

## Extrem dünne Bohrlochsonden zum Einsatz in oberflächennahen Erdwärmesonden

Dipl. Geophys. Achim Rübel und Dipl. Geol. Klaus Brauch

DMT GmbH & Co. KG, Essen / terratec geoservices, Heitersheim

**Keywords:** Qualitätssicherung, Oberflächennahe Geothermie, Messungen in dünnen Erdwärmesonden, Gamma, Magnetfeld und Verlaufsmessungen

### Zusammenfassung

Zunehmend werden Erdwärmesonden zum Heizen einzelner Objekte eingesetzt. Beim Erstellen von Erdwärmesensoren sollte deshalb eine ausreichende Qualitätskontrolle erfolgen, um die Leistungsfähigkeit und die Sicherheit der Sonden zu gewährleisten. Außerdem werden oft Bohrungen ohne ausreichende geologische oder bergtechnische Voruntersuchungen in Risikobereichen abgeteuft. Treten dann Schäden auf, müssen schnell und sicher genaue Untersuchungen über Lage, Zustand und Fehlstellen in den Bohrungen oder den oft schon eingebauten Erdwärmesonden erfolgen. Dazu sind sehr kleine und flexible Messgeräte erforderlich, mit denen in den Sonden gemessen werden kann. Hier werden zwei Geräte vorgestellt, die nur 18 mm Durchmesser haben.

### 1. Einleitung

Die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme zur Beheizung einzelner Gebäude oder Gebäudekomplexe gewinnt zunehmend an Bedeutung. So ist zum Beispiel in NRW praktisch das ganze Land dafür geeignet Energie aus flachen Geothermie Bohrungen zu gewinnen.

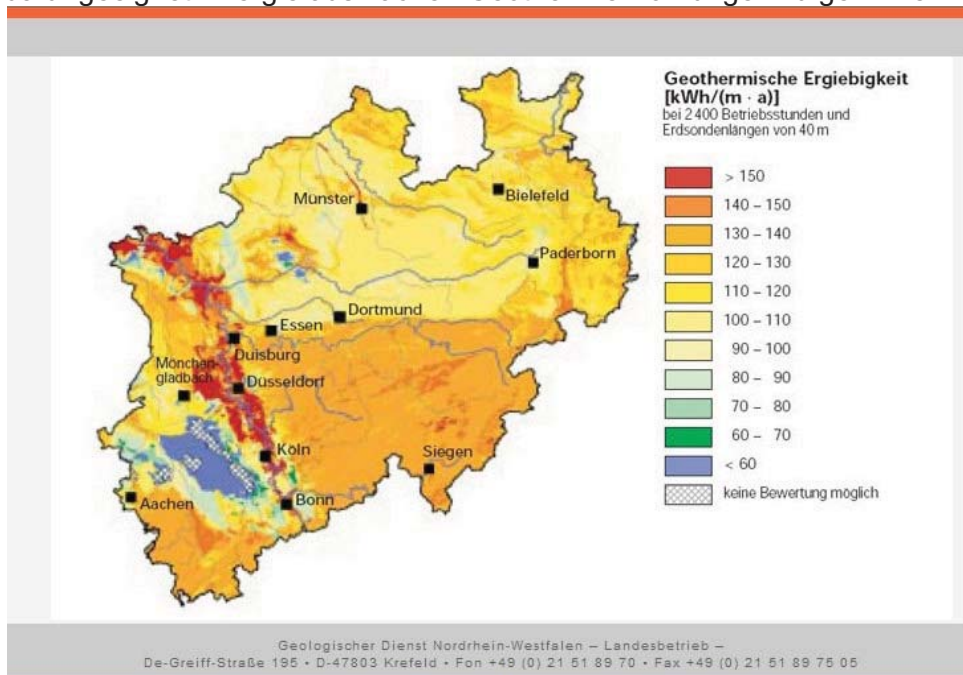


Abb. 1: Geothermische Ergiebigkeit in NRW, Karte des Geologischen Dienstes NRW.

Abbildung 1 zeigt eine Karte, die der Geologische Dienst des Landes NRW auf seiner Internetseite veröffentlicht hat. Diese Karte zeigt, dass in weiten Teilen des Landes mit flachen Bohrungen von maximal 100 m Tiefe ausreichend Heizenergie zur Verfügung steht. Die Karte zeigt aber auch, dass der Teil Nordrhein-Westfalens, der wesentlich durch Bergbauaktivitäten geprägt ist, genutzt werden kann – und genutzt wird. Ohne ausreichende bergtechnische Information können sich Unfälle wie der in Kamen im Juli dieses Jahres leicht wiederholen. Vorinformation und rechtzeitige geophysikalische Messungen hätten diesen Unfall verhindern können.

Ein Beispiel, bei dem geologische Probleme im Vordergrund stehen, ist Staufen (s. Abbildung 2), wo wahrscheinlich undichte Sondenbohrungen zum Aufquellen von Anhydrit geführt haben und einen Teil der historischen Altstadt akut gefährden.



Abb. 2: Risse in einem Haus in der Altstadt von Staufen BW. Die Risse werden durch Bodenhebungen verursacht, die unmittelbar im Zusammenhang mit Geothermie Bohrungen stehen.

Immer dann, wenn Ereignisse wie die oben genannten in der Presse auftauchen, wird nach geophysikalischen Messungen verlangt, die helfen die Ursachen aufzuklären oder die erforderliche Sanierung zu kontrollieren. Derartige Messungen im Rahmen einer umfassenden Qualitätssicherung im Vorfeld könnten wesentlich Kosten sparen und Schäden minimieren.

Derzeit stehen nur sehr eingeschränkt Messsonden zur Verfügung, die in die Erdwärmesonden selbst passen und die erforderlichen Messgrößen liefern.

Für größere Projekte, in denen nicht nur einzelne Bohrungen, sondern ganze Felder abgebohrt werden, werden im Regelfall vor den Baumaßnahmen Modellrechnungen durchgeführt, die einerseits die vorhandene Kapazität (s. Abb. 1) und andererseits die erforderliche Leistung und die

Anzahl der benötigten Sonden/Bohrungen ermitteln. Dabei wird von einer festen Geometrie ausgegangen und von senkrechten Bohrungen, in denen die Sonden fest und mit perfektem Kontakt zur Formation eingebaut werden. Für die erforderliche Qualitätskontrolle stehen wiederum kaum Messgeräte zur Verfügung, weshalb sie oft unterbleibt und entweder Überkapazitäten eingeplant oder eine verminderte Leistung in Kauf genommen werden muss.

## 2. Voruntersuchungen

In einigen Forschungsprojekten wurden Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden durchgeführt. Im Mittelpunkt stehen dabei eher Untersuchungen zum Temperaturfeld (z.B. Uni Karlsruhe, Thermal Response Tests) oder dem Stromverbrauch und der Leistungsfähigkeit der Wärmepumpen sowie den Voraussagen über die Wärmekapazität.

In einem Forschungsprojekt, das von der Universität Paderborn, Institut für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrstuhl für Nachhaltige Energiekonzepte, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Voss koordiniert wurde, wurden zwischen 2005 und 2007 grundlegende Untersuchungen zum Bau und Einsatz dünner Sonden durchgeführt. In diesem Projekt wurden Sonden, Messmöglichkeiten, Dimensionen von Messsonden und Einsatzgrenzen untersucht. Gebaut wurden schließlich ein Teststand sowie eine Druck/Temperatursonde und eine Suszibilitätssonde (MAL-Sonde). Die Druck/Temperatursonde diente in erster Linie der Teufenbestimmung, die Suszibilitätssonde der Qualitätskontrolle der Dämmung und des Verpressmaterials. Die Sonden wurden mit Durchmessern von 22 mm aus Einzelkomponenten aufgebaut, von denen kein Teil länger als 90mm ist. Die Komponenten sind mit flexiblen Schläuchen verbunden.



Abb.3: Konventionelle Knicksonde, wie sie in Versorgungsröhren in Schächten eingesetzt wird. Die Sonde besteht aus einem Gewichtsteil, der Datenübertragung und den Sensoreinheiten. Der Sondendurchmesser beträgt 40mm, die Komponenten sind maximal 35 cm lang, die Verbindung der Module besteht aus flexiblen Hochdruckelementen, der maximale Einsatzdruck liegt über 200 bar.

Die Suszibilitätssonde ist auf Verpressmaterial angewiesen, dass sich vom Hintergrund (Formation) abhebt, oder auf magnetisch dotierte Verpressmaterialien.

In dem Projekt wurde hervorgehoben, dass die Sonden im Regelfall – auch in einer wirklich senkrechten Bohrung - nicht senkrecht eingebaut werden, da die Schläuche flexibel sind und sie mehr oder weniger in Schlangenlinien in der Bohrung liegen. Um in den Sonden messen zu können, müssen die Messgeräte sehr klein sein. und wenn das nicht möglich ist, müssen sie in

Einzelkomponenten zerlegt werden, die flexibel miteinander verbunden sind. Je dünner die Sonden sind, desto länger können sie sein. Dieses Konzept wird immer dann verwendet, wenn es „um die Ecke“ gehen muss. Abbildung 3 zeigt eine Sonde, wie sie von DMT in Versorgungsrohren in Bergwerksschächten eingesetzt wird, die Krümmungen bis 90° aufweisen können.

In dem Forschungsprojekt wurde auch die Möglichkeit untersucht in U-Sonden zu messen und in bereits bestehenden Installationen. Diese Untersuchungen beeinflussten den erforderlichen Mindestdurchmesser und die Länge der Messsonden erheblich. Letztlich muss aber ausgeschlossen werden, dass in U-Sonden durchgängig gemessen werden kann.

### 3. Bau und Einsatz extrem dünner Bohrlochsonden

#### 3.1 Anforderungen an diese Sonden

Die Bohrlochmesssonden müssen für den Einsatz in dünnen Wärmesonden mit Innendurchmessern von ca. 1" (25,4 mm) geeignet sein. Deshalb muss der Durchmesser von 22 mm (s.o. Sonden der Uni) deutlich unterschritten werden. Maximal 3 mm Spiel sind zu wenig, da immer von Schwankungen der Materialdicke und „Schlangelinien“ beim Einbau ausgegangen werden muss. Miniaturisierung ist in diesem Zusammenhang nicht unbedingt das größte Problem. Abbildung 4 zeigt einen Sensor der Firma Honeywell, der Neigungs- und Richtungsinformationen liefert, im Vergleich zu einer kleinen amerikanischen Münze.



Abb. 4: Neigungs- und Richtungssensor der Firma Honeywell, wie er zum Beispiel auch in Bohrlochsonden bei DMT eingesetzt wird.

Die Bohrlochsonden sollten mit konventionellen Datenübertragungen ausgestattet werden, um mit vorhandenen Systemen kompatibel zu sein. Außerdem müssen die Fertigungskosten in einer vernünftigen Relation zu den erzielbaren Messpreisen stehen.

Es müssen Sensoren eingebaut werden, die die wesentlichen Anforderungen der Kunden erfüllen. Eine wichtige Anforderung ist die Ermittlung der genauen Lage der Erdwärmesonden. Dies dient der Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung, vor allem im Bereich von Sondenfeldern. Bei Einzelbohrungen in Gefährdungsbereichen (s. oben) ist die Lagekontrolle auf jeden Fall erforderlich, um Gefahren rechtzeitig zu erkennen und eventuell erforderliche Maßnahmen rechtzeitig und kostengünstig durchzuführen.

Auf die komplizierte Teufenmessung durch Drucksonden kann in der Bohrlochmessung verzichtet werden, da Standardsysteme Teufen mit ausreichender Genauigkeit (bis 0,2 mm) liefern.

Eine weitere Hauptanforderung ist die Kontrolle der Verpressmaterialien. Dies kann z.B. über die magnetische Suszeptibilität oder über konventionelle Gamma Messungen erfolgen, da im Regelfall mit Tonsuspensionen gearbeitet wird. Magnetisch dotierte Materialien lassen sich mit einer Magnetfeldmessung leicht erfassen. Für die Kontrolle der Verpressung sind noch andere Methoden denkbar – zum Beispiel ein Cement Bond Log oder ein Induction Log, die aber an der ersten Forderung (Miniaturisierung) scheitern. Beide Bohrlochsonden könnten miniaturisiert werden, sind dann aber aus physikalischen Gründen nicht mehr geeignet die Aufgabe zu erfüllen.

- Anforderungen :**
1. Durchmesser maximal 18 mm
  2. Maximale Länge der Einzelkomponenten 20 cm
  3. Datenübertragung mit Standardelementen (Robertson 6 Kanal)
  4. Betrieb mit konventionellen Logging Kabeln (1 oder 4 Ader)
  5. Konventionelle Kabelköpfe/Sondenköpfe, die maximal 18 mm Durchmesser aufweisen
  6. Einsatztiefe für alle flachen Bohrungen bis 300 m Tiefe

Der durchgängige Einsatz in U-Sonden oder in Anbauteilen, die enge Knickwinkel oder Kurvenradien ausweisen, wird nicht angestrebt. Die Bohrlochsonden sollen wesentlich in den eigentlichen Erdwärmesonden eingesetzt werden, und in U-Profilen sollte von beiden Seiten ein Zugang möglich sein.

### **3.2 Aufbau der Sonden**

Um die oben genannten Anforderungen zu erfüllen, haben wir zwei Bohrlochsonden gebaut. Eine Bohrlochverlaufs-sonde, die eine 3-Komponentenmessung des Magnetfeldes beinhaltet, und eine Gamma-Temperatursonde.

Die Verlaufs-Sonde misst in 3 Achsen die Neigung und das Magnetfeld und berechnet daraus die Neigung der Sonde (Tilt) und die Richtung (Azimut), in der die Bohrlochsonde geneigt ist. Mit diesen Angaben lässt sich mit Standardtools oder einer Auswertesoftware für Bohrlochmessungen der Bohrlochverlauf anhand der Lage der Sonde berechnen und in Standardformaten (Bulls Eye s. Abb. 8, Schnitte, 3D) darstellen. Diese Sonde kann weitestgehend aus Standardteilen gebaut werden.

Die Gamma-/Temperatursonde wird ebenfalls aus Standardteilen aufgebaut. Wegen der aufwändigeren Stromversorgung für den Gamma Sensor muss sie allerdings aus Modulen aufgebaut werden. Die Temperaturmessung kann mit hochgenauen Temperatursensoren (Genauigkeit  $0,1^\circ$  oder  $0,01^\circ$  je nach Bauform und Messbereich) realisiert werden, wie sie im Bereich von Bohrlochmessungen üblich sind.

Beide Sonden verfügen über eine Standarddatenübertragung (Robertson 6 Kanal), die von den bei DMT und terratec verwendeten Aufzeichnungseinheiten verstanden wird. Die Datenübertragung erfolgt digital, so dass nur Masse und ein Kabel benötigt werden. Damit können beide Sonden an den normalen Bohrloch Messwagen betrieben werden – das heißt es gibt keine Einschränkungen der Kabellänge. Theoretisch sind 2500 m Tiefe möglich, auch wenn die Sonden für diese Tiefen weder die Temperatur- noch die Druckbedingungen erfüllen.

Bei den Kabelköpfen musste allerdings ein Kompromiss eingegangen werden, da die meisten Standardkabelköpfe Durchmesser von 20 bis 25 mm aufweisen. Es wurden spezielle Köpfe entwickelt und an Monokabelwinden montiert. Damit wurde ein tragbares System aufgebaut, das auch in unwegsamem Gelände und in beengten Verhältnissen eingesetzt werden kann. Abbildung 5 zeigt Winde und Sonde in einem PKW Kombi. Über einen einfachen Adapter lassen sich die Sonden an unseren Go-4 Köpfen betreiben, wenn es die Durchmesser der Wärmesonden erlauben.



Abb. 5: Diese Abbildung zeigt die Bohrlochverlaufssonde und die verwendete Winde bei einer Testmessung. Nicht auf dem Bild ist der ebenfalls erforderliche Laptop zur Datenaufzeichnung. Die gesamte Ausrüstung kann leicht auch an schwer unzugängliche Stellen gebracht werden.

### 3.3 Die Bohrlochverlaufssonde

Abbildung 6 zeigt die Bohrlochverlaufssonde und als Referenz einen Kugelschreiber. Die Sonde hat einen Durchmesser von 18 mm und keine Komponente ist länger als 20 cm. Die eigentliche Sonde ist der kupferfarbene Teil links (ca. 18 cm lang, Gewicht ca. 130 g), dann folgt eine flexible Kupplung (ca. 15 cm) mit dem Sondenkopf. der Rest auf der rechten Seite ist der Kabelkopf.



Abb. 6: Diese Abbildung zeigt die Bohrlochverlaufssonde. Als Vergleich ist ein Kugelschreiber auf der Abbildung zu sehen. Die Sonde erfüllt alle oben aufgestellten Anforderungen – Durchmesser 18 mm, Standardelemente, Modullänge maximal 20 cm.

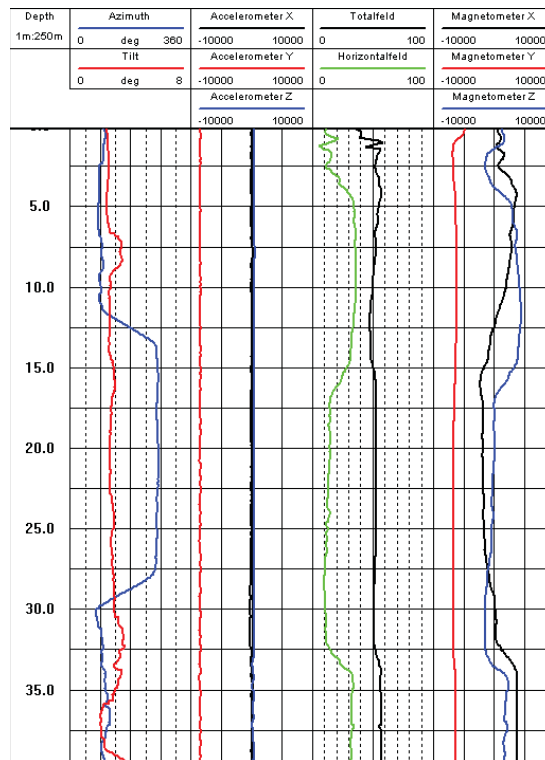


Abb. 7: Messbeispiel der Verlaufs/Magnetfeldsonde. Die Abbildung zeigt alle Messgrößen, die direkt gemessen werden (Magnetometer und Accelerometer Daten) und die aus den Daten abgeleitet (Totalfeld und Horizontalfeld) oder berechnet werden können (Tilt, Azimut). Die Darstellung und die Berechnungen erfolgen mit Standardsoftware.

Das Messbeispiel wurde in der gleichen Bohrung aufgenommen wie die Gamma/Temperaturdaten (s. unten). Die Bohrung hat einen Durchmesser von ca. 110 mm und eine leichte Abweichung aus der Vertikalen (ca. 1° - 2°). Da die Sonde sehr klein und leicht ist und sie an der Bohrlochwand entlang läuft, müssen die Neigungsdaten gefiltert werden. Wegen der geringen Neigung sind Sprünge im Azimut normal. Die Sonde liefert im Rahmen der Messgenauigkeit die gleichen Werte wie die Vergleichssonde (BHTV Sonde mit eingebauter Orientierung).

Abbildung 8 zeigt den Bohrlochverlauf in einer Bulls Eye Darstellung. Würde es sich hier um eine Erdwärmesonde handeln, könnte man Probleme in den beiden „Knicke“ erwarten. Die absoluten Zahlen zeigen allerdings, dass die Knicke sich über einen größeren Abschnitt erstrecken und einen großen Biegeradius aufweisen (ca. 5 cm Abweichung auf ca. 3 m Bohrlochlänge).

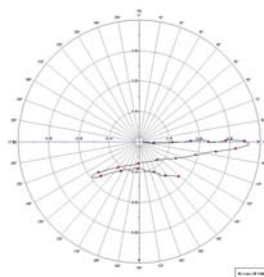


Abb. 8: Bulls Eye Darstellung des Bohrlochverlaufs. Wegen der geringen Neigung der Bohrung sind spontane, scheinbare Richtungswechsel häufig.

### 3.3 Die Gamma-Temperatursonde



Abb. 9: Diese Abbildung zeigt die Gamma-Temperatur Sonde mit den Sensorteilen für Gamma und Temperatur, den Kupplungen und dem Kabelkopf. Als Vergleichsmaßstab wurde wieder ein Kugelschreiber verwendet.

Die Gamma-Temperatursonde ist etwas länger als die Verlaufs-Magnetfeldsonde. Für die Gamma Sonde wird eine Hochspannungsversorgung benötigt, und die muss auch im Sondenkörper – oder einer eigenen Sektion in der Sonde - untergebracht werden. Wäre sie mit dem Gamma Sensor im gleichen Gehäuse, so wäre das Gehäuse zu lang. Aus diesem Grund wurde die Sonde in drei Segmente (Gamma, Temperatur, Hochspannung) aufgeteilt, die mit flexiblen Kupplungen verbunden sind.

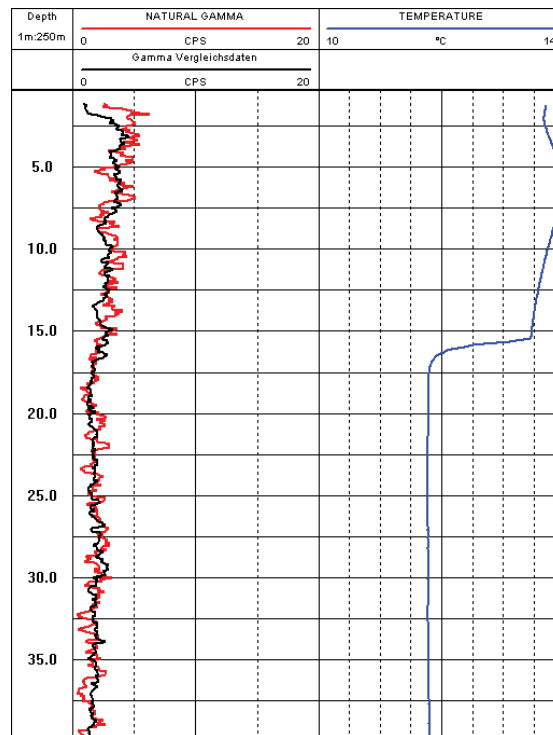


Abb. 10: Messbeispiel der Gamma- Temperatursonde. Die Testmessung (rot) mit der neuen Sonde zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Vergleichsmessung (schwarze Spur). Im Temperatur Log (blau) ist der Übergang Luft Wasser klar zu erkennen.

Abbildung 10 zeigt eine Messung, die in einem Testbohrloch mit ca. 110 mm Durchmesser in Grobsand/Schotter durchgeführt wurde. Die natürliche Gamma Strahlung ist dort extrem niedrig. Ziel der Tests war es Vergleichsdaten mit konventionellen Sonden zu erhalten. Daher war eine

Messung in Erdwärmesonden nicht möglich. Trotz der extrem niedrigen Gamma Werte zeigten die Gamma Werte, die mit der dünnen Sonde aufgezeichnet wurden (rot), eine sehr gute Übereinstimmung mit der normalen Gamma Sonde (schwarz). Der größere Kristall, der in der normalen Gamma Sonde verwendet wurde; liefert ein „ruhigeres“ Signal. Trotzdem zeigt der Test, dass der sehr kleine Kristall in der neuen Sonde ein ausreichend stabiles Signal liefert – auch bei extrem niedrigen Gamma Werten. Auf eine stärkere Filterung wurde zugunsten der Auflösung verzichtet.

#### **4. Endergebnis -Ausblick**

Mit den hier vorgestellten Sonden wird die Möglichkeit geschaffen die Qualitätssicherung für den Einbau von Erdwärmesonden wesentlich zu verbessern. Die Sonden können in Erdwärmesonden und Bohrungen mit einem Durchmesser von 25 mm eingesetzt werden. Der Durchmesser der Messsonden beträgt lediglich 18 mm. Die Sonden können mit „Standardausrüstung“ für Bohrlochmessungen betrieben und die Ergebnisse mit Standardsoftware ausgewertet und bearbeitet werden.

Nachdem mit dem Bau dieser Sonden einige wesentliche Probleme für den Einsatz von Bohrlochmesssonden mit Standardgerät in extrem dünnen Bohrungen gelöst wurden, ist eine Weiterentwicklung unausweichlich. Nachdem man Gamma Sonden bauen kann, sollten auch Dichtesonden kein Problem sein, falls der Einsatz radioaktiver Strahler in Erdwärmesonden als notwendig angesehen wird.

Neben den von uns gebauten Sonden und der im oben genannten Forschungsprojekt entwickelten Suszeptibilitätssonde werden sicher zukünftig noch weitere Sonden auf dem Markt erscheinen.

Auch die Entwicklung von Verpressmaterialien, die auf den Einsatz in Erdwärmesonden optimiert sind, wird sicherlich weitergehen, so dass Sonden, Messgrößen und Verpressmaterial optimal aufeinander abgestimmt werden können. So sollte es z.B. möglich sein ähnliche magnetische Zusätze, wie sie im Brunnenbau üblich sind, auch hier zu verwenden. Das wird das Erkennen von Fehlstellen, Thermischen Kurzschlüssen etc. sicher erleichtern.

#### **Quellenangaben**

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt: „*Qualitätssicherung von Erdwärmesonden: Entwicklung von Methoden zur Überprüfung bestehender Anlagen*“, August 2007, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Förderkennzeichen 0327372A

Postadresse: DMT GmbH&Co. KG, Exploration&Geosurvey, Am Technologiepark 1, 45307 Essen  
terrateg geoservices, Schillerstraße 3, 79423 Heitersheim

E-Mail-Adresse: [hans-joachim.ruebel@dmr.de](mailto:hans-joachim.ruebel@dmr.de); [brauch@terrateg-geoservices.com](mailto:brauch@terrateg-geoservices.com)