKSR-Fachbericht Nr. 263](#); SCHWANDT et al. 2019) und sollen hier nicht weiter im Detail betrachtet werden. In diesem Kapitel werden aufgrund der sehr guten Datenlage und ihrer Lage am Beginn des betrachteten Rheinverlaufs exemplarisch Daten der Station Rheinfelden gezeigt.

Vergleicht man die Abweichungen der Jahresmittelwerte der Wassertemperatur vom langjährigen Mittel mit verschiedenen hydrologischen und meteorologischen Größen, zeigen sich klare Zusammenhänge für den Abfluss, die Sonnenscheindauer und die Lufttemperatur (Abbildung 23). Der Zusammenhang mit dem Niederschlag ist weniger stark ausgeprägt. Der deutlichste Zusammenhang findet sich zwischen Luft- und Wassertemperatur sowie Sonnenscheindauer und Wassertemperatur. So sind besonders warme Jahre in der Lufttemperatur und besonders sonnenscheinreiche Jahre auch besonders warme Jahre im Wasser. Dies ist wenig überraschend, da beide Faktoren wichtige Größen im Wärmehaushalt von Fließgewässern sind (Kapitel 1.1). Wärmere Jahre sind auch eher solche mit geringeren Abflüssen (Abbildung 23 A) und zeigen in der Tendenz einen Zusammenhang mit Niedrigwasserjahren.

⁵ Die EG STEMP hat für den internen Gebrauch ein Inventar mit den Wärmeeinleitungen 2010–2020 (genehmigte und tatsächliche Werte, > 200 MW) erstellt.

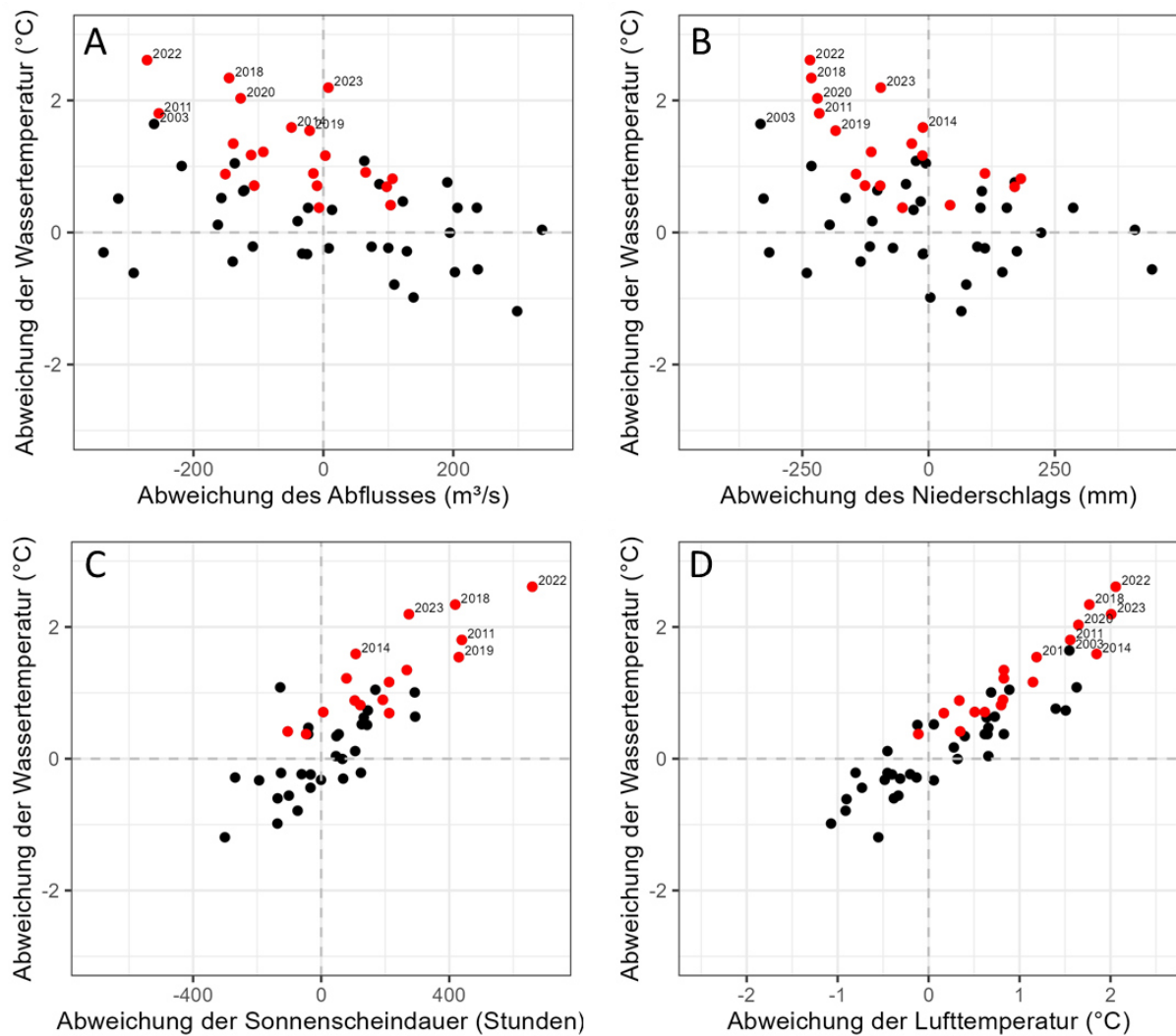


Abbildung 23: Abweichung der Jahresmittelwerte des Abflusses (A), der Jahressumme des Niederschlags (B), der Jahressumme der Sonnenscheindauer (C), der Jahresmittelwerte der Lufttemperatur (D) und der Wassertemperatur vom langjährigen Mittel (1970–1999) für die Station Rheinfelden (CH). In Rot dargestellt sind die letzten 20 Jahre, das heißt 2004–2023.

Das heißeste Jahr 2022 war an 145 Tagen im Jahr wärmer als das langjährige Mittel der Referenzperiode 1970–1999 (Abbildung 24 oben). Der Abfluss lag in diesem Jahr über lange Zeit unterhalb des Medians der Referenzperiode. An 48 Tagen lag er unterhalb des minimal beobachteten Abflusses der Referenzperiode (Abbildung 24 unten). Während der zwei ausgeprägten Hitzeperioden (relativ für die Jahreszeit) im späten Frühjahr und frühen Sommer war der Abfluss bereits niedrig, aber im Bereich der Messungen des Zeitraums 1970–1999. Im Spätsommer fiel der außerordentlich niedrige Abfluss mit der hohen Wassertemperatur zusammen. Im späten Herbst und Winter lagen die Wassertemperaturen noch einmal über dem langjährigen Maximum, hier lag der Abfluss bei mittlerem Niveau.

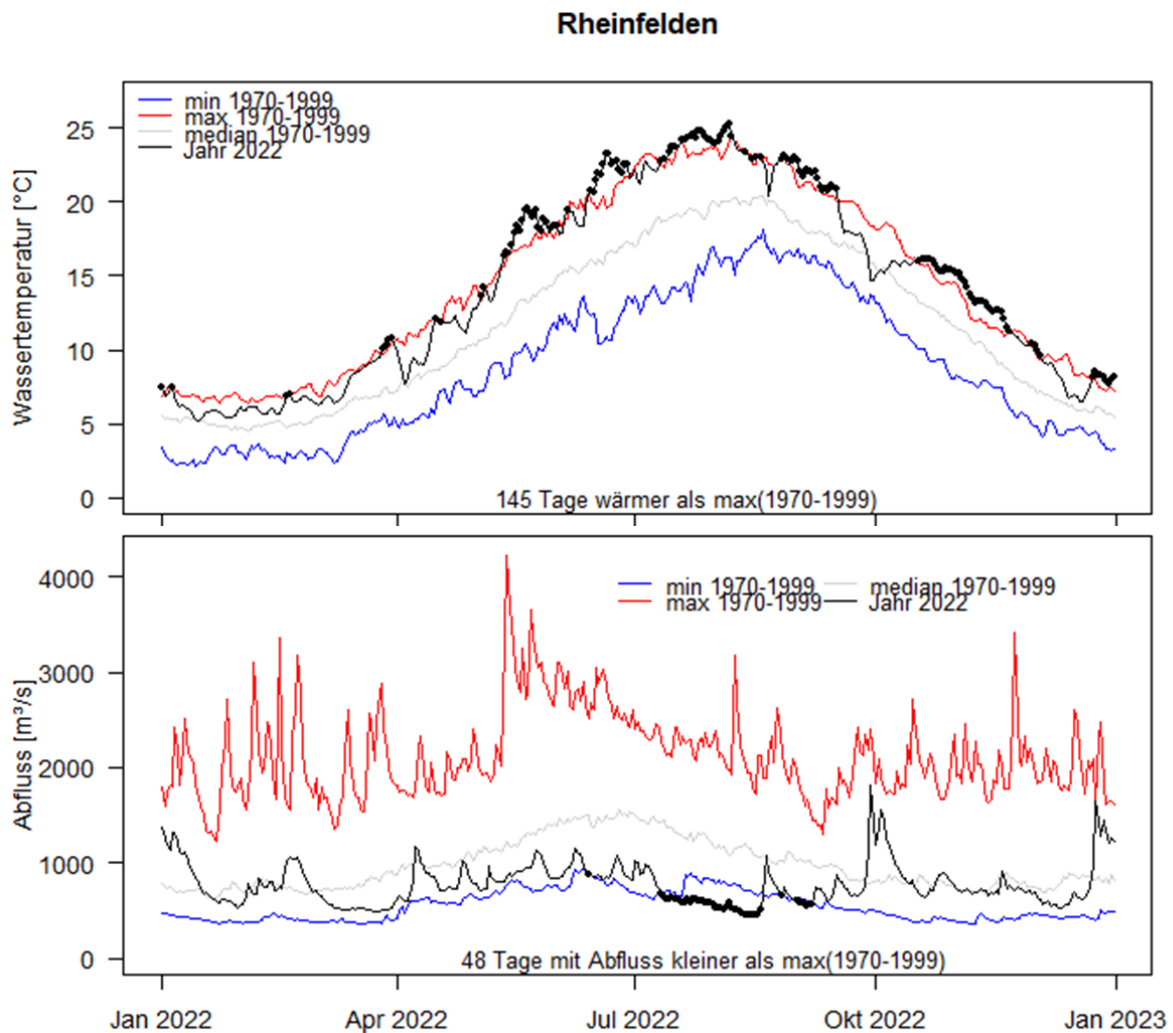


Abbildung 24: Entwicklung der Wassertemperatur (oben) und des Abflusses (unten) über das Jahr für ein sehr warmes Jahr (2022) an der Station Rheinfelden.

Es zeigt sich, dass die Haupteinflussfaktoren der Wassertemperatur, die im Kapitel 1.1 beschriebenen Komponenten des Wärmehaushalts sind. Durch Niedrigwasser kann eine Hitzeperiode im Wasser verschärft werden, da das Wasservolumen, welches erwärmt wird, geringer ist (BFG 2021, SCHWANDT et al. 2019). Für die Zukunft ist projiziert, dass im Rhein der Abfluss im Winter zwar zunimmt, jedoch im Sommer abnimmt ([IKSR-Fachbericht Nr. 297](#)). Die durch den voranschreitenden Klimawandel erfolgende Erwärmung der Wassertemperaturen kann daher durch abnehmende Sommerabflüsse verstärkt werden.

6. Schlussfolgerungen

Die Datenbasis gemessener Wassertemperaturen für diesen Bericht konnte durch die Ergänzung weiterer Stationen in der Schweiz und in den Niederlanden deutlich erweitert werden und deckt jetzt den gesamten Rhein unterhalb des Bodensees ab.

Eine Zunahme der Überschreitungstage kritischer Temperaturschwellenwerte ist weiterhin über den gesamten Rhein zu beobachten; die Anzahl der Überschreitungstage ist im Mittelrhein am höchsten.

Kalte Tage nehmen im Winter ab. Die Veränderung wird besonders im Hoch- und Oberrhein deutlich.

Einzelne besonders warme Ereignisse stechen weiterhin in der Langzeitentwicklung hervor. Zu den Sommern 2003 und 2006 sind seit dem letzten IKSR-Bericht über die Entwicklung der Wassertemperaturen mehrere warme Jahre hinzugekommen (2018, 2020, 2022).

Die Lufttemperatur ist ein zentraler Faktor im Wärmehaushalt von Gewässern und somit dessen Erwärmung ein guter Vergleichsparameter für die Änderung der Wassertemperatur.

Alle auf Trends untersuchten Stationen zeigen eine voranschreitende Erwärmung der Wassertemperatur, bis auf Köln, welche einen negativen Trend zeigt. Die Erklärung liegt in lokalen Messeffekten an der Station Köln, die einen Rückgang der Industrieemissionen nahe der Messstation widerspiegeln. Die größten Erwärmungstrends sind im Hoch-, Ober- und Mittelrhein zu sehen.

Die großen Nebenflüsse Neckar, Main und Mosel haben im Durchschnitt alle eher eine kühlende Wirkung auf die Wassertemperatur des Rheins.

Durch die Abschaltung der deutschen Kernkraftwerke sowie durch die gestiegene Energieeffizienz der Industrie ist die Menge der Wärmeeinleitungen in den Rhein zurückgegangen.

Die Niedrigwasser der jüngeren Vergangenheit haben zur stärkeren Erwärmung der Wassertemperaturen des Rheins beigetragen.

7. Ausblick⁶

Die Messfrequenz hat sich durch den Einsatz automatisiert messender Sensoren an vielen Stationen erhöht und könnte für weitergehende Auswertungen genutzt werden, zum Beispiel für die Analyse von Tag-/Nacht-Temperaturunterschieden. Für einen Folgebericht wird in dem Zusammenhang auch empfohlen, eine Auswertung der Überschreitungstage für die Tagesmaxima der Wassertemperatur durchzuführen. Diese können aus einer Zeitreihe mit einer höheren Messfrequenz als täglicher Daten berechnet werden.

Lange Zeitreihen sind besonders wertvoll, da sie eine Auswertung im klimatischen Sinne (30-Jahres-Mittelwerte) zulassen und sich die Situation für zukünftige Studien noch verbessern lässt. Wichtig ist, die bestehenden Stationen fortzuführen; es sei auf die Zeitreihenlänge der Wassermenge und Lufttemperatur verwiesen.

Es wird empfohlen, eine ausführlichere Daten- und Literatur-Review-Studie durchzuführen, die die verschiedenen, teils sehr weit zurückliegenden Wassertemperaurewertungen zusammenfasst und, wo möglich, Messungen aus der fernerer Vergangenheit zusammenträgt, um die Länge der Datenreihen zu verlängern und noch fundiertere Aussagen über die Trendentwicklung treffen zu können.

⁶ Die im ‚Ausblick‘ genannten Empfehlungen werden im IKSR-Workshop „Klimawandel und seine Auswirkungen im Rheineinzugsgebiet“ im März 2025 diskutiert.

Industrielle Wärmeeinleitungen sowie Kraftwerkseinleitungen haben sich immer weiter verringert.⁷ Es zeichnet sich ab, dass sich die Wärmenutzung des Flusses stark verändern wird. In Zukunft könnte die Nutzung von Flusswärmepumpen relevant werden; der Effekt könnte in einem nächsten Berichtsupdate untersucht werden.

Ferner wird empfohlen, eine ausführliche Studie zu den Wärmeeinleitungen durchzuführen, vergleichbar mit BUND 2009, da sich bezüglich der Wärmeeinleitungen viel geändert hat und derzeit weiter verändert.

Ergänzende Informationen lassen sich dem [IKSR-Fachbericht Nr. 297](#), der die Änderungen des Abflussregimes des Rheins beschreibt sowie dem Bericht „Simulation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development“ (Publikation als IKSR-Fachbericht Nr. 302 im Frühjahr/Sommer 2025 geplant), der die Entwicklung der zukünftigen Rheinwassertemperaturen erläutert, entnehmen.

Danksagung

Wir möchten uns bedanken für die umfangreiche Bereitstellung von Wassertemperaturmessungen. Besonderer Dank gilt den Kolleg:innen, die über die vielen Jahre die Daten erhoben haben und weiter erheben. Die Langzeitdaten sind unendlich wertvoll für die Untersuchung der langfristigen Temperaturentwicklungen im Rhein und seinem Einzugsgebiet, ohne sie wären wir blind für die Veränderungen, die sich im Gewässer abspielen.

⁷ Die EG STEMP hat für den internen Gebrauch ein Inventar mit den Wärmeeinleitungen 2010–2020 (genehmigte und tatsächliche Werte, > 200 MW) erstellt.

Literaturverzeichnis

- BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ (BUND) (2009): Wärmelast Rhein.
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (BFG) (2021): Die Niedrigwassersequenz der Jahre 2015 bis 2018 in Deutschland. Analyse, Einordnung und Auswirkungen. Mitteilungen Nr. 35. Koblenz.
- CAISSIE, D. (2006): The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*. 51(8). 1389-1406.
- FORSTNER, A. E. (1894): Die Temperatur fließender Gewässer Mitteleuropas. – Geographische Abhandlungen, Band V, Heft 4, S. 1-95. Universität Wien.
- HARDENBICKER P., VIERGUTZ, C., BECKER, A., KIRCHESCH, V., NILSON, E. & H. FISCHER (2017): Water temperature increases in the river Rhine in response to climate change. *Regional Environmental Change*, 17, 299-308.
- HARI, R. E., LIVINGSTONE, D. M., SIBER, R., BURKHARDT-HOLM, P. & H. GÜTTINGER (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology* 12(1). 10-26.
- IKSR (2013): Fachbericht Nr. 204. Aktueller Kenntnisstand über mögliche Auswirkungen von Änderungen des Abflussgeschehens und der Wassertemperatur auf das Ökosystem Rhein und mögliche Handlungsperspektiven.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0204.pdf.
- IKSR (2013): Fachbericht Nr. 209. Darstellung der Entwicklung der Rheinwassertemperaturen auf der Basis validierter Temperaturmessungen von 1978 bis 2011.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0209.pdf.
- IKSR (2014): Fachbericht Nr. 214. Estimation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development – extensive version.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/EN/rp_En_0214.pdf.
- IKSR (2020): Fachbericht Nr. 263. Bericht zum Niedrigwasserereignis Juli-November 2018.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0263.pdf.
- IKSR (2024): Fachbericht Nr. 297. Klimawandelbedingte Abflussszenarien für das Rheineinzugsgebiet.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0297.pdf.
- LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) (2013): Grundlagen für die Beurteilungen von Kühlwassereinleitungen in Gewässer.
- LIEFVELD, W. M. & R. POSTMA (2007): Two rivers: Rhine and Meuse. – Rijkswaterstaat Waterdienst. Lelystad, The Netherlands.
- MANNFELD, M. & H. FISCHER (2020): Wassertemperaturen, Sauerstoff & Chlorophyll-a: Rhein, Elbe. In: NILSON, E. et al. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schifffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. 195 S.
- MUNLV (2009): Anpassung an den Klimawandel – Eine Strategie für Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
<http://www.umwelt.nrw.de/klima/klimawandel/anpassungspolitik/anpassungsstrategie/index.php>.

- SCHWANDT, D., HÜBNER, G., ZAVARSKY, A. & K. FRICKE (2019): Projektbericht. Wassertemperatur des Rheins bei Koblenz im Sommer 2018. HW 63. H.1.
- VINNÅ et al. (2023): Swiss-wide future river temperature under climate change "SwissFuRiTe". Basel. No. BGA-CH-78.
- WEBB, B. W. & Y. ZHANG (1997): Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget. *Hydrological processes*. 11(1). 79-101.
- WETZEL, R. G. (2001): *Limnology: lake and river ecosystems*. Vol. 1. Academic Press.
- WUNDT, W. (1940): Beiträge zur Temperatur fließender Gewässer. *Peterm. Mitt.* Heft 12. 399-406.
- WUNDT, W. (1967): Der Temperaturgang an mitteleuropäischen Flüssen. *Peterm. Mitt.* Heft 2. 81-88.
- ZAVARSKY, A. & L. DÜSTER (2020): Anthropogenic influence on the Rhine water temperatures. *Hydrology and Earth System Sciences*. 24(10). 5027-5041.

Anhang: Übersicht der Über- und Unterschreitungstage

Tabelle A.1: Übersicht der Anzahl der Überschreitungstage für die Wassertemperatur-Schwellenwerte 21,5 °C, 23 °C, 25 °C, 28 °C und 30 °C und der Unterschreitungstage für die Schwellenwerte 3 °C und 10 °C.

Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Kapitel 4.2.

Für die Übersicht bitte beim IKSR-Sekretariat anfragen.