

# **Berechnung des Speichernutzungsgrades von Erdsonden- Wärmespeichern bei Anwesenheit von fließendem Grundwasser**

D. Bauer<sup>1)</sup>, W. Heidemann<sup>1)</sup>, H. Müller-Steinhagen<sup>1), 2)</sup>

<sup>1)</sup> Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik

Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart

Tel.: +49-(0)711-685-69445, Fax: +49-(0)711-685-63503

bauer@itw.uni-stuttgart.de

www.itw.uni-stuttgart.de/sun

<sup>2)</sup> DLR, Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart

## **Abstract**

Borehole thermal energy stores used for seasonal heat storage in solar assisted district heating systems are very sensitive to groundwater flow. However, there is no suitable simulation tool available to predict the long-term performance of these systems in the presence of groundwater flow. A mass and heat transport model is being developed at the Institute of Thermodynamics and Thermal Engineering, University of Stuttgart, to simulate the behaviour of this type of systems. The model is used to investigate the efficiency of three U-tubes arranged in different positions with regard to the groundwater flow direction at different groundwater velocities.

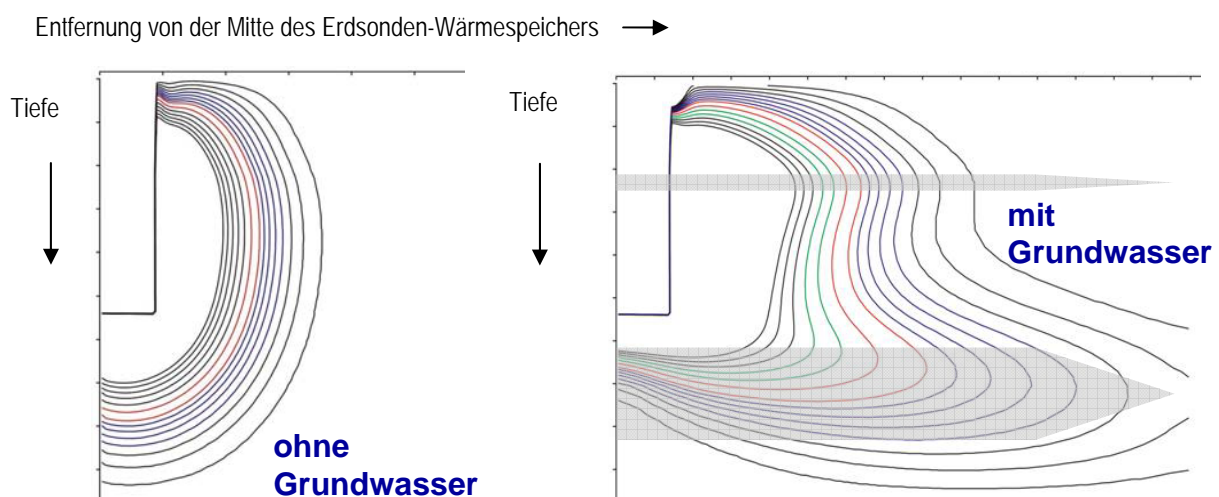
## **1 Einleitung**

Bei solar unterstützten Nahwärmesystemen (SuN) mit saisonaler Wärmespeicherung kann die Erdsonden-Wärmespeicher-Technologie –abhängig von den örtlichen geologischen Verhältnissen– eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Alternative zu anderen Konzepten der Wärmespeicherung darstellen [1]. Die sensible saisonale Wärmespeicherung in solchen Anlagen findet bei Einsatz einer Wärmepumpe auf einem Temperaturniveau zwischen ca. 20°C im Frühjahr und über 50°C im Herbst statt [2], so dass durch fließendes Grundwasser im oder unter dem Speicherbereich

eine signifikante Beeinflussung des thermischen Verhaltens und der Effizienz des Speichers verursacht wird.

## 2 Stand der Technik

Zur Dimensionierung von Erdsonden-Wärmespeichern und aller weiteren Komponenten eines SuN-Systems wurden bisher umfangreiche Simulationen im Vorfeld getätigt. Die dabei verwendeten Simulationstools, z.B. TRNSYS-DST [3], können die Auswirkung von fließendem Grundwasser auf die Effizienz von Erdsonden-Wärmespeichern und damit auf das gesamte SuN-System nicht oder nicht hinreichend erfassen. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der örtlichen hydrogeologischen Untersuchungen basierte die Entscheidung für oder gegen einen Erdsonden-Wärmespeicher somit auf der subjektiven Einschätzung eines Expertenkreises. Durch das Fehlen von geeigneten Simulationstools können derzeit Berechnungen nur unzureichend durchgeführt werden, wie sie im Zuge von wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren für Erdsonden-Wärmespeicherprojekte, bei denen eine Grundwasserbeeinflussung erwartet wird, erforderlich sind. Benötigt werden Voraussagen des dreidimensionalen Temperaturfeldes in und um den Speicher unter Berücksichtigung von fließendem Grundwasser zu beliebigen Zeitpunkten (Abbildung1).



**Abbildung 1: Isothermendarstellung im Erdreich um einen Erdsonden-Wärmespeicher im vertikalen Schnitt ohne (links) und mit Grundwasserfluss (rechts); berechnet mit einem am ITW entwickelten Finite Difference Solver**

Da in geringem Maß die Be- und in hohem Maß die Entladewärmemengen sowie die Be- und Entladetemperaturen eines Erdsonden-Wärmespeichers von der Grundwassersituation abhängen, kann derzeit zur Berechnung kein im Bereich der Grundwasserhydrologie kommerziell verfügbares Simulationstool wie z.B. FEFLOW [4] verwendet werden, welches den konvektiven und advektiven Wärmetransport im Untergrund berücksichtigt. Der Grund dafür ist, dass diese Simulationstools nicht abbilden können, dass die Wärme über U-Rohrsonden ins Erdreich eingebracht wird. Eine realitätsnahe Kopplung an ein zur Simulation der restlichen Anlagenteile verwendetes Tool, z.B. TRNSYS, ist somit derzeit nicht möglich.

### 3 Neuentwicklung in FEFLOW

Um in Zukunft fundierte Aussagen über die Beeinflussung von fließendem Grundwasser auf Erdsonden-Wärmespeicher treffen zu können, wurden die thermodynamischen Vorgänge von Erdwärmesonden in das Programm FEFLOW implementiert. Im Folgenden werden erste Ansätze der Implementierung und sich damit bietende Möglichkeiten des Programms aufgezeigt.

### 4 Implementierung der lokalen Prozesse im Bohrloch

Analog zur Vorgehensweise wie sie unter anderem in [5] verwirklicht wurde, können die Wärmeübertragungsvorgänge in einer Erdwärmesonde zunächst als analytisches Problem dargestellt werden. Der Wärme- und Stofftransport in dem die Erdwärmesonde umgebenden Untergrund wird anschließend numerisch berechnet.

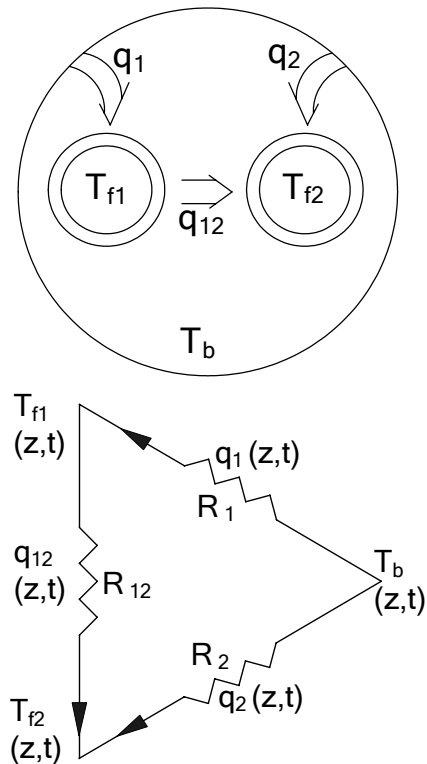
Abbildung 2 zeigt die Temperaturen, Wärmeleitwiderstände und die sich daraus ergebenden Wärmeströme in einem Sondenquerschnitt.  $T_{f1}$ ,  $T_{f2}$  und  $T_b$  seien die von Zeit  $t$  und Sondentiefe  $z$  abhängigen Fluidtemperaturen in den Sondenrohren und die Bohrlochwandtemperatur und  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_{12}$  die Wärmeleitwiderstände zwischen Fluid und Bohrlochwand bzw. zwischen den auf- und absteigenden Fluidströmen.

Dann gilt für die resultierenden Wärmeströme  $q_1$ ,  $q_2$  und  $q_{12}$ :

$$\dot{m} \cdot c_p \cdot \frac{\partial T_{f1}}{\partial z} = q_1 - q_{12} = \frac{T_b - T_{f1}}{R_1} - \frac{T_{f1} - T_{f2}}{R_{12}} \quad \text{Gl. (1)}$$

$$-\dot{m} \cdot c_p \cdot \frac{\partial T_{f2}}{\partial z} = q_2 + q_{12} = \frac{T_b - T_{f2}}{R_2} + \frac{T_{f1} - T_{f2}}{R_{12}} \quad \text{Gl. (2)}$$

Als  $q_{12}$  wird hier der Wärmestrom bezeichnet, der durch den thermischen Kurzschluss der parallel verlaufenden Wärmeübertragerrohre mit auf- bzw. absteigendem Fluidstrom verursacht wird, während  $q_1$  und  $q_2$  die Wärmeströme zwischen Fluid und umgebendem Erdreich beschreiben. Diese stationäre Betrachtung der Wärmeleitvorgänge berücksichtigt nicht die kapazitiven und damit eigentlich instationär zu betrachtenden Effekte im Bohrlochquerschnitt. Für sehr schnell variierende Massenströme und Fluidtemperaturen sowie Erdwärmesonden hoher thermischer Kapazität (z.B. thermisch aktivierte Gründungspfähle) ist diese Vorgehensweise somit ungeeignet. Zur Auslegung großer Erdwärmesondenfelder ist diese Betrachtung allerdings notwendig, da die örtliche Diskretisierung des Bohrlochquerschnittes zu inakzeptabel langen Rechenzeiten führen würde. Die Eignung des aufgeführten Ansatzes zur Berechnung von Erdsonden-Wärmespeichern wurde durch die Validierung des Superposition Borehole Model anhand von Messdaten am ITW gezeigt. Erste Ergebnisse finden sich in [6].



**Abbildung 2: Temperaturen, Wärmeleitwiderstände und sich daraus ergebende Wärmeströme in einem Sondenquerschnitt**

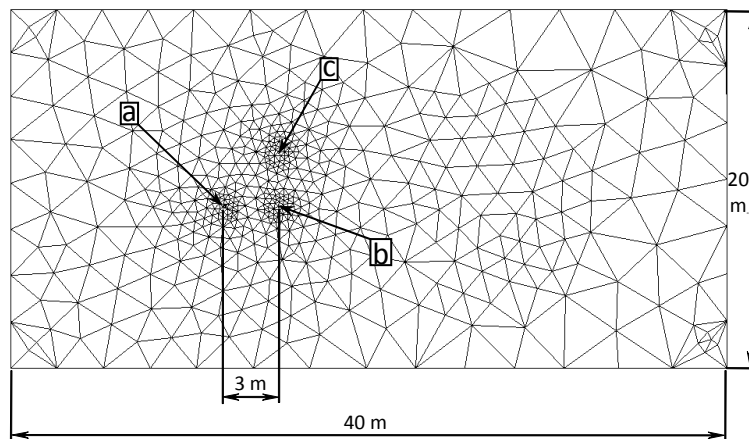
## 5 Übergang zwischen lokalem Prozess und Finite Elemente Gitter

Die Summe der Wärmeströme  $q_1$  und  $q_2$  wird nun an übereinander liegenden Knoten in einem dreidimensionalen Finite Elemente Gitter in Abhängigkeit von Tiefe und Zeit aufgeprägt. Als Elementform kommen Prismen mit dreieckiger Grundfläche zum Einsatz. Diese erlauben eine flexiblere Gestaltung der Diskretisierung im Sonden-nahbereich als dies mit einem rechtwinkligen Finite Differenzen Gitter möglich wäre. Vor jedem Zeitschritt muss die Bohrlochwandtemperatur  $T_b(z)$  aus dem Gitter ausgelesen werden um nach Gl. (1) und (2) mit den für den folgenden Zeitschritt gültigen Werten für Fluidmassenstrom und Sondeneintrittstemperatur die Wärmeströme  $q_1(z)$  und  $q_2(z)$  zu berechnen. Diese werden während des nachfolgenden

Zeitschritts als Randbedingung zweiter Ordnung (Neumann-Randbedingung) auf die entsprechenden übereinander liegenden Knoten aufgeprägt.

## 6 Beispielrechnung

Mit oben genannter Methodik können beliebig viele Sonden in beliebiger Anordnung und Verschaltung in einem dreidimensionalen Gitter nachgebildet werden. Abbildung

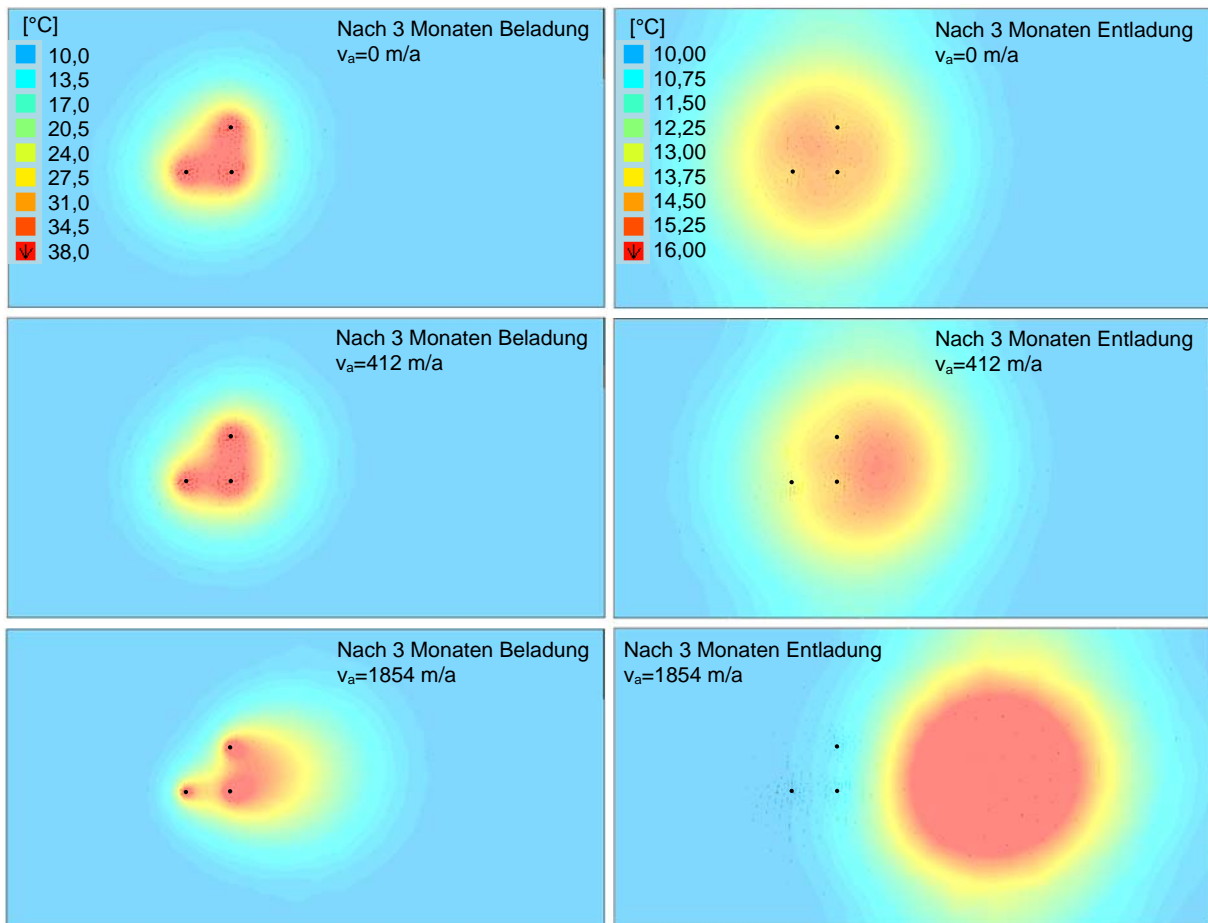


**Abbildung 4: Rechengebiet mit drei Sonden a, b und c in FEFLOW; horizontaler Schnitt**

4 zeigt den horizontalen Schnitt eines Gitters mit den drei Sonden a, b, c. Grundwasser strömt vom linken zum rechten Rand. Der Sondenabstand beträgt drei Meter, das Rechengebiet erstreckt sich auf 20 x 40 m. Der durchflusswirksame Hohlraumanteil im Untergrund beträgt 1 %. Der

Durchlässigkeitsbeiwert wurde auf  $1,3 \cdot 10^{-4}$  m/s festgesetzt. Durch Variation des hydraulischen Gradienten von links nach rechts wurde die Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  auf die Werte 0, 412 und 1854 m/a eingestellt. Alle drei Sonden sind als Einfach-U-Rohr nachgebildet und parallel verschaltet. Es wurde ein Beladungszeitraum von 90 Tagen mit einer Sondereintrittstemperatur von 80°C und direkt im Anschluss eine ebenfalls 90 Tage dauernde Entladung mit 10°C bei konstantem Massenstrom simuliert. Die Temperaturprofile im horizontalen Schnitt nach der Be- und Entladung für die drei unterschiedlichen Grundwasserströmungsgeschwindigkeiten zeigt Abbildung 5. Während sich bei mittlerer Grundwasserströmungsgeschwindigkeit nach der Beladung noch kaum ein Unterschied feststellen lässt, ist bei hoher Geschwindigkeit eine deutliche Verzerrung des Temperaturprofils zu erkennen. Insbesondere die im Zustrom des Grundwassers befindliche Sonde a wird stark ausgekühlt während Sonde b die von Sonde a eingebrachte Wärme zugetragen wird. Drastischer stellt sich die Situation nach der Entladung dar: Schon bei mittlerer Strömungsgeschwindigkeit befindet sich Sonde a außerhalb der eigentlichen ‚Wärmeblase‘. Diese wird

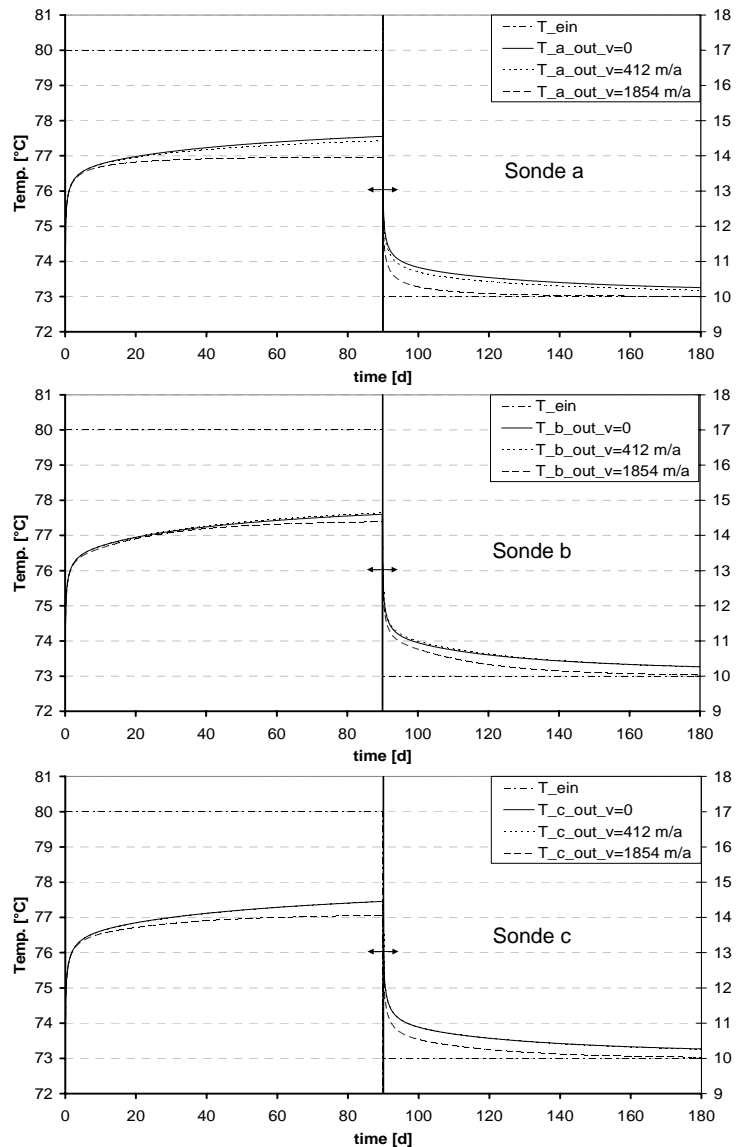
bei hoher Strömungsgeschwindigkeit gar soweit fortgetragen, dass sich alle drei Sonden nahe des Bereiches mit ungestörter Erdreichtemperatur von 10°C befinden und somit fast keine Wärme mehr entnommen werden kann.



**Abbildung 5: Temperaturprofile um drei Erdwärmesonden im horizontalen Schnitt bei Variation der Grundwasserströmungsgeschwindigkeit; zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung**

Abbildung 6 zeigt die Sondenein- und -austrittstemperaturen über den betrachteten Zeitraum von 180 Tagen. Sonde a zeigt das Verhalten, wie man es auch bei einer Einzelsonde erwarten würde: Mit zunehmender Grundwasserströmungsgeschwindigkeit nimmt die Austrittstemperatur sowohl bei Beladung als auch bei Entladung durch die vom Grundwasser verursachte Regeneration der Erdreichtemperatur ab. D.h. dem Speicher kann mehr Wärme zugeführt, aber weniger entnommen werden. Bei Sonde b zeigt sich bei mittlerer Strömungsgeschwindigkeit ein gegenläufiger Effekt. Durch die von Sonde a advektiv zugeführte Wärme steigt die Austrittstemperatur etwas an. Erst bei hoher Strömungsgeschwindigkeit sinkt die Austrittstemperatur sowohl bei Be- als auch bei Entladung etwas ab. Bei Sonde c heben sich

die beiden oben genannten Effekte bei mittlerer Strömungsgeschwindigkeit auf. Im Vergleich zum Fall ohne Grundwasserströmung zeigt sich keine Änderung der Sondenaustrittstemperatur. Über den Fluidmassenstrom und die Ein- und Austrittstemperatur der Sonde lassen sich die Wärmemengen der Be- und Entladung berechnen. Der Quotient aus Entladung zu Beladung beschreibt den so genannten Speichernutzungsgrad. Dieser ist für die drei Sonden bei den untersuchten Grundwassersituationen in Tabelle 1 aufgeführt. Zu erkennen ist, dass die mittlere Strömungsgeschwindigkeit nur bei Sonde a einen signifikant negativen Effekt verursacht, während die hohe Strömungsgeschwindigkeit bei allen drei Sonden zu einer deutlichen Abnahme des



**Abbildung 6: Sondentemperaturen bei Variation der Grundwasserströmungsgeschwindigkeit**

**Tabelle 1: Speichernutzungsgrad der drei Sonden bei Variation der Grundwasserströmungsgeschwindigkeit**

$v_a$ [m/a]	$\eta_a$ [%]	$\eta_b$ [%]	$\eta_c$ [%]
0	18,5	20,5	18,8
412	14,6	21,3	18,7
1854	3,9	11,3	7,9

Speichernutzungsgrads führt. Bei  $v_a=0$  erkennt man im Vergleich der Sonden a und c den Einfluss eines zu kleinen Rechengebietes. Sonde c befindet sich zu nahe an der als adiabat betrachteten Begrenzung. Die dadurch zu hohen berechneten Erdreichtemperaturen führen zu einem gegenüber Sonde a geringfügig höheren Speichernutzungsgrad.

## 7 Fazit

Der Einfluss von fließendem Grundwasser auf Erdwärmesonden und Erdsonden-Wärmespeicher kann durch die gezeigte Implementierung der auftretenden Wärmeübertragungsmechanismen in das Simulationstool FEFLOW erfasst werden. Diese Vorgehensweise lässt eine volldynamische Kopplung an ein Tool zur Simulation von angeschlossener Anlagentechnik zu. Damit kann die Wechselwirkung zwischen Erdsonden-Wärmespeicher und restlicher Anlagentechnik eines SuN-Systems auch bei fließendem Grundwasser erfasst werden. Zurzeit wird in Zusammenarbeit mit WASY (Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH) an einem kommerziell verfügbaren anwenderfreundlichen Simulationstool gearbeitet, welches auch die instationären Wärmeübertragungsvorgänge im Bohrlochquerschnitt berücksichtigt. Dieses wird anhand umfangreicher Messtechnik am Erdsonden-Wärmespeicher in Crailsheim validiert werden.

## Literatur

- [1] M. Bodmann, D. Mangold, J. Nußbicker, S. Raab, A. Schenke, T. Schmidt: Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher (Februar 2003 bis Mai 2005), Forschungsbericht zum BMWA / BMU-Vorhaben 0329607F
- [2] D. Bauer, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen: Der Erdsonden-Wärmespeicher in Crailsheim, 17. OTTI-Symposium thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2007
- [3] TRNSYS, A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison and Transsolar, Stuttgart, Germany, 2000
- [4] Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, WASY GmbH, Berlin, Germany, 2007
- [5] P. Eskilson, Superposition Borehole Model, Manual for Computer Code, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Schweden, 1986
- [6] J. Nußbicker, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen: 10 Jahre solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit Erdsonden-Wärmespeicher in Neckarsulm-Amorbach, 7. internationales Anwenderforum „Oberflächennahe Geothermie“, OTTI, Freising, 2007

*Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*