

Zur thermischen Modellierung von Erdwärmesonden und Erdsonden-Wärmespeichern

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dan Bauer

aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. H. Müller-Steinhagen

Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. I. Sass

Tag der mündlichen Prüfung: 15.07.2011

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart

2011

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	IX
Kurzfassung/Abstract	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Thermische Nutzung des Untergrundes	1
1.1.1 Erdwärmesonden.....	2
1.1.2 Erdsonden-Wärmespeicher	3
1.2 Stand des Wissens	4
1.2.1 Thermische Modellierung von Erdwärmesonden.....	4
1.2.2 Simulationsprogramme für Erdwärmesonden und Erdsonden-Wärmespeicher.	6
1.2.3 Thermal Response Tests.....	7
1.3 Motivation	8
1.4 Zielsetzung und Vorgehensweise	9
2 Numerische Referenzmodelle für Erdwärmesonden	11
2.1 Einführung.....	11
2.2 Programmanforderungen für Referenzlösungen	11
2.3 Numerische Simulation einer Rohrströmung.....	12
2.4 Referenzlösungen.....	18
2.4.1 Koaxial-Rohrsonde	18
2.4.2 Einfach- und Doppel-U-Rohrsonde	21
2.5 Fazit.....	23

3 Zweidimensionale Widerstands-Kapazitäts-Modelle	25
3.1 Modellgeometrien.....	25
3.2 Bestimmung der thermischen Widerstände und Kapazitäten	26
3.2.1 Koaxial-Rohrsonde.....	27
3.2.2 Einfach-U-Rohrsonde.....	28
3.2.3 Doppel-U-Rohrsonde	29
3.2.4 Wärmeleitwiderstände des Füllmaterials	30
3.2.5 Schwerpunktlage des Füllmaterials.....	32
3.2.6 Einschränkungen der Modellgültigkeit	33
3.3 Verifizierung	34
3.3.1 Vergleich mit analytischem Modell.....	35
3.3.2 Vergleich mit numerischen Modellen.....	37
3.4 Fazit	42
4 Dreidimensionale Modellierung von Erdwärmesonden	43
4.1 Numerisches Modell.....	43
4.2 Analytisches Modell	47
4.2.1 Allgemeine Methodik bei konstanter Bohrlochwandtemperatur	47
4.2.2 Einfach- und Doppel-U-Rohrsonden.....	48
4.2.3 Koaxial-Rohrsonden mit Fluideintritt im Ringspalt.....	51
4.2.4 Koaxial-Rohrsonden mit Fluideintritt im Innenrohr	52
4.2.5 Methodik bei nicht konstanter Bohrlochwandtemperatur	54
4.3 Implementierung.....	55
4.4 Verifizierung	55
4.5 Fazit	59
5 Numerische Auswertung von Thermal Response Tests	61
5.1 Verwendeter Messdatensatz.....	61
5.2 Synthetischer Datensatz.....	62
5.3 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds	63

5.3.1 Synthetischer Datensatz	63
5.3.2 Messdatensatz	66
5.4 Bestimmung thermischer Widerstände.....	67
5.5 Fazit.....	69
6 Einfluss von advektivem Wärmetransport in Grundwasserleitern	73
6.1 Grundlagen.....	73
6.2 Modellierung	75
6.2.1 Simulationsumgebung.....	75
6.2.2 Implementierung der Sondenmodelle	75
6.2.3 Besonderheiten der örtlichen Diskretisierung.....	75
6.3 Verifizierung.....	78
6.4 Vergleich mit Messdaten	84
6.4.1 Geologische Situation am Standort Neckarsulm-Amorbach	84
6.4.2 Aufbau des Versuchsspeichers	84
6.4.3 Modellbildung.....	84
6.4.4 Simulation	86
6.4.5 Fazit.....	89
6.5 Thermische Leistung von Erdwärmesonden bei Grundwasserfluss	90
6.6 Grundwasserbeeinflussung von Erdsonden-Wärmespeichern	93
6.6.1 Modellerstellung	94
6.6.2 Simulation	95
6.6.3 Thermische Beeinflussung des Untergrunds.....	95
6.6.4 Beeinflussung des Speichernutzungsgrads	96
6.7 Fazit.....	99
7 Zusammenfassung und Ausblick	101
Literaturverzeichnis	105

Anhang	115
A.1 Nusselt-Korrelationen für Koaxial-Rohrsonden	115
A.2 Nusselt-Korrelation für Einfach-U-Rohrsonden	118
A.3 Nusselt-Korrelation für Doppel-U-Rohrsonden.....	119
A.4 Zur Verifizierung des FEFLOW-Modells.....	120
A.5 Thermische Leistung von Erdwärmesonden bei Grundwasserfluss.....	121

Kurzfassung

Zur thermischen Nutzung des Untergrunds für Heiz- und Kühlzwecke werden unter anderem Erdwärmesonden eingesetzt. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Weiterentwicklung der Modellierung thermischer Transportprozesse in und um Erdwärmesonden sowie mit der Anwendung der weiterentwickelten Modelle.

Dem Widerspruch zwischen hoher Ergebnisgüte und kurzer Rechenzeit wird durch die Entwicklung von Grobstrukturmodellen für Erdwärmesonden auf Basis von Widerstands-Kapazitäts-Modellen begegnet. Gegenüber den bisher in der Literatur und am Markt verfügbaren Grobstrukturmodellen kann eine deutlich verbesserte Abbildung der Dynamik der Transportprozesse und dadurch eine gesteigerte Ergebnisgüte bei transienten Simulationen verzeichnet werden. Erstmals können damit eine numerische Auswertung von Thermal Response Tests mittels automatisierter Parameteroptimierung unter Berücksichtigung dreidimensionaler transienter Transportvorgänge innerhalb des Bohrlochs durchgeführt und damit verbundene Vorteile – insbesondere eine deutliche Verkürzung der Testdauer – aufgezeigt werden.

Durch die Implementierung eines Grobstrukturmodells in das dreidimensionale Finite-Elemente-Programm FEFLOW wird der Einfluss von fließendem Grundwasser auf das thermische Verhalten von Erdwärmesonden und erstmalig auf den Speichernutzungsgrad von Erdsonden-Wärmespeichern quantifiziert.

Abstract

The thermal use of the underground for heating and cooling applications can be done with borehole heat exchangers. This work deals with the further development of the modelling of thermal transport processes inside and outside the borehole as well as with the application of the further developed models.

The combination of high accuracy and short computation time is achieved by the development of three-dimensional thermal resistance and capacity models for borehole heat exchangers. Short transient transport processes can be calculated by the developed model with a considerable higher dynamic and accuracy than with known models from literature. The model is used to evaluate measurement data of a thermal response test by parameter estimation technique with a transient three-dimensional model for the first time. Clear advantages like shortening of the test duration are shown.

The developed borehole heat exchanger model is combined with a three-dimensional description of the underground in the Finite-Element-Program FEFLOW. The influence of moving groundwater on borehole heat exchangers and borehole thermal energy stores is then quantified.