



Doctoral Thesis

## Geoscientific investigations for the use of shallow low-enthalpy systems

**Author(s):**

Signorelli, Sarah

**Publication Date:**

2004

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004818477> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 15519

**GEOSCIENTIFIC INVESTIGATIONS FOR THE USE OF  
SHALLOW LOW-ENTHALPY SYSTEMS**

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

For the degree of

Doctor of Science

presented by

SARAH SIGNORELLI

Dipl. Natw. ETHZ

Born 25. April 1974

Citizen of Trimbach (SO)

Accepted on the recommendation of

PD Dr. Thomas Kohl, examiner

Prof. Dr. William Lowrie, co-examiner

Prof. Dr. Ladislaus Rybach, co-examiner

Prof. Dr. Christoph Clauser, co-examiner

2004

## **ABSTRACT**

This presented study is part of the research project: "Productivity Investigation of the System Borehole Heat Exchanger (BHE) with Heat Pump", financed by the Projekt und Studienfond der Elektrizitätswirtschaft (PSEL) and the Swiss Federal Office of Energy (BFE). It was jointly performed at the Institute of Geophysics and at the "Elektrizitätswerke des Kantons Zürich" (EKZ) (by order of the "Nord-Ostschweizerische Kraftwerke" NOK). The study aimed at the understanding of the scientific basis and the performance improvement of shallow low-enthalpy systems such as geothermal heat pumps. This includes a variety of subjects:

The 3D Finite Element modeling software FRACTure is used to simulate the hydraulic and thermal processes related to the operation of borehole heat exchanger (BHE). The suitability of FRACTure to simulate a BHE is demonstrated by performing various sensitivity studies. This is emphasized furthermore by a simulative comparison with the semi-analytical software EED and by validation with measured data.

The modeling parameters which largely determine the dimensioning of a BHE system are the ground surface temperature (GST) and the thermal conductivity of the subsurface. Methods to estimate these two factors are presented and discussed.

A regional GST analysis of Switzerland was performed considering both climatic and geothermal data. The altitude dependence of GST and the relationship between GST and surface air temperature was investigated carefully. By further processing, a GST map for Switzerland was generated. The results are important for evaluating geothermal resources and determines regional GST distribution under different climatic conditions typical in central Europe.

Thermal response tests became popular to measure the in-situ thermal conductivity. The breadth of their ideal application is investigated by FRACTure simulations. The applied procedure provides information about the necessary test duration, and the effects of heterogeneous subsurface conditions, groundwater movement, and of variable data quality. The results indicate that most thermal response tests underestimate the thermal conductivity; the difference can amount to over -10 %. A comparative analytical and numerical evaluation of an actual thermal response test

emphasizes the importance of more sophisticated numerical methodologies for thermal response test interpretation.

The evaluation of GST and thermal conductivity represents a common geoscientific aspect of applied and general geothermal research. Here, the influence of these two parameters on the performance of a single BHE system is determined by two sensitivity studies and visualized for different locations in Switzerland. GST can have a more dominate impact on the power production than thermal conductivity.

In the final step, the sustainable behavior of a BHE field is investigated. The results (ground temperatures and BHE delivery temperatures) are compared to a single BHE of the same length. In a BHE array, the recovery time is longer than for a single BHE. The BHE array spacing is a critical parameter in the investigated example; the minimum distance shall not fall short of 7 m to provide sustainable production. The lower temperatures of the production fluid can be compensated for by drilling additional meters. Estimates of the additional drilling necessary are given for certain conditions. The investigation shows that sustainable production from a BHE field can be achieved by proper design.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit ist Teil des Forschungsprojekts „Produktivitätsuntersuchung des Systems Erdwärmesonde mit Wärmepumpe“, welches vom Projekt- und Studienfond der Elektrizitätswirtschaft (PSEL) und vom Bundesamt für Energie (BFE) finanziert wurde. Dieses Projekt wurde am Institut für Geophysik der ETH Zürich und bei den „Elektrizitätswerken des Kantons Zürich“ (EKZ) (im Auftrag der „Nord-Ostschweizerischen Kraftwerke“ NOK) gemeinsam durchgeführt. Das Ziel dieser Arbeit war die Erarbeitung wissenschaftlicher Grundlagen für unteufe Niedrig-Enthalpie-Systeme wie Erdwärmepumpen und deren Betriebsoptimierung. Dies beinhaltet eine Vielzahl von Aufgaben:

Für die Simulation von hydraulischen und thermischen Prozessen in Zusammenhang mit dem Betrieb von Erdwärmesonden (EWS) wird die 3D Finite Elemente Software FRACTure verwendet. Die Leistungsfähigkeit von FRACTure zur Modellierung von EWS-Systemen wird durch verschiedene Sensitivitätsstudien gezeigt und des Weiteren durch Vergleichssimulationen mit der semi-analytischen Software EED und durch Validierung mit gemessenen Daten bestätigt.

Den grössten Einfluss auf die Dimensionierung einer EWS-Anlage haben die Bodenoberflächentemperatur (BOT) und die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes. Methoden zur Bestimmung dieser zwei Einflussgrössen werden beschrieben und diskutiert.

Für die Schweiz wird eine regionale BOT-Analyse durchgeführt, die sowohl klimatische als auch geothermische Daten berücksichtigt. Dabei wird die Höhenabhängigkeit der BOT sowie die Beziehung zwischen BOT und Lufttemperatur detailliert untersucht. Die Weiterverarbeitung der erzielten Erkenntnisse erlaubt es eine BOT-Karte der Schweiz zu erstellen, die wichtige Erkenntnisse für die Beurteilung geothermischer Ressourcen sowie für die Bestimmung der regionalen BOT-Verteilung unter für Zentraleuropa typischen klimatischen Bedingungen liefert.

Der Thermische Response-Test ist eine weit verbreitete Methode zur In-situ-Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit. Der Gültigkeitsbereich dieses Tests wird mittels FRACTure-Simulationen untersucht. Das dafür gewählte Vorgehen liefert Erkenntnisse über die nötige Testdauer, über den Einfluss von Grundwasserflüssen

und heterogener Untergrundbeschaffenheit, sowie über den Effekt unterschiedlicher Datenqualität. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass die meisten Response-Tests die Wärmeleitfähigkeit unterschätzen; die Abweichung kann bis zu -10 % betragen. Der Vergleich einer analytischen mit einer numerischen Auswertung verdeutlicht anhand eines realen Response-Tests die Wichtigkeit gut durchdachter, numerischer Methoden für die Interpretation solcher Tests.

Die Bestimmung der BOT und der Wärmeleitfähigkeit sind grundsätzliche geowissenschaftliche Aspekte der angewandten und der allgemeinen geothermischen Forschung. In dieser Arbeit wird anhand von zwei Sensitivitätsstudien der Einfluss dieser zwei Parameter auf die Leistung einer Einzel-Erdwärmesonde untersucht und für verschiedene Standorte in der Schweiz visualisiert. Dabei zeigt sich, dass die BOT einen grösseren Einfluss auf die Leistung haben kann als die Wärmeleitfähigkeit.

In einem letzten Schritt wird die Nachhaltigkeit von EWS-Feldern untersucht. Die Resultate (Untergrundtemperatur und EWS-Fördertemperatur) werden mit denen einer Einzelsonde derselben Länge verglichen. Es zeigt sich, dass die Systemerholung bei EWS-Feldern länger dauert als bei einer Einzelsonde. Im untersuchten Beispiel ist zudem der Sondenabstand im EWS-Feld ein kritischer Parameter; der minimale Abstand sollte nicht unter 7 m liegen. Die tieferen Fördertemperaturen im Fall des EWS-Feldes können durch zusätzliche Sondenbohrmeter kompensiert werden. Abschätzungen bezüglich zusätzlich benötigter Bohrmeter werden für bestimmte Rahmenbedingungen gegeben. Die durchgeführte Untersuchung zeigt, dass bei richtiger Dimensionierung ein EWS-Feld nachhaltig betrieben werden kann.