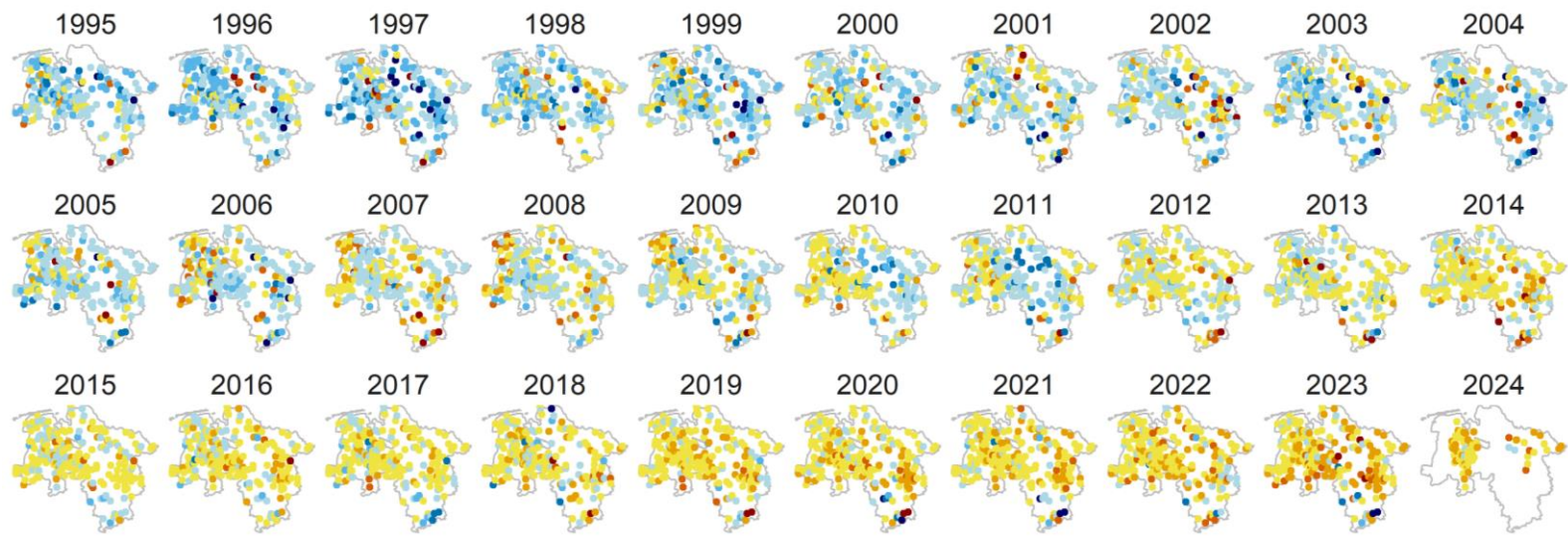




NLWKN.
Für Mensch und Umwelt.
Für Niedersachsen.

Klimawandel im Grundwasser?

Die Entwicklung der Grundwassertemperatur in Niedersachsen



Niedersachsen

Online verfügbar unter www.nlwkn.niedersachsen.de -> Service -> Veröffentlichungen -> Webshop bzw.
https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/service/veroeffentlichungen_webshop/schriften_zum_downloaden/

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1	Wärmehaushalt im Untergrund	2
1.2	Ökosystem Grundwasser	3
2.	Methodik	4
2.1	Datengrundlage	4
2.2	Methodisches Vorgehen und Auswertungs-Software	6
3.	Ergebnisse und Diskussion.....	8
3.1	Entwicklung der Grundwassertemperatur (1995–2024).....	8
3.2	Entwicklung der Grundwassertemperatur an einzelnen Messstellen	13
3.3	Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Grundwassertemperatur	16
4	Auswirkungen der Temperaturveränderung im Grundwasser	21
5	Zusammenfassung und Ausblick	22
	Literaturverzeichnis.....	24

1. Einleitung

Das Grundwasser ist ein System mit langfristig stabilen Umweltbedingungen, dem weitestgehend ausgeglichene Temperaturen zugeschrieben werden (Di Lorenzo und Reboleira 2022; Griebler et al. 2014; Hahn 2015; Kobus und Söll 1987; Retter et al. 2021). Die jährlichen Schwankungen betragen aufgrund der dämpfenden Eigenschaften des Untergrunds etwa $\pm 1\text{ °C}$ in Deutschland (Griebler et al. 2014; Kobus und Söll 1987). Es finden sich jedoch vermehrt Hinweise in Literatur und Presse, dass eine Erwärmung des Grundwassers weltweit stattfindet (Ascott et al. 2023; Gunawardhana et al. 2011; Jyväsjärvi et al. 2015; Odenwald 2019; Park et al. 2011; Taylor und Stefan 2009; Urban 2015). Beispielsweise wurden in Südkorea steigende Temperaturen bis zu $0,1\text{ °C}$ pro Jahr in der Mehrzahl der beprobten flachen sowie tiefen Grundwassermessstellen festgestellt (Lee et al. 2014; Park et al. 2011). Taylor und Stefan (2009) beschrieben einen Anstieg der Untergrundtemperaturen in Minnesota (USA) mit abwärts gerichtetem Wärmestrom und prognostizierten einen modellbasierten möglichen Anstieg um $3\text{--}5\text{ °C}$ in den nächsten Dekaden. In Südengland wurde zwischen 2012 und 2022 ein Anstieg der Grundwassertemperaturen an 75 % der beprobten Messstellen mit einem mittleren Trend von $0,7\text{ °C}$ in dieser Dekade ermittelt (Ascott et al. 2023).

Studien aus Österreich, der Schweiz und Deutschland zeigen ähnliche Trends (Benz et al. 2018; Epting et al. 2021; Figura und Livingstone 2013; Hemmerle und Bayer 2020; Hergesell 2016; Menberg et al. 2014; Riedel 2019; Schartner und Kralik 2011). Eine lineare Analyse der Grundwassertemperaturen in Österreich ergab einen Anstieg um $0,4 \pm 0,5\text{ °C}$ in 10 Jahren (Benz et al. 2018). In der Schweiz wurde eine Erwärmung von $0,5\text{--}0,7\text{ °C}$ pro Jahrzehnt im Betrachtungszeitraum 1980–2000 verzeichnet (Figura und Livingstone 2013). Grundwassertemperaturen in Deutschland in Gebieten ohne vermeintliche anthropogene Störungen zeigten Anstiege zwischen $0,1\text{--}0,4\text{ °C}$ pro Dekade (Hemmerle und Bayer 2020; Riedel 2019). Unter Städten wurden im Grundwasser höhere Temperaturen als im Durchschnitt gemessen (Urban Heat Islands). Anthropogene Störungen der Grundwassertemperatur können an lokalen Hotspots einen Anstieg von mehr als 20 °C bewirken (Menberg et al. 2013).

Als treibende Faktoren für den Anstieg der Grundwassertemperaturen sowohl lokal als auch global werden der Klimawandel und die zunehmende Urbanisierung benannt (Benz et al. 2018; Riedel 2019; Taniguchi et al. 1999; Taylor und Stefan 2009). Während die Temperaturerhöhung in urbanen Gebieten primär durch lokal bis regional wirkende anthropogene Störungen verursacht wird, wird angenommen, dass die langfristige Entwicklung der Grundwassertemperatur in weniger gestörten, ländlichen Gebieten maßgeblich durch die globale Erwärmung und ferner durch Landnutzungsänderungen geprägt wird (Benz et al. 2018; Epting et al. 2021; Hemmerle und Bayer 2020; Taylor und Stefan 2009). Zahlreiche Studien belegen, dass sich der Anstieg der

Lufttemperatur in der Entwicklung der Grundwassertemperatur widerspiegelt (Benz et al. 2018; Hergesell 2016; Park et al. 2011; Schartner und Kralik 2011). Der Temperaturanstieg im Grundwasser erfolgt sukzessive und tiefenabhängig mit einer zeitlichen Verzögerung zur Entwicklung der Lufttemperatur (Park et al. 2011; Retter et al. 2021). Dabei hängen die zeitliche Verzögerung und das Ausmaß der Erwärmung u.a. von den lokalen hydrogeologischen Bedingungen, den thermischen Eigenschaften des Untergrunds und der Größe des Aquifers ab (Hemmerle und Bayer 2020; Jyväsjärvi et al. 2015; Kurylyk et al. 2015).

Im Februar 2024 wurde zum ersten Mal gemeldet, dass die globale Erderwärmung zwölf Monate lang über dem erklärten Klimaschutzziel einer maximalen Erwärmung von $+1,5\text{ °C}$ lag (EU-Klimadienst Copernicus 2024). Nach den Ergebnissen des sechsten IPCC-Berichts wird die durchschnittliche Oberflächentemperatur der Erde je nach Emissionsszenario bis Ende des 21. Jahrhunderts um bis zu $+5,7\text{ °C}$ im Vergleich zum vorindustriellen Referenzwert (1850–1900) zunehmen (IPCC 2021). Cavelan et al. (2022) sprechen sogar von lokal auftretenden stärkeren Schwankungen von bis zu $+9\text{ °C}$, die in den kommenden Jahrzehnten zu einer durchschnittlichen Oberflächentemperatur zwischen $12\text{--}20\text{ °C}$ (derzeit zwischen $10\text{--}14\text{ °C}$) führen könnte. Für Norddeutschland wird in regionalen Klimaszenarien eine Fortsetzung der Erwärmung um $+1$ bis $+5\text{ °C}$ bis zum Jahr 2100 prognostiziert (Meinke 2020). Es ist daher wahrscheinlich, dass auch die Grundwassertemperatur weiter ansteigen wird (Hemmerle und Bayer 2020; Kurylyk et al. 2015; Schartner und Kralik 2011).

Für die Grundwassergüte stellt die Temperatur einen bedeutenden Einflussfaktor dar (Figura und Livingstone 2013; NLWKN 2014). Sie reguliert biologische und chemische Prozesse, die die wichtigen Stoffkreisläufe in Boden und Grundwasser beeinflussen (Riedel 2019). Außerdem ist sie ein entscheidender Faktor für die Besiedlung der Grundwasserlebensräume durch Organismen (BMLFUW 2015), die wiederum für die natürliche Reinigung des Grundwassers eine erhebliche Rolle spielen (Griebler und Avramov 2015). Als Beispiel ist hier der Einfluss der Temperatur auf das Denitrifikationspotential in Böden zu nennen (Schäfer et al. 2018). Somit ist die Temperatur ein Schlüsselparameter für die Aufrechterhaltung des ökologischen Gleichgewichts in Grundwasserökosystemen (Gunawardhana et al. 2011). Der Anstieg der Grundwassertemperatur stellt für das System eine Störung dar und wird sich auf einer Zeitskala von Dekaden auf die unterirdischen Lebensräume, Prozesse und entsprechend auf die Grundwassergüte auswirken (Baker und Baker 2002; Burns et al. 2017; Griebler et al. 2014; Menberg et al. 2014; Retter et al. 2021). Der Gesamtumfang dieser Auswirkungen ist unklar, allerdings können selbst kleine Temperaturveränderungen einen nachweisbaren Effekt auf die Grundwasserqualität haben (Riedel 2019).

Obwohl der Umfang der Auswirkungen nicht absehbar ist, wird deutlich, dass die Veränderung der Grundwassertemperatur als Folge des Klimawandels zukünftig eine Rolle für

die Wasserqualität spielen wird. Daher ist es wichtig, die potenziellen Auswirkungen der Temperaturerhöhungen zu bewerten (Gunawardhana et al. 2011). Die geringe Verfügbarkeit langfristiger Messungen der Grundwassertemperatur erschwert es jedoch fundierte Aussagen über den Einfluss des Klimawandels auf die Wasserqualität zu treffen (Figura und Livingstone 2013). Um den Klimaeinfluss in Daten abzubilden, werden auf Empfehlung der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) Zeitreihen von mindestens 30 Jahren betrachtet (Kaspar et al. 2021). Auch andere Quellen weisen auf die Seltenheit von ausreichend langen Zeitreihen zur Temperaturentwicklung im Grundwasser hin. Sie stellen fest, dass bei vorhandenen Zeitreihen lokale Effekte die klimatisch bedingte Entwicklung der Grundwassertemperatur überlagern können oder es wurden nur Effekte auf ausgewählte Brunnen untersucht, anstatt groß angelegte Studien durchzuführen (Benz et al. 2018; Hemmerle und Bayer 2020; Riedel 2019).

Der NLWKN zeichnet während der Grundwasser-Probenahme standardmäßig Temperaturdaten als Vor-Ort-Parameter mit auf. Diese Daten werden in diesem Bericht erstmalig landesweit ausgewertet. Das Hauptziel ist es die Entwicklung der Grundwassertemperatur in Niedersachsen über einen Zeitraum von 30 Jahren (1995–2024) darzustellen und Abhängigkeiten von möglichen Einflussfaktoren zu untersuchen. Darüber hinaus werden Erkenntnisse aus der internationalen Literatur zum Wärmehaushalt des Untergrunds, zum Ökosystem Grundwasser und zur Grundwassertemperaturentwicklung dargestellt und die Auswirkungen von Temperaturveränderungen im Grundwasser diskutiert.

Leitfragen:

- Was definiert den Wärmehaushalt im Untergrund?
- Wie sieht das Ökosystem Grundwasser aus und welche Rolle spielt die Temperatur im Ökosystem Grundwasser?
- Wie hat sich die Grundwassertemperatur in Niedersachsen in den letzten 30 Jahren entwickelt?
- Kann ein Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Grundwassertemperatur und dem Klimawandel festgestellt werden?
- Welche Einflussfaktoren wirken auf die Entwicklung der Grundwassertemperatur und wie groß ist ihr Einfluss?
- Welche Auswirkungen kann eine Temperaturveränderung im Grundwasser haben?

1.1 Wärmehaushalt im Untergrund

Der Wärmehaushalt im Grundwasser ist definiert als die Summe aller Wärmebilanzgrößen der Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe (LAWA 1987). Diese teilen sich in natürliche

und anthropogene Einflussgrößen (Willy 2001). Zu den natürlichen Einflüssen zählen die Strahlungsenergie, also die Sonneneinstrahlung am Tag und die Abstrahlung des Bodens in der Nacht, der geothermische Wärmestrom sowie aufsteigendes Wasser und der Wärmeeintrag, bzw. Wärmeentzug durch infiltrierendes Wasser, Kondensation und Verdunstung (Epting et al. 2021; Kobus und Söll 1987; LAWA 1987; Willy 2001). Zusätzlich beeinflusst das fließende Grundwasser durch den konvektiven Transport von Wärme den Wärmehaushalt (Epting et al. 2021; Nützmänn und Moser 2016). Anthropogene Einflussfaktoren sind vor allem der Wärmeeintrag durch Gebäude, Tunnel und Leitungen, durch oberflächennahe Geothermie, durch unterirdische Stromtrassen von Windkraftanlagen und der Wärmeeintrag sowie -entzug durch Einleitungen thermal genutzter Grundwässer (Epting et al. 2021; LAWA 1987; Nützmänn und Moser 2016; Spengler 2017). Außerdem beeinflussen anthropogene Aktivitäten wie die landwirtschaftliche Entwicklung oder Urbanisierung, also Landnutzungsänderungen, den Wärmehaushalt an der Bodenoberfläche, was sich indirekt auch im Grundwasser auswirkt (Epting et al. 2021; Taylor und Stefan 2009).

Der Wärmetransport im Untergrund erfolgt zum einen durch Konduktion, das ist die Wärmeleitung und -speicherung von Boden, Gestein und Grundwasser, und zum anderen durch Konvektion, das ist der Wärmetransport durch fließendes Grundwasser sowie infiltrierendes Oberflächen- und Niederschlagswasser (Epting et al. 2021; Kobus und Söll 1987; LAWA 1987; Taylor und Stefan 2009). Ausschlaggebende Faktoren für die Konduktion sind sowohl die Wärmeleitfähigkeit als auch die Wärmekapazität der Boden- und Gesteinsschichten. Die Konvektion ist abhängig vom Hohlraumgefüge, dem hydraulischen Gradienten und der hydraulischen Leitfähigkeit des Untergrunds (Griebler et al. 2014). Grundsätzlich wird angenommen, dass die Temperatur in tiefen Schichten von Porengrundwasserleitern annähernd konstant ist, während sie in Kluft- und Karstgrundwasserleitern aufgrund der höheren Fließgeschwindigkeit und der geringeren Speicherkapazität durch die dort auftretenden Klüfte, Spalten und Höhlen schwankt (Fuchs et al. 2006).

In Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren wie beispielsweise dem Flurabstand, des Materials im Untergrund und oben genannten Einflussfaktoren können periodische tages- und jahreszeitliche Temperaturschwankungen je nach Region bis in eine Tiefe von 10–25 m beobachtet werden (Dohr 2011; Kobus und Söll 1987; Landeshauptstadt Dresden 2010; Nützmänn und Moser 2016; Otto 2003; Taylor und Stefan 2009). Darunter liegt die isotherme Zone, in der annähernd konstante Temperaturen herrschen (Nützmänn und Moser 2016). Die Grundwassertemperatur wird in dieser Tiefe hauptsächlich von langfristigen, nicht-periodischen Änderungen der Lufttemperatur geprägt (Beltrami et al. 2005). Sie entspricht in etwa dem vieljährigen Jahresmittel der Lufttemperatur, welches für die aktuelle Referenzperiode (1991–2020) bei 9,3 °C liegt (Kaspar et al. 2021; Kobus und Söll 1987; Otto 2003). Unterhalb der isothermen Zone bestimmt

der geothermische Wärmestrom die Temperatur (Nützmann und Moser 2016; Otto 2003).

1.2 Ökosystem Grundwasser

Das Grundwasser dient nicht nur vielen Bakterien und Mikroorganismen als Lebensraum, sondern beherbergt ebenfalls eine artenreiche und hochangepasste Fauna, deren Vertreter in der Regel klein, wirbel-, augen- und pigmentlos sind (Griebler et al. 2014; Hahn 2005; Hahn et al. 2018; Hunkeler et al. 2006). Sie ist dort vertreten, wo ausreichend Sauerstoff zur Verfügung steht, und setzt sich hauptsächlich zusammen aus Krebstieren, Schnecken, Würmern und Milben (Griebler et al. 2014; Hahn et al. 2018). Die Organismen werden in drei Gruppen unterteilt: stygophil, stygoxen und stygobiont. Während stygophile und stygoxene Lebewesen nur ein Teilstadium ihres Lebenszyklus im Grundwasser verbringen, beschränkt sich für Stygobionten der komplette Kreislauf auf das Grundwasser (Griebler et al. 2014; Hunkeler et al. 2006). Das überwiegend geringe Nahrungsangebot im Grundwasser führt zu niedrigen Reproduktionsraten und einer langsamen Entwicklung der Tiere, die allerdings ein Alter von mehr als zehn Jahren erreichen können (Hahn 2005; Hunkeler et al. 2006).

Derzeit sind über 7000 unterirdisch lebende Tierarten bekannt und es werden regelmäßig neue gefunden und beschrieben – regionalen Schätzungen zufolge soll es weltweit 50.000-100.000 geben (Di Lorenzo und Reboleira 2022; Hahn et al. 2018; Hunkeler et al. 2006). In Europa sind etwa 2.000 Arten bekannt, wovon in Deutschland etwa ein Fünftel gefunden wurde (Hahn 2015; Hahn und Friedrich 1999). Hinzu kommen die Mikroorganismen mit 100 bis 10.000 lebenden Zellen pro Milliliter (Hunkeler et al. 2006). Viele Tierarten im Grundwasser sind selten, weil eine Vielzahl von ihnen endemisch, d.h. ihre Verteilung lokal eng begrenzt ist (Hahn 2015; Hahn und Fuchs 2009; Hunkeler et al. 2006). Die Artenzahl steigt entsprechend proportional zur Zahl der untersuchten Standorte (Hahn 2015). Im Allgemeinen sind im oberflächennahen Grundwasser die meisten Arten und höchsten Populationsdichten zu finden. Mit der Tiefe nehmen Artenzahl, Abundanz, Diversität und Besiedlungsfrequenz äquivalent zur Nahrungs- und Sauerstoffverfügbarkeit ab (Fuchs et al. 2006). Die Besiedelung und Artenzusammensetzung ist demnach vom Austausch mit der Oberfläche bzw. dem Oberflächenwasser geprägt und hängt von den hydraulischen Eigenschaften des Bodens und des Grundwasserleiters, vom Klima und von der Landnutzung heutzutage, aber auch früheren Zeitaltern ab (Fuchs et al. 2006; Hunkeler et al. 2006). Die Grundwasserfauna der norddeutschen Tiefebene wurde durch die Eiszeiten geprägt. Stygobionte Arten sind kaum anzutreffen und aufgrund des sauerstoffarmen Grundwassers sind nur wenige Standorte durch höhere Organismen besiedelt (Hahn 2015).

Die Nahrungsgrundlage für die heterotrophen Grundwassertiere bilden organisch gebundene Kohlenstoffe (Hunkeler et al. 2006). Das können gelöste und partikuläre organische

Stoffe aus dem Sickerwasser, Biofilme bzw. Bakterienmaten, Protozoen oder andere Grundwassertiere sein (Hahn 2005, 2015; Hunkeler et al. 2006). Ein gutes Nahrungsangebot stellt gleichzeitig ein wesentliches Kriterium für die Besiedlung dar. So können zum Beispiel CKW-belastete Grundwässer durch das erhöhte Nahrungsangebot stärker besiedelt sein als andere Standorte (Hahn 2005). Die Mineralisierung organischer Kohlenstoffe, also auch der Abbau von Nähr- und Schadstoffen, durch Mikroorganismen und Grundwassertiere, ist eine der wichtigsten Ökosystemdienstleistungen im Grundwasser (Griebler et al. 2014; Griebler und Avramov 2015; Hahn 2015). Hinzu kommt das Abweiden von substratüberziehenden Biofilmen. Die Abweidung sorgt dafür, dass zum einen die Porenräume und Klüfte der Grundwasserleiter offen bleiben, gleichzeitig die Viren- und Bakterienlast im Grundwasser reduziert und zum anderen die Stoffwechselleistung von Bakterien angeregt wird (Danielopol et al. 2003; Hahn 2005; Hahn et al. 2018). Das bedeutet, dass biologische Vorgänge sauberes Grundwasser entstehen lassen, dessen Qualität ohne Aufbereitung schon den Vorgaben für Trinkwasser entsprechen kann (Danielopol et al. 2003; Hahn 2015).

Die Umweltbedingungen im Grundwasser sind geprägt durch konstante Dunkelheit, räumliche Enge, den Mangel an Nährstoffen und Energie sowie stabile Temperaturen, an die die Grundwassertiere physiologisch optimal angepasst sind (Griebler et al. 2014; Hahn 2005; Matzke et al. 2009; Retter et al. 2021). Biologische Vorgänge, wie Zellwachstum oder Stoffwechselaktivität, und chemische Reaktionen sind eng an die Temperatur gekoppelt (Griebler et al. 2014). Das macht die Temperatur zu einem Schlüsselparameter sowohl für die Mikroorganismen als auch für die Grundwasserfauna (Briellmann et al. 2009; Griebler et al. 2014; Kobus und Söll 1987; Spengler 2017).

Allgemein wird davon ausgegangen, dass eine Temperaturerhöhung zu einer erhöhten Reaktionsgeschwindigkeit und einem verstärkten Stoffumsatz bei Bakterien führt (Griebler et al. 2014). Jede Bakterienart besitzt jedoch einen idealen Temperaturbereich mit einem Temperaturoptimum, an dem der Organismus am leistungsfähigsten ist (Griebler et al. 2014). Grundwasser mit Temperaturen um die 10–12 °C bietet kälteliebenden und -toleranten Arten einen optimalen Lebensraum. Ändern sich die Rahmenbedingungen durch einen Anstieg der Temperatur, ändert sich auch die bakterielle Gemeinschaft. Ab 15–20 °C werden bereits mesophile Arten gefördert (Griebler et al. 2014). Da einzelne Bakterien in der Lage sind verschiedene metabolische Aktivitäten auszuführen, muss eine Störung des Systems nicht zwangsläufig zu einer Änderung der Diversität führen, sondern kann lediglich ein verändertes Muster der metabolischen Aktivitäten im System zur Folge haben. Das Vorhandensein einer Bakterienart lässt folglich nicht automatisch auf eine eindeutige Rolle der Art im Ökosystem schließen, auch wenn es Spezialisierungen innerhalb der Trophie gibt (Hunkeler et al. 2006; Saccò et al. 2024).

Innerhalb der faunistischen Lebensgemeinschaften gibt es ebenfalls wärmeempfindliche und wärmetolerante Arten, wodurch eine Temperaturerhöhung des Grundwassers potentiell eine Veränderung im Artenspektrum hervorrufen würde (Spengler und Hahn 2018). In der Literatur werden unterschiedliche, maximal tolerierbare Temperaturen für einzelne faunistische Grundwasserarten beschrieben (Griebler et al. 2014; Koch et al. 2021; Retter et al. 2021; Spengler 2017). Griebler et al. (2014) stellten beispielsweise fest, dass Flohkrebse bei höchstens 16 °C den Versuchszeitraum von 50 Tagen unbeschadet überstanden. Die überwiegende Anzahl der Stygobionten ist jedoch an niedrigere Temperaturen gebunden. Der präferierte Temperaturbereich liegt unterhalb von 14 °C (Spengler 2017). Spengler (2017) konnte sogar einen regionalen Schwellenwert, ab dem sich die Zusammensetzung der Faunagemeinschaft verschiebt, von 12,4 °C für die Faunagemeinschaft am Oberen Rheingraben feststellen. Es gibt jedoch auch einige Grundwasserarten, die eine breitere Temperaturtoleranz aufweisen (Eme et al. 2014; Spengler 2017). Es wird vermutet, dass Arten, die höhere Temperaturen tolerieren, nicht gänzlich stygobiont sind, sondern im Austausch mit der Oberfläche stehen, bzw. einen Teil ihres Lebenszyklus dort verbringen (Spengler 2017). Dazu passt, dass Lebewesen, die Bereiche in Oberflächennähe besiedeln, aufgrund der saisonalen Temperaturschwankungen toleranter gegenüber Temperaturänderungen sind, als Tiere, die in tieferen Lagen anzutreffen sind, wo die Temperatur als stabil gilt (Kobus und Söll 1987; Nitzmann und Moser 2016).

Die potentielle Erwärmung des Grundwassers in Folge des Klimawandels und der thermischen Nutzung des Grundwassers gefährdet vor allem Tierarten mit kaltstenothermen Eigenschaften (Hahn et al. 2018; Menberg et al. 2014; Spengler 2017). Verschwinden diese Arten, wird eine Wiederbesiedlung in Folge ihrer lokal begrenzten Verteilung nur langsam oder nie erfolgen (Hunkeler et al. 2006). Die Temperatursensitivität ist jedoch nicht nur ein Problem auf der Ebene der Arten, sondern für die komplette faunistische Gemeinschaft im Grundwasser (Koch et al. 2021). Je größer die Biodiversität eines Ökosystems ist, desto eher bleibt die Funktionalität des Systems erhalten oder stellt sich wieder ein (Hunkeler et al. 2006). Das Grundwasser als Lebensraum weist aufgrund der beständigen, häufig über geologische Zeiträume hinweg bestehenden Bedingungen und Artengemeinschaften, bei Störungen eine geringe Resistenz sowie Resilienz auf und das Ökosystem reagiert unverzüglich auf eintretende Veränderungen (Matzke et al. 2009; Griebler et al. 2014). Da die natürliche Reinigung des Grundwassers das Resultat eines funktionierenden Grundwasserökosystems ist, ist die Dokumentation und Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwassertemperatur essentiell für den Schutz des Grundwassers (Gunawardhana et al. 2011; Spengler 2017).

In der öffentlichen Wahrnehmung gilt Grundwasser als Ressource und nicht als Lebensraum (Hahn et al. 2018; Saccò et al. 2024). So liegt der Fokus der nachhaltigen Bewirtschaftung des Grundwassers auf der Verfügbarkeit des Wassers

für den Menschen (Saccò et al. 2024). Zum Beispiel erfolgt die Bewertung des Grundwassers nach EG-Wasserrahmenrichtlinie hinsichtlich Qualität und Quantität, nicht aber nach ökologischem Zustand (EG-WRRL 2000). Um die Aufrechterhaltung des Ökosystems und der für den Menschen bedeutsamen Ökosystemdienstleistungen, wie den Nähr- und Schadstoffabbau, zu gewährleisten, ist die Berücksichtigung der ökologischen Bedürfnisse der Grundwasser-Organismen, wie des von ihnen tolerierten Temperaturbereichs, wesentlich (Saccò et al. 2024).

In der EG-Grundwasserrichtlinie wird das Grundwasser erstmals als Ökosystem benannt und im Zuge dessen die Verbesserung der Kriterien zur Erhaltung seiner Qualität und seines Schutzes genannt (EG-GWRL 2006; Hahn et al. 2018). Außerdem wird in Art. 2, Abs. 33 der EG-WRRL der Eintrag von Wärme unter den direkten und indirekten anthropogenen Verschmutzungen aufgezählt (EG-WRRL 2000). Allerdings finden die Temperatur bzw. tolerierbare Temperaturbereiche weder im für die Umsetzung relevanten Anhang V der EG-WRRL Erwähnung, noch in der Grundwasserverordnung oder im Wasserhaushaltsgesetz (EG-WRRL 2000; GrwV; Hahn et al. 2018; Spengler 2017; WHG). Lediglich die Richtlinie zur thermischen Nutzung des Untergrunds (VDI 4640, Blatt 1 (2010)) empfiehlt eine maximale Erwärmung des Grundwassers auf 20 °C und dass ± 6 °C im Vergleich zum unbeeinflussten Grundwasser nicht überschritten werden sollten. Obwohl sich Erwärmungen des Grundwassers negativ auf die Biozönose auswirken können und somit als schädliche Grundwasserveränderung nach § 3, Abs. 10 des WHG zu bewerten wären, gibt es keine gesetzlich geregelten Maßnahmen zum Erhalt der natürlichen Temperatur (Griebler et al. 2014; Hahn et al. 2018).

2. Methodik

2.1 Datengrundlage

Um die Entwicklung der Grundwassertemperatur in den letzten Jahrzehnten darzustellen, wurde die umfassende Datenbasis aus den Grundwasserüberwachungsprogrammen Niedersachsens genutzt. Zur Auswertung wurden 1258 Grundwassermessstellen aus den Messprogrammen zur Grundwassergüte herangezogen. Detaillierte Informationen zu den Messprogrammen und der Probenahme finden sich in der NLWKN Broschüre Wasserwirtschaftliche Messnetze – wozu? (NLWKN 2024), in der Veröffentlichungsreihe Grundwasser Band 18 – Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen (GÜN) (NLWKN 2014) und den grundlegenden DIN zur Grundwasserprobenahme und Temperaturmessung (DIN 38404-4; DIN 38402-13). Die Grundwassertemperatur wird während der Grundwasser-Probenahme zur Untersuchung der Grundwasserbeschaffenheit als sogenannter Vor-Ort-Parameter mit aufgezeichnet. Die Messung der Vor-Ort-Parameter erfolgt in der Regel mit Messgeräten, deren Sonden in eine Durchflussmesszelle eingesetzt werden, durch die das

abgepumpte Wasser geleitet wird. Die Nutzung von Durchflussmesszellen ist als Standardmethode beim NLWKN etabliert. Aufgrund diverser Einflussfaktoren sind potentiell geringe Messabweichungen möglich. Diese werden jedoch maximal mit 0,1–0,2 °C angenommen.

Insgesamt fanden 43328 Messwerte Eingang in die Auswertung. Davon wurden 1204 Messwerte als Ausreißer identifiziert und aus dem Datensatz entfernt. Zur Identifikation der Ausreißer wurde pro Messstelle das Fünffache der Standardabweichung zum Mittelwert addiert, bzw. von diesem abgezogen. Alle Werte, die außerhalb dieser Spanne lagen, in der sich über 99 % der Messwerte wiederfinden, wurden als Ausreißer definiert. Der um die Ausreißer reduzierte Datensatz umfasst demnach 42124 Messwerte mit Temperaturen zwischen 3,8–17,1 °C. Der Median des Datensatzes liegt bei 10,4 °C.

Die Aufzeichnung der Grundwassertemperatur begann an einzelnen Messstellen schon in den 1970er Jahren. Im Laufe der Jahrzehnte kamen immer mehr Grundwassermessstellen hinzu. Um die Entwicklung der Grundwassertemperatur darzustellen, wurden hauptsächlich die Messungen der letzten 30 Jahre betrachtet. Zum einen kann in diesem Zeitraum der Klimaeinfluss in den Daten abgebildet werden (Kaspar et al. 2021), zum anderen stehen ab Mitte der 1990er Jahre ausreichend Messungen für eine landesweite Auswertung mit aussagekräftigen Ergebnissen zur Verfügung. Zum Zeitpunkt des Datenexports waren noch nicht alle Messwerte des Jahres 2024 plausibilisiert, sodass im Jahr 2024 weniger Messstellen in die Auswertung eingingen.

Die für die Auswertung betrachteten Grundwassermessstellen werden in der Regel je nach Messzweck ein bis mehrmals im Jahr zu einem nicht definierten Zeitpunkt innerhalb des

Messturnus beprobt. Um einen unverzerrten Mittelwert pro Jahr bilden zu können, müssten die Temperaturen gleichmäßig über die verschiedenen Jahreszeiten hinweg gemessen werden (Benz et al. 2017). Die diskontinuierliche Probenahmefrequenz und der Einfluss der Saisonalität können bei Bildung von Jahresmittelwerten entsprechend zu einem verzerrten Bild der Temperaturentwicklung führen, da sich jahreszeitliche Temperaturschwankungen bis in eine Tiefe von 10–25 m durchprägen können (siehe Kapitel 1.1 *Wärmehaushalt im Untergrund*). Eine Einteilung der Messungen nach Beprobungszeitraum würde dem Verzerrungsfaktor der Saisonalität entgegenwirken. Am besten eignen sich Frühlings- und Herbstmessungen, da hier die Außentemperatur während der Probenahme den geringsten Einfluss auf die Probenahme hat. Die Betrachtung von Messstellen, die entweder nur im Frühjahr (März – Mai) oder im Herbst (September – November) beprobt werden und jährliche Messungen aufweisen, ist jedoch nicht möglich, da keine der insgesamt 1258 Grundwassermessstellen eine solche Datenreihe mit der Länge von 30 Jahren aufweist.

Um den Messstellenpool möglichst groß und damit aussagekräftig zu halten und gleichzeitig abzuschätzen, ob der generelle Trend trotz Mittelbildung durch Jahreswerte abgebildet werden kann, wurden zum einen Auswertungen mit Jahresmittelwerten der letzten 30 Jahre gemacht und zum Vergleich parallel dazu Auswertungen, in die nur die Frühjahrs- bzw. nur die Herbstmessungen eingehen. Dabei wurden für die Datenreihen der Jahresmittelwerte Messstellen genutzt, die in den letzten 30 Jahren maximal drei Jahre keine verwertbaren Daten aufweisen. Das entspricht einer Fehlwertquote von 10 %. Für die Auswertungen der Datenreihen von Frühjahrs- bzw. Herbstmessungen wurde eine Fehlwertquote von 33 % toleriert.

Messstellenauswahl aus den Messnetzen zur Grundwassergüte		
• Anzahl Messstellen		n = 1258
• Anzahl Messwerte		n = 43328
• Anzahl Messwerte nach Entfernung der Ausreißer		n = 42124
Auswertungen für Messwerte (zentrierter Mittelwert) über das gesamte Jahr und nach Frühling (Mär-Mai) und Herbst (Sep-Nov)*		
• Betrachtungszeitraum 30 Jahre (1995 - 2024)		
• Jahresmittel mit 10 % Fehlwertquote – Anzahl Messstellen		n = 327
• Frühling mit 10 % Fehlwertquote – Anzahl Messstellen		n = 10
• Herbst mit 10 % Fehlwertquote – Anzahl Messstellen		n = 7
• Frühling mit 33 % Fehlwertquote – Anzahl Messstellen		n = 94
• Herbst mit 33 % Fehlwertquote – Anzahl Messstellen		n = 31
• Tiefenauswertung Betrachtungszeitraum 30 Jahre (1995 - 2024)		
• Jahresmittel mit 20 % Fehlwertquote – Anzahl Messstellen		n = 432
• Einzelauswertung für gesamten Betrachtungszeitraum (1970 - 2024)		
• Jahresmittel mit 20 % Fehlwertquote – Anzahl Messstellen		n = 2
• Frühling mit 40 % Fehlwertquote – Anzahl Messstellen		n = 6
• Herbst mit 40 % Fehlwertquote – Anzahl Messstellen		n = 7
* Einteilung nach Jahreszeiten erfolgte nach dem Vorbild des DWD für die Luft-Temperatur		

Abbildung 1: Messstellengruppen mit Kurzbeschreibung und Anzahl der Messstellen.

Zusätzlich wurden weitere Auswertungen mit höheren Fehlwertquoten durchgeführt. Diese Auswertungen befassen sich zum einen mit der Temperaturentwicklung über die Tiefe und zum anderen mit einzelnen Messstellen, deren Datenreihen mehr als 30 Jahre umfassen. Die Fehlwertquote wurde bei der Auswertung der Temperaturentwicklung über die Tiefe auf 20 % angehoben, wodurch der Messstellenpool vergrößert wird. Da die Messstellen je nach wasserführender Schicht in unterschiedlichen Tiefen verfiltert sind, wird mit der höheren Anzahl der Messstellen gleichzeitig die räumliche Auflösung entlang der Tiefe verbessert. Bei Datenreihen, die mehr als 30 Jahre umfassen, finden sich vermehrt Jahre, in denen die Temperatur nicht erfasst wurde. Um trotzdem Aussagen zur Entwicklung der Temperatur über längere Zeiträume hinweg treffen zu können, wurden für einzelne Messreihen, bei denen die Jahresmittelwerte betrachtet wurden, die Fehlwertquoten auf 20 % und für Messreihen, bei denen die Frühjahrs- bzw. Herbstmessungen angeschaut wurden, auf 40 % angehoben. In Abbildung 2 sind alle Messstellengruppen mit Kurzbeschreibung und Anzahl der Messstellen aufgelistet.

Die Kreisdiagramme in Abbildung 2–Abbildung 5 zeigen die prozentuale Zuordnung der Messstellen zur überwiegenden Landnutzung im Umkreis von 500 m und zur Tiefe, zum Grundwasserstockwerk und dem Gesteinstyp in dem die Filter verbaut sind. Exemplarisch wurden dafür die Messstellen ausgewählt, an denen die Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre gebildet wurden (Fehlwertquote 10 %). Diese Auswahl umfasst 327 Grundwassermessstellen. Mehr als die Hälfte der Messstellen ist umgeben von ackerbaulich genutzten Flächen, jeweils rund 20 % von Grünland und Wäldern oder naturnahen Flächen und weniger als 10 % von bebauten Flächen und Feuchtflächen. Nur 20 % der betrachteten Grundwassermessstellen sind flach verfiltert, jeweils rund 40 % mittel oder tief. Die Messstellen sind größtenteils im ersten oder zweiten Grundwasserleiter verfiltert und sind entsprechend der Naturräume in Niedersachsen hauptsächlich im Lockergestein zu finden.

2.2 Methodisches Vorgehen und Auswertungs-Software

Zunächst wurden bei den Datenreihen aller betrachteten Messstellen der Mittelwert pro Jahr gebildet. Um die Temperaturentwicklungen der Messstellen vergleichen zu können, wurden die gebildeten Jahresmittelwerte zentriert. Dazu wurde der Mittelwert aller zugrundeliegenden Messwerte herangezogen und dieser von jedem Jahresmittelwert subtrahiert. Die zentrierten Temperaturwerte wurden für verschiedene Auswertungen herangezogen. Zur Betrachtung des generellen Trends wurde der geglättete Mittelwert über alle Messstellen pro Jahr mit einem Konfidenzintervall über die letzten 30 Jahre dargestellt. Im Vergleich dazu wurde die Entwicklung der Lufttemperatur in Niedersachsen von 1970 bis 2023 abgebildet. Die Daten der Lufttemperatur wurden auf der Seite des Deutschen Wetterdienstes heruntergeladen (DWD 2024).

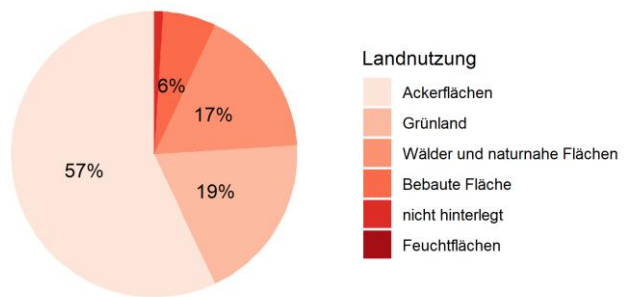


Abbildung 2: Prozentuale Zuordnung der Messstellen zum Landnutzungstyp.

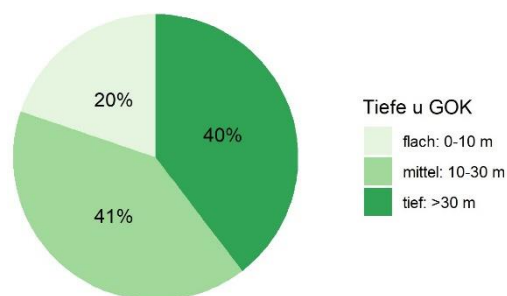


Abbildung 3: Prozentuale Zuordnung der Messstellen zur Tiefe unter Geländeoberkante (u GOK).

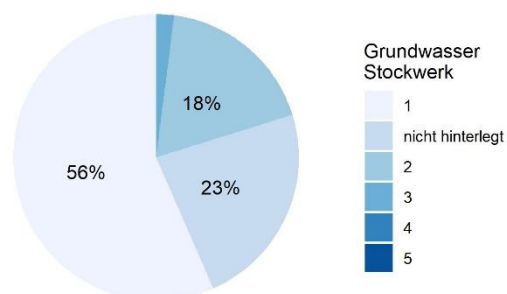


Abbildung 4: Prozentuale Zuordnung der Messstellen zum Grundwasserstockwerk.

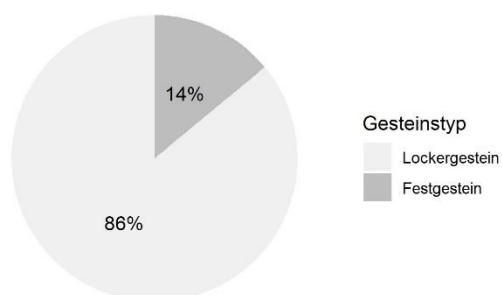


Abbildung 5: Prozentuale Zuordnung der Messstellen zum Gesteinstyp.

In der Literatur wird beschrieben, dass sich Veränderungen sowohl der Lufttemperatur als auch der Grundwassertemperatur sprunghaft, in sogenannten Climate Regime Shifts, darstellen können und diese die Veränderungen besser abbilden können als lineare Modelle (Figura und Livingstone 2013; Benz et al. 2018; Menberg et al. 2014). Rodionov (2004) beschreibt eine Methode zur Berechnung der Climate Regime Shifts. Der Vorteil liegt in der sequenziellen Datenverarbeitung, d.h. es wird jeder Wert der Zeitreihe einzeln betrachtet und dann ins Verhältnis zu den vorangegangenen Werten gesetzt. Jeder Wert wird dabei entweder dem aktuellen Regime zugeordnet oder als Startpunkt für ein neues Regime festgelegt. Für die Berechnung wird online ein kostenfreies Excel Add-In zur Verfügung gestellt (Rodionov 2006). Um Fehlinterpretationen durch saisonal bedingte Abweichungen der Jahresmittel zu vermeiden, wurden für diese Auswertung die Datenreihen der Messstellen mit Frühlings- und Herbstmessungen (Fehlwertquote 10 %) genutzt. Das Add-In benötigt lückenlose Datenreihen. Die maximal 1 bis 2 Fehlwerte in den Datenreihen wurden durch Werte aus einem linearen Modell aufgefüllt. Dazu wurde das Jahr des Fehlwertes in die Formel der Steigung der linearen Regression (Temperatur pro Jahr) pro Datenreihe eingesetzt. Um die Daten später mit kalkulierten Werten aus der Literatur vergleichen zu können, wurden für die Berechnung der Climate Regime Shifts das Add-In mit den gleichen Parametern wie bei Benz et al. (2018) gefüttert.

Für die Erstellung von Differenzkarten wurden die zentrierten Werte im Farbverlauf von Blau zu Rot (kälter zu wärmer) pro Messstelle anhand ihrer Koordinaten in der Fläche Niedersachsens zum einen pro Jahr und zum anderen als Mittelwert pro Jahrzehnt dargestellt. Zusätzlich wurden Density Plots (Kerndichtediagramme) erstellt, um zu prüfen, wie sich die zentrierten Temperaturen und der Temperaturmittelwerte pro Jahrzehnt verteilen – ob sie kongruent oder verschoben sind. Im nächsten Schritt wurde für die letzten 30 Jahre mittels linearer Regression der mittlere Temperaturanstieg (Steigung) pro Jahrzehnt an den einzelnen Messstellen berechnet. Die Signifikanz der Steigung wurde durch den Mann-Kendall Trendtest ermittelt (5 % Signifikanzniveau). So konnte unterschieden werden in Messstellen mit und ohne signifikante Steigung. Wurde keine signifikante Steigung festgestellt, bedeutet das jedoch nicht automatisch, dass keine Steigung oder eine negative Steigung vorliegen. Es bedeutet lediglich, dass sich die Temperatur im Trend nicht signifikant in eine bestimmte Richtung entwickelt. Die Darstellung der signifikanten Steigungen erfolgte in Boxplot-Diagrammen. Diese Diagramme skizzieren in welchem Bereich die Daten liegen und wie sie sich verteilen. Neben der Darstellung des kleinsten und größten Wertes werden auch der Median, sowie das obere und untere Quartil dargestellt zwischen denen die Hälfte der Werte liegen. In einem Tortendiagramm wurden die berechneten Steigungen zusätzlich prozentual dargestellt.

Einzelne Grundwassermessstellen mit langen Zeitreihen wurden genauer betrachtet und miteinander verglichen um Anhaltspunkte zu finden, welche potentiellen Faktoren die

Temperaturentwicklung an den Messstellen beeinflussen. Hierzu wurden reale Werte betrachtet anstatt zentrierter Mittelwerte. Die potentiellen Einflussfaktoren und einige zusätzliche Parameter wurden dann genutzt um zu identifizieren, unter welchen Bedingungen die stärksten Trends zu verzeichnen waren. Dazu wurden die berechneten signifikanten Steigungen pro Jahrzehnt hingehend der verschiedenen hydrogeologischen und räumlichen Bedingungen an den Grundwassermessstellen betrachtet. Faktoren, für die einzelne Auswertungen gemacht wurden, waren die Tiefe der Grundwassermessstellen, das Grundwasserstockwerk, die Gesteinsart, die horizontale Ausdehnung des Grundwasserkörpers, die Geländehöhe an den Messstellen, die Landnutzung und der Landschaftsraum im Umkreis der Messstellen. Die Grundwassermessstellen wurden entsprechend der potentiellen Einflussfaktoren in Untergruppen eingeteilt.

Für die Tiefe wurden die Messstellen in flach (0–10 m), mittel (10–30 m) und tief (>30 m) verfilterte Messstellen gruppiert. Es wurden nur Messstellen mit Filterlängen bis 5 m genutzt und bei der Einteilung die Tiefe der Filteroberkante zur Geländeoberkante betrachtet. Für das Grundwasserstockwerk fand die Einteilung in die entsprechenden Stockwerke statt, für die Gesteinsart in Locker- und Festgestein und für die Geländehöhe in die Gruppen <0 m, 0–25 m, 25–50 m, 50–75 m, 75–100 m und >100 m üNN. Für die Landnutzung waren die Hauptgruppen Ackerflächen, Grünland, Wälder und naturnahe Flächen sowie bebaute Flächen. Dafür wurde in 100 m Umkreis um die Messstellen prozentual ausgewertet, welche die vorwiegende Landnutzung darstellt und dann die Messstellen entsprechender Gruppe zugeteilt. Die Auswertung wurde innerhalb der Software ArcGIS (ArcMap 10.5.1) mit den Landnutzungsdaten aus dem europaweiten Projekt CORINE Land Cover realisiert. Auch die Zuteilung der Messstellen zu den Landschaftsräumen Niederung, Geest und Bergland wurde in ArcGIS durchgeführt. Die Verteilung der berechneten Steigungen an den Grundwassermessstellen wurde dann pro Gruppe in Boxplots dargestellt und für den Vergleich gegenübergestellt. Außerdem wurde die Höhe der Steigung in einem Streudiagramm über die Fläche des Grundwasserkörpers, in dem die Messstelle liegt, aufgetragen. Zuletzt wurde die Temperaturentwicklung über die Tiefe und im zeitlichen Verlauf als Isoliniendiagramm dargestellt. Hierzu wurde der Jahresmittelwert der Temperatur als Farbwert gegenüber der Tiefe und die Zeit aufgetragen. Als Tiefenwert wurde die Lage der Filtermitte unter der Geländeoberkante verwendet, betrachtet wurden nur Messstellen mit Filterlängen kleiner als fünf Meter. Abgebildet wurden diese Temperaturentwicklung in einem Isoliniendiagramm mithilfe der Software Surfer® (Golden Software, LLC). Zwischen den Jahresmittelwerten wurde mittels Kriging-Methode (ordinary Kriging) interpoliert.

Zur Verschneidung, Bearbeitung und Erstellung von Tabellen zur Datenauswertung wurde eine Microsoft Access Datenbank aufgebaut. Die automatisierte Bearbeitung des Gesamtdatensatzes für die statistischen Auswertungen und die Erstellung von Graphiken erfolgte mit der Software R (R Core Team 2020).

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Entwicklung der Grundwassertemperatur (1995–2024)

Aus den zusammengestellten 1258 Grundwassermessstellen aus den Messnetzen zur Grundwassergüte erfüllen die Datenreihen von 327 Messstellen die Kriterien für die Auswertung der Grundwassertemperaturentwicklung anhand der Jahresmittelwerte zwischen 1995 und 2024.

Der geglättete Mittelwert über 30 Jahre zeigt einen klaren Anstieg der Grundwassertemperatur (Abbildung 6). Die Jahre mit Temperaturen unter dem Mittelwert aller Messwerte sind bläulich eingefärbt, Temperaturen um den Mittelwert gelb und Temperaturen darüber rötlich. Obwohl die Jahresmittelwerte schwanken und teilweise außerhalb des Konfidenzintervalls liegen, ist der Trend deutlich sichtbar. In den Jahren 1995–2024 kann ein Anstieg von etwa 1 °C verzeichnet werden. Dieser Trend zeigt sich auch in den Grundwassertemperaturen, die nur im Frühling oder Herbst gemessen wurden (Abbildung 7 und Abbildung 8).

Die Daten zeigen eine etwas stärkere Streuung und einen geringfügig steileren Anstieg von insgesamt etwas mehr als 1 °C zwischen 1995 und 2024. In beiden Graphen ist in den Jahren zwischen 2005 und 2010 einer leichter Knick erkennbar, der in den Daten der Herbstmessungen noch deutlicher zu sehen ist.

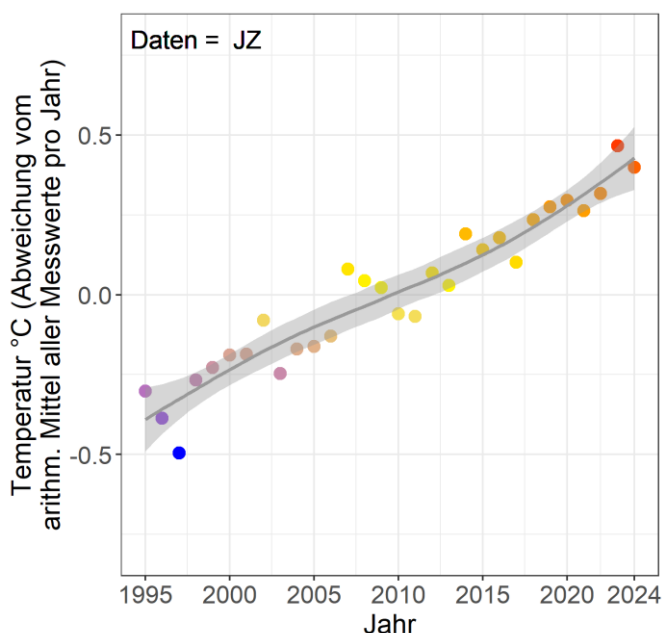


Abbildung 6: Zentrierter und geglätteter Jahresmittelwert der Grundwassertemperatur mit Umhüllender von 1995 bis 2024 (JZ: Eingangsdaten alle Jahreszeiten). Die Jahre mit Temperaturen unter dem Mittelwert aller Messwerte sind bläulich eingefärbt, Temperaturen um den Mittelwert aller Messwerte sind gelb eingefärbt, Temperaturen über dem Mittelwert sind rötlich.

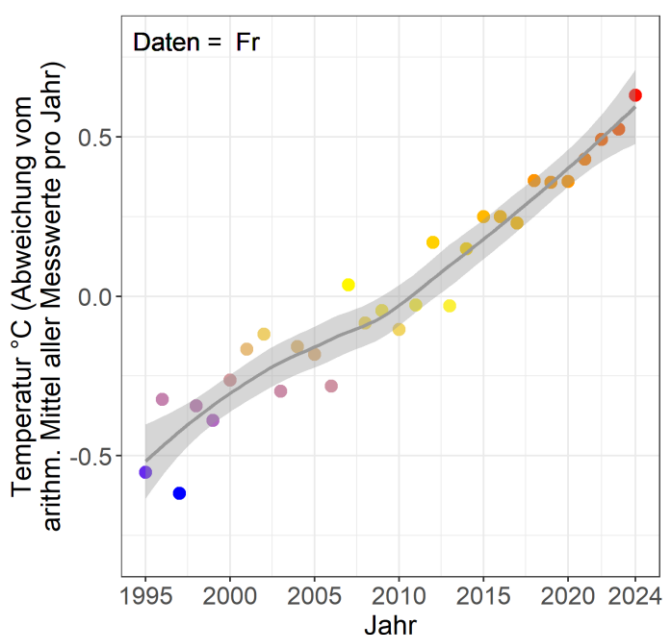


Abbildung 7: Zentrierter und geglätteter Jahresmittelwert der Grundwassertemperatur mit Umhüllender von 1995 bis 2024 (Fr: Eingangsdaten nur Frühlingsmonate). Die Jahre mit Temperaturen unter dem Mittelwert aller Messwerte sind bläulich eingefärbt, Temperaturen um den Mittelwert gelb und Temperaturen darüber rötlich.

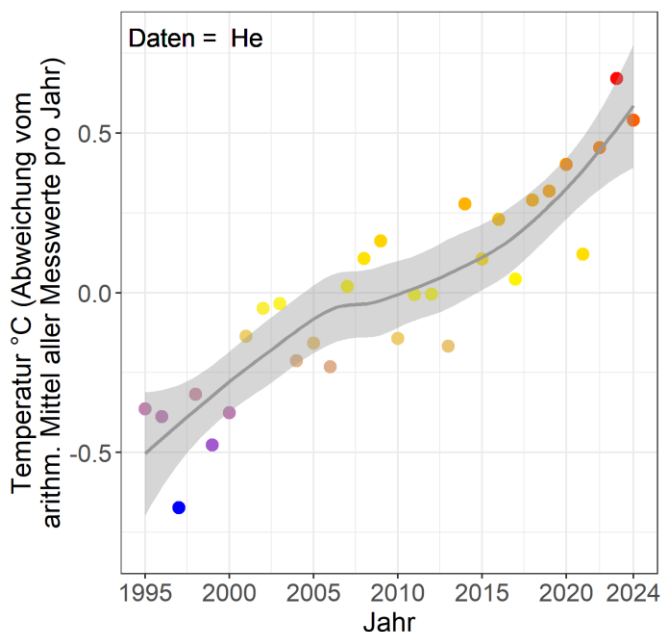


Abbildung 8: Zentrierter und geglätteter Jahresmittelwert der Grundwassertemperatur mit Umhüllender von 1995 bis 2024 (He: Eingangsdaten nur Herbstmonate). Die Jahre mit Temperaturen unter dem Mittelwert aller Messwerte sind bläulich eingefärbt, Temperaturen um den Mittelwert gelb und Temperaturen darüber rötlich.

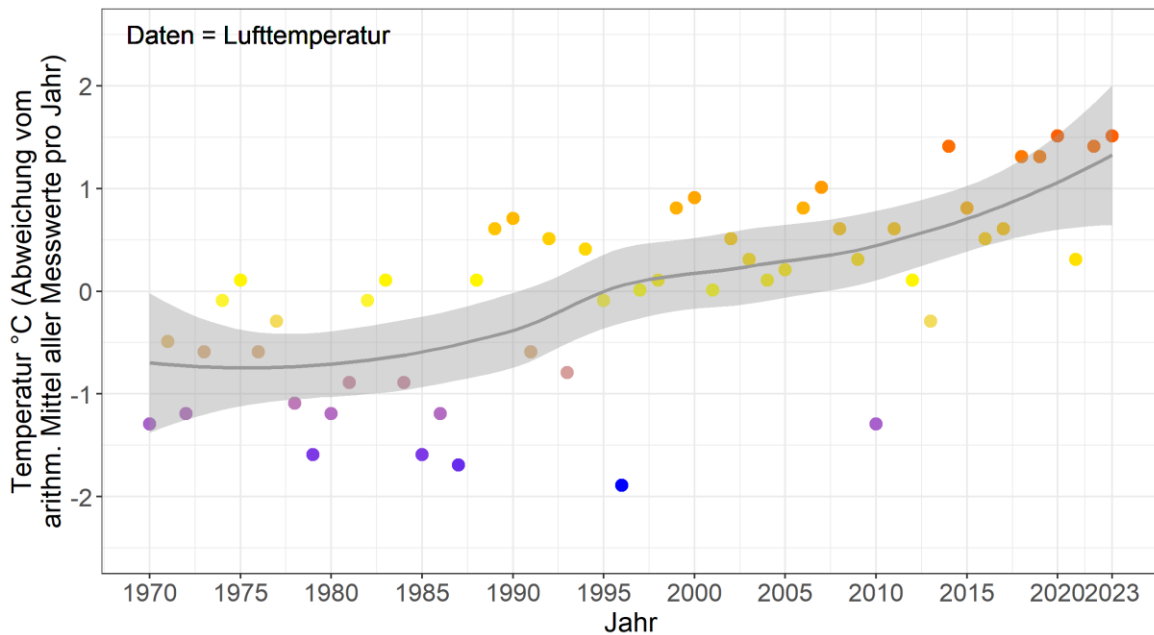


Abbildung 9: Zentrierter und geglätteter Jahresmittelwert der Lufttemperatur in Niedersachsen mit Umhüllender von 1970 bis 2024. Die Jahre mit Temperaturen unter dem Mittelwert aller Messwerte sind bläulich eingefärbt, Temperaturen um den Mittelwert gelb und Temperaturen darüber rötlich.

Abbildung 9 zeigt die Entwicklung der Lufttemperatur in Niedersachsen von 1970 bis 2023. Die Temperatur stieg in den 53 Jahren in etwa um 2 °C an. Der Vergleich mit der Entwicklung der Grundwassertemperatur zeigt, dass der Temperaturanstieg ähnlich stark verläuft. Um 1995 ist außerdem ein leichter Knick erkennbar, wie auch bei den Graphen zu den gemessenen Grundwassertemperaturen im Frühling und Herbst. Verschiedene Autoren beschreiben, dass der Anstieg der Lufttemperatur nicht linear verläuft, sondern stufenweise in sogenannten Climate Regime Shifts (Benz et al. 2018; Menberg et al. 2014; Figura und Livingstone 2013). Der Knick in den Graphen zur Lufttemperatur und den Grundwassertemperaturen im Frühling und Herbst könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Daten ebenfalls einen stufenweisen Anstieg zeigen. Zeitlich ist der Knick in den Graphen zur Entwicklung der Grundwassertemperatur zwischen 10–15 Jahre später als bei der Lufttemperaturentwicklung. Das deutet daraufhin, dass der Anstieg der Lufttemperatur als treibender Faktor für den Grundwassertemperaturanstieg an den betrachteten Messstellen fungiert und sich dieser in Niedersachsen im Durchschnitt mit einer Verzögerung von 10–15 Jahren zur Lufttemperatur zeigt. Durch die Analyse der Datenreihen mit der Methode zur Ermittlung der Climate Regime Shifts nach Rodionov (2004) wäre es potentiell möglich gewesen die Stufen des Anstiegs sichtbar zu machen. Allerdings lieferte die Auswertung auf Grundlage der Temperaturmessungen in Frühling und Herbst aufgrund der geringen Anzahl an nutzbaren Datenreihen keine eindeutig interpretierbaren Ergebnisse.

Niedersachsen als zweitgrößtes Bundesland mit einer Fläche von etwa 47.614 km², der Küste im Norden und den Bergregionen im Süden ist ein naturräumlich diverses Bundesland. Ebenso regional unterschiedlich könnten sich die Temperaturen im Grundwasser entwickeln. Die Differenzkarten in Abbildung 10 zeigen die zentrierten Jahresmittelwerte

(Abweichung vom Mittelwert aller Messungen) pro Jahr pro Messreihe an den Koordinaten der jeweiligen Messstelle als Punkt. Die roten bis gelben Einfärbungen zeigen ermittelte Jahresmitteltemperaturen über dem Mittelwert aller Messwerte, die gelben bis dunkelblauen Einfärbungen Jahresmitteltemperaturen unter dem Mittelwert aller Messwerte. Die Mehrheit der Punkte zwischen 1995 und ungefähr 2005 zeigt eine bläuliche Färbung, zwischen 2005 und circa 2011 verändern sich die Einfärbungen, sodass als dominante Farben Gelb und Blau zu sehen sind. Nach 2011 sind die Einfärbungen mehrheitlich gelblich bis hin ins Rötliche. Die Farbgebung des sich ergebenden Gesamtbildes wechselt in den letzten 30 Jahren vom Blauen ins Gelbrote, was einen Anstieg der Temperatur bedeutet. Der Anstieg der Grundwassertemperatur ist damit flächendeckend ersichtlich. Regionale Unterschiede können nicht ausgemacht werden.

Abbildung 11 zeigt 3 Differenzkarten, diesmal mit den Abweichungen des Dekadenmittelwerts vom Mittelwert aller Messungen. Aus der Farbgebung kann deutlich der Temperaturanstieg herausgelesen werden. Die zu den Daten gehörige Dichterverteilung an den 327 betrachteten Messstellen zeigt, dass sich die Gesamtverteilung pro Jahrzehnt zwar ähnlich weit auffächert, sich aber mit den Jahren sukzessive zu wärmeren Temperaturen hinbewegt. Der Peak der Verteilung verschiebt sich pro Jahrzehnt etwa um 0,25 °C (Abbildung 12). Die gleichen Darstellungen mit den Daten der Herbst- und Frühjahrmessungen (Fehlwertquote 33 %) finden sich in Abbildung 13 bis Abbildung 16. Es fällt direkt auf, dass es weniger Datenreihen gibt, die die Kriterien für die Auswertung erfüllen, und eine Aussage zu regionalen Unterschieden auf dieser Grundlage nicht möglich wäre. Es ist jedoch auch hier klar erkennbar, dass sich die Grundwassertemperaturen pro Jahrzehnt erhöhen. Die Peaks der Dichteverteilungen verschieben sich sogar um etwa 0,3–0,4 °C pro Jahrzehnt.

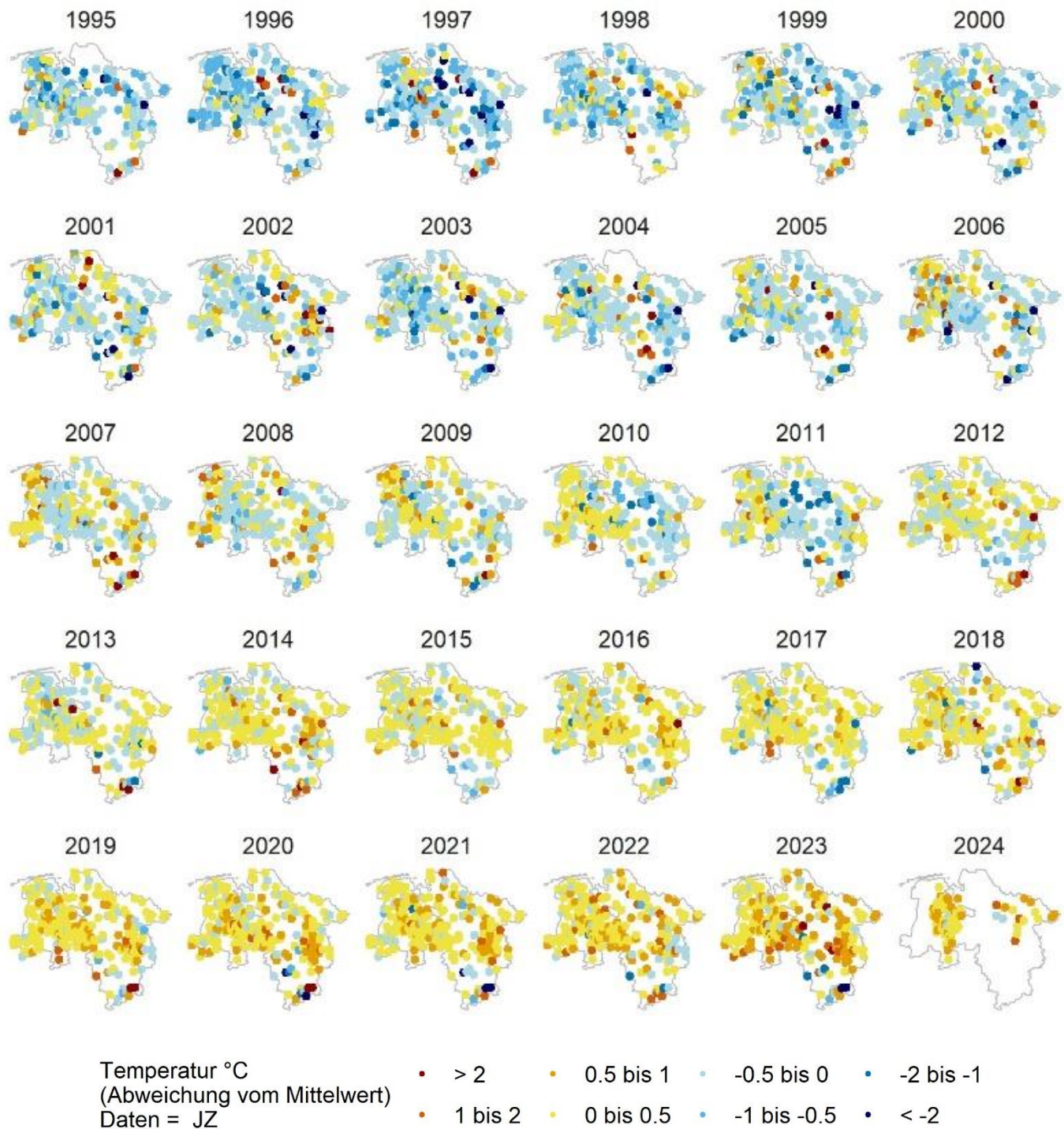


Abbildung 10: Zentrierte Mittelwerte pro Jahr pro Messstelle am Ort der Messstelle in Niedersachsen (Eingangsdaten alle Jahreszeiten). Die roten bis gelben Einfärbungen zeigen ermittelte Jahresmitteltemperaturen über dem Mittelwert aller Messwerte, die gelben bis dunkelblauen Einfärbungen Jahresmitteltemperaturen unter dem Mittelwert aller Messwerte.

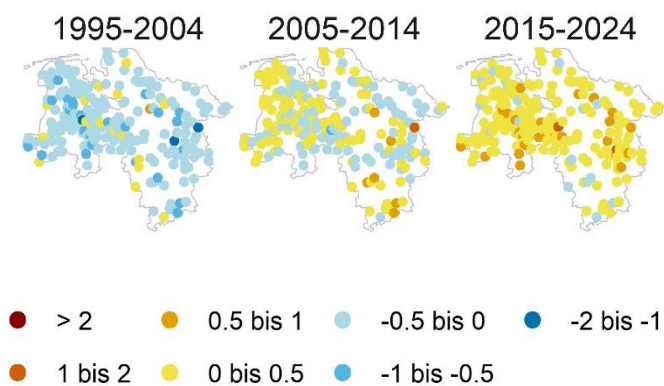


Abbildung 11: Zentrierte Mittelwerte pro Jahrzehnt pro Messstelle am Ort der Messstelle in Niedersachsen (alle Jahreszeiten). (*1)

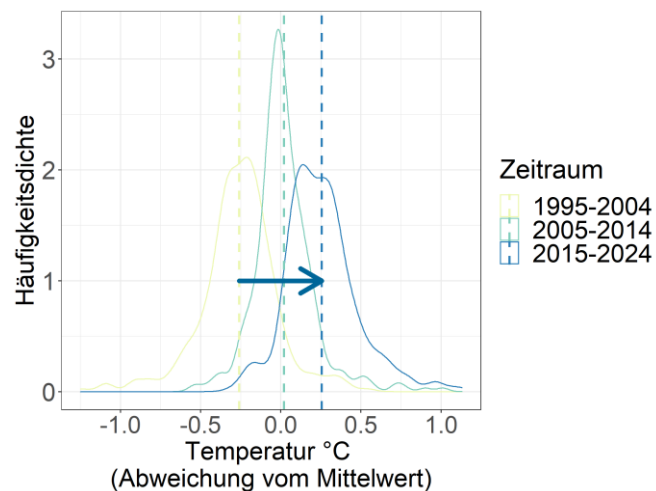


Abbildung 12: Dichteverteilung des Temperaturanstiegs an den Messstellen pro Jahrzehnt (alle Jahreszeiten). (*2)

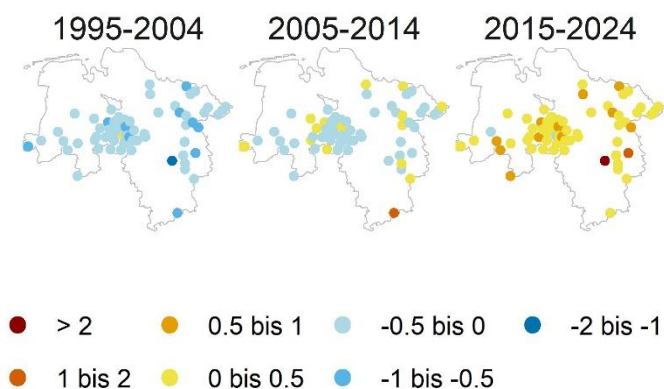


Abbildung 13: Zentrierte Mittelwerte pro Jahrzehnt pro Messstelle am Ort der Messstelle in Niedersachsen (Frühlingsmonate). (*1)

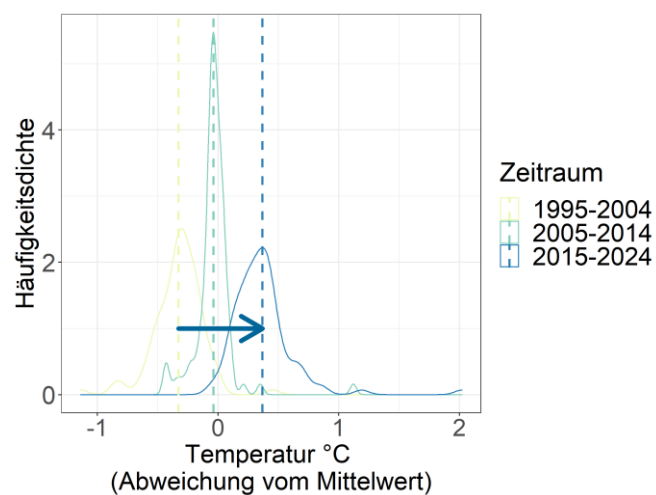


Abbildung 14: Dichteverteilung des Temperaturanstiegs an den Messstellen pro Jahrzehnt (Frühlingsmonate). (*2)

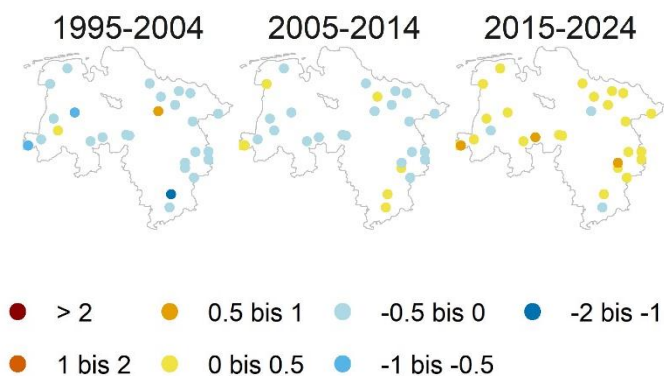


Abbildung 15: Zentrierte Mittelwerte pro Jahrzehnt pro Messstelle am Ort der Messstelle in Niedersachsen Herbstmonate). (*1)

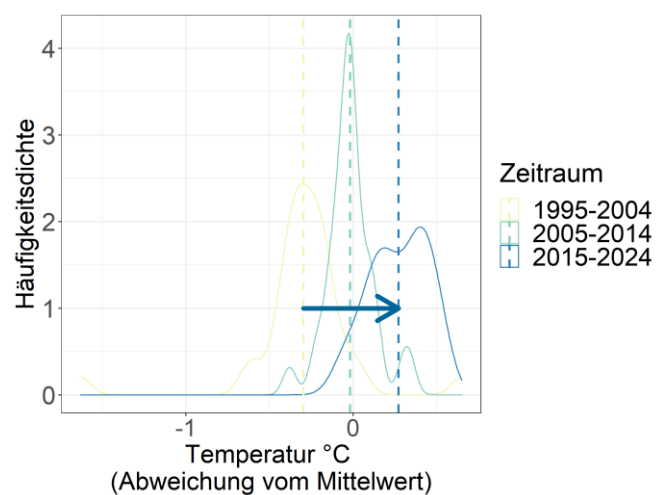


Abbildung 16: Dichteverteilung des Temperaturanstiegs an den Messstellen pro Jahrzehnt (Herbstmonate). (*2)

(*1) Die roten bis gelben Einfärbungen zeigen ermittelte Jahresmitteltemperaturen über dem Mittelwert aller Messwerte, die gelben bis dunkelblauen Einfärbungen Jahresmitteltemperaturen unter dem Mittelwert aller Messwerte.

(*2) Die gestrichelte Linie stellt den Mittelwert der Daten dar. Der Pfeil beschreibt die Verschiebung des Mittelwerts.

Die lineare Steigung der Grundwassertemperatur pro Messstelle wurde für die letzten 30 Jahre in °C pro Jahrzehnt berechnet. Für die Jahresmittelwerte zeigen 244 der 327 betrachteten Grundwassermessstellen einen signifikant steigenden Trend (Abbildung 18). Anteilig sind das 75 % der Messstellen. Der Anstieg bewegt sich hauptsächlich zwischen 0,2 und 0,4 °C pro Jahrzehnt. Im arithmetischen Mittel stieg die Temperatur um 0,32 °C pro Jahrzehnt an, der Median bewegt sich in einem ähnlichen Bereich. Gehen in die Auswertung nur die Frühlings- und Herbstmessungen ein (Abbildung 19 und Abbildung 20), kann im Frühling an 97 % und im Herbst an 81 % der Messstellen ein signifikant steigender Trend beobachtet werden. Das arithmetische Mittel beider Auswertungen liegt bei 0,38 °C pro Jahrzehnt, die Werte bewegen sich hauptsächlich zwischen 0,25 und 0,5 °C pro Jahrzehnt.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Grundwasser im Mittel in etwa gleichem Maße wie die Lufttemperatur erwärmt. In den letzten 30 Jahren zeigt sich im Mittel eine Erhöhung der Lufttemperatur sowie der Grundwassertemperatur von 0,3–0,4 °C pro Jahrzehnt. Außerdem wurde festgestellt, dass der generelle Trend der Grundwassertemperaturentwicklung durch die Jahresmittelwerte dargestellt werden kann. Allerdings führt die Bildung des Jahresmittelwerts potentiell zu einer leichten Unterschätzung des Anstiegs. Zeitgleich werden Trendmuster, wie der Knick in den Graphen, durch die Nutzung der Werte aller Jahreszeiten herausgemittelt.

Der durchschnittliche Anstieg der Temperatur in 10 Jahren pro Grundwassermessstelle ist anteilig im Tortendiagramm in Abbildung 17 abgebildet. Betrachtet werden hier die 327 Messstellen, an denen die Auswertung mit Jahresmittelwerten durchgeführt wurden. Der Maximalwert liegt bei einem Temperaturanstieg von 1,1 °C pro Jahrzehnt. An einem Viertel der Messstellen wurde keine signifikante Steigung festgestellt, die Hälfte der Messstellen nimmt Werte zwischen 0,2 und 0,4 °C pro Jahrzehnt an. Das restliche Viertel teilen sich auf der einen Seite Werte von 0,1 °C pro Jahrzehnt und auf der anderen Seite Werte zwischen 0,5 und 1,1 °C pro Jahrzehnt.

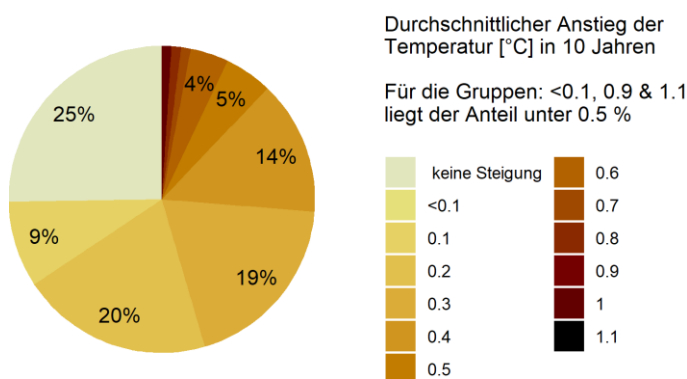


Abbildung 17: Anteilige Darstellung des durchschnittlichen Temperaturanstiegs in 30 Jahren an den Grundwassermessstellen (Eingangsdaten alle Jahreszeiten) in °C pro Jahrzehnt.

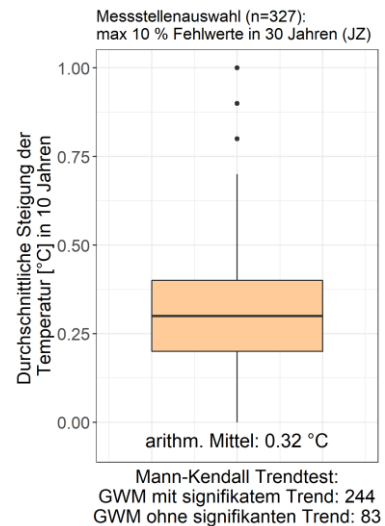


Abbildung 18: Boxplot der ermittelten Steigungen (in °C pro Jahrzehnt) an den Grundwassermessstellen (Eingangsdaten alle Jahreszeiten).

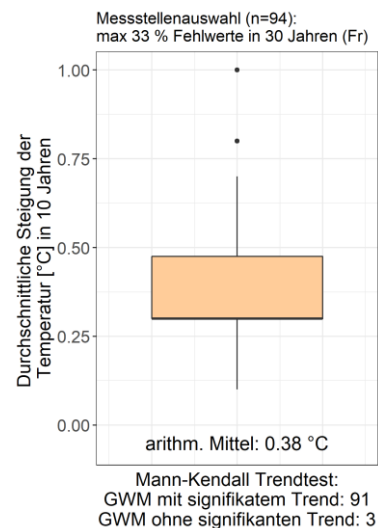


Abbildung 19: Boxplot der ermittelten Steigungen (in °C pro Jahrzehnt) an den Grundwassermessstellen (Eingangsdaten nur Frühlingsmonate).

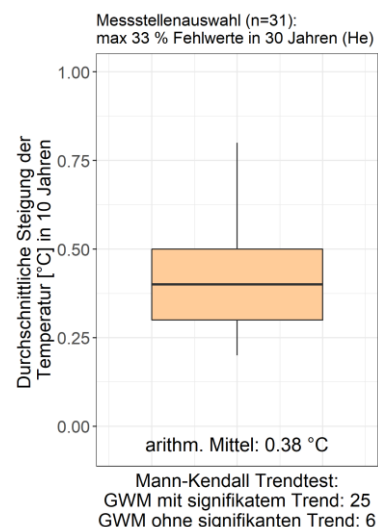


Abbildung 20: Boxplot der ermittelten Steigungen (in °C pro Jahrzehnt) an den Grundwassermessstellen (Eingangsdaten nur Herbstmonate).

Die Einordnung der Ergebnisse in die Literatur zeigt, dass weltweit ähnliche Trends zu sehen sind. In Südkorea, wo die Temperaturzunahme der Luft bei $0,08\text{ °C}$ pro Jahr lag (1996–2008), konnte zwischen 2000 und 2010 ein mittlerer Anstieg der Grundwassertemperatur von $0,09\text{ °C}$ pro Jahr in flach verfilterten Messstellen und von $0,04\text{ °C}$ pro Jahr in tief verfilterten Messstellen festgestellt werden (Lee et al. 2014; Park et al. 2011). Pro Jahrzehnt sind das $0,9$ bzw. $0,4\text{ °C}$. Hier passt die Entwicklung der Lufttemperatur ebenfalls zur Temperaturentwicklung im Grundwasser, liegt jedoch insgesamt etwas höher als in Niedersachsen. Ergebnisse aus Südengland zeigen ebenfalls einen stärkeren Anstieg der Grundwassertemperatur von $0,7\text{ °C}$ im letzten Jahrzehnt zwischen 2012 und 2022 (Ascott et al. 2023). Genau wie in Niedersachsen, wurde in Südengland an 75 % der betrachteten Messstellen ein Temperaturanstieg verzeichnet. Es wird angenommen, dass die Trends, sowohl an den flachen, als auch an den tiefen Grundwassermessstellen, aus aktuellen und historischen Entwicklungen der Lufttemperatur resultieren. Die beiden genannten Studien nutzen Datensätze von jeweils 10 Jahren.

Die in der Literatur beschriebenen Entwicklungen der Grundwassertemperatur in Süddeutschland, Österreich und der Schweiz sind abgesehen von Beobachtungen unter urbanen Standorten ebenfalls auf Veränderungen der Lufttemperatur zurückzuführen. Die beobachteten mittleren Anstiege von etwa $0,4\text{ °C}$ pro Jahrzehnt (1994–2013) in Österreich (Benz et al. 2018), $0,5$ – $0,7\text{ °C}$ pro Jahrzehnt (1980–2000) in der Schweiz (Figura und Livingstone 2013) und $0,1$ – $0,4\text{ °C}$ pro Jahrzehnt (2000–2015) in Süddeutschland (Riedel 2019) sind den in Niedersachsen ermittelten Anstiegen sehr ähnlich. Aus stabilen Isotopen berechnete Grundwassertemperaturen der Nordseeinseln Langeoog und Spiekeroog zeigen einen Anstieg von etwa $1,5\text{ °C}$ in 50 Jahren, entsprechend $0,3\text{ °C}$ pro Jahrzehnt (Houben et al. 2014). Auch dieser Anstieg spiegelt den Trend der Lufttemperatur wider. Die berechnete Erwärmung entspricht dem Mittelwert des Temperaturanstiegs im Grundwasser in Niedersachsen.

Nicht nur die Daten in Niedersachsen, auch andere Untersuchungen weltweit und in geographischer Nähe zu Niedersachsen, konnten einen Anstieg der Grundwassertemperatur äquivalent zur Lufttemperatur feststellen. Je geringer die räumliche Entfernung der Untersuchungen zu Niedersachsen war, desto ähnlicher waren die ermittelten Höhen des Temperaturanstiegs im Grundwasser. Die Länge der untersuchten Zeitreihen variierte bei den Untersuchungen. Um Klimatrends darzustellen, empfiehlt die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) Zeitreihen von mindestens 30 Jahren zu betrachten (Kaspar et al. 2021). Kürzere Zeitreihen könnten zu einer Über-, aber auch Unterschätzung des Trends führen, indem durch die geringere Anzahl an Jahren den Ausnahmejahren eine größere Gewichtung gegeben wird. In Niedersachsen konnte auf Datenreihen von 30 Jahren zurückgegriffen werden, wodurch davon ausgegangen werden kann, dass der Klimatrend in den Ergebnissen wiederspiegelt wird.

3.2 Entwicklung der Grundwassertemperatur an einzelnen Messstellen

Die Messstellen mit den längsten Datenreihen unter den hier genutzten Kriterien waren die Messstellen Renshausen Bannerholz (ID 128800001) und Obernfeld Ost (ID 125100003). Beide Messstellen liegen im Landkreis Göttingen in Wasserschutzgebieten und sind dem Festgesteins-Grundwasserkörper Rhume mesozoisches Festgestein links zugeordnet. Die Messstelle Renshausen Bannerholz wurde 1966 gebaut und besitzt eine Filtertiefe von 24–42 m. Am Filter finden sich Sand- und Schluffstein aus dem Mittleren Buntsandstein. Die Datenreihe liefert Messwerte von 1970 bis heute (Abbildung 21). Über den gesamten Zeitraum schwanken die Werte zwischen $8,0$ und $15,0\text{ °C}$. Die aus der linearen Regression berechnete Steigung beträgt $0,1\text{ °C}$ pro Jahrzehnt. Die Temperatur steigt im Mittel von $10,0$ auf circa $10,5\text{ °C}$ an. An der nächstgelegenen Wetterstation kann eine leicht höhere Steigung verzeichnet werden. Allerdings ist diese fast 15 km entfernt. Die Messstelle Obernfeld Ost wurde im Jahr 1968 gebaut und in einer Tiefe von $15,5$ – $29,5\text{ m}$ im Unteren Buntsandstein (Sandstein, Schluffstein, anteilig Glimmer) verfiltert. Zwischen 1970 und heute weist die Datenreihe Temperaturen zwischen $7,0$ und $15,0\text{ °C}$ auf (Abbildung 22). Der berechnete Temperaturanstieg liegt bei $0,2\text{ °C}$ pro Jahrzehnt und entspricht dem Temperaturanstieg der Luft an einer Wetterstation in 21 km Entfernung.

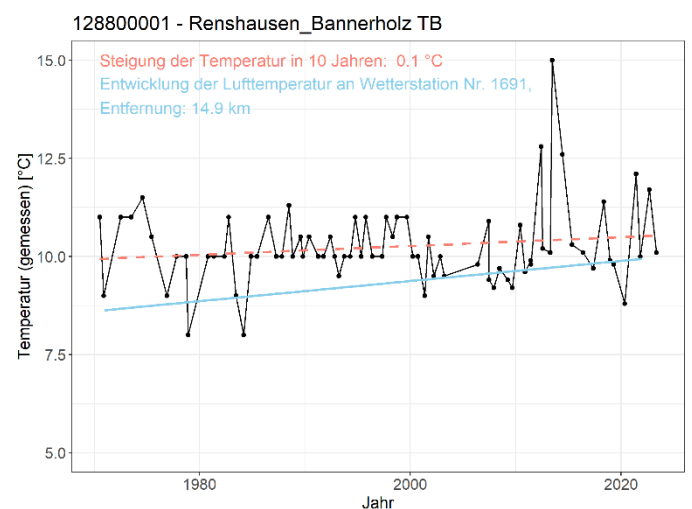


Abbildung 21: Entwicklung der Temperatur an der Messstelle Renshausen Bannerholz TB über die Zeit (Eingangsdaten alle Jahreszeiten). Die schwarzen Punkte verbunden durch schwarze Linien sind die gemessenen Temperaturen. Die rote, gestrichelte Linie entspricht der linearen Steigung der Grundwassertemperatur an der Messstelle. Die blaue Linie entspricht der linearen Steigung der Lufttemperatur der nächstgelegenen Wetterstation.

Die Temperaturverläufe an beiden Messstellen ähneln sich. Die einzelnen Temperatursignale zeigen häufig vergleichbare Ausschläge zu entsprechenden Zeitpunkten. An beiden Messstellen können trotz der mittleren bis tiefen Filtertiefen große Temperaturschwankungen festgestellt werden. Die Messstellen liegen im Festgestein, wo durch potentiell vorhandene Spalten oder Klüfte das neugebildete Grundwasser

schneller versickern könnte und so die saisonalen Temperatursignale mit in den Untergrund getragen werden könnten. Da in die Darstellung und Berechnung alle Werte unabhängig vom Messdatum eingegangen sind, könnte hier potentiell eine Unterschätzung des tatsächlichen Temperaturanstiegs vorliegen.

Dass die Steigung an der Messstelle Renshausen Bannerholz etwas geringer ausfällt als an der Messstelle Obernfeld Ost könnte zum einen ebenfalls auf die Festgesteinsstrukturen zurückzuführen sein, zum anderen könnten weitere Faktoren eine Rolle spielen. Die Landnutzung im Radius von 100 m um die Messstelle besteht an beiden Messstellen prozentual hauptsächlich aus Ackerland. Jedoch ist im Umkreis der Messstelle Renshausen Bannerholz anteilig zusätzlich Laubwald zu finden, dessen Einfluss das Temperatursignal abpuffern könnte. In weniger als 500 m Distanz zur Messstelle fließt außerdem der Renshauser Bach, der wahrscheinlich ans Grundwasser angebunden ist. Ein mildernder Einfluss auf das Temperatursignal im Grundwasser durch einen potentiellen Austausch mit dem Oberflächengewässer ist nicht auszuschließen.

Die Messstelle Obernfeld Ost erfüllt die angesetzten Kriterien für die Einzelbetrachtung der Messstellen mit allen Messwerten eines Jahres, als auch die Einzelbetrachtung der Messstelle unter alleiniger Einbeziehung der Messwerte aus den Frühlingsmonaten. Für die Betrachtung der Messwerte aus dem Frühling beginnt die Datenreihe jedoch 10 Jahre später in 1981 (Abbildung 23). Die Messwerte aus den Frühlingsmonaten schwanken zwischen 7,0–13,1 °C und zeigen einen ermittelten Anstieg von 0,4 °C pro Jahrzehnt von etwa 9 auf 10,6 °C im betrachteten Zeitraum. Damit ist der berechnete lineare Temperaturanstieg im Grundwasser bei reiner Betrachtung der Frühlingsmesswerte doppelt so groß wie der Temperaturanstieg unter Einbeziehung aller Werte unabhängig vom Messdatum. Gründe hierfür könnten die Unterschätzung des Anstiegs durch Verzerrung der Daten durch saisonale Temperaturschwankungen sein oder der leicht unterschiedliche Betrachtungszeitraum. Bei reiner Betrachtung der Graphen sieht es so aus, als ob der wesentliche Temperaturanstieg ab den 2000er Jahren stattfindet. Die Entwicklung der Grundwassertemperatur in den Jahren 1995–2024 hat ebenfalls gezeigt, dass die Veränderung hauptsächlich zwischen 2005 und 2011 stattfindet. Steigt die Grundwassertemperatur zwischen 1970 und 1980 nicht an, verläuft der Anstieg über den gesamten Zeitraum bis heute flacher, als wenn nur die Jahre ab 1980 betrachtet werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass beide genannten Gründe den Unterschied zwischen den ermittelten Temperaturanstiegen an der Messstelle Obernfeld Ost ausmachen.

Abbildung 24 zeigt den Temperaturverlauf der Messdaten aus den Frühlingsmonaten an der Grundwassermessstelle Hemtewede (ID 200001096). Die Messstelle wurde 1980 im Landkreis Diepholz im Niederungsbereich erbaut. Der Filter sitzt in einer Tiefe von 27–29 m im Lockergestein in einem

quartären Porengrundwasserleiter aus Feinsand im Hauptbestandteil und Mittelsand im Nebenbestandteil. Die Messstelle liegt auf einer Ackerfläche. Im Umfeld befindet sich außerdem ein Flughafengelände mit teilweise asphaltierten Bereichen. Die Temperaturdaten von 1984 bis 2022 zeigen ab etwa 1990 einen stetigen Anstieg ohne große Schwankungen, was im Lockergestein bei einer Tiefe > 25 m so zu erwarten war. Die Messwerte liegen zwischen 9,3 und 10,9 °C. Die lineare Steigung liegt bei 0,4 °C pro Jahrzehnt. Die Lufttemperatur an einer Wetterstation in weniger als 1 km Entfernung zeigt einen ähnlich hohen Anstieg.

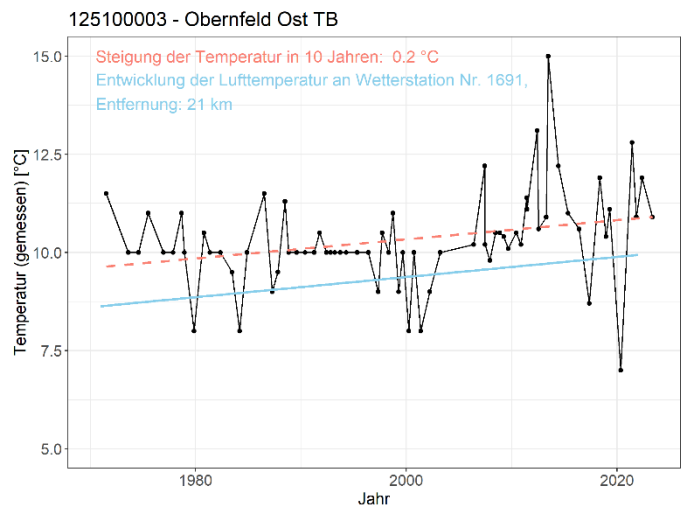


Abbildung 22: Entwicklung der Temperatur an der Messstelle Obernfeld Ost TB über die Zeit (Eingangsdaten alle Jahreszeiten). Die schwarzen Punkte verbunden durch schwarze Linien sind die gemessenen Temperaturen. Die rote, gestrichelte Linie entspricht der linearen Steigung der Grundwassertemperatur an der Messstelle. Die blaue Linie entspricht der linearen Steigung der Lufttemperatur der nächstgelegenen Wetterstation.

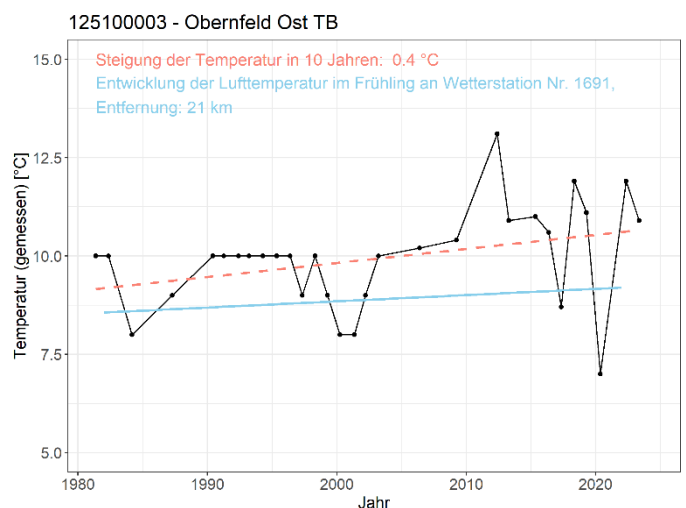


Abbildung 23: Entwicklung der Temperatur an der Messstelle Obernfeld Ost TB über die Zeit (Eingangsdaten nur Frühlingsmonate). Die schwarzen Punkte verbunden durch schwarze Linien sind die gemessenen Temperaturen. Die rote, gestrichelte Linie entspricht der linearen Steigung der Grundwassertemperatur an der Messstelle. Die blaue Linie entspricht der linearen Steigung der Lufttemperatur der nächstgelegenen Wetterstation.

Die berechnete Steigung liegt im Durchschnitt des Anstiegs der Messdaten aus den Frühjahrsmonaten. Genau wie die

Messstelle Hemtewede hat die überwiegende Anzahl der betrachteten Messstellen in ihrem Umfeld ackerbaulich genutzte Flächen. Ein Großteil der Messstellen ist wie die Messstelle Hemtewede zwischen 10 und 30 m verfiltert. Außerdem befindet sich die Messstelle genau wie die große Mehrheit der Messstellen im Lockergestein. Auf Grundlage der Auswertungen des Messstellenpools der letzten 30 Jahre, der Eigenschaften der Messstelle Hemtewede und der Übereinstimmung der ermittelten Steigung an der Messstelle mit der Steigung der Lufttemperatur, könnte der Temperaturverlauf an der Messstelle als erwartbar bezeichnet werden.

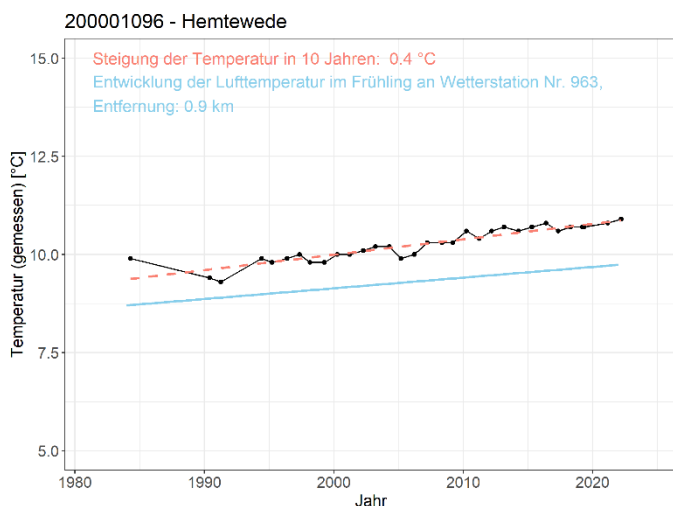


Abbildung 24: Entwicklung der Temperatur an der Messstelle Hemtewede über die Zeit (Eingangsdaten nur Frühlingsmonate). Die schwarzen Punkte verbunden durch schwarze Linien sind die gemessenen Temperaturen. Die rote, gestrichelte Linie entspricht der linearen Steigung der Grundwassertemperatur an der Messstelle. Die blaue Linie entspricht der linearen Steigung der Lufttemperatur der nächstgelegenen Wetterstation.

Das Wasserwerk Getelo/Itterbeck in der Grafschaft Bentheim betreibt im Einzugsgebiet ihrer Gewinnungsbrunnen Vorfeldmessstellen. Die Messstellen WW Getelo 86 o (ID 7910861), WW Getelo 86 u (ID 7910863), WW Getelo 87 o (ID 7910871) und WW Getelo 87 u (ID 7910873) gehören zu den Vorfeldmessstellen und werden zur Ermittlung von Güte- und Standsdaten durch den NLWKN herangezogen. Die Messstellen befinden sich im Lockergestein in Porengrundwasserleitern eines eiszeitlichen Gletschers. Es findet sich an den Bohrungen hauptsächlich Fein- und Mittelsand. Die Datenreihen der Messstellen zeigen Temperaturmessungen aus den Herbstmonaten von 1991 bis heute (Abbildung 25–Abbildung 28). Die Messstellen WW Getelo 86 o und WW Getelo 86 u liegen direkt nebeneinander und in etwa 500 m Entfernung zu den ebenfalls nebeneinander liegenden Messstellen WW Getelo 87 o und WW Getelo 87 u. WW Getelo 86 o und WW Getelo 87 o sind flach verfiltert zwischen 6–8 m, bzw. 7–9 m. Die anderen beiden Messstellen WW Getelo 86 u und WW Getelo 87 u haben beide ihren Filter in einer Tiefe von 30–32 m. Die Temperaturdaten der flach verfilterten Messstellen unterliegen größeren Schwankungen (etwa 10,0–13,0 °C) und sind insgesamt wärmer als die tief verfilterten Messstellen (etwa 9,0–11,5 °C). Alle vier Messstellen zeigen einen Temperaturanstieg im Grundwasser.

Während an den tieferen Messstellen die lineare Steigung bei 0,4 °C pro Jahrzehnt liegt, zeigen die oberflächennah verfilterten Grundwassermessstellen unterschiedliche Steigungen. Die Steigung an Messstelle WW Getelo 86 o liegt bei 0,2 °C pro Jahrzehnt, die Steigung an WW Getelo 87 o hingegen bei 0,5 °C pro Jahrzehnt. Den Unterschied könnte die Landnutzung ausmachen, da sich die Eigenschaften der Messstellen ansonsten sehr ähneln. An der Messstelle WW Getelo 86 o findet sich im Umkreis von 100 m hauptsächlich Grünland, an der Messstelle WW Getelo 87 o prozentual auch Ackerland. Grünland könnte also eventuell für eine Dämpfung oder Ackerland für eine Beschleunigung des Temperaturanstiegs sorgen.

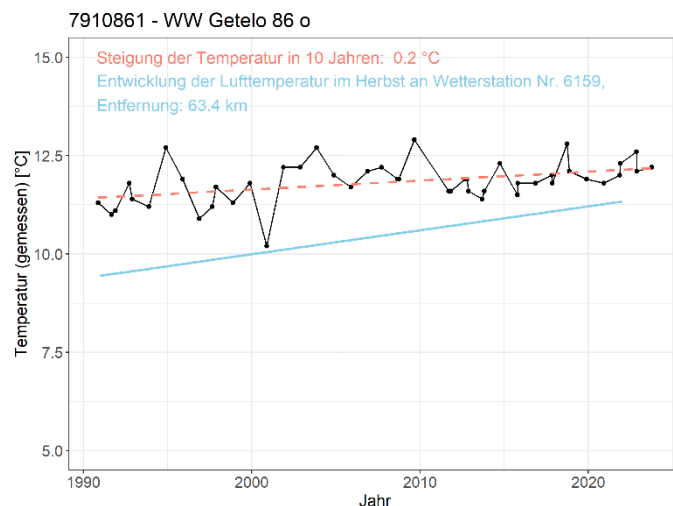


Abbildung 25: Entwicklung der Temperatur an der Messstelle WW Getelo 86 o über die Zeit (Eingangsdaten nur Herbstmonate). Die schwarzen Punkte verbunden durch schwarze Linien sind die gemessenen Temperaturen. Die rote, gestrichelte Linie entspricht der linearen Steigung der Grundwassertemperatur an der Messstelle. Die blaue Linie entspricht der linearen Steigung der Lufttemperatur der nächstgelegenen Wetterstation.

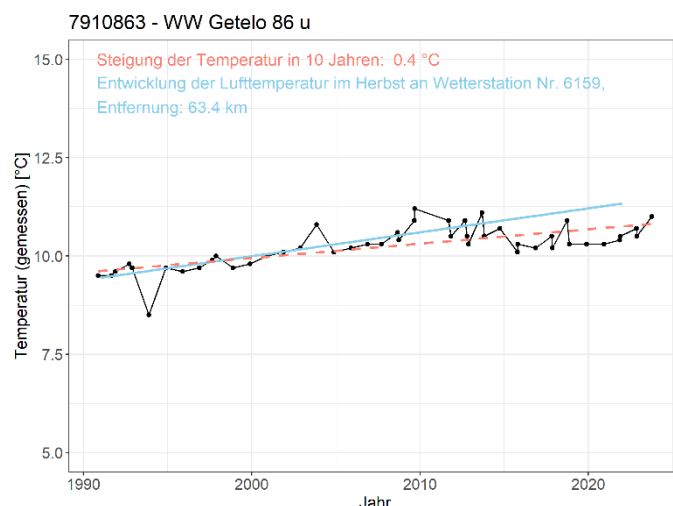


Abbildung 26: Entwicklung der Temperatur an der Messstelle WW Getelo 86 u über die Zeit (Eingangsdaten nur Herbstmonate). Die schwarzen Punkte verbunden durch schwarze Linien sind die gemessenen Temperaturen. Die rote, gestrichelte Linie entspricht der linearen Steigung der Grundwassertemperatur an der Messstelle. Die blaue Linie entspricht der linearen Steigung der Lufttemperatur der nächstgelegenen Wetterstation.

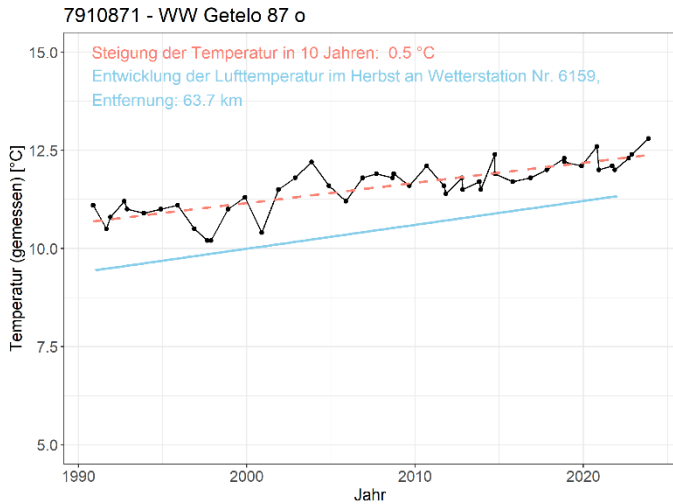


Abbildung 27: Entwicklung der Temperatur an der Messstelle WW Getelo 87 o über die Zeit (Eingangsdaten nur Herbstmonate). Die schwarzen Punkte verbunden durch schwarze Linien sind die gemessenen Temperaturen. Die rote, gestrichelte Linie entspricht der linearen Steigung der Grundwassertemperatur an der Messstelle. Die blaue Linie entspricht der linearen Steigung der Lufttemperatur der nächstgelegenen Wetterstation.

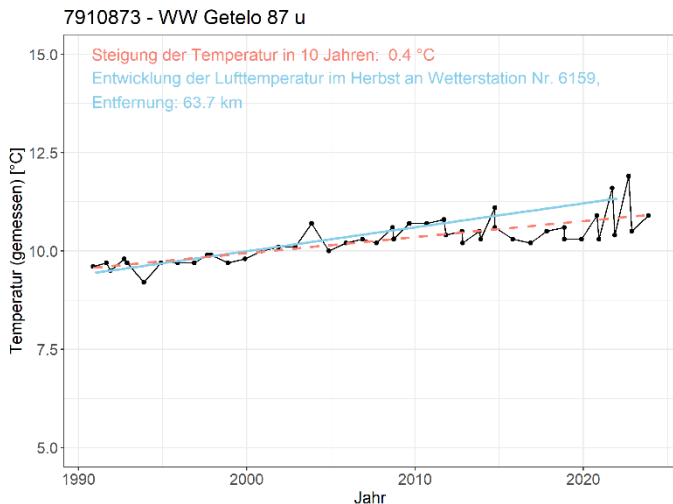


Abbildung 28: Entwicklung der Temperatur an der Messstelle WW Getelo 87 u über die Zeit (Eingangsdaten nur Herbstmonate). Die schwarzen Punkte verbunden durch schwarze Linien sind die gemessenen Temperaturen. Die rote, gestrichelte Linie entspricht der linearen Steigung der Grundwassertemperatur an der Messstelle. Die blaue Linie entspricht der linearen Steigung der Lufttemperatur der nächstgelegenen Wetterstation.

Die Betrachtung der Temperaturentwicklung an einzelnen Messstellen hat gezeigt, dass die Datengrundlage entscheidend für die Berechnung der Steigung ist. An dem hier genutzten Beispiel der Messstelle Obernfeld konnte belegt werden, dass sowohl unterschiedlich lange Datenreihen, als auch der Messzeitpunkt im Jahr einen Einfluss auf die berechnete Steigung haben können. Außerdem wurden potentielle Einflussfaktoren auf den Temperaturanstieg im Grundwasser identifiziert. Diese sind die Filtertiefe, die Art des Gesteins (Locker- oder Festgestein) und die Landnutzung in der Umgebung der Messstelle. Es wurde weiterhin festgestellt, dass die Temperaturentwicklung an den einzelnen Grundwassermessstellen nicht grundsätzlich zu der Lufttemperaturentwicklung der nächstgelegenen Wetterstation

passt. Eine Überlagerung der Einflussfaktoren, die zeitliche Verzögerung bei der Temperaturentwicklung im Grundwasser, aber auch die zum Teil sehr weite Entfernung der Wetterstationen zu den Messstellen können hier als Gründe aufgeführt werden. Das heißt, es ist nicht möglich von der Lufttemperaturentwicklung der nächstgelegenen Wetterstation auf die Temperaturentwicklung im Grundwasser zu schließen. Benz et al. (2018) konnten in Österreich ebenfalls keine Korrelation zwischen den Grundwassertemperaturen und den nächstgelegenen Wetterstationen verzeichnen. Sie vermuten, dass die Entwicklung der Temperatur an einzelnen Messstelle oftmals überprägt sei von den lokalen hydrogeologischen Bedingungen.

3.3 Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Grundwassertemperatur

Die bei der genaueren Betrachtung der einzelnen Messstellen identifizierten Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Grundwassertemperatur sind die Filtertiefe, die Art des Gesteins (Locker- oder Festgestein) und die Landnutzung in der Umgebung der Messstelle. In Kapitel 1.1 *Wärmehaushalt im Untergrund* können auf dieser Grundlage noch weitere Einflussfaktoren herausgefiltert werden. Die hydrogeologischen Einflussfaktoren Tiefe und Gesteinsart werden ergänzt durch das Grundwasserstockwerk und die horizontale Ausdehnung des Grundwasserkörpers. Das Grundwasserstockwerk ist nicht äquivalent zur Höhe zu sehen, sondern bezieht indirekt Stauschichten mit ein, in denen der Wärmetransport abhängig vom Material unterschiedliche Geschwindigkeiten annehmen könnte. Die horizontale Ausdehnung des Grundwasserkörpers wird als Äquivalent zur Größe des Grundwasserkörpers gesehen. Es wird angenommen, je größer der Wasserkörper ist, desto mehr Zeit wird benötigt um die Menge Wasser zu erwärmen und desto geringer sollte der Temperaturanstieg ausfallen. Der Einflussfaktor Landnutzung, der eine räumliche Bedingung an der Messstelle darstellt, wird ergänzt durch die Faktoren Landschaftsraum, in dem die Grundwassermessstelle liegt, und die Geländehöhe, auf der sich die Grundwassermessstelle befindet. Für jeden dieser Einflussfaktoren wurden Unterkategorien gebildet (wie in Kapitel 2.2 *Methodisches Vorgehen und Auswertungs-Software* beschrieben) mit Ausnahme der Ausdehnung des Grundwasserkörpers. Die Grundwassermessstellen wurden entsprechend ihrer zugehörigen Kategorie in Untergruppen eingeteilt. Diese Untergruppen wurden anhand des Grundwasseranstiegs miteinander verglichen.

Abbildung 30 zeigt 3 Boxplots für die Verteilung der ermittelten Steigung pro Jahrzehnt in den Tiefengruppen flach (0–10 m), mittel (10–30 m) und tief verfiltert. Bei den flach und tief verfilterten Messstellen zeigen etwa 60 % eine signifikante Steigung, bei den mittel verfilterten Messstellen sind es sogar 80 %. Die ausgeprägten saisonalen Schwankungen in den oberflächennah verfilterten Messstellen könnten dafür sorgen, dass ein Trend weniger gut ersichtlich ist, als in den tiefer verfilterten Messstellen. Die flach verfilterten

Messstellen zeigen aber im Gesamtbild die höchsten Temperaturanstiege. Die Hälfte der flach verfilterten Messstellen weist Temperaturanstiege zwischen 0,3–0,6 °C pro Jahrzehnt auf, während die Hälfte der mittel verfilterten Messstellen Anstiege zwischen 0,2–0,4 °C pro Jahrzehnt zeigen und die Temperatur an der Hälfte der tief verfilterten Messstellen um 0,2–0,3 °C pro Jahrzehnt ansteigt. Auch der Median an den flach verfilterten Messstellen liegt mit 0,4 °C pro Jahrzehnt höher als bei den tiefer verfilterten Messstellen (0,3 °C pro Jahrzehnt). Im Isoliniendiagramm (Abbildung 29) wurden die Jahresmittelwerte der Temperatur pro Tiefe der Filtermitte über die letzten 30 Jahre aufgetragen. Die Erwärmung des Grundwassers ist in allen Tiefen ersichtlich. Zuerst erwärmen sich das oberflächennahe Grundwasser, wo noch Schwankungen erkennbar sind. Die Erwärmung prägt sich folgend in die tieferen Schichten durch, wo die Schwankungen gedämpft werden und nur noch der generelle Trend erhalten bleibt. Je tiefer die das Grundwasser, desto später findet die Erwärmung statt. Nach 2013 finden sich jedoch in allen Tiefen hauptsächlich Werte über 10,0 °C. Der Wert 10,0 °C galt lange als Referenzwert für die Grundwassertemperatur.

Dass sich das Grundwasser erst in den oberen Schichten erwärmt und diese Erwärmung sich im Laufe der Zeit auch in tieferen Schichten zeigt, findet sich auch in der Literatur. Die ermittelten Temperaturanstiege in den entsprechenden Tiefen sind nicht nur in Niedersachsen, sondern auch in anderen Regionen in den gleichen Größenordnungen zu finden. Houben et al. (2014) berechneten die Temperatur mit der Tiefe aus den Messungen stabiler Wasserisotopen im Grundwasser auf der Nordseeinsel Langeoog. Sie konnten schlussfolgern, dass eine Temperaturzunahme mit der Tiefe eine Temperaturzunahme mit der Zeit sei. Das entspricht der Schlussfolgerung aufgrund Abbildung 29. In Riedel (2019) werden

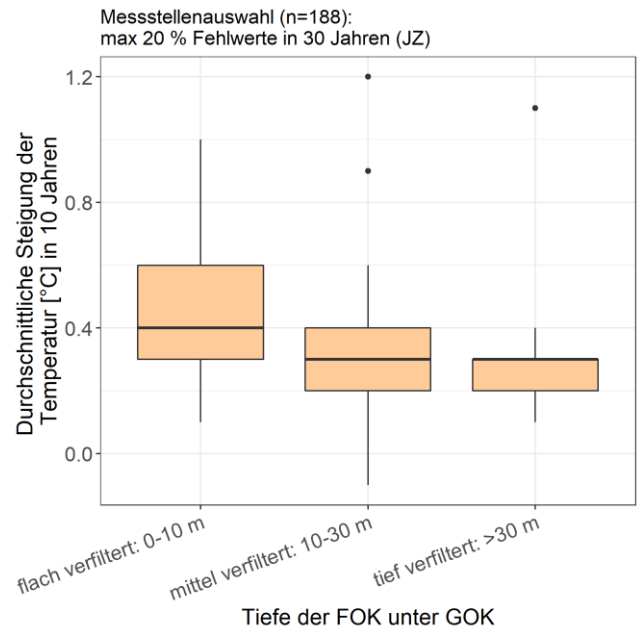


Abbildung 30: Boxplots für die Verteilung der ermittelten Steigung (in °C pro Jahrzehnt) in den Tiefengruppen flach (0-10 m), mittel (10-30 m) und tief verfiltert.

für Monitoringdaten aus Baden-Württemberg Temperaturanstiege für Quellwässer mit 0,3 °C pro Jahrzehnt und für Grundwässer mit 0,2 °C pro Jahrzehnt berechnet (Zeitraum 2000-2015). Der Temperaturanstieg ist bei den Quellwässern damit im Mittel um 0,1 °C pro Jahrzehnt stärker als im Grundwasser. Unter der Annahme, dass die Quellwässer aus einer geringen Tiefe entspringen als das entnommene Grundwasser, trifft auch hier zu, dass die Erwärmung des unterirdischen Wassers in geringerer Tiefe höher ist.

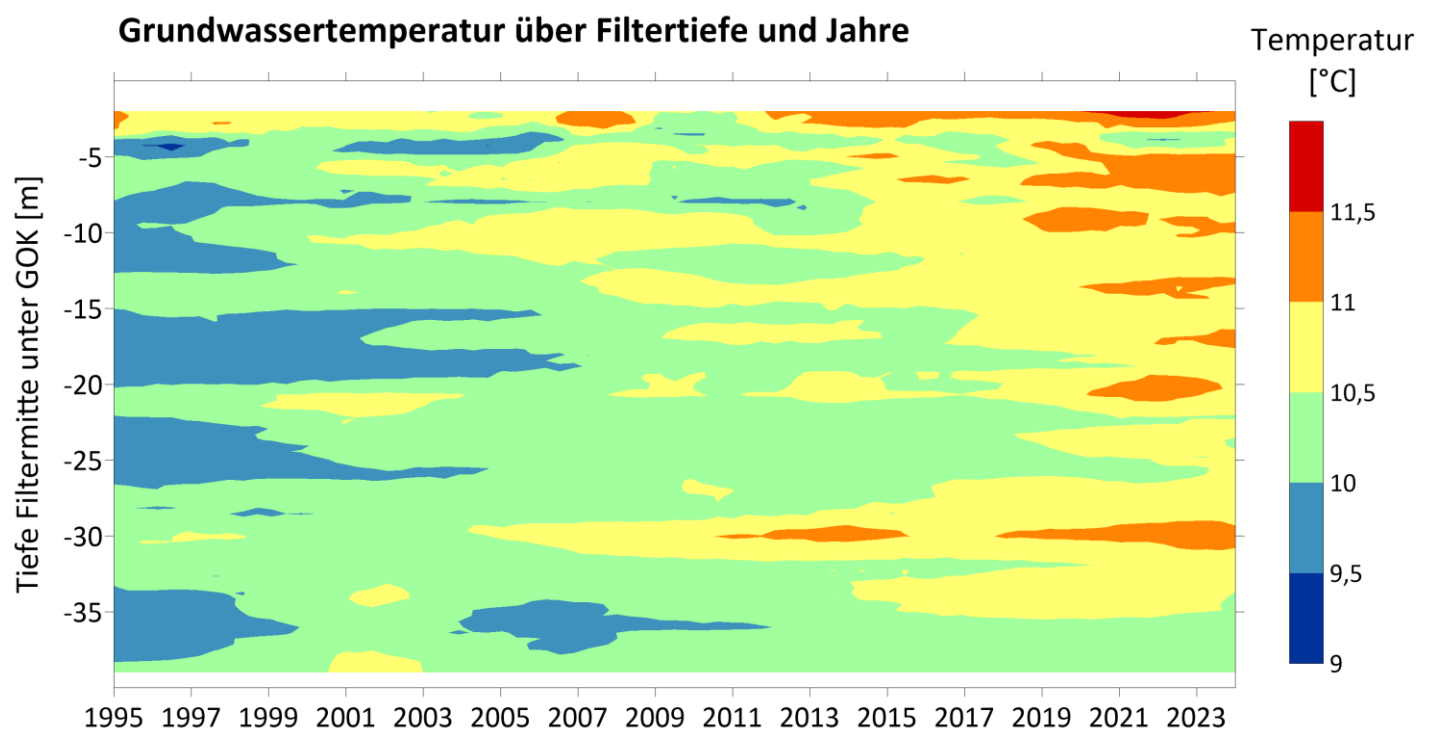


Abbildung 29: Entwicklung der Grundwassertemperatur mit der Tiefe über die Jahre. Zwischen den Messwerten wurde mittels Kriging interpoliert.

Die in Österreich bestimmte Temperaturänderungsrate von im Mittel $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt (Zeitraum 1994–2013) wurde aus Messwerten von Grundwassermessstellen bestimmt, die oberflächennah ($7 \pm 4\text{ m}$ unter GOK) verfiltert waren (Benz et al. 2018). Der Wert entspricht den in Niedersachsen flach verfilterten Messstellen und bestätigt damit diese Ergebnisse. Benz et al. (2018) berechneten außerdem, dass die Temperaturänderung pro Jahrzehnt und Meter Messtiefe um $0,015\text{ }^{\circ}\text{C}$ abnimmt. Das heißt bei der Betrachtung des gleichen Zeitraums ist der oberflächennahe Anstieg größer als der Anstieg in mittlerer und noch größer als der Anstieg in tiefer Tiefe. Entsprechende Ergebnisse zeigen die Auswertungen in Niedersachsen ebenfalls. Benz et al. (2018) folgerten daraus, dass der Temperaturanstieg in der Vergangenheit weniger stark war, also das die in größerer Tiefe gemessenen Temperaturen den Temperaturen aus früheren Zeiten entsprächen. Dieses Ergebnis passt gut zu dem zunehmenden Anstieg der Lufttemperatur durch den Klimawandel, dessen Auswirkungen in der Vergangenheit ebenfalls weniger ausgeprägt waren. Taylor und Stefan (2009) hingegen konnten in Minnesota einen ähnlich hohen Anstiegstrend in allen Tiefen verzeichnen (etwa $0,45\text{--}0,48\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt), welcher geringfügig unter dem dort verzeichneten Anstieg der Lufttemperatur von $0,49\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt liegt. Hier wurde also keine Veränderung des Anstiegs mit der Tiefe festgestellt.

In Baden-Württemberg wurden Temperaturdaten verschiedener Tiefen von Anfang der 1990er Jahre verglichen mit Messwerten aus dem Jahr 2019 (Hemmerle und Bayer 2020). Dabei konnte ein Temperaturanstieg von $0,28\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt in 20 m Tiefe festgestellt werden. Der Durchschnittstemperaturanstieg bei den zwischen 10 und 30 m verfilterten Messstellen lag bei $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt in Niedersachsen. Die Daten aus Baden-Württemberg und Niedersachsen stimmen für diese Tiefe überein. Hemmerle und Bayer (2020) betrachteten außerdem die Tiefen 40 , 60 , 80 und 100 m , wo sie Temperaturanstiege von je $0,16$, $0,09$, $0,07$ und $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt feststellten. Der Temperaturanstieg vollzieht sich auch anhand dieser Daten in der Tiefe langsamer. Abgesehen von einer Quelle zeigen die ausgewerteten Studien, dass der Temperaturanstieg so wie in Niedersachsen im oberflächennahen Grundwasser stärker ausgeprägt ist und mit der Tiefe abnimmt.

Der nächste Einflussfaktor, der beleuchtet wird, ist die horizontale Ausdehnung des Grundwasserkörpers, welche stellvertretend für seine Größe eingesetzt wird. Um die Hypothese zu überprüfen, dass der Temperaturanstieg in kleineren Grundwasserkörpern möglicherweise stärker ausgeprägt sein könnte als in größeren, wurde die ermittelte Steigung pro Jahrzehnt mit der Fläche des jeweiligen Grundwasserkörpers in Beziehung gesetzt. Das Streudiagramm in Abbildung 31 zeigt die ermittelte Steigung an den Messstellen aufgetragen über der Fläche des Grundwasserkörpers. Die Regressionsgerade zeigt an, dass der ermittelte Temperaturanstieg pro Jahrzehnt mit der Größe der Grundwasserkörperfläche abnimmt. Der Korrelationskoeffizient ρ zeigt mit -

$0,31$ einen mäßigen, aber signifikanten Zusammenhang zwischen den Daten an. Das heißt die Hypothese, dass der Temperaturanstieg in kleineren Grundwasserleitern größer ist, wird durch die berechnete Korrelation bestätigt. Potentiell könnte sich ein stärkerer Zusammenhang zwischen dem Volumen des Grundwasserkörpers und der Steigung ergeben, da die Fläche die Mächtigkeit des Grundwasserkörpers nicht mit abdeckt.

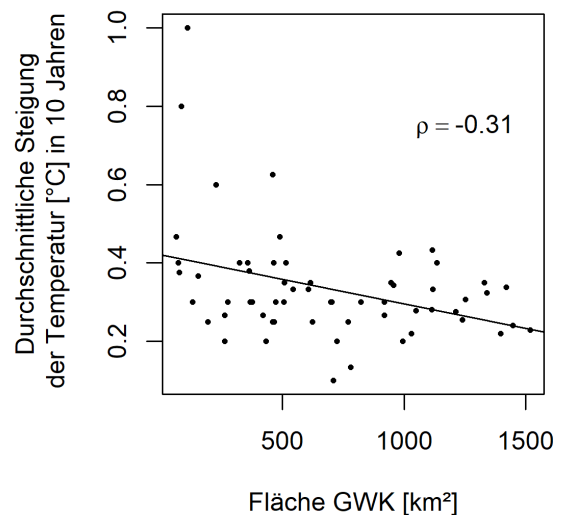


Abbildung 31: Durchschnittliche Steigung der Temperatur (in $^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt) aufgetragen über der Fläche des Grundwasserkörpers (GWK), in dem die Messstelle verfiltert ist.

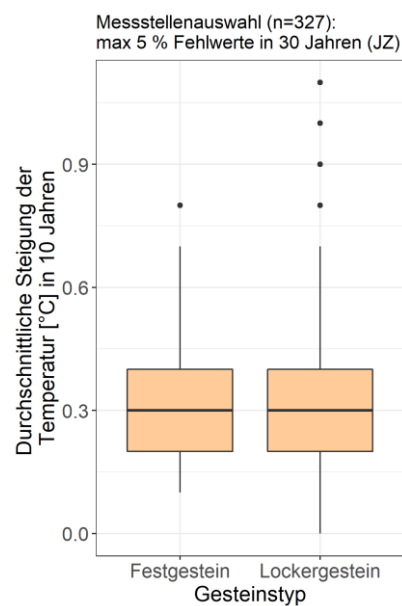


Abbildung 32: Boxplots für die Verteilung der ermittelten Steigung (in $^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt) nach Gesteinstyp.

Einfluss auf die Entwicklung der Grundwassertemperatur könnte auch die Gesteinsart haben. Der Vergleich der Untergruppen Locker- und Festgestein zeigt, dass die Mehrheit der Temperaturanstiege bei beiden Gesteinstypen zwischen $0,2$ und $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt liegt, der Median bei $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt (Abbildung 32). Im Durchschnitt zeigt sich die Temperaturerhöhung also gleichermaßen im Fest- und im Lockergestein. Die beiden Datensätze unterscheiden sich je-

doch darin, dass im Lockergestein an etwa 80 % der Messstellen eine signifikante Steigung ermittelt werden konnte, im Festgestein nur an etwa 60 % der Messstellen. Aufgrund der höheren Fließgeschwindigkeit und der geringeren Speicherkapazität im Festgestein durch die dort auftretenden Klüfte, Spalten und Höhlen schwankt die Temperatur bis in tiefere Schichten (Fuchs et al. 2006). Die Einstellung eines Trends ist deshalb im Festgestein unwahrscheinlicher als im Lockergestein. Das könnte die Erklärung dafür sein, dass an weniger Grundwassermessstellen im Festgestein eine signifikante Steigung festgestellt wurde.

Die Betrachtung des Temperaturanstiegs in den unterschiedlichen Grundwasserstockwerken 1–5 liefert ein durchwachsendes Bild (Abbildung 33). Während die höchsten Einzelwerte im ersten Grundwasserleiter zu finden sind und mit Stockwerkstiefe abnehmen bis hin zum 5. Stockwerk, in dem kein signifikanter Temperaturanstieg ermittelt werden

konnte, zeigt sich der höchste Median von 0,4 °C Anstieg pro Jahrzehnt im 3. Grundwasserstockwerk. Die Anzahl der Messstellen pro Stockwerk unterscheidet sich stark. Während dem 1. Grundwasserstockwerk noch 183 Messstellen zugeordnet werden konnten, liegen nur noch 58 Messstellen im 2. Stockwerk, 8 im 3. Stockwerk und jeweils eine Messstelle im 4. und 5. Grundwasserstockwerk. Die Auswertung ist daher mit entsprechender Vorsicht zu interpretieren. Die Anzahl der Messstellen in Stockwerk 1 und 2 sollten ausreichen um ein realistisches Bild in Bezug auf den Temperaturanstieg zu zeichnen. Die 1 bzw. 8 von 251 Messstellen in den Stockwerken 3–5 stellen eher Stichproben dar. Die berechneten Temperaturanstiege von 0,1–0,8 °C pro Jahrzehnt in Stockwerk 3 verdeutlichen, dass sich das Grundwasser in diesem Stockwerk in unterschiedlich schnell erwärmen kann.

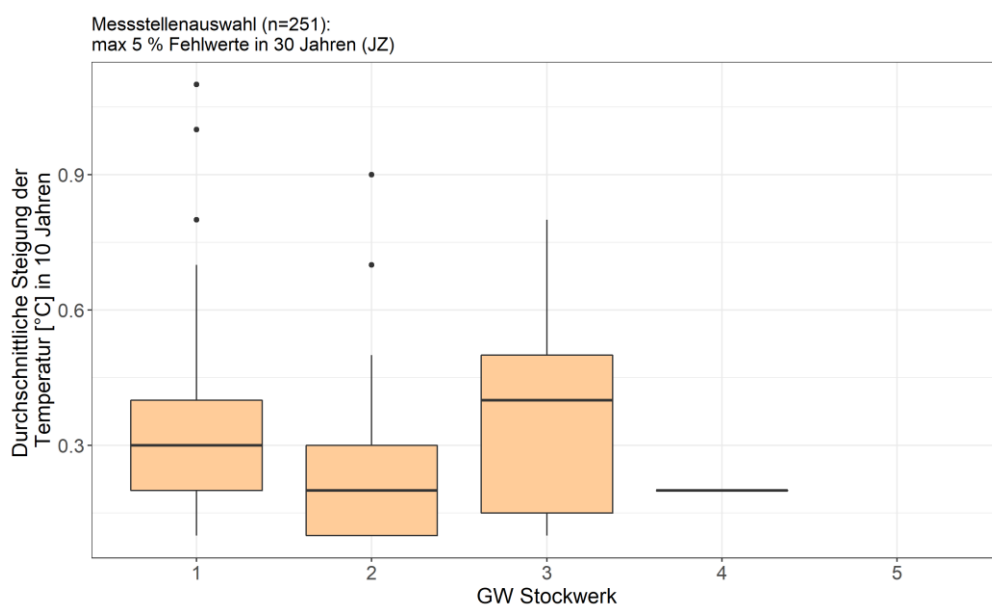


Abbildung 33: Boxplots für die Verteilung der ermittelten Steigung (in °C pro Jahrzehnt) pro Grundwasser Stockwerk (GW Stockwerk).

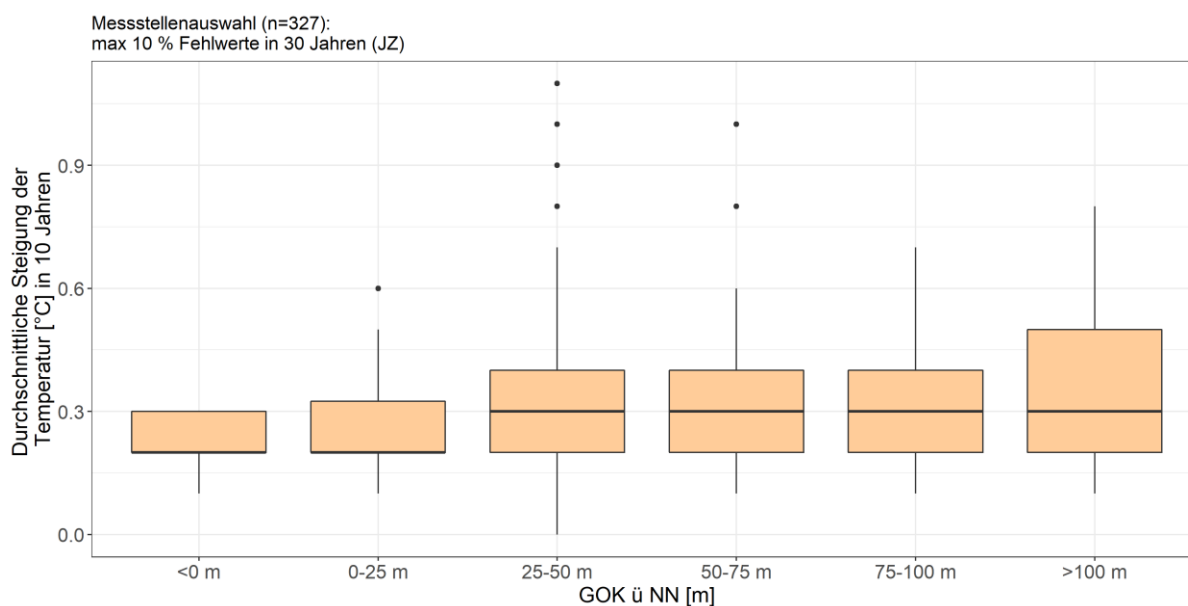


Abbildung 34: Boxplots für die Verteilung der ermittelten Steigung (in °C pro Jahrzehnt) aufgeteilt nach Geländehöhe (GOK ü NN: Geländeroberkante über Normalnull) des Messstellenstandorts.

Ein interessanter Zusammenhang wurde zwischen dem Temperaturanstieg und der Geländehöhe der Messstellenstandorte festgestellt. Je höher die Messstellen liegen, desto breiter gestreut sind die Temperaturanstiege pro Jahrzehnt (Abbildung 34). Während sie im Flachland hauptsächlich etwa zwischen 0,2–0,3 °C pro Jahrzehnt liegen, nehmen sie bei Geländehöhen ab 100 m ü NN vorwiegend Werte zwischen 0,2–0,5 °C pro Jahrzehnt an. Eine Erklärung könnte sein, dass der Untergrund in Niedersachsen mit zunehmender Geländehöhe heterogener (z.B. heterogenes Festgestein bei größeren Geländehöhen) wird und sich die Temperaturentwicklung im Grundwasser entsprechend unterschiedlich darstellt. Im Flachland, wo die ermittelten Temperaturanstiege die geringsten Werte annehmen, könnte das abmildernde maritime Klima einen Einflussfaktor darstellen. Es trägt möglicherweise dazu bei, den Temperaturanstieg im Grundwasser zu dämpfen und somit einen moderateren Anstieg zu bewirken. Vermutlich spielen auch die unterschiedlichen Flurabstände in den Landschaftsregionen Niederung, Geest und Bergland hier eine Rolle.

In den Landschaftsräumen Niederung, Geest und Bergland weisen zwischen 70–80 % der Messstellen signifikante Steigungen auf. Die Mittelwerte liegen alle bei 0,3 °C pro Jahrzehnt (Abbildung 35). Die Landschaftsräume scheinen somit keinen dominanten Einflussfaktor auf die Entwicklung der Grundwassertemperatur darzustellen.

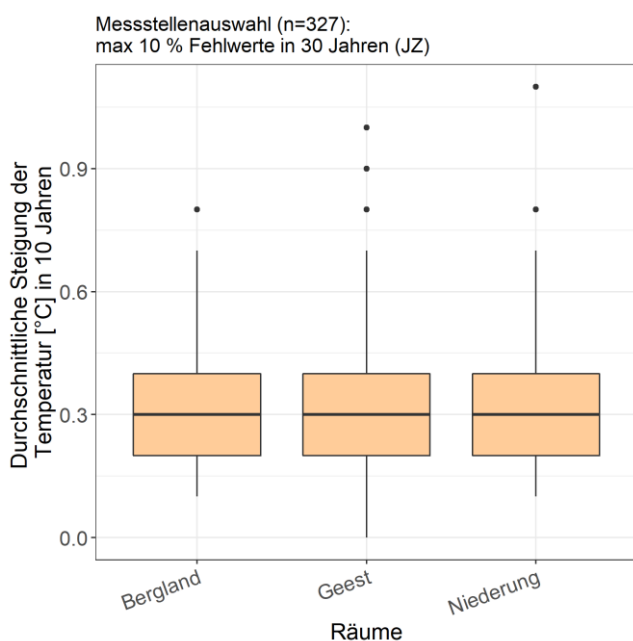


Abbildung 35: Boxplots für die Verteilung der ermittelten Steigung (in °C pro Jahrzehnt) pro Landschaftsraum.

Abbildung 36 zeigt Boxplots zu den ermittelten Temperaturanstiegen an den Grundwassermessstellen unterteilt in die Landnutzungstypen Ackerflächen, bebaute Flächen, Grünland sowie Wälder und naturnahe Flächen. Der Anstieg unter bebauten Flächen ist dabei eindeutig stärker als unter den anderen Flächennutzungen. Der Temperaturanstieg liegt hauptsächlich zwischen 0,3 und 0,5 °C pro Jahrzehnt, der Median liegt bei 0,4 °C pro Jahrzehnt. Signifikante Steigungen konnten an knapp 90 % der Messstellen unter bebauten

Flächen verzeichnet werden. Der Anstieg der Grundwassertemperatur unter den Landnutzungstypen Ackerflächen sowie Wälder und naturnahe Flächen erfolgt in ähnlichem Ausmaß. Die ermittelten Temperaturanstiege liegen zwischen 0,2 und 0,4 °C pro Jahrzehnt, der Median bei 0,3 °C pro Jahrzehnt. Unter Grünland wurde im Median ebenfalls ein Anstieg von 0,3 °C pro Jahrzehnt festgestellt. Dort finden sich die häufigsten Werte in einer etwas geringeren Spanne zwischen 0,2 und 0,35 °C pro Jahrzehnt. Während unter Ackerflächen sowie Wäldern und naturnahen Flächen an etwa 80 % der Messstellen eine signifikante Steigung verzeichnet werden konnte, waren es unter Grünland nur etwa 60 %. Dies deutet darauf hin, dass unterschiedliche Landnutzungsarten Auswirkungen auf die Temperaturentwicklung im Grundwasser haben. Unter bebauten Flächen wird prozentual an den meisten Messstellen ein Anstieg gefunden und der ermittelte Anstieg nimmt im Gesamtbild die höchsten Werte an. Die Messstellen mit Grünland im Umkreis zeigen an den wenigstens Messstellen einen Temperaturanstieg und der Anstieg nimmt im Mittel gleichzeitig die geringsten Werte an.

Die Ursachen des stärkeren Temperaturanstiegs unter bebauten Flächen sind z.B. Abwärme von Gebäuden, U-Bahnnetze, Abwassersysteme und asphaltierte Flächen wie Straßenbeläge (Menberg et al. 2013; Otto 2003; Taylor und Stefan 2009). Aus der Asphaltierung größerer Flächen resultiert ein erhöhter Energieumsatz durch Strahlung und gleichzeitig verringern die Bebauung und die damit verbundene Versiegelung des Bodens die Wärmeabgabe an die Atmosphäre (Kobus und Söll 1987). Bezogen auf Städte oder Ballungsräume zeigen sich hier Unterschiede zwischen den urbanisierten Räumen und unbebauten oder ländlichen Gebieten von 3–7 °C (Menberg et al. 2013; Taylor und Stefan 2009). Der Anstieg der Grundwassertemperatur wird folglich durch bebaute Flächen gefördert.

Im Gegensatz zu den beschriebenen Ergebnissen wurden in einer anderen Studie deutlich höhere Temperaturdifferenzen an Messstellen ermittelt, die im Umkreis Ackerfläche oder Grünland aufweisen, als an Messstellen die sich an Waldstandorten befinden (Otto 2003). Beschrieben wird hier, dass Waldstandorte den Klimagang dämpfen. Eine weitere Studie beschreibt, dass sich das oberflächennahe Grundwasser nach einer Waldrodung erwärmt (Kellner und Hubbart 2015). Die hier präsentierten Daten zeigen diesen Unterschied nicht. Die Landnutzung könnte potentiell weniger Einfluss auf die Temperaturentwicklung haben als andere Faktoren wie zum Beispiel die Messstellentiefe. Die Sichtbarkeit des Einflusses könnte dadurch in dieser Auswertung nicht gegeben sein. Der Unterschied zwischen den Ergebnissen unter Grünlandflächen und Ackerflächen wurde nach Wissen der Autorin bisher nicht beschrieben. Genau wie an Waldstandorten könnten die Unterschiede im Mikroklima (z.B. Verdunstung oder Bodenwasserhaushalt) für diesen Unterschied sorgen. Benz et al. (2018) fanden ebenfalls Unterschiede von 0,1 °C des Temperaturanstiegs zwischen unterschiedlichen Landnutzungen, schlossen jedoch daraus,

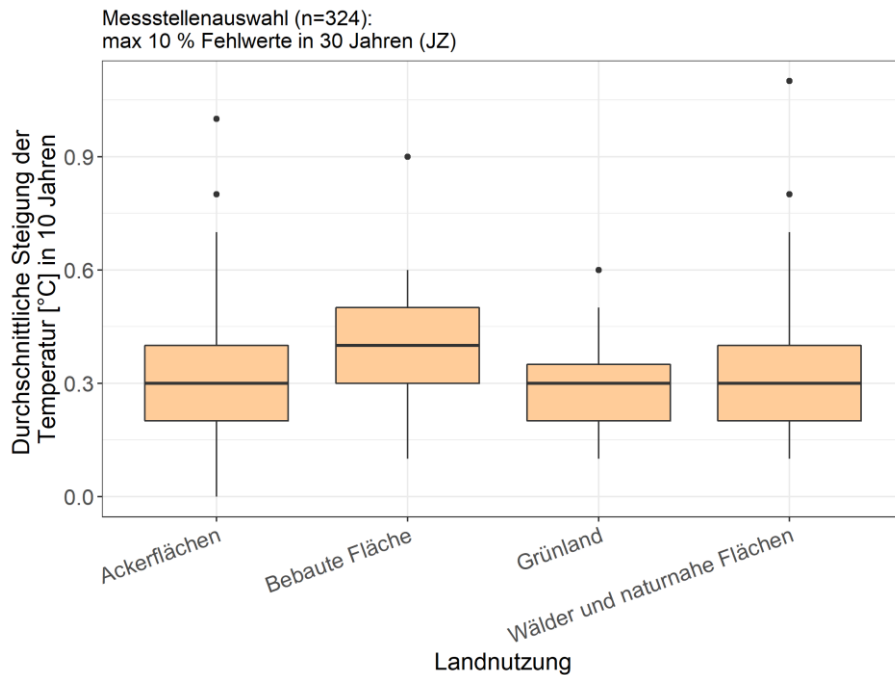


Abbildung 36: Boxplots für die Verteilung der ermittelten Steigung (in °C pro Jahrzehnt) nach Landnutzung.

dass die Landnutzung keinen signifikanten Einfluss auf die beobachteten Temperaturänderungen hätte.

Die Überlagerung der unterschiedlichen, identifizierten Einflussfaktoren macht es schwer, signifikante von weniger signifikanten Einflussfaktoren zu unterscheiden. Das zeigen sowohl die Analyse der Datenreihen an einzelnen Grundwassermessstellen als auch die Untersuchung der potentiellen Einflussfaktoren auf die Grundwassertemperatur. Schartner und Kralik (2011) scheiterten bei dem Versuch, starke und weniger starke Einflüsse herauszufiltern und kamen zu dem Schluss, dass die Faktoren aufgrund ihrer Überlagerung nicht differenzierbar sind. Anhand der Bohrlochmessungen ist es laut Benz et al. (2018) schwer bis unmöglich, das komplexe System des Zusammenspiels der verschiedenen Einflussfaktoren zu verstehen. Sie schreiben, die größten Temperaturveränderungen im Grundwasser würden innerhalb kurzer Zeiträume von 1–2 Jahren auftreten und nicht graduell. Sie schlussfolgern weiter, dass diese Trends auf lokale Ereignisse oder Gegebenheiten zurückzuführen seien und nicht allein durch die Lufttemperatur beeinflusst würden.

4 Auswirkungen der Temperaturveränderung im Grundwasser

Verschiedene Studien beschäftigen sich aus physikochemischer, biologischer und wasserwirtschaftlicher Sicht mit den Auswirkungen der Temperaturerhöhung im Grundwasser. Bei der Analyse großer Datensätze von Umweltdaten zeigte sich, dass die Sauerstoffkonzentration im Grundwasser bei langfristig steigender Temperatur abnimmt (Figura und Livingstone 2013; Riedel 2019). Der Anstieg der Grundwassertemperatur um 1 °C führte in der Studie im Bereich

zwischen 5–20 °C bereits zu einem Abfall der Sauerstoffsättigung um 4 %. Durch die daraus resultierenden reduzierten Bedingungen nahmen die Konzentrationen von gelöstem organischem Kohlenstoff und Mangan zu (Riedel 2019). Die Temperaturentwicklung in Niedersachsen weist im Durchschnitt einen Temperaturanstieg um etwa 1 °C in den letzten 30 Jahren auf. Ein Abfall der Sauerstoffsättigung, die Zunahme reduzierter Bedingungen und die daraus resultierenden steigenden Konzentrationen von Kohlenstoff und Mangan sind folglich ein zu überprüfendes Szenario der physikochemischen Bedingungen im niedersächsischen Grundwasser. Da auch die hochangepasste Fauna auf ausreichend Sauerstoff angewiesen ist, ist ein potentielles Risiko für die Destabilisierung des Ökosystems gegeben. Weiterhin konnten steigende Trends für Natrium, Kalium, Chlorid, Nitrat und Sulfat in vergleichenden Inkubationsversuchen im Labor bei der Erhöhung der Temperatur auf 20 °C und mehr festgestellt werden (Griebler et al. 2014). Die hier betrachteten Grundwassermessstellen erreichen nicht langfristig anhaltend 20 °C. Abgeleitet aus der Literatur könnte ein gemessener Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit einen Hinweis auf startende Prozesse liefern, da mit ihr der Gesamtgehalt der gelösten Salze im Wasser abgeschätzt wird.

Die Erwärmung des Grundwassers wirkt sich außerdem auf die Artenzusammensetzung von Bakterien- und Invertebratengemeinschaften sowie auf die Diversität der Arten aus (Briellmann et al. 2009). Im Temperaturbereich von 8.5–17.8 °C zeigte sich, dass die Bakteriendiversität mit dem Temperaturanstieg zunahm und gleichzeitig die Diversität der Fauna abnahm (Briellmann et al. 2009; Koch et al. 2021). Bereits wenige Grad Unterschied sind als Stress für die faunistische Gemeinschaft zu bewerten, langfristige Erwärmungen auf über 16 °C wirken auf einige Arten bereits letal (Griebler et al. 2014). Spengler (2017) untersuchten den Einfluss auf Crustacea Gemeinschaften und stellten fest, dass

die kaltstenothermen Arten, also die Arten, die geringe Wassertemperaturen bevorzugen, besonders gefährdet sind (Spengler 2017). Auch die Ergebnisse von Di Lorenzo und Reboleira (2022) weisen darauf hin, dass die Crustacea Art *Proasellus lusitanicus* wahrscheinlich aussterben wird, sollte das Worst-Case Klimaszenario eintreffen. Steigt die Grundwassertemperatur, steigt auch die Temperaturen in den Quellen. Das hat voraussichtlich auch einen Verlust von Quellarten, die häufig stenotherm sind, zur Folge (Löser et al. 2011). Aufgrund der kleinen Anzahl von Studien konnten bis dato jedoch keine belastbaren Beweise für signifikante Auswirkungen des Temperaturanstiegs auf die Ökologie und die Ökosystemfunktionen im Grundwasser erbracht werden (Briellmann et al. 2009; Griebler et al. 2014; Riedel 2019). Wie die Stygofauna letztendlich reagieren wird, bleibt aktuell noch unvorhersehbar (Di Lorenzo und Reboleira 2022).

Dahingegen ist die Beeinträchtigung der Wasserqualität in Trinkwasserverteilungssystemen durch die dort messbare Erwärmung, welche unter anderem durch das Klima beeinflusst wird, erwiesen (Epting et al. 2021; Gunkel et al. 2022). In den Sommermonaten werden die verfügbaren Richtwerte von 20–25 °C in den Rohrleitungen regelmäßig erreicht oder sogar überschritten (Epting et al. 2021; Gunkel et al. 2022). In Niedersachsen zeigte ein Beispiel einen Anstieg der Temperatur um 8,2 °C auf über 20 °C vom Wasserwerk bis zum Verbraucher in 2,3 km Entfernung (Gunkel et al. 2022). Solche Temperaturerhöhungen können zu einem Anstieg der Generationszahlen und zu Massenentwicklungen von Wirbellosen und der Mikrofauna in den Verteilungssystemen führen, sodass die Qualitätsgrenzen für deren Abundanz überschritten werden (Epting et al. 2021). Auf diese Entwicklung muss mit Anpassungsstrategien reagiert werden, die große Investitionen in der Trinkwasserversorgung mit sich bringen werden (Epting et al. 2021).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zahlreiche Studien weltweit belegen, dass die Temperaturen im Grundwasser steigen. Die häufigsten beschriebenen Ursachen sind der Klimawandel (die steigenden Lufttemperaturen), sowie die zunehmende Urbanisierung (durch den veränderten Wärmehaushalt auf versiegelten Flächen und Abwärme von Gebäuden). Aktuelle Klimaszenarien prognostizieren einen sukzessiven Anstieg der Lufttemperatur in den kommenden Jahrzehnten, was eine fortlaufende Erwärmung des Grundwassers vermuten lässt.

Die Summe aller Wärmebilanzgrößen, welche sowohl natürliche als auch anthropogene Einflussgrößen einbeziehen, bildet den Wärmehaushalt im Grundwasser. Der Transport erfolgt via Konduktion und Konvektion, welche ihrerseits durch die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der Boden- und Gesteinsschichten bestimmt werden, bzw. abhängig sind von den hydrogeologischen Gegebenheiten wie dem Hohlraumgefüge oder der Hydraulik im Untergrund.

Die periodischen tages- und jahreszeitliche Temperaturschwankungen werden bis in eine Tiefe von 10–25 m verzeichnet. Darunter herrschen annähernd konstante Temperaturen, die hauptsächlich von langfristigen, nicht-periodischen Änderungen der Lufttemperatur geprägt sind.

- Temperaturen im Grundwasser steigen global an
- Ursachen: Klimawandel und Urbanisierung
- Die Grundwassertemperatur wird durch die Lufttemperatur geprägt

Das Ökosystem Grundwasser beherbergt sowohl eine Vielzahl von Bakterien und Mikroorganismen als auch eine hochangepasste Fauna. Die Vielzahl der faunistischen Arten ist endemisch, kommt also nur lokal begrenzt vor. Ihre Artenzahl, Abundanz, Diversität und Besiedlungsfrequenz nimmt mit der Tiefe äquivalent zur Nahrungs- und Sauerstoffverfügbarkeit ab. Durch das überwiegend geringe Nahrungsangebot sind ihre Reproduktionsraten niedrig, entwickeln sie sich langsam, können jedoch ein hohes Alter (bis zu 10 Jahre) erreichen. Mit ihrer Nahrungsaufnahme sorgen sie für den Abbau von Nähr- und Schadstoffen, halten Porenräume offen und reduzieren die Viren- und Bakterienlast im Grundwasser. Sowohl die Fauna, als auch die Bakterien und Mikroorganismen sind an die Bedingungen im Grundwasser angepasst und besitzen präferierte Temperaturbereiche.

- Im Grundwasser leben Bakterien, Mikroorganismen und eine hochangepasste Fauna
- Ihre Nahrungsaufnahme stellt eine wichtige Ökosystemdienstleistung dar
- Es existieren wärmeempfindliche und wärmetolerante Arten

Für den Bericht wurden erstmalig die gemessenen Grundwassertemperaturen in Niedersachsen ausgewertet. Die Grundwassertemperatur wird im Rahmen der Probenahme zur Untersuchung der Grundwasserbeschaffenheit mit aufgenommen. Zur Auswertung wurden aus 1258 Grundwassermessstellen diejenigen ausgewählt, die Zeitreihen von mindestens 30 Jahren ohne größere Datenlücken aufweisen.

Die Auswertung ergab, dass niedersachsenweit im Durchschnitt ein Anstieg der Grundwassertemperatur von etwa 1 °C in den letzten 30 Jahren stattgefunden hat. Der durchschnittliche Anstieg entspricht in etwa dem Muster und der Höhe des Anstiegs der Lufttemperatur in Niedersachsen. Der Maximalwert des Temperaturanstiegs im Grundwasser lag bei 1,1 °C pro Jahrzehnt. Unter Einbeziehung aller Messungen pro Jahr konnte an 75 % der untersuchten Messstellen ein signifikanter Anstieg nachgewiesen werden. Gehen in die Auswertung nur die Frühlings- und Herbstmessungen ein, erhöht sich die Anzahl der Messstellen mit signifikantem Temperaturanstieg auf 97 %, bzw. 81 %. Auch die Höhe des berechneten, mittleren Temperaturanstiegs steigt von 0,32 °C auf jeweils 0,38 °C pro Jahrzehnt an. Die Nutzung aller Messwerte unabhängig vom Messdatum führt durch

die saisonalen Schwankungen zu einer Verzerrung der Ergebnisse. Der Temperaturanstieg wird dadurch im Mittel unterschätzt.

- Erstmalig landesweite Auswertung der Grundwassertemperatur in Niedersachsen
- Der Anstieg liegt im Durchschnitt bei etwa 1 °C in den letzten 30 Jahren
- Signifikanter Anstieg an etwa 75 % der untersuchten Messstellen

Durch die Untersuchung der Entwicklung der Grundwassertemperatur an einzelnen Messstellen wurden potentielle Einflussfaktoren identifiziert. Weitere wurden aus dem Kapitel zum Wärmehaushalt im Untergrund abgeleitet. Die potentiellen Einflussfaktoren wurden für detailliertere Auswertungen herangezogen. Geologische Gegebenheiten, die die Temperaturentwicklung im Grundwasser beeinflussen, sind die Entnahmetiefe des Grundwassers, die Geländehöhe des Messstellenstandorts und das Gestein am Messstellenfilter. Die Zunahme der Temperatur im Grundwasser nimmt mit der Tiefe ab, ist jedoch auch noch in Tiefen bis mindestens 40 m mit Daten belegt. Mit der Zunahme der Geländehöhe nahm die Schwankungsbreite des Temperaturanstiegs deutlich zu, vermutlich durch den heterogener werdenden Untergrund mit der Geländehöhe und das mildere Klima im Flachland. Außerdem können hier weitere Faktoren wie die Gesteinsart oder unterschiedliche Flurabstände in den Landschaftsräumen Niederung, Geest und Bergland eine Rolle spielen. Ein signifikanter Anstieg der Grundwassertemperatur wurde an 80 % der Messstellen im Lockergestein festgestellt, aber nur an 60 % der Messstellen im Festgestein. Außerdem wurde die Landnutzung als Einflussfaktor identifiziert. Grundwasser an Messstellen, in deren Umkreis sich hauptsächlich bebaute Flächen befinden, zeigte einen leicht höheren Temperaturanstieg als unter den anderen Landnutzungstypen Ackerflächen, Grünland, Wälder und naturnahe Flächen. Außerdem wurden unter Grünland mit 60 % die wenigsten Messstellen mit signifikanten Temperaturanstiegen im Grundwasser ermittelt. Aufgrund der Überlagerung der Einflussfaktoren ist eine saubere Trennung und quantitative Einordnung schwierig bis schlichtweg nicht möglich. Die einzelnen Einflussfaktoren scheinen die Erwärmung des Grundwassers zu begünstigen oder zu dämpfen. Ausschlaggebender Treiber für den Anstieg der Grundwassertemperatur ist jedoch der durch den Klimawandel bedingte Anstieg der Lufttemperatur, der sich auf das Grundwasser überträgt.

- Einfluss auf den Temperaturanstieg haben u.a. Tiefe, Landnutzung und Gesteinsart
- Einflussfaktoren überlagern sich: eindeutige Trennung & quantitative Einordnung schwierig
- Klimawandel ist ausschlaggebender Treiber – Einflussfaktoren dämpfen oder begünstigen

Der Anstieg der Grundwassertemperatur ist deutlich sichtbar und wird durch Klima und Landnutzung beeinflusst. Das

Grundwasser galt jahrelang als System mit stabilen Umweltbedingungen. Die Erhöhung der Temperatur stellt eine Störung für das System dar, die die biologischen und chemischen Prozesse im Boden und Grundwasser und somit die Grundwassergüte beeinflussen kann. Ein Anstieg der Temperatur im Grundwasser führt deshalb langfristig zu einer Veränderung des Ökosystems, aber nicht zwangsläufig zu einer Änderung der Ökosystemdienstleistungen, wie zum Beispiel dem Nährstoffabbau. Die Folgen der Grundwassererwärmung für die im Grundwasser stattfindenden Prozesse sind noch nicht absehbar. Viele Forscher plädieren dafür, die Erwärmung des Grundwassers aufgrund des Klimawandels und die potentiellen Folgen in der Grundwasserpolitik und bei Programmen zur Wiederherstellung von Lebensräumen mit zu berücksichtigen. Eine kontinuierliche Überwachung der Grundwassertemperatur, z.B. tägliche Messung über installierte Datenlogger in bestehenden Messnetzen, und eine regelmäßige Auswertung der Daten ist wichtig um das Ausmaß der Temperaturerhöhung im Blick zu behalten. Weitere Auswertungen könnten sich mit den Zusammenhängen zwischen der Temperaturerhöhung und der Sauerstoffsättigung, dem Nährstoffumsatz und den Folgen der Temperaturerhöhung für die Ökosysteme und ihrer Dienstleistungen beschäftigen.

- Auswirkung des Temperaturanstiegs: Störung des Ökosystems Grundwasser
- Folgen für Abbauprozesse und andere Ökosystemdienstleistungen sind nicht absehbar
- Studien plädieren für die Berücksichtigung der Temperatur in der Grundwasserpolitik und bei der Wiederherstellung von Lebensräumen

Literaturverzeichnis

Ascott, M.; Gooddy, D.; Mulcahy, A. (2023): Analysis of climate variability and change in observational groundwater quality data. Hg. v. British Geological Survey. Nottingham.

Baker, J. M.; Baker, D. G. (2002): Long-Term Ground Heat Flux and Heat Storage at a Mid-Latitude Site. In: *Climatic Change* 54 (3), S. 295–303. DOI: 10.1023/A:1016144718218.

Beltrami, Hugo; Ferguson, Grant; Harris, Robert N. (2005): Long-term tracking of climate change by underground temperatures. In: *Geophysical Research Letters* 32 (19), Artikel 2005GL023714. DOI: 10.1029/2005GL023714.

Benz, S. A.; Bayer, P.; Blum, P. (2017): Global patterns of shallow groundwater temperatures. In: *Environ. Res. Lett.* 12 (3), S. 34005. DOI: 10.1088/1748-9326/aa5fb0.

Benz, S. A.; Bayer, P.; Winkler, G.; Blum, P. (2018): Recent trends of groundwater temperatures in Austria. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22 (6), S. 3143–3154. DOI: 10.5194/hess-22-3143-2018.

BMLFUW (2015): Probenahmehandbuch Chemie Wasser. Grundwasser, Oberflächenwasser, Sedimente. Hg. v. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien.

Brielmann, H.; Griebler, C.; Schmidt, S. I.; Michel, R.; Lueders, T. (2009): Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. In: *FEMS microbiology ecology* 68 (3), S. 273–286. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2009.00674.x.

Burns, E. R.; Zhu, Y.; Zhan, H.; Manga, M.; Williams, C. F.; Ingebritsen, S. E.; Dunham, J. B. (2017): Thermal effect of climate change on groundwater-fed ecosystems. In: *Water Resources Research* 53 (4), S. 3341–3351. DOI: 10.1002/2016WR020007.

Cavelan, A.; Golfier, F.; Colombano, S.; Davarzani, H.; Deparis, J.; Faure, P. (2022): A critical review of the influence of groundwater level fluctuations and temperature on LNAPL contaminations in the context of climate change. In: *Science of The Total Environment* 806, S. 150412. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150412.

Danielopol, D. L.; Griebler, C.; Gunatilaka, A.; Notenboom, J. (2003): Present state and future prospects for groundwater ecosystems. In: *Environmental conservation* 30 (2), S. 104–130.

Di Lorenzo, T.; Reboleira, A. S. (2022): Thermal acclimation and metabolic scaling of a groundwater asellid in the climate change scenario. In: *Scientific reports* 12 (1), S. 17938. DOI: 10.1038/s41598-022-20891-4.

Dohr, F. (2011): Grundwassertemperaturen München. Messungen 2009–2010. Hg. v. Referat für Gesundheit und Umwelt. Online verfügbar unter <https://stadt.muenchen.de/dam/jcr:0c5041c3-3439-416e-9115-f167e7be84e8/Grundwassertemperaturen.pdf>.

EG-GWRL (2006): Richtlinie 2006/118/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung. Amtsblatt Nr. L 372 vom 27/12/2006, S. 1–13.

EG-WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt Nr. L 327 vom 22/12/2000, S. 1–73.

Eme, D.; Malard, F.; Colson-Proch, C.; Jean, P.; Calvignac, S.; Konecny-Dupré, L. et al. (2014): Integrating phylogeography, physiology and habitat modelling to explore species range determinants. In: *Journal of biogeography* 41 (4), S. 687–699.

Epting, J.; Michel, A.; Affolter, A.; Huggenberger, P. (2021): Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in Swiss alluvial aquifers. In: *Journal of Hydrology X* 11, S. 100071. DOI: 10.1016/j.hydroa.2020.100071.

EU-Klimadienst Copernicus (2024): Warmest January on record, 12-month average over 1.5°C above pre-industrial average. Online verfügbar unter <https://climate.copernicus.eu/warmest-january-record-12-month-average-over-15degc-above-preindustrial>, zuletzt geprüft am 05.03.2025.

Figura, S.; Livingstone, D. M. (2013): Klima und Grundwasser. Rückblicke und Vorhersagen von Temperatur und Sauerstoff mittels historischer Aufzeichnungen. In: *Aqua & Gas*.

Fuchs, A.; Hahn, H. J.; Barufke, K.-P. (2006): Grundwasserüberwachungsprogramm. Grundwasserfauna in Baden-Württemberg. Erhebung und Beschreibung der Grundwasserfauna in Baden-Württemberg. 1. Aufl. Hg. v. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW). Karlsruhe (Grundwasserschutz, 32). Online verfügbar unter <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/77258>, zuletzt geprüft am 03.03.2022.

Griebler, C.; Avramov, M. (2015): Groundwater ecosystem services: a review. In: *Freshwater Science* 34 (1), S. 355–367. DOI: 10.1086/679903.

Griebler, C.; Kellermann, C.; Kuntz, D.; Walker-Hertkorn, S.; Stumpp, C.; Hegler, F. (2014): Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften. Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau- und Reaktorsicherheit -Forschungskennzahl (3710 23 204).

- GrwV: Verordnung zum Schutz des Grundwassers - Grundwasserverordnung vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1513), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 12. Oktober 2022 (BGBl. I S. 1802) geändert worden ist, S. 1044–1047.
- Gunawardhana, L. N.; Kazama, S.; Kawagoe, S. (2011): Impact of Urbanization and Climate Change on Aquifer Thermal Regimes. In: *Water Resour Manage* 25 (13), S. 3247–3276. DOI: 10.1007/s11269-011-9854-6.
- Gunkel, G.; Michels, U.; Scheideler, M. (2022): Climate Change: Water Temperature and Invertebrate Propagation in Drinking-Water Distribution Systems, Effects, and Risk Assessment. In: *Water* 14 (8). DOI: 10.3390/w14081246.
- Hahn, H. J. (2005): Tiere aus dem Grundwasser von Heidelberg. In: Brandis, D., Hollert, H., Stroh, V. (Hg.): Artenvielfalt in Heidelberg. 2., bearb. u. erweiterte Aufl. Heidelberg: Selbstverlag.
- Hahn, H. J. (2015): Grundwasser – die Tiefsee des Festlandes. In: Peter Diehl, Andreas Imhoff und Lenelotte Möller (Hg.): Wissensgesellschaft Pfalz. 90 Jahre Pfälzische Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften. Ubstadt-Weiher, Heidelberg, Neustadt a.d.W., Basel: Verlag Regionalkultur (Veröffentlichungen der Pfälzischen Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften, Bd. 116), S. 119–131.
- Hahn, H. J.; Friedrich, E. (1999): Brauchen wir ein faunistisch begründetes Grundwassermonitoring, und was kann es leisten? In: *Grundwasser* 4 (4), S. 147–154.
- Hahn, H. J.; Fuchs, A. (2009): Distribution patterns of groundwater communities across aquifer types in southwestern Germany. In: *Freshwater Biology* 54 (4), S. 848–860. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2008.02132.x.
- Hahn, H. J.; Schweer, C.; Griebler, C. (2018): Grundwasserökosysteme im Recht? In: *Grundwasser* 23 (3), S. 209–218. DOI: 10.1007/s00767-018-0394-3.
- Hemmerle, H.; Bayer, P. (2020): Climate Change Yields Groundwater Warming in Bavaria, Germany. In: *Front. Earth Sci.* 8, Artikel 575894. DOI: 10.3389/feart.2020.575894.
- Hergesell, M. (2016): Klimawandel und Wasserhaushalt in Hessen – Beobachtungen und mögliche Veränderungen. 3. Wiesbadener Grundwassertag. HLNUG. Wiesbaden, 20.09.2016.
- Houben, G. J.; Koeniger, P.; Sültenfuß, J. (2014): Freshwater lenses as archive of climate, groundwater recharge, and hydrochemical evolution: Insights from depth-specific water isotope analysis and age determination on the island of Langeoog, Germany. In: *Water Resources Research* 50 (10), S. 8227–8239. DOI: 10.1002/2014WR015584.
- Hunkeler, D.; Goldschneider, N.; Rossi, P.; Burn, C. (2006): Biozönosen im Grundwasser. Grundlagen und Methoden der Charakterisierung von mikrobiellen Gemeinschaften. Hg. v. Bundesamt für Umwelt BAFU. Bern (Umwelt-Wissen, UW-0603-D).
- IPCC (2021): Climate change 2021. The physical science basis : summary for policymakers : working group I contribution to the sixth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, Y. Chen et al. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Jyväsjarvi, J.; Marttila, H.; Rossi, P. M.; Ala-Aho, P.; Olofsson, B.; Nisell, J. et al. (2015): Climate-induced warming imposes a threat to north European spring ecosystems. In: *Global change biology* 21 (12), S. 4561–4569. DOI: 10.1111/gcb.13067.
- Kaspar, F.; Imbery, F.; Friedrich, K. (2021): Nutzung klimatologischer Referenzperioden ab 2021. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/verschiedenes/20210119_neue_referenzperiode.pdf?__blob=publicationFile&v=6.
- Kellner, E.; Hubbart, J. (2015): Agricultural and forested land use impacts on floodplain shallow groundwater temperature regime. In: *Hydrol. Process.*, n/a-n/a. DOI: 10.1002/hyp.10645.
- Kobus, H.; Söll, T. (1987): Der Wärmehaushalt des Grundwassers und seine Nutzung.
- Koch, F.; Menberg, K.; Schweikert, S.; Spengler, C.; Hahn, H. J.; Blum, P. (2021): Groundwater fauna in an urban area – natural or affected? In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25 (6), S. 3053–3070. DOI: 10.5194/hess-25-3053-2021.
- Kurylyk, B. L.; MacQuarrie, K. T. B.; Caissie, D.; McKenzie, J. M. (2015): Shallow groundwater thermal sensitivity to climate change and land cover disturbances: derivation of analytical expressions and implications for stream temperature modeling. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19 (5), S. 2469–2489. DOI: 10.5194/hess-19-2469-2015.
- Landeshauptstadt Dresden (Hg.) (2010): Umweltbericht Grundwasser. Online verfügbar unter https://www.dresden.de/media/pdf/umwelt/UB_Grundwasser.pdf, zuletzt geprüft am 26.04.2022.
- LAWA (1987): Grundwasser. Richtlinien für Beobachtung und Auswertung. Teil 2 - Grundwassertemperatur.
- Lee, B.; Hamm, S.-Y.; Jang, S.; Cheong, J.-Y.; Kim, G.-B. (2014): Relationship between groundwater and climate change in South Korea. In: *Geosci J* 18 (2), S. 209–218. DOI: 10.1007/s12303-013-0062-7.
- Löser, R.; Schneider, P.; Gottschalk, N.; Ihling, H.; Kuhn, K.; Spänhoff, B. (2011): Wassertemperaturen und Klimawandel. Vorstudie zur Recherche, Homogenisierung und Plausibilisierung von verfügbaren Daten zu Langzeit-Temperaturreihen von Oberflächen-, Boden-, Sicker- und Grundwasser in Sachsen. Hg. v. LfULG (39).
- Matzke, D.; Fuchs, A.; Berkhoff, S. E.; Bork, J.; Hahn, H. J. (2009): Erhebung und Bewertung der Grundwasserfauna

Sachsen-Anhalts (Abschlussbericht). Hg. v. Institut für Grundwasserökologie Gbr (IGÖ). Landau.

Meinke, I. (2020): Norddeutschland im Klimawandel. Was wissen wir über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Norddeutschland? Hg. v. Norddeutsches Küsten- und Klimabüro, Helmholtz-Zentrum Geesthacht.

Menberg, K.; Bayer, P.; Zosseder, K.; Rumohr, S.; Blum, P. (2013): Subsurface urban heat islands in German cities. In: *The Science of the total environment* 442, S. 123–133. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.10.043.

Menberg, K.; Blum, P.; Kurylyk, B. L.; Bayer, P. (2014): Observed groundwater temperature response to recent climate change. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18 (11), S. 4453–4466. DOI: 10.5194/hess-18-4453-2014.

NLWKN (Hg.) (2014): Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen (GÜN). Güte- und Standmessnetz Grundwasser. Unter Mitarbeit von A. Jankowski, C. Karfusehr, R. te Gempt, E. Heinbockel, C. Federolf, T. Klöver et al. (Grundwasser, 18).

Nützmann, G.; Moser, H. (2016): Elemente einer analytischen Hydrologie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Odenwald, M. (2019): Grundwasser heizt sich gefährlich auf: "Wasser wird nicht mehr kalt aus Hahn kommen". Bedrohte Lebensräume und schlechtere Qualität. Hg. v. FOCUS-online. Online verfügbar unter https://www.focus.de/wissen/klima/grundwasser-erwaermung_id_10875729.html.

Otto, R. (2003): Grundwassertemperaturmessungen zur hydrogeologischen Erkundung des Bereichs Schwarzenbek/Geesthacht/Lauenburg (Unterelbe). Jahresbericht. Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein.

Park, Y.-C.; Jo, Y.-J.; Lee, J.-Y. (2011): Trends of groundwater data from the Korean National Groundwater Monitoring Stations: indication of any change? In: *Geosci J* 15 (1), S. 105–114. DOI: 10.1007/s12303-011-0006-z.

Retter, A.; Karwautz, C.; Griebler, C. (2021): Groundwater Microbial Communities in Times of Climate Change. In: *Current issues in molecular biology* 41, S. 509–538. DOI: 10.21775/cimb.041.509.

Riedel, T. (2019): Temperature-associated changes in groundwater quality. In: *Journal of Hydrology* 572, S. 206–212. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.059.

Saccò, M.; Mammola, S.; Altermatt, F.; Alther, R.; Bolpagni, R.; Brancelj, A. et al. (2024): Groundwater is a hidden global keystone ecosystem. In: *Global change biology* 30 (1), e17066.

Schäfer, C.; Schneider, A.-L.; Tiehm, A. (2018): Molekularbiologische Verfahren zur Ermittlung der Nitrifikation/Denitrifikation im Grundwasser. In: Arbeitskreis Grundwasserbe-

obachtung (Hg.): Grundwassermonitoring und -probenahme 2018. Grundwassermonitoring und -probennahme. Torgau. Sächsische Landesstiftung Natur und Umwelt Akademie.

Schartner, C.; Kralik, M. (2011): Trends der Grundwassertemperatur. Untersuchungen von Daten der Überwachung des Gewässerzustandes in Österreich. Wien: Umweltbundesamt (Report / Umweltbundesamt, [N.F.] 328).

Spengler, C. (2017): Die Auswirkungen von anthropogenen Temperaturerhöhungen auf die Crustaceagemeinschaften im Grundwasser. Versuch einer Prognose zur Klimaerwärmung und lokalen Wärmeeinträgen. Universität Koblenz-Landau.

Spengler, C.; Hahn, H. J. (2018): Thermostress: Ökologisch begründete, thermische Schwellenwerte und Bewertungsansätze für das Grundwasser. In: *Korrespondenz Wasserwirtschaft* (Bd. 11 H. 9), S. 521–525.

Taniguchi, M.; Shimada, J.; Tanaka, T.; Kayane, I.; Sakura, Y.; Shimano, Y. et al. (1999): Disturbances of temperature-depth profiles due to surface climate change and subsurface water flow: 1. An effect of linear increase in surface temperature caused by global warming and urbanization in the Tokyo Metropolitan Area, Japan. In: *Water Resources Research* 35 (5), S. 1507–1517.

Taylor, C. A.; Stefan, H. G. (2009): Shallow groundwater temperature response to climate change and urbanization. In: *Journal of Hydrology* 375 (3-4), S. 601–612. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.07.009.

Urban, K. (2015): Das Grundwasser wird wärmer. Hg. v. Deutschlandfunk online. Online verfügbar unter <https://www.deutschlandfunk.de/klimawandel-das-grundwasser-wird-waermer-100.html>.

WHG: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts, vom BGBl. I, S. 2585.

Willy, H. (2001): Grundwassertemperatur-Tiefenprofilmessungen der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung. Zusammenfassender Bericht. Materialien Nr. 103. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umwelt. München.

Impressum



Herausgeber

Niedersächsischer Landesbetrieb für
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
NLWKN Direktion
Am Sportplatz 23
26506 Norden
Telefon: (04931) 947 – 24
E-Mail: pressestelle@nlwkn.niedersachsen.de
www.nlwkn.niedersachsen.de

Autoren

Dr. Anne Mehrrens, NLWKN Betriebsstelle Cloppenburg

Koordination

Christel Karfusehr, NLWKN Betriebsstelle Cloppenburg

Unter Mitwirkung von

Dr. Gunter Wriedt, NLWKN Betriebsstelle Cloppenburg
Annette Kayser, NLWKN Betriebsstelle Cloppenburg

Titelbild

Dr. Anne Mehrrens, NLWKN Betriebsstelle Cloppenburg

Gestaltung

Niedersächsischer Landesbetrieb für
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz,
Dr. Anne Mehrrens

Stand

13.10.2025

1. Auflage: Oktober 2025