



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Die Entwicklung vertikaler Temperaturprofile im Untergrund durch jahreszeitliche Änderungen der bodennahen Lufttemperaturen (Erzhausen, Hessen)

Bachelorarbeit von

Merete Arp, Mat.-Nr.: 2736123

Institut für Angewandte Geowissenschaften
Darmstadt, Oktober 2025

Bearbeiterin

Merete Arp
E-Mail-Adresse: merete.arp@stud.tu-darmstadt.de
Matrikelnummer: 2736123
Studiengang: Bachelor Angewandte Geowissenschaften

Bachelorarbeit

Thema: Die Entwicklung vertikaler Temperaturprofile im Untergrund durch jahreszeitliche Änderung der bodennahen Lufttemperaturen (Erzhausen, Hessen)
Abgabe: 09. Oktober 2025

Betreuer

Prof. Dr. Christoph Schüth und Dr. Nils Michelsen
Technische Universität Darmstadt
Fachbereich 11 Angewandte Geowissenschaften
Fachgebiet Hydrogeologie
Schnittspahnstraße 9
64289 Darmstadt

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Merete Arp (Matrikel-Nr. 2736123), dass ich die vorliegende Bachelorarbeit

"Die Entwicklung vertikaler Temperaturprofile im Untergrund durch jahreszeitliche Änderungen der bodennahen Lufttemperaturen (Erzhausen, Hessen)"

gemäß § 22 Abs. 7 APB TU Darmstadt selbstständig, ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt habe. Ich habe mit Ausnahme der zitierten Literatur und anderer in der Arbeit genannter Quellen keine fremden Hilfsmittel benutzt. Die von mir bei der Anfertigung dieser wissenschaftlichen Arbeit wörtlich oder inhaltlich benutzte Literatur und alle anderen Quellen habe ich im Text deutlich gekennzeichnet und gesondert aufgeführt. Dies gilt auch für Quellen oder Hilfsmittel aus dem Internet.

Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§38 Abs.2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Darmstadt, 06.10.2025
.....

Ort, Datum



.....
Unterschrift

Erstberichterstatter: Prof. Dr. Christoph Schüth

Zweitberichterstatter: Dr. Nils Michelsen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Begriffliche Grundlagen	3
2.1	Geowissenschaftliche Begriffe	3
2.2	Physikalische Begriffe	4
3	Stand der Forschung	5
3.1	Grundlagen	5
3.2	Messreihen der vertikalen Temperaturverteilung im Untergrund	6
3.3	Modellgestützte Analyse und Anwendung vertikaler Temperaturprofile	7
3.4	Lücken in der bisherigen Forschungslage	8
4	Rahmenbedingungen und Methodik	10
4.1	Rahmenbedingungen der Wiederholungsmessung	10
4.2	Standort der Messstelle	11
4.3	Geologische und hydrogeologische Gegebenheiten des Standorts	12
4.4	Messausrüstung	15
4.5	Datenqualität und -auflösung	16
4.6	Umrechnung der erhobenen Daten	16
4.7	Bereinigung und Aufbereitung der Daten	18
4.8	Lufttemperaturdaten	19
5	Ergebnisse der Messreihe	20
5.1	Zusammenhang zwischen Luft- und Untergrundtemperaturen	22
5.2	Zonare Einteilung des Untergrundes	23
5.2.1	Saisonale Zone	24
5.2.2	Vergleich der Temperatur an der Untergrenze der saisonalen Zone mit langjährigen Lufttemperaturmitteln	26
5.2.3	Neutrale Zone	27
5.2.4	Zone des geothermischen Gradienten	29
5.2.5	Vergleich der Zonen mit anderen Standorten	29
5.3	Phasenverschiebung und Dämpfung der Temperaturamplitude	30
5.3.1	Phasenverschiebung	33
5.3.2	Dämpfung der Temperaturamplitude	36
6	Diskussion und Ausblick	37
7	Fazit	41
8	Abbildungsverzeichnis	III
9	Tabellenverzeichnis	IV
10	Abkürzungsverzeichnis	V
11	Literaturverzeichnis	VI
12	Anhang	X

1 Einleitung

Das Temperaturregime des Untergrundes und dessen Veränderung aufgrund von Wärmeeintrag durch solare Strahlung über verschiedene Betrachtungszeiträume ist schon seit dem 19. Jahrhundert Gegenstand der Forschung (Müttrich, 1880; Schubert, 1888). Für den obersten Bereich des Untergrundes liegen eine Vielzahl von Messreihen vor, die eine umfangreiche Datengrundlage zur Untersuchung der oberflächennahen thermischen Prozesse bieten (Smerdon et al., 2006; Geiger, 1961; Schubert, 1900; Schubert, 1888). Die Mehrheit dieser Forschungsarbeiten lässt jedoch aufgrund der geringen Messtiefe keine Rückschlüsse auf die genauen Tiefenlagen der saisonalen, neutralen und geothermischen Zone zu. Zudem nimmt die Verfügbarkeit von Messreihen mit räumlich und zeitlich hochaufgelösten Messdaten der Temperatur mit zunehmender Tiefe des Betrachtungsbereichs und Dauer des Betrachtungszeitraums ab (Tremmel, 1984).

Langzeitbeobachtungen von vertikalen Temperaturprofilen gewinnen in der Klimaforschung zunehmend an Bedeutung (Beltrami et al., 2005). Der Untergrund reagiert aufgrund seiner physikalischen Gegebenheiten zeitlich verzögert auf Veränderungen der bodennahen Lufttemperaturen und wirkt dadurch als Klimaarchiv (González-Rouco et al., 2003, S. 4). Langzeitbeobachtungen von Temperaturprofilen ermöglichen deshalb, Rückschlüsse auf vergangene Klimabedingungen zu ziehen und unterstützen die Identifizierung von klimatischen Veränderungen (Bense et al., 2017). Besonders der durch den Klimawandel verursachte Anstieg von Grundwassertemperaturen stellt in hydrogeologischer Hinsicht eine Herausforderung dar (Benz et al., 2024; Hemmerle und Bayer, 2020). Die Erwärmung beeinflusst sowohl physikalisch-chemische Eigenschaften als auch die biologische Aktivität. Langfristige Wiederholungsmessungen von vertikalen Temperaturprofilen bieten somit ein Instrument, um die thermische Entwicklung von Grundwässern zu dokumentieren und klimabedingte Veränderungen zu identifizieren.

Zudem stellt die vertikale Temperaturverteilung und die thermischen Eigenschaften des Untergrundes eine wesentliche Grundlage geowissenschaftlicher Fragestellungen dar. Insbesondere in den Fachdisziplinen der Hydrogeologie, der Geothermie und der Bodenkunde, aber auch im interdisziplinären Schnittstellenbereich, ist ein Detailverständnis der Temperaturverteilung im Untergrund und dessen zeitliche und räumliche Dynamik von Interesse. Gerade dort, wo der Übergang zwischen exogen-dominierten (atmosphärische und solare Einflüsse) und endogen-dominierten (Einfluss des geothermischen Gradienten) Wärmeströmen stattfindet, besteht ein Forschungsinteresse (Tremmel, 1984).

Vor diesem Hintergrund wurde in Erzhausen (Hessen) eine räumlich und zeitlich hochaufgelöste Messreihe der ungestörten Untergrundtemperatur durchgeführt. Über den Zeitraum von einem Jahr und elf Tagen wurden in einer nicht in Betrieb befindlichen Erdwärmesonde (EWS) des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 25 vertikale Temperaturprofilmessungen bis in eine Tiefe von 50 m u. GOK in einem durchschnittlichen 16-Tage Rhythmus durchgeführt. Diese Temperaturprofile bilden in Kombination mit bodennahen Lufttemperaturdaten umliegender meteorologischer Messstationen die Grundlage für die folgende quantitative Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Luft- und Untergrundtemperaturen, und damit auch Grundwassertemperaturen.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen für den Standort Erzhausen (Hessen) folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Wie hängt der Jahresgang der Untergrundtemperaturen quantitativ vom Jahresgang der bodennahen Lufttemperaturen ab?
- In welchen Tiefen lassen sich die thermischen Zonen – die saisonale Zone, die neutrale Zone und die Zone des geothermischen Gradienten – anhand der einjährigen Messreihe identifizieren und abgrenzen?
- Wie pflanzen sich quantitativ die jahreszeitlichen Schwankungen der bodennahen Lufttemperaturen mit zunehmender Zeit und Tiefe im Untergrund fort? Welche Verzögerungen des Temperatursignals (Phasenverschiebung) und Dämpfungen der Temperaturamplitude lassen sich anhand des Sommer- und Wintersignals feststellen?

Im Rahmen dieser Arbeit werden bestimmte Fragestellung explizit nicht beantwortet. Dazu zählt die Untersuchung von Standortfaktoren und physikalischen Eigenschaften des Untergrundes, welche die Dynamik der vertikalen Temperaturverteilung über den Zeitraum eines Jahresgangs beeinflussen. Ebenso erfolgt keine Ursache-Wirkung Untersuchung im Hinblick auf die langfristigen Auswirkungen des Klimawandels auf die vertikale Temperaturverteilung des Untergrundes.

Um die oben genannten Forschungsfragen zu beantworten, werden nachfolgend zuerst begriffliche Grundlagen erklärt, die für diese Arbeit relevant sind (vgl. Kapitel 2). Daraufgehend wird der Stand der Forschung vorgestellt, wobei sowohl auf wissenschaftliche Grundlagen aus den vergangenen Jahrhunderten als auch auf aktuelle Studien eingegangen wird (vgl. Kapitel 3). Der Fokus liegt hierbei auf der Verfügbarkeit und dem Vorhandensein von vergleichbaren Messreihen. Nach der Vorstellung des Standortes mit Betrachtung der hydro-/geologischen Standortfaktoren, wird die Methodik, bezüglich des Messvorgangs, der Datenbeschaffung, der Datenqualität und der Weiterverarbeitung der Daten dargestellt (vgl. Kapitel 4). Anschließend wird der quantitative Zusammenhang der bodennahen Lufttemperaturen und der Temperaturen des Untergrundes in geringen Tiefen betrachtet (vgl. Kapitel 5.1). Darauf folgt die zonare Einteilung des Untergrundes in die saisonale Zone, die neutrale Zone und die Zone des geothermischen Gradienten (vgl. Kapitel 5.2). Zudem wird die Phasenverschiebung und die Dämpfung der Temperaturamplitude quantifiziert (vgl. Kapitel 5.3). Schließlich wird die methodische Vorgehensweise sowie die erarbeiteten Ergebnisse dieser Arbeit in einer Diskussion kritisch reflektiert (vgl. Kapitel 6). Dabei werden Limitationen genannt, welche die Aussagekraft der Ergebnisse beeinflussen. Zudem werden Fragestellungen, welche im Rahmen der Bearbeitung dieser Arbeit aufgekommen sind, jedoch nicht untersucht werden, als Ausblick erläutert. Ein Fazit fasst zum Ende die vorliegende Arbeit und die erarbeiteten Ergebnisse zusammen (vgl. Kapitel 7)

.

2 Begriffliche Grundlagen

In Kapitel 2 werden für die Arbeit relevante begriffliche Grundlagen erläutert. Hiermit soll ein einheitliches Verständnis der jeweiligen Begriffe gewährleistet werden, um Missverständnisse aufgrund von unterschiedlichen Definitionen zu vermeiden.

2.1 Geowissenschaftliche Begriffe

Der Jahresgang beschreibt den wiederkehrenden, zyklischen Verlauf und die Schwankungen einer Kenngröße innerhalb eines Jahres. Im Fall dieser Arbeit wird für eine grafische Auswertung die Temperatur einer konstanten Beobachtungstiefe auf die Zeit aufgetragen. Diese Ganglinien sind eine Form der Datendarstellung, welche zur grafischen Auswertung von punktuellen Temperaturdaten genutzt werden kann (Grundwasser - Richtlinien für Beobachtung und Auswertung, 1987, S. 25f). Eine andere Möglichkeit der Darstellung des Jahresgangs, welche auch in dieser Arbeit genutzt wird, sind Thermoisoplethen-Diagrammen. Diese visualisieren die Abhängigkeit der Größe (im Falle dieser Arbeit der Temperatur) von zwei verschiedenen Variablen (im Falle dieser Arbeit Zeit und Tiefe) (DWD, o.D. a; Grundwasser - Richtlinien für Beobachtung und Auswertung, 1988, S. 25f).

Der Untergrund beschreibt den Zusammenschluss der unter der Erdoberfläche befindlichen festen, flüssigen und gasförmigen Phasen. Die VDI 4640-1:2010-06 (S. 6) definiert den Begriff wie folgt: "Als Untergrund wird [...] die gesamte, unter der Erdoberfläche befindliche Materie bezeichnet. Der Begriff umfasst somit Minerale der Böden und Gesteine, Hohlraumfüllungen (Gase und Flüssigkeiten) sowie organische Materie (z. B. Wurzeln)". Bei der Beschreibung der Untergrundtemperatur wird somit implizit auch die Temperatur des Grundwassers beschrieben.

Die saisonale Zone wird durch das Abbilden der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen im Untergrund, also den Jahresgang der Temperaturen in konstanten Tiefen, charakterisiert. Der größte Einflussfaktor des Wärmeeintrags in dieser Zone stellt die solare Strahlung dar, wobei der exogene, solare Wärmestrom mit etwa $1\,370\text{ W/m}^2$ (Solarkonstante, gemessen ab Eintritt in die Erdatmosphäre) den endogenen, terrestrischen Wärmestrom mit nur etwa 65 mW/m^2 (gemessen an der Erdoberfläche) um mehr als das 20 000-fache übersteigt (Kaltschmitt et al., 1999, S. 9f). Die saisonale Zone beginnt direkt unter der Geländeoberfläche und wird nach unten hin von der neutralen Zone begrenzt. Die Untergrenze der saisonalen Zone wird somit indirekt durch den Beginn der neutralen Zone definiert. Die saisonale Zone hört demnach in der Tiefe auf, in der die Temperaturschwankung des Jahresgangs weniger als $0,1\text{ K}$ beträgt (VDI 4640-1:2010-06, S. 6). Allgemein wird die Mächtigkeit der saisonalen Zone in Literatur mit etwa 10-20 m angegeben (HLNUG, 2019; Florides & Kalogirou, 2005; VDI 4640-1:2010-06, S. 6; Schoklitsch, 1930; Kaltschmitt et al., 1999).

Die neutrale Zone wird vom Verein der Ingenieure in der VDI-Richtlinie 4640-1 (2010) wie folgt definiert: Die neutrale Zone ist der „Bereich im Untergrund, unmittelbar unter der Erdoberfläche, ab dem der Jahresgang der dortigen Temperatur um nicht mehr als $0,1\text{ K}$ schwankt. Diese liegt in der Regel in etwa 10 m bis 20 m Tiefe“ (VDI-Richtlinie 4640-1:2010-06, S. 6). Die neutrale Zone schließt somit unmittelbar unter der saisonalen Zone an und stellt den Bereich dar, in dem der endogene, terrestrische Wärmestrom den exogenen, solaren Wärmestrom weitgehend ausgleicht. Aufgrund des beschriebenen Energieausgleichs innerhalb der neutralen Zone findet hier kein Netto-Wärmestrom statt, auch wenn geringe solare thermische Einflüsse weiterhin nachweisbar bleiben. Unterhalb der neutralen Zone

schließt der Bereich des Untergrundes an, welcher mehrheitlich den Einflüssen des geothermischen Gradienten unterliegt und keine exogenen Einflüsse mehr erfährt.

Die Zone des geothermischen Einflusses (auch geothermische Zone) wird in der Literatur nicht einheitlich definiert. Allgemein zeichnet sich diese Zone, die liegend zur neutralen Zone anschließt, durch den dominanten Einfluss des lokalen geothermischen Gradienten und dem daraus resultierenden Temperaturanstieg mit zunehmender Tiefe aus. In dieser Arbeit wird die Grenze der neutralen zur geothermischen Zone durch die dauerhafte, signifikante Inversion des Temperaturgradienten definiert.

2.2 Physikalische Begriffe

Die Phasenverschiebung (auch Phasendifferenz) beschreibt die Differenz zweier Phasen, beispielsweise periodischer Sinusschwingungen, welche von der Periodendauer gleich sind, aber der Zeitpunkt definierter Punkte, verschieden ist (Tipler & Mosca, 2024, S. 382). In dieser Arbeit wird die Zeit in Monaten als Einheit des zeitlichen Versatzes genutzt, um das verzögerte Auftreten des Sommer- und Wintersignals im Untergrund mit fortschreitender Tiefe zu beschreiben.

Die Messgenauigkeit beschreibt, wie nah einen Messwert am wahren Wert einer Messgröße liegt (Brinkmann, 2012, S. 35). Dieser Begriff ist vor allem in Bezug auf die Messunsicherheiten der hier vorgestellten Messdaten wichtig.

Die Messauflösung wird in der DIN 1319-1:1995-01 definiert. Die Auflösung kennzeichnet die kleinste Differenz zwischen zwei Messwerten, die das Messgerät eindeutig unterscheiden kann (DIN 1319-1:1995-01; Brinkmann, 2012, S. 57). Die Unterscheidung von Messgenauigkeit und Messauflösung ist für die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse von Relevanz.

Der Temperaturgradient $[K/m]$ beschreibt die erste Ableitung der Temperatur nach dem Ort. Sie ist im geowissenschaftlichen Kontext die Veränderung der Temperatur mit zunehmender Tiefe (Bundesverband Geothermie, o.D.). In Deutschland wird ein durchschnittlicher geothermischer Temperaturgradient im Untergrund von $3 K/100 m$ angenommen.

Der Wärmestrom (auch Wärmefluss) $[W]$ ist eine physikalische Größe, die die pro Zeit übertragene thermische Energie beschreibt. Dieser ist abhängig von der im Material vorliegenden Temperaturdifferenz und dem daraus resultierenden Temperaturgefälle (Harten, 2024, S. 179). In dieser Arbeit wird die Temperaturverteilung im Untergrund untersucht, die aus dem Zusammenspiel des endogenen und exogenen Wärmestroms resultiert.

3 Stand der Forschung

Kapitel 3 befasst sich mit dem aktuellen Stand der Forschung. Zunächst wird auf grundlegende Arbeiten des Themenfelds eingegangen, ausgewählte Messreihen der vertikalen Temperaturverteilung und deren Ergebnisse vorgestellt und weiterführende Veröffentlichungen, die sich mit der modellgestützten Analyse und Auswertung von Temperaturprofilen befassen, erläutert. Schließlich werden Lücken in der Forschungslage aufgezeigt, zu deren Schließung die vorliegende Arbeit einen Beitrag leistet.

3.1 Grundlagen

Die Veränderungen und Schwankungen der Temperatur im Untergrund werden schon seit dem 19. Jahrhundert erforscht. Aus dieser Zeit stammt eine Reihe von Arbeiten, die tägliche, monatliche und jährliche Temperaturschwankungen in gleichbleibenden Tiefen des Untergrundes untersuchten. Bei diesen Wiederholungsmessungen wurden meist Tiefen von weniger als 2 m u. GOK betrachtet. Müttrich (1880) und Schubert (1888 und 1900) untersuchten den Einfluss des Waldes auf den täglichen und jährlichen Temperaturgang im oberflächennahen Bereich bis in eine Tiefe von 1,20 m u. GOK. Dafür wurden an den Standorten Preußen, Braunschweig und Elsass-Lothringen sogenannte Doppelstationen eingerichtet, wobei jeweils eine Messstation im Wald und eine Messstation auf einer Freifläche nur wenige hundert Meter entfernt aufgestellt wurden (Schubert, 1900, S. 1). Hier wurden zwischen 1874 und 1881 mit Quecksilberthermometern mehrere Wiederholungsmessungen durchgeführt, die den täglichen Temperaturgang in wenigen Zentimetern Tiefe und den jährlichen Temperaturgang in Tiefen bis 1,20 m u. GOK zeigten (Müttrich, 1880, S. 149ff; Schubert, 1900, S. 4). Zudem wurde der genaue Einfluss des Waldes auf die Schwankungen der Untergrundtemperaturen in Vergleich zu Untergrundtemperaturen unter einer Freifläche quantifiziert und Faktoren, die diese unterschiedlichen Temperaturschwankungen beeinflussen, identifiziert (Schubert, 1900, S. 17ff). Des Weiteren werden in diesen Veröffentlichungen Formeln aufgestellt, um die periodischen Schwankungen der Temperatur im Untergrund mathematisch zu beschreiben (Müttrich, 1880, S. 156f; Schubert, 1900, S. 36ff).

Im 20. Jahrhundert wurden erste wissenschaftliche Grundlagenwerke veröffentlicht, welche die vertikale Temperaturverteilung im Untergrund und deren Veränderungen mit der Zeit in Bezug auf verschiedenste Fachdisziplinen betrachteten. Schoklitsch (1930) eröffnet sein Nachschlagewerk „Der Wasserbau“ mit dem Kapitel „Der Gang der Temperatur an der Erdoberfläche“. Der Autor schreibt, dass die Temperaturänderungen im Untergrund in den mittleren Breiten innerhalb eines Jahres bis in eine Tiefe von 15 bis 20 m unter GOK reichen (Schoklitsch, 1930, S. 1). Ein besonderes Augenmerk wird vom Autor auf die Veränderung der Tiefenlage der 0 °C Isotherme, beziehungsweise die Eindringtiefe des Frostes, gelegt, da dies aus praktischen ingenieur-technischen Fragestellungen häufig von Bedeutung ist (Schoklitsch, 1930, S. 1f).

Geiger (1961) beschreibt in seinem Lehrbuch der Mikroklimatologie die physikalischen Prozesse an der Schnittstelle Atmosphäre und Pedosphäre. Der Autor untersucht die physikalischen Wärmetransportprozesse in Bezug auf Luft und Boden sowie die Tages- und Jahresschwankungen der Temperatur im Untergrund, besonders in den obersten Bodenschichten. Hierbei stellt der Autor standortspezifische Eindringtiefen der täglichen Temperaturschwankungen in den Untergrund von bis zu 80 cm u. GOK fest (Geiger, 1961, S. 64).

3.2 Messreihen der vertikalen Temperaturverteilung im Untergrund

Die Anzahl der Arbeiten, welche vergleichbare Datenumfänge mit räumlich und zeitlich hoch aufgelösten vertikalen Temperaturprofilen vorstellen, ist limitiert. Eine Reihe von Arbeiten, welche jedoch ähnliche Wiederholungsmessungen getätigt haben und dabei den jährlichen Gang der Untergrundtemperaturen untersucht haben oder den Untergrund in Zonen verschiedener thermischer Einflüsse eingeteilt haben, werden im Folgenden vorgestellt.

Tremmel (1984) fasst vier Temperaturmessreihen aus anderen Veröffentlichungen aus dem 20. Jahrhundert zusammen, welche Wiederholungsmessungen bis in eine Tiefe von 12 m u. GOK durchgeführt haben und damit den jährlichen Temperaturgang an verschiedenen Standorten unter mitteleuropäischen Verhältnissen untersucht haben. Der Autor begründet die Relevanz seiner Arbeit damit, dass die letzte deutschsprachige Literatur, die das Temperaturverhalten im Untergrund untersucht, schon 25 Jahre her sei (Tremmel, 1984, S. 118). Aus der Zusammenschau dieser Messreihen leitet der Autor einen hohen Informationswert ab (ebd.). Zudem hebt Tremmel die Wichtigkeit von zeitlich und räumlich hochaufgelösten Temperaturmessreihen hervor und beschreibt die Notwendigkeit von weiteren Wiederholungsmessungen (ebd.).

Die Säkularstation Potsdam des Potsdamer Institut für Klimaforschung hat ein deutschlandweit einmaliges Messprogramm. In den 1890ern wurde ein Messbetrieb eingerichtet, welcher teilweise mehrfach täglich Bodentemperaturen in Tiefen zwischen 0,02 m und 12,0 m u. GOK misst. Seit nun mehr als 130 Jahren werden hier lückenlos Bodentemperaturen erfasst und Jahresgänge dokumentiert. Besonders nennenswert sind Auswertungen über den mittleren Jahresgang zwischen 1961 und 1990, welche die mittlere Monatstemperatur zwischen 0,05 m und 12,0 m u. GOK darstellen (Lehmann & Kalb, 1993). An diesem Standort ist bis 12 m u. GOK ein deutlicher Jahresgang zu erkennen. Die saisonale Zone muss an diesem Standort demnach darunter liegen.

Aufgrund des langjährigen Messbetriebs an der Säkularstation Potsdam, eignen sich die dort erhobenen Bodentemperaturdaten, um klimabezogene Fragestellungen zu beantworten. Böhme & Böttcher (2011) untersuchen die Bodentemperaturdaten in Hinblick auf den Klimawandel. Die Autoren stellen dabei einen beispielhaften Jahresgang der Bodentemperaturen aus dem Jahr 2005 dar, welcher direkt unter der Geländeoberkante bei einer Tiefe von 0,02 m u. GOK eine Temperaturschwankung von 23 K und bei 12 m u. GOK eine jährliche Temperaturschwankung von weniger als 1 K zeigt (Böhme & Böttcher, 2011, S. 86). An der Endteufe der Messreihe beträgt die Jahresdurchschnittstemperatur in konstanter Tiefe etwa 10 °C, wobei eine Phasenverschiebung von einem halben Jahr festgestellt wurde (ebd.). Insgesamt zeigen die Autoren durch die Untersuchung der Untergrund- und bodennahen Lufttemperaturen der vorangegangenen 110 Jahre, dass sich der signifikante Anstieg der Lufttemperaturen auch in den Untergrundtemperaturen bis in die maximale Beobachtungstiefe von 12 m u. GOK widerspiegelt (Böhme & Böttcher, 2011, S. 88).

Kłonowski und Żeruń (2024) haben im Rahmen eines Erkundungsprojektes des Polnischen Geologischen Instituts an fünf Standorten das Temperaturregime des Untergrundes im Hinblick auf die standortspezifische Geologie und Hydrogeologie untersucht (Kłonowski & Żeruń, 2024, S. 1). Zwischen 2022 und 2023 wurde an diesen Standorten in nicht in Betrieb befindlichen 99 m Tiefen EWS mit einfachen U-Rohren im vierteljährlichen Rhythmus vertikale Temperaturprofile gemessen (Kłonowski & Żeruń, 2024, S. 2ff). Für alle fünf Standorte wurde die Tiefenlage der Grenzen der saisonalen/neutralen

Zone und neutralen/geothermischen Zone bestimmt. Die Tiefenlage der saisonalen Zone variiert über die fünf Standorte stark, wobei eine geringste Tiefe von 12 m u. GOK und eine maximale Tiefe von 30 m u. GOK festgestellt wurde (Kłonowski & Żeruń, 2024, S. 7). Die neutrale Zone wurde für vier aus fünf Standorten bestimmt, wobei auch hier starke Variationen in den Tiefen der Grenze und den Mächtigkeiten auffallen. Diese resultieren aus standortspezifischen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten, wie beispielsweise den thermischen Eigenschaften des durchteuften Gesteins oder Sediments oder dem Vorhandensein von Grundwasserleitern (Kłonowski & Żeruń, 2024, S. 1). Es wurden minimale Tiefen der Grenze der neutralen Zone zur geothermischen Zone von 55 m und maximale Tiefen von 80 m u. GOK festgestellt, wobei vor allem ein Standort mit einer großen angegebenen neutralen Zone bei 13-80 m u. GOK auffällt (ebd.).

In Chongqing (China) wurde im Rahmen einer Forschungsarbeit eine Messstation errichtet, an welcher automatisiert von Juni 2010 bis Juni 2011 stündlich Untergrundtemperaturen gemessen wurden (Cui et al. 2011, S. 2). Durchgeführt wurden die Messungen in einer einfachen U-Sonde, in der bis zur maximalen Tiefe von 100 m u. GOK, in 25 verschiedenen Tiefen, Temperatursensoren eingebaut wurden (ebd.). Der Untergrund wird von den Autoren aufgrund ihrer Messergebnisse in zwei Zonen eingeteilt: Die „Thermocline Zone“ und die „Thermostatic Zone“ (Cui et al. 2011, S. 3). Die Untergrenze der „Thermocline Zone“ wird von chinesischen Richtlinien durch eine Temperaturschwankung von weniger als 0,1 K definiert (ebd.). Damit entspricht die Definition der „Thermocline Zone“ der der saisonalen Zone. Diese Zone reicht laut Autoren am Standort Chongqing bis in eine Tiefe von 11 m u. GOK, wobei liegend die „Thermostatic Zone“ anschließt (Cui et al. 2011, S. 4). Diese Zone zeigt bis zur Endteufe der Messstation einen Temperaturgradienten zwischen 2 K/100 m und 4 K/100 m. In dieser Veröffentlichung wurde somit keine weitere Unterscheidung zwischen neutraler und geothermischer Zone gemacht.

3.3 Modellgestützte Analyse und Anwendung vertikaler Temperaturprofile

Eine Vielzahl der Veröffentlichungen, welche sich mit der vertikalen Temperaturverteilung im Untergrund befassen, basiert auf modellgestützten, berechneten Temperaturen. Dabei werden sowohl analytische Modelle als auch numerische Simulationen verwendet, um die vertikale Temperaturverteilung im Untergrund zu beschreiben. Die Modelle werden genutzt, um vergangene Klimata zu rekonstruieren, aktuelle Temperaturverteilungen im Boden ressourcen-effizient durch Berechnung zu bestimmen oder Prognosen für Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels auf die vertikalen Temperaturverteilung im Untergrund zu erstellen. Eine Auswahl von Grundlagenwerken und Veröffentlichungen diesbezüglich wird im Folgenden vorgestellt.

Ein Grundlagenwerk, auf das sich eine Reihe von Veröffentlichungen stützen, welche sich mit der Berechnung von Untergrundtemperaturen befassen, ist Carslaw und Jaeger (1959). Die Arbeit befasst sich mit der physikalischen und mathematischen Handhabung der Wärmeleitungsgleichung nach Fourier und stellt sämtliche analytische Lösungsverfahren für die Berechnung von Wärmetransport in Körpern vor. Die hier beschriebenen theoretischen Konzepte werden jedoch vereinfacht dargestellt und beziehen die komplexen Rahmenbedingungen in geowissenschaftlichen Fragestellungen nicht mit ein.

Huang et al. (2000) untersuchen die Rekonstruktion des Klimas des vergangenen Jahrtausends anhand von vertikalen Temperaturprofilen. Die Autoren nutzten Untergrundtemperaturdaten aus 616 Bohrlöchern mit Tiefen von bis zu 600 m u. GOK, um die globale Entwicklung der bodennahen Lufttemperaturen der vergangenen 500 Jahre zu rekonstruieren (Huang et al., 2000, S. 756). Insgesamt 479 der untersuchten Bohrlöcher zeigten eine global durchschnittliche Erwärmung von 1 K über die letzten 500 Jahre, wobei allein im 20. Jahrhundert ein Anstieg in den Oberflächentemperaturen von 0,5 K festgestellt wurde (Huang et al., 2000, S. 757).

Florides und Kalogirou (2004 & 2005) nutzen numerische Simulationen, basierend auf der Formel von Kasuda und Achenbach (1965), um sowohl den täglichen als auch jährlichen Gang der Temperaturen im Untergrund für den Standort Zypern zu berechnen und mit Messwerten aus dem Feld zu vergleichen. Die Autoren zeigen mit ihrer Modell-Validation eine generelle Übereinstimmung der simulierten Temperaturdaten (Florides & Kalogirou, 2004, S. 6; Florides & Kalogirou, 2005, S. 6), wobei die berechneten Werte die größten Abweichungen im obersten Meter u. GOK zeigen (Florides & Kalogirou, 2004, S. 6). Ab Tiefen unter 2 m u. GOK zeigen die Temperaturdaten, welche durch die numerische Simulation berechnet wurden, nur noch eine maximale Abweichung von 0,5 K im Vergleich zu den tatsächlichen Messwerten (Florides & Kalogirou, 2004, S. 6). Die Autoren betonen, dass numerische Simulationen, aufgrund der Schwierigkeit der Beschreibung der genauen physikalischen Untergrundverhältnisse, möglicherweise unzuverlässig sein können (Florides & Kalogirou, 2005, S. 6).

Eine aktuelle Studie, die den Einfluss des Klimawandels auf den Untergrund und speziell auf das Grundwasser zeigt, wurde von Benz et al. (2024) veröffentlicht. Diese Arbeit beschreibt, dass in einem stationären System jahreszeitliche Temperaturschwankungen bei gleichbleibendem Klima innerhalb der saisonalen Zone nachweisbar sind und darunter die Temperaturen entsprechend des lokalen geothermischen Gradienten ansteigen (Benz et al., 2024, S. 545). Aktuelle Temperaturprofile zeigen jedoch eine Inversion der Temperaturverläufe, wobei unterhalb der saisonalen Zone mit zunehmender Tiefe weiterhin sinkende Temperaturen festgestellt werden bis schließlich in größeren Tiefen der geothermische Gradient hervortritt (Benz et al., 2024, S. 545 und S. 547). Dies weist auf instationäre Verhältnisse und einen Temperatureintrag resultierend aus einer langzeitlichen Erwärmung der Erdoberflächentemperatur der letzten Jahrzehnte hin. Dieser Temperatureintrag kann bis in Tiefen von 100 m u. GOK festgestellt werden (Benz et al., 2024, S. 545). Die Autoren prognostizieren, dass bis zum Jahr 2100 global das Grundwasser, gemessen an der Oberfläche des Grundwasserspiegels, eine Erwärmung von etwa 2,1 K erfahren wird (Benz et al., 2024, S. 547).

3.4 Lücken in der bisherigen Forschungslage

Die Zusammenhänge zwischen den bodennahen Lufttemperaturen und vertikalen Temperaturverteilungen im Untergrund sowie deren physikalischen Grundlagen sind in wissenschaftlicher Literatur umfassen beschrieben. Etablierte Konzepte sind etwa die Temperaturverteilung im Untergrund mit der zonaren Einteilung aufgrund verschiedener thermischer Einflüsse, die mit zunehmender Tiefe auftretende Phasenverschiebung sowie die Dämpfung der Temperaturamplitude. Trotz der fundierten theoretischen Grundlage zeigt sich zusätzlicher Forschungsbedarf im Bereich der empirischen Datenbasis. Es wurden insbesondere folgende Forschungslücken festgestellt.

Die Verfügbarkeit von veröffentlichten Wiederholungsmessungen, welche eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung haben, ist begrenzt. Insbesondere im europäischen Raum sind solche Messreihen eine Seltenheit. Im Kontext dieser Arbeit wird unter einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung mindestens die Erreichung der geothermischen Zone, ein Messintervall von mindestens einmal pro Monat und das Abbilden von mindestens einem Jahresgang verstanden. Diese Datenauflösung ist notwendig um belastbare Aussagen über die Einteilung der thermischen Zonen im Untergrund, der Phasenverschiebung und der Dämpfung der Temperaturamplitude zu machen.

Für die Vergleichbarkeit von Datensätzen sind mehrere Langzeitmessungen an unterschiedlichen Standorten entscheidend. Der langjährige Messbetrieb der Säkularstation in Potsdam, an der täglich Bodentemperaturn bis in 12 m u. GOK gemessen werden, ist deutschlandweit einzigartig. Ein Vergleich der Temperaturdaten mit weiteren Langzeituntersuchungen von anderen Standorten in Deutschland ist somit nicht möglich. Dies würde jedoch einen wichtigen Beitrag zu der Analyse von standortbezogenen Faktoren leisten und es ermöglichen, regionale Besonderheiten von allgemeinen Mustern zu unterscheiden.

Die vorliegende Arbeit mit der hier vorgestellten Wiederholungsmessung leistet somit einen Beitrag zum Verständnis der in Kapitel 1 genannten Fragestellungen und zeichnet sich durch eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung aus. Für den Standort Erzhausen wird ein Datensatz vorgestellt, welcher in vergleichbarer Weise noch nicht verfügbar ist. Auf diese Weise trägt die Arbeit nicht nur zur detaillierten Untersuchung der regionalen vertikalen Temperaturverteilung des Untergrundes bis in 50 m u. GOK bei, sondern sie veranschaulicht und diskutiert die bekannten physikalischen Zusammenhänge anhand einer empirischen Datengrundlage.

4 Rahmenbedingungen und Methodik

In diesem Kapitel werden die Rahmenbedingungen und die Methodik der Wiederholungsmessung dargestellt. Zunächst wird die genaue Durchführung der Wiederholungsmessung und der Standort der Messstelle beschrieben. Anschließend wird die verwendete Messausrüstung vorgestellt und die Datenqualität und -quantität sowie die Datenverarbeitung der erhobenen Druck- und Temperaturdaten erläutert. Abschließend wird auf die Lufttemperaturdaten eingegangen und deren Einbindung in die Arbeit beschrieben.

4.1 Rahmenbedingungen der Wiederholungsmessung

Die Wiederholungsmessungen, auf der diese Arbeit beruht, wurde zwischen dem 18.01.2024 und dem 29.01.2025 durchgeführt. Dabei wurde im durchschnittlichen 16-Tage Rhythmus in einer Erdwärmesonde jeweils ein Temperaturprofil aufgezeichnet. Somit sind über den Zeitraum von einem Jahr und elf Tagen 25 Einzelmessungen durchgeführt worden.

Die Messungen wurden überwiegend vormittags bei stabilen Wetterbedingungen durchgeführt. Bei den Wiederholungsmessungen wurde darauf geachtet immer im selben Sondenrohr der mit einem Doppel-U ausgebauten EWS zu messen (vgl. Abbildung 1). Alle Messungen, mit Ausnahme der Messung vom 31.07.2024, wurden von mir persönlich und mit demselben Datenlogger durchgeführt. Die Messung am 31.07.2024 wurde zur Aufrechterhaltung des Messintervalls vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie übernommen. Dabei wurde ein baugleicher Datenlogger desselben Typs verwendet (vgl. Kapitel 4.4).

Die erste Messung des vertikalen Temperaturprofils wurde einmalig bis zur Endteufe der EWS bis in 100 m u. GOK durchgeführt. Nach Auswertung der in dieser Einzelmessung gesammelten Daten wurde eine Messtiefe der folgenden Temperaturprofile von 50 m u. GOK für ausreichend befunden. Dies ist damit begründet, dass die zu erwartenden Temperaturschwankungen, welche zentral für die folgende Arbeit sind und mit Hilfe dieser Messreihe veranschaulicht werden sollen, meist bis in eine Tiefe von 10-20 m u. GOK begrenzt sind (VDI 4640-1:2010-06, S. 6).



Abbildung 1: Situation untersuchten EWS mit Doppel-U. Sondenschenkel mit gelber Verschlusskappe wurde für die Wiederholungsmessung genutzt, eigene Aufnahme

4.2 Standort der Messstelle

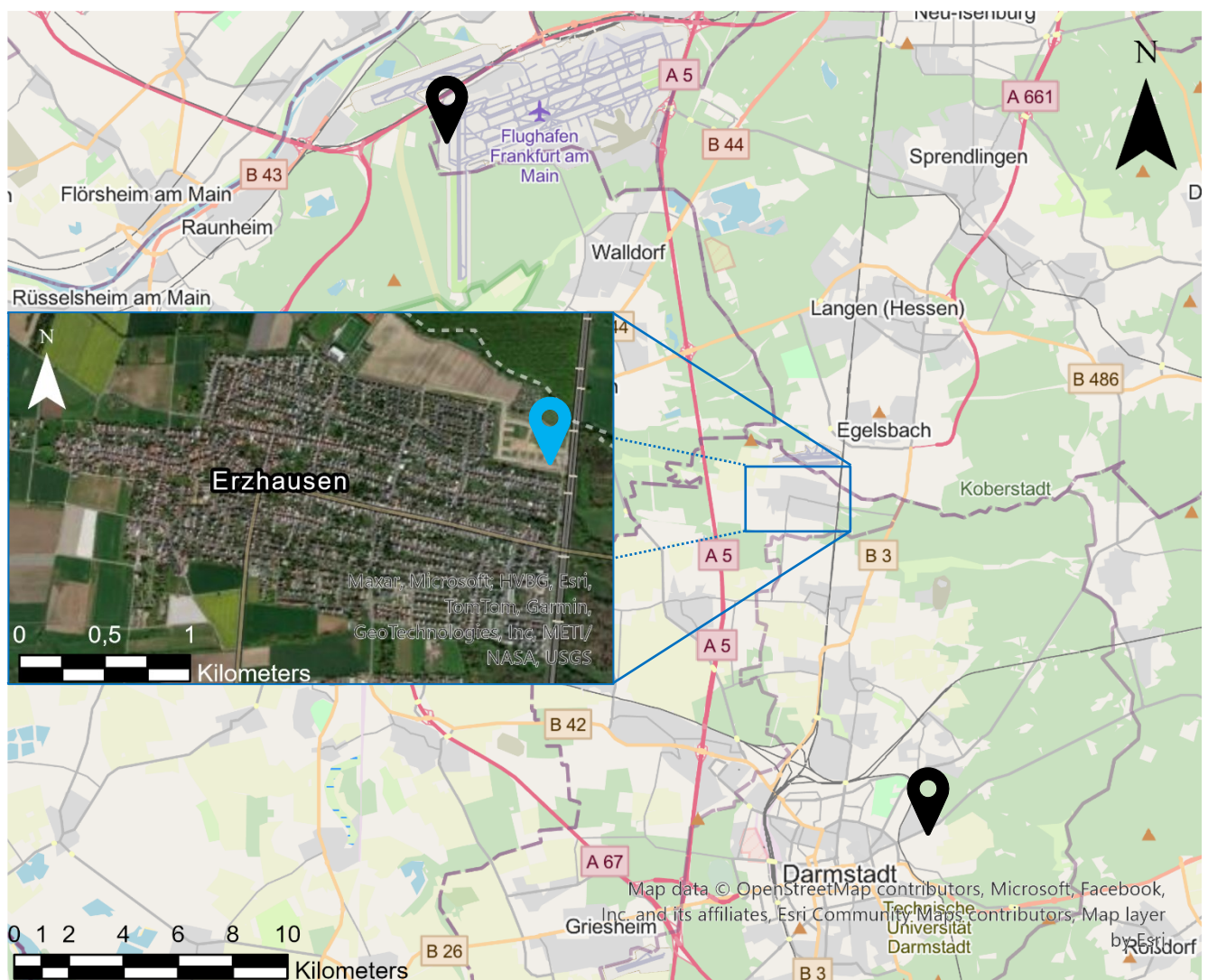


Abbildung 2: Übersichtskarte im Maßstab 1:250 000 mit den Standorten der meteorologischen Messstationen Frankfurt-Flughafen und Darmstadt in Schwarz. Kartengrundlage ESRI OpenStreetMap. Detailkarte von Erzhausen im Maßstab 1:40 000 mit Standort der Erdwärmesonde in Blau. Kartengrundlage ESRI Word Imagery.

Gemessen wurden die 25 Temperaturprofile in einer nicht in Betrieb befindlichen Erdwärmesonde in 64390 Erzhausen (Hessen) (vgl. Abbildung 2). Die 100 m tiefe EWS wurde im Rahmen mehrerer geologischer und geothermischer Erkundungsbohrungen im Auftrag des Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie in Zusammenarbeit mit dem Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen im Jahr 2019 abgeteuft. Sie befindet sich am südlichen Rand des Neubaugebietes „Die vier Morgen“ und hat die UTM-Koordinaten 32U 474871 5533490. Eine weitere EWS des HLNUG wurde am nördlichen Rand des Neubaugebietes, etwa 200 m Luftlinie von der hier untersuchten EWS, abgeteuft. Für beide nicht in Betrieb befindlichen EWS liegt vom HLNUG ein ausführlicher Bericht mit geologischen und hydrogeologischen Informationen inklusive Ergebnisse der durchgeführten Thermal-Response-Tests (TRT) vor (HLNUG, 2020).

Betrachtet man die örtlichen Gegebenheiten der Messstelle, befindet sich diese in Zone IIIB des Wasserschutzgebietes des Wasserwerkes Mörfelden der Stadtwerke Mörfelden-Walldorf sowie in Zone IIIB des Wasserwerkes Gerauer Land (HLNUG, 2020, S. 9). Das Neubaugebiet war zu Beginn der Messreihe im Januar 2024 eine brachliegende, nicht genutzte Freifläche (vgl. Abbildung 3). Gegen Ende der Messreihe im Januar 2025 wurden bereits erste Erschließungsmaßnahmen des Neubaugebietes in Form von öffentlicher Infrastruktur mit Straßen, Leitungen und Beleuchtungen erbaut. Im Rahmen der Bebauung des Neubaugebietes ist es grundsätzlich möglich, die abgeteuften Erdwärmesonden zu nutzen. Dafür wurde eine beispielhafte Dimensionierung vom HLNUG ausgearbeitet und im Abschlussbericht veröffentlicht (HLNUG, 2020, S. 5-8). Eine mögliche Erhaltung der untersuchten Erdwärmesonde als dauerhafte Messstelle wird im Kapitel 6 diskutiert.



Abbildung 3: Blick nach Westen auf die EWS und die Freifläche des Neubaugebietes "Die vier Morgen", eigene Aufnahme

4.3 Geologische und hydrogeologische Gegebenheiten des Standorts

Aufgrund der Erkundungsinitiative des HLNUG liegt zu der EWS ein detailreiches Schichtprofil vor, welches die geologischen Gegebenheiten widerspiegelt (HLNUG, 2020, S. 13f). Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, bestehen die obersten 4 m aus Auenlehm mit Schluffsand. Liegend dazu kommt eine 6 m mächtige Schicht aus kiesführenden Sanden, bei denen es sich um Terrassenablagerungen des Mains handelt. Schließlich folgen bis zur maximalen Teufe von 100 m u. GOK Verschwemmungsablagerungen, die überwiegend aus Schluff, andernfalls aus verschiedenen Korngrößenkombinationen aus Sand, Schluff und Ton aufgebaut sind. Dort können zudem carbonatführende Lagen vorkommen.

Bohransatzhöhe: 119,93 m NN

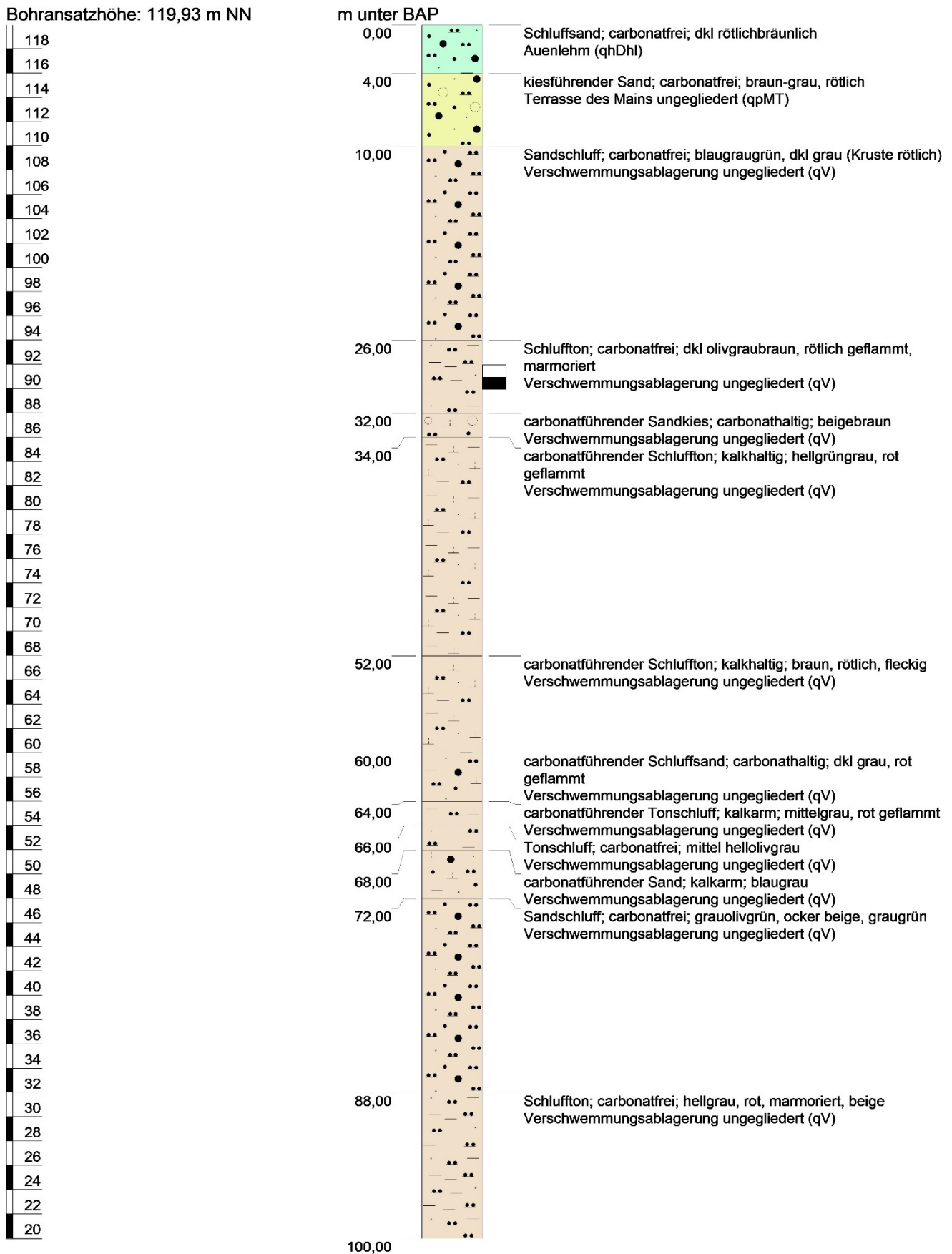


Abbildung 4: Geologisches Schichtprofil der EWS „Erzhausen Süd“ (HLNUG, 2020, S. 13f)

Der Grundwasserstand in der unmittelbaren Umgebung der EWS beträgt etwa 118,95 m über Normalhöhennull (ü. NHN) (HLNUG, 2020, S. 4). Dies ergibt mit einer Höhe des Bohransatzpunkts der EWS von 119,93 m ü. NHN einen Flurabstand von 0,98 m u. GOK im Bereich der untersuchten EWS.

Abbildung 5 stellt die Abklingkurven dar, die nach 1, 2, und 3 Stunden nach der Beendigung des Thermal-Response-Tests (TRT) gemessen wurden (HLNUG, 2020, S. 49). Zu erkennen ist die sukzessive Abkühlung des durch den TRT erwärmten Untergrundes. Diese Abkühlung geschieht jedoch nicht gleichmäßig, sondern es lassen sich Bereiche identifizieren, die schneller abkühlen und demnach eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Dies ist ein Hinweis auf erhöhte Grundwasserfließgeschwindigkeiten im Vergleich zu den jeweils hangenden und liegenden Schichten. Besonders in den Bereichen bei 12-21 m u. GOK und 61-64 m u. GOK zeigt sich eine deutlich schnellere Abkühlung des Untergrundes (vgl. Abbildung 5). Laut Schichtprofil befinden sich in diesen Bereichen Sediment aus Sandschluff beziehungsweise Schluffsand. Es kann aufgrund der Ergebnisse der Abklingkurven und den in diesen Bereichen vorgefundenen Sedimenten davon ausgegangen werden, dass hier zwei Bereiche mit erhöhten Grundwasserfließgeschwindigkeiten vorliegen. Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass der gesamte durch die EWS durchteufte Bereich einen Grundwasserleiter darstellt.

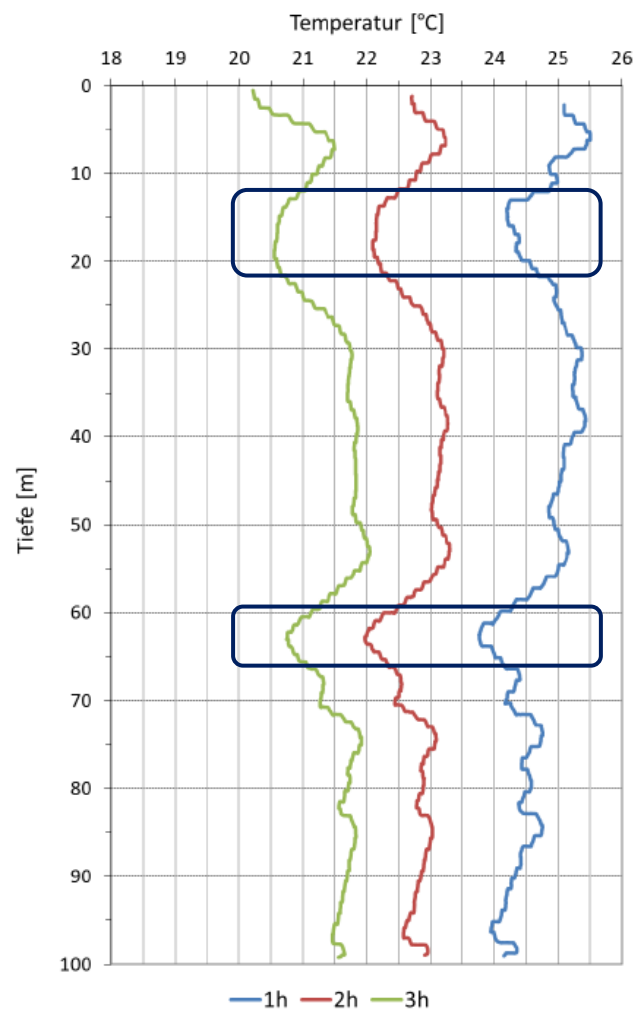


Abbildung 5: Abklingkurven nach 1h/2h/3h nach durchgeführtem Thermal-Response-Test (verändert nach HLNUG, 2020, S. 49). In Blau Bereiche mit erhöhten Wärmeleitfähigkeiten

4.4 Messausrüstung

Für die Messungen wurde ein 150 m langes Temperaturlichtlot des Typs 110 des Herstellers HT Hydrotechnik GmbH verwendet und vom HLNUG bereitgestellt. An das Ende des Lichtlotes wurde eine Temperatur- und Drucksonde des Typs „MikroLog2“ des Herstellers Driesen + Kern GmbH befestigt (vgl. Abbildung 6), welche ebenso vom HLNUG bereitgestellt wurde. Dieser Datenlogger wurde vor Start der Messreihe vom Hersteller kalibriert, um möglichst genaue Messergebnisse zu erzielen.

Der verwendete Datenlogger „MikroLog2“ hat im Messbereich < 50 m eine Messwertauflösung des Drucks von 0,1 mbar, beziehungsweise < 1 mm in Bezug auf eine vom Datenlogger durchgeführte Umrechnung des Drucks auf eine Wassersäule. Dabei entspricht die Genauigkeit $\pm 0,3\%$ vom genannten Messbereich. Im Messbereich > 50 m beträgt die Messwertauflösung < 10 mm, während die Genauigkeit $\pm 0,1\%$ vom genannten Messbereich beträgt. Die Temperaturdaten zeigen im Messbereich zwischen 0 °C und $+50\text{ °C}$ (ohne Eisbildung) eine Messwertauflösung von bis zu $0,001\text{ °C}$ und eine Messwertgenauigkeit von $0,2\text{ °C}$ (Driesen + Kern, o.D.).



Abbildung 6: Verwendete Messausrüstung mit Dreibein, Temperaturlichtlot und darunter befestigtem Datenlogger. Dargestellt mit Modell-EWS, eigene Aufnahme

Die Unterscheidung und Einordnung der angegebenen Messwertgenauigkeit und Messwertauflösung der Temperaturmessung des Datenloggers ist für diese Arbeit von Bedeutung. In Fragestellungen um die Grenzen zwischen saisonaler/neutraler Zone und neutraler/geothermischer Zone sind nicht die tatsächlichen Temperaturen wichtig (welche von der Messwertgenauigkeit beeinflusst werden), sondern viel mehr die Variationen und die Veränderung der Temperaturen (welche von der Messwertauflösung beeinflusst werden). Für die Definition der beiden Begriffe siehe Kapitel 2.2.

Die vom Ausleseprogramm des Datenloggers bereitgestellte automatische Umrechnung des Drucks in eine Wassersäule wurde für diese Messreihe nicht verwendet, da hierbei die Annahme getroffen wird, dass die Wassersäule auf einem über die Zeit hinweg konstanten Niveau ansteht. Der schwankende Wasserstand in der EWS über mehrere Messungen hinweg, welcher sowohl über als auch unter der Geländeoberkante liegen kann, wird also nicht berücksichtigt. Deswegen wird für die vorliegende Messreihe die Geländeoberkante als Referenzfläche genutzt und eine eigene Umrechnungsformel aufgestellt, um den Druck in eine Wassersäule unter Geländeoberkante umzurechnen. Die Umrechnung wird im Kapitel 4.6 näher erläutert.

4.5 Datenqualität und -auflösung

Die Datenqualität und Datenauflösung hängt nicht allein von der Messgenauigkeit und der Messauflösung der verwendeten Temperatur- und Drucksonde ab. Maßgeblich wird diese durch die Geschwindigkeit der Messfahrt, also der Geschwindigkeit, mit welcher der Datenlogger in die EWS hinabgelassen wird, beeinflusst. Von Bedeutung ist hierbei das Zeitintervall in dem jeweils Druck und Temperatur vom Datenlogger erfasst wird. Ein langsames Absenken des Datenloggers resultiert in einer höheren Datenauflösung, während ein schnelleres Absenken in einer geringeren Datenauflösung resultiert. Das Zeitintervall der Datenaufnahme beträgt über die gesamte Messreihe hinweg 2 Sekunden (0,5 Hz). Da der Datenlogger manuell über eine Handkurbel am Lichtlot in die EWS hinabgelassen wurde, unterliegt die Geschwindigkeit des Herunterlassens geringen Schwankungen. Es stellte sich eine Geschwindigkeit von 1-2 cm/s beim Hinabkurbeln ein, so dass in Intervallen von etwa 2-4 cm jeweils ein Messpunkt aufgezeichnet wurde.

Darüber hinaus ist das langsame Absenken des Datenloggers für die Datenqualität und die Genauigkeit der Temperaturmessung entscheidend. Der Datenlogger besitzt eine spezifische Ansprechzeit, die sich aus einer Kombination, der Wärmeleitfähigkeit des Edelstahl Gehäuses, der spezifischen Wärmekapazität des Gehäuses, der Wandstärke des Gehäuses und der internen Kopplung zwischen Gehäuse und Sensor ergibt. Erst nach Verstreichen der Ansprechzeit erfasst der Sensor die Temperaturänderung. Um Temperaturveränderungen in Bezug auf ihre exakte Tiefenlage korrekt zu erfassen, ist daher ein langsames Hinablassen des Datenloggers erforderlich.

Daher wurde der Datenlogger zu Beginn jeder Messung für etwa 5 Minuten in den oberen Bereich der EWS bei etwa 30 cm u. GOK eingetaucht, um eine thermische Akklimatisierung des Datenloggers zu erreichen. Um sicherzustellen, dass das gesamte Messsystem unter Wasser stand, wurde der Datenlogger so weit in die EWS eingetaucht, bis auch das über dem Datenlogger angebrachte Lichtlot Wasser detektierte. Zusätzlich wurde bei jeder Messung bei 10 m u. GOK das Hinabkurbeln des Datenloggers für weitere 5 Minuten unterbrochen, bevor dieser weiter hinuntergelassen wurde. Damit soll nach einem gegebenenfalls zu schnellem Absenken des Datenloggers in den oberen 10 m ab diesem Punkt erneut eine korrekte Temperaturerfassung ermöglicht werden.

Trotz der Maßnahmen kann in diesem Tiefenbereich bei der Auswertung der Rohdaten regelmäßig ein sprunghafter Anstieg in den Temperaturen beobachtet werden. Es ist deswegen davon auszugehen, dass die Geschwindigkeit, mit der der Datenlogger hinabgelassen wurde, zu hoch war. Der festgestellte Temperatursprung betrug meist rund 0,1 K.

4.6 Umrechnung der erhobenen Daten

Nach jeder Messung wurden die Temperatur- und Druckdaten, die der Datenlogger aufgenommen hat, ausgelesen. Hierfür wurde das zu den Datenloggern dazugehörige Computerprogramm „InfraLog“ des Herstellers Driesen + Kern GmbH verwendet. Mittels des Programms wurde eine Excel-Tabelle der Messergebnisse exportiert. In dieser wird für den im Vorhinein festgelegten Zeitraum im 2-Sekunden-Intervall jeweils der aktuelle Druck und die aktuelle Temperatur aufgeführt. Diese Rohdaten wurden vor der Weiterverarbeitung einmal gesichtet, um den korrekten Messbeginn sicherzustellen und die Daten

zu plausibilisieren. Für die weitere Untersuchung wurden die Daten auf Messbeginn und -ende zugeschnitten.

Die reduzierte Datentabelle wurde dann in einem Excel-Spreadsheet weiterverarbeitet. Die notwendige Umrechnung des Drucks in eine Wassersäule mit konstanter Referenzfläche erfolgt mittels folgender, für den Sachverhalt angepassten, hydrostatischen Grundgleichung:

$$Tiefe = (Druck - Luftdruck) \times Umrechnungsfaktor + Tiefenaufschlag \quad (Gl. 2)$$

Mit:

Tiefe	gemessene Tiefe relativ zur Geländeoberfläche	[m]
Druck	vom Logger gemessener Absolutdruck im Wasser	[mbar]
Luftdruck	vom Logger gemessener Luftdruck	[mbar]
Umrechnungsfaktor		[m/mbar]
Tiefenaufschlag	Abstand zw. Wassersäule und Geländeoberkante	[m]

Dabei stellt der Term

$$Druck - Luftdruck = Wasserdruck \quad (Gl. 3)$$

den Wasserdruck dar. Dieser berechnet sich aus dem vom Datenlogger gemessenen Druck innerhalb der Wassersäule, abzüglich des am Anfang gemessenen Luftdrucks. Der Wasserdruck wird dann im nächsten Schritt mit dem Umrechnungsfaktor multipliziert.

Der Umrechnungsfaktor setzt sich wie folgt zusammen:

$$Umrechnungsfaktor = \frac{Gesamtlänge\ der\ Wassersäule}{Maximaler\ Wasserdruck} \approx \frac{100 \frac{Pa}{mbar}}{1000 \frac{kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2}} \quad (Gl. 4)$$

Dieser rechnet den gemessenen Wasserdruck in Millibar [mbar] in Meter [m] unter Geländeoberkante um. Gleichzeitig kann der Umrechnungsfaktor auch über den physikalischen Zusammenhang des Drucks, der Dichte von Wasser und der Erdbeschleunigung formuliert werden. Für die Umrechnung des Drucks in Tiefe wird der Ausdruck über die Wassersäule und den Wasserdruck verwendet, da hier keine Näherungen bezüglich der Dichte der Wassersäule und der Erdbeschleunigung gemacht werden. Somit

können vor allem Dichteschwankungen des Wassers durch schwankende Temperaturen und mögliche Schwebstoffe und mineralische Inhaltsstoffe beachtet werden, wenn auch nur auf die gesamte Messung gemittelt.

Im Rahmen dieser Arbeit lässt sich bestimmen, dass der Umrechnungsfaktor folgenden Wert annimmt:

$$\text{Umrechnungsfaktor} = \frac{100 \frac{\text{Pa}}{\text{mbar}}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 0,010197 \frac{\text{m}}{\text{mbar}} \quad (\text{Gl. 5})$$

Zuletzt wird die berechnete Tiefe um den „Tiefenaufschlag“ korrigiert.

$$\begin{aligned} \text{Tiefenaufschlag} \\ &= \text{Wasserstand im Sondenrohr} \\ &- \text{Abstand zwischen Sondenoberkante und Geländeoberfläche} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 6})$$

Hiermit wird der Umstand berücksichtigt, dass die Wassersäule sowohl über als auch unter der Geländeoberkante, welche als Referenzfläche verwendet wird, anstehen kann. Der Wasserstand schwankt aufgrund von Verdunstung der Flüssigkeit in der Sonde, als auch durch Wasserverlust resultierend aus dem direkten Messvorgang. Während der Messfahrt wird aufgrund des Volumens des Datenloggers und des Maßbands des Lichtlots Wasser verdrängt, weshalb speziell in dieser Messreihe ab einer Messtiefe von etwa 15-25 m u. GOK Wasser aus dem Sondenrohr austritt. Zudem wird auch durch das Herausziehen des Lichtlotes und des Datenloggers Wasser aus der Sonde getragen. Um dem Flüssigkeitsverlust entgegenzuwirken, wurde nach jeder Messung rund 1 L Wasser in die Sonde zurück gefüllt, sodass ein etwa gleichbleibender Wasserstand in der Sonde gewährleistet wird. Da die Erdwärmesonde nicht in Betrieb ist, mussten keine weiteren Maßnahmen bezüglich des Sondenfluids und seinen chemischen Parametern getroffen werden.

4.7 Bereinigung und Aufbereitung der Daten

Da durch die hohe räumliche Datenauflösung ein erheblicher Datenumfang vorhanden ist, wurde für eine bessere Handhabung und weitere Auswertung ein vereinfachter Datensatz verwendet, der nur Temperaturdaten in vollen Meterschritten u. GOK betrachtet.

Die Wiederholungsmessungen am 16. April 2024, 1. August 2024, 15. August 2024, 8. September 2024, 9. Dezember 2024 und 29. Januar 2025 wurden aufgrund von Wetterumschwüngen oder falsch programmierten Datenloggern frühzeitig abgebrochen, bevor die Endteufe der geplanten Messung von 50 m u. GOK erreicht wurde. Viermal liegen daher kleinere Datenlücken vor, bei denen die oberen 40 m u. GOK gemessen wurden und die letzten 10 m des geplanten Messbereichs fehlen. Zweimal liegen größere Datenlücken vor. Dabei wurden einmal bis in eine Tiefe von 12 m u. GOK und einmal bis 19 m u. GOK gemessen. Alle Datenlücken wurden über eine lineare Interpolation geschlossen. Dabei

wurden als Stützpunkte der Interpolation die Temperaturdaten derselben Tiefen der Messung davor und danach verwendet.

4.8 Lufttemperaturdaten

Die für diese Arbeit gesammelten Untergrundtemperaturen werden im Folgenden mit bodennahen Lufttemperaturen verglichen und in Zusammenhang gestellt. Diese frei verfügbaren Daten der Lufttemperaturen wurden von meteorologischen Messstationen des Deutschen Wetter Dienstes über das Climate-Data-Center abgerufen (DWD, o.D. b).

Die beiden nächstgelegenen meteorologischen Messstationen sind die Messstationen 1420 Frankfurt/Main und 917 Darmstadt (vgl. Abbildung 2). Die Messstation 1420 Frankfurt/Main befindet sich auf etwa 103 m ü. NHN auf einer Freifläche des Frankfurter Flughafens und hat die UTM-Koordinaten 32U 465717 5541639. Sie liegt etwa 12,2 km nordwestlich von der EWS in Erzhausen. Die Messstation 917 Darmstadt befindet sich auf etwa 167 m ü. NHN in städtischer Umgebung auf einer von Gebäuden und Bäumen umgebenen Fläche. Die UTM-Koordinaten der Station lauten 32U 476863 5525439. Sie liegt etwa 8,3 km südsüdöstlich von dem Standort der EWS (vgl. Abbildung 2).

Für die Untersuchung und Beantwortung der Forschungsfragen 1 und 3 (Kapitel 5.1 und 5.3) wurden die Daten der meteorologischen Messstation Darmstadt herangezogen. Dies begründet sich damit, dass diese die nächstgelegene Messstation zur EWS in Erzhausen ist und somit diese die lokalen klimatischen Bedingungen wahrscheinlich am zutreffendsten widerspiegelt. In Kapitel 5.1 wurden die Tagesmittelwerte der Lufttemperaturen innerhalb des Messzeitraums (18.01.2024 – 29.01.2025) für eine Korrelation der Jahresgänge von Luft- und Untergrundtemperaturen genutzt. Für die Auswertung der Phasenverschiebung in Kapitel 5.3 wurden zusätzlichen die Tagesmittelwerte des Vorjahres (18.01.2023 – 29.01.2025) genutzt und auf Monatsmittelwerte reduziert. Mit Hilfe dieser wurde der zeitliche Versatz des Auftretens der Extremwerte der Untergrundtemperatur quantifiziert.

Für die Untersuchung der Fragestellung in Kapitel 5.2.2, in der langjährige Mittel der Lufttemperaturen mit der Untergrundtemperatur an der Grenze saisonaler und neutraler Zone verglichen werden, wurde neben den Daten der Messstation Darmstadt auch die Daten der Messstation Frankfurt-Flughafen herangezogen. Da Daten für den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren vor Messbeginn abgerufen werden, werden beide meteorologischen Messstation für die Auswertung berücksichtigt. Dies soll die Verlässlichkeit der Daten und der resultierenden Ergebnisse verbessern. Zudem wird damit die Vergleichbarkeit der Lufttemperaturdaten für den Standort der EWS Erzhausen mit den Standorten der meteorologischen Messstationen untersucht.

5 Ergebnisse der Messreihe

In der folgenden Auswertung werden die erhobenen Daten empirisch untersucht, um die in Kapitel 1 formulierten Forschungsfragen zu beantworten. Grundlage dafür bilden etwa 50 000 Datenpaare der Untergrundtemperatur und des Drucks. Zur Auswertung werden neben statistischen Verfahren eine Reihe von grafischen Darstellungsformen verwendet, die je nach Fragestellung verschiedene Aspekte verdeutlichen.

In Abbildung 7 sind die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erhobenen Rohdaten der Temperatur gegen die Tiefe abgebildet. Dargestellt sind 25 Einzelmessungen, die im durchschnittlichen Abstand von 16 Tagen durchgeführt wurden. Betrachtet man die übereinandergelegten Einzelmessungen, zeigt sich die charakteristische „Trichterform“ oder „Umbrella“-Form (Cui et al. 2011, S. 5), die aus den Schwankungen der Untergrundtemperaturen über einen Jahreszyklus hinweg entstehen. Zudem sind in den dargestellten Daten in Abbildung 7 bei einer Vielzahl von Temperaturprofilen die in Kapitel 4.5 beschriebenen Temperatursprünge von $\pm 0,1$ K bei ca. 10 m u. GOK zu erkennen. Diese Sprünge ergeben sich aus einer zu schnellen Messfahrt des Datenloggers bis 10 m u. GOK. Hier verweilt der Datenlogger für ca. fünf Minuten und kann sich erneut vollständig an die Umgebungstemperatur angleichen.

Die Daten beginnen mit der ersten Messung am 18. Januar 2024 (vgl. Abbildung 7, dunkelblau), wobei dieses Temperaturprofil über die Gesamtlänge der EWS bis in eine Tiefe von 100 m u. GOK erhoben wurde. Dieses Winter-Temperaturprofil zeigt den für die Jahreszeit typischen Temperaturverlauf: Oberflächennah liegen kalte Temperaturen vor, diese steigen bis in eine Tiefe von 9 m u. GOK an und nehmen ab dort wieder ab, bis sie sich schließlich dem Verlauf der übrigen Profile angleichen. Ein typischer Verlauf für ein Temperaturprofil, welches im Frühling aufgenommen wurde (vgl. Abbildung 7, violett), beginnt oberflächennah mit mittleren Temperaturen und wird mit zunehmender Tiefe zuerst kälter, bis bei etwa 5 m u. GOK ein Wendepunkt der Temperatur auftritt, die Temperaturen wieder höher werden und schließlich das Profil mit den übrigen Kurven konvergiert. Das Sommer-Temperaturprofil verläuft gegensätzlich zum Winter-Temperaturprofil (vgl. Abbildung 7, rot). Es startet bei hohen Temperaturen an der Oberfläche, kühlt bis in eine Tiefe von 9 m u. GOK ab, dort steigen die Temperaturen wieder an, bis das Profil sich an die restlichen Temperaturprofile angleicht. Auch das im Herbst aufgezeichnete Temperaturprofil zeigt einen gegensätzlichen Verlauf zum Frühling-Temperaturprofil (vgl. Abbildung 7, orange), wobei die Temperaturen oberflächennah bei mittleren Temperaturen starten, diese bis in eine Tiefe von etwa 5 m u. GOK ansteigen, dann wieder abfallen und mit den restlichen Kurven der Messungen zusammenlaufen.

Der Vergleich zwischen der ersten (18.01.2024) und der letzten Messung (29.01.2025) ist hervorzuheben (vgl. Abbildung 7, dunkelblau und gelb). Beide Messungen wurden mit einem zeitlichen Abstand von einem Jahr und elf Tagen aufgenommen. Abbildung 7 verdeutlicht, dass die Temperaturprofile erst ab etwa 4 m u. GOK einen deckungsgleichen Verlauf bis zur Endtiefe der Messung zeigen. Oberflächennah zeigen sie jedoch andere Temperaturverläufe, welche aus den Temperatureinflüssen der vorangegangenen Wochen vor den jeweiligen Messungen resultieren. Nach Betrachtung der Lufttemperaturdaten bestätigt sich diese Beobachtung: Gemittelt waren die drei Monate November, Dezember und Januar des Winters 2023/2024 zusammen milder als im Winter 2024/2025 (DWD, o.D. b).

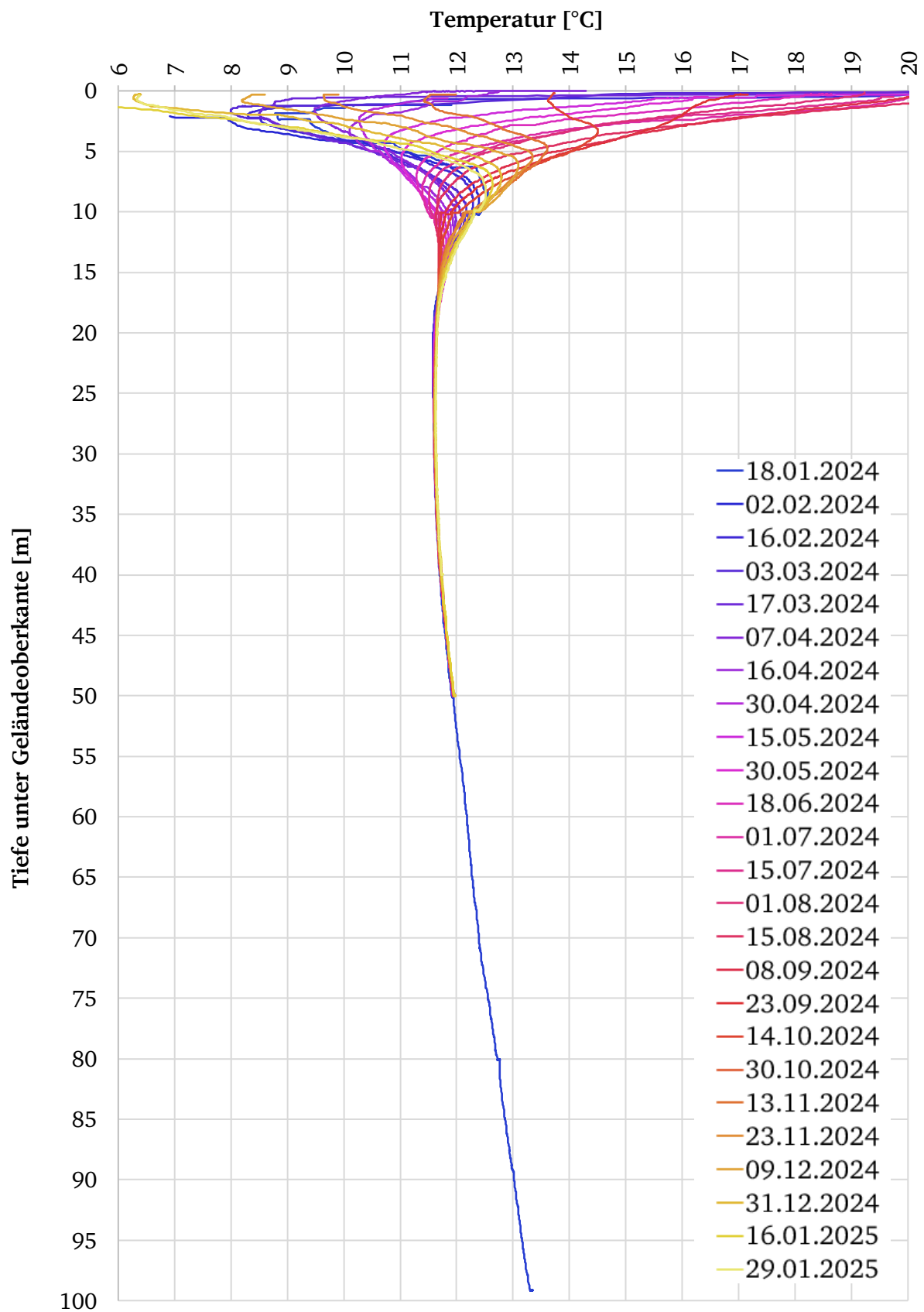


Abbildung 7: 25 Vertikale Temperaturprofile (Rohdaten) im Untergrund von Erzhausen zwischen Januar 2024 und Januar 2025, eigene Darstellung

5.1 Zusammenhang zwischen Luft- und Untergrundtemperaturen

Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Untergrundtemperaturen und bodennahen Lufttemperaturen wurden öffentlich verfügbare Lufttemperaturdaten der meteorologischen Messstation Darmstadt über das Climate-Data-Center des Deutschen Wetterdienstes abgerufen (vgl. Kapitel 4.8).

Um die täglichen, teilweise starken Schwankungen der Tageslufttemperaturen zu glätten, wurde auf die Tagesmittelwerte der Lufttemperaturen ein 14-Tage-gleitender Durchschnitt gelegt. Dies hebt das saisonale Signal deutlicher hervor. Sowohl die mittleren Tageslufttemperaturen als auch der gleitende 14-Tage Durchschnitt der Tageslufttemperaturen wird im Folgenden mit den Untergrundtemperaturen des oberflächennahen Bereichs in Zusammenhang gesetzt.

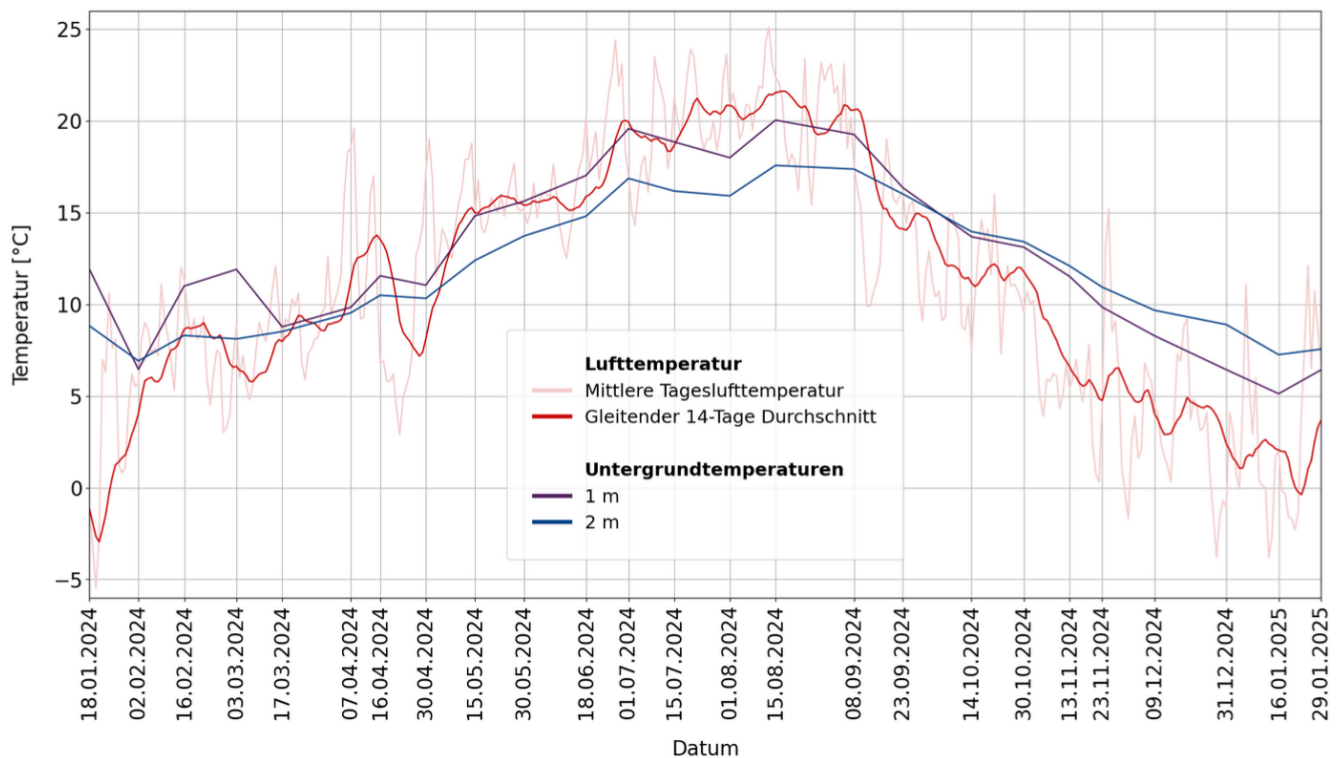


Abbildung 8: Jahresgänge der Untergrundtemperaturen in Erzhausen in 1 und 2 m u.GOK und Jahresgänge der Lufttemperaturen mit Tagesmitteln und 14-Tage-gleitendem Durchschnitt in Darmstadt zwischen Januar 2024 und Januar 2025, eigene Darstellung

Der Einfluss der Lufttemperaturen auf den Untergrund wird in Abbildung 8 anhand der Ganglinien verdeutlicht. Aufgetragen sind die Jahresgänge der Untergrundtemperaturen bei 1 und 2 m u.GOK (violett und blau), die mittleren Tageslufttemperaturen (rosa) und deren 14-Tage-gleitender Durchschnitt (rot) gegen die Zeit des gesamten Messzeitraums. Die Lufttemperaturkurven spiegeln die für diese Region typischen saisonalen Schwankungen wider. Innerhalb des Messzeitraums wird ein voller Jahresgang der Temperaturen abgedeckt: Beginnend mit dem Winter 2023/2024 (Temperaturminimum), gefolgt vom Sommer 2024 (Temperaturmaximum) und abschließend der Winter 2024/2025 (Temperaturminimum). Auch im Untergrund sind im oberflächennahen Bereich diese Schwankungen zu erkennen, jedoch in einer etwas abgeschwächten Form. Dabei fällt insbesondere auf, dass sich mittelfristige Temperaturschwankungen über den Zeitraum von Wochen in der

Lufttemperatur und dessen 14-Tage Durchschnitt deutlich im Untergrund bei 1 m u. GOK und etwas abgeschwächer bei 2 m u. GOK zeigen.

Zur Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen Luft- und Untergrundtemperaturen wird der Korrelationskoeffizient herangezogen. Für die Untergrundtemperaturen bei 1 m u. GOK beträgt die Korrelation im Vergleich mit den Tagesmittelwerten der Lufttemperaturen 0,755, während der Vergleich mit dem 14-Tage-gleitenden Durchschnitt einen höheren Wert von 0,898 ergibt. Beide Korrelationen sind positiv und hoch. Die Differenz der beiden Korrelationskoeffizienten lässt sich mit der thermischen Trägheit des Bodens erklären, die kurzfristige Temperaturextrema dämpft. Die Untergrundtemperaturen bei 1 m u. GOK werden aufgrund dieser nicht mehr von täglichen Temperaturschwankungen beeinflusst (Carslaw & Jaeger, 1959, S. 81; Geiger, 1961, S. 31; Williams & Gold, 1976, S. 4). Zudem ist aufgrund des 16-tägigen Messturnus die Erfassung von täglichen Temperaturschwankungen nicht möglich. Deshalb spiegelt der gleitende 14-Tage Durchschnitt besser die Temperaturdynamik im Untergrund bei 1 m u. GOK wider, was in einer höheren Korrelation resultiert.

Bei 2 m u. GOK beträgt der Korrelationskoeffizient bezogen auf die Tagesmittel bzw. den 14-Tage-gleitenden Durchschnitt 0,726 bzw. 0,882. Diese Korrelation ist immer noch positiv und hoch. Ab größeren Betrachtungstiefen nimmt die Korrelation jedoch ab, was auf die zunehmende Phasenverschiebung des Temperatursignals zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 5.3). Bereits bei 3 und 4 m u. GOK betragen die Korrelationskoeffizienten nur noch 0,585 bzw. 0,761 und 0,419 bzw. 0,601.

Zu erwähnen ist, dass eine Korrelation nicht gleichbedeutend mit Kausalität ist. Zwar zeigen die Daten, dass bodennahe Luft- und Untergrundtemperaturen im oberflächennahen Bereich einen parallelen Verlauf haben, dies jedoch nicht bedeutet, dass die Lufttemperatur an der Oberfläche der übergeordnete Antriebsfaktor für das Temperaturregime im Untergrund ist. Innerhalb der saisonalen Zone stellt Kaltschmitt et al. (1999, S. 10) die solare Strahlung die treibende Kraft des Temperaturregimes im oberflächennahen Bereich des Untergrundes dar. Die solare Strahlung beeinflusst jedoch auch die oberflächennahen Lufttemperaturen, weswegen ein ähnlicher Verlauf der Kurven aufgrund des gemeinsamen Treibers schlüssig ist.

5.2 Zonare Einteilung des Untergrundes

Die Temperaturverteilung im oberflächennahen Untergrund wird maßgeblich durch das Zusammenspiel zweier dominierender Einflussfaktoren bestimmt. Zum einen ist dies der exogene Wärmestrom, der vor allem durch solare Strahlung geprägt wird, und zum anderen der endogene, geothermische Wärmestrom, welcher aus Akkretionswärme, Wärme aus Gravitationsenergie sowie Wärme aus radioaktivem Zerfall gespeist wird (Kaltschmitt et al., 1999, S. 9f). Mit zunehmender Tiefe wird die Intensität des exogenen Wärmestroms abgeschwächt, bis dieser schließlich keinen Einfluss mehr auf das Temperaturregime des Untergrundes hat. Das Zusammenwirken dieser beiden Einflussfaktoren ist verantwortlich für die vertikale Gliederung des Untergrundes in drei Zonen.

In Abbildung 9 verdeutlicht Kürten (2015, S. 79) diese Gliederung: Oberflächennah befindet sich die saisonale Zone, die durch tägliche oder jahreszeitliche Schwankungen der Untergrundtemperaturen charakterisiert wird. In dieser Zone ist der Einfluss des geothermischen Gradienten vernachlässigbar.

Unter der saisonalen Zone schließt die neutrale Zone an, in der sich exogene und endogene Wärmeströme überlagern und weitgehend ausgleichen. Dies zeigt sich an den nahezu konstanten Temperaturen in diesem Bereich (vgl. Abbildung 9). In größeren Tiefen tritt schließlich der Einflussbereich des geothermischen Gradienten hervor, in dem die Temperatur kontinuierlich mit der Tiefe zunimmt.

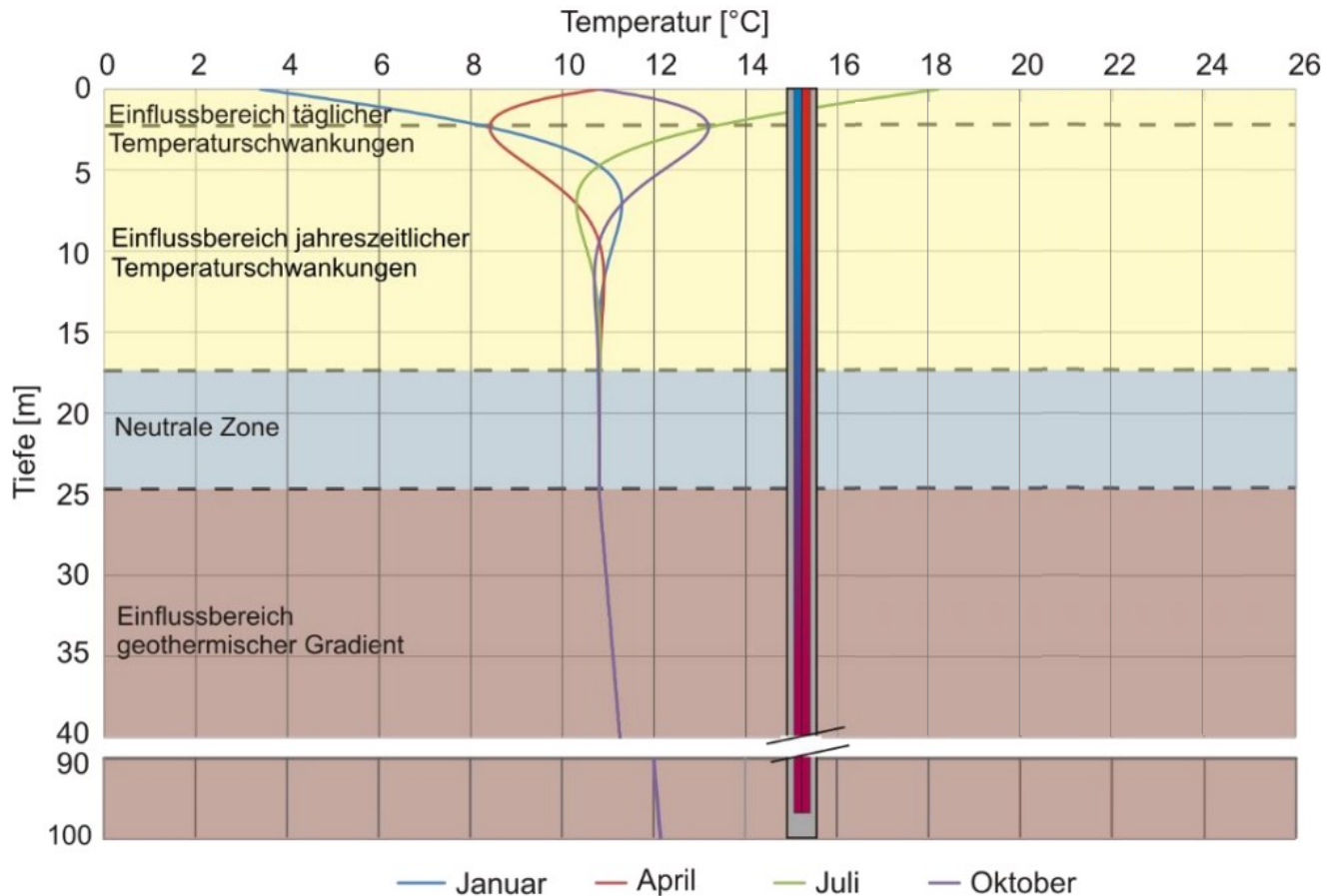


Abbildung 9: Vertikale Gliederung der Temperaturzonen im Untergrund (verändert nach Kürten, 2015, S. 79). Tiefenlage der Grenzen nur beispielhaft

5.2.1 Saisonale Zone

Die saisonale Zone umfasst den Untergrundbereich, in dem sich die Einflüsse der saisonalen Temperaturschwankungen der bodennahen Lufttemperaturen im Untergrund nachweisen lassen und deren Temperaturamplitude in konstanter Tiefe um mindestens 0,1 K schwankt (VDI 4640-1:2010-06, S. 6). Sie schließt unmittelbar an die Erdoberfläche an und reicht typischerweise bis in eine Tiefe von 10-20 m u. GOK (VDI 4640-1:2010-06, S. 6). Charakteristisch für diesen Bereich sind die jahreszeitlich bedingten periodischen Änderungen der Temperaturverläufe mit Phasenverschiebung und Dämpfung der Temperaturamplitude mit zunehmender Tiefe (vgl. Kapitel 5.3).

Physikalisch werden die Charakteristika der saisonalen Zone durch die Wärmeleitungsprozesse im Untergrund bestimmt. Die periodisch schwankenden oberflächennahen Lufttemperaturen pflanzen sich

als Temperatursignal in den Untergrund fort, wobei die Eindringtiefe maßgeblich von der Wärmeleitfähigkeit und thermischen Diffusivität des Untergrundes abhängt (Carslaw & Jaeger, 1959, S. 50ff).

Für die vorliegende Arbeit ist die saisonale Zone von besonderem Interesse, da sie den unmittelbaren Einfluss des atmosphärischen Temperaturregimes auf das Temperaturregime des Untergrundes widerspiegelt. Die Identifizierung dieser thermischen Zone für den Standort Erzhausen (Hessen) wird im Folgenden erläutert.

Die Lufttemperaturschwankungen des Tagesmittels betragen innerhalb des Messzeitraums 30,6 K, wobei eine minimale Tagesdurchschnittstemperatur von $-5,5^{\circ}\text{C}$ und eine maximale Tagesdurchschnittstemperatur von $+25,1^{\circ}\text{C}$ gemessen wurde (DWD, o.D. b.). Bei 1 m u. GOK ist nur noch eine Temperaturamplitude im Untergrund von 14,9 K messbar, wobei ein Temperaturmaximum von $20,04^{\circ}\text{C}$ und ein Temperaturminimum von $5,12^{\circ}\text{C}$ gemessen wurde. Die Temperaturamplitude bei 10 m u. GOK beträgt mit 0,94 K bereits weniger als 1 K. Hier herrscht über den Messzeitraum hinweg eine Durchschnittstemperatur von $11,99^{\circ}\text{C}$. Die Amplitude der Temperaturschwankung unterschreitet unter 16 m u. GOK die Mindestamplitude der Temperaturschwankung von 0,1 K (VDI 4640-1:2010-06, S. 6). Somit liegt die Untergrenze der saisonalen Zone in einer Tiefe von 16 m u. GOK (vgl. Abbildung 10). Die über den Messzeitraum gemittelte Untergrundtemperatur beträgt in dieser Tiefe $11,73^{\circ}\text{C}$.

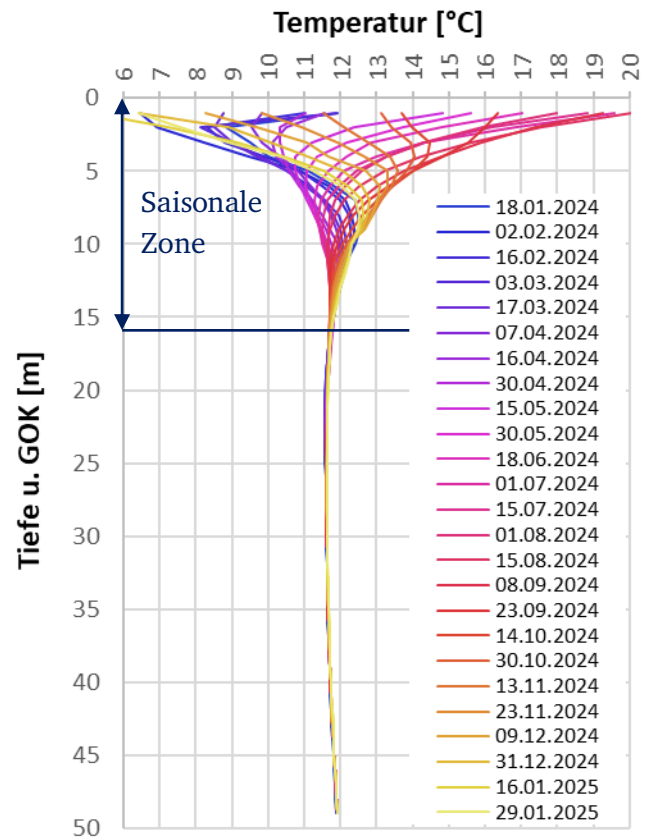


Abbildung 10: Vertikale Temperaturprofile (gekürzter Datensatz, $n=25$) im Untergrund von Erzhausen zwischen Januar 2024 und Januar 2025 mit saisonaler Zone, eigene Darstellung

Die Tiefe der saisonalen Zone wurde im Jahr 2019 nach Fertigstellung der EWS im Rahmen eines Thermal-Response-Tests durch die Messung eines Ruhetemperaturprofils bestimmt und vom beauftragten geothermischen Fachbüro mit einer Tiefe von 10 m u. GOK angegeben (HLNUG 2020, S. 31). Zu beachten ist, dass bei der zweiten untersuchten EWS „Erzhausen-Nord“, welche nur 200 m nordwestlich von der untersuchten EWS „Erzhausen-Süd“ liegt, eine Tiefe der saisonalen Zone von 16 m u. GOK festgestellt wurde (HLNUG 2020, S. 57). Die große Differenz der beiden Werte kann auch nach Vergleich der geologischen Profile nicht erklärt werden (HLNUG 2020, S. 13-15, 17-19). Somit muss davon ausgegangen werden, dass die Tiefe der saisonalen Zone von 10 m u. GOK für die EWS „Erzhausen-Süd“ von dem beauftragten Fachbüro nicht hinreichend genau bestimmt wurde. Die berechnete Tiefe der saisonalen Zone der EWS „Erzhausen-Nord“ stimmt jedoch mit der in dieser Arbeit bestimmten saisonalen Zone für die EWS „Erzhausen-Süd“ überein. Auf Grundlage der Auswertung zeigt

sich, dass Wiederholungsmessungen erforderlich sind, um die Tiefenlage der saisonalen Zone präzise zu bestimmen.

5.2.2 Vergleich der Temperatur an der Untergrenze der saisonalen Zone mit langjährigen Lufttemperaturmitteln

Die Temperatur an der Grenze zwischen saisonaler und neutraler Zone wird in der Literatur als eine Annäherung an das Jahres- bzw. das langjährige Mittel der bodennahen Lufttemperatur beschrieben (Stober & Bucher, 2025, S. 37; Williams & Gold, 1976, S. 4). Hierbei wird jedoch nicht eindeutig definiert, auf welchen Betrachtungszeitraum sich das Jahresmittel bzw. langjährige Mittel erstrecken soll. Um diesen Zusammenhang zu prüfen, wird im Folgenden die Temperatur an der Grenze zwischen saisonaler und neutraler Zone (11,73 °C) mit verschiedenen langjährigen Lufttemperaturmitteln der nahegelegenen meteorologischen Messstationen Frankfurt und Darmstadt verglichen (vgl. Tabelle 1).

In Tabelle 1 sind verschiedene langjährige Lufttemperaturmittel der Standorte Frankfurt und Darmstadt aufgelistet. Die Vergleichswerte der beiden Standorte für denselben Betrachtungszeitraum weichen systematisch voneinander ab. An der Messstation Frankfurt wurden nahezu konstant 0,7 K wärmere Mittel aufgezeichnet als die Mittel der Messstation Darmstadt (vgl. Tabelle 1). Die Differenz ist auf verschiedene Standortfaktoren, etwa die unterschiedliche topographische Höhe der Standorte, zurückzuführen. Da der Standort der EWS sowohl topografisch als auch geografisch zwischen den beiden meteorologischen Messstationen liegt, ist davon auszugehen, dass die tatsächlichen Lufttemperaturen in Erzhausen im Bereich zwischen den gemessenen Mittelwerten in Frankfurt und Darmstadt liegen.

An beiden Standorten zeigt sich ein Anstieg der mittleren Lufttemperaturen über die letzten Jahrzehnte (vgl. Tabelle 1). Ein Vergleich der Mittelwerte der jüngeren Zeiträume (Messzeitraum oder das vorangegangene Jahr) mit den langjährigen Mittel der Lufttemperaturen über 20 Jahre zeigt eine Erwärmung von etwa 0,7 K. Dieser Anstieg der Mittel lässt sich vermutlich auf klimabedingte Erwärmung zurückführen.

Für den direkten Vergleich der Temperaturen der Untergrenze der saisonalen Zone mit langjährigen Lufttemperaturmitteln wird zunächst die mittlere Lufttemperatur innerhalb des Messzeitraums der Wiederholungsmessung mit der Temperatur an der Untergrenze der saisonalen Zone verglichen. Die Abweichung der Untergrundtemperatur zur Durchschnittstemperatur der Luft beträgt in Darmstadt -0,42 K und in Frankfurt +0,28 K (vgl. Tabelle 1). Ähnliche Abweichungen ergeben sich für das Jahr vor dem Messzeitraum mit -0,35 K für Darmstadt und +0,45 K für Frankfurt (vgl. Tabelle 1).

Bei Betrachtung der Lufttemperaturmittel über 20 Jahre nehmen die Abweichungen deutlich zu. Zudem ist auffällig, dass die Abweichungen sowohl für Darmstadt als auch Frankfurt negativ ausfallen. Da der tatsächliche Mittelwert der Lufttemperaturen am Standort Erzhausen, wie zuvor erläutert, zwischen den jeweiligen Messwerten der meteorologischen Messstationen liegt, zeigt sich, dass langjährige Mittel über 20 Jahre nicht mehr repräsentativ für den gegenwärtigen klimatischen Zustand des Standortes Erzhausen sind.

Tabelle 1: Vergleich der Temperatur an der Untergrenze der saisonalen Zone mit langjährigen Mitteln der Lufttemperatur an den Standorten Darmstadt und Frankfurt (DWD, o.D. b)

Langjährige Lufttemperaturmittel	Darmstadt	Frankfurt
Über den Messzeitraum 18.01.2024 – 29.01.2025	11,31 °C (–0,42 K)	12,01 °C (+0,28 K)
1 Jahr vor Messzeitraum 18.01.2023 – 18.01.2024	11,38 °C (–0,35 K)	12,18 °C (+0,45 K)
5 Jahre vor Messzeitraum 18.01.2019 – 18.01.2024	11,10 °C (–0,63 K)	11,87 °C (+0,14 K)
10 Jahre vor Messzeitraum 18.01.2014 – 18.01.2024	11,06 °C (–0,67 K)	11,80 °C (+0,07 K)
20 Jahre vor Messzeitraum 18.01.2004 – 18.01.2024	10,62 °C (–1,11 K)	11,37 °C (–0,36 K)

Tabellenbeschreibung: Diese Tabelle zeigt die langjährigen Lufttemperaturmittel für verschiedene Betrachtungszeiträume an den Messstationen Darmstadt und Frankfurt. Jeweils neben dem langjährigen Mittel steht in Klammern die Abweichung des Mittels zur über den Zeitraum der Wiederholungsmessung festgestellten durchschnittlichen Untergrundtemperatur an der Untergrenze der saisonalen Zone von 11,73 °C.

Es kann aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten Daten davon ausgegangen werden, dass die Temperatur an der Untergrenze der saisonalen Zone ein langjähriges Mittel der Lufttemperaturen am Standort darstellt. Aufgrund der Entfernungen der meteorologischen Messstationen zum Standort der EWS kann jedoch kein genauer Zeitraum bestimmt werden, der die Temperatur an der Untergrenze der saisonalen Zone am zuverlässigsten repräsentiert. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Zeitraum des Lufttemperaturmittels, der repräsentativ für die Temperatur an der Untergrenze der saisonalen Zone ist, nicht älter als 20 Jahre ist. Für genauere Ergebnisse ist eine meteorologische Messstation in der unmittelbaren Umgebung des Standorts der Wiederholungsmessung der vertikalen Temperaturprofile nötig.

5.2.3 Neutrale Zone

Die neutrale Zone schließt direkt unter der saisonalen Zone ab einer Tiefe 16 m u. GOK an. Sie ist definiert als jene Zone, in der der jährliche Temperaturgang aufgrund der vorangeschrittenen Dämpfung der Temperaturamplitude um weniger als 0,1 K schwankt (VDI 4640-1:2010-06, S. 6). Mittelfristige, saisonale Einflüsse sind damit in dieser Zone vernachlässigbar. Vielmehr unterliegt das Temperaturregime dieser Zone einem langfristig geprägten und stark abgeschwächten exogenen Temperatureinfluss, der mit dem geothermischen Temperatureinfluss in Wechselwirkung steht.

Ein Charakteristikum dieser Zone ist das gegenseitige Ausgleichen des exogenen Wärmestroms, der von der Erdoberfläche nach unten gerichtet wirkt (in dieser Arbeit mit positivem Vorzeichen) und des endogenen Wärmestroms, der aus dem Erdinneren nach oben wirkt (in dieser Arbeit mit negativem Vorzeichen). Während im oberen Bereich der neutralen Zone noch ein positiver Temperaturgradient messbar ist (vgl. Abbildung 11), ist im mittleren Bereich der neutralen Zone kein signifikanter Netto-

Temperaturgradient messbar. Ab einer Tiefe von 33 m u. GOK ist schließlich eine signifikante Inversion der Richtung des Temperaturgradienten messbar. Ab dieser Tiefe beträgt der Temperaturgradient über den Zeitraum der Wiederholungsmessung im Mittel $-0,01 \text{ K/m}$. Dieser negative Temperaturgradient zeigt an, dass ab hier der geothermische Wärmestrom überwiegt. Nun ist der Untergrund nicht mehr „neutral“. Somit wird im Rahmen dieser Arbeit die Untergrenze der neutralen Zone bei 33 m u. GOK festgelegt. Die neutrale Zone hat damit eine Mächtigkeit von 17 m.

Die gemittelte Temperatur innerhalb der neutralen Zone beträgt über den gesamten Messzeitraum und über die gesamte Mächtigkeit der neutralen Zone $11,63 \text{ }^{\circ}\text{C}$ mit einer Standardabweichung von $0,03 \text{ K}$.

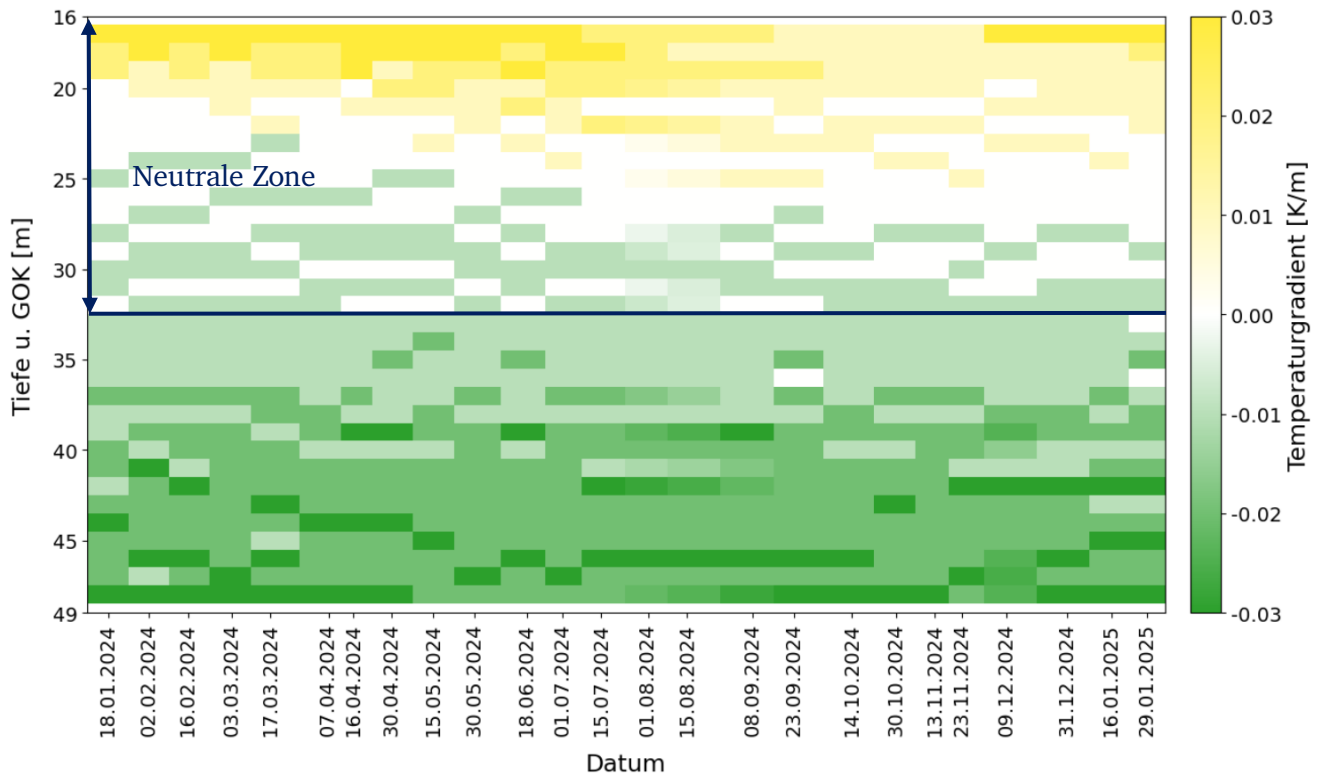


Abbildung 11: Zeitliche Entwicklung des Temperaturgradienten in Erzhausen zwischen Januar 2024 und Januar 2025 unterhalb der saisonalen Zone mit definierter neutraler Zone, eigene Darstellung

5.2.4 Zone des geothermischen Gradienten

Unterhalb der neutralen Zone, die bei 33 m u. GOK endet, schließt die Zone des geothermischen Gradienten an (vgl. Abbildung 12). Hier stellt der geothermische Gradient, der in Deutschland durchschnittlich 3 K/100 m bzw. 0,03 K/m beträgt, den dominierenden thermischen Einflussfaktor dar. Der endogene Wärmestrom, der aus dem Erdinneren Richtung Erdoberfläche gerichtet ist, wird von Wärme aus Gravitationsenergie, Ursprungswärme und Zerfallswärme durch radioaktive Isotope angetrieben (Kaltschmitt et al., 1999, S. 9f).

An der Grenze zwischen neutraler und geothermischer Zone wurde eine Durchschnittstemperatur von 11,64 °C gemessen. Bis zur maximalen Messtiefe ist die Durchschnittstemperatur innerhalb 17 m um 0,27 K auf 11,92 °C angestiegen.

Wie in Abbildung 11 dargestellt, ist ab einer Tiefe von 33 m u. GOK über den Jahreszyklus hinweg ein negativer, zur Erdoberfläche gerichteter Temperaturgradient von mindestens –0,01 K/m messbar. Mit zunehmender Tiefe ist dabei ein Anstieg des Temperaturgradienten auf den für Deutschland typischen Wert von –0,03 K/m beobachtbar.

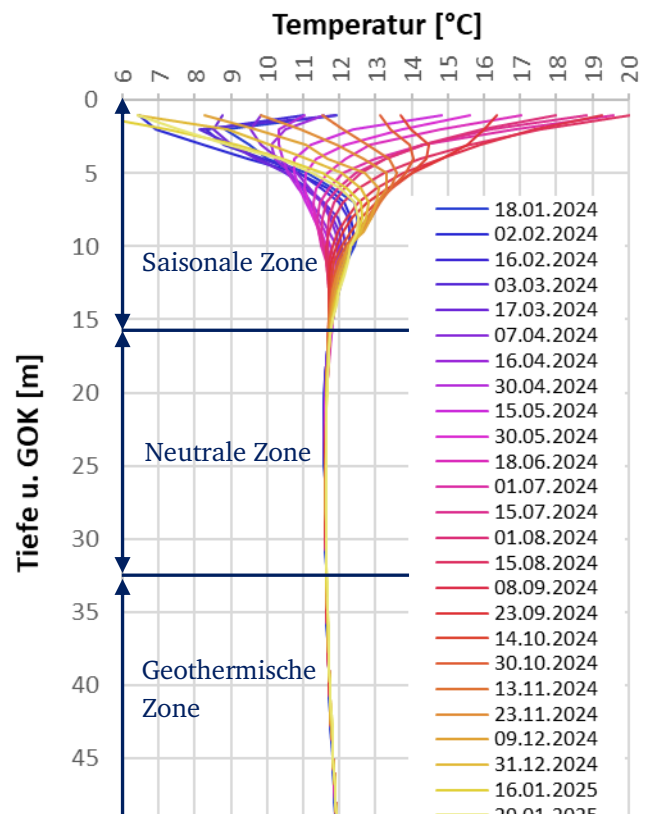


Abbildung 12: Vertikale Temperaturprofile (bereinigte Daten, n=25) im Untergrund von Erzhausen zwischen Januar 2024 und Januar 2025 mit definierter saisonaler, neutraler und geothermischer Zone, eigene Darstellung

5.2.5 Vergleich der Zonen mit anderen Standorten

Der Vergleich von Mächtigkeit und Tiefe der saisonalen und neutralen Zone verschiedener Standorte ist aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren nur bedingt sinnvoll. Beispielsweise beeinflussen die geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten des Untergrundes, klimatische Bedingungen (etwa Sonneneinstrahlung, Niederschläge oder Schneebedeckung), topographische Höhe, Bedeckung durch Vegetation des zu untersuchenden Untergrundes oder urbane Einflüsse, die Tiefenlage der Grenzen zwischen saisonaler/neutraler Zone und neutraler/geothermischer Zone. Daher lässt sich festhalten, dass die Mächtigkeiten der Zonen und die Tiefen der Grenzen stark durch die lokalen Gegebenheiten geprägt sind und nur ein Vergleich von Standorten mit möglichst identischen Rahmenbedingungen sinnvoll ist. Eine Veröffentlichung, die Ergebnisse einer Messreihe mit vergleichbaren Rahmenbedingungen des Standorts durchgeführt hat und vergleichbare methodische Ansätze zeigt, wird im Folgenden vorgestellt.

Die Autoren Kłonowski und Żeruń (2024) haben an fünf polnischen Standorten die saisonale, neutrale und geothermische Zone des Untergrundes bestimmt. Hierbei wurden jeweils in den Jahren 2022 und 2023 vier Temperaturprofilmessungen bis in eine Tiefe von 99 m u. GOK durchgeführt und anhand dieser wurden für beide Jahre getrennt die jeweiligen Zonen bestimmt. Zwei der fünf Standorte zeigen vergleichbare geologische Verhältnisse, wobei die hier untersuchten einfachen U-Sonden klastische Sedimente im Korngrößenbereich zwischen Ton und Kies durchteufen (Kłonowski & Żeruń, 2024, S. 4). Zudem liegen beide Bohransatzpunkte der Messstellen mit 117,94 bzw. 125,21 m ü. NHN auf vergleichbaren topographischen Höhen (ebd.). Für den Standort Halinów wurde in der Messperiode 2022 eine Tiefe der saisonalen Zone von 25 m u. GOK und in der Messperiode 2023 von 15 m u. GOK festgestellt (Kłonowski & Żeruń, 2024, S. 7). Für den Standort Wrocław wurde in der Messperiode 2022 eine Tiefe der saisonalen Zone von 12 m u. GOK und in der Messperiode 2023 von 25 m u. GOK festgestellt (ebd.). Die Autoren betonen, dass die große Differenz in den Mächtigkeiten der saisonalen Zone zwischen den beiden Messperioden zu einem erheblichen Maß aus der Art und Weise der durchgeführten Temperaturprofilmessung resultiert und nicht die natürliche Temperaturentwicklung in dieser Tiefe widerspiegelt (ebd.). Die Tiefenlage der Grenze zwischen neutraler Zone und Zone des geothermischen Gradienten wurde am Standort Wrocław in beiden Messperioden in 50 m u. GOK identifiziert (ebd.). Am Standort Halinów liegt diese in beiden Messperioden in 55 m u. GOK (ebd.).

Wie zu erkennen ist, liegen die Ergebnisse in ähnlichen Größenordnungen, jedoch weichen diese signifikant von den in Erzhausen bestimmten Zonen ab. Dies verdeutlicht, dass die Tiefenlagen und Mächtigkeiten der genannten Zonen maßgeblich von den lokalen Rahmenbedingungen beeinflusst werden.

5.3 Phasenverschiebung und Dämpfung der Temperaturamplitude

Die Phasenverschiebung und Dämpfung der Temperaturamplitude innerhalb der saisonalen Zone lässt sich anhand der in Tabelle 2 dargestellten Temperaturdaten des Untergrundes nachvollziehen. In dieser Tabelle wurde mittels farblicher Formatierung visuell verdeutlicht, wie sich Sommer- und Wintersignal mit zunehmender Zeit und Tiefe fortpflanzen. Zudem wurde die Spannweite (Amplitude) der Untergrundtemperatur für jeden Tiefschritt berechnet.

Im Folgenden werden diese Daten mithilfe von verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten visualisiert. Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser hat mit den Grundwasser Richtlinien (1987) Empfehlungen bezüglich Auswertung von Grundwassertemperaturen aufgestellt und grafische Auswertungsmethoden vorgestellt. Dabei stellen Ganglinien der Temperaturverläufe und Thermo-Isoplethendiagramme zur Darstellung von Temperaturgleichen Werkzeuge dar, die die Phasenverschiebung und Dämpfung der Temperaturamplitude visuell verdeutlichen. Diese Darstellungsmöglichkeiten werden genutzt, um die erhobenen Temperaturdaten im Rahmen der Phasenverschiebung und Dämpfung der Temperaturamplitude einzuordnen.

Tabelle 2: Übersicht der Temperaturdaten der Messreihe bis zur Untergrenze der saisonalen Zone

Tiefe u. GOK [m]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
18.01.2024	11,91	8,82	9,52	10,00	11,11	11,80	12,40	12,48	12,53	12,43	12,22	12,09	11,92	11,83	11,75	11,72
02.02.2024	6,45	6,91	8,22	9,48	10,84	11,67	12,12	12,31	12,39	12,35	12,19	12,06	11,95	11,88	11,79	11,72
16.02.2024	10,99	8,30	8,80	9,90	10,89	11,51	12,00	12,23	12,29	12,27	12,18	12,09	11,98	11,90	11,82	11,73
03.03.2024	11,90	8,11	9,00	9,80	10,51	11,14	11,56	11,94	12,11	12,17	12,13	12,05	11,96	11,89	11,81	11,74
17.03.2024	8,77	8,51	9,00	9,70	10,52	11,04	11,54	11,81	11,98	12,07	12,07	12,03	11,96	11,89	11,81	11,75
07.04.2024	9,83	9,53	9,84	10,34	10,82	11,19	11,49	11,73	11,89	11,98	11,98	11,95	11,90	11,85	11,78	11,73
16.04.2024	11,55	10,49	10,12	10,22	10,65	10,95	11,21	11,49	11,70	11,92	11,94	11,95	11,92	11,86	11,81	11,75
30.04.2024	11,04	10,32	10,31	10,42	10,59	10,86	11,16	11,40	11,60	11,76	11,88	11,91	11,89	11,87	11,81	11,77
15.05.2024	14,82	12,39	11,20	10,75	10,75	10,89	11,08	11,29	11,48	11,65	11,80	11,85	11,87	11,85	11,81	11,78
30.05.2024	15,62	13,72	12,18	11,36	11,06	11,03	11,14	11,29	11,45	11,62	11,74	11,80	11,82	11,82	11,80	11,76
18.06.2024	17,02	14,80	12,84	12,18	11,67	11,37	11,29	11,32	11,42	11,54	11,67	11,73	11,78	11,79	11,78	11,75
01.07.2024	19,57	16,86	14,29	12,98	12,08	11,69	11,47	11,40	11,42	11,49	11,62	11,69	11,73	11,76	11,76	11,75
15.07.2024	18,85	16,17	14,33	13,26	12,46	11,94	11,65	11,53	11,51	11,55	11,62	11,67	11,72	11,74	11,74	11,73
01.08.2024	17,99	15,91	14,31	13,28	12,59	12,12	11,85	11,70	11,66	11,68	11,70	11,74	11,71	11,72	11,73	11,72
15.08.2024	20,04	17,57	15,60	14,22	13,22	12,52	12,10	11,86	11,70	11,64	11,64	11,67	11,69	11,70	11,71	11,70
08.09.2024	19,26	17,37	15,88	14,80	13,76	13,02	12,54	12,20	11,96	11,80	11,70	11,69	11,69	11,69	11,69	11,69
23.09.2024	16,35	16,01	15,55	14,82	14,02	13,35	12,76	12,34	12,09	11,91	11,77	11,72	11,70	11,69	11,69	11,69
14.10.2024	13,68	13,96	14,47	14,39	14,00	13,45	13,02	12,61	12,30	12,05	11,85	11,77	11,73	11,71	11,69	11,68
30.10.2024	13,11	13,41	13,95	14,06	13,82	13,43	13,06	12,76	12,48	12,18	11,96	11,84	11,77	11,73	11,70	11,69
13.11.2024	11,52	12,09	12,76	13,36	13,60	13,41	13,13	12,87	12,59	12,28	12,02	11,91	11,81	11,76	11,72	11,69
23.11.2024	9,84	10,93	11,91	12,65	13,29	13,29	13,06	12,81	12,53	12,23	12,05	11,93	11,83	11,77	11,73	11,70
09.12.2024	8,28	9,67	11,07	11,68	12,71	13,09	13,03	12,87	12,67	12,25	12,15	11,99	11,87	11,81	11,75	11,72
31.12.2024	6,43	8,89	10,09	11,09	12,05	12,61	12,79	12,74	12,59	12,30	12,20	12,06	11,94	11,86	11,78	11,73
16.01.2025	5,12	7,25	9,15	10,42	11,54	12,22	12,60	12,63	12,54	12,32	12,21	12,09	11,97	11,89	11,81	11,75
29.01.2025	6,42	7,55	8,91	10,36	11,24	12,03	12,42	12,52	12,50	12,32	12,24	12,12	12,00	11,91	11,83	11,76
Mittelwert [°C]	12,65	11,82	11,73	11,82	11,99	12,06	12,10	12,09	12,06	11,99	11,94	11,90	11,84	11,81	11,76	11,73
Spannweite [K]	14,92	10,66	7,66	5,34	3,51	2,59	2,05	1,58	1,25	0,94	0,62	0,45	0,31	0,22	0,14	0,10

Tabellenbeschreibung: Diese Tabelle stellt die Untergrundtemperaturen [°C] je Tiefe und Messtag dar. Die farbliche Formatierung vergleicht nur Werte innerhalb einer Tiefenstufe (Spalte). Zusätzlich ist der Mittelwert [°C] und die Spannweite [K] der jeweiligen Temperaturen pro Tiefschritt dargestellt.

Abbildung 13 stellt die Jahresgänge der Untergrundtemperaturen dar. Hierbei repräsentiert jede Ganglinie die Temperaturentwicklung in einer konstanten Tiefe über den gesamten Messzeitraum hinweg. Mit zunehmender Tiefe treten Temperaturmaxima und -minima zeitlich verzögert auf, was auf die thermischen Eigenschaften des Untergrundes zurückzuführen ist. Zudem nimmt die Amplitude, mit der die Temperaturen in konstanten Tiefen schwanken, mit zunehmender Tiefe ab, bis diese nahezu konstant sind.

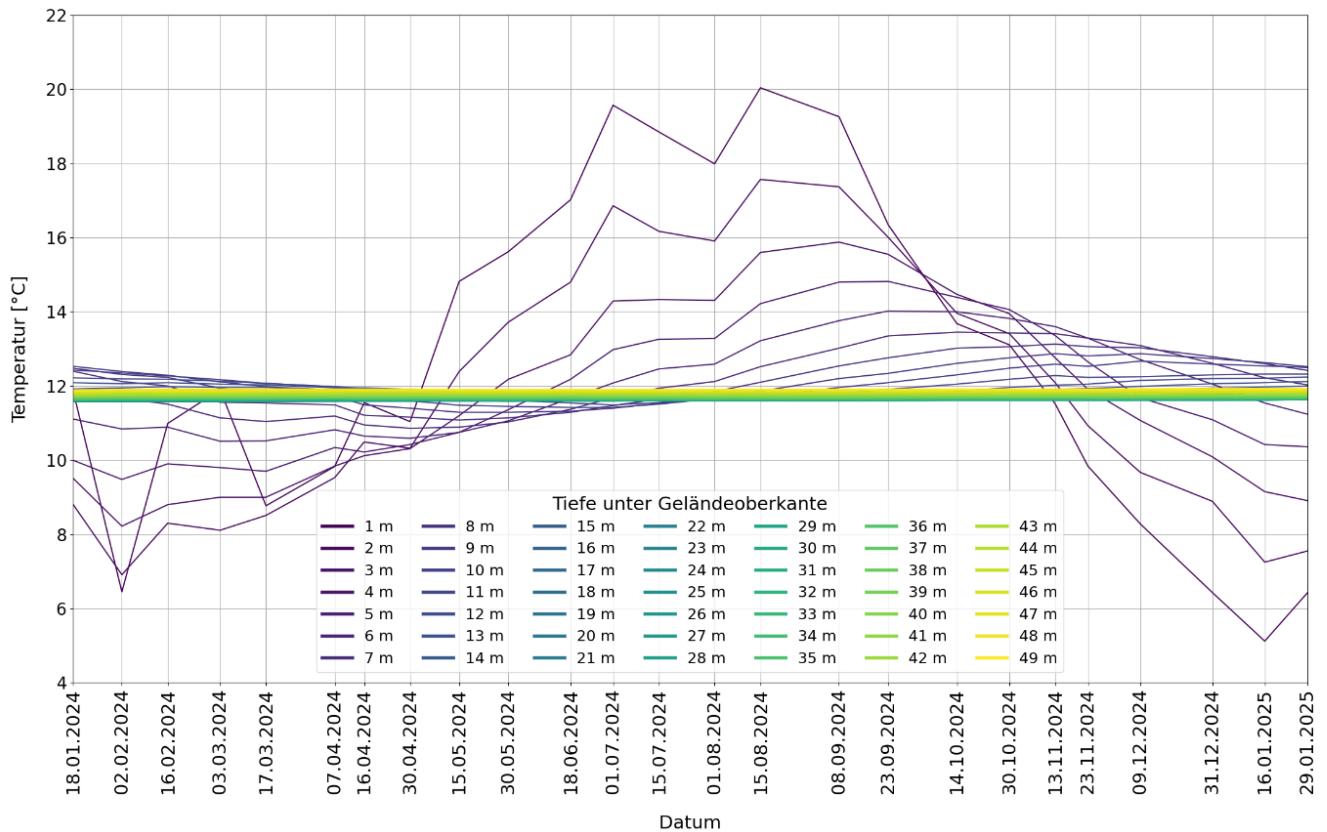


Abbildung 13: Jahresgänge der Untergrundtemperaturen in Erzhausen in verschiedenen Tiefen zwischen Januar 2024 und Januar 2025, eigene Darstellung

Eine weitere Darstellungsweise, die die Dynamik des Untergrundes mitsamt der Phasenverschiebung und der Dämpfung der Temperaturamplitude mit zunehmender Tiefe zeigt, ist das Thermo-Isoplethendiagramm. Abbildung 14 zeigt dieses bis in eine Tiefe von 20 m u. GOK. Da in größeren Tiefen die Temperaturunterschiede minimal sind, wird auf die Darstellung dieser Tiefen in diesem Diagramm verzichtet. Die Isoplethen repräsentieren Linien gleicher Temperaturen und verdeutlichen visuell, wie sich Wärme- und Kältefronten sukzessiv in den Untergrund fortpflanzen. So wechseln sich der Wärmeeintrag aus dem Sommerhalbjahr (rot) und der Kälteeintrag aus dem Winterhalbjahr (blau) periodisch ab. Im Besonderen erkennt man in Abbildung 14 eindeutig zwei Sommersignale und zwei Wintersignale: Das Sommersignal 2023 tritt im ersten Viertel des Messzeitraums in größeren Tiefen ab 7 m u. GOK hervor. Gefolgt wird dies vom Wintersignal 2023/2024, welches fast vollständig abgebildet wird. Von dem zweiten Sommersignal 2024 wurde der vollständige Temperatureintrag erfasst, jedoch kann der Verlauf in größeren Tiefen aufgrund des Endes der Messreihe nicht vollständig dargestellt werden. Das Wintersignal 2024/2025 tritt im letzten Viertel des Messzeitraums hervor. Von diesem

konnte jedoch auch aufgrund der Beendigung der Messreihe nur der Beginn des Temperatureintrags in den Untergrund dokumentiert werden.

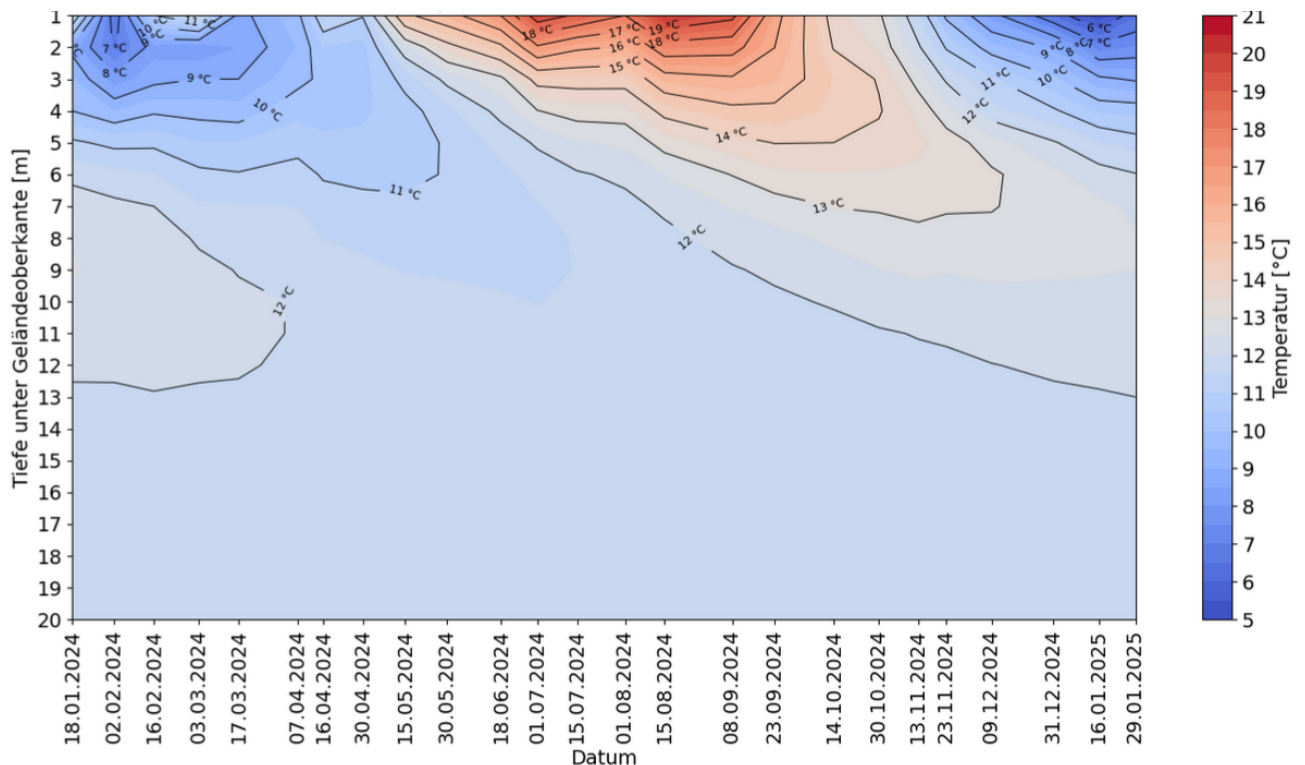


Abbildung 14: Thermoisoplethen-Diagramm der Untergrundtemperaturen in Erzhausen zwischen Januar 2024 und Januar 2025, eigene Darstellung

Im Folgenden findet eine quantitative Auswertung der erhobenen Messdaten statt, um den zeitlichen Versatz der Phasenverschiebung und die Dämpfung der Temperaturamplitude je Tiefschritt innerhalb der saisonalen Zone zu bestimmen. Allgemein wird für die Untersuchung nur die im Vorhinein definierte saisonale Zone betrachtet, in welcher über den Jahreszyklus bzw. den Messzeitraum hinweg die Untergrundtemperaturen schwanken.

5.3.1 Phasenverschiebung

Für die Auswertung der Phasenverschiebung wird in dieser Arbeit insbesondere das „Sommersignal“ und „Wintersignal“ betrachtet. Das Sommersignal stellt das warme Temperatursignal der wärmeren Jahreshälfte dar. Das Wintersignal stellt das kalte Temperatursignal der kälteren Jahreshälfte dar. Die beiden Temperatursignale pflanzen sich mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung und einer Abschwächung der Temperaturamplitude, beziehungsweise der Temperaturspannweite, mit zunehmender Zeit und Tiefe im Untergrund fort. Allgemein wird für die Untersuchung der Phasenverschiebung nur der Bereich der im Voraus definierten saisonalen Zone betrachtet.

Zur Bestimmung der Phasenverschiebung führen Koo und Song (2008, S. 257) drei Methoden auf:

- Sinuskurven-Anpassung: Die zu untersuchenden Temperaturzeitreihen in konstanten Tiefen werden mit einer Sinusfunktion modelliert. Die Phasenverschiebung wird aus der Verschiebung der angepassten Funktionen abgeleitet (Koo & Song, 2008, S. 257).
- Kreuzkorrelation: Unter Verwendung eines statistischen Verfahrens wird berechnet, bei welchem zeitlichen Versatz die Korrelation zwischen zwei Temperaturzeitreihen am höchsten ist. Dieser zeitliche Versatz stellt die Phasenverschiebung dar (Koo et al., 2003).
- Vergleich der Maxima: Für jede Tiefe wird das Auftreten der höchsten Temperatur bestimmt. Die zeitliche Differenz zwischen den Maxima beschreibt die Phasenverschiebung (Horton et al., 1983).

Für die folgende Auswertung wurde die Methode „Vergleich der Maxima“ verwendet, wobei nicht nur das Temperaturmaximum, sondern auch das Temperaturminimum betrachtet wird. Dies ermöglicht durch zusätzliche Ansatzpunkte eine detailliertere Auswertung.

Wie Tabelle 2 zeigt, wurden innerhalb der einjährigen Messreihe mehrere Temperatursignale dokumentiert. Es lassen sich eindeutig zwei Sommersignale und zwei Wintersignale unterscheiden. Für diese Temperatursignale wird im Folgenden die Phasenverschiebung in konkreten Tiefen bestimmt.

Das Sommersignal 2023 ist das zeitlich früheste Temperatursignal, das sich in den Daten deutlich abzeichnet. Da die Messreihe erst im Januar 2024 gestartet wurde, lässt sich dieses Temperatursignal innerhalb der ersten Hälfte des Messzeitraums durch die erhöhten Temperaturen in tieferen Bereichen der saisonalen Zone (ca. 7-16 m u. GOK) feststellen. Im Sommer 2023 war der Monat Juli der Monat mit den höchsten Durchschnittstemperaturen an der Messstation Darmstadt, wobei der Monatsdurchschnitt der Lufttemperatur bei 20,0 °C lag (DWD, o.D. b). Betrachtet man die Phasenverschiebung dieses Temperatursignals ab Juli 2023, dann zeigt sich bei 10 m u. GOK eine Phasenverschiebung von sechs Monaten (vgl. Tabelle 2). An der Grenze zwischen saisonaler und neutraler Zone bei 16 m u. GOK ergibt sich eine Phasenverschiebung von zehn Monaten.

Das Wintersignal 2023/2024 wurde innerhalb des Messzeitraums der Messreihe nahezu komplett aufgezeichnet. Der kälteste Monat des Winters 2023/2024 war mit einem Mittelwert von 1,85 °C der Januar 2024 (DWD, o.D. b). Zwar stellt der Januar den Monat mit den durchschnittlich kältesten Lufttemperaturen im Winter 2023/2024 dar, trotzdem wurden bei 1 m u. GOK erst im Februar die kältesten Temperaturen gemessen. Diese Entkopplung kann etwa durch Schneebedeckung der Erdoberfläche entstehen (Goodrich, 1982; Zhang, 2005). Im Januar 2024 wurde an der Messstation Frankfurt eine Monatssumme von 10 cm Schneehöhe gemessen, in Darmstadt betrug diese im selben Zeitraum 5 cm (DWD, o.D. c). Zudem wurde bei der ersten Messung am 18.01.2024 eine Schneehöhe in Erzhausen von ca. 10 cm festgestellt. Betrachtet man die Phasenverschiebung bei 10 m u. GOK, zeigt sich ein zeitlicher Versatz des Wintertemperatursignals in dieser Tiefe von sechs Monaten. An der Untergrenze der saisonalen Zone bei 16 m u. GOK zeigt sich eine Phasenverschiebung von neun Monaten (vgl. Tabelle 2 und 3).

Tabelle 3: Phasenverschiebung des Wintersignals 2023/2024

Tiefe u. GOK [m]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Monat der kältesten Temperatur je Tiefe	Februar	Februar	Februar	Februar	März	April	Mai	Mai	Juni	Juli	Juli	Juli	August	September	September	Oktober
Phasenverschiebung [Monate]	1	1	1	1	2	3	4	4	5	6	6	6	7	8	8	9

Tabellenbeschreibung: Diese Tabelle zeigt, in welchem Monat, in festgelegten Tiefen, die kältesten Temperatur gemessen wurde. Ausgehend vom kältesten Monat des Winters 2023/2024 (Lufttemperatur) wird die Phasenverschiebung des Wintersignals berechnet.

Das Sommersignal 2024 ist im Rahmen dieser Messreihe das zweite Sommersignal, das aufgezeichnet wurde. Der August war der wärmste Monat des Sommers 2024 (Messstation Darmstadt: Mittelwert 20,56 °C) (DWD, o.D. b). Am 15. August 2024 wurden bei 1 m u. GOK die wärmsten Temperaturen mit 20,04 °C gemessen. Die Temperaturmessreihe in dieser Tiefe ist somit phasengleich. Verfolgt man die höchsten Temperaturen in den jeweiligen Tiefen, zeigt sich in 10 m u. GOK eine Phasenverschiebung von 5 Monaten (vgl. Tabelle 2 und 4). Für größere Tiefen können aufgrund der Beendigung der Messreihe keine genauen Phasenverschiebungen berechnet werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass hier ähnliche Phasenverschiebungen wie beim Wintersignal 2023/2024 vorliegen (vgl. Tabelle 2 und 3).

Tabelle 4: Phasenverschiebung des Sommersignals 2024

Tiefe u. GOK [m]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Monat der wärmsten Temperatur je Tiefe	August	August	September	September	September	Oktober	November	November	Dezember	Januar
Phasenverschiebung [Monate]	0	0	1	1	1	2	3	3	4	5

Tabellenbeschreibung: Diese Tabelle zeigt, in welchem Monat, in festgelegten Tiefen, die wärmste Temperatur gemessen wurde. Ausgehend vom wärmsten Monat des Jahres 2024 (Lufttemperatur) wird die Phasenverschiebung des Sommersignals berechnet. Aufgrund der Beendigung der Messreihe ist nur eine Auswertung bis in 10 m u. GOK sinnvoll.

Zum Ende der Messreihe wurde das zweite Wintersignal, das Wintersignal 2024/2025, aufgezeichnet. Von diesem Temperatursignal wurde nur der Beginn aufgezeichnet. Es lässt sich daher nur bis in eine Tiefe von 5 m u. GOK verfolgen. Im Winter 2024/2025 war der Februar 2024 der Monat mit der geringsten Durchschnittstemperatur mit nur 2,40°C (DWD, o.D.b). Da die Messreihe jedoch Mitte Januar 2025 abgeschlossen wurde, kann für dieses Temperatursignal keine Phasenverschiebung berechnet werden (vgl. Tabelle 2).

Die Phasenverschiebung lässt sich auch anhand einer Korrelation der Lufttemperaturen und der Untergrundtemperaturen nachweisen. Vergleicht man die in Kapitel 5.1 beschriebenen Tagesmittel der Lufttemperaturen und deren 14-Tage-gleitenden Mittel, dann zeigt sich nicht nur für die oberen 2 m u. GOK eine starke, positive Korrelation. Die R-Werte zeigen erneut eine hohe, diesmal jedoch negative Korrelation bei 10 und 11 m u. GOK. Die Korrelationskoeffizienten für den Vergleich zwischen den Tagesmitteln und den Temperaturen in 10 bzw. 11 m u. GOK betragen $-0,874$ bzw. $-0,855$. Im Vergleich zwischen dem 14-Tage-gleitenden Mittel und den Untergrundtemperaturen in 10 bzw. 11 m u. GOK wurden R-Werte von $-0,892$ bzw. $-0,938$ berechnet. In diesen Tiefen wurde somit über den gesamten Messzeitraum ein starker, gegensätzlicher Zusammenhang zwischen Luft- und Untergrundtemperatur festgestellt. Dies spricht dafür, dass über den gesamten Zeitraum hinweg in dieser Tiefe im Schnitt eine Phasenverschiebung von einem halben Jahr vorliegt. Insofern bestätigt sich die zuvor bestimmte Phasenverschiebung. Nutzt man die Temperatur bei 1 m u. GOK, um die Phasenverschiebung der Temperaturen im Untergrund mit Hilfe einer Korrelation zu bestimmen, dann zeigen sich die höchsten, negativen R-Werte mit $-0,921$ und $-0,913$ bei 11 und 12 m u. GOK.

5.3.2 Dämpfung der Temperaturamplitude

Neben der Phasenverschiebung sind die Dämpfung und Abnahme der Temperaturamplitude charakteristisch für das Temperaturregime innerhalb der saisonalen Zone.

Die Temperaturamplitude wird im Folgenden nach dem Konzept von Hinkel (1997, S. 3) bestimmt. Dafür werden die über den Messzeitraum gemessenen maximalen und minimalen Temperaturen je Tiefenschritt voneinander abgezogen und damit die Amplitude der Temperaturschwankung berechnet. Betrachtet man die Dämpfung der Temperaturamplitude, zeigt sich ein deutlicher Abfall dieser mit zunehmender Betrachtungstiefe. Während bei 1 m u. GOK noch eine Temperaturamplitude von fast 15 K gemessen wurde, beträgt diese bei 5 m u. GOK nur etwa 3,5 K, bei 10 m u. GOK etwa 1 K und an der Untergrenze der saisonalen Zone bei 16 m u. GOK nur 0,1 K (vgl. Tabelle 2). In Abbildung 15 sind die jeweiligen Temperaturamplituden je Tiefenschritt in blau aufgetragen. Darüber wurde in Rot eine exponentielle Trendlinie gelegt. Es ist zu erkennen, dass die Dämpfung der Temperaturamplitude einem exponentiellen Abfall folgt.

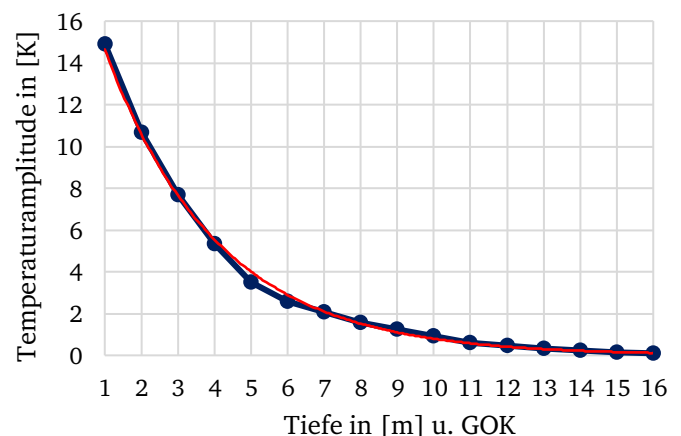


Abbildung 15: Abnahme der Temperaturamplitude in der saisonalen Zone. In Rot die exponentielle Trendlinie, eigene Darstellung

6 Diskussion und Ausblick

Die in dieser Arbeit angewandte Methodik unterliegt Limitationen, die die Aussagekraft der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse beeinflussen können. Diese betreffen sowohl die Datenquantität und -qualität als auch die methodische Vorgehensweise bei der Datenauswertung.

Die vertikalen Temperaturprofile wurden im Mittel in einem 16-Tage-Rhythmus aufgenommen. Der Messturnus konnte jedoch nicht konstant eingehalten werden und die Abstände zwischen den einzelnen Messungen variieren. Der kürzeste Abstand zwischen zwei Messungen betrug 9 Tage und der längste Abstand betrug 24 Tage. Der gemittelte Abstand zwischen allen Messungen beträgt 15,7 Tage mit einer Standardabweichung von $\pm 3,5$ Tagen. Diese Unregelmäßigkeiten führen dazu, dass die Temperaturschwankungen nicht in allen Phasen gleichmäßig erfasst wurden. Damit können einzelne Zeiträume unter- bzw. überrepräsentiert werden.

Die Datenqualität stellt einen zentralen Aspekt in der Datenerhebung und -auswertung dar. Sie hängt maßgeblich von dem verwendeten Datenlogger und der Geschwindigkeit der Messfahrt ab. Der verwendete Datenlogger wurde vor Beginn der Messreihe durch den Hersteller kalibriert und zeigte während der Messreihe keine auffälligen Abweichungen. Sowohl die Messwertgenauigkeit als auch die Messwertauflösung des Datenloggers liegen für die hier vorgestellte Untersuchung des Untergrundes in einem geeigneten Größenbereich. Eine höhere Messwertgenauigkeit würde die Vergleichbarkeit der Messungen innerhalb einer Messreihe belastbarer machen. Die Geschwindigkeit, mit der der Datenlogger manuell über eine Handkurbel in die Erdwärmesonde hinabgelassen wurde, unterlag jedoch geringen Schwankungen. Eine zu hohe Geschwindigkeit in der Messfahrt führt dazu, dass Temperaturänderungen nicht früh genug und nicht auf den exakten Tiefenlagen erkannt werden. Dies führt zu einer schlechteren Datengenauigkeit. Der dokumentierte Temperatursprung bei 10 m u. GOK zeigt, dass die Messgeschwindigkeit zu hoch bzw. zu unregelmäßig war. Aufgrund des Temperatursprungs kann davon ausgegangen werden, dass mindestens die in den obersten 10 m gemessenen Untergrundtemperaturen systematisch bis zu 0,1 K zu hoch sind.

Zur Verbesserung von Datenqualität und -quantität bieten sich eine Teil- oder Vollautomatisierung des Messbetriebs an. Ein automatisiertes Hinablassen des Datenloggers über ein motorisiertes Gewinde bietet eine Möglichkeit, um die Datenqualität und -genauigkeit zu verbessern. Dadurch kann die Messgeschwindigkeit konstant auf einem geeigneten Niveau gehalten werden. Ein vollständig automatisierter Messbetrieb, beispielsweise auf Basis einer faseroptischen Temperaturmessung, im Rahmen einer festen Messstation, würde darüber hinaus eine kontinuierliche und lückenlose Datenerfassung ermöglichen. Hierbei kann zum einen das vorgegebene Messintervall vollständig eingehalten werden und der Messturnus gegebenenfalls verkürzt werden.

Bezüglich der Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs zwischen bodennaher Lufttemperatur und Untergrundtemperatur (Kapitel 5.1) stellt die Verfügbarkeit geeigneter Lufttemperaturdaten eine Beschränkung dar. Die meteorologische Messstation, welche für den Vergleich genutzt wurde, liegt 8,3 km entfernt von der EWS in Erzhausen. Die Entfernung führt zu Unsicherheiten in der Auswertung. Für belastbarere Ergebnisse ist eine meteorologische Messstation in der unmittelbaren Umgebung des zu untersuchenden Untergrundes notwendig. Zudem stellt die Art der Lufttemperaturdaten eine weitere Limitation dar. Die für die Korrelation verwendeten Tagesmittelwerte der Lufttemperatur wurde in einer Höhe von 2 m ü. GOK gemessen. Vergleichswerte aus einer bodennahen Messstation, die bei 5 cm ü. GOK

die aktuelle Lufttemperatur misst, ist für die Schnittstelle Atmosphäre/Pedosphäre repräsentativer. Jedoch wird dieser Messwert nicht an der nächstgelegenen Messstelle in Darmstadt erhoben. Trotz der hier genannten Einschränkungen ist davon auszugehen, dass die erarbeiteten Ergebnisse der Korrelation in ihrer Größenordnung plausibel und korrekt sind.

Die Abgrenzung der in Kapitel 5.2 untersuchten saisonalen Zone, neutralen Zone und Zonen des geothermischen Gradienten wird durch eine zum Teil nicht einheitliche Definitionslage der einzelnen thermischen Zonen und deren Grenzen erschwert. Die Grenze zwischen saisonaler und neutraler Zone wird in der VDI 4640-1:2010-6 eindeutig definiert. Allerdings wurde diese Definition in der aktuellen Version der VDI 4640-1:2021-12 nicht erneut aufgeführt, womit sich diese Arbeit auf eine veraltete Richtlinie stützt. Die Mehrheit der Veröffentlichungen nutzt jedoch weiterhin diese Definition der Grenze. Für die Grenze zwischen neutraler und geothermischer Zone existieren jedoch hingegen verschiedene Ansätze und keine einheitliche Definitionslage. Zusätzlich wird dies durch die ohnehin geringe Anzahl an Arbeiten erschwert, die diese Grenze anhand einer Temperaturmessreihe herausgearbeitet haben. Die Grenze zwischen neutraler und geothermischer Zone wird meist anhand der dauerhaften Inversion des Temperaturgradienten gezogen oder durch das Erreichen des Richtwertes des regionaltypischen geothermischen Gradienten. Ersteres Kriterium wurde für die hier vorgestellte Grenzziehung zwischen neutraler und geothermischer Zone verwendet. Einheitliche Definitionen der Zonen und deren Grenzen würde dazu beitragen, die Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus verschiedenen Arbeiten zu verbessern.

Die Untersuchung und der Vergleich zwischen der Temperatur an der Untergrenze der saisonalen Zone mit langjährigen Lufttemperaturmitteln von nahegelegenen meteorologischen Messstationen (Kapitel 5.2.2) weist gewissen Unsicherheiten auf, ist jedoch grundsätzlich methodisch geeignet, um den Zusammenhang zu beurteilen. Die Unsicherheiten sind im Wesentlichen auf die Entfernung der meteorologischen Messstationen zurückzuführen (8,3 km für Darmstadt und 12,2 km für Frankfurt), die aus nicht übereinstimmenden Standortfaktoren zum Standort Erzhausen resultieren. Trotz dieser Einschränkung liegen die berechneten Werte in einer plausiblen Größenordnung und bestätigen den erwarteten Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Temperatur an der Untergrenze der saisonalen Zone. Ein Vergleich mit Lufttemperaturdaten von einer Messstelle aus der unmittelbaren Umgebung trägt jedoch dazu bei, die Belastbarkeit der Ergebnisse zu verbessern und den Zeitraum näher einzuschränken, der repräsentativ für die Temperatur an der Untergrenze der saisonalen Zone ist.

Innerhalb der Auswertung der Phasenverschiebung (Kapitel 5.3) stellte die Dauer des Messzeitraums eine Einschränkung dar. Der Messzeitraum umfasst mit einem Jahr und elf Tagen zwar mehr als ein Jahr, jedoch wurde kein vollständiges Temperatursignal (von Beginn des Temperatureintrags bis Ende des Temperatursignals durch vollständige Dämpfung) aufgenommen (vgl. Abbildung 14 und Tabelle 2). Sowohl das Wintersignal 2023/2024 als auch das Sommersignal 2024 wurden nur teilweise dokumentiert. Für eine aussagekräftigere Auswertung der Phasenverschiebung mithilfe der Methode des Maxima- und Minima-Vergleichs ist es somit notwendig, vor Beginn der halbjährigen Signale zu starten oder mindestens einen Messzeitraum von 1,5 Jahren festzulegen.

Neben den methodischen und datenbezogenen Limitationen lassen sich aus den Ergebnissen der Messreihe auch Ansatzpunkte für weiterführende Fragestellungen und Untersuchungen ableiten. Ein Themenfeld, das in der vorliegenden Arbeit nicht näher betrachtet wurde, betrifft den Einfluss des Klimawandels auf das Temperaturregime des Untergrundes. Speziell Langzeitbeobachtungen vertikaler

Temperaturprofile stellen ein Werkzeug dar, um den Effekt der fortschreitenden Klimaerwärmung im Untergrund zu dokumentieren.

Die hier vorgestellte Messreihe liefert einen Beitrag für die langjährige Untersuchung des Temperaturregimes des Untergrundes in der Region um Erzhausen. Der Messbetrieb begann ab Abteufung der Bohrung im Jahr 2019 in unregelmäßigen Abständen, wurde mit Beginn der hier vorgestellten Messreihe sehr regelmäßig und wird seit Beendigung der Messreihe im durchschnittlichen achtwöchigen Rhythmus vom HLNUG weitergeführt. Die Fortführung dieser Langezeitmessreihe an der Erdwärmesonde stellt somit eine Möglichkeit dar, um die Auswirkungen der Klimaveränderungen auf den Untergrund und das Grundwasser in der Region zu dokumentieren. Es wird daher empfohlen, die Erdwärmesonde „Erzhausen-Süd“ dauerhaft als Messstelle zu erhalten, um weiterführende Messreihen durchzuführen und belastbare Datensätze zur Dynamik des Temperaturregimes und zur Untersuchung des Einflusses des Klimawandels aufzubauen.

Hinweise für einen Einfluss des Klimawandels auf den Untergrund geben bereits Temperaturdaten, welche ab 2020 aufgenommen wurden und für diese Auswertung vom HLNUG bereitgestellt wurden. Der Vergleich der Temperaturdaten zeigt einen eindeutigen Trend zu steigenden Untergrundtemperaturen in gleichbleibenden Betrachtungstiefen (vgl. Tabelle 5). Dabei ist vor allem die Betrachtung unterhalb der festgestellten saisonalen Zone, unter 16 m u. GOK, geeignet. Zwischen 17 und 33 m u. GOK beträgt der Anstieg der Untergrundtemperaturen innerhalb des durch die fünf Messungen abgedeckten Zeitraum von 4,5 Jahren durchgehend über 0,1 K, wobei ein stetiger Anstieg mit zunehmender Zeit beobachtbar ist (vgl. Tabelle 5).

Dieser Einfluss des Klimawandels auf den Untergrund wurde in der vorliegenden Arbeit nicht tiefergehend untersucht, da die Datenlage für eine ausführliche Analyse zu gering ist und der Umfang dieser Untersuchung den Rahmen der vorliegenden Arbeit überschreitet. Jedoch ist eine weitere Untersuchung dieses Themenfeldes für die Forschung relevant. Zu beachten ist, dass ein valider

Tabelle 5: Vergleich der Untergrundtemperaturen zwischen Juli 2020 und Januar 2025

Tiefe	17.07. 2020	28.07. 2021	18.01. 2024	17.07. 2024	29.01. 2025	Spann- weite
17	11,55	11,64	11,66	11,71	11,72	0,17
18	11,54	11,63	11,62	11,69	11,69	0,15
19	11,52	11,61	11,60	11,66	11,67	0,15
20	11,51	11,60	11,58	11,64	11,66	0,15
21	11,50	11,58	11,58	11,62	11,65	0,15
22	11,50	11,57	11,58	11,62	11,64	0,14
23	11,50	11,56	11,58	11,60	11,63	0,13
24	11,50	11,55	11,58	11,60	11,63	0,13
25	11,50	11,54	11,58	11,60	11,63	0,13
26	11,50	11,54	11,59	11,60	11,63	0,13
27	11,51	11,54	11,59	11,60	11,63	0,12
28	11,51	11,54	11,59	11,60	11,63	0,12
29	11,52	11,54	11,60	11,60	11,63	0,11
30	11,53	11,55	11,60	11,61	11,64	0,11
31	11,54	11,56	11,61	11,62	11,64	0,10
32	11,54	11,56	11,62	11,62	11,65	0,11
33	11,55	11,57	11,62	11,63	11,66	0,11
34	11,57	11,58	11,63	11,64	11,66	0,09
35	11,58	11,59	11,64	11,65	11,67	0,09
36	11,59	11,60	11,65	11,66	11,69	0,10
37	11,61	11,62	11,66	11,67	11,69	0,08
38	11,63	11,63	11,68	11,69	11,70	0,07
39	11,64	11,65	11,69	11,70	11,72	0,08
40	11,66	11,67	11,70	11,72	11,74	0,08
41	11,69	11,69	11,72	11,74	11,75	0,06
42	11,71	11,70	11,74	11,75	11,77	0,07
43	11,73	11,73	11,75	11,78	11,80	0,07
44	11,76	11,75	11,77	11,80	11,81	0,06
45	11,78	11,77	11,80	11,82	11,83	0,06
46	11,80	11,80	11,82	11,84	11,86	0,06
47	11,83	11,82	11,84	11,87	11,88	0,06
48	11,85	11,85	11,86	11,89	11,90	0,05
49	11,87	11,88	11,89	11,91	11,93	0,06

Tabellenbeschreibung: Diese Tabelle stellt den Temperaturanstieg im Untergrund aufgrund des Klimawandels dar. Die farbliche Formatierung vergleicht nur Temperaturen innerhalb einer Tiefenstufe. Tiefe in m u. GOK, Temperatur in °C und Spannweite in K

Temperaturvergleich die regelmäßige Kalibrierung des Datenloggers durch den Hersteller erfordert, die laut Mitteilung des HLNUG stattgefunden hat. Zudem ist der festgestellte Temperaturanstieg geringer als die Messwertgenauigkeit der Datenlogger von 0,2 K. Trotz dessen kann aufgrund des eindeutigen Trends des kontinuierlichen Temperaturanstiegs von einer Erwärmung des Untergrundes unterhalb der saisonalen Zone ausgegangen werden.

7 Fazit

In dieser Arbeit wurde die Entwicklung vertikaler Temperaturprofile im Untergrund durch jahreszeitliche Änderungen der bodennahen Lufttemperaturen am Standort Erzhausen untersucht. Dafür wurde eine einjährige, hochaufgelöste Messreihe durchgeführt, deren quantitative Datenauswertung die Grundlage dieser Arbeit bildet. Die erhobenen Temperaturdaten stellen einen für die Region Erzhausen bislang einzigartigen Datensatz dar, der eine detaillierte Analyse der vertikalen Temperaturverteilung des Untergrundes ermöglicht. Die Untergrundtemperaturdaten, welche einen vollständigen Jahresgang abbilden, wurden hinsichtlich der drei thermischen Zonen im Untergrund ausgewertet und in Zusammenhang mit Lufttemperaturen nahegelegener meteorologischer Messstationen gebracht.

Dies führt zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage (*Wie hängt der Jahresgang der Untergrundtemperaturen quantitativ vom Jahresgang der bodennahen Lufttemperaturen ab?*). Die Jahresgänge der Untergrundtemperaturen bei 1 und 2 m u. GOK zeigen eine hohe Korrelation mit dem Jahresgang der Lufttemperaturen. Dabei wurde der höchste R-Wert von 0,898 für die Korrelation zwischen dem gleitenden 14-Tage-Mittel der Lufttemperatur und den Untergrundtemperaturen bei 1 m u. GOK festgestellt. Diese hohe Korrelation bestätigt das zu erwartende Ergebnis, da sowohl die bodennahen Lufttemperaturen als auch die Untergrundtemperaturen im oberflächennahen Bereich dem zentralen Einfluss der solaren Strahlung unterliegen.

Hinsichtlich der zweiten Forschungsfrage (*In welchen Tiefen lassen sich die thermischen Zonen – die saisonale Zone, die neutrale Zone und die Zone des geothermischen Gradienten – anhand der einjährigen Messreihe identifizieren und abgrenzen?*) wurden die jeweilige Tiefe und Mächtigkeit der drei thermischen Zonen bestimmt. Die saisonale Zone reicht ab Geländeoberkante bis in eine Tiefe von 16 m u. GOK. Hier dient der Jahresgang der Untergrundtemperaturen als identifizierendes Charakteristikum. Unterhalb beginnt die neutrale Zone, die bis in eine Tiefe von 33 m u. GOK reicht und eine Mächtigkeit von 17 m hat. In dieser Zone ist kein Jahresgang nachweisbar und die Untergrundtemperaturen schwanken über den Messzeitraum hinweg weniger als 0,1 K. Darunter folgt die Zone, die maßgeblich dem Einfluss des geothermischen Gradienten unterliegt. Hier wurde ausschließlich ein negativer, zur Erdoberfläche gerichteter Temperaturgradient von -1 bis -3 K/100 m festgestellt.

Die dritte Forschungsfrage (*Wie pflanzen sich quantitativ die jahreszeitlichen Schwankungen der bodennahen Lufttemperaturen mit zunehmender Zeit und Tiefe im Untergrund fort? Welche Verzögerungen des Temperatursignals (Phasenverschiebung) und Dämpfungen der Temperaturamplitude lassen sich anhand des Sommer- und Wintersignals feststellen?*) betrifft die Temperaturschwankungen innerhalb der saisonalen Zone. Hinsichtlich der Phasenverschiebung wurde das Prinzip des Temperaturmaxima-Vergleichs verwendet. Dabei wurde in einer Tiefe von 10 m u. GOK eine Phasenverschiebung von 6 Monaten festgestellt und mittels Korrelation validiert. An der Untergrenze der saisonalen Zone (16 m u. GOK) wurde eine maximale Phasenverschiebung von 9 Monaten festgestellt. Die Dämpfung der Temperaturamplitude folgt innerhalb des Jahresgangs einem exponentiellen Abfall.

Der gewonnene Datensatz und die daraus resultierenden Ergebnisse tragen zum Verständnis des regionalen Temperaturregimes des Untergrundes bei. Gleichzeitig unterstreichen sie die Bedeutung von langfristigen Temperaturmessungen zur systematischen Erfassung von klimabedingten Veränderungen im Untergrund. Die hier ausgewerteten Daten bieten bereits erste Anhaltspunkte für steigende Untergrundtemperaturen, die auf einen Einfluss des Klimawandels hinweisen.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Situation untersuchten EWS mit Doppel-U. Sondenschenkel mit gelber Verschlusskappe wurde für die Wiederholungsmessung genutzt, eigene Aufnahme	10
Abbildung 2: Übersichtskarte im Maßstab 1:250 000 mit den Standorten der meteorologischen Messstationen Frankfurt-Flughafen und Darmstadt in Schwarz. Kartengrundlage ESRI OpenStreetMap. Detailkarte von Erzhausen im Maßstab 1:40 000 mit Standort der Erdwärmesonde in Blau. Kartengrundlage ESRI World Imagery.	11
Abbildung 3: Blick nach Westen auf die EWS und die Freifläche des Neubaugebietes "Die vier Morgen", eigene Aufnahme	12
Abbildung 4: Geologisches Schichtprofil der EWS „Erzhausen Süd“ (HLNUG, 2020, S. 13f)	13
Abbildung 5: Abklingkurven nach 1h/2h/3h nach durchgeführtem Thermal-Response-Test (verändert nach HLNUG, 2020, S. 49). In Blau Bereiche mit erhöhten Wärmeleitfähigkeiten	14
Abbildung 6: Verwendete Messausrüstung mit Dreibein, Temperaturlichtlot und darunter befestigtem Datenlogger. Dargestellt mit Modell-EWS, eigene Aufnahme	15
Abbildung 7: 25 Vertikale Temperaturprofile (Rohdaten) im Untergrund von Erzhausen zwischen Januar 2024 und Januar 2025, eigene Darstellung	21
Abbildung 8: Jahresgänge der Untergrundtemperaturen in Erzhausen in 1 und 2 m u. GOK und Jahresgänge der Lufttemperaturen mit Tagesmitteln und 14-Tage-gleitendem Durchschnitt in Darmstadt zwischen Januar 2024 und Januar 2025, eigene Darstellung	22
Abbildung 9: Vertikale Gliederung der Temperaturzonen im Untergrund (verändert nach Kürten, 2015, S. 79). Tiefenlage der Grenzen nur beispielhaft	24
Abbildung 10: Vertikale Temperaturprofile (gekürzter Datensatz, n=25) im Untergrund von Erzhausen zwischen Januar 2024 und Januar 2025 mit saisonaler Zone, eigene Darstellung	25
Abbildung 11: Zeitliche Entwicklung des Temperaturgradienten in Erzhausen zwischen Januar 2024 und Januar 2025 unterhalb der saisonalen Zone mit definierter neutraler Zone, eigene Darstellung	28
Abbildung 12: Vertikale Temperaturprofile (bereinigte Daten, n=25) im Untergrund von Erzhausen zwischen Januar 2024 und Januar 2025 mit definierter saisonaler, neutraler und geothermischer Zone, eigene Darstellung	29
Abbildung 13: Jahresgänge der Untergrundtemperaturen in Erzhausen in verschiedenen Tiefen zwischen Januar 2024 und Januar 2025, eigene Darstellung	32
Abbildung 14: Thermoisoplethen-Diagramm der Untergrundtemperaturen in Erzhausen zwischen Januar 2024 und Januar 2025, eigene Darstellung	33
Abbildung 15: Abnahme der Temperaturamplitude in der saisonalen Zone. In Rot die exponentielle Trendlinie, eigene Darstellung	36

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Temperatur an der Untergrenze der saisonalen Zone mit langjährigen Mitteln der Lufttemperatur an den Standorten Darmstadt und Frankfurt (DWD, o.D. b)	27
Tabelle 2: Übersicht der Temperaturdaten der Messreihe bis zur Untergrenze der saisonalen Zone	31
Tabelle 3: Phasenverschiebung des Wintersignals 2023/2024	35
Tabelle 4: Phasenverschiebung des Sommersignals 2024	35
Tabelle 5: Vergleich der Untergrundtemperaturen zwischen Juli 2020 und Januar 2025	39

10 Abkürzungsverzeichnis

EWS	Erdwärmesonde
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
u. GOK	unter Geländeoberkante
ü. GOK	über Geländeoberkante
ü. NHN	über Normalhöhennull

11 Literaturverzeichnis

Beltrami, H., Ferguson, G. & Harris, R. N. (2005). Long-term tracking of climate change by underground temperatures. *Geophysical Research Letters*, 32(19).
<https://doi.org/10.1029/2005gl023714>

Bense, V. F., Kurylyk, B. L., van Daal, J., van der Plog, M. J., & Carey, S. K. (2017). Interpreting repeated temperature-depth profiles for groundwater flow. *Water Resources Research*, 53(10), 8639–8647. <https://doi.org/10.1002/2017WR021496>

Benz, S.A., Irvine, D.J., Rau, G.C., Bayer, P., Menberg, K., Blum, P., Jamieson, R. C., Griebler, C. & Kurylyk, B.L. (2024). Global groundwater warming due to climate change. *Nature Geoscience*. 17(6), 545–551. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01453-x>

Böhme, M. & Böttcher, F. (2011). Bodentemperaturen im Klimawandel Auswertungen der Messreihe der Säkularstation Potsdam. In *Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), Klimastatusbericht 2011*, 85–90. Deutscher Wetterdienst.

Brinkmann, B. (2012). Internationales Wörterbuch der Metrologie: Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) Deutsch-englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007. Beuth Verlag GmbH.

Bundesverband Geothermie. (o. D.). Lexikon der Geothermie - Temperaturgradient. Bundesverband Geothermie. <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/t/temperaturgradient>, letzter Abruf am 27. August 2025

Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of Heat in Solids* (2. Auflage). Oxford: Clarendon Press.

Cui, W., Liao, Q., Chang, G., Chen, G., Peng, Q. & Jen, T. (2011). Measurement and Prediction of Undisturbed Underground Temperature Distribution. Volume 4: Energy Systems Analysis, Thermodynamics and Sustainability; Combustion Science and Engineering; Nanoengineering For Energy, Parts A And B. <https://doi.org/10.1115/imece2011-63311>

Deutscher Wetterdienst (o. D. c). Monatssumme der Stationsmessungen der Schneehöhe in cm. Climate Data Center. https://dwd-geoportal.de/products/OBS_DEU_P1M_SH_S/, letzter Abruf am 24. August 2025

Deutscher Wetterdienst (o.D. a). Wetter- und Klimalexikon – Isoplethen. Deutscher Wetterdienst. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101224&lv3=101302>, letzter Abruf am 20. August 2025

Deutscher Wetterdienst (o.D. b). Tägliche Stationsmessungen der mittleren Lufttemperatur in 2 m Höhe in °C für Deutschland, Version v21.3. Climate Data Center. <https://cdc.dwd.de/portal/202209231028/mapview>, letzter Abruf am 9. April 2025

DIN 1319-1:1995-01. Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe

Driesen + Kern GmbH (o.D.). MikroLog2 Miniaturised Logger for 1" Pipes. <https://www.driesen-kern.com/products/water-analysis/water-level/miniaturised-water-level-logger-mikrolog2.php>, letzter Abruf am 10. Juni 2025.

Florides, G. & Kalogirou, S. (2004). Measurements of Ground Temperature at Various Depths, In 3rd International Conference on Sustainable Energy Technologies, Nottingham, UK.

Florides, G. & Kalogirou, S. (2005). Annual ground temperature measurements at various depths, In CLIMA 2005, Lausanne, Schweiz.

Geiger, R. (1961). Das Klima der bodennahen Luftschicht. Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie (4. Auflage). Vieweg.

González-Rouco, F., Von Storch, H. & Zorita, E. (2003). Deep soil temperature as proxy for surface air-temperature in a coupled model simulation of the last thousand years. Geophysical Research Letters, 30(21). <https://doi.org/10.1029/2003gl018264>

Goodrich, L. E. (1982). The influence of snow cover on the ground thermal regime. Canadian Geotechnical Journal, 19(4), 421–432. <https://doi.org/10.1139/t82-047>

Harten, U. (2024). Physik: Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Springer eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-68484-9>

Hemmerle, H. & Bayer, P. (2020). Climate change yields groundwater warming in Bavaria, Germany. Frontiers in Earth Science, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.575894>

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2020). Steckbrief Oberflächennahe Geothermie (EWS) – Kurzfassung – Geltungsbereich: Baugebiet „Die vier Morgen“, Erzhausen.

Hinkel, K. M. (1997). Estimating seasonal values of thermal diffusivity in thawed and frozen soils using temperature time series. Cold Regions Science and Technology, 26(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(97\)00004-9](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(97)00004-9)

Horton, R., Wierenga, P.J., & Nielson, D.R. (1983). Evaluation of methods for determining apparent thermal diffusivity of soil near the surface. Soil Science Society of America Journal, 47(1), 25–32. <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700010005x>

Huang, S., H. N. Pollack, & P. Y. Shen (2000). Temperature trends over the last five centuries reconstructed from borehole temperatures, Nature, 403, 756–758. <https://doi.org/10.1038/35001556>

Kaltschmitt, M., Huenges, E. & Wolff, H. (Hrsg.) (1999). Energie aus Erdwärme: Geologie, Technik und Energiewirtschaft. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.

Kasuda, T., & Archenbach, P.R. (1965). Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States, ASHRAE Transactions, Vol. 71, Part 1. <https://doi.org/10.6028/nbs.rpt.8972>

-
- Klonowski, M.R. & Żeruń, M. (2024).** Shallow subsurface temperature at the selected locations in Poland. In 49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford
- Koo, M. & Song, Y. (2008).** Estimating apparent thermal diffusivity using temperature time series: A comparison of temperature data measured in KMA boreholes and NGMN wells. *Geosciences Journal*, 12(3), 255–264. <https://doi.org/10.1007/s12303-008-0026-5>
- Koo, M., Kim, Y., Suh, M.C., & Suh, M.S., (2003).** Estimating thermal diffusivity of soils in Korea using temperature time series data. *Journal of the Geological Society of Korea*, 39, 301–317 (in Korean with English abstract).
- Kürten, S. (2015).** Zur thermischen Nutzung des Untergrunds mit flächigen thermo-aktiven Bauteilen. Dissertation Ingenieurwissenschaften. Technische Hochschule Aachen, Aachen.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (1987).** Grundwasser-Richtlinien Teil II: Beobachtung und Auswertung – Grundwassertemperatur.
- Lehmann, A. & Kalb, M. (1993).** 100 Jahre meteorologische Beobachtungen an der Säkularstation Potsdam 1893 - 1992. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.
- Müttrich, A. (1880).** Beobachtungen der Erdbodentemperatur auf den forstlich-meteorologischen Stationen in Preussen, Braunschweig und Elsass-Lothringen. Festschrift für die fünfzigjährigen Jubelfeier der Forstakademie Eberswalde, 146–178. Springer-Verlag.
- Schoklitsch, A. (1930).** Der Gang der Temperatur an der Erdoberfläche. In: *Der Wasserbau*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-42994-5_1
- Schubert, J. (1888).** Monats- und Jahresmittel der Bodentemperatur auf dem Felde und im Kieferwalde. In *Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen* Zugleich Organ für Forstliche Versuchswesen, 18-64.
- Schubert, J. (1900).** Der jährliche Gang der Luft- und Bodentemperatur im Freien und in Waldungen und der Wärmeaustausch im Erdboden. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-39608-7>
- Smerdon, J. E., Pollack, H. N., Cermak, V., Enz, J. W., Kresl, M., Safanda, J. & Wehmiller, J. F. (2006).** Daily, seasonal, and annual relationships between air and subsurface temperatures. *Journal Of Geophysical Research Atmospheres*, 111(D7). <https://doi.org/10.1029/2004jd005578>
- Stober, I. & Bucher, K. (2025).** Geothermie. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-70283-3>
- Tipler, P. A. & Mosca, G. (2024).** Tipler Physik. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-67936-4>
- Tremmel, J. (1984).** Zum Temperaturgang des Bodens bis 15 m Tiefe unter mitteleuropäischen Verhältnissen. In *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften*, 9. 117–130.

VDI 4640 Blatt 1:2010-06. Thermische Nutzung des Untergrunds – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. Beuth Verlag

Williams G. P. & Gold L.W. (1976). Ground temperatures. National Research Council of Canada. Division of Building Research. <https://doi.org/10.4224/40000712>

Zhang, T. (2005). Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview. Reviews Of Geophysics, 43(4). <https://doi.org/10.1029/2004rg000157>

12 Anhang

Siehe separate Abgabe.