

Projekt-Nr. 33'206
Vertrags-Nr. 73'162

Programm
Geothermie

Untiefe Geothermie: Woher kommt die Energie?

ausgearbeitet durch

Arthur Huber	Huber Energietechnik, Jupiterstr. 26, CH-8032 Zürich
Daniel Pahud	EPFL - DGC - LASSEN, CH-1015 Lausanne

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Oktober 1999

Schlussbericht

Zusammenfassung

Die untiefe Geothermie, also die in den obersten 400 m der Erde gespeicherte Wärme, bildet eine fast überall zugängliche, sehr grosse „Energiequelle“ für die Beheizung unserer Häuser der Zukunft. Wenn diese Wärme mit Erdwärmesonden genutzt wird, dann kühlen wir diesen geothermischen Wärmespeicher ab. Es stellt sich deshalb die Frage, ob diese Wärme irgend einmal erschöpft ist. Der natürliche Wärmefluss aus dem Erdinnern an die Oberfläche beträgt im Schweizerischen Mittelland ungefähr 0.065 W/m^2 . Dies sind 0.57 kWh/m^2 pro Jahr. Ein typisches Einfamilienhaus entzieht dem Erdreich aber etwa $8'000 \text{ kWh}$ pro Jahr. Dies ist eine Energiemenge, die dem geothermischen Wärmefluss von $14'000 \text{ m}^2$ Landfläche entspricht. Diese Rechnung wurde in den letzten Jahren verschiedentlich angestellt und hat zu Beunruhigung geführt. Leben wir mit dieser Technik auf Kosten unserer Kinder? Was passiert, wenn meine Nachbarn ebenfalls dieses Wärmereservoir anzapfen? Muss der Staat regulierend eingreifen und Konzessionsgebühren für die Nutzung der Erdwärme einführen, oder soll dieser gar eine aktive Wiederaufladung mit Solarenergie im Sommer verlangen?

Im Thermoprogramm Erdwärmesonden, Burgdorf (Werner et al., 1996) wurden zu diesem Thema sehr genaue Messungen durchgeführt. Im betrachteten Zeitraum von 4 Jahren wurde eine Energiebilanz aufgestellt, aus der hervorgeht, dass 68% der Wärme als „Zehrung“ aus dem Wärmereservoir entnommen wurde. Auch dieses Resultat scheint zu belegen, dass wir es nicht mit erneuerbarer Energie zu tun haben.

In der vorliegenden Arbeit wird das Problem auf der Basis der Aehnlichkeitstheorie von Claesson und Eskilson (1987) behandelt. Diese Arbeiten sind durch vielfache Messungen und numerische Rechnungen validiert. Claesson und Eskilson kommen aber klar zum Schluss, dass es für alle Erdwärmesonden eine Zeitkonstante gibt, nach der ein Gleichgewichtszustand von Wärmeentnahme und Nachfliessen der Wärme eintritt. Diese Zeitkonstante ist proportional zur Sondentiefe im Quadrat und liegt für 100m tiefe Erdwärmesonden im Bereich von 20 - 50 Jahren. Ist der Gleichgewichtszustand einmal erreicht, so fliesst im Mittel von der Erdoberfläche zusätzlich gleich viel Wärme nach, wie mit der Erdwärmesonde entzogen wird.

Auf den ersten Blick liegt in den Arbeiten von Eugster und Werner einerseits und der Theorie von Claesson und Eskilson andererseits ein Widerspruch. Der scheinbare Widerspruch löst sich aber auf, wenn wir die langen Zeitkonstanten der untersuchten Beispiele berücksichtigen. Wir nutzen in der untiefen Geothermie also vor allem gespeicherte Sonnenenergie. Auch ein Vergleich der Energiebilanz des Thermoprogrammes Erdwärmesonden und der Theorie von Claesson und Eskilson stimmen hervorragend überein, sofern die Sondenzeitkonstante und die sehr kurze Messzeit berücksichtigt werden.

Wie sieht es nun mit dem „Wärmeklau“ meines Nachbarn aus? Auch für die Beantwortung dieser Frage eignet sich die Aehnlichkeitstheorie sehr gut. Es kann damit genau berechnet werden, um wieviel die Quelltemperatur meiner Erdwärmesonden sinkt, wenn auch mein Nachbar diese Technik einsetzt. Auch hier hilft die Sonnenenergie stark mit, der Einfluss einer zusätzlichen Erdwärmesonde in gebührendem Abstand ist gering. Jede zusätzliche Erdwärmesonde in der Umgebung hat aber auch einen zusätzlichen Einfluss auf meine Quelltemperatur. Und da immer mehr Erdwärmesonden ohne Frostschutz geplant und gebaut werden, muss in Zukunft vermehrt auf diese Zusammenhänge geachtet werden.

Die Existenz eines Gleichgewichtszustandes zwischen nachhaltig nachfliessender Wärme (geothermischer Wärmefluss und Sonnenenergie) und Wärmeentzug beweisen eindeutig die Erneuerbarkeit der untiefen Geothermie.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG	4
1.1 IST UNTIEFE GEOTHERMIE ERNEUERBAR?	4
2 ANALYTISCHER ANSATZ FÜR ERDWÄRMESONDEN	5
2.1 REINE WÄRMELEITUNG ALS „WORST CASE“	5
2.2 MODELLANFORDERUNGEN	6
2.3 ÄHNLICHKEITSGESETZE VON ERDWÄRMESONDEN	7
3 VERGLEICH MIT MESSUNGEN	9
3.1 MESSUNGEN IN BURGDORF	9
3.2 RECHENPROGRAMME FÜR ERDWÄRMESONDEN	10
4 WÄRMEKLAU VOM NACHBARN?.....	12
4.1 BEISPIEL MIT 2 ERDWÄRMESONDEN	13
5 VARIABLEN	15
6 LITERATURVERZEICHNIS	16

1 EINLEITUNG

1.1 Ist untiefe Geothermie erneuerbar?

Definition Geothermie „Geothermie ist die in Form von Wärme gespeicherte Energie unterhalb der Oberfläche der festen Erde“; so umschreibt die VDI-Richtlinie 4640 den Begriff Geothermie. Untiefe Geothermie wird die in den obersten 400m der Erdkruste gespeicherte Energie genannt. Bewusst offen gelassen wird in dieser Richtlinie, woher diese Energie eigentlich kommt.

erneuerbar: nur wenn Gleichgewichtszustand existiert Energiewandlungsprozesse (z.B. radioaktive Zerfallsprozesse etc.) innerhalb dieser Erdschicht sind an den meisten Orten vernachlässigbar. Entnehmen wir diesem Energiespeicher „Geothermie“ also Wärme, so muss langfristig betrachtet die selbe Energiemenge durch die Begrenzungsflächen des „untiefen, geothermischen Gebietes“ nachfließen. Die Fragestellung der Erneuerbarkeit kann somit auch auf die Frage nach einem thermischen Gleichgewichtszustand von Wärmeentnahme und nachhaltigem Nachfließen von Wärme durch die Begrenzungsflächen des untiefen, geothermischen Gebietes reduziert werden. Unwichtig ist dabei, welcher Wärmetransportmechanismus vorherrscht. Ein sich ständig vergrößernder Temperaturtrichter kann dabei weder als nachhaltig, noch als Gleichgewichtszustand bezeichnet werden. In einem Gleichgewichtszustand verändern sich die Isothermen um den Ort konstanter Wärmeentnahme (z.B. Erdwärmesonde) nicht mehr. Folglich muss im Gleichgewichtszustand 100% der Wärme aus dem Erdinnern oder von der Oberfläche her nachfließen, nicht aber horizontal aus dem angrenzenden Erdreich.

Wärmefluss
im Gleichgewicht

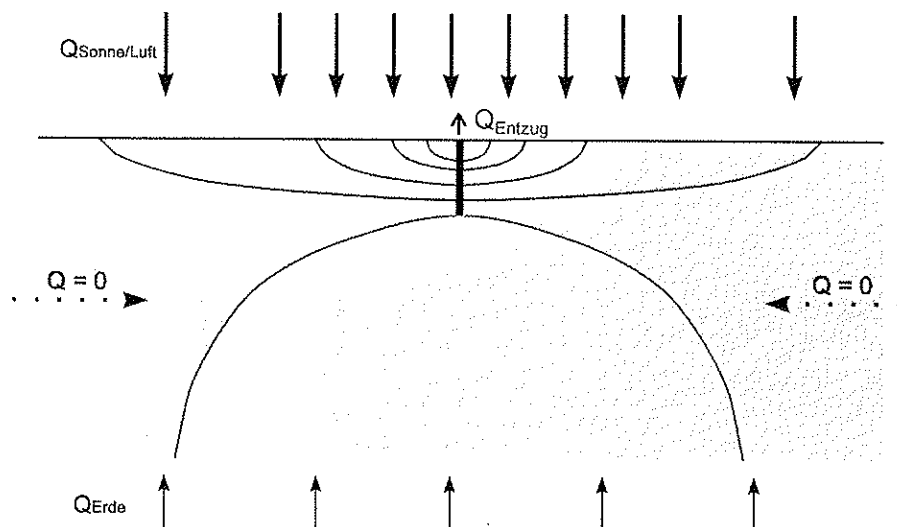


Abb 1-1: Thermischer Gleichgewichtszustand mit Wärmefflusslinien bei konstanter Wärmeentnahme in einer Erdwärmesonde: $Q_{\text{Entzug}} = Q_{\text{sonne/Luft}} + Q_{\text{Erde}}$

Sonnenenergie und Erdwärme Nach üblicher Terminologie wird sowohl die aus den tiefen Erdschichten nachströmende Wärme, als auch die Sonnenenergie, die die Erdoberfläche erwärmt, als erneuerbare Energie gewertet.

existiert Gleichgewichtszustand? Im folgenden soll somit der Fragestellung nachgegangen werden, ob es einen energetischen Gleichgewichtszustand gibt, wie er aussieht, wann er sich einstellt, welche Faktoren das Eintreten dieses Zustandes beeinflussen, wie ein Modell aussehen muss, damit dieser Zustand berechnet werden kann und ob dieses Modell mit den Beobachtungen und Messungen übereinstimmt.

2 ANALYTISCHER ANSATZ FÜR ERDWÄRMESONDEN

2.1 Reine Wärmeleitung als „worst case“

Wärmeleitung
Konvektion,
Dampfdiffu-
sion

Im Erdreich gibt es verschiedene Wärmetransportmechanismen. Neben Wärmeleitung und Konvektion (fließendes Grundwasser oder thermisch aktivierte Konvektion), können auch die noch wenig untersuchten Dampfdiffusionsprozesse eine Rolle spielen. Allen gemeinsam ist die ausgleichende Wirkung, das Streben nach dem Gleichgewichtszustand. Dieses Verhalten kann auch mit dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik begründet werden. Sind also neben der reinen Wärmeleitung noch weitere Wärmetransportmechanismen bedeutend, so führt dies immer dazu, dass ein Temperaturtrichter schneller wieder aufgefüllt wird. Ausser bei gewollter Wärmespeicherung erhöht uns dies den Ertrag, wir betrachten somit bei Vernachlässigung von Konvektion und Dampfdiffusion den „worst case“. Es soll deshalb im folgenden nur die Wärmeleitung untersucht werden, womit wir uns meist auf der sicheren Seite befinden. Auch nach Eskilson (1987) ist dies in der Regel der dominante Wärmetransportmechanismus im Erdreich.

Wärmeleitung Die Wärmeleitungsgleichung („Fourier-Gleichung“) hat die folgende Form:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T$$

Gl. 2-1

Darin ist die Temperaturleitfähigkeit a definiert als

$$a = \frac{\lambda_{\text{Erde}}}{c p_{\text{Erde}} \rho_{\text{Erde}}}$$

Gl. 2-2

Linearität Die Wärmeleitungsgleichung ist linear. Dies bedeutet, dass das Verhalten des Systems „Erde“ durch die Beschreibung einer Antwortfunktion, die das ganze Frequenzspektrum abdeckt, und durch Vorgabe der Anfangs- und Randbedingungen zu jeder Zeit eindeutig definiert ist. Oder mit anderen Worten: Die Antwortfunktion ersetzt uns die geometrischen Angaben über das System. Kennen wir die Antwortfunktionen, so benötigen wir keine Angaben mehr über Lage und Form z.B. eines Sondenfeldes. Neben Erdwärmesonden können aber auch beliebige Erdwärmetauscher mit ihrer Antwortfunktion beschrieben werden.

Antwort-
funktionen Bei Erdwärmesonden hat sich die Sprungantwort als Antwortfunktion durchgesetzt. Sie kann durch Messung oder durch rechnerische Simulation des Erdreiches bestimmt werden. Beispiel einer Sprungantwort ist das zeitliche Verhalten der Erdreichtemperatur im Abstand r_0 einer Erdwärmesonde beim plötzlichen Einschalten einer Wärmepumpe.

Superposition Eine weitere Eigenschaft linearer Systeme ist die Möglichkeit, komplexe Störungen des Systems in einfache Grundsignale (z.B. Sprünge) zu zerlegen und die Systemantwort durch Überlagerung (Superposition) der Antwortfunktionen zu bestimmen. Mit Sprungantworten können sowohl die Kurzzeiteffekte, als auch die Langzeiteffekte von Erdwärmesonden physikalisch korrekt beschrieben werden. Selbst der dynamische Anlaufvorgang bei einer Erdwärmesonde könnte damit berechnet werden. Damit steigt allerdings der Rechenaufwand stark an. Deshalb verzichtet das Programm EED (Hellström, Sanner, 1994) auf diese Möglichkeit und im Programm EWS (Huber, Schuler, 1997) wird im Sonden-Nahbereich mit dem Crank-Nicholson-Verfahren dynamisch simuliert und die Sprungantwort erst als äussere Randbedingung des Simulationsgebietes verwendet. Mit dieser Zweiteilung von Simulation mit finiten Differenzen im Sondennahbereich und analytischer Superposition von Sprungantworten als Temperaturrandbedingung kann erreicht werden, dass im Programm EWS sowohl das

Kurzzeitverhalten, inklusive dynamisches Anfahrverhalten, wie auch das Langzeitverhalten mit kurzer Rechenzeit korrekt berechnet werden können. Damit entfällt auch das numerisch heikle Setzen von Randbedingungen in reinen Simulationsprogrammen, wie dies etwa in den Programmen NUSOND oder COSOND nötig ist (Eugster, 1991). Ausserdem können bei der Verwendung von Sprungantworten mit dem Rechenaufwand von Einzelsonden auch ganze Sondenfelder korrekt simuliert werden.

2.2 Modellanforderungen

Welche Anforderungen müssen an ein Modell gestellt werden, damit geklärt werden kann, ob es einen thermischen Gleichgewichtszustand gibt?

Ansatz darf Resultat nicht vorweg nehmen	Allgemein kann festgehalten werden, dass wir nur mit solchen Modellen diese Frage beantworten können, die nicht bereits in sich selbst den Gleichgewichtszustand ausschliessen oder aber diesen sogar voraussetzen. Diese Feststellung ist zwar trivial, doch wurde in der Vergangenheit gerade dieser Grundsatz öfters verletzt, was verschiedentlich zu Fehlinterpretationen geführt hat.
Linienquellentheorie	Sanner (1992) stellt einige, z.T. bereits seit Jahrzehnten bekannte Ansätze vor, die ihren Ursprung in der Linienquellentheorie von Kelvin haben (z.B. Ansätze von Ingersoll & Plass und von Guernsey). Bei diesen Ansätzen wird vereinfachend von einer unendlich langen, vertikalen, linienförmigen Wärmesenke im Erdreich ausgegangen. Das Problem wird eindimensional, in Zylinderkoordinaten gelöst. Durch den Ansatz bedingt kann die Wärme nur horizontal nachfliessen, vertikale Regeneration von unten oder oben ist damit unmöglich. Mit der Linienquellentheorie wird es somit nie möglich sein, die Frage zu beantworten, ob es einen Gleichgewichtszustand gibt, da dieser Zustand das vertikale Nachfliessen der Wärme voraussetzt.
Brunnenanalogie	Ein ähnlicher Ansatz wurde von Werner (1996) mit der Brunnenanalogie aufgestellt. Auch dieser Ansatz ist eindimensional und somit nicht geeignet, unsere Frage nach dem Gleichgewichtszustand zu beantworten.
Simulation und Wärme-flussrandbe-dingung	Wie sieht es mit den existierenden, zweidimensionalen oder dreidimensionalen Simulationsprogrammen aus (z.B. SBM (Eskilson, 1986), NUSOND, COSOND (Eugster, 1991))? Hier ist die Wahl der äusseren, radialen Randbedingungen entscheidend. Der Simulant hat prinzipiell die Wahl zwischen Temperatur-Randbedingungen und Wärme-fluss-Randbedingungen. Um Rechenzeit zu sparen, wird oft für die radiale Randbedingung der Wärmefluss vorgegeben und dieser gleichzeitig Null gesetzt. Damit ist aber implizit die Existenz eines Gleichgewichtszustandes vorgegeben. Auch dieser Ansatz ist somit höchstens bedingt geeignet, die Existenz des Gleichgewichtszustandes nachzuweisen.
Programm SBM	Möglich ist die Ueberprüfung der Nachhaltigkeit mit einer Simulation mit Temperatur-Randbedingungen, vorausgesetzt ein genügend grosses Simulationsgebiet ist vorhanden. Im Programm SBM (Eskilson, 1986) kann ein sehr grosses Simulationsgebiet um die Erdwärmesonde definiert werden, wobei als äussere Randbedingung mit konstanten Temperaturen gerechnet wird. Das Rechengitter wird im Sondernahbereich sehr fein und mit zunehmender Sondendistanz immer gröber gewählt. Mit Hilfe der Superpositionstechnik kann mit diesem Programm aus dem Resultat einer Einzelsonde auch die Temperaturverteilung in einem ganzen Sondenfeld berechnet werden.
Experiment	Eine andere Möglichkeit besteht in der experimentellen Ueberprüfung. Um herauszufinden, wie ein solches Experiment angesetzt werden soll, müssen wir uns zunächst etwas mehr mit den Ähnlichkeitsgesetzen für Erdwärmesonden beschäftigen.

2.3 Ähnlichkeitsgesetze von Erdwärmesonden

2.3.1 Die Bezeichnungen an der Sonde

Bezeichnungen

Bevor wir uns den Gesetzmässigkeiten von Erdwärmesonden zuwenden, betrachten wir einen Schnitt durch eine Doppel-U-Sonde (cf. Abb. 2-1). Bei diesem Sondentyp wird zunächst eine Bohrung mit dem Radius r_1 erstellt. Darin werden 4 Sondenrohre eingeführt und mit einer Zement-Bentonitmischung hinterfüllt. In 2 dieser Sondenrohre fliesst das Sondenfluid hinunter und in 2 wieder hinauf. Die Rohre sind unten verbunden, wir betrachten einen geschlossenen Sondenkreislauf. Am Rand dieser Bohrung, also auf dem Radius r_1 , ist die Bohrlochtemperatur T_b definiert. Wenn das Sondenfluid die Sonde verlässt hat es eine Quelltemperatur von T_{Quelle} .

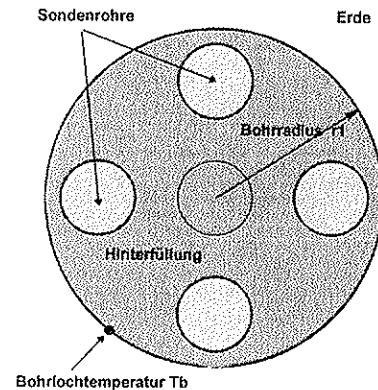


Abb 2-1: Sondenquerschnitt

2.3.2 Dimensionslose Sprungantwort „g-function“ von Eskilson

Sondenzeitkonstante

Sowohl Einzelsonden als auch Sondenfelder weisen bei geometrischer Ähnlichkeit auch ähnliche Temperatur-Sprungantworten auf. Der Zeitmassstab muss dabei nach Eskilson (1987) mit der Sondenzeitkonstante t_s

$$t_s = \frac{H^2}{9a} \quad \text{Gl. 2-3}$$

dimensionsbefreit werden. Die dimensionslose Zahl Es von Eskilson

Eskilsonzahl

$$Es = \frac{t \cdot 9a}{H^2} \quad \text{Gl. 2-4}$$

kann somit als dimensionslose Zeit für Sondenfelder und Einzelsonden betrachtet werden.

Nach Eskilson (1987) kann bei einer Einzelsonde bis zum Zeitpunkt t_s ($Es = 1$) die vertikale Wärmeleitung im Erdreich (bei einem maximalen Fehler von 7%) vernachlässigt werden, ab ca. $Es = 10$ ist der Gleichgewichtszustand im Erdreich beinahe hergestellt. Im Gleichgewichtszustand fliesst im Jahresschnitt die gleiche Energiemenge, die mit der Sonde dem Erdreich entzogen wird, von der Erdoberfläche und zu einem kleineren Teil vom Erdinneren vertikal wieder nach. Es findet somit keine weitere Auskühlung mehr statt.

g-function

Die Dimensionsbefreiung der Temperaturabsenkung ΔT am Sondenradius r_b , bei einer spezifischen Wärmeentzugsleistung $\dot{q}$, erfolgt mit $\dot{q}$, der Wärmeleitfähigkeit der Erde λ_{Erde} und der Sondenlänge H . Damit kann die dimensionslose Temperaturabsenkung g definiert werden als

$$g\left(Es, \frac{r_b}{H}\right) = \frac{\Delta T \cdot 2 \pi \lambda_{\text{Erde}}}{\dot{q}} \quad \text{Gl. 2-5}$$

Die dimensionslose Temperatursprungantwort g („g-function“) ist nach Eskilson (1987) sowohl für Einzelsonden, als auch für Sondenfelder einzig eine Funktion der dimensionslosen Zeit (Es) und des dimensionslosen Sondenradius r_b/H . Es wird dabei von einem konstanten, spezifischen Wärmeentzug pro Sondenlänge $\dot{q}$ ausgegangen. Für eine Einzelsonde im Bereich $5r_b^2/a < t < t_s$ kann die Funktion g bei einem maximalen Fehler von 7% angenähert werden mit

$$g(Es, r_b / H) = \ln\left(\frac{H}{2r_b}\right) + 0.5 \ln(Es) \quad \text{Gl. 2-6}$$

Für Zeiten grösser als t_s strebt die Einzelsonde dem folgenden Gleichgewichtszustand zu:

$$g(r_b / H) = \ln\left(\frac{H}{2r_b}\right) \quad \text{Gl. 2-7}$$

Bohrloch-
temperatur

Um die absolute Temperatur im Erdreich zu erhalten, kann nun die Sprungantwort ΔT einfach von der Anfangstemperatur T_m abgezählt werden (Superpositionsprinzip). Die Bohrlochtemperatur T_b am Bohrlochradius r_1 kann so aus g und T_m wie folgt berechnet werden:

$$T_b = T_m - \frac{\dot{q}}{2 \pi \lambda_{\text{Erde}}} g(Es, r_1 / H) \quad \text{Gl. 2-8}$$

Was jetzt noch fehlt, ist die Abhängigkeit der g -Funktion vom Sondenradius r_1 . Dafür gilt nach Eskilson der folgende, logarithmische Zusammenhang:

$$g(Es, r_1 / H) = g(Es, r_b / H) - \ln(r_1 / r_b) \quad \text{Gl. 2-9}$$

Diese Formel ist im Sonden-Nahbereich gültig und ermöglicht es uns, mit einer einzigen Sprungantwort g das Temperaturverhalten im ganzen Sonden-Nahbereich zu bestimmen.

In Abbildung 2-2 sind als Beispiel die dimensionslosen Temperatur-Sprungantworten („g-functions“) von 2 Erdwärmesonden mit Abstand B eingezeichnet. Im Vergleich dazu ist gestrichelt die g -function einer Einzelsonde zu finden. Diese g -functions wurden mit dem Rechenprogramm SBM (Eskilson, 1987) berechnet.

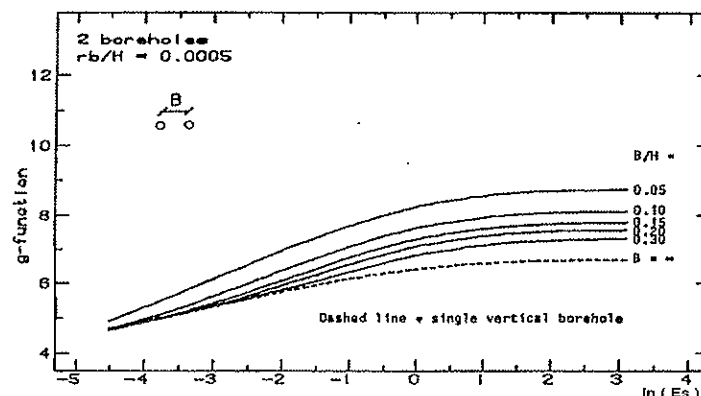


Abb 2-2: Dimensionslose Sprungantworten „g-functions“ für 2 Erdwärmesonden mit dem Abstand B nach Eskilson (1987). Die Sprungantwort einer Einzelsonde ist gestrichelt eingezeichnet.

3 VERGLEICH MIT MESSUNGEN

Wie das Kapitel 2 zeigt, postuliert Eskilson (1987) ganz klar den Gleichgewichtszustand. Er leitet aus Aehnlichkeitsbetrachtungen sogar den Zeitpunkt ab, ab wann dieser Gleichgewichtszustand eintritt (ca. $10 \times t_s$). Es ist nun interessant zu vergleichen, ob sich die Theorie von Eskilson und die Messungen des Thermoprogrammes Erdwärmesonden Burgdorf (Werner et al., 1996) decken.

3.1 Messungen in Burgdorf

Kennwerte
Burgdorf

Die Erdwärmesonden des Versuchsfeldes in Burgdorf weisen die folgenden Kennwerte auf:

Wärmeleitfähigkeit Erde	λ_{Erde} (Mittel)	2.6 W/mK
Temperaturleitfähigkeit Erde	a (Mittel)	$0.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Sondenlänge	H	100 m
Sondenzeitkonstante	t_s	44 Jahre

Da die Sondenzeitkonstante in diesem Versuchsfeld also 44 Jahre beträgt, können nach der damit vergleichsweise kurzen Messzeit noch keine direkten, aus Messungen abgeleitete Aussagen zum Gleichgewichtszustand gemacht werden. Im folgenden soll deshalb nur untersucht werden, ob die Messresultate von Burgdorf den Angaben von Claesson und Eskilson (1987) widersprechen. Diese haben in ihrem Paper für eine Einzelsonde den Anteil der Wärme, der im Vergleich zum Wärmeentzug durch die Oberfläche zusätzlich wieder nachfließt, berechnet. In ihrem Beispiel kommen Sie auf die folgenden Werte:

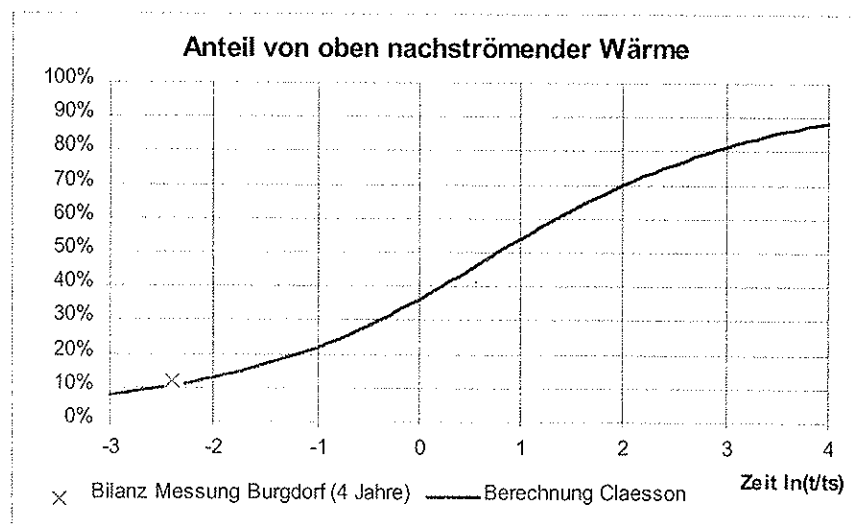


Abb 3-1: Vergleich des Anteils von der Bodenoberfläche ins Erdreich nachströmenden Wärme für einen berechneten Fall nach Eskilson (1987) mit der Energiebilanz der Messung Burgdorf.

untiefe Geothermie = gespeicherte Sonnenenergie	In Burgdorf wurde der von der Oberfläche nachströmende Wärmeanteil in der Periode 1991 / 1995 auf maximal 12% bilanziert (Werner et al., 1996, Seite 159), der natürliche geothermische Wärmefluss von unten auf 8%, bezogen auf den Wärmeentzug aus der Erdwärmesonde. In Abbildung 2-2 können diese Werte mit den Berechnungen von Claesson und Eskilson (1987) verglichen werden. Der Vergleich zeigt für beide Werte eine sehr schöne Übereinstimmung.
gute Übereinstimmung mit Messung	Theorie und Bilanz Burgdorf stimmen somit zumindest in der betrachteten, kurzen Periode von 4 Jahren gut überein. Es kann ganz bestimmt kein Widerspruch zwischen Theorie und Praxis festgestellt werden! Auch die Theorie geht davon aus, dass bis zum Erreichen der Sondenzeitkonstanten (44 Jahre für das Sondenfeld in Burgdorf) mehr als 50% der entzogenen Energie aus der Abkühlung des Erdreiches um die Sonde kommt. Daraus zu schliessen, dass untiefe Geothermie nicht erneuerbar sei, ist nicht haltbar!
Ausbreitung des Temperaturtrichters	Abbildung 3-1 zeigt, dass die Wärme erst mit einer Zeitverzögerung von Jahren bis Jahrzehnten nachfließt. Müssen wir nun daraus schliessen, dass sich auch der Temperaturtrichter in dieser Periode um die Erdwärmesonde im gleichen Ausmass weiter vertieft? Eugster et al. (1999) sind dieser Frage sehr detailliert nachgegangen. Ihre sorgfältige Arbeit hat gezeigt, dass wir bereits nach 4 Jahren im Sondennahbereich beinahe die Temperaturverteilung des Gleichgewichtszustandes erreicht haben und danach nur noch mit einer geringfügigen, weiteren Temperaturabsenkung zu rechnen haben. Bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes haben wir aber mit einer kontinuierlichen, radialen Ausbreitung des Temperaturtrichters zu rechnen.

3.2 Rechenprogramme für Erdwärmesonden

Programme EED und TRNSBM	Charakteristisch für die Erdwärmenutzung ist, dass wir beim Verhalten des Erdreiches sowohl Kurzzeiteffekte (instationäres Anlaufverhalten und Betrieb über wenige Stunden) bis zum Langzeitverhalten (mehrjähriger Betrieb) einen sehr grossen Zeitbereich abdecken müssen. Es wurde deshalb schon in Frage gestellt, ob dies mit dem gleichen Modell überhaupt möglich ist (Eugster, Hopkirk, Rybach, 1999). Eine einfache Simulation über diesen ganzen Zeitbereich ergibt in der Tat eine sehr grosse, benötigte Rechenleistung. Es wurden deshalb verschiedene Ansätze angewandt, um dieses Problem zu lösen. Das Programm EED beispielsweise (Hellström, Sanner, 1994) kann als kleinsten Zeitschritt 3 Stunden berechnen. Effekte von kürzerer Dauer sind damit nicht abbildbar. Das Programm TRNSBM (Pahud, Fromentin, Hadorn, 1996) benötigt ein zusätzliches, nachgeschaltetes Rohrmodul mit entsprechender Wärmeträgerkapazität, um die Anfahreffekte nachbilden zu können.
Programm EWS	Beim Programm EWS (Huber, Schuler, 1997) wird das Problem durch einen Modellwechsel zwischen Sondennahbereich (Simulation mit Crank-Nicholson-Verfahren) und analytischem Ansatz für die Randbedingungen des Simulationsgebietes (Superposition von Sprungantworten) für das Langzeitverhalten gelöst. Damit lassen sich nun mit dem gleichen Modell sowohl die Kurzzeiteffekte (instationäres Anfahrverhalten einer Erdwärmesonde), als auch die Langzeiteffekte korrekt abbilden, ohne dass damit unnötig viel Rechenzeit gebraucht wird.

Programm
EWS: Anfahr-
verhalten

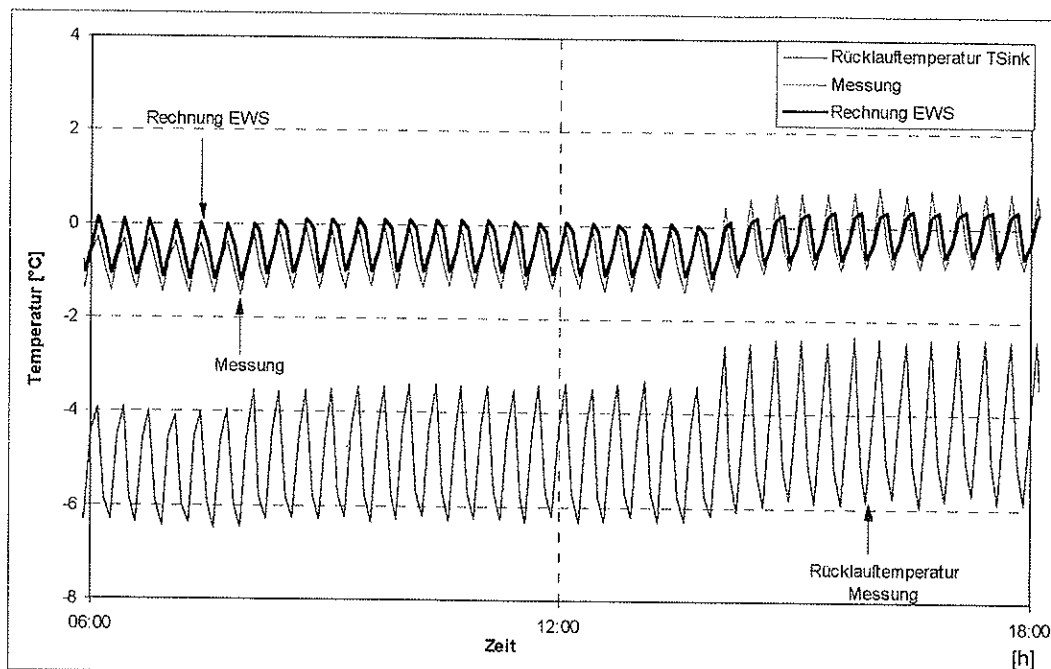


Abb 3-2: Kurzzeitverhalten: Vergleich Rechnung EWS und Messung in Burgdorf

Die Kurzzeiteffekte wurden anhand einer Messung des Thermoprogrammes Burgdorf (Werner et al., 1996) validiert (Abb. 3-2), die Langzeiteffekte konnten mit der Messung von Elgg (Eugster, 1991) überprüft werden (Abb. 3-3). Beide Vergleiche zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Voraussetzung für die gute Übereinstimmung sind genau bekannte Anfangsbedingungen und Stoffwerte des Erdreiches. Beides war bei diesen Validierungsfällen vorhanden.

Programm
EWS:
Langzeit-
verhalten

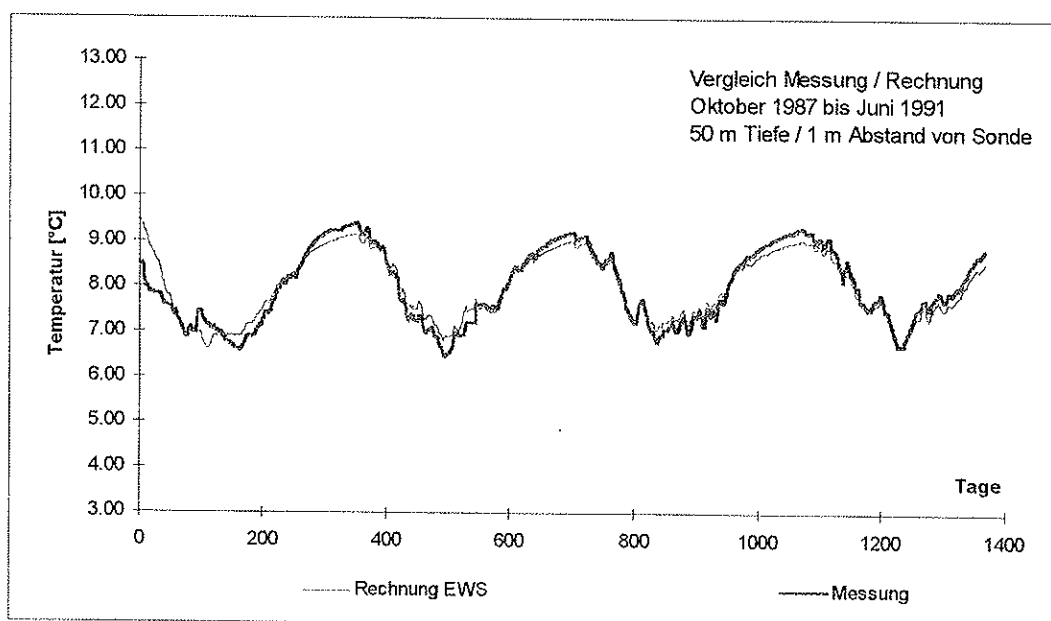


Abb 3-3: Langzeitverhalten: Vergleich Rechnung EWS und Messung an Erdsondenanlage in Elgg, Erdreichtemperaturen in 50m Tiefe

4 WÄRMEKLAU VOM NACHBARN?

Wärmestrom-
dichte an
Oberfläche

Mit den Gleichungen 2-3 bis 2-9 lässt sich für eine Einzelsonde ein Temperaturfeld berechnen. Daraus abgeleitet kann die durchschnittliche Wärmestromdichte von der Erdoberfläche ins Erdreich abgeschätzt werden. Auf der folgenden Abbildung 4-1 ist für ein Beispiel einer 100m tiefen Sonde die Wärmestromdichte im Gleichgewichtszustand auf einem 100m x 100m grossen Feld dargestellt. Das Erdreich hat dabei eine Wärmeleitfähigkeit von 2 W/mK. Da die Gleichung 2-9 nur im Sondennahbereich korrekt ist, ergibt sich im Randbereich ein gewisser Fehler.

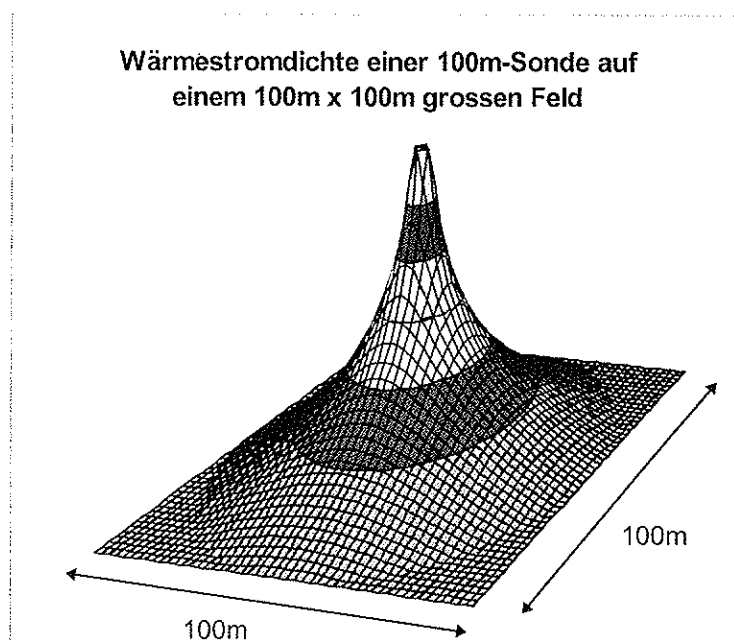


Abb 4-1: Wärmestromdichte im Jahresmittel an der Erdoberfläche im Gleichgewichtszustand bei konstantem Wärmeentzug für eine 100m Sonde.

Zu einem ähnlichen Resultat gelangt man, wenn statt Gleichung 2-9 die analytische Lösung von Claesson und Eskilson (1987b) verwendet wird (Abbildung 4-2):

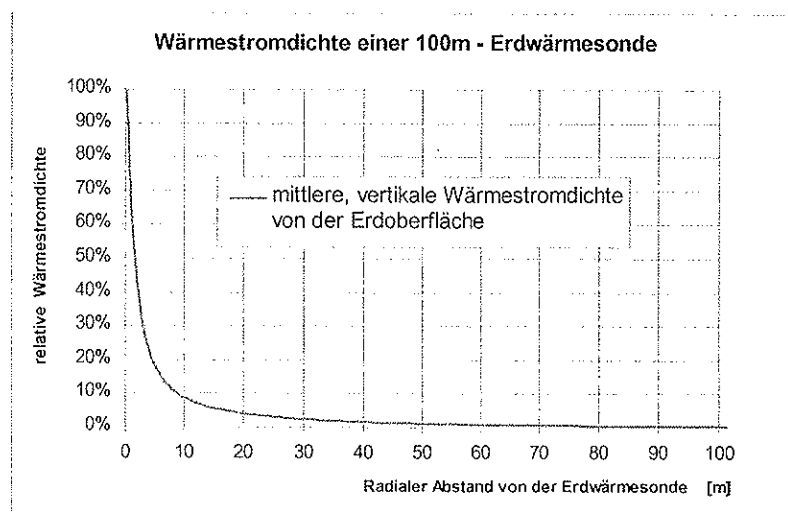


Abb 4-2: Zusätzliche Wärmestromdichte an der Erdoberfläche im Gleichgewichtszustand für eine 100m Sonde mit dem Ansatz von Claesson und Eskilson (1987b)

Einflussbereich = Sondentiefe

Aus der Abbildung 4-1 und 4-2 ist ersichtlich, dass der Einflussbereich einer Erdwärmesonde bei typischen Stoffwerten der Erde leicht grösser ist als die Bohrtiefe der Erdwärmesonde. Eskilson (1987) kommt mit seinen Simulationsrechnungen zum gleichen Schluss. Es stellt sich somit die Frage, wie stark eine Nachbarsonde die Entzugsleistung beeinflusst. Auch diese Frage lässt sich, wie das nachfolgende Beispiel zeigt, mit der Theorie von Eskilson relativ elegant beantworten:

4.1 Beispiel mit 2 Erdwärmesonden

2 Sonden mit H=100m Betrachten wir als Beispiel den folgenden Fall:

Ein Einfamilienhausbesitzer habe auf seinem Grundstück eine 100m tiefe Erdwärmesonde (H=100m). Auf dem Nachbargrundstück werde nun ebenfalls eine Erdwärmesonde gebohrt, bei der mit einer gleichen Entzugsleistung gerechnet werden muss. Als Varianten stehen die folgenden Abstände zur ersten Erdwärmesonde zur Diskussion:

1. keine Nachbarsonde (unbeeinflusst)
2. Abstand B der beiden Erdwärmesonden von 30 m
3. Abstand B der beiden Erdwärmesonden von 5 m

Es stellt sich nun die Frage, um wieviel die Quelltemperatur in der ersten Erdwärmesonde im Schnitt sinken wird, da das Nachströmen der Wärme durch die neue Erdwärmesonde behindert wird.

Kennwerte des Beispiels Wir gehen in unserem Beispiel von den folgenden Kennwerten aus:

r_1	= 0.06 m (Bohrradius)
λ_{Erde}	= 2.4 W/mK
ρ_{Erde}	= 2'400 kg/m ³
$c_{p\text{Erde}}$	= 900 J/kgK
T_m	= 11.5°C (ungestörte Erdreichtemperatur in 50m Tiefe)
Q_{Quelle}	= 4.5 kW (Entzugsleistung beim Betrieb der Sonde)
t_{Betrieb}	= 1800 h/a (Betriebszeit der Erdwärmesonde)

Zeitkonstante 32 Jahre mit diesen Kennwerten ergibt sich für unsere Erdwärmesonden eine Zeitkonstante von $t_s=32$ Jahren. Aus der Abbildung 2-2 können wir nun die dimensionslose Temperatursprungantwort (g-function) für unsere 3 Varianten herauslesen. Nach 32 Jahren ($\ln(E_s)=0$) und 234 Jahren ($\ln(E_s)=2$, Gleichgewichtszustand) erhalten wir für den Radius 5 cm die folgenden Werte:

g-function bei $r_b=5\text{cm}$	g-Wert nach 32 Jahren	g-Wert nach 234 Jahren
Einzelsonde	6.40	6.66
Sondenabstand 30 m	6.79	7.23
Sondenabstand 5 m	8.20	8.62

g-function am Bohrloch Mit Gleichung 2-9 können wir nun die g-functions beim Bohrlochradius $r_b=6\text{cm}$ berechnen:

g-function bei $r_b=6\text{cm}$	g-Wert nach 32 Jahren	g-Wert nach 234 Jahren
Einzelsonde	6.22	6.48
Sondenabstand 30 m	6.61	7.05
Sondenabstand 5 m	8.02	8.44

durchschnittliche Sondenbelastung $\dot{q}$ Aus der Entzugsleistung Q_{Quelle} und der Betriebszeit der Sonde t_{Betrieb} kann die durchschnittliche Sondenbelastung $\dot{q}$ im Jahresschnitt berechnet werden. Diese beträgt im Beispiel:

$$\dot{q} = \frac{Q_{\text{Quelle}}}{H \cdot 8760 \text{ h/a}} \cdot t_{\text{Betrieb}} = 9.25 \text{ W/m} \quad \text{Gl. 4-1}$$

Bohrlochtemperatur T_b Mit Gleichung 2-8 erhalten wir daraus die Bohrlochtemperatur T_b :

durchschnittliche Bohrlochtemperatur T_b	T_b nach 32 Jahren	T_b nach 234 Jahren
Einzelsonde	7.68°C	7.53°C
Sondenabstand 30 m	7.45°C	7.18°C
Sondenabstand 5 m	6.58°C	6.33°C

Quellentemperatur Eine 30 m entfernte Erdwärmesonde senkt die durchschnittliche Bohrlochtemperatur in unserem Beispiel also um maximal 0.35°C. Und da man die mittlere Fluidtemperatur einfach als

$$\overline{T_f} = T_b - R_b \cdot \dot{q} \quad \text{Gl. 4-2}$$

mit dem Bohrlochwiderstand R_b beschreiben kann, sinkt auch die durchschnittliche Quelltemperatur um den gleichen Wert (R_b ist nicht von der Nachbarsonde abhängig und für ein gegebenes Beispiel konstant).

mehr als 2 Sonden Der geringe Einfluss einer einzelnen Erdwärmesonde in der Nachbarschaft ist somit sicher kein Grund zur Beunruhigung. Der „Wärmeklaus“ ist gering. Es bleibt aber zu bedenken, dass jede weitere Sonde im gleichen Abstand die Quelltemperatur um zusätzlich exakt die gleiche Temperaturdifferenz senkt (Superpositionsprinzip). Beschließen also alle meine 8 Nachbarn, in 30 m Entfernung ihr Eigenheim mit einer Erdwärmesonde zu beheizen, so sinkt meine durchschnittliche Quelltemperatur um maximal $8 \times 0.35^\circ\text{C} = 2.8^\circ\text{C}$. Und werden die 8 Nachbarsonden gar nur in einem Abstand von 5 m gebohrt, so sinkt meine durchschnittliche Quelltemperatur um $8 \times 1.2^\circ\text{C} = 9.6^\circ\text{C}$. Diese Werte sind natürlich nur für unser Zahlenbeispiel gültig.

einfache Berechnung des „Wärmeklaus“ Mit dem obigen Beispiel konnte gezeigt werden, dass mit der Theorie von Eskilson der Einfluss von Nachbarsonden einfach berechnet werden kann. Komplizierte Simulationen sind dazu nicht notwendig. Leichte Grundwasserbewegungen machen das Problem zwar asymmetrisch, die Grundproblematik der Beeinflussung von Nachbarsonden bleibt aber die gleiche.

Bewertung Wie diese Temperaturbeeinflussung nun zu werten ist, soll an dieser Stelle offen gelassen werden. Immerhin sollte man bedenken, dass in letzter Zeit vermehrt nur mit Wasser gefüllte Erdwärmesonden als Wärmequelle für eine Wärmepumpe gebaut wurden. Eine durchschnittliche Temperaturabsenkung um 2°C kann in einer solchen Anlage bereits den Unterschied zwischen sicherem Betrieb und Frostgefahr des Sondenfluids bedeuten!

5 VARIABLEN

α	[W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient von der Sole zum Sondenrohr
λ_{Erde}	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit der Erde
γ	[-]	0.5772, Eulerkonstante
a	[m ² /s]	Temperaturleitfähigkeit
B	[m]	Abstand von Erdwärmesonden
c_p	[J/kgK]	spezifische Wärmekapazität des Solefluids
Es	[-]	Eskilsonzahl, dimensionslose Zeit (t/t_s)
g	[-]	dimensionslose Temperatursprungantwort der Erde nach Eskilson
H	[m]	Erdwärmesondenlänge
m	[kg/s]	Solemassenstrom
q	[W/m]	Spezifische Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonde (Q/H)
r_o	[m]	Radius des Sondenrohres
r_1	[m]	Bohrlochradius
r_b/H	[m]	dimensionsloser Sondenradius der g-function
R_α	[Km/W]	thermischer Wärmeübergangswiderstand (vom Sondenrohr zum Fluid)
R_b	[Km/W]	thermischer Bohrlochwiderstand (vom Sondenfluid bis zum Bohrradius)
R_c	[Km/W]	thermischer Sondenwiderstand (von Sondenrohr- bis Bohrradius)
R_f	[Km/W]	thermischer Sondenwiderstand (von Sondenrohr- bis Bohrradius)
t	[s]	Zeit
t_s	[s]	Sondenzeitkonstante
T_b	[K]	Bohrlochtemperatur (in der Tiefe $H/2$)
T_f	[K]	Mittlere Fluidtemperatur
T_m	[K]	ungestörte Erdreichmitteltemperatur (in der Tiefe $H/2$)
T_{Quelle}	[K]	Quellentemperatur einer Erdwärmesonde

6 LITERATURVERZEICHNIS

- Carslaw, H.; Jaeger, J. (1959): Conduction of Heat in Solids. Oxford.
- Claesson, J.; Eskilson, P. (1987): Conductive Heat Extraction by a Deep Borehole. Thermal Analysis and Dimensioning Rules. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund.
- Claesson, J.; Eskilson, P. (1987b): Conductive Heat Extraction by a Deep Borehole. Analytical Studies. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund.
- Eskilson, P. (1986): Superposition Borehole Model. Manual for Computer Code. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- Eskilson, P. (1987): Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- Eugster, W. (1991): Erdwärmesonden - Funktionsweise und Wechselwirkung mit dem geologischen Untergrund. Feldmessungen und Modellsimulation. Diss. ETH Nr. 9524.
- Eugster, W.; Hopkirk, J.; Rybach, L.; (1999): Ist untiefe Geothermie erneuerbar? Bundesamt für Energie, Programm Geothermie, Bern.
- Fromentin, A.; Pahud, D.; Jaquier, C.; Morath, M. (1997): Recommandations pour la réalisation d'installation avec pieux échangeurs. Empfehlungen für Energiepfahlsysteme. Rapport final, décembre 1997. Office fédéral de l'énergie, Bern.
- Hässig, W.; Suter, D.; Bigler, R.; Huber, A. (1998): Regeneration von Erdwärmesonden. Phase I: Potentialabschätzung. Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm UAW, Bern. ENET-Nr. 9722601 / 1; Artikelnummer 30897.
- Hellström, G. (1991): Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage Systems. Theory. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- Hellström, G.; Sanner, B. (1994): PC-Programm zur Auslegung von Erdwärmesonden. Erdgekoppelte Wärmepumpen. IZW-Bericht 1/94. Fachinformationszentrum Karlsruhe.
- Huber, A.; Müller, Ch.; Berchtold, O.; Eggenberger, H. (1996): Luftvorwärmung für Wärmepumpen in Erdregistern. Phase 1, Kosten-Nutzen-Analyse. Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm UAW, Bern. ENET-Nr. 9554499 / 1.

- Huber, A.; Schuler, O. (1997): Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm UAW, Bern. ENET-Nr. 9658807.
- Klein, A. et al. (1996): TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.
- Leu, W. et al. (1999): Programm SwEWS-99. Berechnungsprogramm für geothermische Eigenschaften der Schweizer Molasse (0-500m). Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm UAW, Bern. ENET-Nr. 9723763.
- Leu, W. et al. (1999): Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich 0-500m). Bundesamt für Energie, Programm Geothermie, Bern.
- Pahud, D.; Fromentin, A.; Hadorn J. (1996): The Superposition Borehole Model for TRNSYS (TRNSBM). User Manual for the November 1996 Version. Internal Report. LASEN - DGC - EPFL, Lausanne.
- Pahud, D.; Fromentin, A. (1998): Pieux échangeurs: outils de simulation, KWH - Energieforschung im Hochbau, Status-Seminar ETH Zürich.
- Pahud, D.; Hubbuch, M. (1998): Response-Test für die Energiepfahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen. Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Wärmespeicherung, Bern.
- Pahud, D.; Fromentin, A.; Hubbuch, M. (1999): Heat exchanger pile system for heating and cooling at Zürich airport. IEA Heat Pump Centre Newsletter, Volume 17 - No. 1/1999, pp. 15-16.
- Pahud, D.; Fromentin, A. (1999): PILESIM: a Simulation Tool for Pile and Borehole Heat Exchanger Systems. Bulletin d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, Suisse.
- Sanner, B. (1992): Erdgekoppelte Wärmepumpen, Geschichte, System, Auslegung, Installation. IZW-Berichte 2/92. Fachinformationszentrum Karlsruhe.
- Werner, A.; Bigler, R.; Niederhauser, A. et al. (1996): Grundlagen für die Nutzung von Wärme aus Boden und Grundwasser im Kanton Bern. Thermoprogramm Erdwärmesonden, Burgdorf. Schlussbericht. Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kt. Bern (WEA).
- Wetter, M.; Huber A. (1997): TRNSYS Type: Vertical Borehole Heat Exchanger, EWS Model. Zentralschweizerisches Technikum ZTL, Luzern.
- Zimmermann, M. et al. (1999): Handbuch der passiven Kühlung. EMPA (ZEN)/ Bundesamt für Energie BFE, Bern. ISBN 3-905594-06-4.