

Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes bohrlochgeophysikalischer Messverfahren bei der Erkundung, Errichtung und Überwachung oberflächennaher Erdwärmesonden

Autoren: Dipl. Geophysiker M. Maurer, Dipl. Geophysiker W. Voigt
BBI – Brunnen- und Bohrlochinspektion GmbH
Salzstr. 21
D-39245 Gommern
E-Mail: info@bbi.de
Internet: <http://www.bbi.de>

Bohrlochgeophysikalische Untersuchungen können bei der Erkundung, Errichtung und Überwachung von Erdwärmesonden sinnvoll eingesetzt werden. Die Erdwärmesonde hat sich als häufigster Anlagentyp durchgesetzt. Erdwärmesonden werden zwischen 50 und 200 Meter senkrecht abgeteuft und liefern ein konstantes Temperaturniveau. In die Bohrungen werden zumeist Doppel-U-Rohre aus Kunststoff installiert. Diese sind mit einer Wärmeträgerflüssigkeit, normalerweise Wasser mit einem Frostschutzmittel, gefüllt. Diese Flüssigkeit zirkuliert und nimmt die Wärme aus dem Erdreich auf und transportiert sie zur Wärmepumpe. Mit dieser Methode können nicht nur Einfamilienhäuser, sondern auch Büro-, Gewerbebauten, ganze Wohnanlagen und komplette Wohngebiete versorgt werden.

Das thermische Potenzial wird aus der gespeicherten Wärmemenge abgeschätzt, die sich aus der Wärmekapazität und der ausbeutbaren Temperaturdifferenz errechnen lässt (z.B. Hänel & Staroste 1988, Kayser 1999, Kleinschmidt & Wiese 1997). Dieses Verfahren ist für den oberflächennahen Bereich völlig unbefriedigend, da bisher zur Projektierung kleinerer Anlagen nur mittlere Erfahrungswerte benutzt werden, die spezifische Wärmekapazität aber um einen Faktor von weit mehr als 10 variieren kann. Hinzu kommt, dass bei diesem Verfahren nur der Wärmehalt, nicht aber die thermische Leistung abschätzbar ist. Die thermische Leistung ist aber notwendig, um eine geothermische Anlage planen zu können. Zu diesem Zweck müssen zusätzlich die thermischen Leitfähigkeiten bekannt sein, die ebenfalls materialabhängig sind und bei lockerem Untergrund sowie bei porösem Festgestein von der Wassersättigung erheblich beeinflusst werden. Die genannten zahlreichen Einflussfaktoren erfordern einen multidisziplinären Ansatz unter Einbeziehung von petrophysikalischen Daten und geologischen Informationen.

Um eine geothermische Anlage technisch und wirtschaftlich auszulegen, ist es notwendig, die thermophysikalischen und petrophysikalischen Eigenschaften des Standortes zu kennen.

Die Qualitätssicherung von Geothermieanlagen gewinnt zunehmend an Bedeutung.

Hierzu können bohrlochgeophysikalische Untersuchungen zukünftig wertvolle Informationen liefern.

Die Grundlage aller Arbeiten bietet die aus dem Brunnen- und Messstellenbau verbindliche DVGW Richtlinie W 110.

1.) Bohrlochgeophysikalische Messungen bei der Erkundung und Errichtung von Erdwärmesonden

Bohrlochgeophysikalische Untersuchungen beziehen sich auf die Quelle der geothermischen Energienutzung, den **geologischen** Untergrund. Das Erdreich stellt den Speicher dar, dem die Wärme durch die Sonde entzogen wird. Dabei werden statische Wärmevorräte abgebaut. Der von unten mit dem Erdwärmestrom von ca. 50 mW/m^2 eingetragene Wärmestrom ist zu gering, um den Wärmeentzug durch die Sonde zu kompensieren. Der von der Erdoberfläche eingetragene Wärmestrom kann zwar von der Größenordnung her deutlich höher sein, jedoch kann sich auf Grund der räumlichen Symmetrie und der begrenzten Wärmeleitfähigkeit des Bodens in typischen Nutzungszeiten von 20 – 30 Jahren kein stationäres Gleichgewicht einstellen. Lediglich der Wärmeeintrag über ausreichend schnell strömendes Grundwasser könnte den Abbau der statischen Wärmevorräte zeitnah kompensieren. Daraus erkennt man wie entscheidend die objektspezifische Betrachtung des Komplexes Boden / Grundwasser für die Bewertung eines oberflächennahen Geothermieprojektes ist.

Die Erkundung des Untergrundes auf die Nutzbarkeit geothermischer Energie ist äußerst aufwendig. Temperaturmessungen in geringen Tiefen sind nur punktuell möglich und ebenso die Bestimmung der thermischen Eigenschaften, die in situ kaum gemessen werden.

Es wird hier eine indirekte Methode vorgeschlagen, die die vorgenannten Nachteile beheben könnte. Statt der thermischen Eigenschaften werden andere petrophysikalische Parameter bestimmt und daraus die thermischen Eigenschaften abgeschätzt. Um diese Korrelation zu

Zur Extrahierung von Wärmeenergie aus dem Untergrund spielen sowohl die Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit als auch die Wärmekapazität der Umgebung eine wichtige Rolle. Diese thermischen Eigenschaften sind in der Regel aus den Gesteinseigenschaften und den Eigenschaften des Wassers zusammengesetzt, das den Porenraum im Untergrund ganz oder teilweise ausfüllt. Daraus ergibt sich, dass der Wassergehalt im Untergrund ein wesentlicher Faktor der Wärmekapazität ist. Bei den thermischen Leitfähigkeiten spielen der Quarz- bzw. Feldspatgehalt die dominierende Rolle und bestimmen die thermischen Leitfähigkeiten (Buntebarth 1992). Die Wärmekapazität wird jedoch im hohen Maße vom Wassergehalt im Porenraum beeinflusst. Die Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens, der mindestens aus zwei Phasen besteht (Festsubstanz und Porenfluid), kann mit der Wiener'schen Mischungsformel theoretisch vorhergesagt und experimentell mit einer Wärmeleitfähigkeitsapparatur überprüft werden.

Zweitens entscheidend ist der Wärmetransport von der Bohrlochwand zur Sonde, das heißt die Betrachtung des Komplexes Geothermiesonde. Hierbei handelt es sich ebenso um Wärmeleitungsvorgänge. Diese sind allerdings in hohem Maße von der verwendeten Sondengeometrie abhängig. So stellen sich in der Regel komplexe Wärmeströmungen zwischen den einzelnen Rohren (zwischen aufwärts- und abwärtsströmender Flüssigkeit) in der Sonde ein. Zu beachten ist weiterhin das sich aus der konkreten Geometrie der Sonde, dem Sondenmaterial, dem Verfüllmaterial und den thermischen Anschluss des Verfüllmaterials an das Gebirge ringsum ein zusätzlicher thermischer Widerstand ergibt. Dieser führt dazu, dass bei einem Wärmefluss vom Boden bis zur Sonde eine zusätzliche Temperaturdifferenz zu berücksichtigen ist. Hierbei spielen unsere vorgesehenen Betrachtungen zur Qualitätssicherung bei der Errichtung der Sonden eine besondere Rolle.

Im Ergebnis von umfassenden petrophysikalischen Untersuchungen und der sich anschließenden interdisziplinären Auswertung und Interpretation der Labordaten durch die Verbundpartner soll festgelegt werden, welche konventionellen geophysikalischen Bohrloch-Messverfahren relevant sind, um aus den Messdaten Wärmeleitfähigkeiten und andere für geothermische Untersuchungen relevante Parameter zu bestimmen.

Zunächst ist es wichtig zu wissen, welche Gesteinseigenschaften die thermische Nutzung des Untergrundes entscheidend beeinflussen:

Bezeichnung	Einheit	Bemerkung	Methode
Wärmestromdichte	W/m ²	Wärmequelle	-
Wärmeleitfähigkeit	W/(m,K)	Proportionalitätsfaktor	Laborativ, TRT
Temperaturgradient	K/m	Geotherm. Tiefenstufe	T Log
Wärmekapazität	KJ/m ³	Wärmespeichervermögen	Laborativ, TRT
Temperaturleitfähigkeit	m ² /s	Instationärer Wärmetransport	-
Durchlässigkeitsbeiwert	m/s	Grundwasserverhältnisse	Pumpversuch, TFL

Die dargestellten Parameter dienen einzeln oder im Zusammenspiel als Eingangsgrößen in analytischen Berechnungsvorschriften und numerischen Simulationsprogrammen. Zielstellung ist die Ableitung dieser Größen aus Standardmessverfahren, die einfach und kostengünstig in Bohrungen anwendbar sind. Ein solcher Messverfahrenskomplex kann bestehen aus:

(in Abhängigkeit vom Bohrverfahren)

- Messung der natürlichen Gammastrahlung (Gammaray)
- Elektrisches Widerstandsverfahren (Induktionslog)
- Dichtemessung (Gamma-Gamma)
- Porositätsmessung (Neutron-Neutron)
- Temperaturmessung / Leitfähigkeitsmessung
- Resistivimetrie (Kf Wert Bestimmung, Fließgeschwindigkeiten)
- Messung des Bohrlochverlaufs in Richtung und Neigung insbesondere bei Sondenfeldern

Messung der natürlichen Gammastrahlung

- ▶ lithologische Schichtgliederung

Elektrisches Widerstandsverfahren

- ▶ lithologische Schichtgliederung, Wassersättigung, Klüftigkeit

Dichtemessung (Gamma-Gamma)

- ▶ lithologische Schichtgliederung

Porositätsmessung (Neutron-Neutron)

- ▶ lithologische Schichtgliederung, Wassersättigung,

Temperaturmessung

► Temperaturmessungen

Temperaturmessungen in Bohrlöchern dienen nicht nur dazu Auskunft über die Temperaturverteilung im Untergrund zu erhalten, sondern können auch folgende Informationen liefern :

- Detektion von Wassereintrittsstellen und damit verbunden:
Detektion von Klüften oder hochpermeablen Zonen.
- Bei Temperaturmessungen während eines Pumpversuchs:
Lage von Zuflusshorizonten in Kombination mit Leitfähigkeitsmessungen
- Verwendung der Temperatur zur Korrektur temperaturabhängiger Parameter, wie Dichte, Salinität und elektrische Leitfähigkeit der Bohrlochflüssigkeit.

Resistivimetrie, Tracer Fluid Logging

► kf Wert Bestimmung, Fließgeschwindigkeiten

Messung des Bohrlochverlaufes in Richtung und Neigung

Die Kenntnis der Lage des Bohrlochverlaufes im Raum ist insbesondere bei Sondenfeldern wichtig da die Abstände der Bohrungen meist nicht sehr groß sind und eine gegenseitige Beeinflussung bei ungünstigem Bohrlochverlauf bis in Teufen von 100 m nicht ausgeschlossen werden kann.

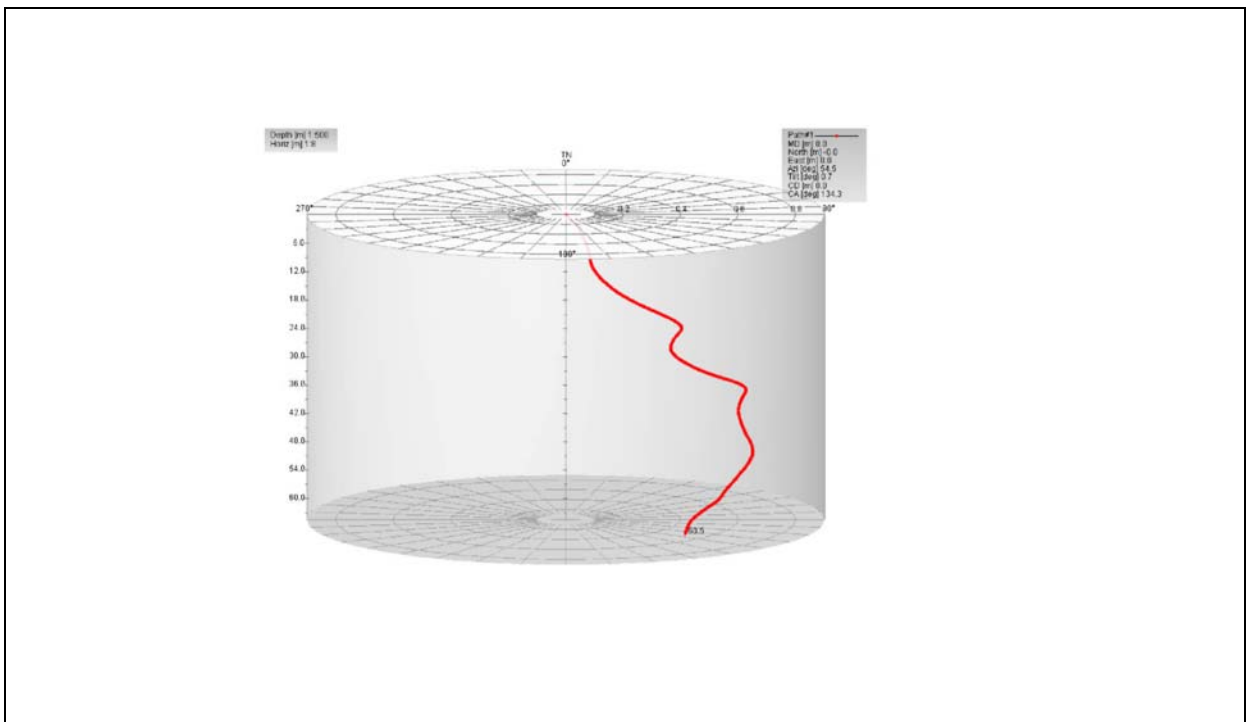


Abbildung: Beispiel der Darstellung des Verlaufes der Bohrung im Raum

2.) Bohrlochgeophysikalische Messungen zur Qualitätssicherung bei neu errichteten Erdwärmesonden

Neben dem Nachweis über die Qualität der Ankopplung der Sonde an das Gebirge, ist eine Kontrollmöglichkeit besonders für den Schutz des Grundwassers von Bedeutung, da hier ein Nachweis erbracht werden kann, dass die zuvor über die Bohrung gekoppelten Grundwasserleiter durch die eingebrachte Zementation wieder getrennt sind. Besonders in hydrogeologisch exponierten Bereichen (Trinkwasserschutzzonen) ist der Nachweis ein wichtiges Instrumentarium bei der Entscheidung zur Genehmigungsfähigkeit der Erdwärmesonden.

Bohrlochgeophysikalische Messsonden die für die Doppel U Rohre ab DN 32 verwendbar sind, sind größtenteils noch in Entwicklung bzw. scheitern an dem meist durch den Einbau und die Bauart (Einbau von der Rolle) stark verdrehten Verlauf im Bohrloch. Es konnten bisher nur wenige Messungen bis zur Endteufe durchgeführt werden.

Folgende Messverfahren die bereits aus dem Brunnen- und Messstellenbau bekannt sind versprechen in modifizierter Form einen erfolgreichen Nachweis der qualitätsgerechten Verfüllung in Geothermiesonden:

- **Gammaray Messungen**
(Suspension muß dotiert sein mit hochstrahlendem Zirkonsand, ähnlich wie Quellon WP, Troptogel C u.a.)
- **Suszeptibilitätsmessung**
(Suspension muß dotiert sein mit magnetisierbarem Material, ähnlich wie Quellon HD u.ä.)
- **Gamma-Gamma-Dichte Messung**
- **Neutron-Neutron Messung**
- **Temperaturmessung**
- **Ultraschall Messverfahren**

sowie der

- **Thermal Response Test.**

Bei dem Einsatz der Messverfahren ist der Sondentyp der Geothermiesonde zu berücksichtigen (Doppel U oder Koaxialsonden bzw. andere Bauarten)