



Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal d'energia

DIS Projekt- Nr.: 29'606
DIS Vertrags- Nr.: 69'383

Programm
Geothermie

Ist untiefe Geothermie erneuerbar?

ausgearbeitet durch

Dr. Walter J. Eugster

Polydynamics Engineering, Malojaweg 19, 8048 Zürich

Dr. Robert J. Hopkirk

Polydynamics Engineering, Bahngasse 3, 8708 Männedorf

Prof. Dr. Ladislaus Rybach

Institut für Geophysik, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

März 1999

Schlussbericht

Ist untiefe Geothermie erneuerbar?

Kurzbericht im Auftrag des Bundesamtes für Energie
(Projekt-Nr. 29'606, Vertrags-Nr. 69'383)

verfasst von

Dr. Walter J. Eugster¹, Dr. Robert J. Hopkirk², Prof. Dr. Ladislaus Rybach³

¹ Polydynamics Engineering Zürich, Malojaweg 19, CH-8048 Zürich

Tel. 01 430 15 00; Fax 01 430 15 04

<http://www.polydynamics.epetech.ch>; wje@polydynamics.epetech.ch

² Polydynamics Engineering Männedorf, Bahngasse 3, CH-8708 Männedorf

Tel. 01 920 54 20; Fax 01 790 17 40

roberthopkirk@compuserve.com

³ Institut für Geophysik, ETH Höggerberg, CH-8093 Zürich

Tel. 01 633 20 76; Fax 01 633 10 65

<http://www.gtr.geophys.ethz.ch>; rybach@geo.phys.ethz.ch

<u>Inhalt</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung, Fragestellung	1
2. Vorgänge im Untergrund	2
3. Langzeitverhalten und Nachhaltigkeit	3
4. Analytische Lösungen oder FE/FD-Simulation?	4
5. Beschreibende Figuren und Tabellen	5
6. Überblick über die bisherigen Berichte und Publikationen	9

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden und wurde durch dieses Amt mitfinanziert. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichtes verantwortlich.

1. **Einleitung, Fragestellung**

Bei der Nutzung der untiefen Erdwärme mit Hilfe von Erdwärmesonden wird häufig folgende Frage gestellt: „Ist diese Erdwärme wirklich erneuerbar?“. Oft folgt sofort die Anschlussfrage: „Nutze ich mit meiner Erdwärmesonden-Anlage auch die Wärme meines Nachbarn?“ oder „Mein Nachbar nutzt bereits die Erdwärme - hat es für meine Erdwärmesonde noch genügend Wärme im Untergrund?“.

Gleichzeitig wird meist der natürliche vertikale Wärmefluss aus dem Erdinnern, der im Schweizer Mittelland ca. 65 mW/m² beträgt, als Bezugsgrösse verwendet. Solche Berechnungen führen unweigerlich zum Resultat, dass eine einzelne Erdwärmesonde eine Fläche mit einem Radius von hundert und mehr Meter für einen „erneuerbaren“ Betrieb benötigt.

Auf den folgenden Seiten sollen diese Fragen und Probleme auf einfache Art und Weise beantwortet und geklärt werden. Die mittlerweile bald 20jährige Forschungserfahrung in untiefer Geothermie der Autoren und der entsprechenden Firmen und Institutionen (ETH Zürich; Polydynamics Engineering, früher: Polydynamics Ltd.) erlauben ein einfaches und zielgerichtetes Vorgehen mit beschreibenden Figuren und vielen Literatur- und Berichtsverweisen.

Die aufgeführten Berichte und Veröffentlichungen können gegen eine Gebühr wie folgt bezogen werden:

- Berichte ab 1989: bei ENET, Bern.
Anfragen über Tel. 031 350 00 05, Bestellungen über Fax 031 352 77 56.

- Informationen und Berichte über Pilot- und Demonstrationsanlagen im Rahmen von Energie 2000: bei Nova Energie, Aarau.
Anfragen über Tel. 062 834 03 00; Bestellungen über Fax 062 834 03 23 bzw. über Internet:
http://www.infoenergie.ch/p_d.
- Alle Berichte: Bei den Autoren.

2. Vorgänge im Untergrund

a) Erdwärmesonden in trockenem bzw. natürlich feuchtem Untergrund

Im natürlich feuchten Untergrund, d.h. in Böden ohne fließendem Grundwasser, in denen die reine Wärmeleitung deutlich vorherrscht, bewirkt der Betrieb einer einzelnen Erdwärmesonde bereits nach wenigen Betriebsjahren eine bleibende Abkühlung der unmittelbaren Sondenumgebung von ca. 1K. Nach 2 - 3 Betriebsjahren erreicht dieser bleibend abgekühlte Bereich einen Radius von ca. 2.5 m um die Sonde. Bis zum Erreichen der theoretischen Lebensdauer einer Erdwärmesonde (ca. 50 - 60 Jahre) strebt diese bleibende Abkühlung im Nahbereich asymptotisch gegen ca. 2K. Die Wärmeleitung im Untergrund bewirkt, dass sich dieser abgekühlte Bereich mit zunehmenden Betriebsjahren langsam, aber stetig vergrössert. Dieser Effekt beschreibt die *Langzeitfolgen* der Erdwärmenutzung (*flache Temperatursenke*).

Diese Langzeitfolgen beeinträchtigen jedoch die Leistungsfähigkeit von korrekt ausgelegten Einzelsonden oder korrekt ausgelegten Sondengruppen in keiner Weise. In letzterem Fall gilt insbesondere ein Minimalabstand zwischen zwei Sonden zu beachten, der bei einer Sondenlänge von 100 m einen Wert von 6 - 10 m erreichen soll. Weiter ist bei der Auslegung von Sondengruppen ein je nach Grösse der Gruppe um ca. 10 - 20 % geringerer jährlicher Energieentzug zu berücksichtigen.

Im *Kurzzeitbereich*, d.h. wenn die Erdwärmesonde während einiger Stunden in Betrieb ist, wird der Nahbereich der Sonde massiv um 5 - 10 K abgekühlt. Es entsteht ein stark ausgeprägter *Temperaturtrichter*. Sobald die Erdwärmesonde wieder ausser Betrieb geht, füllt sich dieser Temperaturtrichter sofort wieder auf. Diese Kurzeiteffekte sind nicht mit den oben beschriebenen Langzeitfolgen zu verwechseln.

Dieser Temperaturtrichter treibt den Wärmeentzug durch die Erdwärmesonde erst an. Der Temperaturtrichter beschreibt das Kurzzeitverhalten der Erdwärmesonde. Er bildet sich entlang der ganzen Sonde mehr oder weniger stark aus. Dieser Temperaturtrichter bewirkt eine Wärmesenke mit Temperaturgradienten zwischen 10 K/m (bei der Sonde) und 1 K/m (am Rand des Trichters). Dies entspricht rund dem 30- bis 300fachen Wert des ungestörten natürlichen geothermischen Gradienten (ca. 0.03 K/m).

Die Wärme des Untergrundes fliesst deshalb in unmittelbarer Nähe hauptsächlich in radialer Richtung der Sonde zu. Es kommt hinzu, dass die im natürlich feuchten Untergrund ablaufenden Dampfdiffusionsprozesse den Wärmetransport in Richtung der Sonde beträchtlich verstärken.

Selbst wenn sich der Temperaturtrichter mit der Zeit etwas nach aussen verlagert, wächst er jedoch nur bis einem gewissen Mass. Der kurzzeitig immer wieder entstehende und verschwindende Trichter bewirkt schliesslich die eingangs beschriebenen Langzeitfolgen.

Die Tiefe und das Ausmass des Trichters spiegelt zu jedem Zeitpunkt eine Situation, welche durch verschiedene Faktoren definiert wird:

- durch die Intensität und den zeitlichen Verlauf der vom Erdreich entzogenen Energiemenge
- durch die thermischen Eigenschaften des Gesteins entlang der Sonde
- durch den ursprünglichen geothermischen, vertikalen Temperaturgradienten
- durch den Wärmeaustausch zwischen Boden und Atmosphäre

Daraus wird ersichtlich, dass um jede Erdwärmesonde ein thermisch gestörter Bereich entsteht, welcher sich aus dem eigentlichen Temperaturtrichter (Kurzeiteffekt) und der Langzeitabkühlung (flache Temperatursenke) zusammensetzt.

Die Erfassung dieser Prozesse und insbesondere ihrer zeitabhängigen Dynamik ist mit einem markanten Aufwand verbunden. Während ca. 18 Jahren hat das Forschungsteam bestehend aus *Polydynamics Ltd.*,

Zürich, Polydynamics Engineering sowie der Forschungsgruppe für Radiometrik und Geothermie des Instituts für Geophysik der ETH Zürich mehr als 30 Berichte veröffentlicht.

b) Erdwärmesonden im fließenden Grundwasser

Kommen die Erdwärmesonden in einen Untergrund mit Bereichen von fließendem Grundwasser zu liegen, so verändert sich das oben beschriebene Kurz- und Langzeitverhalten der Sonden. Der Einfluss des fließenden Grundwassers auf das Langzeitverhalten von Erdwärmesonden und auf die maximale Entzugsleistung einer Sonde ist generell als positiv zu bewerten. Die fließenden Grundwässer stabilisieren die Temperaturen im Umfeld der Sonde mehr oder weniger auf dem Niveau der Wassertemperatur.

Das fließende Grundwasser hat aber auch zur Folge, dass die bei reiner Wärmeleitung vorkommende Radialsymmetrie des Temperaturtrichters um die Sonde weitgehend entfällt. Der Temperaturtrichter sowie die bleibende Abkühlung des Untergrundes wird in Schichten mit fließendem Wasser in Richtung des Zustroms reduziert und in Richtung des Abstroms vergrößert. Dieser Effekt wirkt sich - durch reine Wärmeleitung - ebenfalls auf die angrenzenden Schichten ohne Grundwasser aus.

Entlang der Sonde wird aus Schichten mit fließendem Grundwasser anteilmässig immer ein grössere Wärmemenge als aus natürlich feuchten Schichten entzogen.

Trotzdem verringert aber der Einfluss des fließenden Grundwassers wegen dem zusätzlichen Wärmetransportanteil die oben beschriebenen Auswirkungen bei reiner Wärmeleitung in einem deutlich spürbaren Mass - egal, ob die Fließgeschwindigkeit nun gross oder gering ist.

3. Langzeitverhalten und Nachhaltigkeit

Selbst nach einem langjährigen Betrieb zeigen Erdwärmesonden ein stabiles Verhalten. Dies konnte an Hand der Anlage in Elgg/ZH, welche seit 1986 in Betrieb ist und über mehrere Jahre mit einer Messkampagne begleitet worden ist (zuletzt 1996 - 1998), nachgewiesen werden.

Die langsam fortschreitende geringfügige, aber bleibende Abkühlung beeinträchtigt den Wärmeentzug nicht bzw. kaum spürbar, da sich auch in einem geringfügig abgekühlten Untergrund ein stark ausgeprägter Temperaturtrichter bilden kann, welcher letztlich allein für den Wärmeentzug verantwortlich ist.

Mit Hilfe von Modellrechnungen wurde der Betrieb der Anlage in Elgg bis auf 30 Jahre extrapoliert. Die Rechnungen haben gezeigt, dass auch nach 30 Betriebsjahren ein stabiler Betrieb möglich ist. Der kurzzeitige Temperaturtrichter hat sich aber lateral vergrößert. Die bleibende Abkühlung in 10 m Abstand von einer Einzelsonde beträgt nun ca. 1.1 K, in 20 m Abstand von der Sonde ca. 0.6 K und in 50 m Entfernung immerhin noch 0.1 K.

Bei gleichbleibendem Lastprofil nimmt die Untergrundtemperatur also mit zunehmenden Betriebsjahren geringfügig, aber kontinuierlich ab. Nach 15 Betriebsjahren beträgt die Abkühlung in 1 m Abstand von der Erdwärmesonde noch rund 2/100 K pro Jahr, nach 30 Betriebsjahren fällt dieser Wert unterhalb von 1/100 K pro Jahr!

Die jährliche Zunahme der bleibenden Abkühlung im Umfeld der Erdwärmesonde ist also nach den ersten Betriebsjahren relativ gross und nimmt dann mit zunehmender Betriebsdauer asymptotisch ab.

Wird die Erdwärmesonden-Anlage definitiv ausser Betrieb genommen, so füllt sich diese bleibende Auskühlung des Untergrundes langsam wieder auf. Auch in diesem Fall ist die Erwärmung anfangs hoch und nimmt mit der Zeit asymptotisch ab. Selbst wenn 30 Jahre nach der definitiven Abschaltung noch ein Temperaturdefizit von ca. 0.1 K gegenüber dem Ruhezustand herrscht, kann die Erdwärmenutzung mittels Erdwärmesonden durchaus als nachhaltig und erneuerbar bezeichnet werden.

4. Analytische Lösungen oder FE/FD-Simulation?

Wie in Kapitel 2 beschrieben, finden beim Betrieb einer Erdwärmesonde verschiedene sich überlagernde physikalische Vorgänge statt:

- die massive Abkühlung und Wiedererwärmung des Nahbereiches der Sonde bis einige Dezimeter während eines einzelnen Einschaltzyklus („Stundenzyklus“)
- die Ausweitung dieses massiv abgekühlten und wiedererwärmten Bereiches bis auf einige Meter als Temperaturtrichter durch den saisonalen Betrieb („Jahreszyklus“)
- die grossräumige, aber nur geringe Abkühlung des Umfeldes bis in einige 10 m Distanz von der Erdwärmesonde während der gesamten Lebensdauer der Erdwärmesonde („30-Jahre-Zyklus“)
- neben diesen horizontalen Wärmebewegungen werden auch die vertikalen Wärmeflüsse massiv vergrössert: Durch die Abkühlung des Sondenumfeldes wird der Wärmezufluss aus der Atmosphäre und aus dem Untergrund massiv verstärkt. Im Umfeld der Erdwärmesonde existieren die natürlichen Wärmeflussverhältnisse schlichtweg nicht mehr!

Auch ohne fließendes Grundwasser und ohne Wasserdampfdiffusion sind diese reinen Wärmeleitungs-vorgänge bereits recht komplex.

Die Überlagerung der einzelnen Prozesse führt jedoch nach wenigen Jahren zu einem neuen thermodynamischen Quasi-Gleichgewicht, welches dafür verantwortlich ist, dass auch noch nach 10 und mehr Jahren eine Erdwärmesonde mit nahezu gleichem Erfolg wie in den ersten Betriebsjahren funktioniert. In diesem Zusammenhang wird explizit von einem Temperatur- und nicht von einem Energiegleichgewicht gesprochen.

Es liegt nun auf der Hand, dass die mathematisch-physikalische Simulation dieser komplexen natürlichen Vorgänge einen grossen Aufwand verlangt. Hier bieten sich primär sogenannte Finite-Differenzen- bzw. Finite-Elemente-Modelle an, welche das Umfeld der Erdwärmesonde gleichmässig bzw. unregelmässig in einzelne Zellen unterschiedlicher Grösse (mm-, cm-, dm- oder m-Bereich je nach Bedarf) unterteilt. Die fluiddynamischen Prozesse innerhalb der Erdwärmesonde müssen berücksichtigt werden. Diese Modelle simulieren nun Zeitschritt für Zeitschritt (im Mikrosekunden bis Stundenbereich) den Wärmeentzug durch die Sonde und führen die Energiebilanz über jede der einzelnen Zellen nach. Selbstverständlich können in diesen Modellen auch zeitlich rasch ändernde Lasten an der Erdwärmesonde und zeitlich rasch ändernde atmosphärische Randbedingungen berücksichtigt werden.

Wenn die Antwort dieser Modelle mit der natürlichen Antwort der Erdwärmesonde im Kurzzeitbereich (1 Ein- und Ausschaltzyklus) wie auch im Langzeitbereich (z.B. nach 1 Betriebsjahr oder nach 10 Betriebsjahren) in genügendem Mass übereinstimmt („Modelleichung“), so kann das Modell als zuverlässig und gültig bezeichnet werden. Komplizierte physikalische Vorgänge dürfen dabei vereinfacht werden, wenn die Modellantwort trotzdem stimmt. Der Nachteil der FE- und FD-Modelle ist jedoch die relativ lange Rechenzeit. Dieser Umstand wird jedoch durch die heute angebotenen schnellen Rechner relativiert.

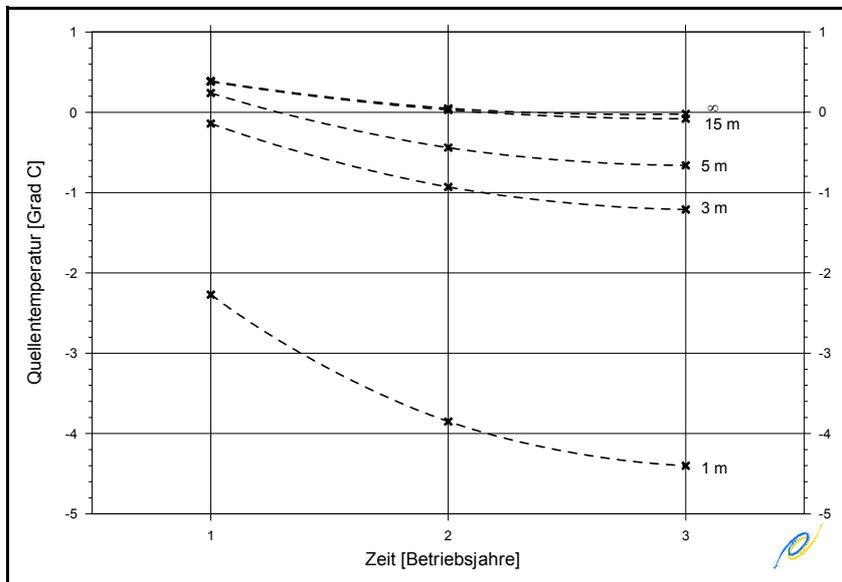
Eines ist sicher: Eine Abschätzung der Sondenleistung bzw. des Systemverhaltens ist mit stationären, d.h. zeitunabhängigen analytischen Lösungen zum Scheitern verurteilt. Diese vermögen die natürlichen sowie die durch den Erdwärmesondenbetrieb vollständig gestörten Vorgänge im Untergrund mit den sich andauernd verändernden horizontalen und vertikalen Wärmeflüssen sowie dem ebenfalls stark veränderlichen Wärmeaustausch zwischen Atmosphäre und Untergrund nicht beschreiben. Diese Wärmeflüsse ändern nicht nur rasch Grösse und Richtung, sie sind gegenüber dem Sondenbetrieb auch zeitverzögert - mit zunehmendem Abstand von der verursachenden thermischen Störung.

Werden hingegen verschiedene analytische Einzellösungen superponiert und in einen zeitlichen Ablauf integriert wie dies z.B. im Programm EED oder im Programm EWS der Fall ist, so kann damit durchaus eine gute Charakterisierung des Langzeitverhaltens der Sonden erzielt werden. Für die Charakterisierung des Kurzzeitverhaltens (einige Stunden) sind diese Modelle jedoch ungeeignet. Ihre Stärke liegt vielmehr bei der schnellen Auslegung von Erdwärmesonden. Hierzu sind sie - einmal geeicht - hervorragend geeignet, da in diesem Zusammenhang vor allem das längerfristige Verhalten der Sonden wesentlich ist.

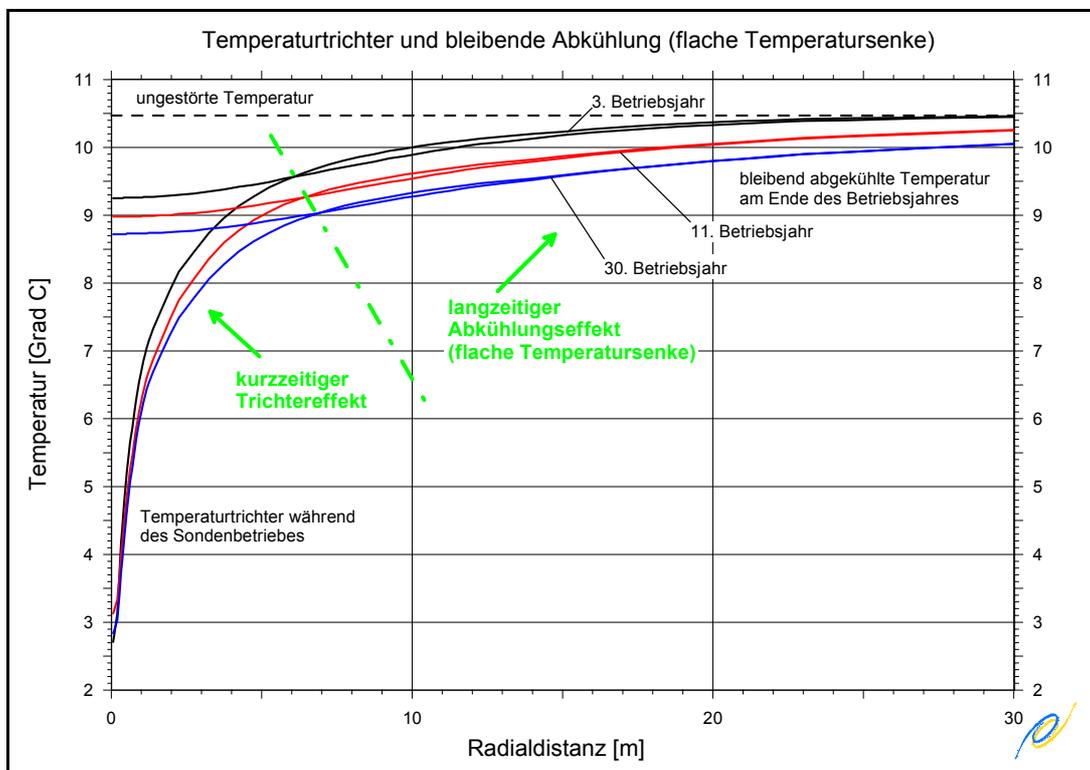
Es erfordert also einige tiefgreifende Massnahmen, um mit den schnellen analytischen Lösungen brauchbare Resultate in der Beschreibung und Vorhersage des Erdwärmesondenbetriebes zu erzielen.

Das einfache Programmieren einer Lösung aus der Formelsammlung reicht dazu nicht aus! Wie aus den vorangegangenen Erklärungen ersichtlich ist, ist es ebenso wenig zulässig, Abschätzungen über den Einflussbereich einer Erdwärmesonde allein aufgrund des natürlichen, ungestörten geothermischen Wärme-flusses von 65 mW/m^2 anzustellen.

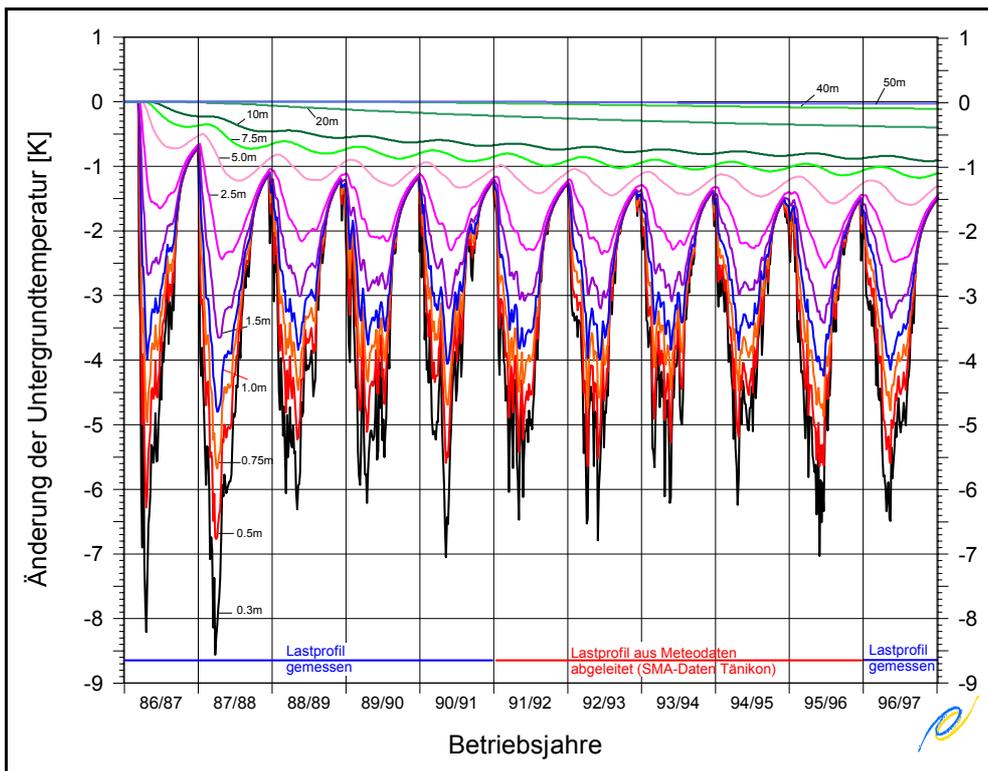
5. Beschreibende Figuren und Tabellen



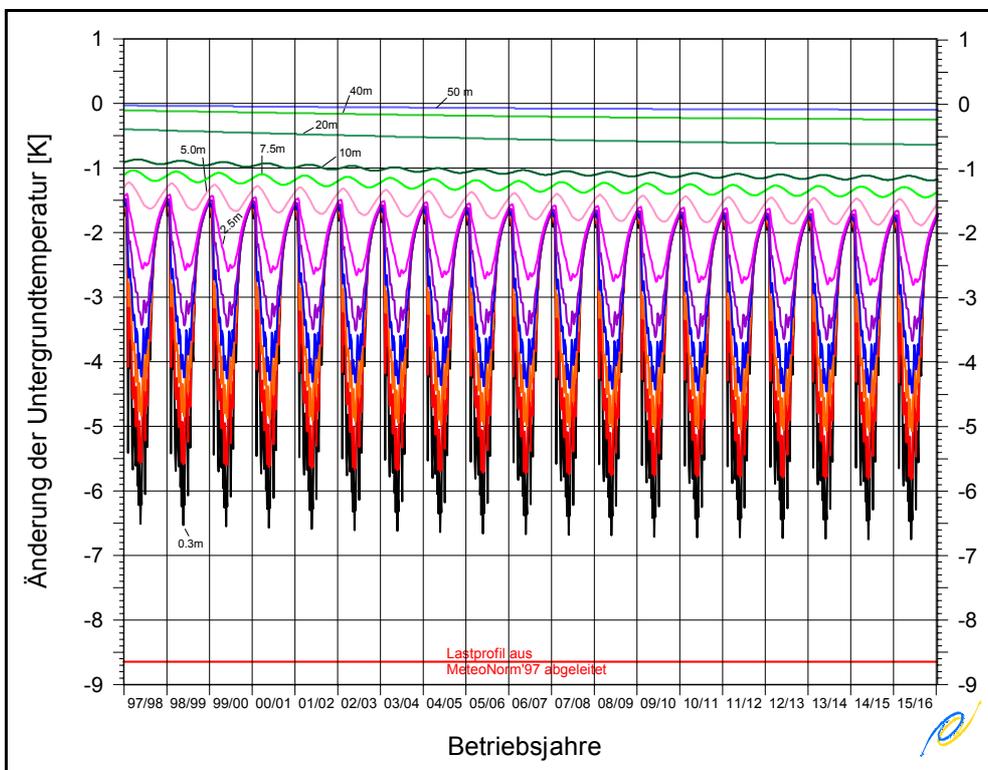
Figur 1: Die Abnahme der mittleren Quelltemperatur einer 50 m tiefen Erdwärmesonde in Abhängigkeit des Abstandes zwischen zwei Sonden (nach KÄLIN & HOPKIRK, 1991).



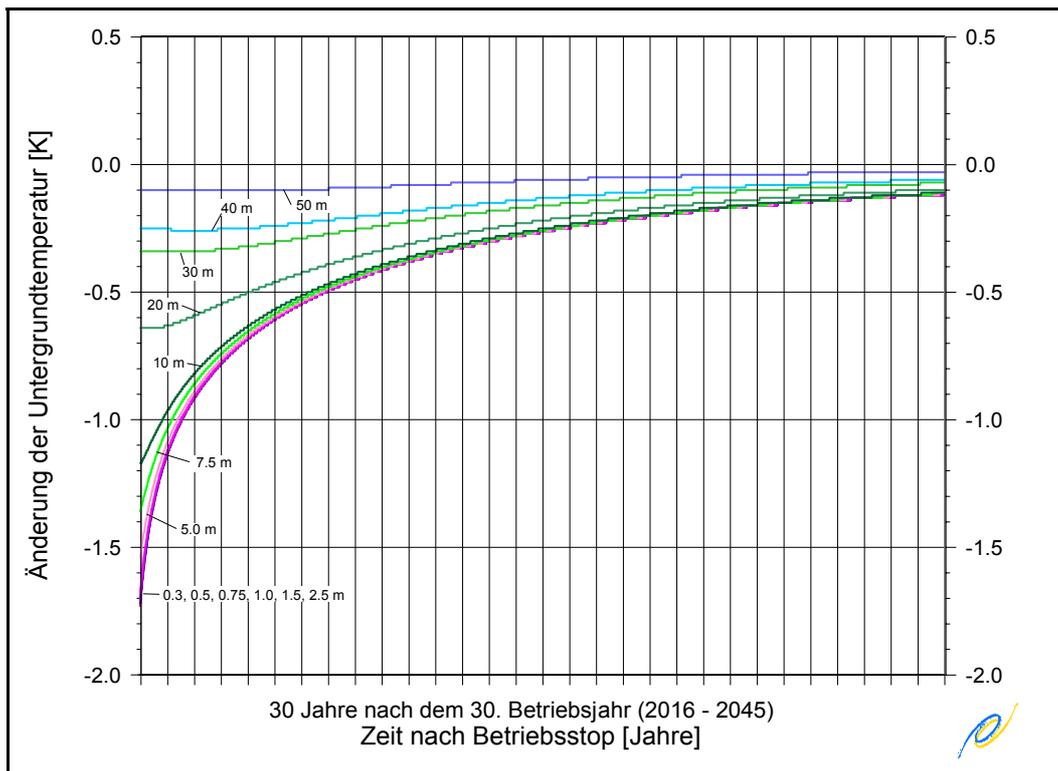
Figur 2: Temperaturtrichter und bleibende Abkühlung (flache Temperatursenke) im 3., 11. und 30. Betriebsjahr in 50 m Tiefe der 105 m langen Erdwärmesonde in Elgg/ZH. Daraus ist der Unterschied zwischen den kurzzeitigen und den langzeitigen Effekten ersichtlich.



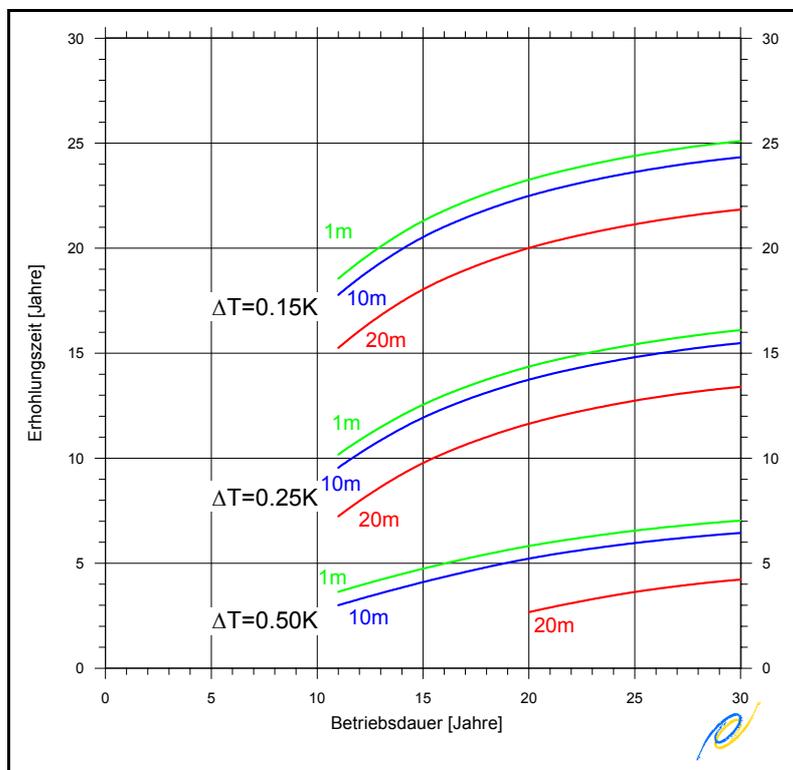
Figur 3: Die Abkühlung des Untergrundes um die 105 m lange Erdwärmesonde in Elgg/ZH über die ersten 11 Betriebsjahre für verschiedene Abstände von der Sonde in 50 m Tiefe. Die Lastprofile haben von Jahr zu Jahr geändert (aus EUGSTER, 1998).



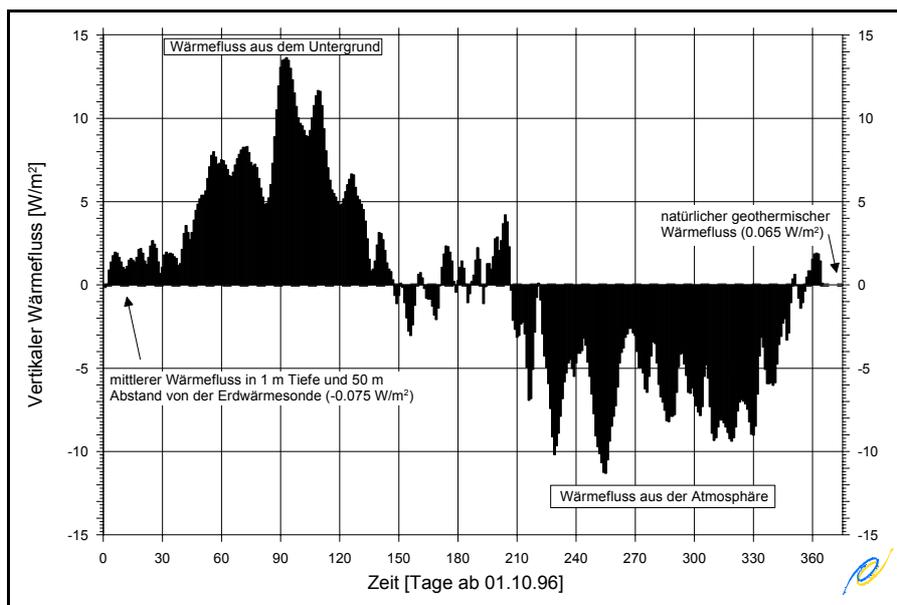
Figur 4: Die extrapolierte Abkühlung des Untergrundes um die 105 m lange Erdwärmesonde in Elgg/ZH über weitere 19 Betriebsjahre, d.h. bis zum 30. Betriebsjahr, für verschiedene Abstände von der Sonde in 50 m Tiefe. Die Lastprofile sind jedes Jahr die selben, abgeleitet aus der Meteonorm '97 (aus EUGSTER, 1998).



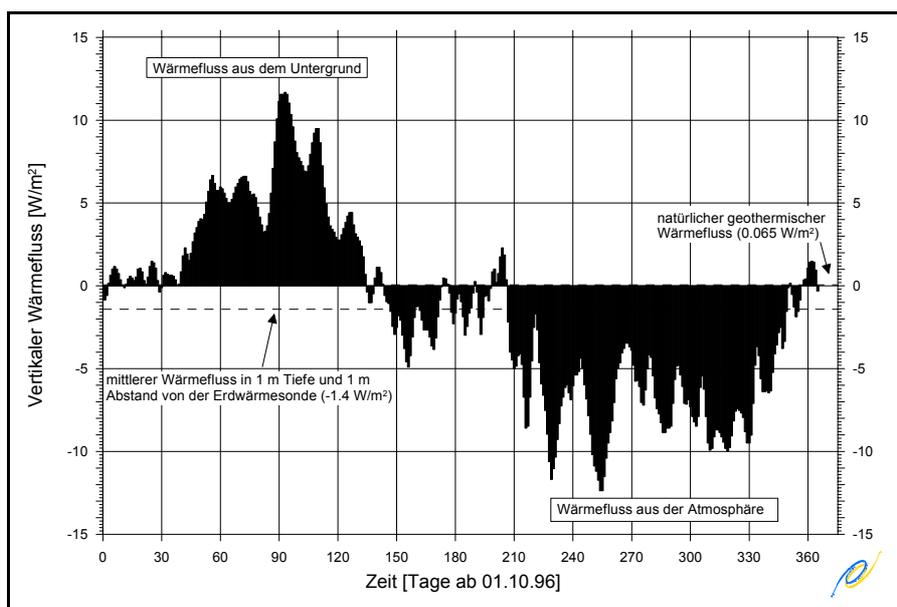
Figur 5: Die Erholung des Untergrundes um die 105 m lange Erdwärmesonde in Elgg/ZH über die folgenden 30 Jahre nach einem definitiven Betriebsstop nach dem 30. Betriebsjahr. Dargestellt sind die Temperaturänderungen für verschiedene Abstände von der Sonde in 50 m Tiefe (aus EUGSTER, 1998).



Figur 6: Modellierter Dauer der Erholungszeit bis sich die Untergrundtemperatur in 50 m Tiefe bei der Erdwärmesonde in Elgg/ZH wieder bis auf bestimmte Minimaldifferenzen ($\Delta T = 0.5 \text{ K}$, 0.25 K und 0.15 K) gegenüber dem Ruhezustand erholt. Dies ist für Abstände von 1 m, 10 m und 20 m von der Sonde aufgezeigt (nach EUGSTER & RYBACH, 1999).



Figur 7: Die vertikalen Wärmeflüsse in 1 m Tiefe und in 50 m Abstand von der Erdwärmesonde in Elgg/ZH über das Betriebsjahr 1996/97. Positive Wärmeflüsse fließen in Richtung der Erdoberfläche, d.h. aufwärts. Die Wärmeflüsse an diesem Bezugspunkt bleiben durch den Betrieb der Sonde unbeeinflusst. Sie spiegeln die klimatische Geschichte dieses Betriebsjahres. Trotzdem dominiert der atmosphärische Einfluss gegenüber dem geothermischen Wärmefluss.



Figur 8: Die vertikalen Wärmeflüsse in 1 m Tiefe und in 1 m Abstand von der Erdwärmesonde in Elgg/ZH über das Betriebsjahr 1996/97. Positive Wärmeflüsse fließen in Richtung der Erdoberfläche, d.h. aufwärts. Die Wärmeflüsse an diesem Bezugspunkt sind durch den Betrieb der Sonde beeinflusst. Es ist aus dieser Figur klar ersichtlich, dass sich gegenüber dem ungestörten Zustand bei diesem Punkt das Vorzeichen des mittleren Wärmeflusses ändert und dass der Betrag des mittleren Wärmeflusses rund 20 Mal höher ist.

In Sondennähe und in 1 m Tiefe dominiert der Wärmeeintrag aus der Atmosphäre über den Wärmenachfluss aus dem Untergrund. In 1 m Abstand von der Sonde ist der atmosphärische Wärmeeintrag rund 20 Mal grösser als der ungestörte geothermische Wärmefluss. Die Atmosphäre verfügt also über einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf den Erdwärmesondenbetrieb. In grösserer Entfernung von der Erdwärmesonde hingegen, d.h. ausserhalb des eigentlichen Einflussbereiches der Sonde, dominiert - je nach Jahresverlauf der Lufttemperatur - mal der geothermische Wärmefluss und mal der atmosphärische Einfluss. Der Betrag des Einflusses bleibt jedoch auf wenige Vielfache des natürlichen

geothermischen Wärmeflusses beschränkt. Dieses Resultat entspricht den Erwartungen. Im verwendeten, geeichten Modell sind die Einflüsse der Atmosphäre (Temperatur, Strahlung, Niederschläge, Schneedecke) summarisch über saisonal ändernde Übergangskoeffizienten und über die physikalischen Eigenschaften der obersten Bodenschichten abgedeckt. Über eine genügend lange Beobachtungsperiode müsste allerdings der geothermische Wärmefluss auch in Oberflächennähe dominieren. Dies wird auch von der Faustregel unterstützt, dass die mittlere Oberflächentemperatur des Untergrundes rund 0.5 - 1.0 K höher ist als die mittlere Lufttemperatur.

Tabelle 1: Die berechnete Auskühlung des Untergrundes in 50 m Tiefe für verschiedene Distanzen von der 105 m langen Erdwärmesonde in Elgg/ZH. In diesem Tiefenbereich ist die Auskühlung unabhängig von atmosphärischen Einflüssen und nur durch den Betrieb der Erdwärmesonde verursacht (aus EUGSTER, 1998).

Distanz	Berechnete Auskühlung [K] des Untergrundes in 50 m Tiefe nach Ablauf von			
	2 Betriebsjahren	5 Betriebsjahren	11 Betriebsjahren	30 Betriebsjahren
0.5 m	1.13	1.23	1.50	1.75
1.0 m	1.12	1.22	1.49	1.73
5.0 m	0.82	0.98	1.22	1.56
10.0 m	0.44	0.65	0.87	1.18
20.0 m	0.06	0.22	0.40	0.64
40.0 m	0.00	0.02	0.11	0.25
50.0 m	0.00	0.00	0.03	0.10

Tabelle 2: Die im Umfeld der Erdwärmesonde auftretenden mittleren Wärmeflüsse [W/m²] im Vergleich zum natürlichen geothermischen Wärmefluss von 65 mW/m². Die mit „F“ bezeichneten Kolonnen geben den Multiplikationsfaktor zwischen dem effektiven vertikalen Wärmefluss und dem geothermischen Wärmefluss an. Die Wärmeflüsse haben ein positives Vorzeichen, wenn sie in Richtung der Erdoberfläche (vertikal), d.h. aufwärts, oder in Richtung der Erdwärmesonde (horizontal) fließen. In 1 m Tiefe und 50 m Abstand von der Sonde ist der lokale vertikale Wärmefluss stark von der klimatischen Geschichte abhängig. Der Unterschied zwischen dem sondennahen und dem entfernten Bezugspunkt ist jedoch frappant und zeigt den starken Einfluss der Atmosphäre direkt bei der Sonde. Als Grundlage dienen die Modellrechnungen für die Erdwärmesonden-Anlage in Elgg/ZH.

Position			Betriebsjahr						geothermischer Wärmefluss
Tiefe	Abstand von der EWS	Richtung	3		11		30		
[m]	[m]		[W/m ²]	F	[W/m ²]	F	[W/m ²]	F	[W/m ²]
1.0	1.0	vert.	- 1.280	- 19.69	- 1.413	- 21.74	- 1.269	- 19.52	+ 0.065
1.0	50.0	vert.	+ 0.075	+ 1.15	- 0.074	- 1.14	+ 0.124	+ 1.91	+ 0.065
50.0	1.0	vert.	+ 0.090	+ 1.38	+ 0.068	+ 1.05	+ 0.065	+ 1.00	+ 0.065
105.0	1.0	vert.	+ 1.093	+ 16.82	+ 1.023	+ 15.74	+ 0.991	+ 15.25	+ 0.065
50.0	1.0	horiz.	+ 1.757	-	+ 1.680	-	+ 1.627	-	-
105.0	1.0	horiz.	+ 1.029	-	+ 0.935	-	+ 0.888	-	-

Die Tabelle 2 zeigt, dass in Oberflächen- und Sondennähe der atmosphärische Einfluss über sämtliche Betriebsjahre dominierend bleibt. In 50 m Tiefe bleibt der vertikale Wärmenachfluss jedoch nahezu auf der Grösse des geothermischen Wärmeflusses beschränkt. Dies ist nachvollziehbar, da die Erdwärmesonde auf ihrer ganzen Länge als Wärmequelle dient und die Temperaturunterschiede mit der Tiefe nur gering sind. Hier dominiert deshalb ganz klar der horizontale Wärmenachfluss aus dem seitlichen Umfeld der Erdwärmesonde. Der Betrag des horizontalen Wärmenachflusses entspricht dem rund 25fachen des vertikalen geothermischen Wärmeflusses. Am unteren Sondenende, in 105 m Tiefe, sieht die Situation wieder anders aus: Der vertikale Wärmenachfluss aus grösserer Tiefe wie auch aus horizontaler Richtung

ist in etwa gleich gross und entspricht dem 14- bis 17fachen Betrag des ungestörten geothermischen Wärmeffusses.

Diese Wärmeffussbetrachtungen haben zum Zweck, nachhaltig aufzuzeigen, dass Abschätzungen über die Erneuerbarkeit oder den Einflussbereich von Erdwärmesonden niemals und definitiv niemals auf dem natürlichen geothermischen Wärmeffluss aufbauen dürfen, da diese natürlichen geothermischen Wärmefflussverhältnisse im Umfeld einer Erdwärmesonde schlichtweg nicht vorkommen!

6. Überblick über die bisherigen Berichte und Publikationen

Erste modelltechnische Erfassung von 50 m langen Erdwärmesonden. Beschreibung des Grundwassereinflusses und der sommerlichen Aufladung.

I. SCHWANNER, R.J. HOPKIRK

„Die vertikale Erdwärmesonde im Betrieb“. Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Dezember 1983.

D.J. GILBY, R.J. HOPKIRK

„The coaxial vertical heat probe with solar recharge. Numerical simulation and performance evaluation.“ Proc. 2nd IEA-CEC Workshop on Solar Assisted Heat Pump Systems, Vienna 8-10 May, 1985.

W.H. WAGNER, R.J. HOPKIRK

„Untersuchung der Wirkungsweise von Erdwärmesonden. Wechselwirkungen zwischen Erdsonden und Grundwasserstrom (erste quantitative Vorhersagen)“. Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Januar 1986.

Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse über 50 bis 100 m lange Erdwärmesonden: Messwerte, Betriebsweise, Modellrechnungen (Langzeitbetrieb, Unterschied Koaxialsonde und U-Rohr-Sonde, Temperaturtrichter) und Empfehlung zur Sondenauslegung:

R. BURKART, R.J. HOPKIRK, W.J. EUGSTER, L. RYBACH

„Erdwärmesonden-Heizanlagen: durch Messungen und Berechnungen bestimmte Auslegungs- und Betriebsgrößen“ Schriftenreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Studie Nr. 46, September 1989.

R.J. HOPKIRK, R. BURKART

„Earth-coupled Heat Pumps“. Proc. 3rd IEA Heat Pump Conference, Tokyo, 12-15 March, 1990

L. RYBACH, R.J. HOPKIRK, W.J. EUGSTER & R. BURKART

„Design and long-term performance characteristics of vertical earth heat exchangers“. 1990 Int. Symposium on Geothermal Energy, Geothermal Resources Council, Hawaii, 20-24 Aug. 1990.

Detailuntersuchungen über das Betriebsverhalten von Erdwärmesonden. Untersuchung von verschiedenen Größen, die den Betrieb der Sonden beeinflussen, wie z.B.: Abstand zwischen zwei Sonden; Wärmepumpencharakteristik; Untergrundtyp (Wärmeleitfähigkeit); Klima, Standort (Höhe ü.m.); SONDENDURCHMESSER UND -LÄNGE; ART DES WÄRMETRÄGERS; HINTERFÜLLUNG; LANGZEITVERHALTEN UND NACHHALTIGKEIT.

B. KÄLIN, R.J. HOPKIRK

„Quantitative Empfehlungen über den minimalen Grenzabstand einer Erdwärmesonden-Anlage“. Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, März 1991.

R.J. HOPKIRK, B. KÄLIN

„Untersuchungen über die Wirkungsweise von Erdwärmesonden für Raumheizung - Wärmepumpen-Charakteristiken für Erdwärmesonden-Anlagen“. Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, März 1991.

W.J. EUGSTER

„Erdwärmesonden - Funktionsweise und Wechselwirkung mit dem geologischen Untergrund. Feldmessungen und Modellsimulation.“ ETH Zürich, Dissertation Nr. 9524, 1991.

R.J. HOPKIRK, B. KÄLIN

„Auslegungskriterien für Erdwärmesondenheizungen“. Symposium: Erdgekoppelte Wärmepumpen, Schloss Rauischholzhausen, Institut für angewandte Geowissenschaften, Justus-Liebig-Universität Giessen, Deutschland, 7-9 Oktober, 1991, IZW Karlsruhe Bericht 3/91.

W.J. EUGSTER, L. RYBACH, R.J. HOPKIRK

Erdwärmesonden - ihre Funktionsweise und Wechselwirkungen mit Boden und Grundwasser“. NEFF Projekt Nr. 324, Schlussbericht, April 1992.

R.J. HOPKIRK, B. KÄLIN

„Analysis of vertical tube heat exchangers for design optimisation“. Proc. IEA Heat Pump Workshop, Montreal, Canada, August 12, 13, 1991

P.K. SEIFERT, W.J. EUGSTER, B. KÄLIN, R.J. HOPKIRK

„Auswirkungen von Bergklima und Bodentypen auf das Betriebsverhalten von Erdwärmesonden“. Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, August 1992.

L. RYBACH, W.J. EUGSTER, R.J. HOPKIRK AND B. KÄLIN

„Borehole Heat Exchangers: long term operational characteristics of a decentral geothermal heating system“. Geothermics, Vol. 21, No. 5/6, pp. 861-867, 1992.

W.J. EUGSTER, P.K. SEIFERT, R.J. HOPKIRK

„Einfluss von Klima und Standort auf das Betriebsverhalten von Erdwärmesonden-Heizanlagen“. Beitrag zur Tagung der Deutschen Geothermischen Vereinigung, Erding, Oktober 1992.

W.J. EUGSTER, R.J. HOPKIRK, B. KÄLIN, L. RYBACH, P.K. SEIFERT

„Das Betriebsverhalten der Erdwärmesonde“. Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 46, 12. November 1992.

P.K. SEIFERT, B. KÄLIN, R.J. HOPKIRK

„Einfluss von Sondengeometrie auf die Heizanlagenleistung“. Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Dezember 1992.

W.J. EUGSTER, R.J. HOPKIRK

„Vorbereitung eines Experimentes zur Untersuchung von Hinterfüllungen für Erdwärmesonden-Bohrungen“. Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Dezember 1992.

R.J. HOPKIRK

„Eigenschaften von Wärmeträgerflüssigkeiten für die Anwendung in Erdwärmesonden“. Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft. 1993.

L. RYBACH AND R.J. HOPKIRK

„Shallow and deep borehole heat exchangers - achievements and prospects“. Proc. 15th PNOC-EDC Geothermal Conference, Manila, Philippines, Feb. 1994, pp 127-133.

L. RYBACH AND R. J. HOPKIRK

„Shallow and deep borehole heat exchangers - achievements and prospects“
Proc. World Geothermal Congress, Florence, 18-31 May 1995.

W.J. EUGSTER UND R.J. HOPKIRK

Experimente zur Untersuchung von Hinterfüllungen für Erdwärmesonden. NEFF-Projekt Nr. 627, Schlussbericht, August 1998.

W.J. EUGSTER

Langzeitverhalten der Erdwärmesonden-Anlage in Elgg/ZH. PSEL-Projekt Nr. 102, Schlussbericht, Dezember 1998.

W.J. EUGSTER AND L. RYBACH

„How renewable are borehole heat exchanger systems?“. EGC'99, Basel (im Druck).

Die korrekte Auslegung von EWS-Anlagen bis 30 kW Heizleistung ist in der demnächst erscheinenden VDI-Richtlinie Nr. 4640 beschrieben.