

Klimawandel und Wasserhaushalt in Bayern

Langzeitverhalten der Wassertemperaturen bayerischer Fließgewässer



Die Wassertemperatur ist ein zentraler Güteparameter, da sie alle biologischen und chemischen Prozesse im Gewässer steuert. Sie beeinflusst auch die Nutzungsmöglichkeiten durch uns Menschen in vielfältiger Form. Sei es die Nutzung als Erholungsraum, Nahrungsquelle oder als Mittel zur Kühlung von Kraftwerken und Industrieanlagen. Somit liegt der Erhalt einer guten Gewässerqualität im Interesse aller. Daher wird die Wassertemperatur in Bayern bereits seit 1951 kontinuierlich in einzelnen Fließgewässern erfasst. Im Laufe der Jahre wurde das Temperaturmessnetz weiter ausgebaut und modernisiert, so dass nun Aussagen über das Langzeitverhalten der Fließgewässertemperaturen möglich sind. Darüber hinaus soll aufgezeigt werden, ob und zu welchen Anteilen der Klimawandel einen Einfluss auf die Temperatur bayerischer Fließgewässer hat.

1 Bedeutung der Gewässertemperatur

Die Wassertemperatur beeinflusst maßgeblich eine Vielzahl von biologischen und physikalisch-chemischen Prozessen im Gewässer und steuert die Geschwindigkeit des Stoffwechsels. Somit wirkt sie sich direkt auf alle im Wasser lebenden Organismen aus und ist unter anderem relevant für die Zusammensetzung der aquatischen Lebensgemeinschaften, Photosyntheseleistung, Sterblichkeit von Fischen, gewässerinternen Stoffumsatzraten, Löslichkeit von Gasen und Toxizität von zahlreichen Umweltchemikalien.

Insbesondere für Fische dürfen je nach Region bestimmte Temperaturgrenzwerte, die in der Bayerischen Fischgewässerqualitätsverordnung (BayFischGewV 1997) und ab 2014 detaillierter in der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) festgeschrieben sind, nicht überschritten werden. Für Salmonidengewässer („Oberläufe“) sind dies im Sommer 21,5°C und in der Laichzeit 10°C, für Cyprinidengewässer („Unterläufe“) jeweils 28°C und 10°C. Um der Bedeutung der Gewässertemperatur für die ökologische Funktionalität von Fließgewässern gerecht zu werden, wurden daher in der Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (OGewV 2011) Vorgaben für Aufwärmspannen und Maximaltemperaturen im Gewässer und somit für die Einleitung von warmem Wasser aus der Industrie und von Kraftwerken festgelegt.

Untersuchungen zum Klimawandel bei denen Lufttemperaturmessungen aus dem Zeitraum von 1931 bis 2010 analysiert wurden, ergaben für Bayern in diesem Zeitraum eine Zunahme um durchschnittlich 1.1°C (KLIWA 2011). Weiterhin deuten alle Klimamodellierungen darauf hin, dass sich dieser Trend auch in Zukunft fortsetzen wird. Ist dieser Anstieg auch in der Wassertemperatur bayerischer Fließgewässer zu beobachten? Eine grundsätzliche Erhöhung der Durchschnittstemperatur in Fließgewässern verringert unmittelbar deren Wärmeaufnahmekapazität und damit deren Belastungsfähigkeit. Wenn aufgrund klimabedingter erhöhter Wassertemperaturen die Einleitung der erwärmten Abwässer der rund 40 in Bayern vorhandenen Kraftwerke und Industriebetriebe reduziert werden müsste, hätte das auch direkte ökonomische Folgen.

Vor diesem Hintergrund wurde durch das Ingenieurbüro IAGW eine Studie über das Langzeitverhalten der Wassertemperatur bayerischer Fließgewässer im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt erstellt (Willems, 2011). Dabei wurden folgende Aspekte untersucht:

- Besteht in den Messreihen ein Trend für die mittlere jährliche Wassertemperatur, die maximale Jahrestemperatur sowie die Dauer zusammenhängender Wärmephasen oberhalb eines festgelegten Schwellenwertes?
- Gibt es eine Veränderung in der Saisonalität und Periodizität (Wiederkehrintervalle) der Wassertemperaturen?
- Lassen sich Veränderungen auf den klimatischen Wandel zurückführen, also aus dem Klimasignal der meteorologischen Eingangszeitreihen (Niederschlag, Temperatur) ableiten?
- Können räumliche Muster nachgewiesen werden?

2 Methodik der Zeitreihenauswertung

Die in diesem Infoblatt dargestellten Ergebnisse stammen, wenn nicht anders zitiert, aus der oben genannten Studie. Mit Hilfe verschiedenster statistischer Verfahren wurden 50 Wassertemperatur-Messstellen in Bayern untersucht. Die ausgewerteten Zeitreihen beginnen frühestens 1951 und reichen längstens bis zum Jahr 2009 (Abbildung 1). Eine räumliche Einordnung der Messstellen enthält die Abbildung 2.



Abb. 1: Beobachtungszeiträume der statistisch ausgewerteten Wassertemperaturmessreihen

Für die Charakterisierung der Wassertemperaturbedingungen wurden folgende Kennwerte ermittelt:

- Mittlere jährliche Wassertemperatur,
- Maximale Wassertemperatur des jeweiligen Kalenderjahres,
- Mittlere monatliche Gewässertemperatur,
- Überschreitungsdauer von Wassertemperaturen über einem festgelegten Schwellenwert (90%-Quantil der jeweiligen Messreihe),
- Jahresamplitude der Wassertemperatur, also die Spanne zwischen dem niedrigsten und dem höchsten Wert,
- Eintrittszeitpunkt der maximalen Gewässertemperatur im Jahresgang.

Die zahlreichen Aspekte von möglichen Instationaritäten (langfristige Veränderung von Mittelwerten, zum Beispiel Trends) wurden mit jeweils gezielt angewandten statistischen Verfahren beleuchtet. Trends mit

mittlerem Verhalten der betrachteten Serien über die jeweils zur Verfügung stehenden, gesamten Messzeiträume wurden anhand des Mann-Kendall-Tests, des saisonalen Mann-Kendall-Tests und des t-Tests auf ihre Signifikanz hin analysiert. Die Untersuchung von Trends in Teilzeiträumen erfolgte mit Hilfe von lokal gewichteten Regressionen, Trenddreiecken und segmentierten, instationären Wahrscheinlichkeitsanalysen. Untersuchungen zur Saisonalität beruhen auf trigonometrischen und zirkular-linearen Regressionen. Inwieweit Instationaritäten in Temperaturzeitreihen anhand von Instationaritäten in den klimatologischen Variablen erklärt werden können, wurde mittels multipler Regression analysiert. Nachstehend sind die Auswertungsergebnisse exemplarisch dargestellt.

3 Veränderung der jährlichen mittleren und maximalen Wassertemperaturen

An allen langjährigen Messstellen mit einer Reihenlänge von mindestens 30 Jahren treten bis auf die Messstelle Hohenstadt an der Pegnitz signifikant steigende mittlere jährliche Wassertemperaturen auf. Die Zeitreihe der Messstelle in Hohenstadt sowie einzelne Messstellen mit kürzeren Zeitreihen weisen keine Veränderung auf (Abbildung 2).

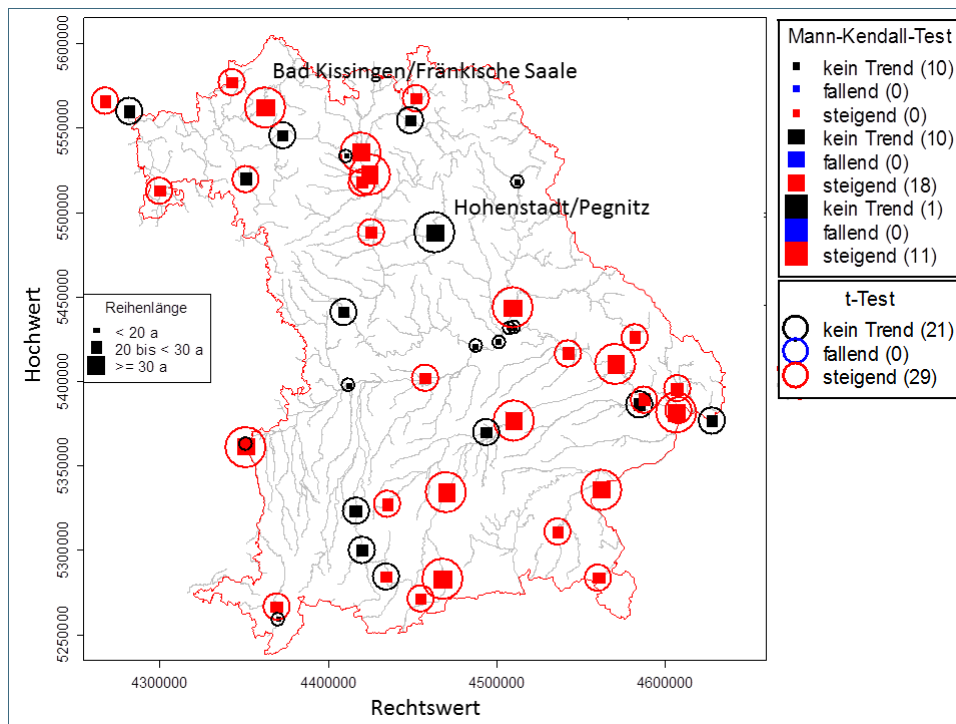


Abb. 2: Trends der mittleren jährlichen Wassertemperatur an den bayerischen Messstellen; Untersuchungszeitraum je nach Länge der Messzeitreihen

Über den gesamten Betrachtungszeitraum wurden keine sinkenden Wassertemperaturtrends ermittelt und die beobachtete Gewässertemperaturzunahme betrifft alle Landesteile von Bayern gleichermaßen. Gemittelt über die 50 Pegel beträgt der mittlere jährliche Anstieg seit 1980 etwa 0,05°C pro Jahr und beläuft sich auf knapp 1°C in zwanzig Jahren. Demnach ist die Temperaturerhöhung in den Fließgewässern teilweise sogar noch etwas höher als bei der Lufttemperatur. Als Beispiel für einen typischen steigenden Temperaturverlauf wurde exemplarisch die Messstelle in Bad Kissingen an der Fränkischen Saale (Abbildung 3) der Messstelle in Hohenstadt an der Pegnitz (Abbildung 4) gegenübergestellt. Vor allem am Beispiel der Messstelle Hohenstadt wird der Unterschied in der Aussagekraft einzelner statistischer Methoden deutlich. So weist die lineare Regression (rote Linie) über den gesamten Zeitraum der vorliegenden Daten keinen Trend auf (in Abbildung 2 als schwarzes Quadrat in einem schwarzen Kreis). Im Gegensatz dazu zeigt sich unter Verwendung eines zeitlich variierenden Betrachtungsfensters mittels lokal gewichteter Regression (grüne Linie) an beiden Standorten zunächst ein abnehmender Trend. Die-

sem folgen stationäre Wassertemperaturverhältnisse am Ende der 1970er bis zum Anfang der 1980er Jahre und anschließend ein steigender Temperaturtrend bis in die Gegenwart.

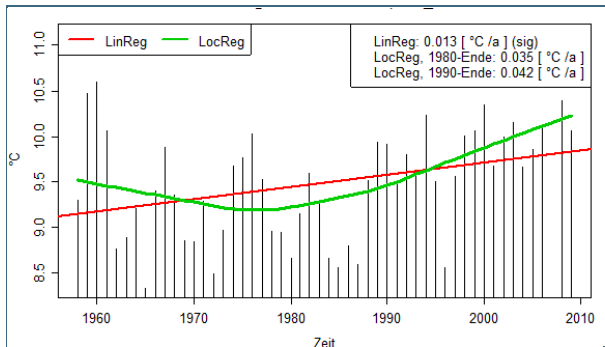


Abb. 3: Verlauf der Wassertemperatur im Jahresmittel an der Messstelle Bad Kissingen / Fränkische Saale; rote Linie: lineare Regression, grüne Linie: lokal gewichtete Regression

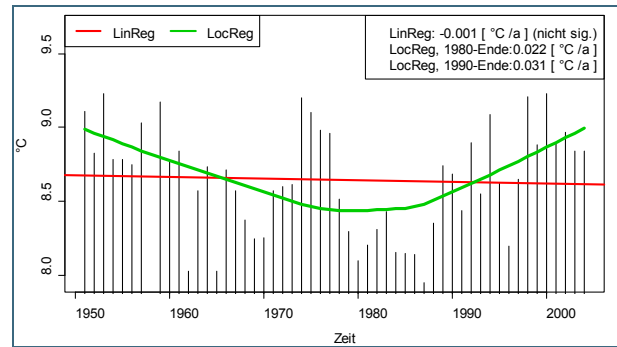


Abb. 4: Verlauf der Wassertemperatur im Jahresmittel an der Messstelle Hohenstadt / Pegnitz; rote Linie: lineare Regression, grüne Linie: lokal gewichtete Regression

Die Tendenzen in den jährlichen Maximaltemperaturen sind weniger klar ausgeprägt (Abbildung 5). Lediglich ein Viertel der längeren Zeitreihen (>20 Jahre) weisen einen signifikanten Anstieg auf. Dabei konzentriert sich die Tendenz zur Erhöhung der maximalen Wassertemperaturen ebenfalls auf den Zeitraum seit Ende der 1980er Jahre. Auch die Änderungsrate der maximalen Jahrestemperatur entspricht nahezu der Änderungsrate der mittleren jährlichen Gewässertemperatur und ist nur geringfügig niedriger. Die Messstelle Hohenstein an der Pegnitz tritt auch in diesem Fall auffällig in Erscheinung. Es ist die einzige lange Zeitreihe mit abnehmender maximaler Gewässertemperatur (Abbildung 5, blaues Quadrat im blauen Kreis).

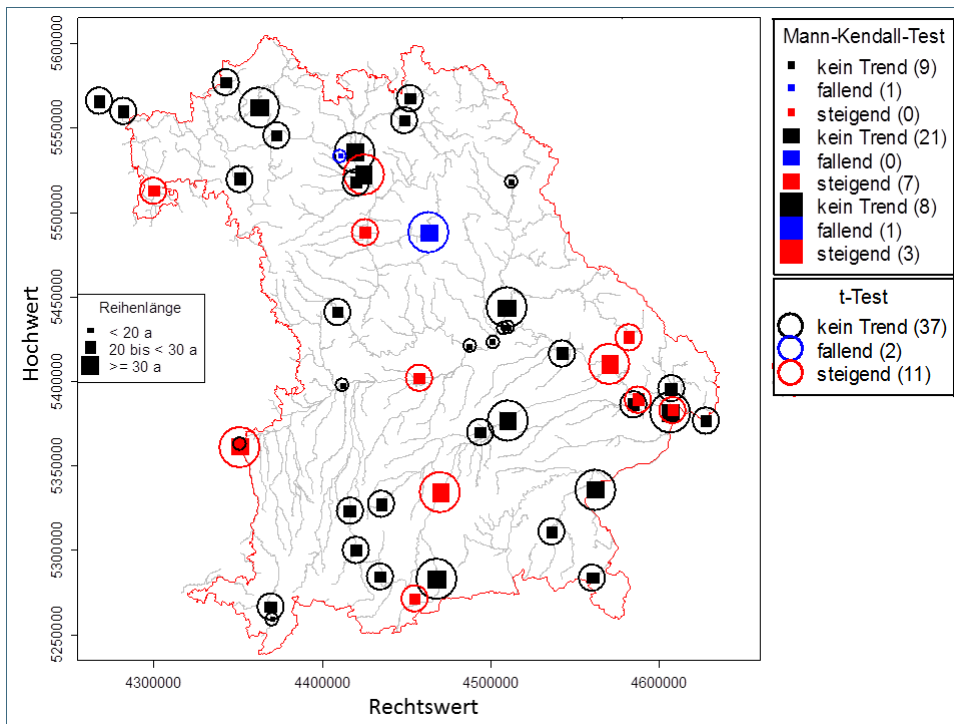


Abb. 5: Trends der jährlichen Maximaltemperaturen

4 Veränderungen in der Dauer von Wärmeperioden

Die Längen der Zeiträume erhöhter Wassertemperaturen über einem Schwellenwert (Überschreitungs-dauern des 90%-Quantils) zeigen ein ähnliches Muster wie die Trendentwicklung der mittleren Jahres-temperatur der Fließgewässer (Abbildung 6). Dies bedeutet, dass die Fließgewässer in Bayern tendenzi-ell nicht nur wärmer geworden sind, sondern diese auch längere Zeit hohe Temperaturen aufweisen. Insbesondere seit Ende der 1980er Jahre beträgt die Verlängerung durchschnittlich etwa 1 Tag pro Jahr. Die einzige Ausnahme bildet auch hier wieder der Pegel Hohenstadt an der Pegnitz.

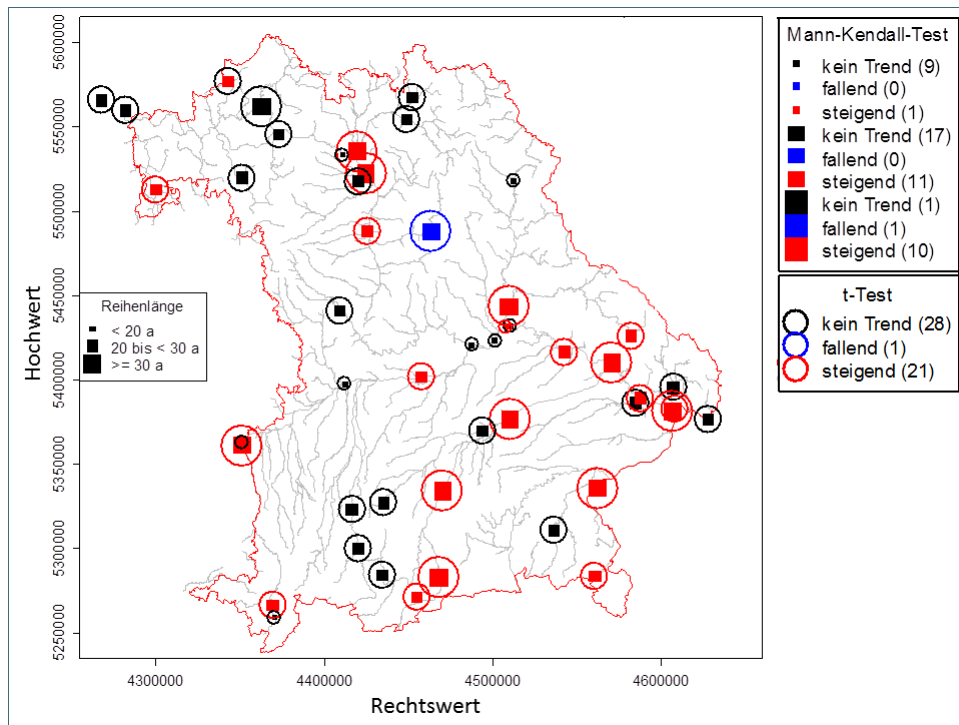


Abb. 6: Trend der Längen der Zeiträume erhöhter Wassertemperaturen über einen Schwellenwert (Überschreitungsdauern des 90%-Quantils)

5 Saisonale Veränderungen der Wassertemperatur

Eine saisonal differenzierte Auswertung ergab für die mittleren monatlichen Wassertemperaturen, dass signifikante Zunahmen insbesondere in den Sommermonaten (Mai-August) vorkommen (Abbildung 7), wobei aber – je nach Messstelle – signifikante Veränderungen auch zu allen anderen Monaten auftreten. Auch hier ist kein klares räumliches Muster zu verzeichnen. Der detaillierte Blick auf das monatliche Trendverhalten der Gewässertemperatur zeigt, dass der für den Pegel Hohenstadt beobachtete, gegenläufige Trend im Wesentlichen auf Temperaturabnahmen in den Sommermonaten zurückzuführen ist. Hingegen weisen die Wintermonate eine Zunahme der monatlichen Wassertemperaturen auf. Weiterhin ergaben die Untersuchungen, dass das Gewässertemperaturmaximum seit den 1980er Jahren immer früher im Jahr eintritt. Im Gegensatz dazu haben die Amplituden des Jahresganges, also die Spannweite zwischen den tiefsten und den höchsten Temperaturen eines Jahres, ein weniger gleichförmiges Verhalten. Dennoch zeichnet sich seit dem Ende der 1980er Jahre eine Tendenz zur Zunahme der Amplituden bei vielen Messstellen ab.

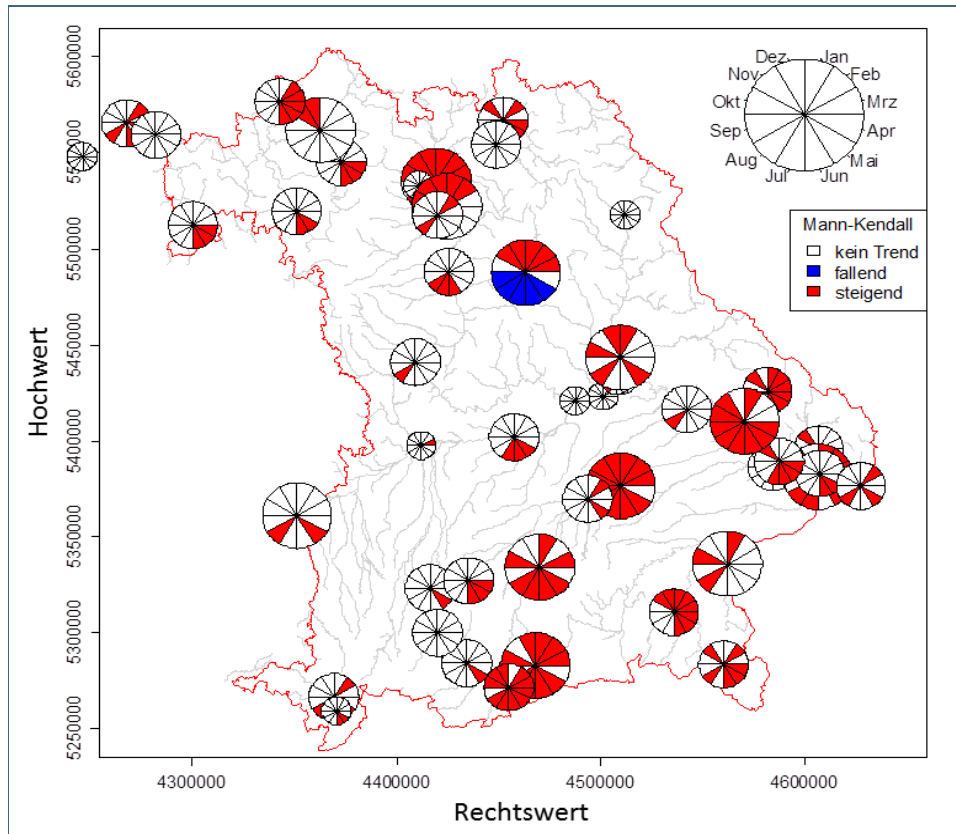


Abb. 7: Veränderungen der mittleren monatlichen Wassertemperaturen; die Kreissegmente zeigen das Trendverhalten für die 12 Monate des Jahres; die Größe des Kreises ist proportional zur Reihenlänge

6 Ursachen der Veränderung von Wassertemperaturkennwerten

In der statistischen Analyse (multiple Regression) wurden neben der Lufttemperatur eine Reihe weiterer möglicher Einflussfaktoren, wie der Bebauungsgrad und die Versickerungsraten, auf die Wassertemperatur untersucht. Anhand dieses statistischen Modells konnten rund 70 % der Veränderungen der mittleren jährlichen Gewässertemperatur erklärt werden. Hierbei lassen sich wiederum die größten Anteile anhand der Veränderungen der Lufttemperatur nachvollziehen. Luft- und Wassertemperatur korrelieren demnach sehr stark miteinander (mittleres $R^2 = 0,7$). Der nicht erklärte Anteil von knapp 30 % geht auf nicht erfasste, natürliche Faktoren und menschliche Beeinflussungen zurück. Als menschliche Einflussfaktoren kommen zum Beispiel Stauhaltungen bei Wasserkraftanlagen oder Speicherseen sowie Aufwärmungen durch Einleitungen von Kraftwerken zum Tragen. Auch zwischen der maximalen Wassertemperatur und der Lufttemperatur gibt es einen positiven, wenn auch weniger stark ausgeprägten Zusammenhang (mittleres $R^2 = 0,33$). Dies liegt daran, dass Veränderungen der maximalen Wassertemperaturen nicht linear mit den Lufttemperaturen korrelieren, da laut Mohseni & Stefan (1999) bei hohen Lufttemperaturen der abkühlende Einfluss der Verdunstungskälte die Wassertemperatur reduziert.

7 Zusammenfassung

Die Wassertemperatur ist für alle biologischen und ökologischen Prozesse in Fließgewässern und damit für deren Gewässerqualität ein elementarer Faktor. Durch die begrenzte Aufnahmekapazität für Abwärme von Kraftwerken und Industrieanlagen sind auch menschliche Nutzungen von Veränderungen betroffen. Die vorliegende statistische Untersuchung der bayerischen Temperaturmessreihen von 50 Messstellen in Fließgewässern kann größtenteils eine deutliche Erwärmung in den letzten 30 bis 60 Jahren belegen. So konnte seit 1980 im Mittel aller untersuchten Gewässer ein statistisch signifikanter Anstieg der mittleren jährlichen Wassertemperatur um etwa $0,05^\circ\text{C}$ pro Jahr ermittelt werden. Räumliche Unterschiede sind dabei nicht zu erkennen. Der ansteigende Trend bestätigt sich auch in der differenzierten

Betrachtung der Monatsmitteltemperaturen. Allerdings tritt dieser Trend in den Sommermonaten von Mai bis August besonders deutlich hervor. Darüber hinaus tritt das Temperaturmaximum seit den 1980er Jahren immer früher im Jahresverlauf auf. Für den gleichen Zeitraum sind auch eine Tendenz zur Erhöhung der jährlichen Temperaturamplitude sowie eine Verlängerung von Wärmephasen (Überschreitungsdauern des 90%-Quantils) um etwa 1 Tag pro Jahr zu erkennen.

Auf der Basis einer multiplen Regressionsanalyse konnte statistisch signifikant ein starker Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Lufttemperatur und der mittleren jährlichen Gewässertemperatur nachgewiesen werden. Dieses Signal ist weniger deutlich bei den Maximalwerten erkennbar, da hier durch Verdunstung über den Gewässern die Luft- und damit auch die Wassertemperatur deutlich reduziert werden. Neben den klimatischen Einflüssen, welche für den größten Teil der Gewässererwärmung verantwortlich sind, verstärken viele menschliche Eingriffe, wie zum Beispiel das Errichten von Staustufen die Erwärmung. Eine Trennung der Ursachen und Einflussgrößen ist im Einzelfall nur eingeschränkt möglich.

8 Literaturquellen

BayFischGewV - Bayerische Fischgewässerqualitätsverordnung (1997): Verordnung über die Qualität von schutz- oder verbesserungsbedürftigem Süßwasser zur Erhaltung des Lebens der Fische. 30.04.1997 (GVBl 1997, S. 101).

KLIWA (2011): Klimawandel in Süddeutschland. Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA. Monitoringbericht 2011.

Mohseni, O. and Stefan, H.G. (1999): Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation. Journal of Hydrology 218, p. 128–141.

OGewV - Oberflächengewässerverordnung (2011): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer. (BGBl. I S. 1429)

Willems, W. (2011): Langzeitverhalten von Niedrigwasserabflüssen und Wassertemperaturen in Bayern: Strukturen und Ursachen von Veränderungen. Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt. Bericht von 2011, mit Korrekturen vom März 2012. Unveröffentlichter Bericht, Ottobrunn.

Impressum:

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg

Telefon: 0821 9071-0

Telefax: 0821 9071-5556

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: <http://www.lfu.bayern.de>

Bearbeitung:

Ref. 81 / Frank Bäse, Harald Morscheid, Johann Weber

Bildnachweis:

Titelbild: Loisach Flusskilometer 80, LfU

Stand:

November 2013

Postanschrift:

Bayerisches Landesamt für Umwelt
86177 Augsburg

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbenden oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – wird um Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars gebeten.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Broschüre wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Broschüre wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.