

Frieder Häfner
Rolf-Michael Wagner
Linda Meusel

Bau und Berechnung von Erdwärmeanlagen

Einführung mit praktischen Beispielen

Bau und Berechnung von Erdwärmeanlagen

Frieder Häfner • Rolf-Michael Wagner
Linda Meusel

Bau und Berechnung von Erdwärmeanlagen

Einführung mit praktischen Beispielen

Frieder Häfner
GeoRes Consult Meusel & Partner
TU Bergakademie Freiberg
Freiberg
Deutschland

Linda Meusel
Ingenieurbüro für Bergbau, Erdgas, Erdwärme
und Wasser
GeoRes Consult Meusel & Partner
Freiberg
Deutschland

Rolf-Michael Wagner
BLZ Geotechnik Service GmbH
Gommern
Deutschland

ISBN 978-3-662-48200-1
DOI 10.1007/978-3-662-48201-8

ISBN 978-3-662-48201-8 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
(www.springer.com)

Vorwort

Die Wärme unserer Erde (geothermische Wärme) ist neben der Wärme der Sonne die älteste regenerative Energieart, die die Menschen schon seit frühester Zeit kennen und nutzen, um ihre Wohnstätten warm zu halten und sich in warmen Thermalquellen zu baden. Neu ist die breite Anwendung

- zur Gebäudeheizung in Verbindung mit Wärmepumpen,
- zur Kühlung (Klimatisierung) von Gebäuden,
- zur Beheizung von Flächen und Anlagen zur Eisfreihaltung, die sogenannte Oberflächenheizung (Bahnsteige, Fußwege, Weichen etc.) und
- zur Speicherung von Wärme und Kälte im Erdreich.

Das Buch beschränkt sich im Wesentlichen auf die sogenannte oberflächennahe Geothermie, die die Erdkruste bis in etwa 400 m Tiefe in Anspruch nimmt. Selbstverständlich gelten alle Berechnungsverfahren für beliebige Tiefen, nicht jedoch die technischen Anlagen. Die Beschränkung auf oberflächennahe Anlagen ergibt sich heute aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten, denn eine 100 m tiefe Erdwärmebohrung ist schon für weniger als Zehntausend Euro zu haben, eine 1000 m tiefe Bohrung erfordert jedoch schon die Größenordnung von einer Million Euro.

In der heißen Diskussion um die Energiewende wird das Problem häufig auf die Elektroenergie beschränkt, obwohl etwa die Hälfte aller verbrauchten Energie auf Heizung und Kühlung von Gebäuden entfällt und die wird zum allergrößten Teil aus Erdgas, Erdöl, und Kohle gewonnen. Die Autoren haben die Überzeugung und Hoffnung, dass Erdwärmeanlagen zukünftig diesen Teil der fossilen Energiearten teilweise oder ganz ersetzen können.

Das vorliegende Buch richtet sich in erster Linie an die Beschäftigten der Branche – Ingenieure, Physiker, Kaufleute und viele andere – und an „grüne“ Bauherren, die ihren Teil zur Energiewende im privaten Bereich und in Wirtschaft und Bauwesen beitragen wollen. Erdwärmeanlagen sind nicht billig zu haben, jedoch erwärmen sie unsere Wohnungen und Arbeitsräume und bringen langfristig wirtschaftliche Vorteile – und sie erwärmen auch „**grüne Herzen**“.

Freiberg, im Juni 2015

Frieder Häfner
Rolf-Michael Wagner
Linda Meusel

Inhaltsverzeichnis

1	Der Wärmehaushalt der Erdkruste bei der Erdwärmegewinnung	1
	Literatur	5
2	Der Aufbau von Erdwärmeanlagen	7
2.1	Drei Systeme zur Erdwärmegewinnung	7
2.2	Oberflächennahe EWS-Systeme mit Wasserzirkulation	10
2.3	Oberflächennahe EWS-Systeme als Direktverdampfer (Phasenwechsellsonden)	13
2.4	Tiefe Erdwärmesonden	18
	Literatur	20
3	Wärmepumpen	21
3.1	Arbeitsprinzip der Wärmepumpe	21
3.2	Leistungszahl und Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen	22
	Literatur	25
4	Berechnung von Erdwärmeanlagen	27
4.1	Thermo- und fluiddynamische Grundlagen des Wärmetransportes im Erdreich und in Erdwärmesonden	27
4.1.1	Das physikalisch-mathematische Modell des Wärmetransportes im Erdreich	28
4.1.2	Das physikalisch-mathematische Modell des Wärmetransportes in Erdwärmesonden	29
4.2	Mathematisch-analytische Lösungen für die Einzelsonde	32
4.2.1	Zeitlich konstante Temperatur im Inneren der Erdwärmesonde	32
4.2.2	Speicherung von Wärme mit konstantem Wärmestrom	33
4.2.3	Speicherung von Wärme durch Wasserinjektion in eine Schicht	33
4.2.4	Erdwärmesonde mit Wasserzirkulation als U-Rohr oder Koaxialsonde	35

4.2.5	Thermal Response Test	39
4.3	Numerische Simulation der Einzelsonde – ModTherm	41
4.3.1	Örtliche Diskretisierung (Zelleinteilung)	42
4.3.2	Stetigkeit der Eigenschaften	43
4.3.3	Randbedingungen	45
4.3.4	Wärmeübergang zwischen Fließräumen und Feststoff	47
4.3.5	Zeitliche Diskretisierung	47
4.3.6	Steuerung von Wärme- und Kälteleistung	48
4.3.7	Flutpunkt-/Staupunktberechnung beim Direktverdampferverfahren	50
4.3.8	Vergleich der numerischen Lösung mit analytischen Lösungen	51
4.3.9	Speicherung der Ergebnisse für die 3D-Simulation von Sondenfeldern	52
4.3.10	Auswertung von Thermal Response Tests mit numerischen Verfahren	53
4.4	3D-Simulation von Sondenfeldern – ModGeo3D	59
4.4.1	Bilanzverfahren und Zeitschrittbeschränkung	60
4.4.2	Die Denkweise des U.S.G.S. für hydrogeologische Aufgabenstellungen (Modflow/MT3D)	61
4.4.3	Numerische Lösung der Strömungs- und Wärmetransportgleichung	63
4.4.4	Berücksichtigung von Erdwärmesonden (EWS)	65
4.4.5	Eingabe der Daten, die nicht in Modflow/MT3D vorgesehen sind	66
4.5	Software	67
4.6	Berechnungsbeispiele und Vergleiche	68
4.6.1	Erdwärme für ein Einfamilienhaus	68
4.6.2	Beheizung und Klimatisierung eines Geschäftshauses	72
4.7	Optimierung von Erdwärmesonden	79
4.7.1	Tiefe der Sonde	81
4.7.2	Thermische Leitfähigkeit der Rohre und Wärmeübergangszahlen	82
4.7.3	Wärmeleitfähigkeit des Verfüllbaustoffes	84
4.7.4	Einfluss der Zirkulationsrate	85
4.7.5	Einfluss des Sondendurchmessers (großvolumige EWS, GeoKOAX)	86
Literatur	89
5	Bau von Erdwärmesonden	91
5.1	Geologisches Vorprofil, Sondentyp und –eckwerte	92
5.2	Thermal Response Test	95
5.3	Genehmigungsantrag	96

5.4	Bohrverfahren und Technik	97
5.4.1	Bohrverfahren	97
5.4.2	Informationsgewinn aus Bohrungen	99
5.4.3	Bohranlagen	102
5.5	Sondenkomplettierung, Verrohrung, Verfüllung	104
5.5.1	Wasserzirkulationsverfahren	104
5.5.2	DVD-Sonden, Phasenwechsellsonden	106
5.5.3	Verfüllung von Erdwärmesonden	107
5.6	Qualitätssicherung	109
	Literatur	113
6	Überblick über genehmigungsrechtliche Aspekte für Erdwärmebohrungen	115
6.1	Rechtsverbindliche Regelwerke (Bundesgesetze)	115
6.2	Nicht rechtsverbindliche Regelwerke	117
6.2.1	Arbeitspapier der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA-Papier)	117
6.2.2	VDI-Richtlinie 4640	117
6.2.3	Leitfäden der Bundesländer	119
	Literatur	122
7	Anlagen zur Energiespeicherung	125
7.1	Oberflächennahe Wärmespeicher im Erdreich	127
7.2	Oberflächennahe Kältespeicherung im Erdreich	128
7.3	Wärmespeicherung mit Tiefen Erdwärmesonden	128
7.4	Hydrothermale Wärmespeicherung mit Tiefbohrungen	128
	Literatur	132
8	Kostenvergleiche	133
8.1	Kosten für die in Abschn. 4.6.1 beschriebene Einfamilienhaus-Heizungsanlage	134
8.2	Kosten für die in Abschn. 4.6.2 beschriebene Geschäftshaus-Anlage	135
9	Ergänzende Informationen	137
9.1	Input-Datei ModTherm für das Beispiel Einfamilienhaus	137
9.2	Zusammenfassung der gesetzlichen Grundlagen, Richtlinien und Vorschriften	139
9.3	Zusammenfassung der wichtigsten Leitfäden der Deutschen Bundesländer	147
	Sachverzeichnis	181

Abkürzungsverzeichnis

Verwendete Symbole

A	Fläche, m ²
a	Temperaturleitfähigkeit, m ² /s
B	Breite, m
Co	Courantzahl
COP	Leistungszahl einer Wärmepumpe (Coefficient Of Power)
c	Spezifische Wärmekapazität, J/(kg K)
D	Durchmesser, m
D*	Dispersionsmatrix, m ² /s
E	Preis, €
e	Exponentialfunktion
f	Mittlerer prozentualer Fehler, %
g	Erdbeschleunigung, g=9,81 m/s ²
h	Grundwasserspiegelhöhe, m
J	Gütefunktional, K ²
JAZ	J ahres A rbeits Z ahl einer Wärmepumpenanlage
K	Kapitalwert, €
k	Durchlässigkeit, Permeabilität, m ²
k _f	Durchlässigkeitsbeiwert, m/s (in der Hydrogeologie übliche Maßeinheit)
k _r	Relative Permeabilität
k _w	Wärmedurchgangszahl, W/K
L	Länge (Tiefe) einer Erdwärmesonde, m
M	Mächtigkeit, Schichtdicke, m
m	Masse, kg
m _{lg}	Logarithmische Steigung, K/log ₁₀ Zyklus
Nu	Nusseltzahl
n	Porosität des Erdreichs
P	Leistung, Wärmeleistung, W=J/s

Pe	Pecletzahl
Pr	Prandtlzahl
p, p _w , p _g	Druck, Druck in der Wasser-/Gasphase, Pa
p _c	Kapillardruck, Saugspannung, Pa
Q	Wärmestrom, W=J/s
Q _w	Geothermischer Wärmestrom je Meter Sondenlänge, W/m
q	Volumenstrom, m ³ /s
R	Wärmewiderstand, (m K)/W
Re	Reynoldszahl
R _{B, th}	Thermischer Sondeneintrittswiderstand, (m K)/W
r	Radius, m
r _B , r _{Be}	Bohrlochradius, effektiver Bohrlochradius, m
S, S _w	Sättigung, Wassersättigung
T	Temperatur, °C oder K
t	Zeit, Sekunden oder wie jeweils angegeben
V	Volumen, m ³
v	Geschwindigkeit, m/s
W	Wärme, Wärmearbeit, J=W s
x, y	Koordinaten in der Ebene, m
z	Vertikale Koordinate, m (nach oben gerichtet)
α	Wärmeübergangszahl, W/(m ² K)
η	Dynamische Viskosität, Pa s
λ	Wärmeleitfähigkeit, W/(m K)
ω	Geothermischer Gradient, K/m
ρ	Dichte, kg/m ³

Indizes

A, 0	Anfang, initial, Null
B	Bohrloch, Sonde
c	Kapillar
e	effektiv
g	Gas, Luft
w	Wasser,
fl	Fluid
V	Auf das Volumen bezogen (je m ³)

Umrechnungen

Durchlässigkeitsbeiwert:	$1\text{m/s} \approx 1,3 \times 10^{-7} \text{m}^2 = 1,3 \times 10^5 \text{Darcy}$
Permeabilität, Durchlässigkeit:	$1 \text{Darcy} = 10^{-12} \text{m}^2$,
Wärmearbeit:	$1 \text{kWh} = 3,6 \text{Mio. Joule}, 1 \text{MWh} = 3,6 \text{Mrd. Joule}$

Definitionsformeln

Courantzahl:

$$Co = \frac{\sum_i Q_i \times \Delta t}{V \times (\rho c)_{total} \times \Delta T_{min/max}} :$$

Durchlässigkeitsbeiwert:

$$k_f = \frac{k \rho g}{\eta} \left(\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \eta = 1.31 \times 10^{-3} \text{ Pa s für Wasser bei } 10^\circ \text{C} \right)$$

Jahresarbeitszahl:

$$JAZ = \frac{\text{Summe der in einem Jahr gewonnenen Nutzarbeit (Wärme, Kälte) [kWh]}}{\text{Summe der in einem Jahr aufgewendeten Antriebsarbeit [kWh]}}$$

Leistungszahl:

$$COP = \frac{\text{Nutzleistung Wärme [kW]}}{\text{Antriebsleistung [kW]}}$$

Nusseltzahl:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda_{fl}}$$

Pecletzahl:

$$Pe = \frac{L_{charakteristisch} \times v \times (\rho c)_{fl}}{\lambda}$$

Prandtlzahl:

$$Pr = \frac{\eta \times c_{fl}}{\lambda_{fl}}$$

Relative Permeabilität:

$$k_{rw} = \frac{k_{wasser}}{k}, \quad k_{rg} = \frac{k_{gas}}{k}$$

Reynoldszahl:

$$Re = \frac{v D \rho}{\eta}$$

Temperaturleitfähigkeit:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

Abkürzungen

BBergG	Bundesberggesetz
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
DIN	Deutsche Industrienorm
DVD	Direktverdampfersonde (Phasenwechselfsonde)
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs
EWS	Erdwärmesonde
FCKW, FKW	Fluorkohlenwasserstoff
HFKW	Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LagerStG	Lagerstättengesetz
RAL-GZ	Gütezeichen Abwasser/Kanalbau des RAL Deutschen Institutes für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.
SGD	Staatlich anerkannter Geologischer Dienst
U2	Doppel-U-Rohrsonde
VAwS	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
VwVwS	Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe
WGK	Wassergefährdungsklasse
WHG	Wasserhaushaltgesetz
WP	Wärmepumpe

Die Umwelt der Erdoberfläche erhält Wärme aus dem Erdinneren und durch Sonneneinstrahlung. Der Wärmehaushalt in unserem Lebensbereich befindet sich dabei in einem außerordentlich sensiblen Gleichgewicht zwischen dem Wärmestrom aus dem Inneren von ca. 60 mW/m^2 und der Sonneneinstrahlung in der Größenordnung von etwa $1 \text{ kW/m}^2 = 1 \text{ Mio. mW/m}^2$. Die eingestrahelte Sonnenenergie wird zum allergrößten Teil reflektiert, wobei bereits geringste Änderungen in der Gaszusammensetzung der Atmosphäre sowohl die Einstrahlung als auch die Reflektion und im Ergebnis davon die Jahresmitteltemperatur auf der Erde wesentlich verändern können. Dies macht die Voraussage eines möglichen Klimawandels infolge Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Erdatmosphäre so kompliziert, dass auch heute die Meinungen der Wissenschaft dazu sehr unterschiedlich sind. So hat Professor Lothar Eißmann von der Sächsischen Akademie der Wissenschaften schon in den 1990er Jahren gezeigt, dass sich die Jahresmitteltemperaturen im Raum Leipzig in den letzten zehntausenden Jahren mehrfach kurzzeitig, d. h. innerhalb von etwa 200 Jahren, um einige Grad erhöht bzw. verringert haben, ohne dass atmosphärische Veränderungen damit im Zusammenhang zu bringen sind und der Mensch noch keinerlei Einfluss auf das Geschehen hatte [1].

In großen Tiefen von 1000 m und mehr bestimmt der natürliche Erdwärmestrom infolge Zerfall von radioaktiven Elementen im Gestein gemeinsam mit der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins die Gesteinstemperatur, die im Mittel um 3 K je 100 m Tiefe zunimmt (s. Abb. 1.1)

Im oberflächennahen Tiefenbereich bis ca. 100 m hat jedoch die von der Sonne eingestrahelte Energie einen erheblichen Einfluss, so dass es richtig ist zu sagen, dass die Wärme der oberflächennahen Erdschichten zum Teil gespeicherte (und jährlich erneuerbare) Sonnenenergie ist. In diesem Sinne ist Erdwärme eine teilweise erneuerbare Energie.

In Abb. 1.2 ist das Leistungsverhalten einer oberflächennahen Erdwärmesonde im Dauerbetrieb dargestellt.

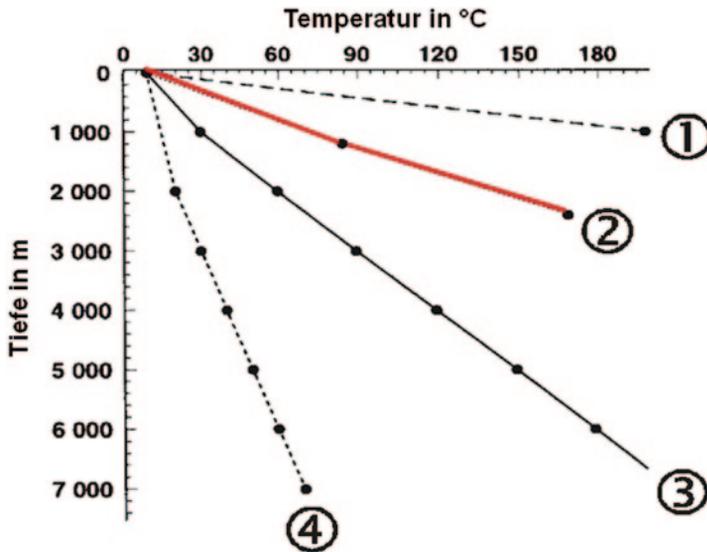


Abb. 1.1 Temperaturverlauf in der Erde (1-Lardarello/Italien, 2- Bruchsal/Oberrhheintalgraben/ Deutschland, 3-weltweiter Durchschnitt, 4-Südafrika)

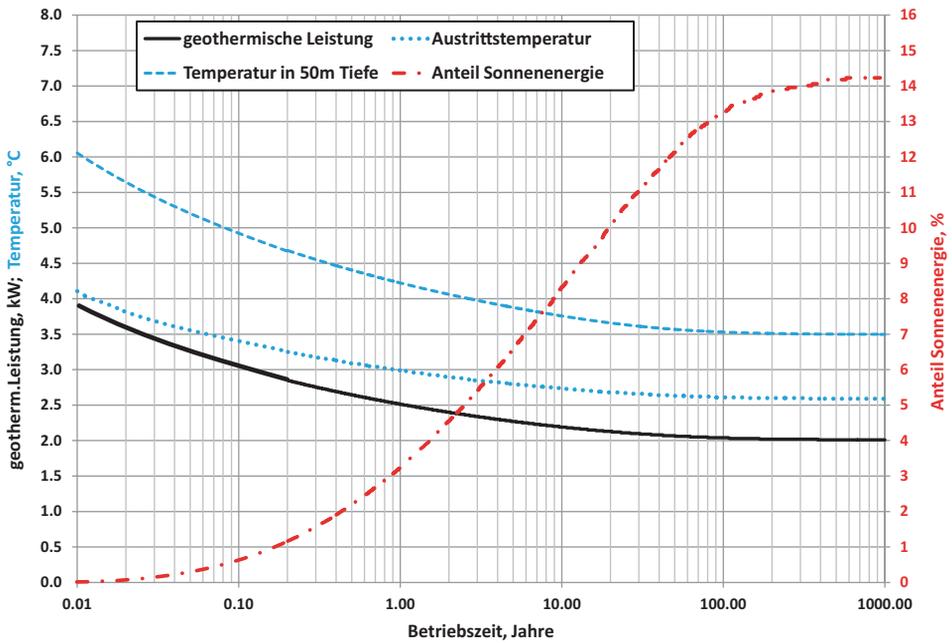


Abb. 1.2 Leistung und Temperaturen einer hypothetischen 100 m tiefen Sonde (das abgekühlte Wasser wird mit einer Temperatur von +1 °C injiziert)

Nach etwa 100 Jahren würde sich ein stabiler (stationärer) Zustand einstellen. Der Anteil an Sonnenenergie, d. h. Energie, die über die Erdoberfläche eingetragen wird, nimmt zu bis zu einem Betrag von ca. 14%.

In der Tiefe, die nicht mehr von der Sonnenenergie erreicht wird, dienen im Falle der Wärmeentnahme durch tiefe Geothermiebohrungen vor allem der Erdwärmestrom und der radioaktive Zerfall zur Regeneration des Temperaturfeldes. Da diese Regeneration jedoch gering ist, wird es zu einer gewissen Auskühlung kommen. Die Auskühlung ist in keiner Weise dramatisch, weil jeder Kubikmeter Gestein pro Grad Abkühlung eine Wärmemenge von ca. 2 Mio. Joule abgeben kann und zusätzlich der Erdwärmestrom aus der Tiefe existiert, wodurch eine Geothermiesonde über mehrere Jahrhunderte ohne Schaden betriebsfähig bleibt. Nach vergleichbaren Zeiträumen der Ruhe stellt sich wieder das natürliche Temperaturfeld, d. h. eine vernachlässigbare Temperaturabsenkung ein.

In Abb. 1.3 ist der zeitliche Verlauf der Temperaturabsenkung nach einem 1000 Jahre dauernden Betrieb von zwei hypothetischen Erdwärmesonden (EWS) dargestellt. In beiden Sonden wurde das abgekühlte Wasser mit einer Temperatur von 1 °C injiziert. In der Hälfte der Tiefe tritt dabei in etwa das Maximum der Temperaturabsenkung auf und dort ist auch die Zeitdauer der Regeneration am längsten.

Tabelle 1.1 enthält einige Vergleichsdaten, wobei aus den erneuerbaren Anteilen hervorgeht, dass je geringer die Sondentiefe, desto höher der erneuerbare Anteil ist und dass die Wärmeausbeute aus tiefen Sonden deutlich stärker als linear mit der Tiefe wächst.

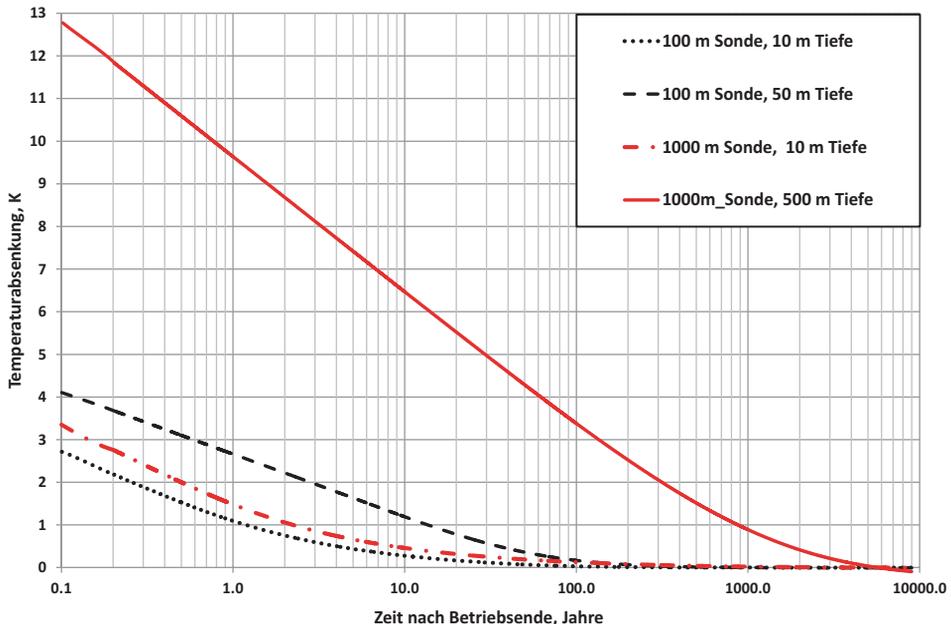


Abb. 1.3 Zeitlicher Verlauf der Regeneration des Temperaturfeldes nach 1000 Jahren Betrieb von zwei verschieden tiefen Erdwärmesonden