



Prognose der oberflächennahen Grundwassertemperatur in Sachsen-Anhalt

Maximilian Noethen¹ · Hannes Hemmerle¹ · Laura Meyer¹ · Peter Bayer¹

Eingegangen: 5. Oktober 2023 / Überarbeitet: 30. April 2024 / Angenommen: 6. Mai 2024
© The Author(s) 2024

Zusammenfassung

Informationen zu Grundwassertemperaturen (GWT) sind häufig spärlich und nur als Punktdaten aus Grundwassermessstellen verfügbar. Für räumlich aufgelöste Vorhersagen der GWT bieten sich Satellitendaten als Alternative zur herkömmlichen Interpolation an. Dabei wird sich die thermische Kopplung der Landoberfläche und des oberflächennahen Untergrundes zunutze gemacht. In dieser Studie wird die Verteilung der GWT in Sachsen-Anhalt erstmals charakterisiert. Basierend auf Fernerkundungsdaten und Messdaten aus 436 Grundwassermessstellen wird eine Vorhersage mit einer flächigen Auflösung von 500 m getroffen. Zudem werden neben der GWT und der Landoberflächentemperatur als Prognoseparameter weitere Variablen genutzt, welche die GWT beeinflussen und so die Genauigkeit der Vorhersage erhöhen. Die Vorhersage zeigt im Vergleich zu vorangegangenen Studien die bisher höchste Auflösung und Genauigkeit (RMSE = 0,74 K). Die Methodik liefert für alle Landnutzungsklassen gute Ergebnisse (RMSE = 0,55–1 K). Ausreißer zeigen jedoch auch, dass eine höhere Auflösung nötig ist, um lokale Hotspots zuverlässiger zu detektieren.

Schlüsselwörter Grundwassertemperatur · Erwärmung des Untergrunds · Sachsen-Anhalt · Fernerkundung · CORINE Land Cover · MODIS

Estimation of shallow groundwater temperatures in Saxony-Anhalt, Germany

Abstract

Information on groundwater temperature (GWT) is often sparse and only available as point data from monitoring wells. For large-scale spatially distributed estimates of GWT, satellite data are a suitable complement to conventional interpolation. This method utilizes the thermal coupling between land surface and the shallow subsurface. In this study, the distribution of GWT in Saxony-Anhalt is characterized. Based on remote sensing data and measurements from 436 wells, the GWT field is estimated with a spatial resolution of 500 m. In addition to the GWT and the land surface temperature, further variables are used, which influence the GWT and thus increase the accuracy of the estimation. Compared to previous studies, the results show the highest resolution and accuracy (RMSE = 0.74 K) for current GWT estimates. The methodology produces good results for all land cover classes (RMSE = 0.55–1 K). However, outliers show that a higher resolution is needed to detect local hotspots more reliably.

Keywords Groundwater temperature · Subsurface warming · Saxony-Anhalt · Remote sensing · CORINE Land Cover · MODIS

✉ Maximilian Noethen
maximilian.noethen@geo.uni-halle.de

¹ Fachbereich Angewandte Geologie, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale), Deutschland

Einleitung

Grundwassertemperaturen (GWT) spielen eine wichtige Rolle für die effiziente Versorgung mit grüner Energie aus oberflächennaher Geothermie (Bayer et al. 2019; Yasukawa et al. 2009; Zhu et al. 2010). So kann eine um 5 K erhöhte GWT die Leistung von Erdwärmesonden um bis zu 40 %

steigern (Rivera et al. 2017). Die zunehmende Nachfrage nach der Ressource Erdwärme verstärkt den Bedarf an Grundwassermonitoring und räumlich hoch aufgelöster Standortkenntnis. Mindestens ebenso wichtig wie die Energiewende ist die zuverlässige Versorgung mit qualitativ hochwertigem Trinkwasser. In Zeiten des Klimawandels verändert sich nicht nur das Dargebot an nachhaltig verfügbarem Grundwasser, auch die GWT unterliegt einer Veränderung, die sich an die steigenden Lufttemperaturen anpasst (Kurylyk et al. 2014). Erhöhte GWT können Grundwasserökosysteme mit ihrer wichtigen Reinigungsfunktion beeinträchtigen und damit die Grundwasserqualität verringern (Bonte et al. 2011; Brielmann et al. 2009; Griebler et al. 2016). Die Artenvielfalt stygobionter Grundwasserfauna, die an konstante Bedingungen angepasst ist, kann mit steigenden GWT abnehmen (Becher et al. 2022; Blum et al. 2021; Koch et al. 2020; Spengler und Hahn 2018). Zusätzlich führen höhere Untergrundtemperaturen zu vermehrtem Bakterienwachstum, insbesondere in städtischen Trinkwassernetzen (Agudelo-Vera et al. 2017; Gunkel et al. 2022; van den Bos 2020).

Die flächendeckende Bestimmung der GWT gestaltet sich aufgrund der starken Variabilität der Temperaturverteilung im Untergrund in der Praxis oft als schwierig. Da nur Punktdaten an Grundwassermessstellen erhoben werden können, werden die Zwischenräume in der Regel interpoliert (z. B. Böttcher und Zosseder 2022a; Previati und Crosta 2021; Tissen et al. 2021). Bei geringer Punktdichte kann ein großer Fehler entstehen. Wenn beispielsweise kühle, ländlichen Messstellen eine typischerweise wärmere bebauete Gegend einschließen, in der selbst keine Messwerte erhoben wurden, wird die Wärmeanomalie der Bebauung im Ergebnis nicht widerspiegelt. Um diese Schwäche der Punktinterpolation zu umgehen, ist die Nutzung von Fernerkundungsdaten möglich. Diese können die verschiedenen Faktoren, welche die GWT beeinflussen, räumlich aufgelöst in die Berechnung einer vorhergesagten Grundwassertemperatur (eGWT) mit einbeziehen. So lässt sich zum Beispiel die Abhängigkeit der oberflächennahen GWT von der Lufttemperatur nutzen. Die satellitengestützte Landoberflächentemperatur wird dabei als Proxy für die Lufttemperatur verwendet (Čermák et al. 2014). Da die GWT neben den klimatischen Bedingungen auch von anderen Einflüssen bestimmt wird, profitiert die Vorhersage der GWT davon, wenn zusätzlich zur Landoberflächentemperatur weitere Informationen einbezogen werden (z. B. Benz et al. 2017; Hemmerle et al. 2019). Die GWT wird maßgeblich von der Bodenbedeckung beeinflusst, insbesondere wurden in Gebieten mit hoher Bebauungsdichte (BD) lokal erhöhte Temperaturen im Grundwasser nachgewiesen (Böttcher und Zosseder 2022b; Epting et al. 2017; Ferguson und Woodbury 2007; Menberg et al. 2013a). Aber auch Evapotranspiration und der Anteil der Schneetage können durch Ver-

dunstungskälte bzw. Isolierung einen Effekt auf den Versatz zwischen Landoberflächentemperatur und GWT haben und somit die Ergebnisse einer Vorhersage verbessern (Shukla und Mintz 1982; Sun et al. 2016; Zhang 2005).

Bisherige Ansätze, die GWT mithilfe von Fernerkundungsdaten zu berechnen, konzentrierten sich auf urbane Räume, mit Ausnahme einer Studie von Benz et al. (2017), in der ein globaler Datensatz verwendet wurde. Für Städte in Deutschland (Benz et al. 2015a; Hemmerle et al. 2020), Frankreich (Hemmerle et al. 2019) und China (Zhan et al. 2014) wurden urbane Wärmeinseln im Untergrund, im Englischen Subsurface Urban Heat Islands (Ferguson und Woodbury 2007; Menberg et al. 2013a), mithilfe von satellitengestützten Datensätzen charakterisiert. Es ist jedoch bislang wenig erforscht, wie gut sich die Methodik auf den ländlichen Raum anwenden lässt und wie groß der Einfluss der Landnutzung auf die Genauigkeit der Vorhersage ist.

Ziel dieser Studie sind die erstmalige Beschreibung und Auswertung der GWT-Verteilung in dem Bundesland Sachsen-Anhalt sowie anschließend die Berechnung der eGWT mithilfe von Satelliten- und Messdaten. Die Ergebnisse sollen hinsichtlich des Einflusses der Landnutzung auf die GWT und die Zuverlässigkeit der Methodik ausgewertet werden.

Materialien und Methoden

Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst das deutsche Bundesland Sachsen-Anhalt und hat eine Größe von 20.452 km². Die drei größten Städte sind Magdeburg, Halle (Saale) und Dessau. Im Westen liegt das Mittelgebirge Harz mit dem Brocken als höchsten Punkt (1141 m NHN). Dominanter Vorfluter ist die Elbe, die das Land von Südosten nach Norden in 302 km durchfließt.

In Sachsen-Anhalt herrscht ein gemäßigtes Übergangsklima zwischen maritimen und kontinentalen Einflüssen. Die durchschnittliche Jahresmitteltemperatur der Jahre 2007–2022 im Randbereich von Magdeburg betrug 10,6 °C (DWD 2023). Während die Lufttemperaturen in den Höhenlagen des Harzes wesentlich niedriger sind, beispielsweise am Brocken durchschnittlich 4,7 °C (DWD 2023), steigen die Temperaturen in urbanen Zentren aufgrund der dichten Bebauung typischerweise um 1–2 K im Vergleich zum Umland an (Tzavali et al. 2015).

Mess- und Fernerkundungsdaten

Die genutzten Daten der GWT stammen aus Grundwasserqualitätsmessungen des Landesbetriebs für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW 2023)

sowie aus selbst durchgeführten Messungen. Die ausgewählten Daten des LHW wurden zwischen 2007 und 2022 erhoben. Bei den Grundwasserqualitätsmessungen wird das Grundwasser so lange gepumpt bis physikochemische Parameter stabil sind, mindestens aber das doppelte Pegelvolumen gefördert wurde. Die Temperatur des gepumpten Grundwassers wird dann in einer Durchflusszelle an der Oberfläche gemessen. Die Messtiefe der GWT entspricht bei dieser Methodik in etwa der mittleren Tiefe der Filterstrecke. Die eigenen Messungen wurden in den Städten Magdeburg (Feb., Jun., Nov. 2021), Halle (Feb., Jun. 2020; Jan., Jun., Nov. 2021) und Dessau (Mär., Jun. 2020; Jan., Jun., Nov. 2021) sowie dem Saalekreis (Jun., Aug. 2021) durchgeführt. Dabei wurden mithilfe von Temperatur-Kabellichtloten der Firmen HT Hydrotechnik und SEBA Tiefenprofile gemessen. Beide Geräte haben eine Messgenauigkeit von $<0,1$ K.

Die vorhandenen Grundwasserdaten wurden auf den Tiefenbereich von 10 bis 50 m unter Geländeoberkante beschränkt, um den Einfluss saisonaler Temperaturschwankungen sowie des geothermischen Gradienten möglichst gering zu halten. Messstellen mit einem Abstand von unter 3 m zueinander wurden zusammengefasst. Von insgesamt 1098 Messstellen wurden so 436 für die weitere Auswertung selektiert, wovon 325 vom LHW und 111 Messstellen in eigenen Messungen beprobt wurden. Die Häufigkeit der Messungen variiert, und jede der selektierten Messstellen wurde durchschnittlich zwölf Mal beprobt. Eine Darstellung der Messwiederholungen pro Messstelle ist in Abb. 7 (im Anhang) für die Qualitätsmessungen des LHW zu finden. Es zeigt sich eine stark heterogene Anzahl der Messwiederholungen, wobei 15 Messstellen nur einmal beprobt wurden, während maximal 32 Wiederholungen erreicht wurden. In Abb. 7 (im Anhang) ist ebenfalls die Verteilung der Messzeitpunkte dargestellt. Hier zeigen sich Schwerpunkte in Frühjahr und Herbst. Die Temperaturdaten der selektierten Messstellen wurden konsekutiv als Monats-, Quartals- und Jahresmittel, sowie als Mittel zwischen den Jahren 2007 bis 2022 zusammengefasst.

Für die Berechnung der eGWT wurden Fernerkundungsdaten der Landoberflächentemperatur (Wan et al. 2021), Evapotranspiration (Mu et al. 2014) und dem Anteil der Schneetage (Hall et al. 2006) mit einer Bodenauflösung von circa 1 km (Landoberflächentemperatur = MODIS/061/MOD11A1 und MODIS/061/MYD11A1, Evapotranspiration = MODIS/006/MOD16A2) bzw. 500 m (Anteil der Schneetage = MODIS/MOD10A1) genutzt. Diese wurden als Mittel des Zeitraums 2007–2022 auf eine Auflösung von 500×500 m umgerechnet. Um die zeitliche Variabilität der Landoberflächentemperatur einschätzen zu können, wurden vier repräsentative Standorte herangezogen. Die Landoberflächentemperatur zeigt in diesem Zeitraum einen linearen Trend von $0,13$ K/a (Halle:

$0,13$ K; Brocken: $0,12$ K; Altmark: $0,14$ K; Börde: $0,14$) und eine Varianz aus den Jahresmitteln von $1,44$ K (Halle: $1,31$ K; Brocken: $1,13$ K; Altmark: $1,71$ K; Börde: $1,60$). Die räumliche Varianz aller Pixel in Sachsen-Anhalt beträgt $0,42$ K. Der Anteil der Schneetage wurden zusätzlich noch hinsichtlich der Verteilung der Oberflächengewässer (MODIS/061/MCD12Q1) maskiert. Die Bebauungsdichte wurde aus den aktuellsten Impervious Built-up Daten von 2018 (European Environment Agency 2023) auf das 500 m Raster der weiteren Datensätze gemittelt. Für die weitere Auswertung wurden CORINE Land Cover (CLC) Daten von Copernicus genutzt (European Environment Agency 2023). In Abb. 1 sind alle genutzten Datensätze als Karten dargestellt.

Aktueller Forschungsstand

Eine erste Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Bodentemperaturen und satellitengestützten Landoberflächentemperatur wurde von Zhan et al. (2014) durchgeführt, beinhaltet jedoch nur Tiefen bis $3,2$ m unter Geländeoberfläche und wurde an lediglich neun Punkten mit Messdaten validiert. Dieser Ansatz wurde von Benz et al. (2015a) für die vier deutschen Städte Berlin, München, Köln und Karlsruhe weiterentwickelt, indem zusätzlich die Bebauungsdichte und Kellertemperatur berücksichtigt wurde, um den Wärmefluss von anthropogenen Quellen besser widerzuspiegeln. Es konnte ein Spearman-Korrelationskoeffizient von $0,8$ erzielt werden, wobei besonders hohe Korrelationen für ältere Städte auftraten. Dennoch war die GWT in 95% der Pixel wärmer als die Landoberflächentemperatur, mit einer durchschnittlichen Unterschätzung der jährlich gemittelten GWT um $1,5$ K. Die Studie zeigt, dass die GWT nicht alleine mithilfe der Landoberflächentemperatur geschätzt werden kann, obwohl eine signifikante Korrelation besteht. Weitere Einflussfaktoren, wie unterirdische anthropogene Wärmequellen, sorgen in Städten dafür, dass das Grundwasser zusätzlich erwärmt wird (Menberg et al. 2013b). Benz et al. (2017) führten eine Methodik ein, die einen empirischen Zusammenhang zwischen Evapotranspiration und dem Anteil der Schneetage mit der Differenz aus GWT und Landoberflächentemperatur erstellt, und wendeten diese für einen globalen Datensatz an. Damit konnte die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) der GWT-Vorhersage im Vergleich zu einer Vorhersage, die sich ausschließlich auf die Landoberflächentemperatur stützt, um $0,5$ K auf $1,4$ K verringert werden. Hemmerle et al. (2019) kombinierten die Ansätze aus Benz et al. (2017) für den ländlichen Raum mit den Vorschlägen aus Benz et al. (2015a) für urbane Flächen, um eine Vorhersage der GWT für Paris zu erstellen. Gestützt auf GWT-Messdaten aus 377 Messstellen gelang eine Schätzung mit einer weiteren Reduktion des RMSE auf $0,96$ K. In einer

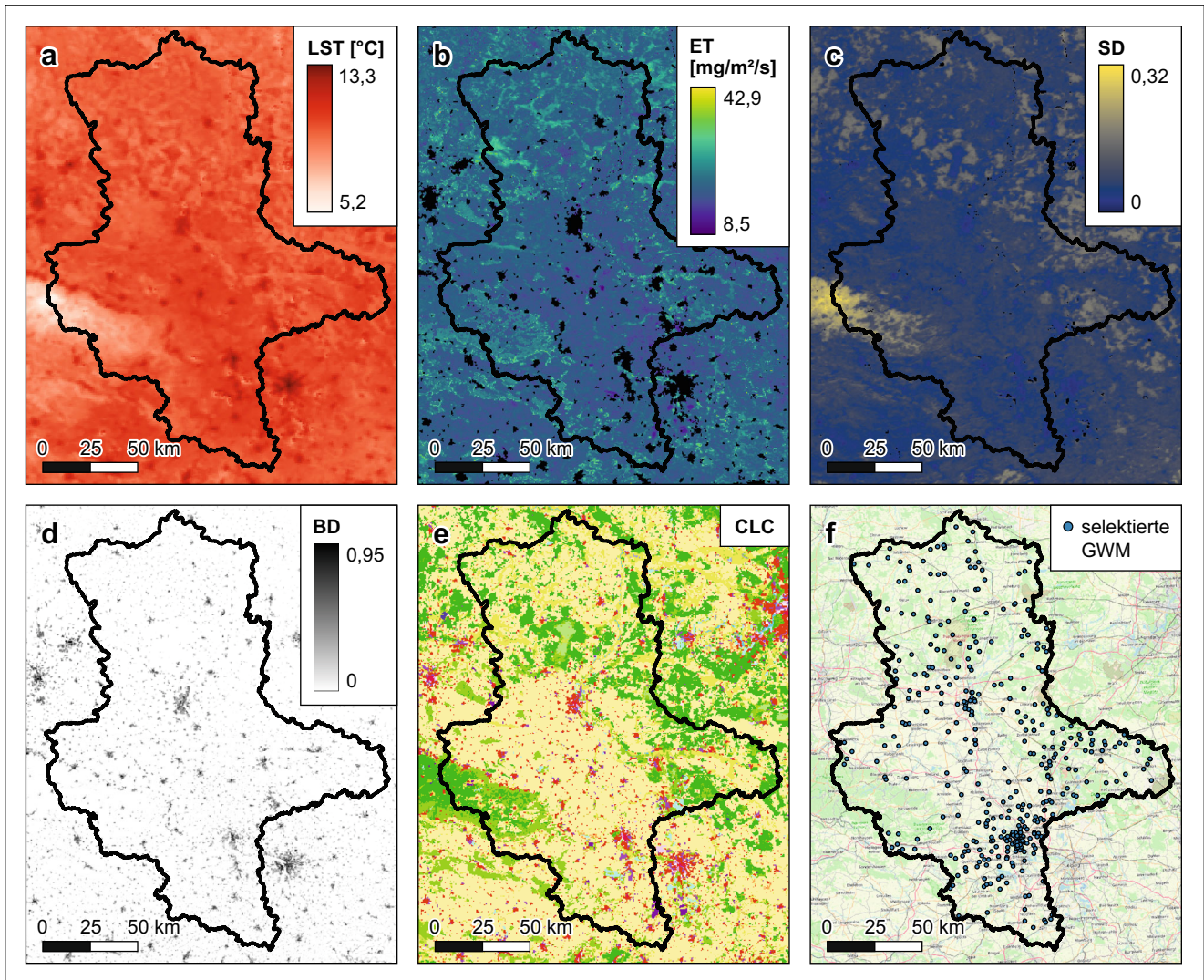


Abb. 1 Karten von Sachsen-Anhalt mit den genutzten Datensätzen: **a** Rasterdaten der Land Surface Temperature (LST); **b** Rasterdaten der Evapotranspiration (ET); **c** Rasterdaten der Snow Days (SD); **d** Rasterdaten der Building Density (BD); **e** Rasterdaten der CORINE Land Cover (CLC); **f** Punktdaten der ausgewählten Grundwassermessstellen (GWM)

Fig. 1 Maps of Saxony-Anhalt with the data sets used: **a** raster data of the Land Surface Temperature (LST); **b** raster data of Evapotranspiration (ET); **c** raster data of Snow Days (SD); **d** raster data of Building Density (BD); **e** raster data of CORINE Land Cover (CLC); **f** point data of selected monitoring wells (GWM)

weiteren Studie wendeten Hemmerle et al. (2020) den Ansatz von Benz et al. (2017) mit der zusätzlichen Berücksichtigung der Bebauungsdichte für die Stadt Köln an. Die GWT-Vorhersage konnte die bisher genauesten Ergebnisse mit einem RMSE von 0,86 K erzielen.

Berechnung und Auswertung der Grundwassertemperatur

In den bisherigen Studien wurden die Berechnungen der eGWT mithilfe Multipler Linearer Regression durchgeführt. Für die vorliegende Studie haben wir vorab für verschiedene alternative Ansätze die Ergebnisse verglichen (Tab. 1, im Anhang). Da die komplexeren Methoden jedoch

nur eine geringe Reduktion des Prognosefehlers lieferten, stellen wir im Haupttext nur das etablierte Verfahren der Multiplen Linearen Regression zur Berechnung der eGWT vor (Benz et al. 2017; Hemmerle et al. 2019).

Die Methodik zur Berechnung der eGWT folgt Hemmerle et al. (2020) unter Nutzung der Landoberflächentemperatur (LST), Evapotranspiration (ET), dem Anteil der Schneetage (SD) und der Bebauungsdichte (BD). Dazu wurde je

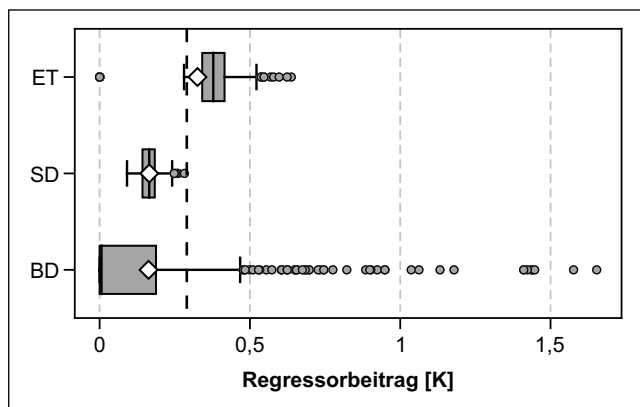


Abb. 2 Beiträge der Regressoren für die Berechnung der vorhergesagten Grundwassertemperatur an jeder Grundwassermessstelle, dargestellt als Boxplots. Die gestrichelte Linie zeigt den Beitrag des y-Achsenabschnitts. Die Mittelwerte sind mit Rauten markiert. ET=Evapotranspiration, SD=Anteil der Schneetage, BD=Bebauungsdichte
Fig. 2 Regressor contributions for the calculation of the predicted groundwater temperature per monitoring well, shown as box plots. The dashed line shows the contribution of the y-axis intercept. The mean values are marked with diamonds. ET=Evapotranspiration, SD=Snow days, BD=Building density

räumlich diskretisiertem Pixel folgende Gleichung angewendet:

$$eGWT = LST + 0,02 \left[K \frac{m^2 \cdot s}{mg} \right] \cdot ET + 7,47 [K] \cdot SD + 2,23 [K] \cdot BD + 0,29[K]$$

Während durch den y-Achsenabschnitt für jeden Pixel einen Versatz von 0,29K addiert wird, tragen die restlichen Regressoren unterschiedlich stark zur eGWT bei, abhängig von den abgeleiteten Regressionskoeffizienten und den Regressoren. Hierbei hat, gemittelt auf die Fläche von Sachsen-Anhalt, die Evapotranspiration mit 0,33 K den stärksten Einfluss. Die Einflüsse der Schneebedeckung und Bebauungsdichte sind mit 0,17K und 0,16K etwa halb so groß. Die Bebauungsdichte weist jedoch lokal die größten Änderungen von bis zu 1,66K auf. Die Verteilung der Beiträge der Regressoren sind in Abb. 2 dargestellt.

Ergebnisse und Diskussion

Räumliche Verteilung der Grundwassertemperatur

Zunächst wird die Verteilung der gemessenen GWT betrachtet (Punkte in Abb. 3). Die kälteste GWT wurde mit 8,7°C in einem Waldgebiet in der Nähe von Rottleberode im Südharz aufgezeichnet. In den höheren Lagen im

Harz, wo noch kältere Temperaturen zu erwarten sind, sind im Festgestein keine Messstellen im Messnetz enthalten. Auffällig sind die erhöhten Temperaturen in den Städten Magdeburg, Halle und Dessau von bis zu 17°C (bzw. 15,7 und 16,6°C). Die hohen GWT sind in der Regel auf anthropogene Quellen zurückzuführen, wie bei der wärmsten beprobten Messstelle, die in direkter Nähe zu einer unterkellerten medizinischen Einrichtung im Süden Magdeburgs liegt. Die von der Unterkellerung ausgehende Wärme könnte hier einen direkten Einfluss auf die hohe GWT haben. Dass die höchste Temperatur in Magdeburg nicht in der Innenstadt, wo die Bebauung am dichtesten ist, gemessen wurde, zeigt den starken Einfluss lokaler Wärmequellen auf das thermische Feld des Untergrunds und die daraus resultierende starke Variabilität von Grundwassertemperaturen.

Für die weitere Auswertung wurde jeder Messstelle die jeweilige CLC-Klasse zugewiesen. Dadurch kann der Einfluss der Landnutzung auf die GWT untersucht werden. Zur Vereinfachung wurden die Klassen in Gruppen zusammengefasst (Tab. 2, im Anhang).

Das arithmetische Mittel der gemessenen GWT in Sachsen-Anhalt beträgt 11,2°C, mit einer räumlichen Varianz

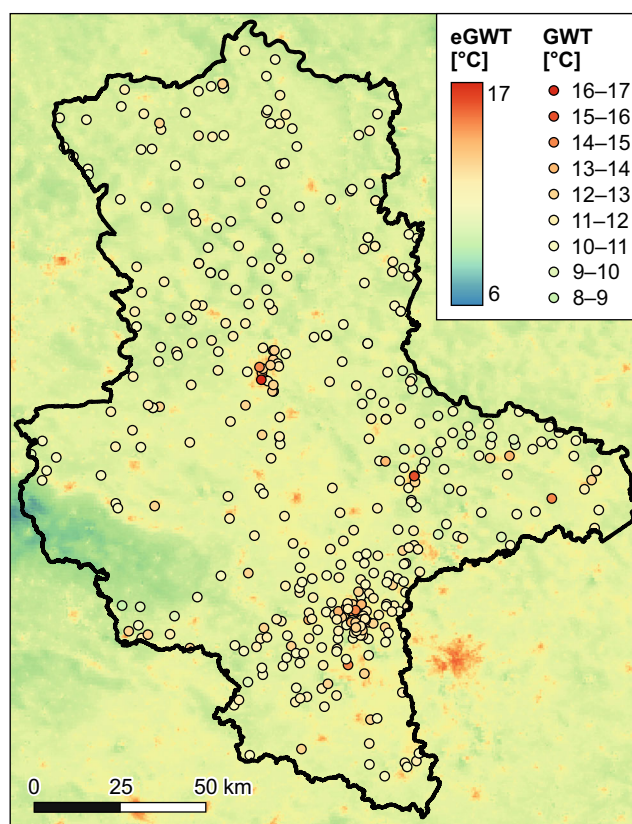
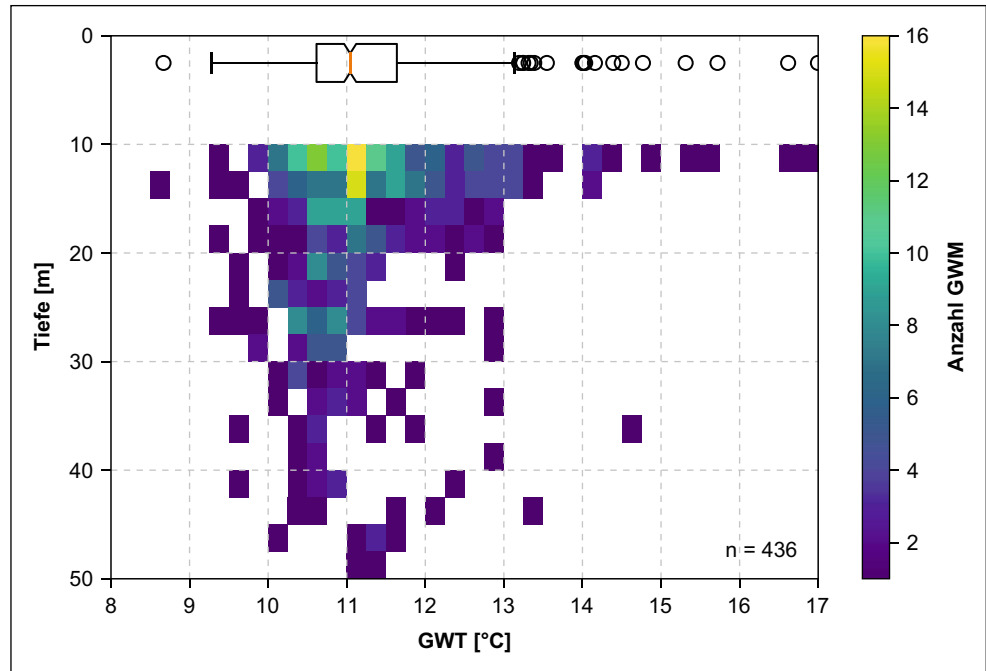


Abb. 3 Vorhergesagte Grundwassertemperaturen (eGWT) in Sachsen-Anhalt mit den gemessenen Grundwassertemperaturen (GWT) als Punkte

Fig. 3 Predicted groundwater temperatures (eGWT) in Saxony-Anhalt with the measured groundwater temperatures (GWT) as points

Abb. 4 Durchschnittliche Mess-tiefe und Grundwassertemperatur (GWT) aller Messstellen, dargestellt als Streudiagramm mit Boxplot der GWT-Verteilung am oberen Rand. Die Farbe der Pixel zeigt die Anzahl der Grundwassermessstellen (GWM)

Fig. 4 Average measurement depth and groundwater temperature (GWT) of all monitoring wells, shown as a scatter plot with boxplot of GWT distribution at the top. The colour of the pixels indicates the number of monitoring wells (GWM)



von 1,08 K. Die zeitliche Varianz, die zwischen den einzelnen Messungen auftritt, fällt dahingegen mit 0,87 K etwas geringer aus. Die mittlere vertikale Varianz der GWT innerhalb der Grundwassermessstellen beträgt 0,03 K. Sie wurde aus allen Temperaturprofilen zwischen 10 und 50 m Tiefe ($n=100$) erstellt, wobei beachtet werden muss, dass die Profile unterschiedliche Tiefenbereiche abdecken. An 81 % der beprobten Messstellen beträgt die GWT unter 12 °C und kann damit unter den herrschenden klimatischen Bedingungen als natürlich betrachtet werden. Ergebnisse anderer Studien, die die Verteilung der GWT in einer Region oder einem Land ausgewertet haben, zeigen ähnliche Werte. Die Vergleichbarkeit ist allerdings durch abweichende klimatische Bedingungen und Unterschiede in der Datenerhebung eingeschränkt. So beschreibt Riedel (2019) für Baden-Württemberg zwischen 2000 und 2015 eine mittlere GWT von 10,6 °C, während Benz et al. (2018) für das Jahr 2013 in Österreich eine mittlere GWT von 11,4 °C angeben.

Auch wenn in dieser Studie versucht wurde, durch eigene Messkampagnen in urbanen Räumen alle Regionen des Landes abzudecken, werden Agrarflächen und Wald- bzw. Naturgebiete (zusammen 79 % der Messstellen) aufgrund des an der Wasserrahmenrichtlinie orientierten Messnetzes des LHW stärker als urbane Räume repräsentiert. Ebenfalls werden die hohen Lagen des Harzes in dieser Studie nicht abgebildet. Darüber hinaus kann die unterschiedliche Anzahl der Beprobungen je Messstelle ebenso wie die ungleichmäßige Verteilung der Messzeitpunkte einen Einfluss auf die Ergebnisse haben (Abb. 7, im Anhang). Eine Abhängigkeit der GWT von der Messtiefe ist innerhalb von 10 bis 50 m Tiefe nicht ersichtlich (Abb. 4). Der Fehler

durch jahreszeitliche Temperaturschwankungen im oberflächennahen Bereich liegt unterhalb von 10 m in der Regel bei < 1 K (Anderson 2005; Böttcher und Zosseder 2022b; Kurylyk et al. 2019) und wird in dieser Studie zusätzlich durch die Messwiederholungen verringert. Die unterschiedlichen Messmethoden und Messgeräte stellen ebenfalls eine mögliche Fehlerquelle dar. Temperaturwerte bei Grundwasser-Qualitätsmessungen könnten im Vergleich zu In-situ-Messungen aufgrund des Pumpvorgangs leicht erhöht sein. Dies wurde bisher jedoch nicht systematisch untersucht. Da in Sachsen-Anhalt keine begleitenden In-situ-Messungen durchgeführt wurden, können wir diesen Fehler hier ebenfalls nicht bestimmen. Daten aus einer Studie von Hemmerle et al. (2022) zeigen jedoch, dass die Temperatur bei Grundwasser-Qualitätsmessungen in Köln im Mittel um 0,29 K überschätzt wurde. Es ist ebenfalls möglich, dass ein Einhängen der Pumpe auf mittlerer Höhe der Filterstrecke nicht gewährleistet, dass das gepumpte Grundwasser aus dieser Tiefe stammt. Durch Heterogenität der hydraulischen Durchlässigkeit der Sedimente im Bereich der Filterstrecke kann die wahre Entnahmetiefe von der mittleren Filterstrecke abweichen.

Vergleich zwischen gemessener und vorhergesagter Grundwassertemperatur

Die vorhergesagten Grundwassertemperaturen sind in Abb. 3 als Raster dargestellt. Die Verteilung bildet die erwarteten Muster der Landoberflächentemperatur ab, die eine Zunahme der eGWT in urbanen Räumen sowie die kältesten eGWT von unter 8 °C im Harz zeigt. Um die

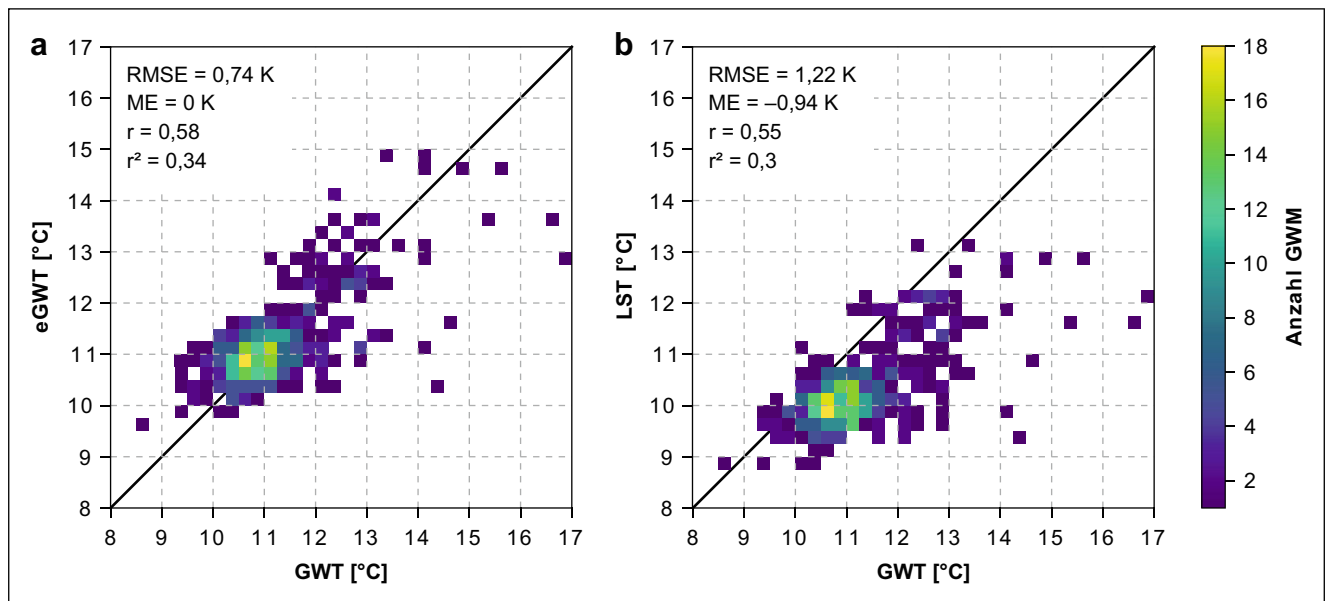


Abb. 5 Streudiagramme zur Korrelation von **a** vorhergesagter (eGWT) und gemessener Grundwassertemperatur (GWT); **b** Land Surface Temperature (LST) und GWT. Die Farbe der Pixel zeigt die Anzahl der Grundwassermessstellen (GWM). Die Fehler werden durch den Root Mean Square Error (RMSE) und den Mean Error (ME) angegeben. Der Spearman-Korrelationskoeffizient wird mit r und das Bestimmtheitsmaß mit r^2 angezeigt

Fig. 5 Scatter plots showing the correlation of **a** predicted (eGWT) and measured groundwater temperature (GWT); **b** Land Surface Temperature (LST) and GWT. The colour of the pixels indicates the number of wells (GWM). The errors are indicated by the Root Mean Square Error (RMSE) and the Mean Error (ME). The Spearman correlation coefficient is indicated by r and the coefficient of determination by r^2

Qualität der aus den Satellitenbildern berechneten eGWT zu beurteilen, werden die Ergebnisse mit den gemessenen GWT verglichen. Abb. 5 zeigt Streudiagramme, die die Korrelationen von eGWT/GWT sowie Landoberflächentemperatur/GWT abbilden. Eine Vorhersage, die alleine auf der Landoberflächentemperatur basiert, würde einen RMSE, also die Abweichung des gemessenen vom vorhergesagten Wert, von 1,22 K haben und die wahre GWT um durchschnittlich 0,94 K unterschätzen. Eine bessere Schätzung würde alleine der Mittelwert der gemessenen GWT von 11,2 °C liefern (RMSE 0,84 K). Die Vorhersage mithilfe jeweils eines einzigen zusätzlichen Fernerkundungsparameters verringert den RMSE bereits erheblich auf 0,77 K (Evapotranspiration; Anteil der Schneetage), bzw. auf 0,75 K (Gebäudedichte).

Die Genauigkeit der Vorhersage mit allen Regressoren wurde durch einen erzielten RMSE von 0,74 K im Vergleich zu vorangegangenen Arbeiten verbessert. Vorherige Studien für einen globalen Datensatz, für Köln und für Paris (Benz et al. 2018; Hemmerle et al. 2020, 2019) zeigen höhere RMSE von 0,86–1,4 K. Das leicht verbesserte Ergebnis kann u. a. auf die hohe Anzahl und flächige Verteilung der Messstellen zurückgeführt werden. Des Weiteren sind in ländlichen Gebieten weniger Ausreißer mit hoher GWT, die durch lokale Wärmequellen hervorgerufen werden, zu beobachten. Dadurch ist für Studien in urbanen Räumen, wie

z. B. Paris und Köln, wo das Grundwasser häufiger durch Bebauung beeinflusst wird, ein höherer Fehler zu erwarten.

Die drei höchsten positiven und negativen Ausreißer sind in Tab. 3 (im Anhang) zusammengestellt. Starke Unterschätzungen der GWT sind in Magdeburg (–4,2 K) und Dessau-Roßlau (–3,1 K) auf lokale Temperaturanomalien durch Bebauung zurückzuführen. In Klöden hängt die niedrigere Vorhersage (–3,9 K) vermutlich mit der Nähe zur Elbe und der damit verbundenen Infiltration wärmerer Oberflächenwässer zusammen. Eine Überschätzung der GWT durch das Modell kann insbesondere für Grünflächen (Agrarflächen oder Stadtparks) innerhalb oder in der Nähe von Stadtgefüge beobachtet werden. In dieser Studie ist die gemessene GWT in verschiedenen Fällen in Halle (Saale) niedriger als die Vorhersage (1,5–1,8 K). Grünflächen in Städten zeigen in der Regel niedrigere GWT als umliegende bebaute Flächen. Die Satellitendaten hingegen sind mit einer Auflösung von 500 m in manchen Fällen zu grob, um kleinere Grünflächen in Städten zu erfassen. Dies zeigt das generelle Problem von GWT-Vorhersagen mit niedrig aufgelösten Satellitendaten, dass zwar regionale Effekte wie urbane Wärmeinseln im Untergrund gut wiedergegeben werden können, lokale Anomalien hingegen nur unzureichend abgebildet werden. Aus diesem Effekt resultiert auch das relativ geringe Bestimmtheitsmaß von 34 % in der Prognose. Hinzu kommen Einflüsse durch die Mittelung der Eingangsdaten über mehrere Jahre, die

Mittelung über die Tiefe und die Messfehler bei der Bestimmung der Grundwassertemperatur, die die Genauigkeit der Modellergebnisse negativ beeinflussen. Beispielsweise kann von einem Fehler durch die Erwärmung des Wassers während des Pumpvorgangs bei den Grundwasserqualitäts-Messungen ausgegangen werden, der mit den anderen Unsicherheiten in den hohen Restfehler der Prognose mit einfließt und diesen teilweise begründet.

Einfluss der Landnutzung auf die Grundwassertemperatur

Um den Einfluss der Landnutzung auf die GWT und eGWT, der bereits bei den Ausreißern der Vorhersage ersichtlich wurde, besser bewerten zu können, sollen die CLC-Klassifizierungen der Messstellen ausgewertet werden. Die Durchschnittswerte für die GWT und eGWT der jeweiligen CLC-Gruppen sowie der resultierende RMSE (Tab. 4, im Anhang) geben dabei Auskunft über die Tauglichkeit der Methodik für die verschiedenen Landnutzungsklassen (Abb. 6).

Wie erwartet sind im ländlichen Raum niedrigere GWT als auf urbanen Flächen messbar. Wald- und Naturgebiete haben in Sachsen-Anhalt mit $10,7^{\circ}\text{C}$ und einer Varianz von $0,48\text{ K}$ die niedrigsten durchschnittlichen GWT, gefolgt von landwirtschaftlichen Flächen ($11,0^{\circ}\text{C} \pm 0,44\text{ K}$). In urbanen Räumen sind städtische Grünflächen mit $11,7^{\circ}\text{C} \pm$

$4,01\text{ K}$ am kältesten, während in Stadtgefüge und Industriegebieten die GWT auf $12,3^{\circ}\text{C} \pm 1,21\text{ K}$, bzw. $12,6^{\circ}\text{C} \pm 0,85\text{ K}$ ansteigt. Die Differenz zwischen der kältesten und wärmsten CLC-Gruppe liegt daher bei $1,9\text{ K}$.

Die besten Ergebnisse werden für die Messstellen in Wald- und Naturgebieten (RMSE = $0,55\text{ K}$, $n = 78$) und auf städtischen Grünflächen (RMSE = $0,62\text{ K}$, $n = 8$) erzielt. Dies ist für die Wald- und Naturgebiete mit der geringeren Beeinflussung durch lokale Wärmequellen zu begründen. Als städtische Grünflächen wurden nur acht Messstellen klassifiziert. Aufgrund der geringen Anzahl an Datenpunkten und damit geringen Repräsentativität muss das Ergebnis für die städtischen Grünflächen kritisch betrachtet werden. Gleichzeitig fallen dadurch Messstellen, die eigentlich auf Grünflächen oder -streifen liegen, in die Klasse des Stadtgefüges. Dadurch liegt der wahre Wert der durchschnittlichen GWT vermutlich höher als die berechneten $12,3^{\circ}\text{C}$.

Für landwirtschaftliche Flächen, auf denen sich 61% ($n = 266$) der Messstellen befinden, beträgt der RMSE $0,71\text{ K}$. Auch hier ist von einer geringen anthropogenen Beeinflussung und dadurch homogeneren Temperaturverteilung im Vergleich zu urbanen Räumen auszugehen. Die Heterogenität des Temperaturfeldes in Städten spiegelt sich in den Fehlern für die CLC-Gruppen „Stadtgefüge“ und „Industriegebiete“ wider, die mit $0,95$ und $1,00\text{ K}$ höher als der Durchschnitt ausfallen. Urbane GWT hängen zusätzlich von unterirdischen Wärmequellen ab, die mit dieser Methodik nicht abgebildet werden können, und sind weniger stark an die Landoberflächentemperatur gekoppelt. Darüber hinaus können die lokal stark variierenden GWT in Städten bei einer Auflösung der Vorhersage von 500 m schlecht wiedergegeben werden.

Der Prognosefehler kann in Zukunft insbesondere durch eine höher auflösende räumliche und zeitliche Diskretisierung der Eingangsdaten verringert werden. Auch die Berücksichtigung von anthropogenen Wärmequellen wie Abwasser- und Fernwärmenetzen oder Tunneln würde genauere Abschätzungen als mit der Bebauungsdichte alleine ermöglichen, benötigt aber detaillierte Datensätze. Ähnliche Ansätze wie von Menberg et al. (2013b) oder Benz et al. (2015b), um Wärmeflüsse in urbane Aquifere zu ermitteln, könnten genutzt werden, indem verschiedene Wärmequellen für Modellgebiete detailliert aufgelöst werden. Wenn die GWT für kleinere Räume hochauflösend abgeschätzt werden sollen, eignen sich hingegen numerische Modelle, die neben anthropogenen Einflussfaktoren auch Aquifereigenschaften berücksichtigen können, dafür aber entsprechend aufwendiger in der Parametrisierung und Berechnung sind (Epting et al. 2013; Makasis et al. 2021). Satellitengestützte Berechnungen, wie in dieser Studie vorgestellt, eignen sich, um zuverlässig regionalskalige Abschätzungen der GWT mit öffentlich zugänglichen Daten vorzunehmen. Das Vorgehen stellt eine zuverlässige Alternative zu den üblicher-

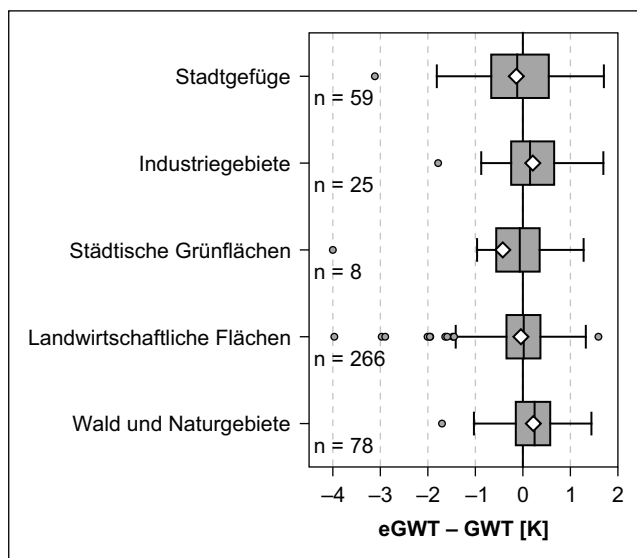


Abb. 6 Differenz zwischen vorhergesagter (eGWT) und gemessener Grundwassertemperatur (GWT) als Boxplot pro Landnutzungs-Gruppe. Die Anzahl der Messstellen in der jeweiligen Landnutzungs-Gruppe wird mit n angegeben. Die Mittelwerte sind mit Rauten markiert
Fig. 6 Difference between predicted (eGWT) and measured groundwater temperature (GWT) as boxplot per land use group. The number of measured wells in the respective land use group is indicated by n . The mean values are marked with diamonds

weise genutzten Interpolationsmethoden dar, insbesondere in Gebieten mit geringerer Datendichte oder ungleichmäßiger Verteilung der Messstellen. Die Ergebnisse der eGWT-Verteilung können beispielsweise zur Kartierung des geothermischen Potenzials verwendet werden (Hemmerle et al. 2020).

Fazit

Die Verteilung der oberflächennahen GWT in Sachsen-Anhalt wird in dieser Studie erstmals charakterisiert. Die GWT beträgt im arithmetischen Mittel 11,2 °C, mit einer räumlichen Varianz von 1,08 °C und basierend auf wiederholten Messungen an 436 Messstellen. Der Wertebereich der GWT von 8,7 bis 17,0 °C zeigt die Variabilität in der räumlichen Verteilung zwischen Naturräumen und Städten.

Die vorgestellte Berechnung der eGWT erfolgte mithilfe Multipler Linearer Regression und anhand von Satellitendaten sowie den gemessenen GWT-Daten. Das Ergebnis zeigt einen geringen Fehler (RMSE=0,74 K) und stellt eine Verbesserung im Vergleich zu vorherigen Studien dar. Nach Auswertung der Landnutzung können die wärmsten GWT in Stadtgefüge (12,3 °C ± 1,21 K) und Industriegebieten (12,6 °C ± 0,85 K) festgestellt werden, ebenso wie die größten Fehler bei der Berechnung der eGWT (RMSE=0,95 und 1,00 K). In Wald- und Naturgebieten sowie landwirtschaftlichen Flächen wurden die kältesten GWT gemessen (10,7 °C ± 0,48 K; 11,0 °C ± 0,44 K), was der zu erwartenden Temperaturverteilung im Untergrund entspricht. Am zuverlässigsten ist die verwendete Methodik für Wald- und Naturgebiete mit einem RMSE von 0,55 K. Regionale Trends wie urbane Wärmeinseln im Untergrund werden zuverlässig abgebildet, während lokale Wärmeanomalien aufgrund der Pixelgröße in der Regel schlecht detektiert werden. Die aus den Fehlern ableitbare schlechtere Anwendbarkeit in urbanen Räumen liegt an der größeren Heterogenität der GWT aufgrund kleinräumiger Änderungen der Landnutzung und der Vielzahl anthropogener Wärmequellen. Eine geringere Pixelgröße der Satellitendaten sowie eine Einbeziehung weiterer Faktoren wie unterirdischer anthropogener Wärmequellen würde Verbesserungspotenzial für die Anwendung in urbanen Räumen bieten.

Die genutzte Methodik kann einfach und kostengünstig auf andere Regionen übertragen werden und bietet sich als Alternative zur einfachen Interpolation von Punktdaten an, die eine hohe Anzahl und homogene Verteilung der Messpunkte benötigt. Eine höhere Auflösung der Vorhersage kann mit numerischen Grundwassermodellen erreicht werden, die sich daher insbesondere für kleinskalige Fragestellungen eignen. Allerdings sind numerische Ansätze vergleichsweise aufwendig bei der Parametrisierung und Berechnung. Die Ergebnisse dieser Studie können beispiels-

weise genutzt werden, um das Potenzial für oberflächennahe Geothermie zu kartieren.

Anhang

Gegenüber der etablierten multiplen linearen Regression wurden verschiedene Regressionsmethoden getestet (Tab. 1). Diese beinhalten Support-Vektor-Maschinen, simple neuronale Netze und Nearest-Neighbour-Regression

Tab. 1 Metrik der erprobten Methoden zur Berechnung der vorhergesagten Grundwassertemperatur

Table 1 Metrics of the tested methods for calculating predicted groundwater temperatures

5f-RMSE	Test R2	Test RMSE	Test ME	Model
<i>Prognoseparameter: GWT, Variablen: LST, SDP, EVT, BD</i>				
0,71	0,45	0,80	0,01	MLP – logistic
1,27	0,45	0,80	-0,01	MLP – tanh
0,68	0,44	0,81	-0,01	MLR – with intercept
0,69	0,45	0,81	-0,03	NNR
0,70	0,4	0,84	-0,04	SVM – polynomial
0,74	0,03	0,84	0,02	SVM – linear
0,73	0,01	0,85	-0,02	SVM – radial basis
0,72	0,37	0,86	0,01	MLR – no intercept
0,71	0,44	0,87	-0,01	MLP – relu
<i>Prognoseparameter: GWT-LST, Variablen: SDP, EVT, BD</i>				
0,74	0,03	0,84	0,02	SVM – linear
0,73	0,01	0,85	-0,02	SVM – radial basis
0,75	0,03	0,85	0,00	SVM – polynomial
0,72	0,02	0,85	0,13	MLP – logistic
0,72	0,01	0,85	0,02	MLR – with intercept
0,72	0,02	0,85	-0,11	MLP – tanh
0,72	0,00	0,87	-0,01	MLR – no intercept
0,73	0,00	0,91	0,01	NNR
0,71	0,00	0,91	-0,05	MLP – relu

RMSE Root Mean Square Error, MAE Mean Absolute Error, ME Mean Error, 5f 5-fold Cross-Validation, MLR Multiple Lineare Regression, SVM Support Vector Machine, MLP Multilayer Perceptron, NNR Nearest Neighbor Regression

Tab. 2 Landnutzungs-Gruppen und zugehörige Klassen nach CORINE Land Cover (CLC)

Table 2 Land use groups and associated classes according to CORINE Land Cover (CLC)

CLC-Gruppe	Enthaltene CLC-Klassen
Stadtgefüge	1, 2
Industriegebiete	3–9
Städtische Grünflächen	10, 11
Landwirtschaftliche Flächen	12–22
Wald und Naturgebiete	23–34

Tab. 3 Ausreißer der Vorhersage als Temperaturdifferenz (ΔT) zwischen Grundwassertemperatur (GWT) und vorhergesagter Grundwassertemperatur (eGWT) sowie zugeordnete CORINE Land Cover (CLC) Gruppen

Table 3 Prediction outliers as temperature difference (ΔT) between groundwater temperature (GWT) and predicted groundwater temperature (eGWT) as well as assigned CORINE Land Cover (CLC) groups

Ort	ΔT [K]	GWT [°C]	eGWT [°C]	CLC-Gruppe	Mögliche Begründung
Magdeburg	-4,2	17	12,8	Künstliche Grünflächen	Nähe zu med. Einrichtung (12 m)
Klöden	-3,9	14,4	10,5	Landwirtschaftliche Flächen	Nähe zu Elbe (130 m)
Dessau-Roßlau	-3,1	16,6	13,5	Stadtgefüge	Innenstadt, Nähe zu Wohngebäude (1 m)
Halle (Saale)	1,5	11,2	12,7	Landwirtschaftliche Flächen	Hohe LST durch städtische Lage
Halle (Saale)	1,5	12,4	13,9	Stadtgefüge	Lage in Stadtpark
Halle (Saale)	1,8	12,3	14,1	Stadtgefüge	Lage in Stadtpark

Tab. 4 Durchschnittliche Grundwassertemperatur (GWT) und vorhergesagte Grundwassertemperatur (eGWT) sowie Mean Error (ME) und Root Mean Square Error (RMSE) je CORINE Land Cover (CLC) Gruppe

Table 4 Average groundwater temperature (GWT) and predicted groundwater temperature (eGWT) as well as Mean Error (ME) and Root Mean Square Error (RMSE) per CORINE Land Cover (CLC) group

CLC-Gruppen	Anzahl GWM	$\bar{\text{GWT}}$ [°C]	$\bar{\text{eGWT}}$ [°C]	ME [K]	RMSE [K]
Stadtgefüge	59	12,3	12,2	-0,09	0,95
Industriegebiete	25	12,6	12,3	-0,25	1,00
Städtische Grünflächen	8	11,7	12,1	0,39	0,62
Landwirtschaftliche Flächen	266	11,0	11,0	-0,02	0,71
Wald und Naturgebiete	78	10,7	10,8	0,13	0,55
Total	436	11,2	11,2	-0,01	0,74

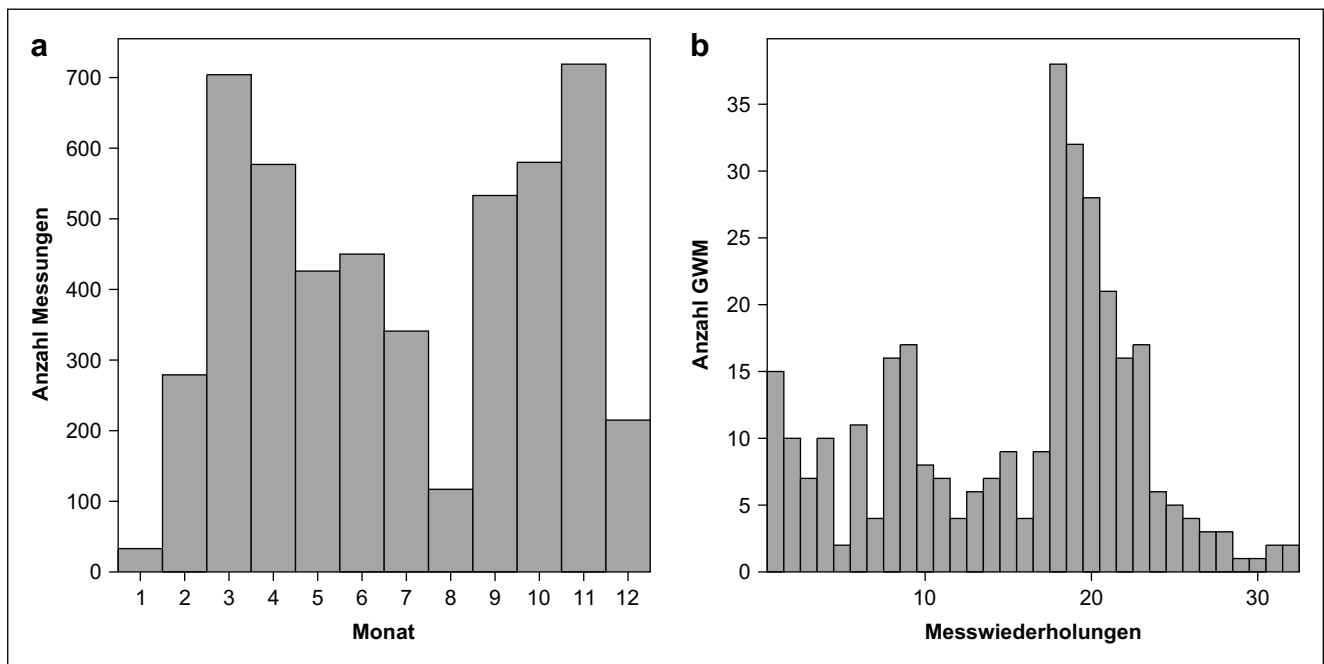


Abb. 7 Histogramme zur Darstellung der **a** Verteilung der Messdaten des LHW auf die Monate; **b** Häufigkeit der Anzahl der Messwiederholungen pro Grundwassermessstelle (GWM) des LHW

Fig. 7 Histograms visualising **a** the distribution of the LHW measurement data over the months; **b** the frequency of the number of measurement repetitions per LHW well (GWM)

mit verschiedenen Konfigurationen (Aktivierungsfunktion, SVM-Kernel). Für alle Methoden wurde eine Bayes'sche Hyperparameter-Optimierung mit 100 initialen randomisierten Läufen und 900 Optimierungszyklen durchgeführt. Die Daten wurden in 25 % Testdaten und 75 % Trainingsdaten gesplittet. Darüber hinaus wurde zusätzlich zu der Prognose der Differenz zwischen GWT und Landoberflächentemperatur (GWT – Landoberflächentemperatur) eine Prognose für die GWT direkt mit der Landoberflächentemperatur als Variable erstellt.

Danksagung Die finanzielle Unterstützung für Maximilian Nothen aus dem Stipendienprogramm der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) wird dankend anerkannt. Wir danken Christian Schenkling (LHW Sachsen-Anhalt) für die Unterstützung mit Daten und zusätzlichen Informationen. Darüber hinaus danken wir Alena Wawra, Tebea Klein und Philip Hoefs für die Unterstützung bei der Datenerhebung und den in den Abschlussarbeiten gezeigten Einsatz. Für wertvolle Anregungen und kritische Kommentare danken wir zwei anonymen Reviewern.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Agudelo-Vera, C.M., Blokker, M., de Kater, H., Lafort, R.: Identifying (subsurface) anthropogenic heat sources that influence temperature in the drinking water distribution system. *Drink. Water Eng. Sci.* **10**(2), 83–91 (2017)
- Anderson, M.P.: Heat as a ground water tracer. *Groundwater* **43**(6), 951–968 (2005)
- Bayer, P., Attard, G., Blum, P., Menberg, K.: The geothermal potential of cities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **106**, 17–30 (2019)
- Becher, J., Englisch, C., Griebler, C., Bayer, P.: Groundwater fauna downtown—Drivers, impacts and implications for subsurface ecosystems in urban areas. *J. Contam. Hydrol.* **248**, 104021 (2022)
- Benz, S.A., Bayer, P., Goettsche, F.M., Olesen, F.S., Blum, P.: Linking surface urban heat islands with groundwater temperatures. *Environ. Sci. Technol.* **50**(1), 70–78 (2015a)
- Benz, S.A., Bayer, P., Menberg, K., Jung, S., Blum, P.: Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers. *Sci. Tot. Environ.* **524**, 427–439 (2015b)
- Benz, S.A., Bayer, P., Blum, P.: Global patterns of shallow groundwater temperatures. *Environ. Res. Lett.* **12**(3), 34005 (2017)
- Benz, S.A., Bayer, P., Winkler, G., Blum, P.: Recent trends of groundwater temperatures in Austria. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **22**(6), 3143–3154 (2018)
- Blum, P., Menberg, K., Koch, F., Benz, S.A., Tissen, C., Hemmerle, H., Bayer, P.: Is thermal use of groundwater a pollution? *J. Contam. Hydrol.* **239**, 103791 (2021)
- Bonte, M., Stuyfzand, P., Van den Berg, G., Hijnen, W.: Effects of aquifer thermal energy storage on groundwater quality and the consequences for drinking water production: a case study from the Netherlands. *Water Sci. Technol.* **63**(9), 1922–1931 (2011)
- van den Bos, L.: Quantifying the effects of anthropogenic heat sources on the water temperature in the drinking water distribution system. TU Delft (2020)
- Böttcher, F., Zosseder, K.: Thermal influences on groundwater in urban environments—A multivariate statistical analysis of the subsurface heat island effect in Munich. *Sci. Tot. Environ.* **810**, (2022a)
- Böttcher, F., Zosseder, K.: Thermal influences on groundwater in urban environments—A multivariate statistical analysis of the subsurface heat island effect in Munich. *Sci. Total. Environ.* **810**, 152193 (2022b)
- Briellmann, H., Griebler, C., Schmidt, S.I., Michel, R., Lueders, T.: Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microbiol Ecol* **68**(3), 273–286 (2009)
- Čermák, V., Bodri, L., Šafanda, J., Krešl, M., Dědeček, P.: Ground-air temperature tracking and multi-year cycles in the subsurface temperature time series at geothermal climate-change observatory. *Stud. Geophys. Geod.* **58**(3), 403–424 (2014)
- DWD: Climate Data Center (2023). <https://cdc.dwd.de/portal/>. Zugegriffen: 21. Sept. 2023
- Epting, J., Händel, F., Huggenberger, P.: Thermal management of an unconsolidated shallow urban groundwater body. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **17**(5), 1851–1869 (2013)
- Epting, J., Scheidler, S., Affolter, A., Borer, P., Mueller, M.H., Egli, L., García-Gil, A., Huggenberger, P.: The thermal impact of subsurface building structures on urban groundwater resources—a paradigmatic example. *Sci. Tot. Environ.* **596**, 87–96 (2017)
- European Environment Agency: Copernicus land monitoring service (2023). <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover>. Zugegriffen: 21. Sept. 2023
- Ferguson, G., Woodbury, A.D.: Urban heat island in the subsurface. *Geophys. Res. Lett.* (2007). <https://doi.org/10.1029/2007GL032324>
- Griebler, C., Briellmann, H., Haberer, C.M., Kaschuba, S., Kellermann, C., Stumpp, C., Hegler, F., Kuntz, D., Walker-Hertkorn, S., Lueders, T.: Potential impacts of geothermal energy use and storage of heat on groundwater quality, biodiversity, and ecosystem processes. *Environ. Earth Sci.* **75**(20), 1–18 (2016)
- Gunkel, G., Michels, U., Scheideler, M.: Climate change: water temperature and invertebrate propagation in drinking-water distribution systems, effects, and risk assessment. *Water* **14**(8), 1246 (2022)
- Hall, D., Riggs, G., Salomonson, V.: MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500m, Version 5. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, Boulder (2006)
- Hemmerle, H., Hale, S., Dressel, I., Benz, S.A., Attard, G., Blum, P., Bayer, P.: Estimation of groundwater temperatures in Paris, France. *Geofluids* (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/5246307>
- Hemmerle, H., Dressel, I., Blum, P., Menberg, K., Benz, S.A., Bayer, P.: Benefits from subsurface urban heat islands to shallow geothermal applications—an example from the city of Cologne, Germany. *Proc. World Geotherm. Congr.* (2020)
- Hemmerle, H., Ferguson, G., Blum, P., Bayer, P.: The evolution of the geothermal potential of a subsurface urban heat island. *Environ. Res. Lett.* **17**(8), 84018 (2022)

- Koch, F., Menberg, K., Schweikert, S., Spengler, C., Hahn, H.J., Blum, P.: Groundwater fauna in an urban area: natural or affected? *Hydrolog. Earth. Syst. Sci. Discuss.* **25**(6), 1–23 (2020)
- Kurylyk, B.L., MacQuarrie, K.T., McKenzie, J.M.: Climate change impacts on groundwater and soil temperatures in cold and temperate regions: Implications, mathematical theory, and emerging simulation tools. *Earth Sci. Rev.* **138**, 313–334 (2014)
- Kurylyk, B.L., Irvine, D.J., Bense, V.F.: Theory, tools, and multidisciplinary applications for tracing groundwater fluxes from temperature profiles. *Wiley Interdiscip. Rev. Water* **6**(1), e1329 (2019)
- LHW – Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt: (2023). <https://gld.lhw-sachsen-anhalt.de/>. Zugegriffen: 21. Sept. 2023
- Makasis, N., Kreitmair, M., Bidarmaghz, A., Farr, G., Scheidegger, J., Choudhary, R.: Impact of simplifications on numerical modelling of the shallow subsurface at city-scale and implications for shallow geothermal potential. *Sci. Tot. Environ.* **791**, 148236 (2021)
- Menberg, K., Bayer, P., Zosseder, K., Rumohr, S., Blum, P.: Subsurface urban heat islands in German cities. *Sci. Tot. Environ.* **442**, 123–133 (2013a)
- Menberg, K., Blum, P., Schaffitel, A., Bayer, P.: Long-term evolution of anthropogenic heat fluxes into a subsurface urban heat island. *Environ. Sci. Technol.* **47**(17), 9747–9755 (2013b)
- Mu, Q., Zhao, M., Running, S.W.: MODIS global terrestrial Evapotranspiration (ET) product MOD16A2 collection 5 (2014)
- Previati, A., Crosta, G.B.: Regional-scale assessment of the thermal potential in a shallow alluvial aquifer system in the Po plain (northern Italy). *Geothermics* **90**, 101999 (2021)
- Riedel, T.: Temperature-associated changes in groundwater quality. *J. Hydrolog.* **572**, 206–212 (2019)
- Rivera, J.A., Blum, P., Bayer, P.: Increased ground temperatures in urban areas: estimation of the technical geothermal potential. *Renew. Energy* **103**, 388–400 (2017)
- Shukla, J., Mintz, Y.: Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate. *Science* **215**(4539), 1498–1501 (1982)
- Spengler, C., Hahn, H.: Thermostress: Ökologisch gegründete, thermische Schwellenwerte und Bewertungsansätze für das Grundwasser (Ecological based temperature thresholds and ecosystem assessment schemes for groundwater). *Korresp. Wasserwirt.* **9**, 521–525 (2018)
- Sun, Z., Wang, Q., Batkhisig, O., Ouyang, Z.: Relationship between evapotranspiration and land surface temperature under energy- and water-limited conditions in dry and cold climates. *Adv. Meteorol.* (2016). <https://doi.org/10.1155/2016/1835487>
- Tissen, C., Menberg, K., Benz, S.A., Bayer, P., Steiner, C., Götzl, G., Blum, P.: Identifying key locations for shallow geothermal use in Vienna. *Renew. Energy* **167**, 1–19 (2021)
- Tzavali, A., Paravantis, J.P., Mihalakakou, G., Fotiadi, A., Stigka, E.: Urban heat island intensity: a literature review. *Fresenius Environ. Bull.* **24**(12b), 4537–4554 (2015)
- Wan, Z., Hook, S., Hulley, G.: MODIS/terra land surface temperature/emissivity monthly L3 global 0.05 Deg CMG V061. NASA EOS-DIS Land Processes DAAC, Sioux Falls (2021)
- Yasukawa, K., Uchida, Y., Tenma, N., Taguchi, Y., Muraoka, H., Ishii, T., Suwanlert, J., Buapeng, S., Nguyen, T.H.: Groundwater temperature survey for geothermal heat pump application in tropical Asia. *Bull. Geol. Surv. Jpn.* **60**(9–10), 459–467 (2009)
- Zhan, W., Ju, W., Hai, S., Ferguson, G., Quan, J., Tang, C., Guo, Z., Kong, F.: Satellite-derived subsurface urban heat island. *Environ. Sci. Technol.* **48**(20), 12134–12140 (2014)
- Zhang, T.: Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: an overview. *Rev. Geophys.* (2005). <https://doi.org/10.1029/2004RG000157>
- Zhu, K., Blum, P., Ferguson, G., Balke, K.-D., Bayer, P.: The geothermal potential of urban heat islands. *Environ. Res. Lett.* **5**(4), 44002 (2010)

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.