

Optimierungspotential bei der Planung und Auslegung eines Erdwärmesondenfeldes

Optimizing potential for planning and design of borehole heat exchanger field

Katharina Albert¹, Kai Zosseder¹, Marcellus Schulze², Simone Nickel³

¹ M.Sc. Katharina Albert, Lehrstuhl für Hydrogeologie, TU München, k.albert@tum.de

¹ Dr. Kai Zosseder, Lehrstuhl für Hydrogeologie, TU München, kai.zosseder@tum.de

² Dipl.-Geol. Marcellus Schulze, Bayerisches Landesamt für Umwelt, marcellus.schulze@lfu.bayern.de

³ Dipl.-Geol. Simone Nickel, GeoUmweltTeam GmbH, s.nickel@geoumweltteam.de

Zusammenfassung

Bei geothermischen Anlagen kann eine Abkühlung des Untergrundes durch Wärmeentzug zu einer Leistungssenkung dieser Anlagen führen. Um eine effizientere Nutzung geothermischer Energie zu ermöglichen, ist ein verbessertes Verständnis des Wärmetransportprozesses notwendig. Dafür werden detaillierte numerische Modelle einzelner und mehrerer Erdwärmesonden in einem Sondenfeld mit dem Program FEFLOW® erstellt, die es ermöglichen, die Wechselwirkung zwischen Sonde, Bohrloch und Erdreich zu analysieren. Bei bestimmten natürlichen und technischen Rahmenbedingungen, können sich die Erdwärmesonden thermisch gegenseitig beeinflussen. Die Schwerpunkte liegen bei der Simulation der Frost-Tau-Bedingungen und die Untersuchung des Einflusses salinärer Wässer auf den Wärmetransportprozessen. Durch Variation einzelner Parameter (Sondendesign) werden die Optimierungsanalyse durchgeführt. Die Kopplung des Grundwassermodells mit TRNSYS ermöglicht die Modellierung und Optimierung des gesamten Energiekreislaufs. Die Bearbeitung des Projekts wird von der Stiftung Nagelscheider gefördert.

Schlüsselworte: Geothermie, Erdwärmesonde, Parameteroptimierung, numerische Modellierung, Wärmetransportprozess, FEFLOW®, TRNSYS

Abstract

The cooling of the subsurface due to heat extraction reduces the performance of a geothermal system. For an efficient use of geothermal energy, a better understanding of the subsurface heat transport processes is obtained by establishing precisely configured numerical models of a single and multiple double U-tube borehole heat exchangers (BHE) to observe the interaction between the BHE, the borehole and the surrounding ground. The model of a single BHE is fully discretized, whereas the model of multiple BHEs consists of fully discretized ground with 1D line source BHE. Core analysis and borehole logging were performed for detailed geological and hydrogeological parameterization. The parameters for the design of the BHE were adopted from the geothermal system at Ludwigshöhe, Kempten (Allgäu). The numerical modelling has its focus on the simulation under freeze-thaw-conditions. Starace (2011) demonstrates the expansion of the cold plume using inlet temperature of -1°C. After 11 days, the 0°C-Isotherme reaches the borehole wall. Increase of inlet temperature leads to shrinking of the plume. Further operation of the system below the freezing point causes further expansion of the plume. Hence, it is necessary to provide a sufficient recovery period for the plume to form back. This effect has an impact on neighboring BHEs, since thermal interaction exists due to small spacing between the BHEs (Kurevija et al., 2012). Furthermore, the effect of salinity on the conductive heat transport process will be analyzed, since the subsurface of the study area consist of saline water. Increase of Salinity leads to decrease of thermal conductivity (Abu-Hamdeh and Reeder, 2000; Sharqawy, 2013) In consideration of the optimization potential, variation of the variable parameters (design of the BHE) will be examined to use the geothermal energy to its full potential. According to the energy demand, the overall energy circuit can be modelled by coupling FEFLOW® with TRNSYS. The processing of this project is funded by the Stiftung Nagelscheider.

Keywords: geothermal energy, borehole heat exchanger, parameter optimization, numerical modeling, heat transport process, FEFLOW®, TRNSYS

1 Einleitung

Die Nutzung geothermischer Wärme für Kühl- und Heizzwecke ist in Süddeutschland aufgrund günstiger geologischer Bedingungen besonders attraktiv. Bestehende geothermische Anlagen können allerdings das vorhandene thermische Potential trotz fortschrittlicher Entwicklung der Erdwärmesonden nicht voll ausschöpfen. Eine Hürde für die

Weiterentwicklung dieser Anlagen besteht in der Ungewissheit über die Auswirkungen von Temperaturänderungen im Boden, die durch Wärmeentzug hervorgerufen werden. Hierbei mangelt es nicht an Grundkenntnissen, sondern an einer detaillierten numerischen Simulation des Problems (AL-KHOURY ET AL., 2005). Der Fokus dieser Arbeit liegt daher auf der numerischen Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Bodenmatrix und Erdwärmesonde, sowie



der thermischen Beeinflussung benachbarter Sonden in einem Erdwärmesondenfeld während des Betriebs (KUREVIJA ET AL., 2012). Zudem soll der Einfluss der Salinität des Untergrunds auf den konduktiv-dominierten Wärmetransportprozess untersucht werden. Bisher veröffentlichte Modellierungen von Erdwärmesonden basieren oft auf stark vereinfachte Annahme eines homogenen Untergrunds (HECHT-MENDÉZ ET AL., 2013). In dieser Arbeit werden anhand präziser Parametrisierung die Grundparameter für die Simulation ermittelt, um daraus ein kalibriertes und verifiziertes Modell zu erstellen. Durch Variation der einzelnen Parameter am kalibrierten Modell werden Optimierungsanalysen der Ausbau- und Randparameter durchgeführt. Die Bearbeitung des Projekts wird von der Stiftung Nagelscheider gefördert.

2 Datengrundlage

Die Grundparameter für den Modellansatz stammen von dem Untersuchungsgebiet „Ludwigshöhe“, Kempten (Allgäu) (Abb. 1). Zurzeit werden dort sechs Wohnhäuser (Abb. 1, rechts, grün) mit insgesamt 37 Doppel-U-Erdwärmesonden (Abb. 1, rechts, Kreise um den grünen Häusern) beheizt. Die Sonden sind jeweils 150 m lang und dringen in die Sand- und Mergelsteine der Unteren Süßwassermolasse ein. Es wurden vertikal differenzierte Temperaturmessensoren sowohl direkt an einer Erdwärmesonde in den Tiefen von 2, 4, 6, 40, 100 und 150 m unter GOK installiert, um die Temperaturverhältnisse im Nahfeld der Sonde zu beobachten, als auch an einer Grundwassermessstelle in den Tiefen von 68, 102 und 135 m unter GOK, um die integrativen Auswirkungen des Sondenfeldes auf die Untergrundtemperatur zu analysieren. Anhand des gewonnenen Bohrkerns werden die thermischen Eigenschaften des Untergrunds detailliert bestimmt. Dazu gehören die Bestimmung der Porosität, der Permeabilität, der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins mit dem Thermal Conductivity Scanner (TCS) und der spezifischen Wärmekapazität anhand eines Kalorimeters. Die Bestimmung der Salinität dient zur Bewertung der Auswirkung des salinaren Wassers auf den Wärmetransportprozess. Ein Enhanced Geothermal Response Test (EGRT) wurde zusätzlich zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften des Bohrlochs durchgeführt.

3 Numerische Modellierung

Die Erstellung des numerischen Modells erfolgt unter Anwendung des finite Elemente basierten Programms FEFLOW® (DIERSCH ET AL., 2011). Die Modellierung ermöglicht eine Vorhersage der Temperaturentwicklung im Untergrund unter vorgegebenen Bedingungen. In der großflächigen Betrachtung wird die Erdwärmesonde als 1D-Linienquelle dargestellt. Dieser Ansatz ermöglicht eine geringere Rechenzeit als es mit einer voll-diskretisierten Erdwärmesonde möglich wäre und liefert realitätsnahe Ergebnisse (DIERSCH ET AL., 2011B), lässt jedoch nicht die Betrachtung des detaillierten Wärmeübertrags im Ausbau und im unmittelbaren Nahfeld der Sonde zu. Daher wird für die Nahfeldbetrachtung das Modell einer voll-diskretisierten Erdwärmesonde aufgebaut. Die Verwendung tatsächlich ermittelten Bodenparameter führt zu einem verbesserten Verständnis der thermischen Prozesse im Untergrund (CHOI ET AL., 2013). Für die Aufstellung des Modells werden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Inhomogener Untergrund, d.h., geologische und hydrogeologische Gegebenheiten werden in dem Modell differenziert
- Konstante thermische Eigenschaften aller Materialien innerhalb des Untersuchungsbereichs
- Übergangswiderstand zwischen Bohrloch und Boden
- saisonalen Schwankungen der Bodentemperatur (besonders im oberflächennahen Bereich) sowie Schwankungen durch Wärmeentzug durch die Erdwärmesonde (Nahfeld der Erdwärmesonde)
- Instationärer Zustand innerhalb des Bohrlochs
- Gleiche Fließgeschwindigkeit des Wärmeträgerfluides in allen Sonden

Anhand des oben beschriebenen Modelaufbaus wird das Verhalten einer Einzelnen, sowie mehrerer Erdwärmesonden im Sondenfeld numerisch modelliert.

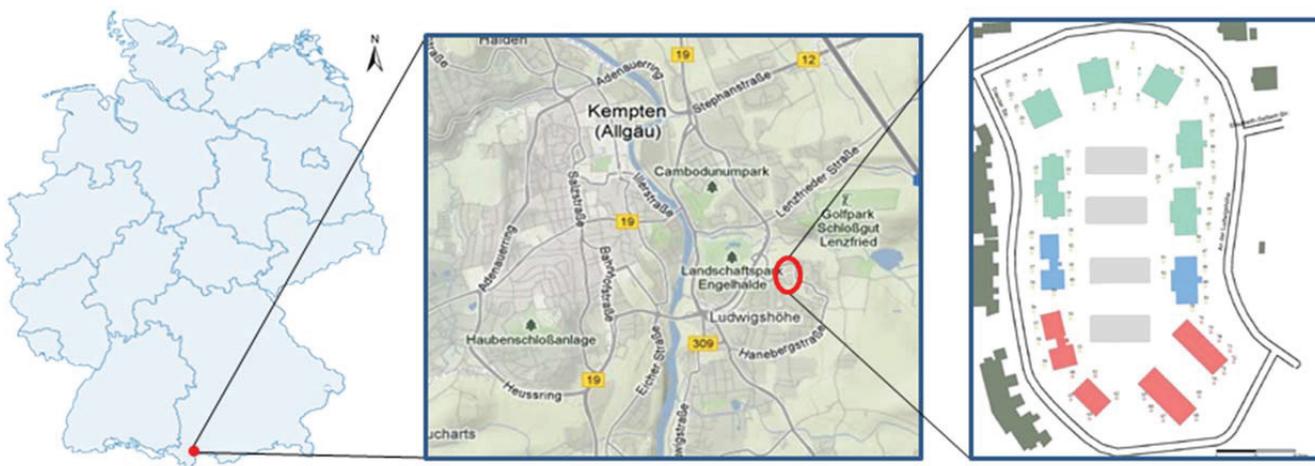


Abb. 1: Die detailliert erfassten Grundparameter stammen aus der Geothermieanlage an der „Ludwigshöhe“, Kempten (Allgäu).

Fig. 1: The basic parameters for the detailed modell are based on the geothermal system from “Ludwigshöhe”, Kempten (Allgäu).

3.1 Simulation des Frost-Tau-Wechsels im Nahfeld einer Erdwärmesonde

Die Simulation von Frost-Tau Bedingungen dient zur Analyse der thermischen Entwicklung im Untergrund bei einer Vorlauftemperatur von -1°C in der Hauptheizsaison. Die Vorlauftemperatur kann unter 0°C betragen, da das Wärmeträgerfluid aus einer Glykol-Wasser-Mischung besteht. Bei mehrmaligen Frost- und Auftauprozessen können Risse im Verpressmaterial und Sonde entstehen, die zum einen die Funktionsweise der Anlage beeinträchtigen und zum anderen das Grundwasser bzw. den Boden belasten (Müller, 2009). In Abbildung 2 (STARACE, 2011) wird beispielhaft die Ausbreitung einer Kältefahne (0°C -Isotherme) bei einer voll-diskretisierten Sonde dargestellt. Nach 11 Tagen erreicht die Kältefahne die Bohrlochwand. Die Kältefahne zieht sich zurück, wenn die Vorlauftemperatur erhöht wird (über 0°C). Ist in den Sommermonaten keine ausreichende Regenerierungsphase vorhanden, so kann die Kältefahne sich nicht zurückbilden. Bei weiterem Betreiben der Anlage mit einer Vorlauftemperatur unter 0°C dehnt sich die Kältefahne weiter aus und führt zu einem deutlicheren Abkühlen des Untergrunds.

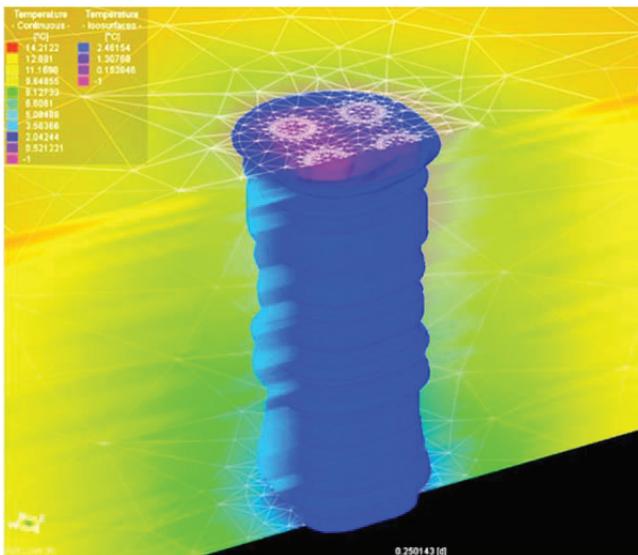


Abb. 2: Ausdehnung der 0°C -Isotherme (blau) in einer Doppel-U-Sonde nach 11 Tagen bei einer Vorlauftemperatur von -1°C (Starace, 2011).

Fig. 2: Expansion of the 0°C -Isotherme (blue) in a Double-U-Pipe after 11 days with -1°C inlet temperature (Starace, 2011).

3.2 Optimierungsbetrachtung durch Variation der Ausbau- und Randparameter

Bei der Planung einer Geothermieanlage sind die geologischen sowie hydrogeologischen Parameter festgelegt. Die Optimierungsmöglichkeiten liegen also beim Sondendesign und in der Art des Verpressmaterials (BAUR, 2012). Der Optimierungsansatz erfolgt durch Variation einzelner Parameter: Wärmeleitfähigkeit des Verpressmaterials, Durchflussrate des Wärmeträgerfluids, Grundwassergefälle und Schenkelabstand. Abbildung 3 zeigt die Änderung der Temperaturspreizung in Abhängigkeit der Änderung der jeweiligen Parameter. Die Grundwasserhöhe und die Fließgeschwindigkeit der Sohle in der Erdwärmesonde haben

hier die deutlicheren Auswirkungen auf die Effizienz der Erdwärmesonde als Veränderungen des hydraulischen Gradienten oder der Wärmeleitfähigkeit des Verpressmaterials.

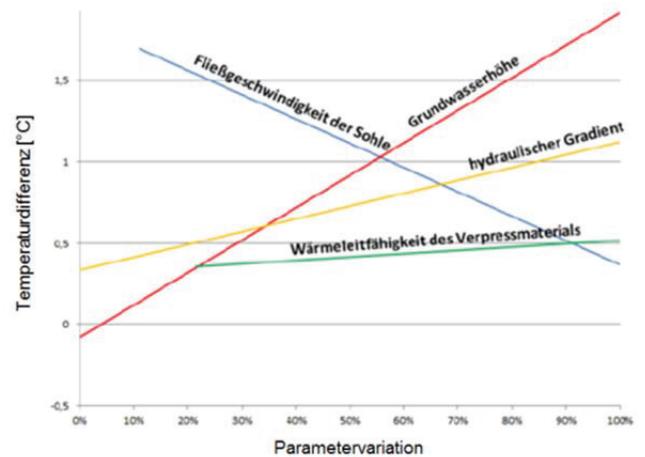


Abb. 3: Temperaturdifferenz durch Variation einzelner Parameter (STARACE, 2011).

Fig.3: Temperature difference due to individual variation of the parameter (STARACE, 2011).

3.3 Großflächige Auswirkung und Einschätzung der gegenseitigen Wechselwirkung der Sonde

Die gegenseitige thermische Beeinflussung benachbarter Erdwärmesonden hat eine Auswirkung auf die Leistung geothermischer Anlagen (HECHT-MENDEZ ET AL., 2013; LAZZARI ET AL., 2010). In einem Erdwärmesondenfeld ist das Entzugspotential auf die Hälfte des Sondenabstands limitiert, da sich der Boden um die Erdwärmesonde radial abkühlt (KUREVIJA ET AL., 2012). Somit ist es wichtig, dass die Erdwärmesonden in optimalen Abständen positioniert sind, um die Wechselwirkung zu vermeiden. Die Modellierung soll eine langfristige Ausbreitung der Kältefahne prognostizieren. Die Vorgehensweise ist ähnlich wie in 3.1 beschrieben. Es soll die Wechselwirkung der 37 Erdwärmesonden im Sondenfeld simuliert werden. Die Auslegung des Sondenfeldes bezieht sich auf die Anlage am oben beschriebenen Erdwärmesondenfeld an der Ludwighöhe.

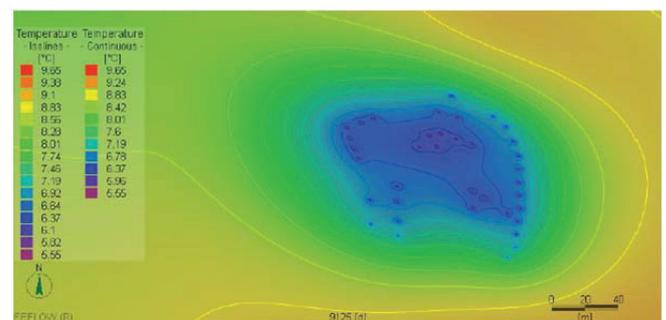


Abb. 4: Temperaturverteilung nach 25 Jahren bei einer Tiefe von 60 m unter GOK (BAUR, 2012).

Fig. 4: Temperature distribution after 25 years at the depth of 60 m bgl (BAUR, 2012).



Auch hier spielt die Regenerierungsphase eine wichtige Rolle, denn bei nicht ausreichender Regenerierungsphase breitet sich die Kältefahne großflächig aus (Abb. 4; BAUR, 2012) und führt zu einer Senkung der Temperatur des Wärmeträgerfluids. Dieser Effekt wirkt sich negativ auf die Leistung der Anlage aus (KHALAJZADEH ET AL., 2011). Nach der Verifizierung und Kalibrierung wird das Modell auf 76 Sonden ausgebaut, um die gesamte Anlage an der Ludwigshöhe zu simulieren.

3.4 Abschätzung des Einflusses von salinarem Wasser auf den konduktiven Wärmetransport und auf die spezifische Entzugsleistung

Die Anwesenheit von salinarem Wasser führt zur Änderung in der Hydrochemie und damit verbunden auch zu Änderungen der thermodynamischen Eigenschaften des Wassers. ABU-HAMDEH & REEDER (2000) stellen fest, dass sich bei Erhöhung der Salzkonzentration in der Bodenlösung die Wärmeleitfähigkeit des Bodens senkt. Auf Basis von Laboruntersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit eines mit variiertem Salzgehalt gesättigtem Bohrkerns wird der konduktiv-dominierten Wärmetransportprozess abgeschätzt und in der numerischen Modellierung berücksichtigt.

3.5 Kopplung des großflächigen Modells mit dem Anlagensimulationsprogramm TRNSYS

Die Modellierung der geothermischen Anlage verknüpft mit dem Energiebedarf erfolgt durch die Kopplung mit dem in FEFLOW® integrierten Modul TRNSYS. Die Kopplung ermöglicht die Modellierung des gesamten Energiekreislaufs eines Gebäudes, z.B. zwischen Solarkollektoren, dem Gebäude und der Wärmespeicher mit den Erdwärmesonden (DIERSCH ET AL., 2011:2). Bezogen auf den Energiebedarf der Wohnhäuser an der Ludwigshöhe können Optimierungsvorschläge ausgearbeitet werden, die zu einer effizienten Nutzung geothermischer Anlagen führt.

4 Schlussfolgerung

Die detaillierte Erfassung geothermischer Parameter und Quantifizierungen der thermodynamischen Einflussgrößen im Labor ermöglicht die realitätsnahe Modellierung des Erdwärmesondenfeldes um die Wärmetransportprozesse und deren Wechselwirkungen zwischen der Sonde und dem Erdreich zu analysieren. Besonderes Augenmerk bei dem Forschungsstandort gilt der Abschätzung des Einflusses von salinaren Wässern auf den Wärmetransport. Mit den detaillierten in-situ Messungen im Nahfeld einer Erdwärmesonde kann der Betrieb der Sonden unter Frost-Tau-Bedingungen realitätsnah simuliert und Schlussfolgerungen auf die thermischen Wechselwirkungen gezogen werden. Im Zusammenspiel mit tiefenorientierten Temperaturmessungen an einer für diese Zwecke ausgebauten Grundwassermessstelle kann auch auf die großflächigen Temperaturveränderungen im Untergrund des Sondenfeldes rückgeschlossen werden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden Optimierungsvorschläge durch Parametervariationen herausgearbeitet. Diese Vorschläge sollen der Planung weiterer oberflächennaher Geothermieanlagen, wie z.B. dem Wohnpark an der Ludwigshöhe mit zusätzlichen 39 Sonden (Abb. 1, rechts, blau und rot) dienen.

Literatur

- ABU-HAMDEH, N.H., REEDER, R.C. (2000): Soil Thermal Conductivity Effects of Density, Moisture, Salt Concentration, and Organic Matter. *Soil Science Society of America Journal* 64, 2: 1285-1290
- ADAMOVSKÝ R., MAŠEK, L., NEUBERGER, P. (2012): Analysis of rock mass borehole temperature with vertical heat exchanger, *Research in Agricultural Engineering* 58, 2: 57-65
- AL-KHOURY, R., BONNIER, P.G., BRINGREVE, R.B.J. (2005): Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part I: Steady state. *Int. J. Numer. Meth. Engng.* 63:988-1013
- AL-KHOURY, R., BONNIER, P.G. (2006): Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part II: Transient. *Int. J. Numer. Meth. Engng.* 67:725-745
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE; 2001): Chapter 21: Physical properties of secondary coolants (brines). In *ASHRAE Handbook, Fundamentals* (pp. 21.1-21.13). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- BAUER, F. (2012): Geothermische Modellierung eines Erdwärmesondenfeldes im Grenzbereich der gefalteten zur ungefalteten Molasse. Unveröff. Masterarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, TU München, 94 S.: München
- CHOI, J.C., PARK, J., LEE, S.R. (2013): Numerical evaluation of the effects of groundwater flow on borehole heat exchanger arrays. *Renewable Energy* 52, 230-240
- DIERSCH, H.-J.G. (2005): FEFLOW® finite element subsurface flow and transport simulation system, Reference Manual, User's Manual and White Papers Vol. I, II, III, IV, WASY-Institute for Water Resource Planning and System research, Berlin
- DIERSCH, H.-J.G., BAUER, D., HEIDEMANN, W., RÜHAAK, W., SCHÄTZL, P. (2011): Finite element modeling of borehole heat exchanger systems. Part 1. Fundamentals. *Computer and geosciences* 37, 1122-1135
- DIERSCH, H.-J.G., BAUER, D., HEIDEMANN, W., RÜHAAK, W., SCHÄTZL, P. (2011): Finite element modeling of borehole heat exchanger systems. Part 2. Numerical simulation. *Computer and geosciences* 37, 1136-1147
- ESKILSON, P., CLAESON, J. (1988): Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes. *Numerical Heat Transfer*. 13, 2: 149-165
- HECHT-MÉNDEZ, J., DE PALY, M., BECK, M., BAYER, P. (2013): Optimization of energy extraction for vertical closed-loop geothermal systems considering groundwater flow. *Energy Conversion and Management* 66, 1-10
- KHALAJZADEH, V., HEIDARINEJAD, G., SREBIC, J. (2011): Parameter optimization of a vertical ground heat exchanger based on response surface methodology. *Energy and Building* 43, 1288-1294
- KUREVIJA, T., VULIN, D., KRAPEC, V. (2012): Effect of borehole array geometry and thermal interferences on geothermal heat pump system. *Energy Conversion and Management* 60, 134-142

- LAZZARI, S., PRIARONE, A., ZANCHINI, E. (2010): Long-term performance of BHE (borehole heat exchanger) fields with negligible groundwater movement. *Energy* 35, 4966-4974
- MÜLLER, L. (2009): Frost-Tau-Widerstand von Verfüllbaustoffen für Erdwärmesonden. Beitrag „Der Geothermiekongress 2009. Bochum, Germany, 17-19 November, 2009
- SHARQAWY, M.H. (2013): New correlations for seawater and pure water thermal conductivity at different temperature and Salinity. *Desalination* 313, 97-104
- STARACE, C. (2011): Numerische Simulation des Frost-Tau-Wechsels im Nahfeld einer Erdwärmesonde. Unveröff. Masterarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, TU München, 175 S.: München