

UNTERSUCHUNGEN ZUR OPTIMIERUNG DES EINSATZES VON ERDWÄRME- SONDEN BEI DER NUTZUNG ERDGEKOPPELTER WÄRMEPUMPEN

Rolf Katzenbach, Frithjof Clauß, Thomas Waberseck

Technische Universität Darmstadt, Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik

Petersenstr. 13, 64287 Darmstadt

Tel: 06151-162149, Fax: 06151-166683

E-Mail: katzenbach@geotechnik.tu-darmstadt.de, Web: www.geotechnik.tu-darmstadt.de

KURZFASSUNG

Für die Kapazität und Leistung von erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen und von saisonalen, geothermischen Pendelspeichern mit Erdwärmesonden sind die Beschaffenheit des anstehenden Baugrundes und die Grundwasserverhältnisse sowie die thermischen Eigenschaften des bei der Herstellung der Erdwärmesonden verwendeten Verpressmaterials von signifikanter Bedeutung. Am Institut und der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt werden umfangreiche Untersuchungen zu diesen Einflussparametern durchgeführt mit dem Ziel, die Dimensionierung von erdgekoppelten Wärmepumpen- bzw. Pendelspeichersystemen wirtschaftlich zu optimieren.

ABSTRACT

The capacity and the performance of ground source heat pumps and seasonal thermal storage systems with borehole heat exchangers depends on the encountered subsoil and the groundwater conditions and furthermore on the thermal properties of the grouting material used for conclusive backfilling the annular space after installing the heat exchanger pipes in the borehole. Intensive investigations are carried out at the Institute and the Laboratory of Geotechnics of TU Darmstadt with the aim of an economical optimisation of the dimensioning of ground source heat pumps and seasonal thermal storage systems.



Abbildung 1 Einbau und Verpressen einer Erdwärmesonde

EINLEITUNG

Angeichts der dringend gebotenen Senkung der Emissionen von CO₂ und anderen Treibhausgasen und der weltweiten Suche nach umwelt- und ressourcenschonenden, regenerativen Energien bietet die energetische Nutzung des Baugrundes eine zukunftsweisende Alternative zu konventionellen Energiesystemen. Insbesondere im Bereich der Gebäudetemperierung, die derzeit rund 40 % des jährlichen Energiebedarfs in Deutschland verschlingt, bietet die thermische Nutzung des Untergrundes als regenerative Energiequelle ein enormes Einsparpotential.

Eine Grundvoraussetzung für den nachhaltigen Betrieb von Erdwärmesondenanlagen ist die richtige Dimensionierung und die fachgerechte Herstellung der zum Energietransfer zwischen Baugrund und Gebäude in den Baugrund eingebrachten Sonden (Abbildung 1). Dabei sind die wesentlichen Einflussparameter für die maximal erreichbare Entzugsleistung einer Erdwärmesonde einerseits die thermischen Eigenschaften des anstehenden Baugrundes, die ganz erheblich von den Grundwasserbedingungen beeinflusst werden, und andererseits die thermische Anbindung der Erdwärmesonde an den umgebenden Baugrund. Die hierzu nach dem Einbringen der Erdwärmesonde ins Bohrloch hohlraumfrei einzupressende Bohrlochverdümmung hat die Aufgabe, nach dem Aushärten eine dichte, dauerhafte, physikalisch und chemisch stabile Einbindung der Erdwärmesonde in den umgebenden Baugrund zu gewährleisten (VDI 4640, Blatt 2, 2001). Hat das verwendete Bohrlochverdümmmaterial eine geringere thermische Leitfähigkeit als der umgebende Baugrund, führt dies aufgrund des erhöhten thermischen Bohrlochwiderstands R_b zu merklichen Leistungsverlusten der Anlage (Abbildung 2). Zur Optimierung von Erdwärmesondenanlagen werden daher immer häufiger Verdämmmaterialien eingesetzt, die thermisch verbesserte Eigenschaften besitzen.

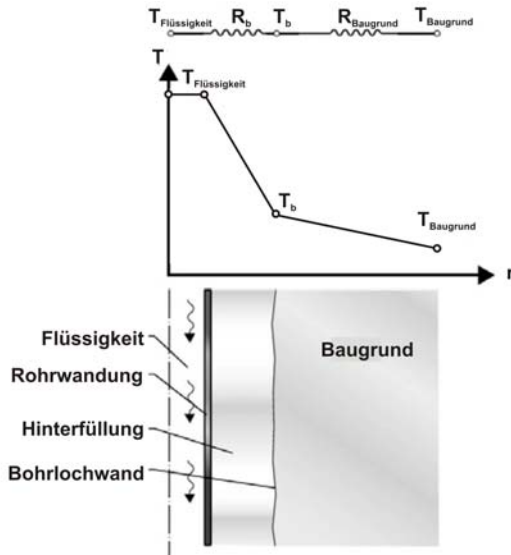


Abbildung 2 Temperatursprung zwischen Wärmeträgerflüssigkeit in der Sonde und Bohrlochwand infolge Bohrlochwiderstand R_b (nach Gehlin, 2002)

GRUNDLAGEN DER THERMISCHEN BAUGRUNDNUTZUNG

Die thermische Nutzung des Baugrundes kann auf zwei Arten erfolgen: Zum einen durch die saisonale Speicherung von thermischer Energie im Boden – z.B. mit Hilfe des Saisonalen Thermospeichers, auch Pendelspeicher genannt – wobei die thermodynamische Trägheit des Bodens ausgenutzt wird, und zum anderen durch die Nutzung des natürlichen Wärmepotentials des Bodens als Wärmequelle, sofern die thermische Regeneration des Bodens ausreichend ist (Brandl et al., 2006)

Um dem Boden Energie entziehen zu können, wird mit Hilfe einer durch die Erdwärmesonde gepumpten Wärmeträgerflüssigkeit ein künstlicher Temperaturgradient im Boden erzeugt. Infolge dieses Gradienten kommt es zu Wärmetransportvorgängen in Richtung des niedrigeren Temperaturniveaus. Die wesentlichen Wärmeübertragungsmechanismen sind dabei:

- Konduktion (Wärmeleitung)
- Konvektion
- Dispersion

Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl weiterer Mechanismen, die zu einem Wärmetransport im Boden führen können, wie beispielsweise Wärmestrahlung, Verdunstungs- und Kondensationsprozesse, Frost- und Tauprozesse oder Ionenaustauschprozesse. Im Vergleich zu den o.g. Mechanismen sind diese aber bei der Beschreibung des Wärmetransports im Boden von untergeordneter Bedeutung (Ennigkeit, 2002).

Auf Grundlage einer Wärmebilanzbetrachtung an einem Kontrollvolumen lässt sich die Änderung der inneren Energie eines Bodenkörpers pro Zeiteinheit

und somit der Wärmetransport im Boden unter Beachtung der Wärmeübertragungsmechanismen Konduktion, Konvektion und Dispersion sowie Wärmequellen mit folgender Differentialgleichung beschreiben (Katzenbach et al., 2002):

$$\underbrace{\text{div}(\lambda \text{ grad } T)}_{\text{Konduktion}} - \underbrace{(\rho \cdot c)_w \text{ div}(v \cdot T)}_{\text{Konvektion}} + \underbrace{\text{div}(D_\lambda \text{ grad } T)}_{\text{Dispersion}} + \underbrace{\dot{Q}_i}_{\text{Wärmequellen}} = \rho \cdot c \underbrace{\frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{zeitl. Änderung}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right]$$

mit:

$$\rho \cdot c = n(\rho \cdot c)_w + (1-n)(\rho \cdot c)_s$$

- λ Wärmeleitfähigkeit des Bodens [W/(m·K)]
- T Temperatur des Bodens [K]
- $(\rho \cdot c)_w$ volumetrische Wärmekapazität des Grundwassers [J/(m³·K)]
- v Filtergeschwindigkeit des Wassers [m/s]
- D_λ Wärmedispersionskoeffizienten des Bodens [W/(m·K)]
- \dot{Q}_i Wärmequellen [W/m³]
- ρ Dichte [kg/m³]
- c spezifische Wärmekapazität des Bodens [J/(kg·K)]
- $\rho \cdot c$ volumetrische Wärmekapazität des Bodens [J/(m³·K)]
- t Zeit [s]
- n Porenanteil [-]
- $(\rho \cdot c)_s$ volumetrische Wärmekapazität der festen Phase (Korngerüst) [J/(m³·K)]

EINFLUSSPARAMETER DER ENTZUGSLEISTUNG

Wie aus der o.g. Gleichung ersichtlich, hat das Grundwasser einen erheblichen Einfluss auf den Wärmetransport im Baugrund und somit auf die erzielbare Entzugsleistung von Erdwärmesonden. Aufgrund der im Vergleich zur Bodenluft rund 20-mal größeren Wärmeleitfähigkeit λ und rund 4-mal größeren spezifischen Wärmekapazität c von Wasser eignen sich wassergesättigte Bodenschichten besonders gut zur thermischen Nutzung.

Neben der Sättigung des Bodens sind die Strömungsverhältnisse des Grundwassers bei der Planung und Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen zu beachten. Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit wird die in den Baugrund eingebrachte Energie zunehmend verschleppt, so dass eine saisonale Speicherung dieser Energie nicht oder nur bedingt möglich ist. In einem solchen Fall kann stattdessen das vorhandene Wärmepotential des nachströmenden Grundwassers genutzt werden. Numerische Untersuchungen haben gezeigt, dass die Grenze, bis zu der eine saisonale Speicherung ohne

größere Verluste wirtschaftlich sinnvoll ist, etwa bei 0,05 m/d liegt. Abbildung 3 zeigt das Ergebnis der numerischen Simulation einer Einzelsonde bei einer Grundwassergeschwindigkeit von 0,2 m/d. Gut zu erkennen ist, dass die im Winter in den Baugrund eingebrachte Kälte vom Grundwasser konvektiv abtransportiert wird, so dass diese Kälte im Sommer nicht zur Gebäudeklimatisierung zurückgewonnen werden kann. In einem solchen Fall ist die Anordnung der Erdwärmesonden nicht wie für einen Speicher kompakt zu wählen, sondern möglichst offen, orthogonal zur Strömungsrichtung, so dass eine möglichst große Entzugsfläche vom nachströmenden Grundwasser umströmt werden kann.

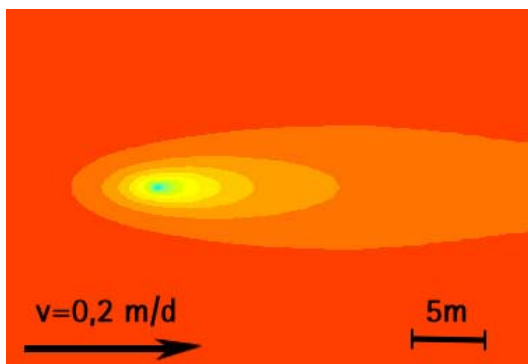


Abbildung 3 FE-Simulation einer Erdwärmesonde nach Winterbetrieb

Zur vergleichenden Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Verdämmmaterialien auf die Entzugsleistung von Erdwärmesonden wurden im Rahmen eines F+E-Vorhabens in einem Feldversuch zwei Erdwärmesonden in einem Abstand von 6 m in den Baugrund eingebracht und verpresst, wobei eine Sonde mit einem Standardmaterial, die zweite Sonde mit einem thermisch verbesserten Material verpresst wurde. Die Versuchsergebnisse zeigen eine signifikante Verbesserung der Entzugsleistung bei Verwendung des thermisch verbesserten Hinterfüllmaterials. Im Vergleich zum Standardprodukt kann beim thermisch verbesserten Hinterfüllmaterial aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung die Energie schneller und aus einem größeren Einflussbereich entzogen werden. Diese Ergebnisse decken sich mit Forschungsergebnissen der Universität Karlsruhe (Herrmann et al., 2004).

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit Hilfe geothermischer Energie lassen sich Gebäude nachhaltig und wirtschaftlich temperieren. In Feldversuchen wurde erwartungsgemäß qualitativ bestätigt, dass der Einsatz thermisch verbesserter Verpressmassen eine signifikante Verbesserung des Wärmeentzugs bei Erdwärmesonden bewirken kann.

In weiteren experimentellen und numerischen Untersuchungen sollen die bisherigen Ergebnisse verifiziert werden und weitere Erkenntnisse, vor allem über die gegenseitige Beeinflussung von Erdwärmesonden, gewonnen werden.

LITERATUR

- Brandl, H., Adam, D., Markiewicz, R. 2006. Ground-Sourced Energy Wells for Heating and Cooling of Buildings. Acta Geotechnica Slovenica Vol. 3, 2006/1, Pages 5-27
- Ennigkeit, A. 2002. Energiepfahlanlagen mit Saisonalem Thermospeicher. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft Nr. 60
- Gehlin, S. 2002. Thermal Response Test – Method Development and Evaluation, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Sweden
- Herrmann, V.J., Ruesgen, M.I., Steger, H., Zorn, R., Haus, R., Schramedei, R., Leyens, D. 2004. Technikumsversuch zum Vergleich thermisch verbesserter und herkömmlicher Hinterfüllmassen für un tiefe Erdwärmesonden. OTTI-Profiforum "Oberflächennahe Geothermie", Garching, 17.-18.02.2004, S. 203-208
- Katzenbach, R., Adam, D., Ennigkeit, A., Waberseck, T. 2002: Innovationen bei der Nutzung geothermischer Energie durch erdberührte Bauwerke, wie z.B. Pfahlgründung mittels Energiepfählen. Geothermie-Symposium Bremerhaven `Erdwärme – Energieträger der Zukunft`, 25. Nov. 2002, 11S.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2001. VDI-Richtlinie 4640 – Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, Beuth-Verlag, Berlin