

Das Betriebsverhalten der Erdwärmesonde: dezentrales Heizen durch Nutzung der untiefen Geothermie

Autor(en): **Eugster, Walter J. / Hopkirk, Robert J. / Kälin, Bruno**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **110 (1992)**

Heft 46

PDF erstellt am: **08.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-77986>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Das Betriebsverhalten der Erdwärmesonde

Dezentrales Heizen durch Nutzung der untiefen Geothermie

Zur Nutzung der Erdwärme aus Tiefen von einigen 10 bis wenigen 100 Metern (= «untiefe Geothermie») wurden im vergangenen Jahrzehnt in der Schweiz auf empirischer Basis mehrere tausend dezentrale Heizanlagen mit wärmepumpengekoppelten Erdwärmesonden in Betrieb genommen, meist zur Beheizung von Einzelobjekten. Seit 1983 sind am Institut für Geophysik der ETH Zürich und beim Forschungs- und Beratungsbüro Polydynamics Ltd., Zürich, theoretische und experimentelle Untersuchungen im Gange, um die wissenschaftlichen und energiewirtschaftlichen Grundlagen solcher Heizsysteme zu erarbeiten. Die Resultate sind auch für die richtige Dimensionierung von Erdwärmesonden-Anlagen von ausschlaggebender Bedeutung.

Prinzip

Eine Erdwärmesonden-Heizanlage besteht im einfachsten Fall aus drei getrennten Kreisläufen (Bild 1):

- dem Wärmequellenkreislauf
- dem Wärmepumpenkreislauf
- dem Heizkreislauf oder Ladekreislauf für einen technischen Speicher (Wärmenutzungskreislauf)

Mit einer Bohrung wird ein Koaxial- oder U-Rohr aus Polyethylen (das ist die Erdwärmesonde oder auch Erdsonde im eigentlichen Sinn) mit einer Länge von bis zu 150 m und einem Durchmesser von 8-10 cm in das Erdreich eingebracht, welches als Wärme-

quelle dient. Die Wärme wird über den geschlossenen Kreislauf (Wärmequellenkreislauf) in der Erdwärmesonde dem Erdreich entzogen. Die wärmetransportierende Sole im Wärmequellenkreislauf nimmt diese Wärme auf und führt sie zur Wärmepumpe. Als Sole wird meistens Wasser mit einem Zusatz von 25-35% Frostschutzmittel verwendet.

Die Erdwärmesonden werden hinterfüllt, um einen satten Kontakt zwischen Erdwärmesonde und Erdreich zu gewährleisten und so den Wärmeübergang zu erhöhen. Die gebräuchlichsten Materialien für die Hinterfüllung sind Ton-Suspensionen (z.B. Bentonit, Opalit) mit Beimischung von Zement und/oder Quarzsand.

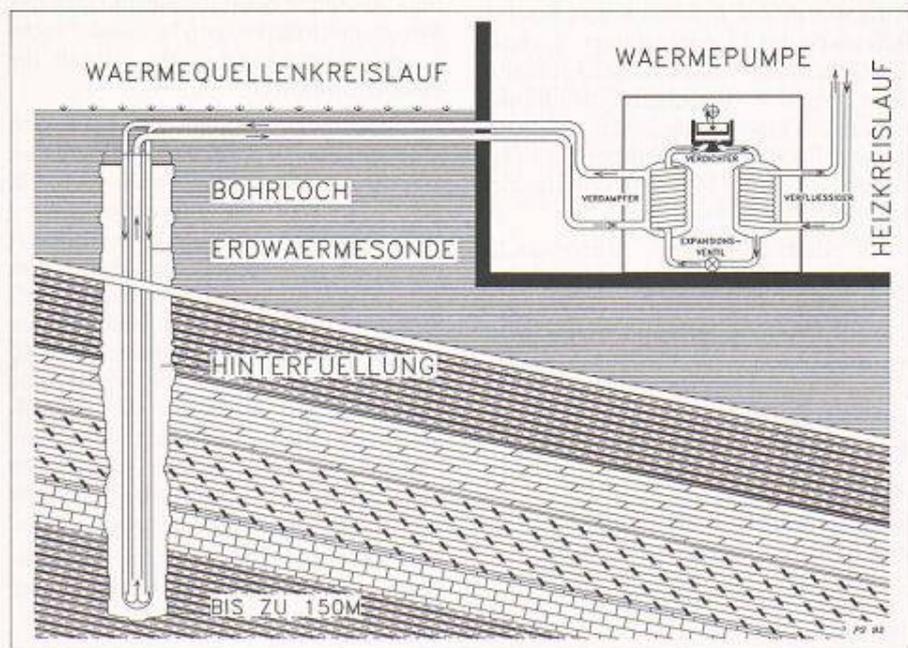


Bild 1. Das Prinzip einer Erdwärmesonden-Heizanlage mit den drei geschlossenen Kreisläufen: Wärmequellenkreislauf, Wärmepumpenkreislauf und Heizkreislauf

Autoren dieses Beitrages

Walter J. Eugster, Robert J. Hopkirk, Bruno Kälin, Ladislaus Rybach, Patty Seifert, Zürich.

Die Wärmepumpe ihrerseits besteht grundsätzlich aus vier Teilen: dem Verdampfer, dem Verdichter, dem Verflüssiger und dem Expansionsventil. Über dem Verdampfer, ein Wärmeaustauscher, fließt Wärme vom Quellenkreislauf in den Wärmepumpenkreislauf. Hier zirkuliert ein Arbeitsmittel (sog. Kältemittel), dessen Siedepunkt niedriger ist als die Temperatur im Wärmequellenkreislauf. Das flüssige Arbeitsmittel erwärmt sich hier und wird dadurch gasförmig. Die Sole im Wärmequellenkreislauf, die üblicherweise eine Temperatur zwischen -2°C und $+5^{\circ}\text{C}$ aufweist, kühlt durch die Wärmeabgabe an das Arbeitsmittel um $2-3^{\circ}\text{C}$ ab, kehrt ins Erdreich zurück und erwärmt sich dort von neuem.

Das nun gasförmige Arbeitsmittel gelangt in den Verdichter und wird komprimiert. Dabei erhöht sich die innere Energie des Gases. Die Temperatur steigt somit von der Quellen- auf die Nutzungstemperatur an. Das stark erhitze, unter Druck stehende Arbeitsmittel wird zum Verflüssiger geleitet. Der Verflüssiger ist ein zweiter Wärmeaustauscher. Auf seiner sekundären Seite ist er an den Heizkreislauf angeschlossen, dessen Temperatur niedriger sein soll als die des komprimierten Gases. Der Heizkreislauf kühlt das Arbeitsmittel ab. Dieses wird dabei wieder flüssig und gelangt zum Expansionsventil, wo der Druck nun verringert wird. Dadurch nimmt das Volumen des Arbeitsmittels zu und dessen Temperatur sinkt noch weiter. Das Arbeitsmittel ist erneut in der Lage, beim Verdampfer Wärme aufzunehmen. Der Kreis der Wärmepumpe schliesst sich.

Ein energiewirtschaftlich sinnvoller Betrieb einer Wärmepumpenheizung mit elektrischem Antrieb erfolgt erst, wenn die Jahresarbeitszahl der Anlage (das Verhältnis: gelieferte Heizenergie zu aufgenommener elektrischer Energie der Wärmepumpe und Quellenkreislaufpumpe) wenigstens den Wert 3.0 erreicht. Erst dann fängt Umgebungswärme an, Primärenergieträger für thermisch generierte Stromproduktion zu ersetzen. Um dieses Ziel zu erlangen, muss der Temperaturunterschied zwischen Wärmequellen- und Heizkreislauf möglichst gering sein. Dadurch wird von der Wärmepumpe weniger Elektrizität zur Verdichtung des Ar-

beitsmittels benötigt. Als Heizkreislauf wird also am besten ein Verteilsystem benutzt, welches mit einer möglichst geringen Vorlauftemperatur betrieben werden kann.

Auf der Wärmequellen-Seite dürfen ebenfalls keine zu tiefen Temperaturen vorliegen. Im Idealfall um 0°C oder höher. Dies kann erreicht werden, wenn die Länge der Erdwärmesonden grosszügig bemessen wird. Zur Planung einer Anlage sollen im Mittelland deshalb spezifische Sondenleistungen von maximal 45 W pro Meter Sondenlänge benutzt werden (siehe auch Kasten).

Erdwärmesonden in der Schweiz

Auf empirischer Basis wurden in den vergangenen 15 Jahren in der Schweiz knapp 4000 Erdwärmesonden-Anlagen mit insgesamt mehr als 9000 Sonden und über 700 000 Bohrmeter in Betrieb genommen. Dies entspricht einer geschätzten jährlichen Heizenergie von rund 300 TJ (85 Mio. kWh) oder rund 0.1% des schweizerischen jährlichen Wärmeverbrauchs. Gemäss Berechnungen liegt die maximal mögliche Anzahl von Erdwärmesonden-Heizanlagen in der Schweiz bei mindestens 100 000 Anlagen. Das maximale Heizenergie-Potential würde demnach bei zirka 2% des jährlichen Wärmeverbrauchs oder rund 6300 TJ liegen. Das Aktionsprogramm Energie 2000 [1] des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW) hat sich zum Ziel gesetzt, bis ins Jahr 2000 insgesamt 3% (bezogen auf fossile Energieträger) des Wärmebedarfs durch erneuerbare Energie (Geothermie, Sonnenkollektoren, Biomasse und Umgebungswärme) zu decken.

In der Schweiz ist weitaus der grösste Teil der Erdwärmesonden-Anlagen über das ganze Mittelland verteilt. Im Jura und in den höher gelegenen Gebieten der Alpen existieren nur wenige Anlagen (Bild 2; ohne Anspruch auf Vollständigkeit). Die Schweiz weist weltweit die höchste Dichte an Erdwärmesonden-Heizanlagen auf.

Erdwärmesonden-Heizanlagen sind grundsätzlich bewilligungspflichtig. Zuständig sind die kantonalen Gewässer-schutzämter. Die Bewilligungspraxis ist deshalb auch von Kanton zu Kanton unterschiedlich. In den meisten Kantonen wird jedoch in Grundwasser-Schutzzonen keine Betriebsbewilligung erteilt. Einheitliche Richtlinien für die Bewilligung von Erdwärmesonden-Anlagen sind allerdings unter Federführung des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) in Vorbereitung. Solide theoretische Kenntnisse über das Betriebsverhalten und über die Wir-

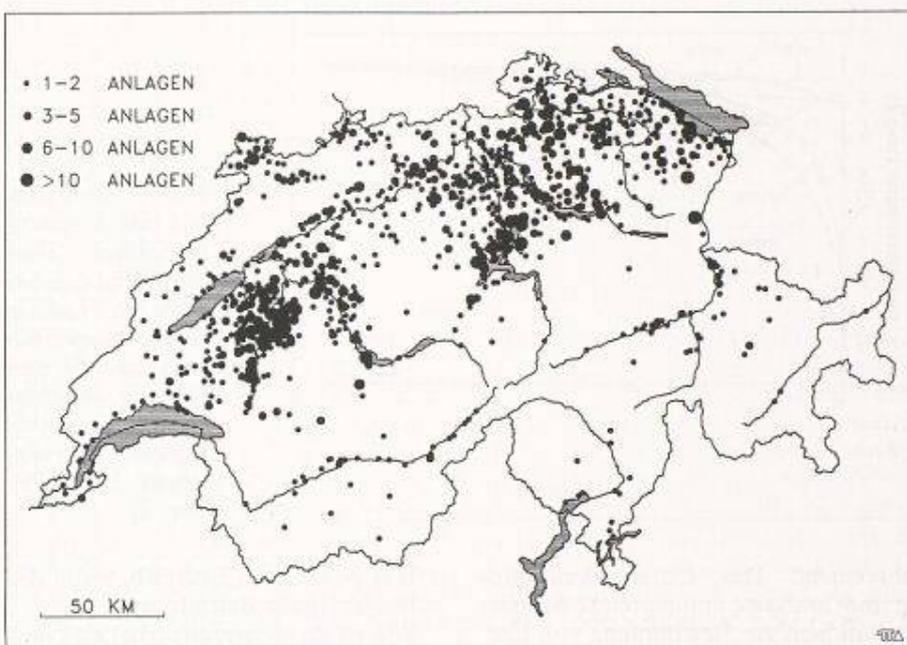


Bild 2. Die Verteilung der Erdwärmesonden in der Schweiz (Quelle: Broder AG, Sargans; Grundtag AG, Gossau SG)

kungweise solcher Anlagen haben bis jetzt weitgehend gefehlt. Insbesondere haben Unsicherheiten bestanden über die gegenseitige Beeinflussung von allfällig vorhandenem Grundwasser, über die benötigte Länge der Sonden, über ökologische Auswirkungen auf die

nähere Umgebung sowie über die gegenseitige Beeinflussung benachbarter Anlagen.

Aus diesen Gründen wurden seit Mitte der achtziger Jahre drei ausgewählte Erdwärmesonden-Anlagen detailliert

Begriffe

Spezifische Sondenleistung:

Entzugsleistung der Wärmepumpe aus dem Wärmequellenkreislauf pro Meter Sondenlänge.

Quellentemperatur:

Temperatur im Wärmequellenkreislauf am Verdampfer der Wärmepumpe.

Jahres-Arbeitszahl (JAZ)

$$JAZ = \frac{\text{Nutzenergie pro Jahr}}{\text{aufgewendete Energie pro Jahr}}$$

Die aufgewendete Energie setzt sich aus der von der Wärmepumpe und der Zirkulationspumpe im Wärmequellenkreislauf verbrauchten Energie zusammen.

Wärmequellenkreislauf:

Geschlossener Kreislauf im Erdreich auf der kalten Seite der Wärmepumpe, der zur Wärmeaufnahme dient (die Erdwärmesonde im eigentlichen Sinn). Der Wärmequellenkreislauf liefert die Verdampfungsenergie für das Arbeitsmittel im Verdampfer der Wärmepumpe.

Arbeitsmittel, Wärmepumpenkreislauf:

Das Arbeitsmittel zirkuliert innerhalb der Wärmepumpe im sogenannten Arbeitsmittelkreislauf zwischen Verdampfer, Verdichter, Verflüssiger und Expansionsventil. Die physikalischen bzw. chemischen Eigenschaften des Arbeitsmittels müssen spezielle Bedingungen (z.B. Verflüssigung unter geringem Druck bei geringen Temperaturen) erfüllen. Die heute gebräuchlichen Arbeitsmittel sind meist Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe.

Heizkreislauf, Ladekreislauf:

Der Heizkreislauf ist der Kreislauf auf der Nutzungsseite der Wärmepumpe. Er nimmt beim Verflüssiger der Wärmepumpe Heizenergie auf und gibt die Wärme an das Gebäude oder an einen technischen Speicher ab.

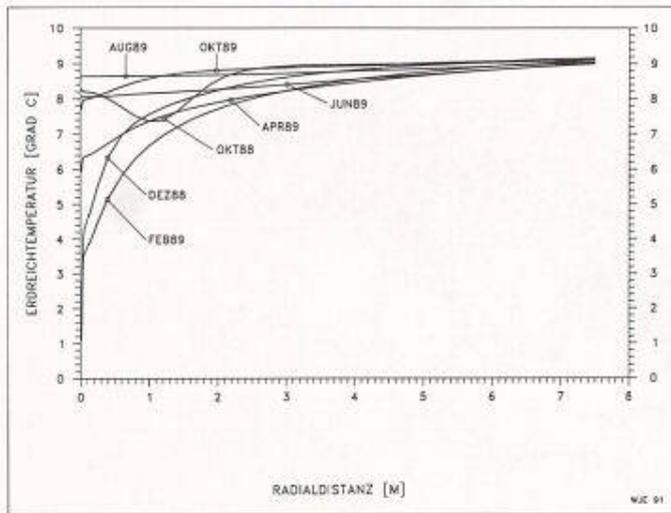


Bild 3. Die Dynamik des Temperaturtrichters. Dargestellt ist die berechnete radiale Temperaturverteilung der Anlage Elgg für verschiedene Zeitpunkte während des Heizjahres 1988/89, aus [3]

untersucht. Das Untersuchungsprogramm umfasste umfangreiche Messinstallationen zur Bestimmung von Erdreichtemperaturprofilen in verschiedenen Abständen von der Erdwärmesonde. Daneben wurden die relevanten Betriebsdaten (Vor- und Rücklauftemperaturen sowie die Durchflussmengen im Wärmequellen- und Heizkreislauf, elektrische Energieaufnahme der Wärmepumpe), meteorologische Größen und verschiedene Raumtemperaturen laufend registriert. Die untersuchten Anlagen liegen alle im östlichen Mittelland: Rorschacherberg SG (1983–1988), Frauenfeld TG (1984–1989) und Elgg ZH (1986–1991).

Betriebsverhalten

Die Hauptfragen aus der Sicht der Geothermie konzentrieren sich auf den Wärmehaushalt im Untergrund:

- Was passiert im Erdreich, wenn die Heizanlage in Betrieb ist?
- Wie ist das Langzeitverhalten einer Erdwärmesonden-Anlage?

Im einfachsten Fall wird eine Erdwärmesonden-Anlage nur zur Beheizung eines Gebäudes eingesetzt. Dann bleibt die Wärmepumpe vom Frühjahr bis zum Herbst ausgeschaltet. Dies ist bei der Anlage in Elgg (ZH), auf die in den nächsten Abschnitten eingegangen wird, der Fall (siehe [3], [4]). Diese Anlage ist mit einer einzigen Sonde zu 105 m Länge ausgerüstet.

Ist die Heizanlage in Betrieb, wird dem Untergrund durch die Erdwärmesonde laufend Wärme entzogen. Da die Wärme nicht schnell genug aus den entfernteren Gebieten nachfliessen kann, bildet sich ein stark ausgeprägter Kälte-trichter im Nahbereich der Sonde. Bild 3 zeigt die radiale Temperaturverteilung um die Erdwärmesonde der Anlage Elgg für verschiedene Zeitpunkte

Steckbrief einer Erdwärmesonden-Anlage für ein Einfamilienhaus mit 10 kW Heizleistungsbedarf

- 2 Sonden à 75 m oder 1 Sonde à 150 m
- Sondendurchmesser ca. 8–10 cm
- Koaxialrohr oder doppeltes U-Rohr aus Polyethylen
- Spezifische Sondenleistung ca. 45 W/m
- Wärmeträger: ca. 70% Wasser
30% Frostschutz
- Wärmeträger-Umsatzmenge ca. 2,5 m³/h
- Wärmepumpe
(ca. 3,5–4,5 kW elektrische Leistung)
- Niedertemperatur-Heizung
(idealerweise)
- Evt. technischer Speicher

während des Heizjahres 1988/89. Unmittelbar bei der Sonde wird das Erdreich bis zu 8°C abgekühlt. In 50 cm Abstand beträgt die Abkühlung nur noch rund 4°C. Ab ca. 2,5 m Distanz fällt dieser Wert auf weniger als 1°C zurück. Ist die Wärmepumpe hingegen ausgeschaltet, so kann sich der Trichter wieder auffüllen. Während der Heizperiode sind diese Ruhephasen jedoch zu kurz für eine vollständige thermische Erholung. Somit kommt es je nach benötigter Heizenergie zu einer stärkeren oder geringeren Auskühlung des Untergrundes während eines Winters.

In Bild 4 ist der Verlauf der Erdreichtemperaturen in 5 m, 50 m und 85 m Tiefe und in 50 cm Abstand von der Erdwärmesonde in Elgg über fünf Betriebsjahre aufgezeigt. Im unteren Bereich sind die monatlichen Heizgradtage (HGT 20/12) dargestellt. Der direkte Einfluss der atmosphärischen Temperatur ist in der Tiefe von 5 m noch deut-

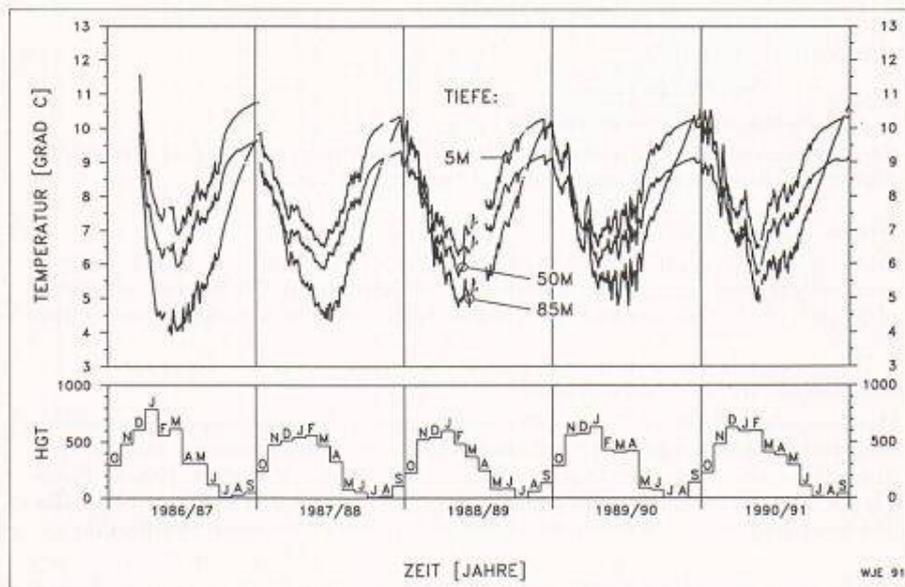


Bild 4. Der zeitliche Verlauf der gemessenen Erdreichtemperaturen in 5 m, 50 m und 85 m Tiefe und 50 cm Abstand von der Erdwärmesonde in Elgg über fünf Betriebsjahre (HGT: Heizgradtage 20/12), aus [3]

Woher kommt die Wärme?

Einerseits fliesst Wärme aus dem heissen Erdinnern vertikal nach zur Oberfläche hin. In der Schweiz sind dies ca. 0,08 W/m². Wegen des ausgeprägten Kälte-trichters im Nahbereich der Erdwärmesonde, der sich zylindersymmetrisch entlang der gesamten Sonde ausbildet, strömt auch eine beträchtliche Menge an Wärme aus horizontaler Richtung nach. Daneben dringt Sonnenwärme in das Erdreich ein. Die Globalstrahlung der Sonne kann an Sommertagen Spitzenwerte von über 1000 W/m² erreichen. Davon dringt je nach Beschaffenheit der Erdoberfläche bis zu 70% in den Untergrund ein und stabilisiert die Bodentemperatur in der Umgebung der Erdwärmesonde. Zusammen mit versickerndem Regenwasser können so bedeutende Mengen an Wärme aus der Atmosphäre in das Erdreich eindringen.

Eine un tiefe Erdwärmesonde profitiert also nicht nur von der Erdwärme, sondern ebenfalls von der Sonnenwärme.

So wird richtig geplant

Eine gut funktionierende Erdwärmesonden-Heizanlage mit einer Jahres-Arbeitszahl von wenigstens 3.0 ist das Ergebnis einer sorgfältigen Planung und Realisierung:

1. Die Wärmepumpe muss so ausgelegt sein, dass sie bei allen vorkommenden Quellentemperaturen die geforderte Heizleistung erbringen kann.
2. Die Erdwärmesonde muss sorgfältig hinterfüllt werden, um über die ganze Länge der Sonde einen guten Kontakt mit dem Erdreich zu gewährleisten.
3. Die Länge der Erdwärmesonde soll so bemessen sein, dass die durchschnittliche Quellentemperatur kaum unter 0°C sinkt.
4. Das Heizsystem muss auf die Wärmepumpe abgestimmt sein. Die Vorlauftemperaturen sind möglichst tief zu halten, um eine möglichst kleine Temperaturdifferenz über die Wärmepumpe und damit eine möglichst hohe Effizienz der Maschine zu ermöglichen.
5. Die klimatischen und geologischen Randbedingungen müssen in der Planung berücksichtigt werden.

Erstellungskosten

Gegenüber einer herkömmlichen Ölheizung sind die Investitionskosten einer Erdwärmesonden-Heizanlage erheblich höher. Die jährlich wiederkehrenden Betriebskosten (Stromverbrauch, Wärmepumpen-Service) sind jedoch im allgemeinen geringer als die einer Ölheizung (Ölverbrauch, Servicekosten für Brenner und Kamin).

Die approximativen Investitionskosten einer Erdwärmesonden-Anlage für ein Einfamilienhaus mit 10 kW Heizleistung bei einer angestrebten Jahres-Arbeitszahl von 3.0 sind in der folgenden Zusammenstellung den Erstellungskosten für eine Ölheizung gegenübergestellt. Nicht enthalten sind die Kosten für den Zuleitungsgraben zwischen dem Sondenstandort und dem Gebäude:

	Erdwärmesonden	Ölheizung
Bohren, Erdwärmesonde einbringen und hinterfüllen. Drucktest.	Fr. 14 000.–	Fr. –.–
Wärmepumpe mit 10.1 kW Heizleistung bei S-3W45 Kompaktwärmezentrale mit 9–13 kW Heizleistung inkl. Steuerung, Low Nox.	Fr. 12 000.–	Fr. –.–
Technischer Speicher, isoliert, 750 l Inhalt Heizungssteuerung	Fr. –.–	Fr. 8 200.–
Anschluss der Erdwärmesonde an die Wärmepumpe inkl. Pumpe, Expansionsgefäss, allen Armaturen und Füllung (Wasser und Frostschutz).	Fr. 2 300.–	Fr. –.–
Anschluss des technischen Speichers an die Wärmepumpe inkl. Pumpe, Expansionsgefäss und allen Armaturen.	Fr. 2 400.–	inkl.
Öltank, 2 x 1500 l, Kunststoff, inkl. Auffangwanne (100%) Tankarmaturen und Verbindungsleitungen	Fr. 4 300.–	Fr. –.–
Montage	Fr. 2 000.–	Fr. –.–
Kamin inkl. Ummauerung, Isolation, Verputz über Dach, Spenglerarbeiten und Kaminhut	Fr. –.–	Fr. 3 700.–
Platzbedarf Öltank (14 m ² à Fr. 400.–)	Fr. –.–	Fr. 500.–
	Fr. –.–	Fr. 2 000.–
	Fr. –.–	Fr. 7 000.–
	Fr. –.–	Fr. 5 600.–
Total	Fr. 37 000.–	Fr. 27 000.–

lich spürbar, in grösseren Tiefen jedoch nicht mehr. In Phasen mit geringem Heizbedarf ist sofort eine signifikante Erhöhung der Erdreichtemperaturen und somit eine natürliche thermische Teilerholung des Untergrundes feststellbar (z.B. Dezember 1989 mit Tagesmitteltemperaturen von 10°C und Tageshöchstwerten von 17°C). Die tiefsten Temperaturen werden nach den intensivsten Heizmonaten Januar und/oder Februar erreicht. Danach ist der Heizbedarf im Mittelland meist geringer als das Erholungsvermögen des Untergrundes. Die aus weiter entfernten Gebieten nachfliessende Wärme kann das Erdreich wieder merklich erwärmen. Diese Regeneration findet anschliessend während der Sommermonate bei ganz abgeschalteter Wärmepumpe ihren Abschluss. Im grösseren Zeitmassstab ist hier der girdandenähnliche Verlauf der Erdreichtemperaturen im Nahbereich der Sonde ersichtlich. Im Winter kühlt sich der Untergrund um 3–4 °C ab und im Sommer findet die nahezu vollständige Regeneration auf die Vorjahreswerte statt.

Nach dem ersten Betriebsjahr entsteht jedoch eine messbare, gleichmässig über die gesamte Sondenlänge verteilte, bleibende Abkühlung in der Grössenordnung von 1°C. Im Laufe der folgenden Betriebsjahre verringert sich das zusätzliche jährliche Defizit jedoch zu einem kaum mehr messbaren Betrag. Das System Erdwärmesonde-Erdreich

strebt nach drei bis vier Betriebsjahren einem neuen Gleichgewichtszustand zu, der sich allerdings auf einem etwas tieferen Temperaturniveau stabilisiert. Dies wird durch Bild 5 verdeutlicht. Dargestellt sind die unmittelbar vor Beginn der Heizperiode gemessenen Temperaturprofile in 50 cm Abstand von der Erdwärmesonde in Elgg. Die Kurve «Dezember 1986» bezeichnet den Ruhezustand vor der ersten Inbetriebnahme der Heizanlage.

Die Erdreichtemperaturen und somit auch die Quellentemperaturen verändern sich also mit zunehmenden Betriebsjahren geringfügig in die ungünstige Richtung. Dadurch muss bei gleichbleibender Laufzeit eine Erhöhung der spezifischen Sondenleistung akzeptiert werden oder umgekehrt, bei gleichbleibender spezifischer Sondenleistung eine Erhöhung der Laufzeit der Wärmepumpe. Der jährliche totale Energieeinsatz wird jedoch nicht eingeschränkt.

Erdwärmesonden können praktisch in jedem Untergrund installiert werden. Massgebendes Kriterium ist dessen Wärmeleitfähigkeit, also das Vermögen des Untergrundes, Wärme nachfliessen zu lassen. Aus dieser Sicht sind trockene, unverfestigte Schotter zu vermeiden. Ebenso ungünstige Bedingungen bieten gesättigte Schotterdecken in stehendem Grundwasser.

Für den Betrieb der Heizanlage spielt es keine Rolle, ob U-Rohre oder koaxiale

Rohre als Erdwärmesonden verwendet werden [2].

Modellrechnungen

Die Messdaten dienen der Eichung und Überprüfung von numerischen Simula-

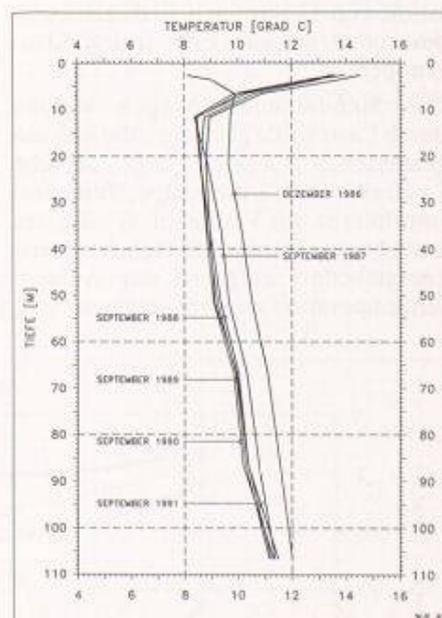


Bild 5. Gemessene Temperaturprofile im Erdreich unmittelbar vor Beginn einer neuen Heizperiode in 50 cm Abstand von der Erdwärmesonde in Elgg. Die Kurve «Dezember 1986» definiert den Ruhezustand vor Inbetriebnahme des Heizsystems, aus [3]

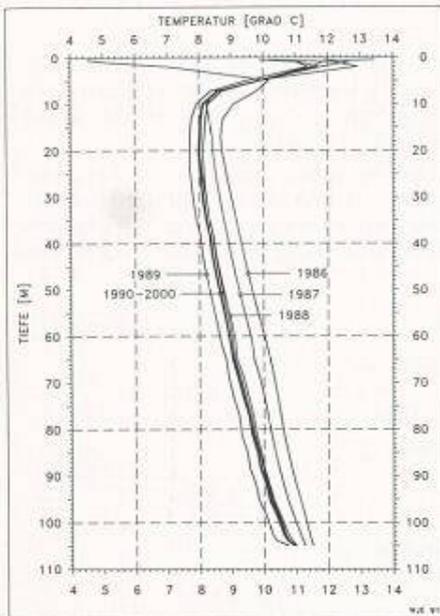


Bild 6. Modellierter Temperaturprofile der Anlage Elgg in 50 cm Abstand von der Erdwärmesonde. Dargestellt ist das Profil vom Dezember 1986 (modellierter Ruhezustand) sowie die Profile vom 30. September jedes simulierten Betriebsjahres, aus [3]

tionsrechnungen. Gegenwärtig sind zwei Rechenprogramme im Einsatz: ein zweidimensionales Modell (implizite Finite Differenzen in Zylinderkoordinaten) zur Simulation von coaxialen Erdwärmesonden an Standorten ohne Grundwasser und ein dreidimensionales Modell (explizite Finite Differenzen in kartesischen Koordinaten) zur Simulation von U-förmigen Erdwärmesonden oder ganzen Erdwärmesonden-gruppen.

Die Simulationsrechnungen werden durch Lastprofile gesteuert, die sich aus gemessenen Grössen (z.B. tägliche Laufzeit der Wärmepumpe, Temperaturdifferenz am Verdampfer) oder aus berechneten Daten (z.B. täglicher Heizenergiebedarf aufgrund der Aussenlufttemperatur) zusammensetzen.

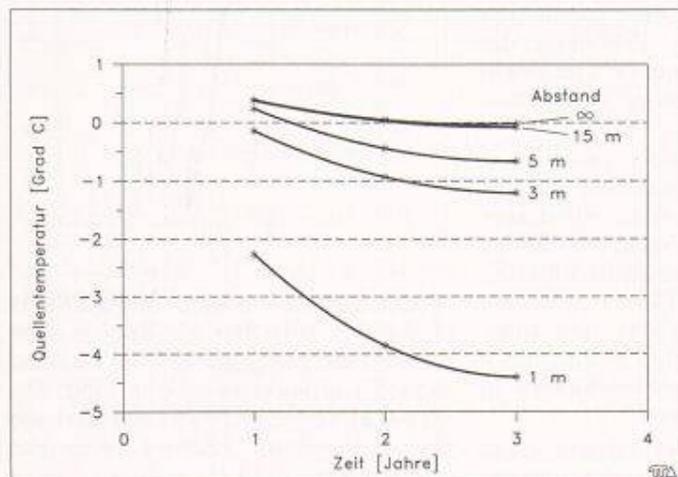


Bild 8. Die Abnahme der durchschnittlichen Quelltemperatur in Abhängigkeit vom Abstand zwischen zwei Erdwärmesonden, aus [5]

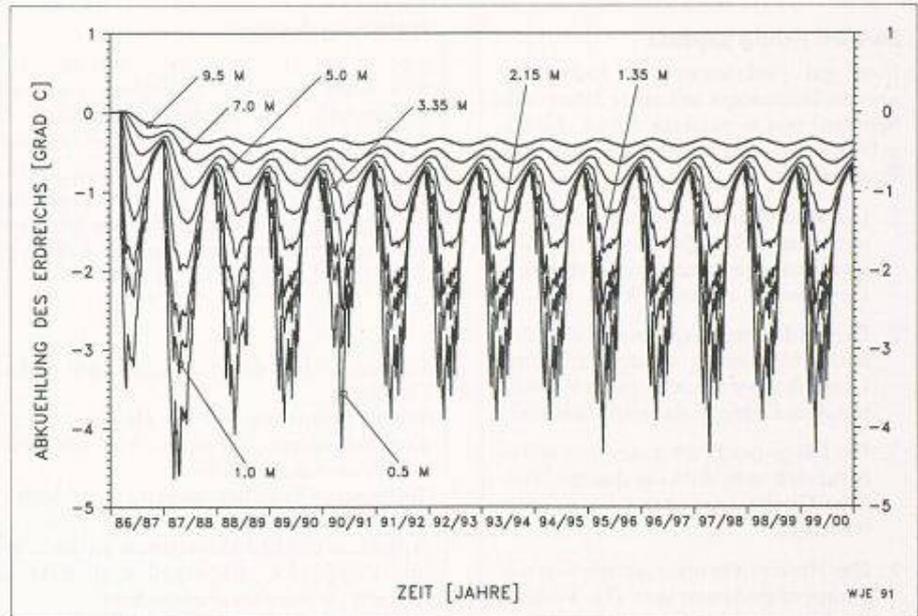


Bild 7. Die Abkühlung des Erdreichs im Umfeld der Erdwärmesonde in Elgg gegenüber dem Ruhezustand in verschiedenen radialen Distanzen über 14 modellierte Betriebsjahre, aus [3]

Bild 6 zeigt – analog zu Bild 5 – die Temperaturprofile jeweils Ende September in 50 cm Abstand von der Erdwärmesonde in Elgg von einem simulierten 14-jährigen Betrieb. Bis zum Frühjahr 1991 wurden die gemessenen Lastprofile verwendet. Für die folgenden Jahre wurden die gleichen Lastprofile, allerdings in wechselnder Reihenfolge, verwendet. Auch dieses Bild zeigt das Entstehen eines neuen und überaus stabilen Temperaturgleichgewichts im Erdreich nach wenigen Betriebsjahren.

Einflussbereich

Bild 7 zeigt die Abkühlung des Erdreichs gegenüber dem Ruhezustand für verschiedene radiale Distanzen von der Erdwärmesonde über alle 14 simulierten Betriebsjahre der Anlage in Elgg

(ZH). Es lässt sich wiederum feststellen, dass der jährliche Abkühlungs-Erwärmungs-Prozess im Nahbereich der Erdwärmesonde bis rund 1.5 m Distanz mehr als 1°C, in 0.5 m Distanz sogar bis zu 4°C ausmacht. Erst in grösseren Abständen fällt dieser Wert deutlich unter 0.5°C zurück.

Im Fernbereich der Erdwärmesonde ab ca. 5 m Radialdistanz hat der jährlich unterschiedliche Heizenergiebedarf keinen Einfluss mehr auf den Verlauf der Abkühlungskurven. Hier bleiben die Temperaturschwankungen ab dem dritten Betriebsjahr völlig konstant. Sie sind die indirekten, zeitlich verzögerten Folgen des Sondenbetriebs. Ähnlich den Vorgängen in den obersten Metern des Erdreichs, die durch die wechselnden Temperaturen in der Atmosphäre hervorgerufen werden.

Andere Modellrechnungen [5] haben den Einfluss zweier benachbarter Sonden bei unterschiedlichem Abstand auf die Quelltemperaturen untersucht (Bild 8). Auch hier ist ersichtlich, dass ab ca. 5 m Distanz zwischen zwei Sonden nur noch eine geringfügige Abkühlung der Quelltemperatur die Folge ist. Ein Abstand von wenigstens 5 m zwischen zwei Erdwärmesonden genügt also, um eine Einschränkung im Betriebsverhalten der einzelnen Sonden auszuschliessen.

Berggebiet

Alpine Regionen unterscheiden sich in ihren für einen Erdwärmesonden-Be-

Literatur

- [1] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 1990, Bulletin SEV/VSE 82 (1991) 12.
- [2] Burkart, R.; Eugster, W.J.; Hopkirk, R.J.; Rybach, L.: Erdwärmesonden-Heizanlagen: Durch Messungen und Berechnungen bestimmte Auslegungs- und Betriebsgrößen. Studie Nr. 46, Schriftenreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Bern, 1989.
- [3] Eugster, W.J.: Erdwärmesonden – Funktionsweise und Wechselwirkung mit dem geologischen Untergrund. Feldmessungen und Modellsimulation. Dissertation Nr. 9524, ETH Zürich, 1991.
- [4] Eugster, W.J.; Hopkirk, R.J.; Rybach, L.: Erdwärmesonden – ihre Funktionsweise und Wechselwirkungen mit Boden und Grundwasser. Schlussbericht NEFF-Projekt Nr. 324. Nationaler Energie-Forschungs-Fonds, Basel, 1992.
- [5] Kälin, B.; Hopkirk, R.J.: Quantitative Empfehlung über den minimalen Grenzabstand einer Erdwärmesonden-Anlage. Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, 1991.
- [6] Seifert, P.K.: Untersuchungen zur Wirkungsweise von vertikalen Erdwärmesonden an alpinen Standorten. Diplomarbeit an der Abteilung für Naturwissenschaften der ETH, Zürich, 1992.
- [7] Seifert, P.K.; Eugster, W.J.; Kälin, B.; Hopkirk, R.J.: Auswirkungen von Bergklima und Bodentypen auf das Betriebsverhalten von Erdwärmesonden. Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, 1992.

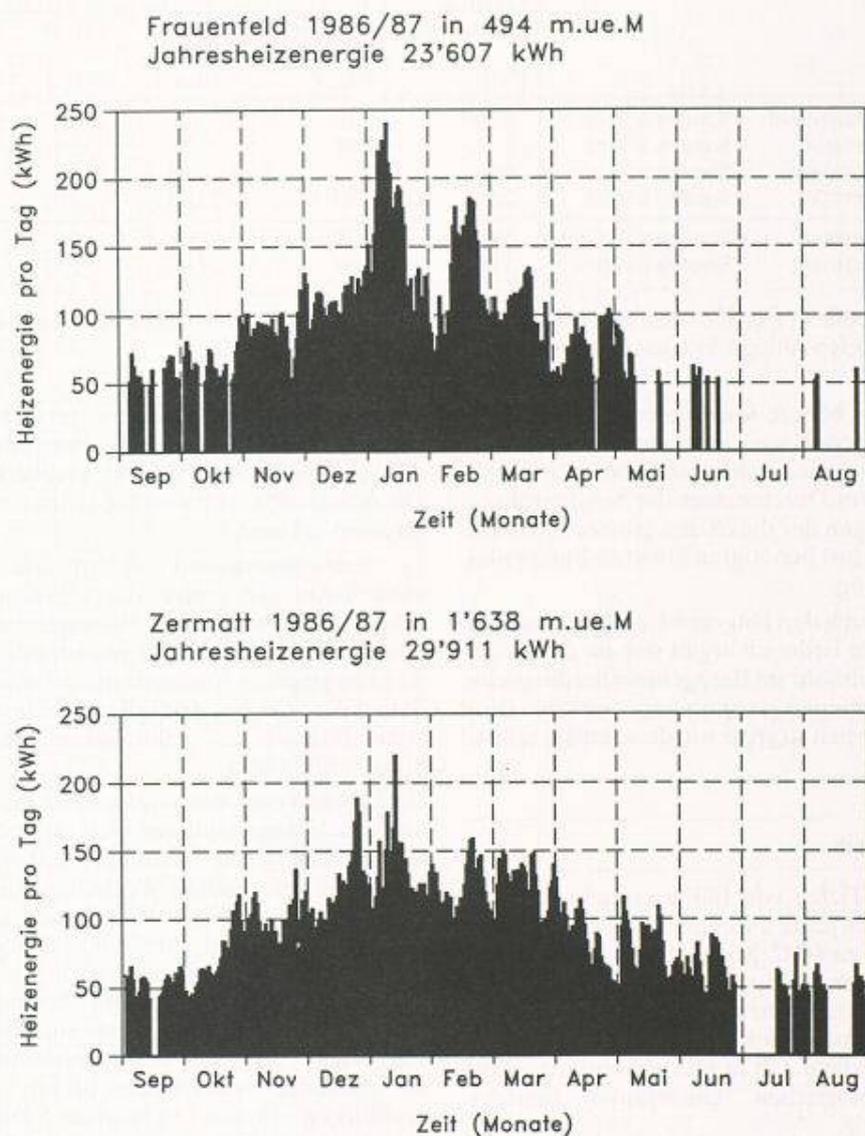


Bild 9. Der zeitliche Verlauf des berechneten täglichen Heizenergiebedarfes für ein Einfamilienhaus mit 7 kW Heizleistungsbedarf in Frauenfeld und in Zermatt für das Heizjahr 1986/87, nach [7]

trieb relevanten Randbedingungen deutlich vom Mittelland:

- niedrigere Aussenlufttemperaturen
- höherer Jahresheizenergiebedarf
- tiefere Bodentemperaturen.

Diese drei Punkte sind eine reine Folge des klimatischen Unterschieds. Daneben können andere Untergrundstypen mit anderen Wärmeleitfähigkeiten des Erdreichs auftreten. Im folgenden wird nur auf die klimatischen Unterschiede am Beispiel der Standorte Frauenfeld (494 m.ü.M) und Zermatt (1638 m.ü.M) eingegangen.

Die langjährige mittlere Tagestemperatur von Frauenfeld liegt mit rund 8°C wesentlich über dem Wert von Zermatt mit 3,4°C. Im Berggebiet fallen die Temperaturen tiefer und bleiben über eine längere Zeitdauer auf diesem Niveau. Anhand der Aussentemperaturen kann

der tägliche Heizenergiebedarf berechnet werden. Im Fall eines Einfamilienhauses, welches einen Heizleistungsbedarf von 7 kW aufweist, ergibt sich im Heizjahr 1986/87 für Frauenfeld ein jährlicher Energiebedarf von 23 607 kWh und für Zermatt ein solcher von 29 911 kWh (Bild 9). Die Dauer der Heizperiode ist deutlich erhöht. Die Erholungsphasen im Sommer sind folglich entsprechend kürzer.

Die Erdreichtemperaturen variieren einerseits mit der Höhenlage und andererseits mit dem Standort (Alpennord- oder Alpensüdseite). Zwischen 700 und 1600 m.ü.M. nehmen die Bodentemperaturen auf der Alpennordseite zwischen 0,5°C und 5°C niedrigere Werte an als im Mittelland in 500 m.ü.M.

Zusammenfassend zeigt sich die klimatische bedingte Ausgangslage für das

Berggebiet folgendermassen: Es ist ein erhöhter jährlicher Heizenergiebedarf während einer längeren Heizperiode bei tieferen Erdreichtemperaturen zu decken.

Mit Hilfe von Modellrechnungen können die Auswirkungen dieser Ausgangslage auf das Betriebsverhalten der Erdwärmesonden-Anlagen eingegrenzt werden. Die Anlage in Frauenfeld wurde samt Untergrund hypothetisch an einen höheren Standort in ein Gebäude mit gleichem Heizleistungsbedarf versetzt (weitere Details in [6], [7]. Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der Resultate.

Mit um 80% vergrößerter Sondenlänge können auch im Berggebiet vergleichbare Resultate wie im Mittelland erreicht werden. Durch weniger, aber dafür entsprechend tiefere Sondenwer-

	mittlere Quellen- temperatur [°C]	mittlere Temperatur- differenz am Verdampfer [°C]	mittlere spezifische Sonden- leistung [W/m]	Jahres- Arbeits- zahl [Ø]
Frauenfeld: 4 Sonden à 50 m	2.39	4.50	39.94	3.10
Zermatt: 4 Sonden à 50 m	-1.32	3.82	33.88	2.88
Zermatt: 4 Sonden à 70 m	0.95	4.21	26.67	2.97
Zermatt: 4 Sonden à 90 m	2.50	4.52	22.26	3.05
Zermatt: 3 Sonden à 93.3 m	1.26	4.27	27.05	2.96
Zermatt: 2 Sonden à 140 m	1.86	4.39	27.80	2.93

Tabelle 1. Der klimatische Einfluss auf einige Betriebsdaten der gleichen Erdwärmesonden-Anlage in verschiedenen Höhenlagen (nach [1], [6]).

den höhere Quellentemperaturen und höhere Kälteleistungen erzielt, die Jahres-Arbeitszahl sinkt aber – bei gleichem Durchmesser der Sondenröhre – wegen der durch den grösseren Druckverlust benötigten höheren Pumpenleistung.

Durch den längeren Energieentzug aus dem Erdreich ergibt sich im ersten Betriebsjahr im Berggebiet allerdings eine bleibende Abkühlung, welche rund doppelt so gross wie diese im Mittelland ist.

Fazit

In Tiefen von 100 m erreicht das Erdreich je nach Region Temperaturen von bis zu 14°C. Mit Erdwärmesonden und Wärmepumpen kann diese Wärme zur Gebäudeheizung genutzt werden. Erdwärmesonden reichen bis in Tiefen von maximal 150 m und sind in fast jedem geologischen Untergrund betriebsfähig.

Der Wärmeentzug kühlt das Erdreich während der Heizperiode um die Erdwärmesonde trichterförmig ab. Die Auskühlung beschränkt sich jedoch auf einen Umkreis von wenigen Metern. Während des Sommers erholt sich das Erdreich bei abgeschalteter Wärmepumpe wieder. Allerdings nicht vollständig. Ein geringes Temperaturdefizit bleibt bestehen. Von Jahr zu Jahr wächst es jedoch immer weniger. Es bildet sich also ein neues Temperaturgleichgewicht zwischen Erdwärmesonde und Erdreich, welches im Mittelland rund 1°C unter dem Anfangswert liegt.

Im Langzeitbetrieb zeigen die untersuchten Anlagen ein stabiles Verhalten.

Ausblick

Die Erdwärmesonden-Anlage als monovalentes, reines Heizsystem ist bis

jetzt im Mittelland recht gut untersucht worden. Die Technik in der Planung und Ausführung ist weitgehend etabliert. Die meisten Planer haben die kritischen Grössen erkannt.

Das Betriebsverhalten von Erdwärmesonden-Anlagen unter den geologischen und klimatischen Bedingungen von alpinen Regionen ist jedoch noch nicht im gleichen Ausmass studiert worden. Hier werden vor allem weitere computergestützte Simulationsrechnungen nötig sein.

Bis 1994 soll ein umfassendes Planungs- und Auslegungshandbuch den interessierten Stellen zur Verfügung stehen. Diese als vollständige Wegleitung für die Realisierung einer Erdwärmesonden-Heizanlage gedachte Hilfe soll alle Aspekte von der Dimensionierung der Sonde und der Wärmepumpe über die Anforderungen an die Wärmenutzung (Heizung, Brauchwassererwärmung usw.) und den Umweltschutz bis hin zu rechtlichen Fragen beinhalten. Die Standortabhängigkeit der Auslegungsgrössen wird ebenfalls integriert sein.

Die Einsatzmöglichkeiten einer geschlossenen Erdwärmesonde sind mit dem reinen Heizbetrieb keineswegs erschöpft. Die Entwicklung geht einerseits in die Tiefe und andererseits in die Vervielfachung der Sonden. Beide Varianten versprechen eine verstärkte Nutzung der in der Umwelt enthaltenen erneuerbaren Energie. Sie sind jedoch aus Kostengründen nur noch für grössere Energiezentralen anwendbar.

Die Erschliessung grösserer Tiefen bringt ebenfalls höhere Temperaturen im Wärmequellenkreislauf. Somit könnte auf den Einsatz einer Wärmepumpe verzichtet werden. Hierzu sind allerdings Tiefen von wenigstens 2000 m nötig. Bereits existierende, nicht fündige Bohrungen stehen hier im Vordergrund. Um die Transportwege und die damit verbundenen Wärmeverluste

möglichst gering zu halten, kommen aber nur konzentrierte Wohnsiedlungen bzw. Gewerbe- und Industriebauten in unmittelbarer Nähe mit einigen 100 kW erforderlichen Heizleistung als Abnehmer in Frage.

Die Massierung von Erdwärmesonden auf kleinem Gebiet bietet die Möglichkeit der Wärmespeicherung im Erdreich. Die hierzu benötigte Wärme kann gezielt gesucht werden (Strassenoberflächen, Parkplätze, Flachdächer, Sonnenkollektoren, Industrieabwärme usw.) oder sie kann überschüssige Wärme bei der Klimatisierung von Gebäuden darstellen. Diese Energie kann schliesslich in der kalten Jahreszeit mit herkömmlichem Erdwärmesonden-Betrieb für die Gebäudeheizung genutzt werden. Die Bewirtschaftung eines Speichers muss jedoch wegen der geringen Sondenabstände sehr sorgfältig und kontrolliert ausgeführt werden, um ein zu starkes Auskühlen und damit einen Kollaps des Systems zu vermeiden.

Eine weitere Spielart des Systems Erdwärmesonde sind die sogenannten Energiepfähle: Die Erdwärmesonden sind in den statischen Pfählen von Gebäuden eingelassen. Bauuntergründe, bei denen eine Pfählung des Gebäudes angezeigt sind, sind schlecht verfestigt und/oder wassergesättigt. Hier bietet sich eine weitere interessante Anwendungsform für die Wärmespeicherung (stehendes Grundwasser) oder die Klimatisierung von Gebäuden (fliessendes Grundwasser).

*

Die Autoren danken dem Nationalen Energie-Forschungs-Fonds, dem Bundesamt für Energiewirtschaft sowie den Kantonen Zürich, St. Gallen und Thurgau für die Finanzierung der hier berichteten Untersuchungen.

Adresse der Verfasser: Dr. W.J. Eugster, dipl. Natw. ETH/SIA; Dr. phil. Masch.-Ing. R.J. Hopkirk; P. Seifert, dipl. Natw. ETH; B. Kälin, Dipl. Natw. ETH/SIA, Polydynamics Ltd, Zeltweg 16, 8032 Zürich. Prof. Dr. L. Rybach, dipl. Ing. ETH/SIA; Institut für Geophysik, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.

Mitteilung Nr. 707, Institut für Geophysik, ETH Zürich.