

Vergleich von vertikalen und radialen Erdwärmesonden

Versuche zum thermischen Verhalten bei Bohrungen bis 100 m Tiefe im Labor- und Computermodell

Prof. Dr.-Ing. Richard Herrmann, Institut für Geotechnik Universität Siegen
Dipl.-Geologe Andreas Hagedorn MBA, Fachbereichsleiter

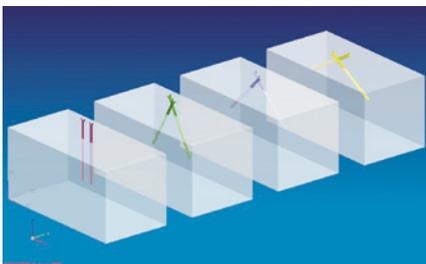


Abb. 1a und b: Die vier Versuchsmodelle mit den unterschiedlichen Sondenwinkeln (links) und ein Versuchskörper (rechts)

Am Institut für Geotechnik der Universität Siegen, Fachbereich 10: Bauwesen, ergaben Modellexperimente, dass der Austausch von Wärmeenergie mit dem Untergrund bei radial angeordneten Erdwärmesonden anderen Mechanismen folgt, als dies bei benachbarten Vertikalbohrungen derselben Gesamtlänge der Fall ist. Um die Ergebnisse der Modellversuche zu evaluieren, wurden die Unterschiede zwischen vertikal und radial angeordneten Bohrungen in unterschiedlichen Tiefenlagen mittels Finite-Elemente-Analyse untersucht.

Die Ergebnisse stellen sich wie folgt dar: Die Finite-Elemente-Analysen (Steady-State) der Entwicklung der Temperatur um das Bohrloch zeigten, dass im günstigsten Fall die mittels Radialbohrungen entzogene Wärmemenge pro Tag um bis zu 114% über der eines Feldes von kurzen, aber in Summe gleich langen Vertikalbohrungen liegen kann. Diese deutlich höhere Energieeffizienz resultiert aus der niedrigen gegenseitigen Beeinflussung radial geneigter Sonden.

Transiente Finite-Elemente-Analysen, die den Einfluss der jahreszeitlichen Schwankungen der Oberflächentemperatur berücksichtigen, bestätigten die Aussagen der Gleichgewichtsanalysen.

Das thermische Verhalten von kurzen Erdwärmesonden, d.s. Sonden bis ca. 50 m

Tiefe (geneigt oder vertikal positioniert), unterscheidet sich signifikant vom thermischen Verhalten vertikaler Erdwärmesonden, die bis in eine Tiefe von 99 m u. GOK reichen. Flache Erdwärmesonden werden über einen bedeutenden Teil ihrer Wärmetauscherfläche maßgeblich durch den solaren Wärmeeintrag beeinflusst, tiefe Sonden dagegen wesentlich durch den geothermischen Flux.

Durch zeitlich hochauflösende transiente Finite-Elemente-Analyse konnte gezeigt werden, dass bei flachen Radialbohrungen die Soletemperatur im langjährigen Mittel höher liegt als bei tiefen Vertikalbohrungen. Die daraus nach 20 Jahren kumulierte Ersparnis der Betriebskosten kompensiert ca. 30% - 50% der aufgewendeten Bohrkosten.

Durch Finite-Elemente-Analyse konnte also gezeigt werden, dass die planerische Entscheidung hinsichtlich Tiefenlage und geometrischer Anordnung der Erdwärmesonden einen deutlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer eines Erdwärmesondengewerks hat.

1. EXPERIMENTELLE- UNTERSUCHUNGEN AN DER UNIVERSITÄT SIEGEN

Allgemeines

Es wurden Versuchskörper aus Beton mit maßstäblich verkleinerten Erdwärmesonden hergestellt und Kühl- und Aufheizversuchen unterworfen, um eine Abschätzung hinsichtlich der Energieeffizienz zu bekommen.

In den Kühlversuchen wurde zuerst die gesamte Versuchsanordnung über die Sondenmodelle (U-Rohre aus Glas) bis zu einem Steady-State Zustand heruntergekühlt, um danach die passive Wiedererwärmung auszuwerten. Beim Aufheizversuch (aktive Energiezufuhr über die Sondenmodelle) wurden die Sondenmodelle durch Heizschleifen ersetzt und die Aufheizung in der Umgebung der Bohrungen durch Thermografieaufnahmen bemessen.

Verglichen wurden vier Versuchsmodelle, in die jeweils U-Rohre gegeneinander geneigt in Fallwinkeln von 30°, 45°, 60° und 90° - gemessen von der Oberfläche des Modells - eingebaut waren, Abb.1.

Die Versuche wurden im Labor bei konstanter Raumlufttemperatur durchgeführt. Die gemessene Raumlufttemperatur dient dabei als Referenzgröße für die Temperatur des Versuchskörpers. Sie liegt im Mit-

tel bei 23,5°C, die maximale Abweichung von der gemittelten Temperatur beträgt +/- 0,2°C.

Festlegung der Messintervalle

Die ersten Vorversuche zeigten, dass sehr kurze Messintervalle von ein bzw. zwei Sekunden keinen Vorteil gegenüber einem Messintervall von 10 Sekunden erbrachten.

Modell Nr.	Aufwärmzeit bis 20°C	Zeitdifferenz in Sek.	Zeitdifferenz in %
Versuchsmodell Nr. 4 (90°)	1480 Sekunden	Differenz: 0 Sekunden	100 %
Versuchsmodell Nr. 3 (60°)	1320 Sekunden	Differenz: 160 Sekunden	89,12 %
Versuchsmodell Nr. 2 (45°)	1270 Sekunden	Differenz: 210 Sekunden	85,81 %
Versuchsmodell Nr. 1 (30°)	1190 Sekunden	Differenz: 290 Sekunden	80,41 %

Tab. 1: Überblick der zeitlichen Differenzen der Aufwärmphasen für $\Delta T = 20$ [°]

Außerdem konnte festgestellt werden, dass, je kleiner das Messintervall gewählt wird, die Temperatursprünge immer größer wurden. Die Temperaturverläufe ähnelten dann eher einer Linie eines Oszillographen.

2. DURCHFÜHRUNG DER MESSREIHEN IM KÜHLVERSUCH

Messungen in Versuchsmodellen Nr. 1 bis Nr. 4 mit Sondenneigungen von 30° bis 90°

Der erste Versuch wurde an dem Probekörper mit einer Sondenneigung von 30° durchgeführt. Dabei sind die Glasrohre 9,9 cm in den Beton eingebunden. Der Sondenabstand an der Oberfläche beträgt 0,5 cm, was einem Abstand von einem Meter in der Örtlichkeit entspricht. Der Abstand ist hier wesentlich geringer als bei den senkrecht angeordneten Energiesonden, da in der Radialbohrtechnik in der Örtlichkeit alle Sondenanschlüsse in

einem Schacht von ca. 1 m Durchmesser erfolgen.

Für den zweiten Versuch diente der Probekörper mit einer Sondenneigung von 45°, gemessen von der Oberfläche des Versuchsmodells. Die Einbindetiefe der U-Rohre beträgt 14,2 cm. Der Sondenabstand liegt in diesem Versuchsmodell

ebenfalls bei 0,5 cm.

Der Probekörper für den dritten Versuch hatte eine Sondenneigung von 60°. Die Einbindetiefe beträgt 17,3 cm, der Sondenabstand 0,5 cm zwischen den beiden Rohren. Die letzte Versuchsreihe wurde an dem Probekörper mit einer Sondenneigung von 90° durchgeführt. Hier beträgt die Einbindetiefe 20 cm, der Abstand zwischen den beiden U-Glasrohren 3 cm. Das entspricht bei dem Maßstab von 1 : 200 einem Abstand in der Örtlichkeit von 6 m. Übliche Abstände zwischen zwei Energiesonden liegen im Bereich von 3 - 10 m.

3. AUSWERTUNG

Die Messungen zeigten deutliche Unterschiede hinsichtlich der Aufwärmzeit zwischen den verschiedenen Versuchsmodellen. Wenn man die längste Aufwärmphase des 90°- Versuchsmodells (Nr. 4) als Referenz zu den drei anderen Modellen nimmt,

so ergeben sich folgende Werte, Tab.1.

Je flacher die Energiesonden also im Versuchsmodell eingebaut sind, desto schneller erwärmt sich die Flüssigkeit im Versuchskreislauf.

- ▶ Die Energiesondenanordnung im Winkel von 60° bewirkt hinsichtlich der Energieeffizienz gegenüber vertikal angeordneten Sonden einen Vorteil von ca. 11 % \approx 10 %.
- ▶ 45°-Winkel: 14 % \approx 15 % höhere Energieeffizienz
- ▶ 30°-Winkel: 19 % \approx 20 % höhere Energieeffizienz

Die gewonnenen Erkenntnisse können aber nur eine Abschätzung über den Grad der gegenseitigen Beeinflussung im ebenen Modell (2D) liefern. Die energetischen Vorteile liegen im Bereich von 3 - 5 % pro 15° Spreizung. Zur Vereinfachung wurden die Energiesonden im Modellversuch nur in einer Ebene angeordnet. Für genauere Ergebnisse müsste die Sondenanordnung sternförmig, d.h. räumlich, erfolgen, so wie beim GRD-Verfahren üblich. Aus Gründen des Versuchsumfanges war dies im Rahmen der durchgeführten Arbeit nicht zu realisieren.

Aufheizversuch - Thermographieaufnahmen

Zur Nachweisführung, d.h. Evaluierung der Versuche zur Energieeffizienz und Temperaturverteilung, erfolgte nach Beendigung der Modellversuche mit dem Wärmeentzug eine Versuchsdurchführung am veränderten Modell. Die Modelle wurden in der Schnittebene der Erdwärmesonden in zwei Hälften zersägt und an Stelle der

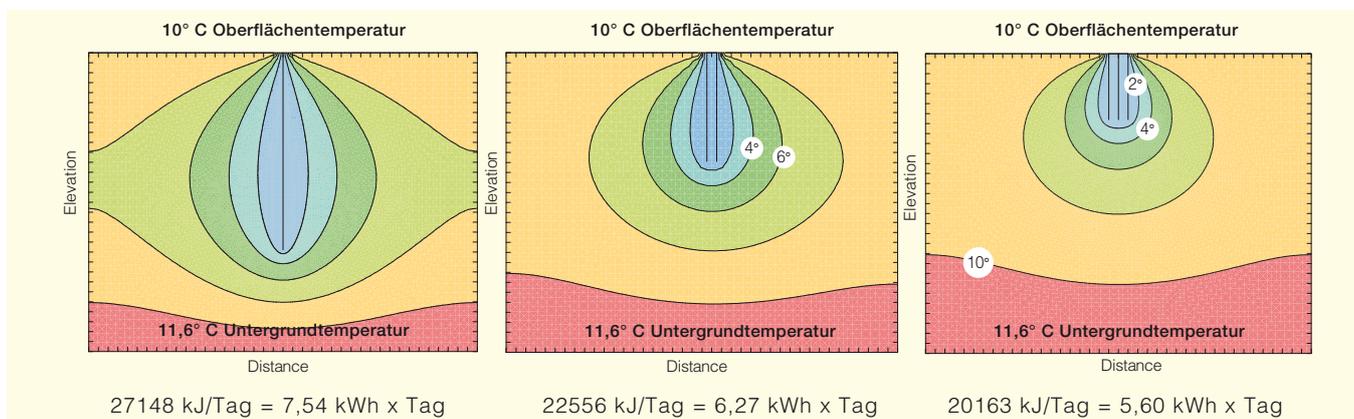


Abb.2: Temperaturverteilung im Modell für die Sondenkonfigurationen 1 x 99 m, 2 x 49,5 m (Linienkonfiguration: Abstand 5 m) und 3 x 33 m (Linienkonfiguration: Abstand 5 m; Isothermenabstand 2° K)

Glasröhrchen ein Heizdraht eingebaut. Im Gegensatz zu der ersten Versuchsreihe erfolgte jetzt eine Zufuhr von Energie, die im Versuch am zusammengefügt Modell aufgebracht wurde. Nach einer definierten Versuchszeit wurde das Modell wieder getrennt und es wurden daran Wärmebildaufnahmen hergestellt.

Die Ergebnisse zeigten, dass sich insbesondere eine Spreizung der Energiesonden positiv auf die thermische Energieeffizienz auswirkt. Die Wärmebilder zeigen eine Übereinstimmung der Laborversuche mit den Ergebnissen der numerischen

ren: $412.23 \text{ kJ/Tag/m/K} = 4,77 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 Lambda der Formation im gefrorenen Zustand: $470 \text{ kJ/Tag/m/K} = 5,44 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

- ▶ Volumetrische Wärmekapazität der Formation, wenn nicht gefroren: $2310 \text{ kJ/m}^3\text{K}$
- ▶ Volumetrische Wärmekapazität der Formation, wenn vollständig gefroren: $2080 \text{ kJ/m}^3\text{K}$

Im Sinne einer konservativen Bemessung der Modellierungsergebnisse berücksichtigte man ausschließlich die konduktive Wärmeleitung im Modellraum.

In der Steady-State Analyse wurden eine

die gesamte Bohrlochlänge von 99 m eine Wärmemenge von 7500 kWh x Jahr entzogen und dann die Bohrlochwandtemperatur bestimmt.

- ▶ Transiente Belastungen erfolgten taggenau über die Zeitdauer von 20 Jahren, es wurde jeder 30,42ste Rechenschritt aufgezeichnet. Die thermischen Stressoren wurden im Jahresgang wie folgt verändert:
- ▶ Die Oberflächentemperatur schwankte zwischen $1,48^\circ\text{C}$ und $23,84^\circ\text{C}$ im Jahresgang.
- ▶ Die spezifische Entzugsleistung der Einzelsonde über die Bohrlochwand schwankte zwischen 1416 kJ/Tag/m ($= 16,4 \text{ W/m}$) im Januar und 0 kJ/Tag/m in den Monaten Juni/Juli/August, gemäß der Defaultheizlastverteilung des Earth Energy Designers 3.14.

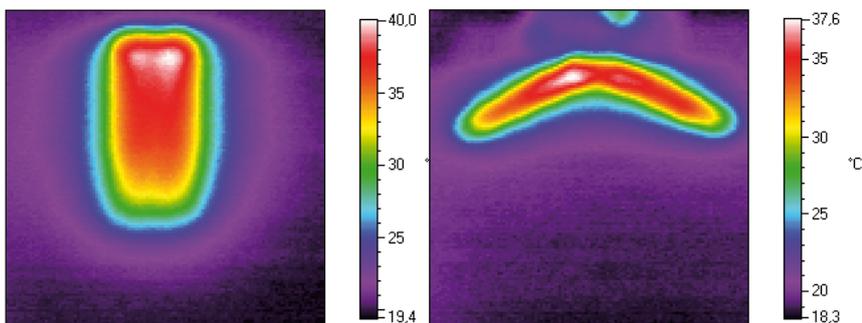


Abb.3: Thermographieaufnahme nach 30 min. für Modell 4 (90°) und Modell 1 (30°)

Modellierung nach Kapitel 5. Die gegenseitige Beeinflussung von vertikal angeordneten Energiesonden – auf der gesamten Länge – ist in Abb.3 erkennbar.

4. DAS VERHALTEN SCHRÄGER UND VERTIKAL ANGEORDNETER ERDWÄRMESONDEN IN DER FINITE-ELEMENTE-ANALYSE

Um die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen der Universität Siegen weiter zu evaluieren, wurden mittels des Softwarepaketes Temp/W 2007 Finite-Elemente-Analysen unterschiedlicher Sondenkonfigurationen als Gleichgewichtsanalysen (Steady-State) und transiente Analysen im „plan view“ (2D) durchgeführt. Der dazu gewählte Modellraum hatte eine Breite von 200 m, die Tiefe betrug 150 m, die Anzahl der Elemente im Modellraum ca. 30.000. Im Bereich der Wärmesenke (Bohrloch) wurde die Elementgröße stark verringert und den Dimensionen einer fiktiven Erdwärmesonde angepasst. Folgende einheitliche Geologie wurde dem Modellraum zugrunde gelegt:

- ▶ Quarzit mit 10 % Kluftwasservolumen
- ▶ Lambda der Formation, wenn nicht gefro-

ren: konstante Oberflächentemperatur von 10°C und eine konstante Untergrundtemperatur von $11,6^\circ\text{C}$ in 150 m Tiefe als Boundary Condition zugrundegelegt.

In der transienten Analyse wurden für die Oberflächentemperatur ganzjährige Messdaten für Potsdam aus 1 m und GOK aus dem Jahr 2006 festgelegt und über 20 Jahre zyklert (gemäßigt kontinentales Klima). Es wurden jeweils 2 Modellansätze mit den folgenden Sondenkonfigurationen durchgeführt:

- ▶ Vertikal: 1 x 99 m, 2 x 49,5 m im VDI-gemäßen Abstand von 5 m, 3 x 33 m, ebenfalls im VDI-gemäßen Abstand von fünf Metern
- ▶ Geneigte Bohrungen: 2 x 49,5 m im Abstandswinkel Azimuth von 180° bei einer Neigung aus der Horizontalen von 35° und 65°

Das Modellfeld wurde in allen Berechnungen einem definierten thermischen Stress unterworfen:

- ▶ die Bohrlochwandtemperatur verringerte man über die gesamte Bohrlochlänge um 10 K, um die entzogene Wärmemenge zu berechnen.
- ▶ Entlang der Bohrlochwand wurde über

5. ERGEBNISSE DER STEADY-STATE ANALYSE

Vertikal orientierte Erdwärmesonden

Mittels Steady-State Analyse wird die Aussage getroffen, wie sich die Parameter im Modellraum verändert haben, nachdem sich zwischen konstantem Energieeintrag (konstantem geothermischem und atmosphärischem Flux) und konstantem Energieaustrag (Erdwärmesonde im Dauerbetrieb über einen unendlichen Zeitraum) ein Fließgleichgewicht eingestellt hat.

Werden die Sonden als isothermes System betrachtet und die Bohrlochwandtemperatur konstant auf 0°C gehalten, ergeben sich im Modell für verschiedene Sondenkonfigurationen im Gleichgewichtszustand folgende Temperaturverteilungen: Abb.2.

Es zeigt sich, dass eine einzelne lange Sonde im thermischen Gleichgewichtszustand einen bis zu einem Drittel höheren Ertrag an Wärmeenergie liefert als jede Kombination mehrerer, evt. auch verkürzter Sonden.

Es überrascht daher auch nicht, dass der thermisch beeinflusste Bereich bei einer Einzelsonde flächenbezogen größer ist als bei einer Kombination von Einzelsonden.

Geneigt orientierte Erdwärmesonden

Es galten dieselben Bedingungen wie bei der Modellierung von vertikalen Erdwärmesondenkonfigurationen. Folgende Temperaturverteilungen stellten sich bei Erreichen des Gleichgewichtszustandes ein: Abb.4.

Zwei Erdwärmesonden im Winkel von 180° Azimuth bei 35° Neigung gegen die Horizontale im thermischen Gleichgewicht mit den Grenzbedingungen des Modellraumes könnten hiernach rechnerisch ca. 54% mehr Wärmeertrag liefern als zwei Erdwärmesonden, die mit 65° gegen die Horizontale geneigt sind (Winkelabstand im Azimuth in beiden Fällen 180°).

Ebenso ließ sich durch Steady-State Analysen zeigen, dass eine ähnlich hohe Effizienz wie bei geneigten Bohrungen erreicht werden kann, indem der Abstand kurzer vertikal orientierter Bohrungen zueinander deutlich vergrößert wird. Abb.5 fasst die Ergebnisse aus der Steady-State Analyse für vertikale und geneigte Sonden zusammen. Wichtig für die Abstandsbemessung im Vertikalfeld ist der Abstand der Mittelpunkte zweier gegeneinander geneigter Erdwärmesonden.

Wie CUI et al. (2005) mathematisch nachgewiesen haben, kann der Abstand zwischen den Mittelpunkten geneigter Sonden als das Abstandsmaß für die horizontale Distanz zwischen vertikalen Erdwärmesonden festgelegt werden, um ein vertikales Sondenfeld zu definieren, das die gleiche Effizienz wie eine radial geneigte Erdwärmesondenanordnung hat. Dies sei an einem Beispiel verdeutlicht: Der Mittenabstand betrüge z.B. bei zwei entgegengesetzt geneigten Sonden à 49,5 m Länge im Winkel von 35° ca. 40 m, bei 65° Einfallswinkel ca. 21 m. Um ein vertikales Erdwärmesondenfeld mit gleichem Wärmetauschvermögen zu konstruieren, müssten zwei vertikale Sonden in den entsprechenden Abständen zueinander angeordnet werden.

6. ERGEBNISSE DER TRANSIENTEN FINITE-ELEMENTE-ANALYSE

Zur vergleichenden transienten Analyse wurde die Oberflächentemperatur im Modell den Bodentemperaturen von Potsdam, wie gemessen im Jahr 2006 in 1 m u. GOK, über 20 Jahre tageweise zyklert.

Es wurden ausschließlich die zwei effizientesten Sondenkonfigurationen betrachtet, d.s. zwei geneigte Erdwärmesonden à 49,5 m mit einem Einfallswinkel von 000/35 bzw. 180/35 sowie eine vertikal orientierte Erdwärmesonde von 99 m Länge. Die über das Jahr dem Untergrund ent-

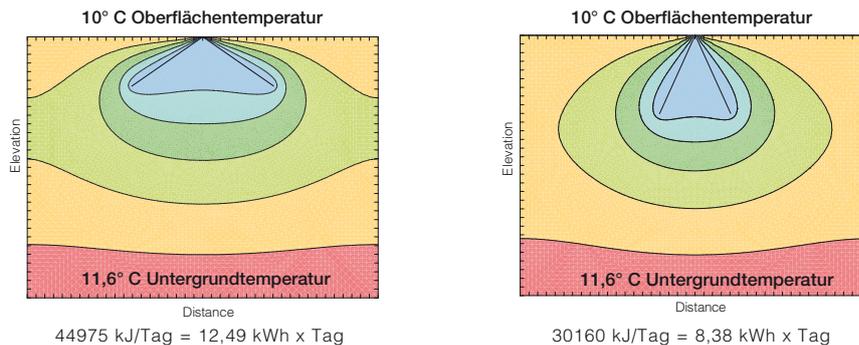


Abb.4: Temperaturverteilung im Modell für die Sondenkonfiguration 2 x 49,5 m bei 35° und 65° Neigung gegen die Horizontale (Isothermenabstand = 2° K)

zogene aufsummierte Wärmearbeit sollte 7500 kWh x Jahr im Modell betragen und wurde entsprechend der Default-Kurve für die Grundlastverteilung des EED 3.14 verteilt, Abb.6; der max. therm. Stress betrug 16,4 W/m. Die Temperaturschwankungen an der Bohrlochwand des geneigten Gewerks betragen im Jahresgang bis zu ca. 5,5° K, während die Bohrlochwand der Vertikalsonde Schwankungen von bis zu ca. 4° K unterworfen ist, Abb.7. Diese Unterschiede sind durch den jahreszeitlichen Gang der Bodentemperaturen in den oberen 20 m der Erdkruste erklärt; geneigte Erdwärmesonden sind über einen großen Teil der Bohrstrecke innerhalb dieser 20-m-Zone angeordnet. Der Einfluss der Phasenumwandlung von Wasser zu Eis und das daraus resultierende Freisetzen von Latentwärme macht sich bei der Vertikalsonde ab Ende des 5. Jahres bemerkbar (Tag 1825): die jährliche Schwankung der Bohrlochwandtemperatur halbiert sich vorübergehend, nachdem der Frost-/Taupunkt erstmalig unterschritten wurde. In den Folgejahren nimmt die Schwankungsbreite wieder zu, um ab Jahr 10 wieder die anfängliche Amplitude zu erreichen; das gesamte Formationswasser ist jetzt Eis. Die minimale Bohrlochwandtemperatur der Vertikalsonde fällt danach stetig weiter, ein Abflachen der Kurve ist bis zum Ende des Rechenzeitraumes nicht festzustellen. Die minimale Bohrlochwandtemperatur des geneigten Erdwärmegewerks fällt im Berechnungszeitraum niemals unter 0,3° C, aber auch hier ist nach 6 Jahren ein deutliches Abflachen der Temperaturkurve zu erkennen. Nach ca. 10 Jahren schwanken die Bohrlochwandtemperaturen stetig mit gleicher Amplitude weiter, ohne dass die Kurve weiter fällt. Selbst

nach einem Rechenzeitraum von 20 Jahren wird die 0° C-Marke nicht unterschritten.

7. SCHLUSSFOLGERUNG

Die experimentellen Untersuchungen am Institut für Geotechnik der Universität Siegen ergaben, dass flach geneigte Erdwärmesonden im Vergleich zu vertikal orientierten Erdwärmesonden bei gleicher Bohrlochwandtemperatur einen wesentlich höheren Wärmeertrag generieren können. Diese Ergebnisse stehen in Einklang mit denen aus der Steady-State Analyse für zwei im Fallwinkel von 65° gegeneinander geneigte Erdwärmesonden (delta Azimuth = 180°), wonach bei geneigten Erdwärmesonden der Vorteil in der Energieeffizienz gegenüber einer vertikalen Sondenanordnung mindestens 11% beträgt.

Diese Aussage kann aber dahingehend fortgeschrieben werden, dass bei flacheren Neigungswinkeln die Effizienzwerte im Rechenmodell, d.h. der geothermischen Nutzung, durchweg höher sind, als im Laborexperiment belegbar ist. Diese Abweichungen resultieren aus Randbedingungen im Modellversuch am ebenen 2D Modell und den Randbedingungen zu den Versuchszeiten (Kurzzeitversuch), zu zyklischen Langzeitbetrachtungen bei der numerischen Modellierung.

Beide Modellbetrachtungen stimmen aber – trotz der Differenz zwischen den Ergebnissen infolge der abweichenden Randbedingungen – dahingehend überein, dass es aus Gründen der Energieeffizienz grundsätzlich sinnvoller ist, mehrere kurze geneigte Bohrungen anstelle einer langen Vertikalbohrung abzuteufen.

Ursache ist die tendenziell erhöhte Bohrlochwandtemperatur. Diese ist vorteilhaft für die Betriebskosten einer Wärmepumpe,

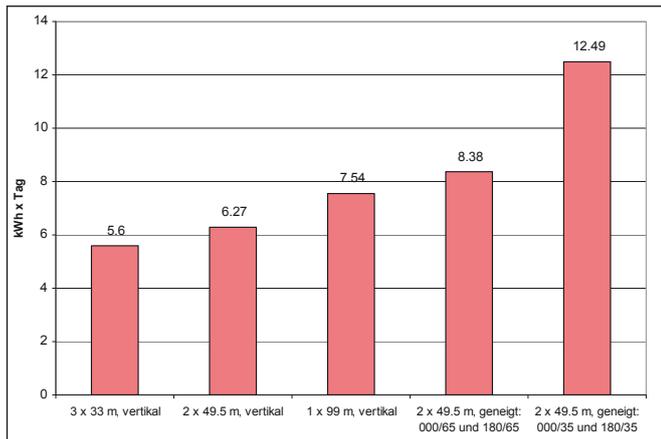


Abb.5: Vergleich der Ergebnisse der entzogenen Wärmearbeit (kWh x Tag) in unterschiedlichen Sondenkonfigurationen im Finite Elemente Modell

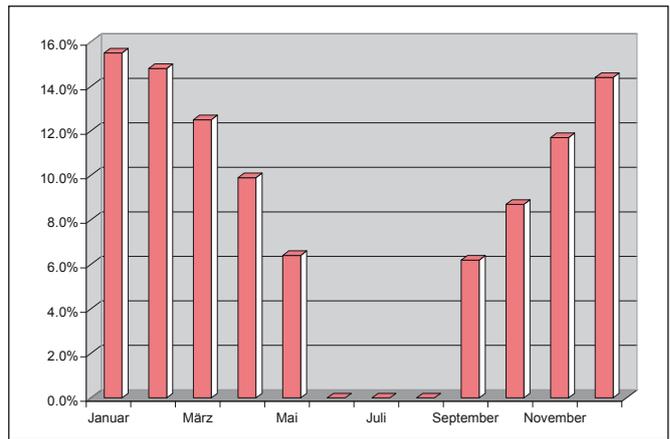


Abb.6: Verteilung der monatlichen Wärmeentzugsarbeit in Prozent

denn pro °K erhöhter Soletemperatur fallen die Betriebskosten um ca. 4%. Wirtschaftlichkeitsberechnungen zeigen, dass über die Dauer von 20 Jahren auf diesem Wege Einsparungen bei den Betriebskosten zwischen ca. 1500 € und 6000 € theoretisch zu verwirklichen sind - ein Betrag, der ca. 30% - 50% der aufgewendeten Bohrkosten kompensiert. Die Berechnungen haben aber auch klar gezeigt, dass mehrere kurze vertikal orientierte Bohrungen tendenziell energetisch ungünstiger als eine lange Vertikalbohrung sind, wenn die Bohrabstände nach VDI 4640 ausgelegt werden. Diese Aussage deckt sich mit den Erfahrungen aus der Praxis. Trotzdem kann der Planer ein Feld kurzer Erdwärmesonden hocheffizient umsetzen, wenn er Simulationssoftware, wie z.B. den Earth Energy Designer, nutzt. Leider sind dafür in der baubetrieblichen Praxis nur in seltenen Fällen entsprechend große Sondenabstände für das Bohrunternehmen realisierbar, da die zur Verfügung stehende Grundstücksfläche i.d.R. nicht ausreicht. In der baubetrieblichen Praxis bleibt daher meist nur die Lösung, von einem zentralen Bohrpunkt aus Erdwärmesonden geneigt in den Untergrund zu treiben. Mit dem GRD-Verfahren bietet der Lennestädter Maschinenbauer Tracto-Technik dafür eine technisch und wirtschaftlich erprobte Lösung.

Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Richard Herrmann,
 Institut für Geotechnik Universität Siegen
herrmann@fb10.uni-siegen.de
 Dipl.-Geologe Andreas Hagedorn MBA,
 Fachbereichsleiter, Tracto, Siegen,
 Foto / Grafiken: Tracto-Technik
www.tracto-technik.de

Literatur

- [1] BIALY, H., OLBRICH, M. (1975): Optimierung – eine Einführung mit Anwendungsbeispielen. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1. Auflage.
- [2] BITTERLICH, S., KNABNER, P. (2002): An Efficient Method for Solving an Inverse Problem for the Richards Equation. Institute for Applied Mathematics, Friedrich-Alexander Universität, Erlangen-Nürnberg.
- [3] CARRERA, J.; ALCOLEA, A.; MEDINA, A.; HIDALGO, J.; SLOOTEN, L. J. (2005): Inverse problem in hydrogeology. Hydrogeological Journal 13, Springer-Verlag, S. 206 – 222.
- [4] CUI, L., SHENG, D. (2006): Genetic algorithms in probabilistic finite element analysis of geotechnical problems. Computers and Geotechnics, Vol. 32, pp. 555-563.
- [5] DAHLE, P., KOLBJORNSEN, O., ABRAHAMSEN, P. (2004): When can shape and scale parameters of a 3D variogram be estimated? Geostatistics Banff 2004. Quantitative Geology and Geostatistics, Vol. 14, Springer Netherlands, pp. 949-958
- [6] DUAN, Q. Y., GUPTA, V. K., SOROOSHIAN, S. (1993): Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization. Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 76, No. 3, pp. 501 - 521.

8. SCHRIFTTUM

- CUI, P.; YANG, H.; FANG, Z. (2005): „Heat transfer analysis of ground heat exchangers with inclined boreholes“. Applied Thermal Engineering 26 (2006), pp. 1169-1175,
- ROSENTHAL, M. (2008): „Vergleichende Untersuchung zur Energieeffizienz von vertikal und schräg angeordneten, geschlossenen Wärmeübertragungssystemen (Erdwärmesonden) auf der Grundlage von Modellversuchen“; Diplomarbeit am Institut für Geotechnik, Prof. Dr.-Ing. Richard Herrmann
- HERRMANN, R. A. (2010): Vorlesungen und Skriptum „Geotechnik“, Universität Siegen, Institut für Geotechnik, Eigenverlag

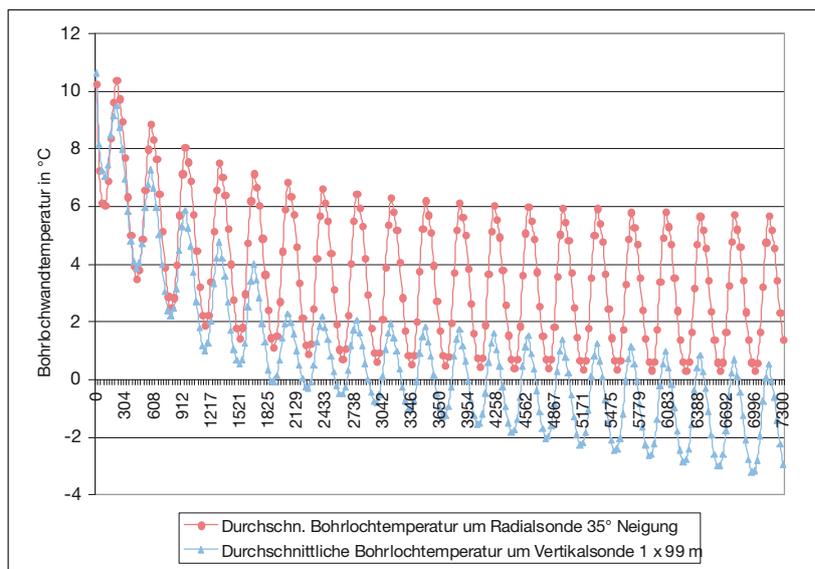


Abb.7: Vergleich der gemittelten Bohrlochwandtemperaturen zwischen einer vertikal orientierten Erdwärmesonde mit 99 m Länge und zwei Radialbohrungen mit jeweils 49,5 m Länge, die im Azimuth einen Abstandswinkel von 180° und eine Neigung gegen die Horizontale von 35° haben. Die Zahlen auf der x-Achse bezeichnen die Tage, die Zahlen auf der y-Achse die über die Bohrung gemittelte Wandtemperatur in °C. Jahresentzugsarbeit 7500 kWh (0 - 16,4 W/m spezifische Entzugsleistung)