



## Nachweis magnetisch markierter Baustoffe im Ringraum von Erdwärmesonden – Möglichkeiten und Grenzen des Magnetik-Logs

Welche Informationen zur Qualität von markierten Ringraumverfüllungen lassen sich allein aus Messungen der magnetischen Suszeptibilität ableiten? Anhand von Modellmessungen und Praxisbeispielen werden die Grundprinzipien des Messverfahrens und die Aussagekraft der Messdaten illustriert.

B. WITTE/SCHWENK-ZEMENT KG

**Die Qualitätskontrolle von Erdwärmesonden** ist schon seit Jahren ein viel diskutiertes Thema. Doch warum wird für Erdwärmesonden die Möglichkeit einer Qualitätskontrolle mit hoher Ausagesicherheit benötigt? Die Antwort ist einfach: Bauwerke im Grundwasser dürfen generell keine nachteiligen Veränderungen der Qualität des Grundwassers zur Folge haben. Aus diesem Grund ist eine fachgerechte Ausführung der Bauwerke in jedem Fall nachzuweisen. Die Schwierigkeit der Problematik wird gerade bei innerstädtischen Grundwassermessstellen, welche nach den hohen Anforderungen des Arbeitsblattes W 121 des DVGW-Regelwerkes [1] zu errichten sind und mit den im Arbeitsblatt W 110 [2] beschriebenen Verfahren kontrolliert werden, deutlich. Diese Messstellen sind in der Regel von einer Vielzahl von Erdwärmesonden umgeben. Mit welcher Rechtfertigung ist hier im Zweifelsfall eine Sanierung oder ein fachgerechter Rückbau

der Grundwassermessstelle zu fordern, während die unkontrollierbaren Erdwärmebohrungen im direkten Umfeld ein dauerhaftes Existenzrecht haben?

Aus Sicht der Autoren ist die Entwicklung von Kontrollmöglichkeiten für Erdwärmesonden daher die Voraussetzung für die Zukunftsfähigkeit der Nutzung der oberflächennahen Geothermie.

### Ringraumkontrollen in Erdwärmesonden

Die meist installierten Einfach- oder Doppel-U-Sonden sind aufgrund ihrer geringen Innendurchmesser für herkömmliche Bohrlochmesssonden nicht befahrbar. Aus diesem Grund gab es in der Vergangenheit eine ganze Reihe von Versuchen, Messtechnik soweit zu miniaturisieren, dass eine Befahrung der Erdwärmesonden möglich wird. Dabei entstanden Prototypen, die

jedoch nicht in Serie hergestellt und vertrieben wurden. Da jeweils nur ein oder zwei Bohrlochmessverfahren, die für sich allein genommen eine geringe Aussagekraft haben, realisiert wurden, waren all diese Initiativen bisher nicht ausreichend erfolgreich, um Qualitätskontrollen von Erdwärmesonden in der Praxis zu etablieren. Der Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben EWSPLUS [3] liefert einen weitgehend vollständigen Überblick zu den Möglichkeiten der bis Ende 2012 zur Verfügung stehenden einsatzfähigen Verfahren. In der bbr wurden die Möglichkeiten der Geophysik zur Qualitätskontrolle von Erdwärmeh Bohrungen im Artikel „Geothermie und Schutz des Grundwassers – ein Widerspruch?“ 2012 [4] bereits ausführlicher diskutiert. Demnach ist es zurzeit praktisch nicht möglich, eine fachgerechte Hinterfüllung von bereits existierenden Erdwärmesonden sicher nachzuweisen.

### Neuentwicklung Magnetik-Log für Erdwärmesonden

Ein Weg zum Nachweis von Verfüllbaustoffen ist der Einsatz von Markierungen. Ziel dieser Markierung ist es, dem Baustoff eine durch die Rohrwand hindurch messbare Eigenschaft zu geben. Nach diesem Prinzip werden Baustoffe mit erhöhter Gammaeigenstrahlung z. B. bei sekundären Ringraumabdichtungen im Brunnenbau eingesetzt. Da die Gammastrahlung auch Rohrwandungen durchdringt, ist so die Verteilung des Verfüllmaterials im Ringraum gut nachweisbar. Auch in Erdwärmesonden wurden bereits Versuche mit gammaaktiven Verfüllmaterialien durchgeführt und die Ergebnisse in der bbr veröffentlicht [5].

Weiterhin werden mit Magnetit versetzte und damit magnetisch markierte Ton-Pellets zur Abdichtung von Ringräumen eingesetzt. Damit wird z. B. im Bereich von im Gebirge anstehenden Schluffen, Tonen bzw. in Tonsteinen eine eindeutige Nachweisbarkeit des Tonsperrenmaterials erreicht.

Durch die SCHWENK-ZEMENT KG wurde ein magnetisch markierter Füllbinder entwickelt, welcher sich zur Ringraumverfüllung von Erdwärmesonden eignet und im Vergleich mit dem zu erwartenden, natürlichen Hintergrund eine deutlich erhöhte magnetische Suszeptibilität aufweist. Damit steht ein Baustoff zur Verfügung, dessen Vorhandensein mit dem klassischen Magnetik-Log nachgewiesen werden kann.

In Zusammenarbeit mit der Bohrlochmessung - Storkow wurde von der SENSYS GmbH das dazu notwendige Messgerät SSM1 entwickelt (Abb. 1). Es kann in Erdwärmesonden bis in eine Tiefe von 500 m zum Einsatz kommen. Hiermit können magnetisch markierte Hinterfüllbaustoffe nachgewiesen werden. Damit steht nun zum einen ein geophysikalisches Messsystem zur Verfügung, das aufgrund seiner kompakten Bauweise (Außenmaß: 16x78 mm) in kleinkalibrigen Erdwärmesonden problemlos eingesetzt werden kann. Zum anderen sind auch die dazu notwendigen markierten Baustoffe verfügbar. Aufgrund des einfachen Handlings hat sich das Magnetik-Log daher bereits in der Praxis etabliert. Es wird z. B. zur automatischen Überwachung des Abdichtungsvorganges im Bohrloch in Baden-Württemberg empfohlen und angewendet. Dabei wird die Ober-



Abb. 1 – Von der SENSYS GmbH neu entwickelte Messsonde mit Kabeltrommel und Teufenzählwerk

kante des Baustoffes während der Verfüllung beobachtet und protokolliert. Da zusätzlich die Verpressmenge erfasst wird, ist eine Kontrolle der Vorgänge im Bohrloch gegeben. Starke Verluste, welche beispielsweise über offene Klüfte auftreten können, werden so frühzeitig erkannt.

Durch die Bohrlochmessung - Storkow GmbH wurden in der Region Berlin/Brandenburg bereits mehrere Bohrungen kontrolliert. Der Einsatz der Methode beschränkt sich hier jedoch bisher auf einzelne Projekte.

Um eine korrekte Interpretation der Messergebnisse zu ermöglichen, erfolgte im Rahmen einer Bachelorarbeit eine systematische Untersuchung des Messprinzips. Die SCHWENK-ZEMENT KG half beim Bau der dazu benötigten Modelle und stellte die verwendeten Baustoffe (Füllbinder EWM, Füllbinder EWM plus und Magnetit) zur Verfügung. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im Folgenden vorgestellt.

### Aufbau und Messprinzip der SSM1-SONDE

Das wichtigste Element der SENSYS SSM1-Sonde ist ein in Reihe geschalteter Schwingkreis. Dessen Resonanzfrequenz ist von der Magnetisierbarkeit des Materials im Umfeld der Spule des Schwingkreises abhängig. Da die Messung relativ erfolgt, ist es zu Beginn der Messung jeweils notwendig, die „unbeeinflusste“ Resonanzfrequenz, den „Nullwert“ in Luft, zu kompensieren.

Die ausgegebenen Messwerte entsprechen der Änderung der Resonanzfrequenz im Verhältnis zum Nullwert in ppm (parts per million). Nähert sich die Spule nun dem magnetisch markierten Material, ändert sich die Selbstinduktivität  $L$  der Spule und in der Folge auch die Resonanzfrequenz des Schwingkreises.

Durch die axiale Ausrichtung der Spule zum Bohrloch, sind die Feldlinien im Bohrloch rotationssymmetrisch ausgerichtet. Die Sonde reagiert daher ungerichtet und die Messwerte repräsentieren integral den gesamten Umfang der Messsonde. Eine Erhöhung der Magnetisierbarkeit im Umfeld des Sensors führt zu einer Ver-

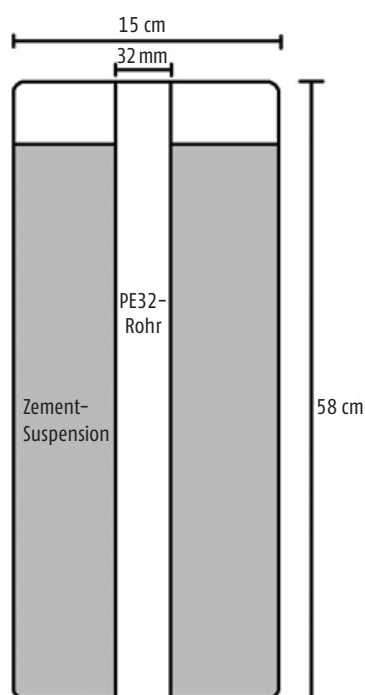
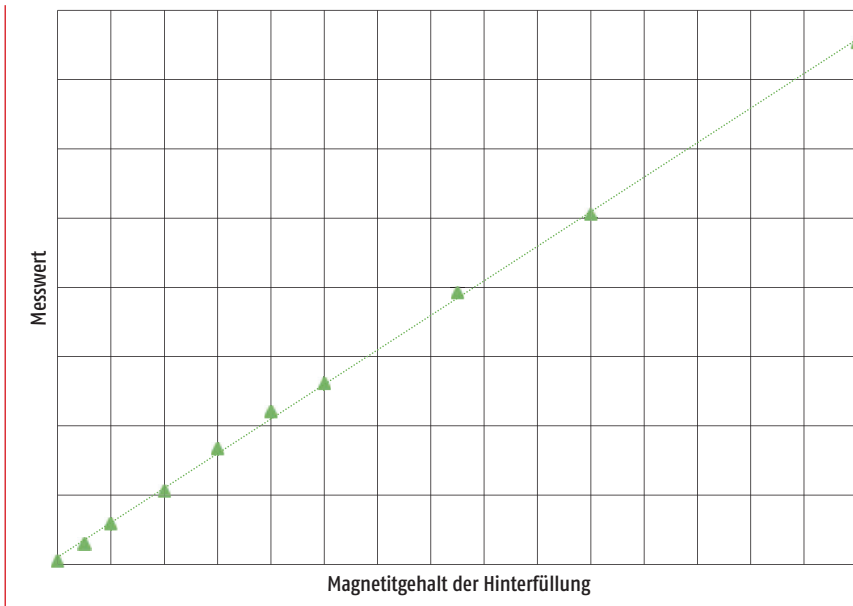


Abb. 2 – Modellskizze

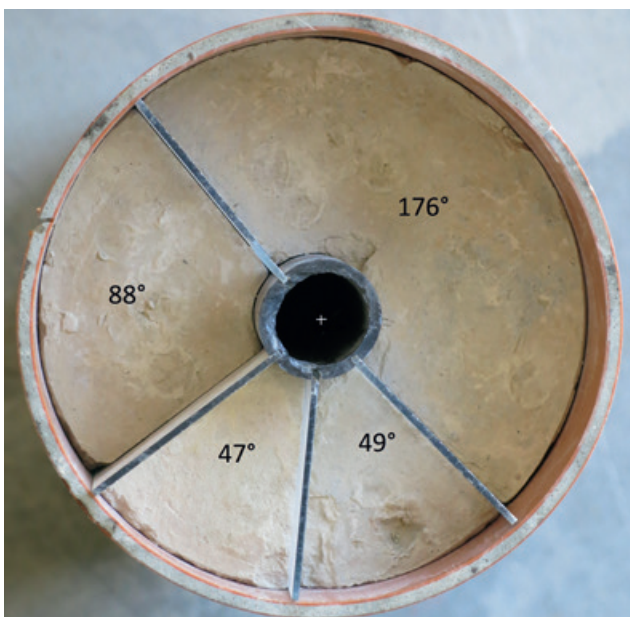


**Abb. 3** – Die Messwerte der SSM-1 zeigen eine direkte Proportionalität zum Magnetitgehalt im Ringraum des Erdwärmesondenrohres.

ringerung der Resonanzfrequenz und damit zu negativen Messergebnissen. Positive Messergebnisse entstehen hingegen, wenn sich der Sensor in der Nähe von elektrisch leitfähigen, aber nichtmagnetischen Materialien (z. B. Kupfer, Messing) befindet.

**Zusammenhang zwischen Messwert und Magnetit-Gehalt in der Sondenumgebung**

Um den physikalischen Zusammenhang zwischen dem Ausgabewert der SSM1-Sonde und dem Magnetit-Gehalt der Ringraumverfüllung zu bestimmen, wurden insgesamt zehn Modelle erstellt, die der Geometrie einer Erdwärmesonde entsprechen (Abb. 2): In Kunststoffrohren mit einem Innendurchmesser von 150 mm wurde dazu jeweils ein 32 mm PE-Rohr zentriert einge-



**Abb. 4** – Modell mit Ringraumsegmenten zur Realisierung unterschiedlicher Umhüllungsgrade

baut und der Ringraum anschließend mit SCHWENK Füllbinder EWM verfüllt, der jeweils mit unterschiedlichen Magnetit-Gehalten angereichert wurde. Die Messung erfolgte innerhalb des PE-Rohres.

Die Ergebnisse dieser Versuche zeigen, dass das Messsignal proportional zum Magnetit-Gehalt reagiert (Abb. 3). Man kann demnach bei gleichem Volumen des Ringraumes unter bekannten Modellbedingungen mit dem Messgerät den Magnetit-Gehalt der Ringraumverfüllung ermitteln.

Aus früheren Versuchen ist weiterhin bekannt, dass die Suszeptibilität des Magnetits mit der Partikelgröße abnimmt. Die mit den Versuchen bestimmte Beziehung von Messwert und Magnetit-Gehalt gilt daher nur bei gleicher Körnung der Markierung.

Welche Messwerte repräsentieren jedoch den in einer realen Erdwärmesonde zu erwartenden „korrekten“

Messwert? Die Autoren schlagen vor, bei der Bauausführung jeweils eine Probe anzufertigen. Dazu ist ein Kunststoffrohr, das in Durchmesser und Wandstärke der Erdwärmesonde entspricht, mittig in einen Behälter mit einem Durchmesser bzw. einer Höhe von jeweils etwa 150 mm einzusetzen. Dieses Gefäß sollte dann mit dem Baustoff verfüllt werden. Auf diese Weise ist praktisch eine Kalibrierung des Messgerätes auf der Baustelle möglich. Weiterhin ist damit eine Rückstellprobe der Bohrlochverfüllung vorhanden.

**Abhängigkeit von Umhüllungsgrad und Messwert**

In einer realen Bohrung ist nur im Ausnahmefall mit einer zentralen Position des Erdwärmesondenrohres in der Bohrung zu rechnen. Das Sondenrohr wird zumindest abschnittsweise nahe oder direkt an der Bohrlochwand anliegen und somit nicht vollständig von Verpressmaterial umhüllt sein.

Um den Messeffekt bei unvollständiger Umhüllung mit einem Füllbinder zu simulieren, wurde ein Modell gebaut, dessen Ringraum über Plexiglas-Trennwände in mehrere Segmente („Tortenstücke“) aufgeteilt wurde, welche nun flexibel miteinander kombiniert werden konnten. So wurden Umhüllungsgrade von 360°, 311°, 264°, 176°, 88°, 49°, 47° realisiert (Abb. 4).

Die lineare Beziehung zwischen Umhüllungsgrad und Messwert (Abb. 5) bestätigt die oben beschriebene Linearität zwischen Magnetit-Gehalt und Messwert und der integralen Funktionsweise der Sonde.

**Der Einfluss von Nachbarrohren**

Auch nahe anliegende benachbarte PE-Rohre können einen niedrigeren Umhüllungsgrad bei der Messung suggerieren. Das von ihnen eingenommene Volumen ist nicht magnetisch markiert und führt daher zu einer Messwertverringern. In einer realen Bohrung ist die räumliche Lage der einzelnen Rohre im Bohrloch nicht vorhersagbar.

Um die tatsächliche Qualität der Ringraumverfüllung bewerten zu können, ist es daher wichtig, den möglichen Einfluss der benachbarten PE-Rohre auf den Messwert zu kennen. Hierfür wurden weitere Probekörper in unterschiedlichsten Rohrposi-

onen (Abb. 6) hergestellt und mit SCHWENK Füllbinder EWM plus verfüllt. Beispielhaft werden hier die Ergebnisse von drei Versuchen vorgestellt.

Der Probekörper 12a stellt den Idealfall dar: Hier wurden in definierten Tiefen Abstandshalter eingebaut, um deren Nachweisbarkeit zu untersuchen. Der Probekörper 16 enthält zentral vier aneinander anliegende Sondenrohre. Die Messergebnisse in den Rohren 1-4 der beiden Probekörper unterscheiden sich aufgrund der jeweils realisierten Modell-Symmetrie nicht voneinander.

In Abbildung 7 sind die Datenreihen für beide Probekörper 12a (Rohr 3) und 16 (Rohr 1) aufgetragen. Die Abstandshalter des Probekörpers 12a sind hier im Verlauf der Messdaten durch eindeutige lokale Mini-ma erkennbar. Sie befinden sich bei 21 cm, 40 cm und 58 cm Tiefe.

Betrachtet man nun die Unterschiede zwischen den Datenreihen beider Probekörper unter Ausschluss der Abstandshalter, zeigt sich, dass der Messwert für Probekörper 16 um circa 20 % kleiner ausfällt als jener, welcher den Körper 12a repräsentiert.

Der dritte hier vorgestellte Probekörper (Probe 15) zeigt eine Zusammenballung der PE-Rohre am Modellrand und simuliert eine wandnahe Rohrposition. Als fünftes PE-Rohr wurde hier zusätzlich die mit Füllbinder verfüllte „Verpressleitung“ realisiert. Die gewonnenen Messkurven (Abb. 8) sind ein gutes Beispiel für die mögliche Differenzierung der Datenreihen von Rohren in unterschiedlichen Lagebedingungen. Rohr 4 zeigt die größten Messwerte und ordnet sich damit relativ zu den anderen drei Rohren im weitaus größeren Wertebereich für die Suszeptibilität ein, was auf die deutlich bessere Umhüllung mit Verpressmaterial zurückgeht. Rohr 2 liegt in direktem Kontakt zu Rohr 1, Rohr 3, der „Verpressleitung“ und der Modellwand. Das bedeutet, dass besonders in der nahen Umgebung, welche nach dem Gesetz von Biot-Savart den stärksten Einfluss auf die Sonde nimmt, Füllmaterial verdrängt und somit von der Sonde nicht erfasst wird. Dies hat zur Folge, dass die Datenreihe für Rohr 2 am niedrigsten ausfällt. Die Messwerte für Rohr 3 und Rohr 1 ordnen sich zwischen den Kurven von Rohr 2 und Rohr 4 ein.

Vergleicht man nun die Daten der drei Proben 12a, 15 und 16 miteinander, so wird ersichtlich, dass bei korrekter Verfüllung allein durch die Position der PE-Rohre im Bohrloch ein Messwertabfall von etwa 50 % möglich ist. Ein derart starker Abfall ist jedoch bei den Modellannahmen nicht bei allen vier PE-Rohren zugleich möglich. Dies wäre nur bei folgenden zusätzlichen Faktoren zu erwarten:

1. verringerte Magnetit-Konzentration des Verpressmaterials,
2. Verengung des Bohrlochquerschnittes (Einschnürung der PE-Rohre durch das Gebirge) sowie
3. Nachfall.

#### Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen

Folgende Schlussfolgerungen lassen sich aus diesen experimentellen Ergebnissen ziehen:

- Die Messwerte sind linear vom Grad der Anreicherung der magnetischen Markierung im Baustoff abhängig.
- Da die Messsonde nicht den gesamten Querschnitt der Bohrung erfasst, ist auch bei fachgerechter Ausführung der Bohrlochabdichtung mit einer deutlichen Varianz der Messsignale durch eine variierende Geometrie zu rechnen.
- Zur Einschätzung der Ursache von Messwert-Variationen ist es demzufolge sinnvoll, in mehreren der im Bohrloch befindlichen PE-Rohre Messungen durchzuführen.

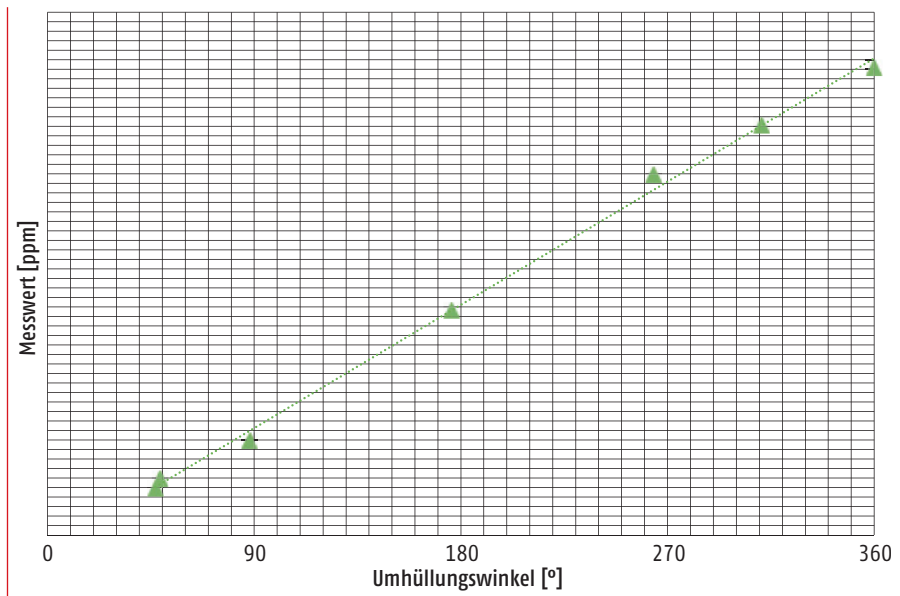


Abb. 5 – Der Messwert nimmt bei steigendem Grad der Umhüllung der Messsonde linear zu.



Die Messwerte sind linear vom Grad der Anreicherung der magnetischen Markierung im Baustoff abhängig.

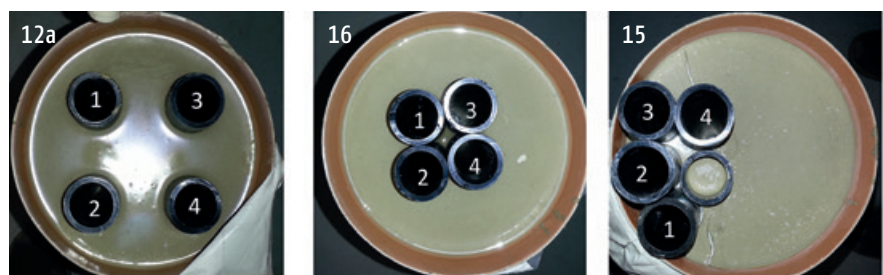


Abb. 6 – Es wurden verschiedene mögliche Anordnungen der Sondenrohre im Bohrloch modellhaft nachempfunden.

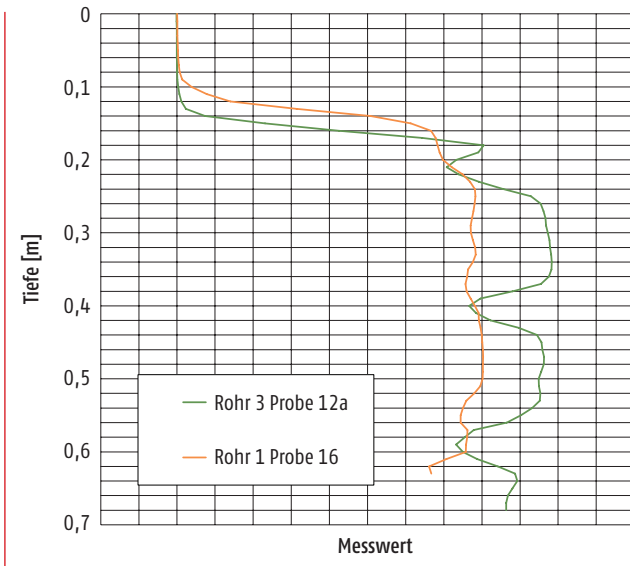


Abb. 7 – Messergebnisse aus den Proben 12 a und 16

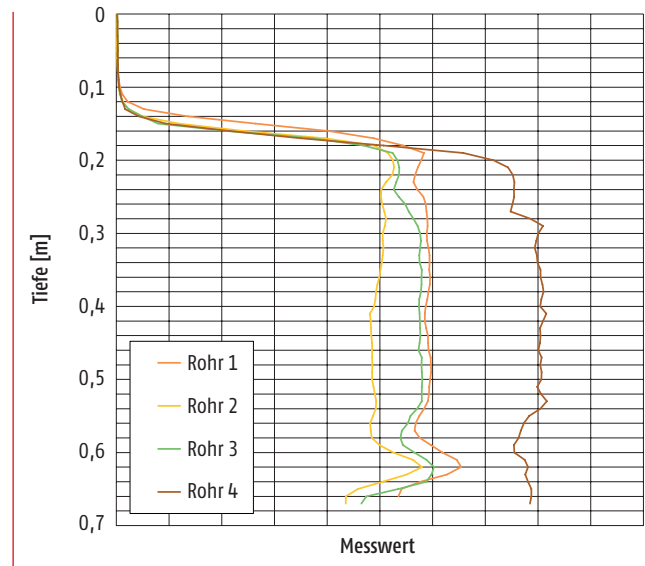


Abb. 8 – Messergebnisse aus Probe 15

**Beispiele aus der Praxis**

Die beschriebenen theoretischen Überlegungen spiegeln sich in der Praxis wider. An dieser Stelle werden nun beispielhaft die in zwei verschiedenen Erdwärmesonden gewonnenen Messdaten diskutiert. Beide Beispielbohrungen wurden in quartären und tertiären Lockersedimenten in der Region Berlin/Brandenburg abgeteuft.

In der Abbildung 9 werden die in einer Einfach-U-Rohr Sonde gemessenen Daten gezeigt. In der Bohrung befindet sich zusätzlich zu den Sondenrohren die Verpressleitung, welche nach dem Ende der Bohrlochverfüllung in der Bohrung verblieben ist. In beiden Rohren der U-Sonde wurden Magnetik-Log-Messungen durchgeführt, die dabei entstandenen Messkurven unterscheiden sich im Detail teilweise erheblich voneinander. Da eine horizontale Variation der Magnetitkonzentration zunächst nicht zu erwarten ist, sind mit hoher Wahrscheinlichkeit in erster Linie geometrische Faktoren für die Messwertdifferenzen verantwortlich: So ist zwischen 58 und 60 m z. B. am Rohr 1 mit nahe anliegendem Gebirgsmaterial zu rechnen. Zwischen 64 und 66 m gilt dies hingegen für Rohr 2.

Beide Messkurven zeigen aber übereinstimmend folgende Abfolge:

- 0-3 m: oberflächennah erhöhte Messwerte,
- 3-14 m: relativ geringe, zum Liegenden hin zunehmende Werte,
- 14-38 m: relativ gleichförmige Messwerte mit geringer Streuung und
- unterhalb von 38 m: starke Schwankung der Messwerte auf insgesamt hohem Niveau, abschnittsweise verringerte Werte.

Diese Zonierung wurde bei den bisher durch die Bohrlochmessung - Storkow GmbH untersuchten Erdwärmesonden mehrfach beobachtet und lässt sich im Prinzip auch am

Praxisbeispiel 2 (Abb. 10) nachvollziehen. Dabei handelt es sich um eine mit einem Doppel-U-Rohr ausgebaute Bohrung, deren vier Rohrstränge untersucht wurden.

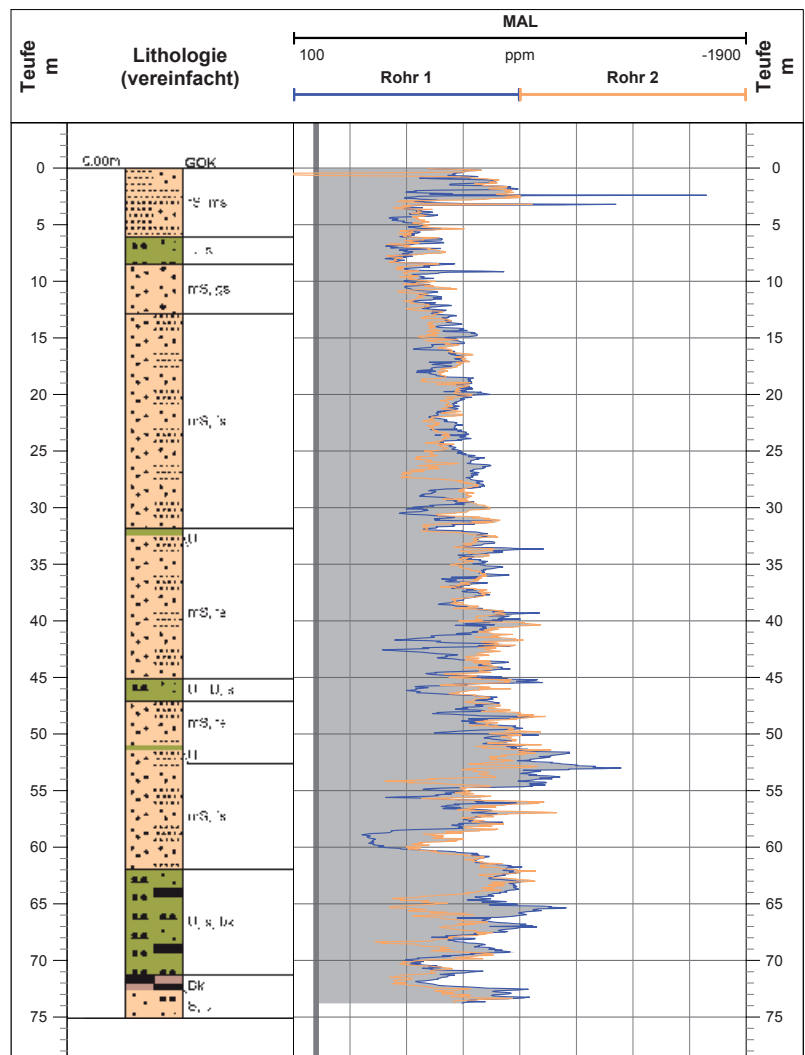


Abb. 9 – Praxisbeispiel 1 - Untersuchungsergebnisse einer Erdwärmehohrung, die mit einem Einfach-U-Rohr ausgebaut ist.

- 0-6 m: oberflächennah keine Magnetit-Anreicherung nachweisbar,
- 6-34 m: zum Liegenden hin zunehmende Werte mit geringer Streuung und
- unterhalb von 34 m: hohe Schwankung der Messwerte auf insgesamt sehr hohem Niveau.

Diese Zonen sind aus Sicht der Autoren wie folgt zu verstehen:

### 1. Oberflächennaher Bereich (in der Regel von 0 bis maximal 6 m reichend)

Erdwärmebohrungen werden im Kontraktorverfahren so lange verpresst, bis das Verfüllmaterial am Bohrlochmund austritt. Auch nach dem Ende dieses Vorganges kommt es bis zur Verfestigung des Verpressmaterials zu einer langsamen Infiltration in aufnahmefähige Gebirgsbereiche. Dabei sinkt der Suspensionsspiegel im Bohrloch wieder ab. Dieser Prozess endet mit dem Abbinden der Bohrlochverfüllung. Das Bohrloch ist dann oberflächennah wieder unverfüllt und wird in einem zweiten Arbeitsgang nachträglich abgedichtet. Dies betrifft im Beispiel 1 den Bereich zwischen Geländeoberkante und ca. 3 m Tiefe. Im Beispiel 2 ist hingegen zum Zeitpunkt der Messungen noch keine Nachdichtung erfolgt. Hier ist oberhalb von 6-7 m daher kein magnetisch markiertes Material nachweisbar.

### 2. „Hut“ des Verpressmaterials

Dieser oberste Abschnitt der im Kontraktorverfahren eingebrachten Ringraumverfüllung zeigt häufig eine vergleichsweise geringe, zum Liegenden hin aber zunehmende Magnetisierbarkeit. Über die Genese dieser Zone kann nur spekuliert werden. Wahrscheinlich spielt der Kontakt des Baustoffes mit der Bohrlochspülung bei deren Verdrängung aus dem Bohrloch und das Absetzen des Magnetits, der naturgemäß eine hohe Dichte aufweist, eine Rolle. Es handelt sich also um eine Mischungszone.

### 3. Weitgehend homogener mittlerer Zementkörper

Die Mächtigkeit dieser zentralen Zone, die ein relativ gleichmäßiges Signallevel zeigt, ist sehr unterschiedlich und hängt sowohl vom Verpressvorgang als auch von der Geologie ab. Wahrscheinlich findet hier nur eine geringe Interaktion von Verpressmaterial und Gebirge statt. Ein Spülungskontakt ist ebenfalls nicht gegeben. Daher ist dieser Teil der Suspensionssäule den Messergebnissen zufolge relativ homogen.

### 4. Unterer Bohrungsabschnitt mit erhöhten, stark schwankenden Messwerten

Im unteren Abschnitt der bisher untersuchten Bohrungen wurden häufig deutlich erhöhte Signale registriert. Besonders deutlich ist dieser Effekt im Praxisbeispiel 2 unterhalb von 50 m ausgeprägt. Die Messwerte der einzelnen PE-Rohre weichen in gleicher Tiefe stark voneinander ab. Dies ist ein Hinweis auf einen hohen Einfluss der Bohrlochgeometrie, der nur schwer zu erklären ist. Vermutlich interagiert der Baustoff aufgrund des höheren Überdruckes in den tieferen Abschnitten der Bohrung stärker mit dem Gebirge. Hier findet bis zum Abbinden eine Infiltration statt. Dabei kann es zu einer Anreicherung von Magnetit an der Bohrlochwand kommen. So wären die hohen Messwerte, welche jeweils nur in einem Teil der Rohre angezeigt werden, erklärbar. →

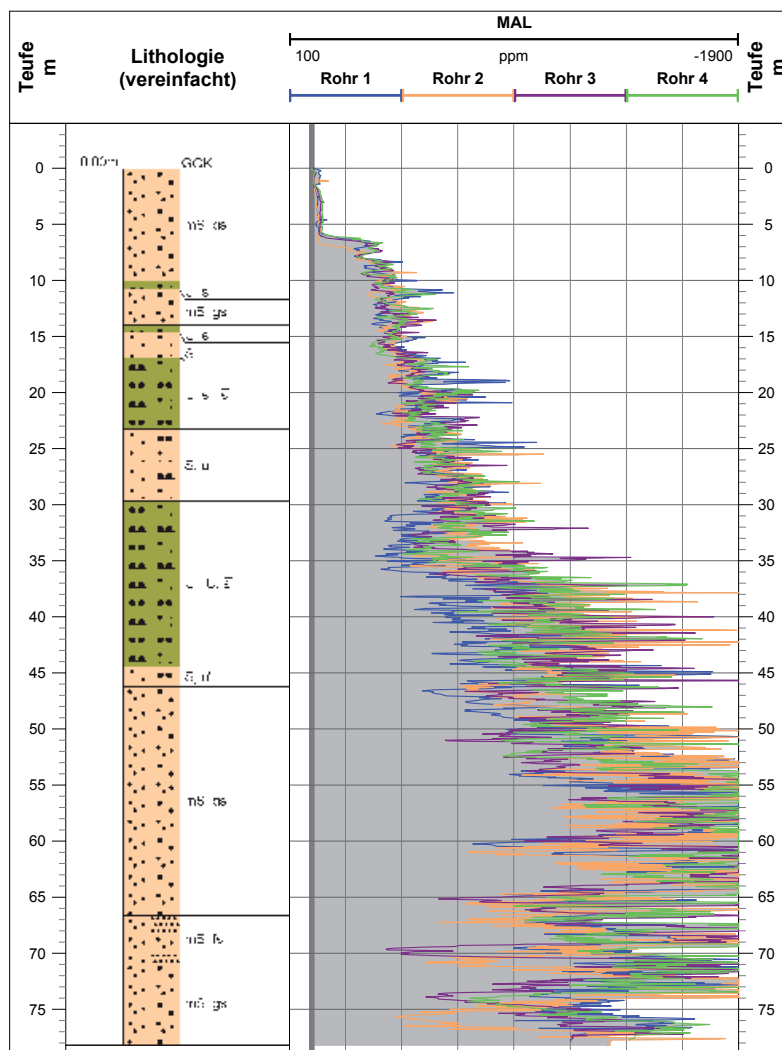


Abb. 10 – Praxisbeispiel 2 – Untersuchungsergebnisse einer Erdwärmebohrung, die mit einem Doppel-U-Rohr ausgebaut ist.



BOHRLOCHMESSUNG-STORKOW GmbH

D-15859 Storkow - Schützenstraße 33

Tel./Fax: +49 33678 436 30 / 436 31 - <http://www.blm-storkow.de>

Geophysikalische Messungen und  
Kamerabefahrungen in Brunnen und Grundwassermessstellen

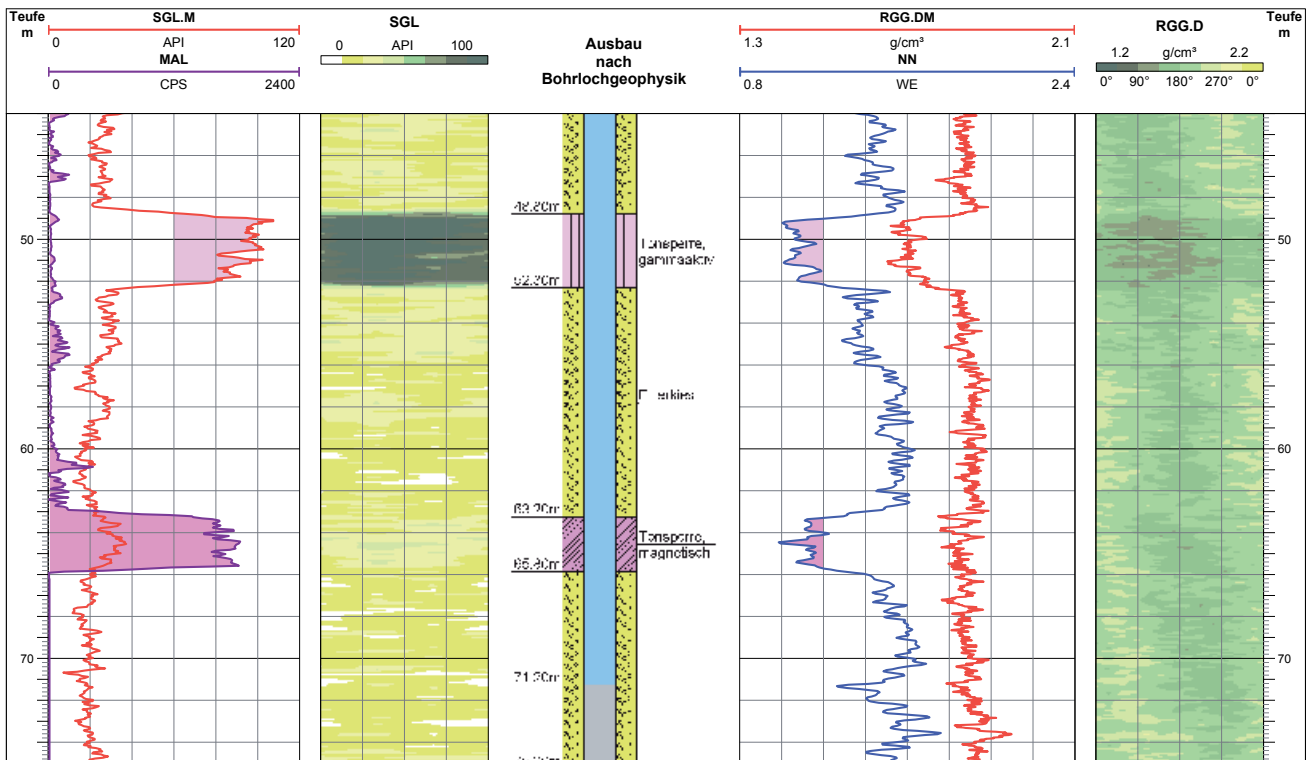


Abb. 11 – Nachweis von Tonsperrschichten mit unterschiedlichen Eigenschaften in einer Grundwassermessstelle. Das Gebirge ist im gezeigten Teufenabschnitt weitgehend frei von Tonmineralien.

Es ist auch nicht auszuschließen, dass sich ein Teil der Markierung aufgrund ihrer hohen Dichte beim Durchfließen des Bohrloches von unten nach oben absetzt und aus diesem Grund der untere Bohrungsabschnitt jeweils höhere Magnetitgehalte aufweist.

**Schlussfolgerungen**

Aus den aufgeführten Beispielen lassen sich folgende Schlussfolgerungen und Erkenntnisse ziehen:

- Das Vorhandensein magnetischen Materials in der Bohrung kann anhand der Messungen sicher erkannt werden.
- Die Untersuchung in mehreren Röhren, die jeweils eine unterschiedliche Lage im Bohrloch aufweisen, gibt zusätzliche Hinweise zur Verteilung des Markierungsmittels.
- Risse, Kanäle und ähnliche lokal begrenzte, aber eventuell hydraulisch wirksame Strukturen in der Abdichtung können aufgrund ihres geringen Volumens mit dem Verfahren nicht detektiert werden. Es eignet sich daher auch nicht für eine Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit des Systems.
- Es existieren keine Kriterien für eine „geringste Magnetisierbarkeit“ bzw. eine minimale Magnetitkonzentration, die für ein fachgerechtes Abbinden des Verfüllbaustoffes notwendig ist. Da es sich um einen Zuschlagstoff handelt, der nicht am Abbindeprozess beteiligt ist, ist eine solche Angabe wahrscheinlich auch nicht sinnvoll.

- Die in der Bohrung während der Verpressung bis zum Erstarren des Verfüllmaterials herrschende Dynamik beeinflusst die Verteilung der Markierung in der Bohrung. Der Verfüllprozess, die Bohrlochgeometrie und die geologischen Verhältnisse sind somit für die Signalhöhe und -verteilung mit verantwortlich.
- Das „eingefrorene“ inhomogene Muster der Messergebnisse ist jedoch als reproduzierbarer „Fingerabdruck“ der Bohrung zu verstehen. Das bedeutet, dass dieses Messverfahren die Möglichkeit einer Kontrolle der Beständigkeit der Abdichtung nach der Verfestigung eröffnet. Bei einer Stilllegung der Erdwärmesonde oder bei einem Wechsel des Eigentümers kann dieses von großem Nutzen sein.

**Ringraumkontrollen – gängige Praxis im Brunnen- und Messstellenbau**

Wie kann man die Aussagesicherheit zukünftig erhöhen? Entsprechend der Vorgehensweise bei der Kontrolle von Brunnen und Grundwassermessstellen sind eindeutige Aussagen und Informationen zu mehreren petrophysikalischen Eigenschaften der Hinterfüllung notwendig. Nach dem DVGW-Arbeitsblatt W 110 [2] werden dabei die natürliche Gamma-Eigenstrahlung (Gamma-Ray-Log bzw. GR), der Wasserstoffgehalt (Neutron-Neutron-Log bzw. NN) und die Lagerungsdichte (Gamma-Gamma-Dichte-Log bzw. GG.D) bestimmt. Beim Vorhandensein magnetischer Ausbaumaterialien kann weiterhin zusätzlich das Magnetik-Log (MAL) eingesetzt werden. Erst die Summe der bestimmten Eigenschaften ermöglichen eine sichere Ansprache der Materialien und eine Einschätzung ihrer Lagerungsverhältnisse.

Das Beispiel zeigt die Messergebnisse der Ringraumkontrolle einer Grundwassermessstelle (Abb. 11). Zu Demonstrationszwecken wurde im Bereich von tonarmen Sedimenten (Sanden) zwischen 48,8 und 52,3 m eine stark gammaaktive Tonsperrschicht und zwischen 63,2 und 65,8 m eine magnetisch markierte Tonsperrschicht installiert.

» Das „eingefrorene“, inhomogene Muster der Messergebnisse ist als reproduzierbarer „Fingerabdruck“ der Bohrung zu verstehen. «

Das hier eingesetzte Segmentierte Gamma-Ray-Log (SGL) zeigt die vollständige Umhüllung des Rohrstranges mit hoher Gammaaktivität im Bereich der oberen Tonsperre an. Diese weist weiterhin im Vergleich mit der Kiesschüttung eine verringerte Lagerungsdichte auf.

Die untere Tonsperre zeigt beide Messeffekte nicht. Hier ist magnetisch angereichertes Material nach Magnetik-Log (MAL) angezeigt. Die geringen MAL-Indikationen oberhalb der Tonsperre gehen auf markierte Tonpellets, die sich beim Schütten an der Bohrlochwand akkumuliert haben, zurück.

Nach Neutron-Neutron-Log zeichnen sich beide Tonsperren klar ab. Dieses Messverfahren ist jedoch für sich allein nicht aussagekräftig; eine Brückenbildung ließe sich hier nicht von einer Tonsperre unterscheiden.

Ringraumkontrollen sind im Brunnen- und Messstellenbau nicht auf den Nachweis der Ringraumabdichtung beschränkt. Aussagen zum Verfüllungsgrad, also dem Vorhandensein von Brückenbildungen, der Lagerungsdichte und Homogenität der Ringraumabdichtung sowie zum Zustand der Kiesschüttung sind ebenso wichtig.

Um die Grundwassermessstelle in Hinblick auf die Gewährleistung des Grundwasserschutzes beurteilen zu können, wird natürlich die Kenntnis des Gebirgsaufbaues benötigt. So können Aussagen hinsichtlich einer nicht teufengerechten Lage einer Ringraumabdichtung fachlich fundiert kommentiert und die Folgen abgeschätzt werden. Dazu wird zusätzlich das Induktions-Log eingesetzt, welches als Verfahren mit großer Reichweite Informationen zum Gebirgsaufbau liefert. Erst diese Kombination mehrerer Verfahren ermöglicht eine akzeptable Aussagesicherheit. Eine ähnliche Herangehensweise ist sicher auch bei Qualitätskontrollen von Erdwärmesonden zielführend und daher zukünftig anzustreben.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklung von für die Abdichtung von oberflächennahen Erdwärmebohrungen geeigneten Verfüllbaustoffen und der für deren Nachweis geeigneten Messtechnik eröffnet neue Möglichkeiten für die Ringraumkontrolle von Erdwärmesonden. So kann nun der Nachweis markierter Verfüllbaustoffe in Erdwärmesonden zu akzeptablen Bedingungen erfolgen. Das Vorhandensein der magnetischen Markierung im Ringraum lässt sich zweifelsfrei nachweisen.

Allein aus der Höhe des Messsignales lässt sich jedoch nicht direkt auf die Qualität der Ringraumverfüllung schließen. Es gibt hingegen klare Hinweise darauf, dass die Verteilung der mag-

netischen Markierung vom Verfüllprozess, von der Position der Sondenrohre innerhalb der Bohrung und der Interaktion der Ringraumverfüllung mit dem Gebirge beeinflusst wird. Es ist daher für die praktische Anwendung sinnvoll, im Zweifelsfall mehrere der in der Bohrung vorhandenen U-Rohre zu vermessen.

Eine qualitative Kontrolle der Ringraumverfüllung ist nur bei Kenntnis von weiteren Eigenschaften der Hinterfüllung möglich. Bei der Entwicklung entsprechender Konzepte und Messtechnik kann dabei auch weiterhin viel von den bei der Untersuchung von Brunnen und Grundwassermessstellen eingesetzten Techniken profitiert werden. Es ist daher zu empfehlen, bei entsprechenden Forschungsprojekten jeweils Firmen, die über die notwendigen Erfahrungen bei der Untersuchung von Bohrungen verfügen, mit einzubinden.

### Literatur

- [1] DVGW-Arbeitsblatt W 121: Bau und Ausbau von Grundwassermessstellen, , wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wassers, Bonn, 07/2003.
- [2] DVGW-Arbeitsblatt W 110: Geophysikalische Untersuchungen in Bohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen – Zusammenstellung von Methoden und Anwendungen, wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wassers, Bonn, 06/2005.
- [3] M. Rieger, S. Hochmuth, M. Werner: Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben EWSPLUS – Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden, Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme, 2013.
- [4] K. N. Lux, K. Baumann, J. Blumtritt, W. Beck: Geothermie und Schutz des Grundwassers – ein Widerspruch?, bbr 10/2012.
- [5] K. Baumann: Erste Erfahrungen bei der bohrlochgeophysikalischen Überprüfung von Erdwärmesonden, bbr 5/2010.

### Autoren

Falk Triller  
Bohrlochmessung – Storkow GmbH  
Schützenstr. 33  
15859 Storkow (Mark)  
Tel: 033678 4363-9  
triller@blm-storkow.de  
www.blm-storkow.de

Daniel Klinkhardt  
Student der Technischen Universität Berlin, Fachrichtung Geotechnologie  
DanielKlinkhardt@gmx.de





**ITE GmbH**  
Niedersedlitzer Str. 37  
01239 Dresden  
Tel.: 0351/215208-45  
www.separation.de



**DIE KUNST DES FEINEN TRENNENS**  
WIR MACHEN DA WEITER, WO ANDERE AUFHÖREN



