https://doi.org/10.5281/zenodo.18301412

Beitrag “Der Geothermiekongress DGK 2025”, 18.-20. November 2025

Simulative Untersuchung äußerer Einflussgrößen auf oberflächennaheste Geothermiesysteme mit Vergleich zur VDI 4640-2

Selina Schmitt, Björn Ohlsen, Volker Stockinger
Energie PLUS Concept GmbH, Deutschland, E-Mail: s.schmitt@energie-plus-concept.de

Keywords: Oberflächennaheste Geothermie, hygrothermische Erdreichsimulation

Abstract

Ein oberflächennahestes Geothermiesystem wird aufgrund der ungedämmten Rohrleitungen und der Verlegung in 1 m bis 2 m Tiefe durch verschiedenste klimatische und hydrogeologische Rahmenbedingungen beeinflusst. Durch eine hygrothermische Simulationsanalyse konnten diese Einflussgrößen kategorisiert und bewertet werden. Dabei ist neben den klimatischen Rahmenbedingungen die Datengrundlage, wie die Einschätzung des Wasserhaltevermögens des Erdreichs und deren Wärmeleitfähigkeit sowie die Bodendichte, elementar. Dies führt zu teilweise signifikanten Änderungen des spezifischen Energieentzugs eines oberflächennahesten Geothermiesystems.
Es wurde eine Parameterstudie zur Einschätzung der Einflussgrößen durchgeführt und die wichtigsten Einflussfaktoren ermittelt und bewertet. Die Ergebnisse der Einflussgrößen auf oberflächennaheste Geothermiesysteme führen zur verbesserten Einschätzung des Energieentzugs unter bestimmten klimatischen und bodenbedingten Randbedingungen.
Die Simulationsergebnisse zeigen teils deutliche Unterschiede zu den bisher in der Fachwelt bekannten Werten der VDI 4640-2 und könnten als Basis für weitere Untersuchungen dienen.

1. Einleitung

Die oberflächennaheste Geothermie gewinnt im Rahmen der Wärmewende zunehmend an Bedeutung. Aufgrund ihrer geringen Verlegetiefen von 1 bis 2 m interagieren diese Systeme stark mit klimatischen und bodenphysikalischen Randbedingungen. Faktoren wie Bodenart, Feuchte, Dichte, Wasserhaltevermögen und die klimatische Strahlungsbilanz beeinflussen den Energieentzug wesentlich und führen zu Unsicherheiten in der Auslegung. Die in Normen wie der VDI 4640 Blatt 2 enthaltenen Leistungswerte basieren jedoch auf vereinfachten Annahmen und bilden die tatsächliche Bandbreite dieser Einflussgrößen nur eingeschränkt ab.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die wichtigsten Einflussfaktoren durch hygrothermische Simulationen systematisch zu untersuchen und deren Wirkung auf oberflächennaheste Geothermiesysteme einzuordnen. Die Ergebnisse ermöglichen eine verbesserte Bewertung des Energieentzugs unter verschiedenen klimatischen und bodenbezogenen Bedingungen und können als Grundlage für realitätsnähere Richtwerte dienen.

2. Geothermiesysteme

Es werden drei Hauptarten von Geothermiesystemen, wie in Abb. 1 dargestellt, unterschieden: tiefe Geothermie, oberflächennahe Geothermie und oberflächennaheste Geothermie, Zeh et al. (2023).

2.1 Hauptarten Geothermiesysteme

Tiefe Geothermie nutzt die Wärmeenergie in mehreren Kilometern Tiefe. Dabei werden Bohrungen vorgenommen, durch die Wasser zirkuliert: In geschlossenen Systemen bleibt es im Kreislauf, in offenen Systemen wird natürliches Thermalwasser gefördert, an der Oberfläche zur

Wärmeerzeugung genutzt und anschließend wieder in den Untergrund zurückgeleitet. Aufgrund der großen Tiefe sind jahreszeitliche Witterungseinflüsse in den obersten Bodenschichten ohne Bedeutung, wodurch konstante Temperaturen weit über 20 °C erreicht werden, R. Bracke et al. (2022). Die Nutzung erfordert jedoch hohe Investitionskosten für Erkundung, Entwicklung und Genehmigung der tiefen Anlagen.

Oberflächennahe Geothermie erschließt die Wärme in Tiefen bis zu rund 400 m. Sonden werden in das Erdreich eingebracht und entziehen dem Erdreich Wärme, die an eine Wärmepumpe übertragen wird. Diese hebt das Temperaturniveau auf das zur Heizung erforderliche Maß an. Die im Erdreich erreichbare Temperatur liegt zwischen 10 und 20 °C, Zeh et al. (2023), Bracke et al. (2022). Sondensysteme sind kostengünstiger als Tiefengeothermieanlagen und eignen sich durch den geringen Platzbedarf an der Oberfläche besonders für urbane Gebiete.

Oberflächennaheste Geothermie nutzt die Energie bis in 10 m Tiefe durch horizontal oder vertikal verlegte Erdwärmekollektoren (EWK). In den mit Wasser oder einem frostbeständigen Wärmeträgermedium gefüllten Rohrleitungen wird Wärme aus dem Boden aufgenommen und über Wärmepumpen (WP) an das Heizsystem abgegeben. Das Temperaturniveau beträgt bei der Nutzung von Frostschutzflüssigkeiten im Bereich etwa 0 °C bis 20 °C, Energie PLUS Concept GmbH (EPC) (2023). Diese Technologie zeichnet sich durch die zusätzliche Nutzung der latenten Wärme sowie der solaren Regeneration des Kollektorsystems aus.

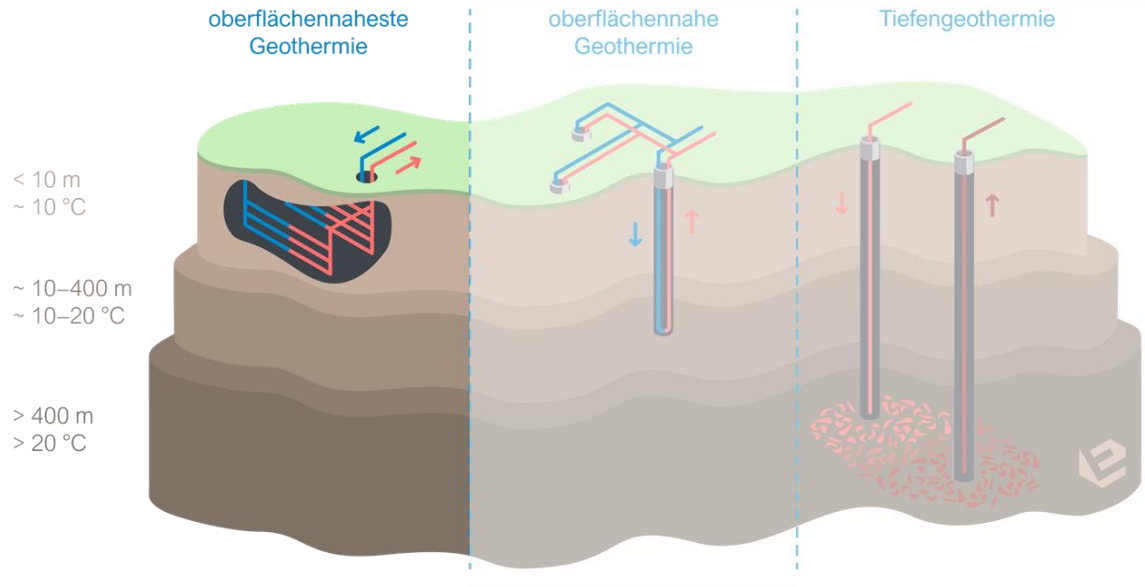


Abb. 1 Klassifizierung der oberflächennahesten, oberflächennahen und der Tiefengeothermie

Insgesamt unterscheiden sich die drei Geothermiesysteme hinsichtlich Investitionsaufwand, Einsatzgebiet und Temperaturniveau. Während Tiefengeothermie primär für größere Energieversorgungen von Städten oder Industrieanlagen geeignet ist, kommen oberflächennahe und oberflächennaheste Systeme vorwiegend vom Einzelgebäude bis zu Siedlungen und Quartieren zum Einsatz.

2.2 Arten von oberflächennahester Geothermie

Zu den gängigsten Bauformen von EWK zählen der Grabenkollektor (Spiralkollektor), der Erdwärmekorb, der Erdwärmeabsorber sowie der Flächenkollektor. Alle Systeme bestehen aus

Kunststoffrohren, vorzugsweise aus PE 100 RC oder PEX und sind meist mit einem frostbeständigen Wärmeträgermedium gefüllt.

Der Flächenkollektor stellt die klassische Form des EWK dar. Er wird ähnlich einer Fußbodenheizung schneckenförmig oder mäanderförmig verlegt. Neben den Standardausführungen existieren modulare Systeme, die eine schnellere Installation erlauben. Zu den Flächenkollektoren zählen auch der Agrothermiekollektor, der durch Einpflügen der Leitungen ins Erdreich eingebracht wird, sowie Kapillarrohrmatten, die aus feinen Kunststoffrohren bestehen und auch als Heiz-/Kühlelemente in Gebäuden Verwendung finden.

3. Einflussgrößen auf das oberflächennaheste Erdreich

Einfluss auf das oberflächennaheste Erdreich und somit den Wärmeentzug eines EWK haben sowohl die klimatischen Bedingungen als auch die Eigenschaften des Erdreichs.

3.1 Klimazone

Die DIN V 18599 Beiblatt 10 beinhaltet die Einteilung der Klimazonen (KLZ), welche in der weiteren Arbeit verwendet werden, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (2018). Die meteorologischen Daten beruhen auf den Datensätzen des Testreferenzjahres (TRJ) des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Die Klimadaten des TRJ wurden für die 15 KLZ nach Schmitt (2023) bewertet. Diese Daten beruhen auf den gewählten 1 km² des jeweiligen Referenzortes. Eine Abweichung zu den ursprünglichen Klimadaten der 15 KLZ ist daher nicht auszuschließen.

Die KLZ 4 (Potsdam) wird nach der DIN V 18599-10 als repräsentative KLZ (Referenzzone) für Deutschland benannt, DIN (2018). Wohingegen die KLZ 9 (Chemnitz) dem Median $\tilde{x}$ aller KLZ besser entsprechen würde. KLZ 11 (Fichtelberg) ist mit einer mittleren Außenlufttemperatur von 5,1 °C die kältestes KLZ, KLZ 12 (Mannheim) mit 12,2 °C die wärmste KLZ, Schmitt (2023).

3.2 Bodenart

Aufgrund unterschiedlicher Bodenzusammensetzungen, die Temperatur und Feuchtegehalt bestimmen, variiert die Wärmeleitfähigkeit (WLF) deutlich. In Deutschland treten zahlreiche Bodenarten mit regional unterschiedlichen Eigenschaften auf, deren Ausprägungen durch Klima, geologische Gegebenheiten und Vegetation beeinflusst werden.

Die Klassifikation der Bodenarten erfolgt auf Grundlage ihrer Kornfraktionen und Bodentexturen. Neben dem Humusgehalt und der Erdreichfeuchte sind insbesondere Korngrößen und Materialzusammensetzung maßgebend. Das Erdreich lässt sich in die Fraktionen Sand, Schluff und Ton sowie die Hauptgruppen Sand, Schluff, Ton und Lehm unterteilen. Auf Basis dieser Einteilung definiert die DIN 4220 insgesamt 31 Bodenarten, dargestellt in Abbildung 2, DIN (2020). Tonige Böden weisen im trockenen bis leicht feuchten Zustand die höchste WLF auf (bis etwa 2,0 W/m·K), während im gesättigten Zustand insbesondere sandige Böden hohe Werte (>2 W/m·K) erreichen.

Die WLF eines Bodens hängt maßgeblich vom Wasser- und Luftanteil sowie von der Dichte ab. Mit zunehmender Verdichtung reduziert sich der Luftanteil. Luft mit einer WLF von etwa 0,03 W/(m·K) verringert die WLF des Bodens, während Wasser mit rund 0,4 W/(m·K) und Sandkörner mit bis zu 3,9 W/(m·K) diese erhöhen. Eine optimale Verdichtung, bei der Luftporen durch die Bodensubstanz oder Wasser ersetzt werden, führt zu einer deutlichen Verbesserung der WLF. Mineralische Böden setzen sich im Mittel aus etwa 23 % Wasser, 25 % Luft, 45 % mineralischen Bestandteilen und 7 % organischen Substanzen zusammen, Fuchs et al. (2022).

3.3 Feldkapazität

Die Feldkapazität (FK) beschreibt die Wassermenge, die ein Boden nach ausreichender Wasserzufuhr gegen die Schwerkraft halten kann. Sie hängt von den Porenkräften und der Bodenstruktur ab. Sandböden besitzen eine geringe FK aufgrund ihrer Grobporigkeit, wohingegen Tonböden durch ihre Feinporigkeit ein hohes Wasserhaltevermögen aufweisen. Schluffböden liegen bei der FK zwischen Sand- und Tonböden und verfügen über einen hohen Anteil pflanzenverfügbaren Wassers. Typische FK verschiedener Bodenfeuchtegrade der 31 Bodenarten nach Schmitt (2023) und simulierte Feuchtespannen der 15 KLZ zeigen, dass bei identischem Feuchtegehalt die Bodenarten unterschiedliche Feuchtezustände aufweisen. Maßgeblich ist die Saugspannung (pF-Wert): Bei pF 0 ist der Boden gesättigt, bei pF 2,5 entspricht der Zustand der Feldkapazität und bei pF 4,2 dem Welkpunkt. Die simulierten Feuchtespannen zeigen für die meisten Standorte leicht feuchte bis feuchte Bedingungen, während nur einzelne Böden, wie St2, trockenere Zustände aufweisen.

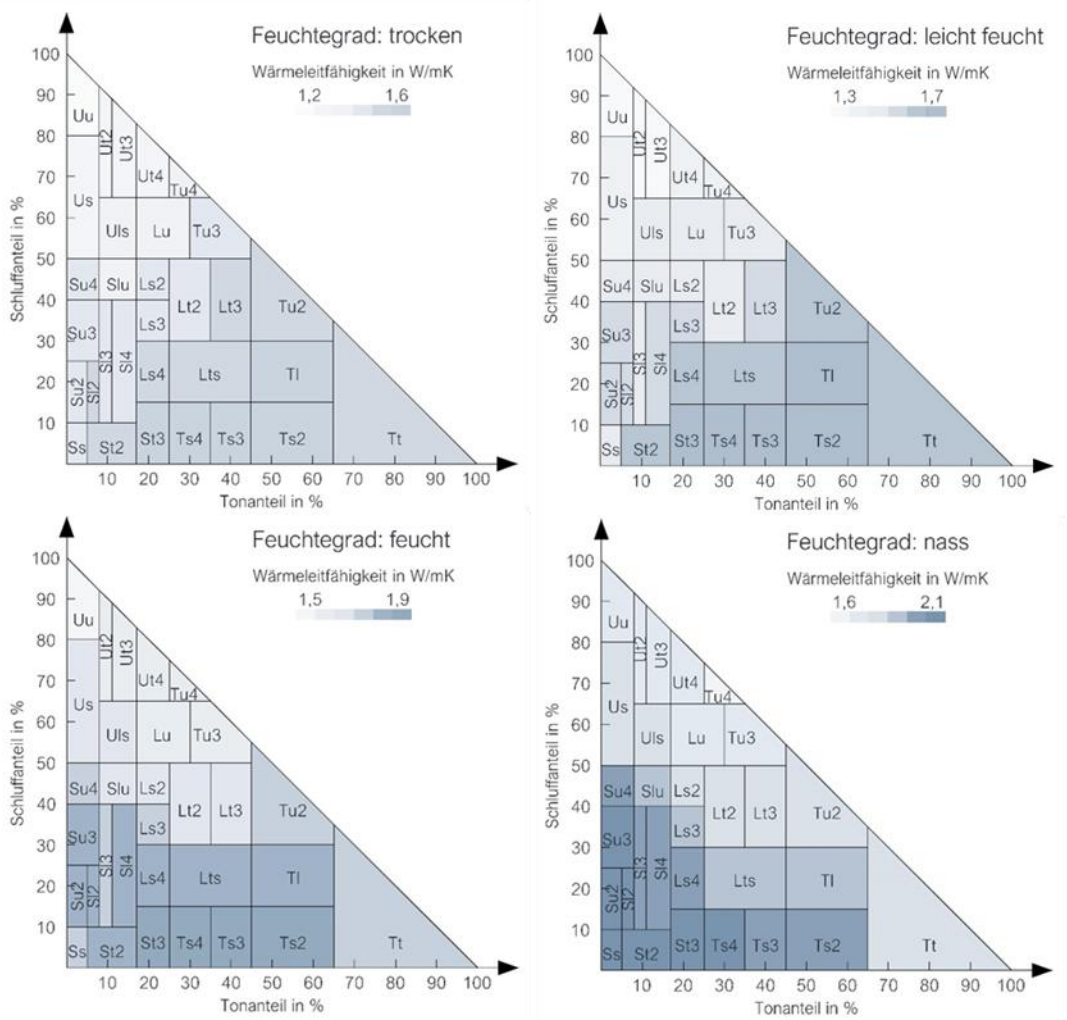


Abb. 2 WLF der Bodenarten nach DIN 4220 und Hirsch (2023) bei unterschiedlichen Feuchtegehalt

In Abb. 2 zeigt sich, dass bei trockenen und leicht feuchten Feuchtegraden die Böden mit höherem Tonanteil bessere WLF aufweisen. Je höher der Feuchtegrad ist, desto höher steigt die WLF bei sandigen Böden gegenüber den anderen Bodenarten.

3.4 Erdreichtemperatur

Die Erdreichtemperatur stellt eine wesentliche Größe für den Ertrag eines EWK dar und variiert mit Tiefe, Standort und Jahreszeit. In Deutschland beträgt die durchschnittliche Erdreichtemperatur in den ersten 10 m etwa 10 °C, Schmitt (2023). Wärmezufuhr erfolgt in den oberen Bodenschichten überwiegend durch Solarstrahlung, während der geothermische Wärmestrom aus dem Erdinneren nur einen geringen Anteil liefert. Wärmeverluste entstehen durch Ausstrahlung und Verdunstung. Eine Betrachtung der Erdreichtemperatur in unterschiedlichen Tiefen über ein Jahr verdeutlichten, dass die Temperaturschwankungen in oberflächennahen Schichten stark ausgeprägt sind, ab etwa 10 m Tiefe jedoch weitgehend konstant verlaufen.

Des Weiteren zeigen Sandböden die größten Temperaturschwankungen, während Tonböden durch ihren höheren Feuchtegehalt und die damit einhergehende höhere Wärmekapazität thermisch träger reagieren. Schluff- und Lehmböden liegen hinsichtlich der Erdreichtemperatur zwischen diesen Extremen. Bei Temperaturen unter 0 °C kann insbesondere in schluffigen Böden aufgrund der Feinporigkeit und des hohen Wasserhaltevermögens Eisbildung auftreten.

3.5 Eisbildung

Die Eisbildung im Erdreich ist ein komplexer Prozess, der von Bodenart, Zusammensetzung, Feuchtegehalt, Porengröße, Plastizität und Durchlässigkeit abhängt. Für den EWK spielt sie jedoch eine wichtige Rolle, da die latente Wärme einen großen Anteil am gesamten Wärmeentzug aus dem Boden hat. Durch das Gefrieren des Bodenwassers kommt es zu einer Volumenzunahme, wodurch Hebungen entstehen können.

3.6 Niederschlag & Verdunstung

Seit 1881 ist eine Zunahme des mittleren Niederschlags, um etwa 8 % zu verzeichnen, Umweltbundesamt (2023). Extreme Niederschlagsereignisse führen infolge ausgetrockneter Böden zunehmend zu Überflutungen. Für die Geothermie bedeuten trockenere Böden eine verringerte WLF, jedoch auch eine reduzierte Verdunstung und geringere Versickerung.

Die Verdunstung, bestehend aus Transpiration, Interzeption und Evaporation, wird wesentlich durch atmosphärische Bedingungen beeinflusst. Ein Teil des Niederschlags verbleibt auf Vegetationsoberflächen (Interzeption), ein weiterer Teil versickert und wird über Pflanzen (Transpiration) oder die Bodenoberfläche (Evaporation) wieder an die Atmosphäre abgegeben. Durch kapillaren Aufstieg kann Wasser aus tieferen Schichten in obere Erdschichten gelangen. Die genaue Simulation dieser verschiedenen Effekte ist aufgrund des hohen Einflusses der Bodenfeuchte auf den Wärmeentzug essenziell.

3.7 Entzugsprofil

Die Verteilung des Wärmeentzugs auf das Jahr hat einen deutlichen Einfluss auf die entziehbare Wärmemenge. Pauschal kann bei einem sehr gleichmäßigen Entzug in der Heizperiode insgesamt mehr Wärme entzogen werden.

Für die Simulationsanalyse wurde ein fiktives Quartier mit 40 Gebäuden, davon die Hälfte mit dem Energiestandard EH 55 und die andere Hälfte mit EH 40 angenommen. Die Wohngebäude haben eine Grundfläche von 12 m x 10 m mit 2 Vollgeschossen ohne Keller. Es wird eine Personenanzahl von 3 festgelegt. Die Heizgrenztemperatur wurde nach VDI 4650 Blatt 1 mit 12 °C bzw. 10 °C angesetzt. Die Innentemperatur wird nach DIN EN 12831 mit 20 °C bemessen, DIN e.V. (2017).

Für die Berechnung des Quellwärmebedarfs wurde eine feste Leistungszahl der Wärmepumpe angenommen. Für die Simulationsstudie wird der Quellwärmeentzug als Stundenprofil in W/m³ mittels der EWK-fläche und -höhe umgerechnet und dem Modell aufgeprägt. In der Parameterstudie wurde für jede KLZ ein entsprechendes Entzugsprofil erstellt.

4. Parameterstudie des ungestörten Erdreichs

Zur Identifikation der wichtigsten Einflussgrößen des Erdreichs wurde zunächst ein ungestörtes Bodenmodell untersucht. Dieses Modell berücksichtigt ausschließlich die natürlichen Wärme- und Feuchtetransporte, ohne eine Beeinflussung durch den EWK. Grundlage bildeten die standortspezifischen Klimadaten der 15 KLZ Deutschlands gemäß DIN V 18599-10 sowie Bodenparameter nach DIN 4220.

4.1 Methodik

Die Simulation erfolgte mit dem hygrothermischen Simulationsprogramm DELPHIN, Bauklimatik Dresden (2021). In einer übers Jahr stündlichen Auflösung. Eingangsgrößen waren die TRJ des DWD, die mittlere Bodenart, Trockenrohdichte und Bodenfeuchte.

Zur systematischen Analyse wurde eine Parameterstudie durchgeführt, in der einzelne Einflussgrößen variiert wurden:

- Bodenart: leicht toniger Sand (St2), mittel sandiger Lehm (Ls3), leicht sandiger Ton (Ts2), sandiger Schluff (Us)
- Feuchtegehalt (pF 0, pF 1, pF 2, pF 3 und pF 4)
- Dichte: 1,2 g/cm³, 1,5 g/cm³ und 1,8 g/cm³
- Grundwasser in den Tiefen: 2,5 m, 5,0 m und 10 m
- Strahlung, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Außenlufttemperatur gemäß KLZ

Ausgangsgrößen waren Wärmeleitfähigkeit, Feuchte- und Eisgehalt, sowie Erdreichtemperatur gemittelt über die ersten 2 m des Erdreichs.

4.2 Ergebnisse

Die Untersuchungen zeigen, dass Bodenart, Bodenfeuchte und Bodendichte den größten Einfluss auf die WLF besitzen. Trockene, luftreiche Böden wie Sand erreichen im gesättigten Zustand bis zu 2,4 W/(m·K), während sie bei trockenen Zuständen bei nur etwa 0,6 W/(m·K) liegen, siehe Abb. 3A. Tonige Böden reagieren durch ihre hohe Wasserspeicherkapazität träger auf kurzfristige Klimaschwankungen.

Die klimatischen Parameter wirken vor allem über Oberflächentemperatur und Feuchtedynamik. Im oberen Meter des Bodens treten Temperaturamplituden von mehr als 20 K zwischen Sommer und Winter auf. Mit zunehmender Tiefe verringert sich die Amplitude, ab etwa 10 m herrscht ein nahezu stationäres Temperaturfeld.

Die Sensitivitätsanalyse ergab, dass Änderungen des Feuchtegehalts um ±10 % Abweichungen der WLF von bis zu ±25 % bewirken, siehe Abb. 3B. Eine Verdichtung des Bodens von 1,2 g/cm³ auf 1,8 g/cm³ erhöht die WLF um etwa 35 % (Abb. 3C). Durch Luftverdrängung steigt bei feuchteren, grobporigen Böden die WLF deutlich an. Bei Tonböden kann eine Verdichtung dagegen durch den

sinkenden maximalen Wassergehalt die WLF verringern. Die Zusammensetzung und Feuchtedynamik des Bodens sind maßgeblich für die thermischen Eigenschaften

Die Wärmestrahlung beeinflusst das ungestörte Erdreich durch Änderungen der Erdreichtemperatur und des Frostverhaltens. Ja niedriger die langwellige Ausstrahlung und die Langwellige Himmelsgegenstrahlung, desto geringer werden die Erdreichtemperaturen und desto höher der Eisanteil im Erdreich wie in Abb. 3D dargestellt.

Die maximalen Abweichungen der Wärmestrahlung in Deutschland liegen jedoch lediglich zwischen -3 % und +6 %, weshalb der Einfluss der Wärmestrahlung in Realität nicht so stark ist.

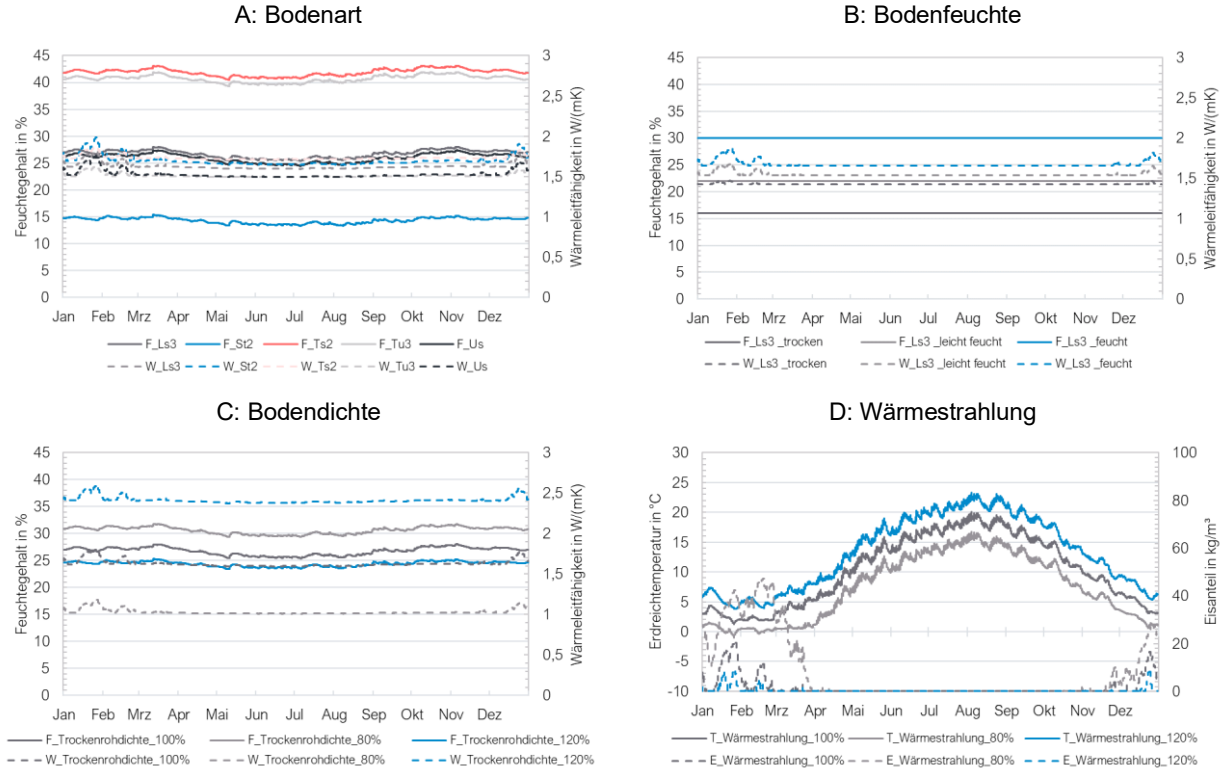


Abb. 3 Jahresverlauf der simulierten Feuchtegehalt und Wärmeleitfähigkeit für Variation der Bodenarten, - feuchten und -dichte sowie Erdreichtemperatur und Eisanteil bei Variation der Wärmestrahlung für das ungestörte Erdreichmodell

Die Veränderung des Grundwasserstands zeigte einen deutlichen Einfluss in den oberen Schichten. Ab 5 m Tiefe hat das Grundwasser jedoch kaum Auswirkungen mehr auf die oberen 2 m des Erdreichs.

Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Solarstrahlung haben hingegen nur geringe Effekte auf Feuchtegehalt und WLF, sollten jedoch aufgrund standortspezifischer Unterschiede nicht vollständig vernachlässigt werden.

5. Parameterstudie des Erdwärmekollektors

Im zweiten Teil der Untersuchung wurde mit integriertem EWK simuliert. Die Simulation berücksichtigt den Wärmeaustausch zwischen EWK und Erdreich sowie die klimatischen Randbedingungen.

5.1 Methodik

Das Kollektormodell basiert auf einer typischen horizontalen Rohrverlegung in 1,5 m Tiefe. Als Rohrmaterial wurde PE100-RC angenommen. Im EWK zirkuliert ein 30 %iges Wasser-Glykol-Gemisch. Das Modell wurde für unterschiedliche Bodenarten und KLZ parametrisiert.

Die Eingangsparameter für die Klimadaten (Außenlufttemperatur, Strahlung, Niederschlag, Wind) stammen aus dem TRJ. Die Simulationen erfolgten über einen Zeitraum von 10 Jahren, um ein Einschwingen des Erdreichs sicherzustellen. Weiterhin wurde der Entzug so begrenzt, dass die minimale Kollektortemperatur bei -3 °C liegt und es an der Erdoberfläche nicht zu Hebungen kommt.

5.2 Ergebnisse

Die Simulationen zeigen eine starke Abhängigkeit der Entzugsleistung von der Bodenfeuchte und Bodendichte. Während trockene Böden deutlich geringere Entzugsleistungen liefern, kann eine hohe Feuchte den spez. Entzug um bis zu 35 % steigern, siehe Abb. 4 A.
Hierbei wird der Unterschied der fünf Bodenarten deutlich. Wie zu erwarten, hat die sandige Bodenart St2 den geringsten Entzug aufgrund des geringen Haltevermögens von Wasser. Wohin der tonige Ts2 das größte Potential aufweist. Wird ein Sandboden jedoch gesättigt, ist ein enorme Erhöhung des Potentials möglich.

Bei der Untersuchung der Bodendichte (Abb. 4 B) ist ein Anstieg des Entzugs für die Bodenart Ls3 und Us bei der Erhöhung der TRD zu erkennen. Die Bodenart Us zeigt einen besonders hohen Anstieg des Entzugs bei Verdichtung von 1,2 g/cm³ auf 1,5 g/cm³, wohingegen eine weitere Verdichtung auf 1,8 g/cm³ kaum zu einer Verbesserung führt. Besonders auffällig ist die Bodenart St2, die sowohl bei einer geringeren als auch einer höheren TRD als die Referenz einen höheren Entzug ermöglicht.

Dieses Verhalten lässt sich durch gegenläufige Faktoren erklären. Durch die Reduzierung der TRD entstehen mehrere und größere luftgefüllte Poren, wodurch das Sickerwasser schneller das Erdreich durchfließt. Anschließend gefriert der EWK, und ungefrorenes Wasser sammelt sich oberhalb der EWK-Ebene, wodurch das weitere Durchsickern verhindert wird. Mit steigendem Feuchtegehalt, Gefrieren des Bodens und sinkender EWK-Temperatur unterschreitet dies die Auslegungsgrenze von -3 °C und überschreitet den maximal möglichen Eisgehalt, bevor es zu Erdhebungen kommt. Trotz geringerer Dichte kann der tonige Sand einen höheren Entzug aufweisen.

Jedoch macht sich auch bemerkbar, dass mit einer Erhöhung der TRD der spez. Entzug auch signifikant erhöht werden kann. Dies liegt daran, dass das Porenvolumen bei der Verdichtung verdrängt wird und dadurch die WLF des Sandkorns den hohen Entzug ermöglicht.

Neben dem Sandboden weisen die beiden Tonböden Ts2 und Tu3 hingegen eine Reduzierung des spez. Entzugs bei zu starker Erhöhung der TRD auf. Hierbei hat sich gezeigt, dass mit Erhöhung der TRD der maximal mögliche Feuchtegehalt deutlich sinkt und durch den geringeren Wasseranteil der spez. Entzug niedriger ausfällt. Die WLF und die Erdreichtemperatur steigen wie zu erwarten bei Erhöhung der TRD. Der Eisanteil richtet sich nach der vorhanden Feuchte, weshalb eine hohe TRD einen geringeren Eisanteil und dadurch geringere latente Wärmepotentiale aufweist.

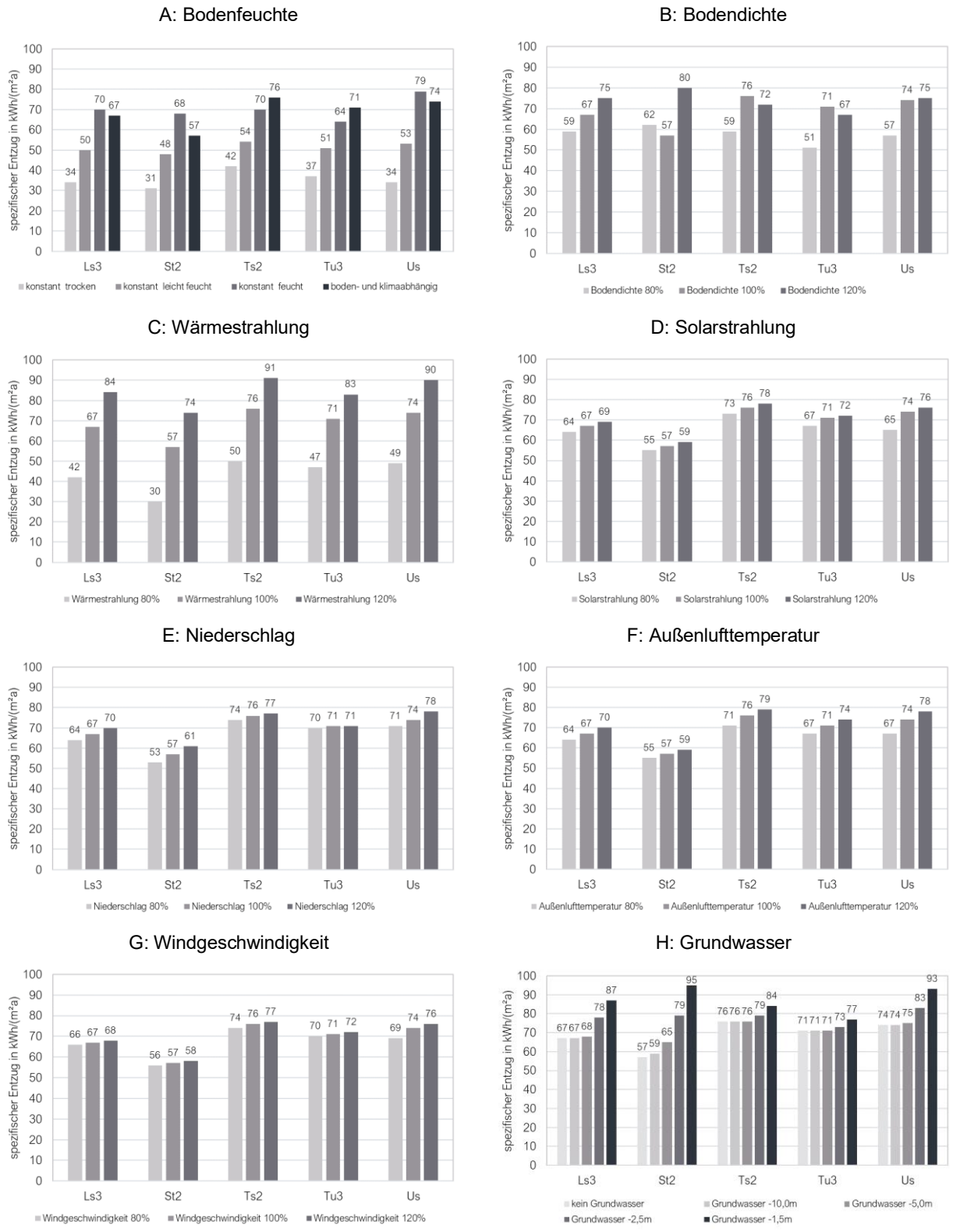


Abb. 4 spezifische Entzugsdichte unterschiedlicher Böden bei Variation verschiedener Parameter (Begrenzung: -3 °C Kollektortemperatur und keine Hebungen)

Die Wärmestrahlung beeinflusst den spez. Entzug deutlich, siehe Abb. 4 C. Jedoch variiert sie in Deutschland nur von -3 % bis +6 %, weshalb der Einfluss in der Praxis schwächer ausfällt.
Neben den bisher genannten Einflussgrößen zeigen die Solarstrahlung, die Außenlufttemperatur, der Niederschlag und die Windgeschwindigkeit einen geringen Einfluss auf oberflächennaheste Geothermiesysteme, siehe Abb. 4 D-G. Jedoch haben die einzelnen Klimarandbedingungen im gesamten eine erhebliche Einfluss auf das Grundenergiepotential je geografische Lage.

Das oberflächennahes Grundwasser bewirkt ähnlich wie bei der Parameterstudie des Feuchtegehalts eine deutliche Änderung der WLF, weshalb ein hoher Anstieg des spez. Entzugs bei nahe der GOK anstehendem Grundwasser zu verzeichnen ist, siehe Abb. 4 H. Wie zu erwarten, ist dieser Einfluss besonders stark bei sandigen Bodenarten, da es die Bodenfeuchte erhöht.

6. Bewertung der Einflussgrößen und Kategorisierung der Klimazonen

Auf Basis der Simulationsergebnisse wurden die relevanten Einflussgrößen bewertet und für die 15 KLZ kategorisiert. Ziel war eine vereinfachte, aber wissenschaftlich fundierte Abschätzung der Energieentzugspotentiale.

Für die Bewertung der Einflussgrößen in Bezug auf die KLZ wurden lediglich die Außenklimabedingungen bewertet, da die bodenspezifischen Parameter das Klima nicht direkt beeinflussen.
In kälteren Regionen (z. B. KLZ 11 Fichtelberg) reduziert sich der mittlere Energieentzug um bis zu 60 % im Vergleich zu wärmeren Regionen (z. B. KLZ 12 Mannheim). Die Ursache liegt in der geringeren mittleren Erdreichtemperatur und den höheren Frostanteilen. Die gewichtete Bewertung erfolgte somit durch die Bepunktung der klimatischen Einflussgrößen bezogen auf den Energieentzug.

Dabei zeigte sich folgende Rangfolge der Einflussgrößen:

1. Wärmestrahlung
2. Außenlufttemperatur
3. Solarstrahlung
4. Niederschlag
5. Windgeschwindigkeit

Des Weiteren ist bekannt, dass die Erdreichtemperatur in den ersten Metern des Erdreichs entscheidend durch die Außenlufttemperatur beeinflusst wird. Durch die Annahme einer mittleren Abweichung der Außenlufttemperatur auf das Jahr werden jedoch besonders tiefe und hohe Temperaturen je nach Jahreszeit geglättet und vernachlässigt. Daher wurden die spez. Außenlufttemperaturen der vier Jahreszeiten als zusätzlicher Faktor berücksichtigt.

Anhand der Klimadaten des DWD konnte die Abweichung der 15 KLZ in Bezug zur mittleren KLZ 9 erfolgen. Die größten Abweichungen zeigen die KLZ 8 (Braunlage), 11 (Fichtelberg), 14 (Stötten) und 15 (Garmisch-Partenkirchen), welche sich durch ihre deutlich geringeren Außenlufttemperatur auszeichnen.

7. Gegenüberstellung

Zwischen den Klimazonen bestehen ausgeprägte Unterschiede in den betrachteten Parametern. Aus diesem Grund sind gegenläufige Entwicklungen und Einflüsse durch Klima- und Bodeneigenschaften zu erwarten. Beispielweise begünstigt eine hohe Solar- und Wärmestrahlung die Möglichkeit höherer Verdunstungen an der Erdoberfläche, was folglich zu einer Reduktion der Bodenfeuchtigkeit und einem trockeneren Boden führt und den spez. Wärmeentzug reduziert. Jedoch bewirkt

die hohe Solarstrahlung eine größere Absorption der Wärme in den Boden, was sich wiederum positiv auswirkt.

Mithilfe der Gewichtungsfaktoren und der Abweichung der jeweiligen Klimarandbedingungen ist ein mittlerer spez. Entzug für jede KLZ abschätzbar, siehe graue Wertespannen in Abb. 5.

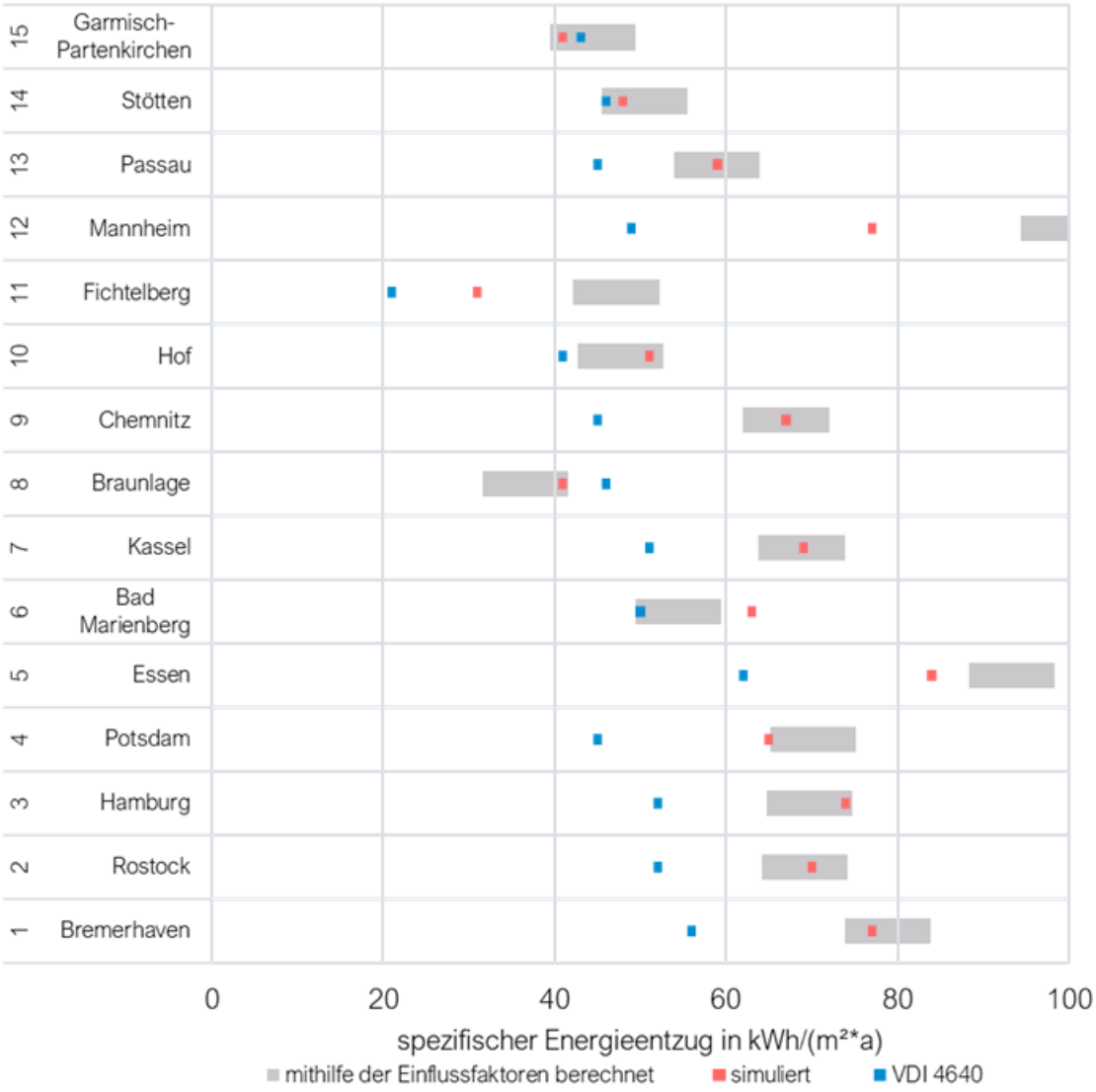


Abb. 5 Gegenüberstellung des spez. Energieentzug eines EWK der Abschätzung nach Einflussfaktoren mit Simulationsergebnissen und mit der VDI 4640-2

Um die Genauigkeit dieser Spannen zu überprüfen, wurde für jede KLZ mithilfe einer eigenen Simulation mit der Bodenart Ls3 (in Deutschland häufigste Bodenart) der mögliche spez. Energieentzug ermittelt, siehe rote Werte in Abb. 5.

Weiterhin wurden in Abb. 5 die Werte aus der VDI 4640 in Blau eingetragen. Die Ergebnisse zeigen, dass für die meisten KLZ eine Abschätzung des Energieentzugs mithilfe der erarbeiteten Methodik möglich ist. Nur bei KLZ 5, 6, 11 und 12 liegt die Simulation außerhalb der Spanne. KLZ 11 und KLZ 12 stellen mit der niedrigsten und der höchsten Außenlufttemperatur extreme Situationen

dar, die mit der jetzigen Methodik noch nicht verlässlich abgeschätzt werden können und die größten Abweichungen aufweisen. Bei KLZ 5 und 6 ist die Abweichung etwas geringer. Gründe hierfür sind nicht eindeutig ersichtlich, könnten jedoch mit der Windgeschwindigkeit und dem Niederschlag zusammenhängen.

Der Vergleich mit der VDI 4640-2 zeigt oftmals erhebliche Abweichungen. Während die Norm für mittelwarme KLZ Energieentzüge von etwa 45 kWh/(m²a) angibt, ergaben die Simulationen für vergleichbare Bedingungen Werte zwischen 30 und 85 kWh/(m²a), abhängig von Bodenart und Feuchte.

Die Werte der VDI liegen im Mittel etwa 30 % (14 kWh/(m²*a)) unterhalb der Simulationsergebnisse. Abweichungen von bis zu 57 % können einen erheblichen wirtschaftlichen Faktor auf die Auslegung von EWK-Flächen zu Folge haben.

Zu beachten ist, dass die Werte der VDI 4640-2 für eine Rohrdimension von Da = 32 mm und einen Lehmboden gelten, was jedoch keine wesentlichen Unterschiede verursacht. Eine größere Wärmeübertragerfläche führt zwar zu leicht verbesserten Ergebnissen, die Abweichungen bleiben jedoch gering. Zudem stimmen die der VDI 4640-2 zugrunde liegende WLF und der Wassergehalt weitgehend mit den in der Simulation verwendeten Werten für mittel sandigen Lehm überein.

Im Unterschied dazu führt der in der VDI 4640-2 angegebene größere Rohrabstand zu einen entsprechend höheren Einfluss auf den spezifischen Energieentzug. Nach Schmitt (2022) kann der Rohrabstand je nach Bodenart einen Einfluss von bis zu 15 % bewirken. Trotz und besonders wegen dieser Diskrepanz ist eine Überarbeitung der Auslegungstabellen mithilfe modernen hygrothermischen Simulationsprogrammen und einer Erweiterung um mehrerer Rohrabstände und Verlegetiefen, sowie die Berücksichtigung typischer Bodenzusammensetzungen sehr zu empfehlen.

8. Zusammenfassung

Die untersuchten Ergebnisse zeigen, dass Klima und Boden die Leistungsfähigkeit von EWK maßgeblich bestimmen. Insbesondere Bodenfeuchte, Wärmestrahlung und Trockenrohdichte erwiesen sich als entscheidende Parameter, da sie über die WLF, Temperaturverteilung und Eisgehalt im Erdreich den spezifischen Energieentzug beeinflussen. Die Analysen der klimatischen Bedingungen sowie der bodenspezifischen Eigenschaften verdeutlichen, dass eine pauschale Anwendung aktueller Richtwerte, wie in der VDI 4640-2, nur eingeschränkt geeignet ist. Für eine praxisnahe Planung sind daher hygrothermische Simulationen unter Verwendung realer Standortdaten notwendig.

Aus den Abweichungen gegenüber der VDI 4640-2 ergeben sich Empfehlungen für deren Überarbeitung. Dazu zählen der Einsatz moderner hygrothermischer Simulationsprogramme, die Aktualisierung der bisherigen Auslegungstabellen sowie eine Erweiterung auf mehrere Rohrabstände zwischen 0,2 und 1,2 m und Verlegetiefen zwischen 1,2 und 2,0 m. Ebenso sollte die Richtlinie typische Bodenzusammensetzungen stärker berücksichtigen, um die reale Variabilität der Bodenparameter abzubilden. Mit denen momentanen Tabellenwerten wird das Potential der EWK systematisch im Mittel um ca. 30 % (14 kWh/(m²*a)) unterschätzt. Dies führt dazu, dass die oberflächennaheste Geothermie in vielen Fällen bereits in frühen Projektphasen als mögliches Potential verworfen wird.

Über diese Arbeit hinaus ergeben sich verschiedene wissenschaftliche Anknüpfungspunkte für zukünftige Arbeiten. Dazu zählt die Untersuchung unterschiedlicher Entzugsprofile und Varianten der Bauweise eines EWKs sowie der Einfluss eines Regenrückhaltebeckens, das aufgrund erhöhter Bodenfeuchte das Entzugspotential steigern kann. Auch mit Gebäuden überbaute Flächen sollten

betrachtet werden, da sie zu Bodenverdichtungen und der Veränderung der Vereisungseffekte sowie der natürlichen Regeneration führen. Ergänzend sind spezifische Bodenmischungen zur Optimierung des Energieentzugs sowie der Einfluss von Bäumen auf die Bodenfeuchte von besonderem Interesse, da Vegetation über Verschattung und geänderte Verdunstungsverhältnisse die thermischen Prozesse im Erdreich beeinflusst.

Quellenangaben

R. Zeh, B. Ohlsen, D. Philipp, D. Berthemann, T. Kotz, V. Stockinger und N. Jocic´, „Large-Scale Geothermal Collector Systems for 5th Generation District Heating and Cooling Networks," Sustainability, 2021.

R. Bracke, E. Huenges und e. al., „Roadmap tiefe Geothermie für Deutschland," Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie, Bochum, 2022.

Energie PLUS Concept GmbH, „Oberflächennaheste Geothermie," [Online]. Available: https://energie-plus-concept.de/wissen/oberflaechennaheste-geothermie. [Zugriff am 20 04 2023].

Recknagel und A. Sprenger, Recknagel - Taschenbuch für Heizung+Klimatechnik, K. Albers, Hrsg., ITM Inno-Tech Medien, 2020.

Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN V 18599 - 10 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung," Beuth Verlag GmbH, 2018.

S. Schmitt, „Simulative investigation of the undisturbed soil to validate the simulation model on very shallow geothermal systems," Nürnberg, 2023.

Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 4220 Bodenkundliche Standortbeurteilung - Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten," Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2020.

H. Hirsch, „Bodenkurven der 31 Bodenarten," Dresden, 2023.

S. Fuchs, A. Förster und B. Norden, „Evaluation of the terrestrial het flow in Germany: A case study for the reassessment of global continental heat-flow data," Elsevier B.V, Potsdam, 2022.

C. Kellner, „Frosthebungsverhalten von Böden infolge tief liegender Vereisungskörper," München, 2007.

Umwelt Bundesamt, „Umwelt Bundesamt, Klima," [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-niederschlagshoehe#:~:text=Seit%201881%20hat%20die%20mittlere,im%20Sommer%20geringf%C3%BCgig%20zur%C3%BCckgegangen%20sind.. [Zugriff am 28 01 2023].

Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN 12831 Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN 12831-1:2017," Beuth Verlag GmbH, 2017.

Bauklimatik Dresden, „Delphin," 2021. [Online]. Available: http://www.bauklimatik-dresden.de/delphin/bestellen.php. [Zugriff am 19 03 2021].

S.Schmitt, „Simulative Untersuchung von Wärmenetzen der 4. Generation" Nürnberg, 2022.

Energie PLUS Concept GmbH, Blumenstraße 1, 90402 Nürnberg
s.schmitt@energie-plus-concept.de