

Schlussbericht, 16. April 2015

# Qualitätssicherung Erdwärmesonden

## Übersicht Messmethoden zur Prüfung der Hinterfüllung

**Autoren**

Dr. Maurus Hess, CSD Ingenieure

Markus Sommerhalder, CSD Ingenieure

Felix Burger, CSD Ingenieure

Dr. Vincent Badoux

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt. Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

**Adresse**

CSD Ingenieure AG, Hessesstrasse 27d, CH-3097 Liebefeld

Tel. +41 31 970 35 35, Fax +41 31 970 35 36, info@csd.ch, [www.csd.ch](http://www.csd.ch)

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>5</b>
1.1	Ausgangslage und Motivation .....	5
1.2	Aufgabenstellung .....	6
1.3	Untersuchungsgegenstand und Abgrenzung .....	6
1.4	Vorgehensweise und Produkte .....	8
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>9</b>
2.1	Erdwärmennutzung mittels Sonden .....	9
2.2	Übersicht Methoden .....	9
2.3	Erläuterung zur Methodenbeschreibung.....	10
<b>3</b>	<b>Thermische Methoden</b> .....	<b>12</b>
3.1	Methode Kurz TRT .....	12
3.2	Methode Ruhe-p-T-log .....	13
3.3	Methode Messen der Abbindewärme .....	14
3.4	Beurteilung und Diskussion .....	15
<b>4</b>	<b>Radioaktive Methoden</b> .....	<b>18</b>
4.1	Methode Gamma-Gamma-Dichte-Anomalie Methode .....	18
4.2	Methode Gamma-Ray-Log (GR).....	19
4.3	Beurteilung und Diskussion .....	20
<b>5</b>	<b>Mechanische Methoden</b> .....	<b>22</b>
5.1	Methode Digital Borehole Observation 3 .....	22
5.2	Methode Hinterfüllungsmessgerät .....	23
5.3	Methode HDG EWS - Datalogger .....	24
5.4	Beurteilung und Diskussion .....	25
<b>6</b>	<b>Magnetische Methoden</b> .....	<b>27</b>
6.1	Methode Magnetik-Cemtrakker.....	27
6.2	Methode Magnetik-Log (MAL) .....	28
6.3	Beurteilung und Diskussion .....	29
<b>7</b>	<b>Blick ins Ausland</b> .....	<b>31</b>

7.1	Frankreich .....	31
7.2	Deutschland (Baden-Württemberg) .....	32
<b>8</b>	<b>Wichtigste Ergebnisse und Fazit.....</b>	<b>34</b>
8.1	Vorbemerkung.....	34
8.2	Anwendung und Aussagekraft Methoden .....	34
8.3	Fazit.....	35
Anhang 1 Liste der Interviewpartner .....		37

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Motivation

Mit der Energiestrategie 2050 des Bundes sollen der Endenergie- und der Stromverbrauch reduziert, der Anteil der erneuerbaren Energien erhöht und die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen gesenkt werden. Eine der lokal vorhandenen, erneuerbaren Energiequellen ist Erdwärme, welche mit einer Wärmepumpen-Anlage (WP) genutzt werden kann.

In der vorliegenden Untersuchung geht es um die untefe Erdwärmennutzung mittels Erdwärmesonden. In den letzten Jahren wurden immer mehr Heizungen mit Erdwärmesonden-WP-Anlagen gebaut (vgl. Abbildung 1).

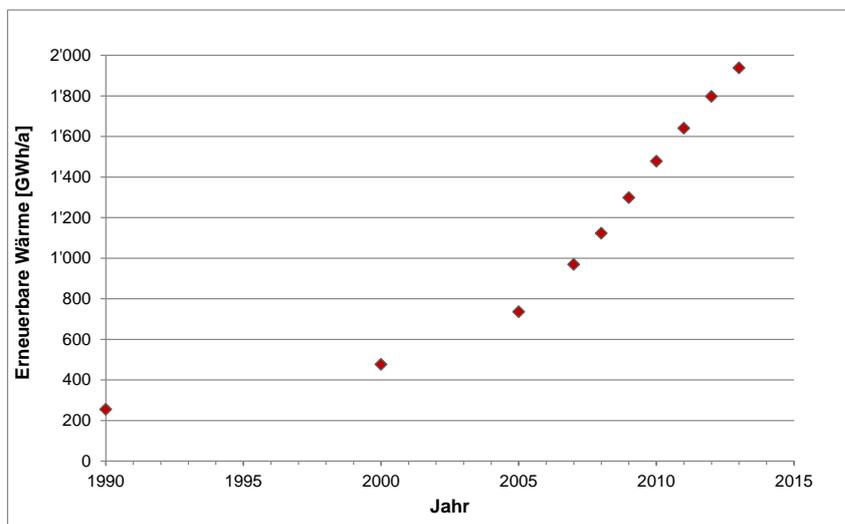


Abbildung 1: Entwicklung Erdwärmennutzung mittels Sonden und Sole/Wasser Wärmepumpen seit 1990.  
(Quelle: BfE: Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien. Ausgabe 2013. Bern, Sept. 2014)

Die Ausführungsqualität der Erdwärmesonden ist unter anderem ausschlaggebend für eine gute thermische Anbindung der Erdwärmesonden an den Untergrund, und damit für die Leistungsfähigkeit der Erdwärmesonden, letztlich also auch für die Effizienz des Gesamtsystems Erdwärmesonden – Wärmepumpe - Wärmeabgabe.

Für die Beurteilung der Ausführungsqualität nach Vollendung der Bohr- und Installationsarbeiten existieren einige wenige Mess- und Prüfverfahren, und diese werden nicht flächendeckend angewendet. Ausführungskontrollen in Form von Baubegleitungen und Ausführungsüberwachungen sind mit grossem Aufwand und relativ hohen Kosten verbunden. Durch die Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz (FWS) durchgeführte Vollzugskontrollen haben bei Stichproben-Bohrkontrollen ergeben, dass:

- bei angekündigten Kontrollen 15% der Bohrstellen Mängel an der Hinterfüllung aufwiesen,
- bei nicht angekündigten Kontrollen 38% der Bohrstellen Mängel an der Hinterfüllung aufwiesen.

Bessere und umfassendere Kontrollmöglichkeiten sowie deren regelmässige Anwendung bewirken also mit grosser Wahrscheinlichkeit höhere Qualität der Hinterfüllung, somit bessere Wärmeübergänge, höhere Energieeffizienz.

## 1.2 Aufgabenstellung

Bei der Beurteilung der Ausführungsqualität einer Erdwärmesonde kommt der Hinterfüllung eine tragende Rolle zu. Im Rahmen des Projekts werden Methoden für die Beurteilung der Hinterfüllungsqualität von Erdwärmesonden vorgestellt. Die Methoden werden nach einem einheitlichen Raster beschrieben, und im Wesentlichen werden folgende Fragen beantwortet:

- Welche Methoden werden gegenwärtig eingesetzt?
- Wie funktionieren die Methoden, wie gross ist der Aufwand und was für Werte werden gemessen?
- Welche Aussagen können im Hinblick auf die Hinterfüllungsqualität gemacht werden?

Bei der vorliegenden Untersuchung wird der aktuelle Wissensstand aufgearbeitet und eine Übersicht über die heute angewendeten Messmethoden erstellt. Es geht nicht um eine Priorisierung der verschiedenen Methoden.

## 1.3 Untersuchungsgegenstand und Abgrenzung

Das Projekt behandelt marktreife Methoden, die heute im Einsatz sind (also keine Prototypen bzw. unerprobte Methoden).

Abbildung 2 zeigt die Einordnung und Abgrenzung des Untersuchungsgegenstandes. Die Darstellung orientiert sich an der SIA Norm 384/6 Erdwärmesonden. Die Abdichtung des Bohrlochs (Hinterfüllung) muss folgende Bedingungen erfüllen (vgl. SIA 384/6 Kapitel 4.3.1.1):

- Vertikale Abdichtung von unterschiedlichen Grundwasser- oder Kluftwasserhorizonten
- Thermische Anbindung der Erdwärmesonden an den Untergrund
- Einbettung und Schutz der Erdwärmesonden

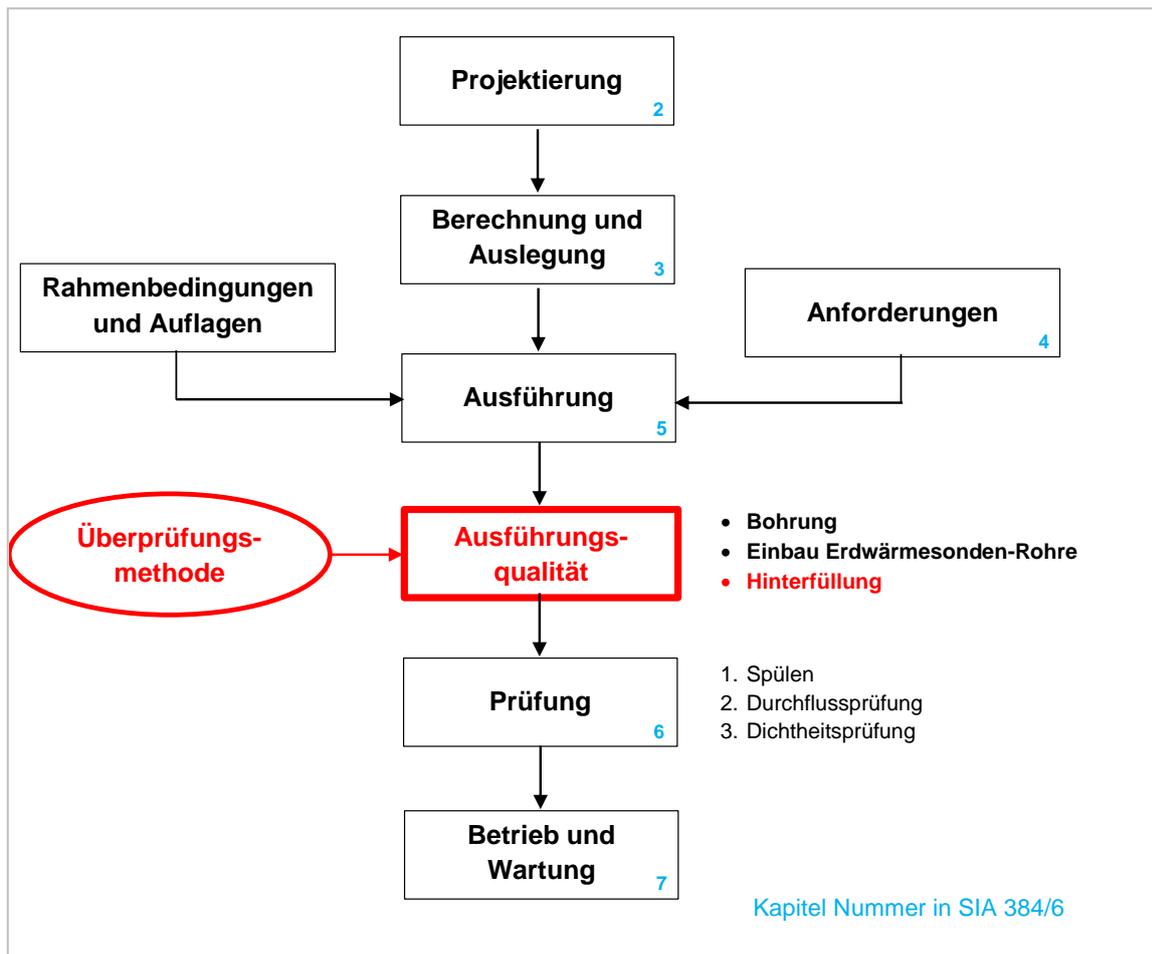


Abbildung 2: Einordnung und Definition des Untersuchungsgegenstands.

Die Ausführungsqualität der Hinterfüllung wird im Hinblick auf den Energieaustausch zwischen Erdreich und Erdwärmesondenrohr bzw. Wärmeträgerflüssigkeit beurteilt. Es geht also um Methoden, welche Aussagen über die thermische Anbindung der Erdwärmesonden an den Untergrund ermöglichen.

Für die korrekte Ausführung der Hinterfüllung ist die Bohrfirma zuständig. Weitere Aufgaben der Bohrfirma, wie z.B. die eigentliche Bohrung und der Einbau der Erdwärmesonden-Rohre sind nicht Teil der Untersuchung.

Die Ausführungsqualität ist neben dem Können, der Erfahrung und Ausrüstung der Bohrfirma auch durch die lokalen geologischen Rahmenbedingungen sowie durch allfällige Auflagen bestimmt. So können Auflagen für Erdwärmesonden zum Schutz des Grundwassers den Wärmeaustausch zwischen Erdreich und Sonde beeinflussen, z.B. Eigenschaften des Hinterfüllungsmaterials.

In der vorliegenden Untersuchung geht es nicht um die Projektierung von Erdwärmesonden-Anlagen, die Berechnung und Auslegung oder die Überprüfung der Dimensionierung.

## 1.4 Vorgehensweise und Produkte

Die Angaben zu den verschiedenen Messmethoden wurden direkt bei den Herstellern oder Entwicklern nachgefragt. Die erhaltenen Beschreibungen sind in Kapitel 3 bis 6 dargestellt. Alle uns nach aktuellem Wissenstand bekannten Hersteller von Messgeräten wurden angefragt. Die aufgeführten Methoden entsprechen dem Rücklauf der Umfrage innerhalb der Bearbeitungsfrist.

Die Praxiserfahrungen mit den Messmethoden wurden mittels Interview bei verschiedenen Gruppen von Akteuren telefonisch erfragt. Die interviewten Personen sind im Anhang ersichtlich. Die Antworten der Interviews bilden jeweils die Grundlage für die Beurteilung und Diskussion in den Kapiteln 3 bis 6 sowie für das Kapitel 7.

Die kritische Würdigung und das Fazit der Autorenschaft befinden sich im letzten Kapitel des Berichts.

Die Ergebnisse der durchgeführten Abklärungen ist im vorliegenden Bericht beschrieben. Der Bericht wird durch ein Merkblatt komplettiert, das die wichtigsten Resultate der Untersuchung tabellarisch zusammenfasst.



<b>Thermische Methoden</b>	
Kurz Thermal Response Test, Kurz TRT	Bestimmen von Inhomogenitäten nach Aufheizen und Messen des thermischen Verhaltens
Ruhe Druck-Temperatur-Messung, Ruhe-p-T-log	Messung des Temperaturprofils der Sonde und deren Übereinstimmung mit geothermischen Gradienten
Deep Drifter	Messung von Temperaturverlauf und den räumlichen Verlauf einer Erdsonde
<b>Radioaktive Methoden</b>	
Gamma-Gamma-Dichte-Anomalie	Dichtebestimmung vs. Tiefe im hinterfüllten Bohrloch durch künstliche radioaktive Quelle
Gamma-Ray-Log	Hinterfüllmaterial $\gamma$ -aktiv dotiert, misst natürliche Strahlung
<b>Mechanische Methoden</b>	
Digital Borehole Observation 3, DBO-3	Digitales Überwachungssystem des Verpressvorgangs (Druck, Tiefe, Verpressmenge)
Hinterfüllungsmessgerät, HMG-K, HMG-S	Messung von Volumen, Druck und Dichte der Hinterfüllung während des Injektionsvorgangs
HDG Erdwärmesonden Datenlogger	Digitales Überwachungssystem des Verpressvorgangs (Druck, Tiefe, Verpressmenge)
<b>Magnetische Methoden</b>	
CemTrakker	Hinterfüllmaterial magnetisch dotiert, Messung der Suszeptibilität während Verpressung und im Bohrlochprofil
Magnetik-Log (MAL)	Hinterfüllmaterial magnetisch dotiert, z.B. Magnetit, Messung der Suszeptibilität im Bohrlochprofil

Tabelle 1: Messmethoden zur Überprüfung der Hinterfüllungsqualität von Erdwärmesonden.

## 2.3 Erläuterung zur Methodenbeschreibung

Die Messmethoden zur Überprüfung der Ausführungsqualität der Hinterfüllung sind nach einem einheitlichen Raster in den Kapiteln 3 – 6 beschrieben. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Grenzen zwischen Methoden und Geräten häufig fließend sind und einzelne Messgeräte für verschiedene Methoden verwendet werden können, bzw. mehrere Geräte dem Anspruch einer Methode genügen. Historische und patentrechtliche Gründe haben aber dazu geführt, dass gewisse Geräte auch direkt einer Methode zugeordnet werden.

### Überblick

- |                        |  |
|------------------------|--|
| • Bezeichnung          | Name der Methode inkl. üblicher Abkürzungen, Fabrikate |
| • Foto                 | Foto Messgeräte oder von Durchführung der Messung      |
| • Kurzbeschreibung     | Kürzestbeschreibung der Messmethode / Messprinzip      |
| • Lieferant Messgeräte | Namen der Messgerät Lieferanten, Fabrikate             |

### Einsatzbereich

- |                               |  |
|-------------------------------|--|
| • Geologische Verhältnisse    | Einsatzbereich geologische Verhältnisse  |
| • Länge Erdsonden             | Einsatzbereich für Länge Bohrloch, min. Durchmesser                                |
| • Durchmesser Erdsondenrohre  | Einsatzbereich bezüglich Durchmesser Erdsondenrohre, max. Tiefe                    |
| • Spezifische Voraussetzungen | Spezifische Voraussetzungen oder Bedingungen, damit Methode angewendet werden kann |

<b>Verbreitung</b>	
• Geografisch	Im Einsatz und Anwendung auch in Deutschland, Österreich und Frankreich
• Marktreife	Seit dem Jahr XY wird die Methode angewendet
• Urheberrechte	Patentierter Methode mit allfälligen Einschränkungen bezüglich Anwendbarkeit und Verbreitung
<b>Aufwand</b>	
• Kosten	Kosten für die Durchführung der Messung inkl. aller Vorbereitungsarbeiten, Durchführung der Messung und Bericht. Damit die Kostenangaben vergleichbar sind, wurde eine einheitliche Situation angenommen: 1 vertikale Erdwärmesonde mit einer Länge von 100 m und Rohrdurchmesser von 40 mm. Freier Zugang zum Bohrloch und unbehinderte Durchführung der Messung.
• Aufwand Material	Anzahl, Typ Messgeräte (Fühler, Sonden, Logger, ...) und allenfalls Installationen und Ausrüstung
• Aufwand Personal	Nötiges Personal für das Einrichten, Durchführen und Auswerten der Messergebnisse inkl. fachliche Qualifikationen
<b>Durchführung</b>	
• Vorgehen, Ablauf	Kurze Beschreibung zur Vorbereitung und Durchführung der Messung
• Zeitdauer	Zeitbedarf für Vorbereitung, Durchführung der Messungen bis und mit Abbau der Messeinrichtungen
• Platzbedarf	Platz- und Raumbeanspruchung beim Bohrloch für die Durchführung der Messung
• Zeitpunkt	Während dem Einbringen der Hinterfüllung, nach dem Einbringen, ...
<b>Resultat</b>	
• Messgrößen thermische Anbindung	Gemessene Parameter (Druck, Volumen, ..). Einzelne Messwerte und / oder Verläufe als Grundlage für die Beurteilung der thermischen Anbindung der Erdwärmesonden an den Untergrund
• Andere Messgrößen	Weitere gemessene Parameter der Methode, die zur Beurteilung anderer Anforderungen an die Hinterfüllungsqualität dienen.

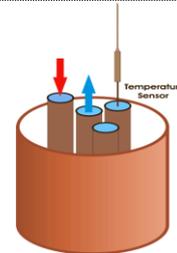
Tabelle 2: Raster für die Beschreibung der Messmethoden zur Überprüfung der Hinterfüllungsqualität von Erdwärmesonden.

## 3 Thermische Methoden

### 3.1 Methode Kurz TRT

#### Überblick

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| • Bezeichnung             | Kurz Thermal Response Test, K-TRT  |
| • Kurzbeschreibung        | Funktionsprüfung der Ringraumhinterfüllung einer Erdwärmesonde   |
| • Dienstleistungsanbieter | z.B. André Voutta Grundwasserhydraulik (Deutschland), <a href="http://www.avoutta.de">www.avoutta.de</a> |



#### Einsatzbereich

- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| • Geologische Verhältnisse    | Keine Einschränkung   |
| • Länge Erdsonden             | Keine Einschränkung solange Temperatursensorkabel durch Erdwärmesonde geführt werden kann   |
| • Durchmesser Erdsonden       | Keine Einschränkung   |
| • Spezifische Voraussetzungen | Die Erdwärmesonde muss am Sondenkopf vertikal erreichbar sein, keine horizontalen Anbindungsstrecken, Starkstromanschluss mit 400 V / 16 A nötig (es gibt auch eine gasbetriebene Variante) |

#### Verbreitung

- |                 |                     |
|-----------------|---------------------|
| • Geografisch   | Keine Einschränkung |
| • Marktreife    | Reif                |
| • Urheberrechte | keine               |

#### Aufwand

- |                    |  |
|--------------------|--|
| • Kosten           | ca. 2'000 bis 4'000 € je Erdwärmesonde ohne Anfahrt  |
| • Aufwand Material | 1 kabelgebundener, miniaturisierter, hochauflösender Temperatursensor mit Teufengeber, K-TRT Gerät |
| • Aufwand Personal | 1 qualifizierter Mitarbeiter   |

#### Durchführung

- |                    |   |
|--------------------|---|
| • Vorgehen, Ablauf | I. Ruhetemperaturprofil; II 2 Aufheizprofile in zwei Stunden; III. bis zu 5 Abkühlprofile innerhalb von 4 Stunden nach Ende der Heizphase |
| • Zeitdauer        | 6-7 Stunden   |
| • Platzbedarf      | Platz für Geophysikwinde, und K-TRT-Gerät   |
| • Zeitpunkt        | Jederzeit nach dem Abbinden des Verfüllbaustoffes im Ringraum   |

#### Resultat

- |                     |   |
|---------------------|---|
| • Temperaturprofile | Variation der Temperaturreaktionen über die Zeit und die Tiefe. Erfahrung in der Interpretation erforderlich. |
|---------------------|---|

#### Messgenauigkeit

- |                        |  |
|------------------------|--|
| • Angaben Kalibrierung | Sehr genaue Kalibrierung nötig (absolut 0.1°K), um Vergleichs- oder Wiederholungsmessungen auswerten zu können |
| • Andere Angaben       | Messgenauigkeit: 0,01°K; Auflösung 1 cm  |

## 3.2 Methode Ruhe-p-T-log

### Überblick

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| • Bezeichnung             | Nimo-T   |
| • Kurzbeschreibung        | Messung und Auswertung von Druck- und Temperaturprofil in der Erdwärmesonde im Ruhezustand |
| • Dienstleistungsanbieter | Geowatt ( <a href="http://www.geowatt.ch">www.geowatt.ch</a> )                             |



### Einsatzbereich

- |                               |  |
|-------------------------------|--|
| • Geologische Verhältnisse    | Keine Einschränkung, im Speziellen geeignet zur Erkennung von Grundwasserströmungen  |
| • Länge Erdsonden             | Bis 500 m (40 bar Gerät), bis 1000 m (80 bar Gerät)  |
| • Durchmesser Erdsonden       | Bei Duplex EWS: min. 40 mm   |
| • Spezifische Voraussetzungen | Ingenieurleistung zur Auswertung der Temperatur log. Temperaturlogging Gerät muss vorhanden sein. Software „Nimo-T“ erstellt .csv-Datei. |

### Verbreitung

- |                 |                     |
|-----------------|---------------------|
| • Geografisch   | Keine Einschränkung |
| • Marktreife    | Mehrere Jahre       |
| • Urheberrechte | Geowatt             |

### Aufwand

- |                    |   |
|--------------------|---|
| • Kosten           | ca. 1'000 CHF – 2'000 CHF                         |
| • Aufwand Material | 1 Messgerät mit Druck-Temperatur Logger, Software |
| • Aufwand Personal | 1 Spezialist                                      |

### Durchführung

- |                    |   |
|--------------------|---|
| • Vorgehen, Ablauf | Messung des Temperaturprofils in der EWS im Ruhezustand. Die Auswertung der Profile kann Hinweise geben über mögliche Klüfte in der Hinterfüllung, Präsenz von Grundwasserströmungen sowie der Geometrie der Sonde.                               |
| • Zeitdauer        | Messung : 1 Stunde, Auswertung umgehend (ohne Bericht)  |
| • Platzbedarf      | Zugang zur Erdwärmesonde  |
| • Zeitpunkt        | Nimo-T muss vertikal eingeführt werden, also vor der Montage der y-Stücke und Anschlussleitungen. Ansonsten jederzeit, auch ohne Sonde im offenen Bohrloch. Zur Beurteilung der Hinterfüllung empfohlen: 1 Tag nach Druck- und Durchflussprüfung. |

### Resultat

- |                     |   |
|---------------------|---|
| • Messgrößen        | Zeit, Druck und Temperaturprofile       |
| • Andere Messgrößen | Vertikalität der EWS, Geometrie der EWS |

### Messgenauigkeit

- |                        |  |
|------------------------|--|
| • Angaben Kalibrierung | Schwankung Temperatur im Mittel 0.2%, Schwankung Druck im Mittel 1.04% |
| • Andere Angaben       | -  |

### 3.3 Methode Messen der Abbindewärme

#### Überblick

- Bezeichnung DeepDrifter<sup>®</sup>250 (Bild) und DeepDrifter<sup>®</sup>500
- Kurzbeschreibung Die Messsonde registriert den Temperaturverlauf und den räumlichen Verlauf einer Erdsonde. Misst man die Temperatur ein erstes Mal nach dem Ausbau der Erdsonde und ein zweites Mal nachdem die Hinterfüllung vollständig ausgehärtet ist, kann anhand der Temperaturverläufe und des Temperaturunterschiedes die Güte der Hinterfüllung beurteilt werden.
- Dienstleistungsanbieter EBERHARD & Partner AG ([www.eberhard-partner.ch](http://www.eberhard-partner.ch))



#### Einsatzbereich

- Geologische Verhältnisse Keine Einschränkungen
- Länge Erdsonden Bis 250 m in PE 32, bis 485 m in PE 40
- Durchmesser Erdsondenrohre k.A.
- Spezifische Voraussetzungen Horizontale, ebene Oberfläche, auf welcher das Messgerät und das Dreibein gut verankert werden können (Verbindungsgräben sollten noch nicht ausgehoben sein), freier Zugang.

#### Verbreitung

- Geografisch Nordwestschweiz (Kanton AG, BL, BS, LU, SO, ZH, ZG)
- Marktreife Der DeepDrifter<sup>®</sup> ist seit 2011 im Einsatz.
- Urheberrechte Geschützter Name

#### Aufwand

- Kosten CHF 2070.00
- Aufwand Material DeepDrifter<sup>®</sup> System, inkl. Kabelrolle, Dreibein, Messsonde und Stromanschluss (muss vor Ort vorhanden sein)
- Aufwand Personal Reisezeit; Aufstellen und Abbauen je 0.5 h (2 Messungen = 2 h);  
Messdauer: 1h/100m (2h)  
Vorabklärungen: 1h; Datendarstellung, Auswertung und Berichtverfassen: 6 h

#### Durchführung

- Vorgehen, Ablauf Der Zementanteil in der Hinterfüllung erreicht während seiner Abbindeung nach rund 24 Stunden seine Maximaltemperatur. Anschliessend klingt die Temperaturkurve bis zur vollständigen Abbindeung der Hinterfüllung im Laufe von vier Wochen sukzessive ab. Im Zuge der Realisierung mehrerer grosser EWS-Felder in Basel wurden nicht nur die Messwerte der räumlichen Vermessung, sondern auch die Temperaturdaten ausgewertet. Der geologische Kontext ist bei allen drei EWS derselbe, d.h. die Temperaturentwicklung wird vom Abbindevorgang des beigemischten Zementes bestimmt. Aufgrund des, während des Betrachtungszeitraums kontinuierlich rückläufigen, Temperaturverlaufs (keine positiven oder negativen Temperaturanomalien) kann auf eine gleichmässige Hinterfüllung und somit eine effiziente Wärmeübertragung zwischen dem Erdreich und der Sonde geschlossen werden.
- Zeitdauer Vorbereitung: 1h; Durchführung der Messungen bis und mit Abbau der Messeinrichtungen: Reisezeit; Aufstellen und Abbauen je 0.5 h;

	Messdauer: 1h/100m; Umstellen (mehrere Erdsonden): 0.5 h/Umstellen
• Platzbedarf	2 m ums Bohrloch (Kreis mit Radius 2 m = 12.5 m <sup>2</sup> )
• Zeitpunkt	Erste Messung: 24 h nach dem Hinterfüllen; zweite Messung: ca. 4 Wochen später
<b>Resultat</b>	
• Messgrössen	Temperatur, Kabellänge
• Andere Messgrössen	Magnetische Rotation, Pitch und Roll -> räumlicher Sondenverlauf
<b>Messgenauigkeit</b>	
• Angaben Kalibrierung	Temperatur wird in regelmässigen Abständen mit einem WTW Temperatursensor kalibriert. Für die räumliche Verlaufsüberprüfung hat der Dienstleistungsanbieter eine Kalibrierbohrung, welche von einer Drittfirma vor dem Ausbau der Erdsonde vermessen wurde.
• Andere Angaben	-

### 3.4 Beurteilung und Diskussion

Traditionell werden thermische Methoden als Planungswerkzeug verwendet, z.B. mittels Thermal Response Test (TRT). Beim TRT wird im Wesentlichen die effektive Wärmeleitfähigkeit der geologischen Schichten über den Tiefenbereich einer Erdwärmesonde gemessen. Diese Methode gilt als ideales Planungsmittel, da an einer Probebohrung die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes gemessen werden kann, die dann als Parameter in die Dimensionierung des Erdwärmesondenfelds einfließen kann. Die Genauigkeit der Dimensionierung wird damit massiv erhöht.

Technisch wird beim TRT über die Erdwärmesonde während mehreren Tagen eine definierte Wärmemenge in den Untergrund eingetragen und anschliessend dessen „Antwort“ (Abkühlung) gemessen. Sie misst somit die ungestörten thermischen Verhältnisse über die ganze Bohrtiefe und schliesst dabei die Eigenschaften der Hinterfüllung (wie auch die des Fluids und des EWS-Materials) mit ein.

Das sogenannte eTRT (enhanced Thermal Response Test, Geowatt) ist eine erweiterte Form des TRT's, welche die thermischen Eigenschaften nicht nur integral über die Länge der EWS, sondern als Funktion der Tiefe misst. Dazwischen gibt es diverse Mischformen von verschiedenen Lieferanten, welche die thermischen Eigenschaften für definierte Tiefenbereiche misst.

Die Nutzung von TRT's zur Dimensionierung von EWS-Feldern ist auch heute noch ihr häufigster Anwendungsbereich. Als reines Kontrollwerkzeug sind sie weniger geeignet, da sie relativ aufwendig sind und Aufschluss über gesamten thermischen Eigenschaften um die EWS geben, und ein direkter Rückschluss über die Qualität der Hinterfüllung damit nicht möglich ist.

Die drei in diesem Kapitel beschriebenen Methoden sind vergleichsweise wenig aufwendig, somit kostengünstiger und für die Beurteilung der Hinterfüllung effektiver. Wir unterscheiden dabei drei vom Messziel her unterschiedliche Methoden: Der kurz-TRT misst die Abkühlkurve nach Aufheizen des Bohrlochs, der Ruhe-p-T-log misst das Temperaturprofil nach der Hinterfüllung, und schliesslich das Messen der Abbindewärme durch Vergleichsmessung des Temperaturprofils 24 h nach Hinterfüllung (Maximaltemperatur) und ca. vier Wochen später. Die Grenzen zwischen den jeweiligen Methoden und Geräten sind allerdings fließend. So können Deep Drifter und Nimo-T grundsätzlich auch für ein kurz-TRT benutzt werden. Ebenso könnte der Nimo-T durch

Vergleichsmessung die Abbindewärme messen. Historische und patentrechtliche Gründe haben aber dazu geführt, dass gewisse Geräte auch direkt einer Methode zugeordnet werden.

Bei allen Geräten zur thermischen Messung wird erwartet, dass sich markante Mängel in der Qualität der Hinterfüllung in einer Anomalie im Temperaturprofil während der Abkühlung zeigen. Ob und inwiefern aufgrund einer Anomalie – bzw. aufgrund Fehlens von Anomalien – auf Lücken oder auf Vollständigkeit der Hinterfüllung geschlossen werden kann, hängt zu einem grossen Teil von der Wassersättigung in den entsprechenden geologischen Schichten ab. Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser ist höher als von Hinterfüllmaterial, selbst bei thermisch verbessertem Hinterfüllmaterial.

### **Einsatzmöglichkeiten**

Die hier beschriebenen thermischen Methoden werden nach Abschluss der Bohr- und Hinterfüllarbeiten eingesetzt. Je nach Lieferant wird empfohlen, mehrere Tage bis zum Messbeginn abzuwarten, damit sich Erdwärmesonde, Hinterfüllung und Umgebungsgestein im thermischen Gleichgewicht befinden. Die Hinterfüllung der Erdwärmesonde kann mit vernünftigem Aufwand zu diesem Zeitpunkt nicht mehr angepasst werden.

Sondenlängen, -durchmesser oder –geometrie haben keinen Einfluss auf die Durchführbarkeit der Methoden. Der Entscheid zum Einsatz wird in der Regel nach wirtschaftlichen Kriterien getroffen (Aufwand – Ertrag).

Bei guter Organisation wird der Bauablauf während der Messung kaum tangiert, da die Messeinrichtungen, im Vergleich zur Bohreinrichtung, relativ wenig Platz beanspruchen. Für den allgemeinen Bauablauf ist der Zeitpunkt der Messung trotzdem relevant, da die Erdwärmesonden bis dahin nicht an das Verteilsystem angeschlossen und eingegraben werden können. Die oben aufgeführten Methoden / Geräte unterscheiden sich durch den Messzeitpunkt, bzw. durch die Messdauer. Während der Nimo-T gemäss Angaben der Anwender ein Tag nach Abschluss der Bohrarbeiten durchgeführt werden kann und eine einmalige Messung ausreichend ist, benötigt der Deep Drifter eine zweite Messung nach ca. vier Wochen. Während dieser Zeit muss die EWS vertikal zugänglich bleiben. Beim kurz-TRT reicht ebenfalls eine einzelne Messung nach der Abbindezeit der Hinterfüllung, welche je nach Baustoff wenige Tage bis ca. 1 Woche beträgt. Des Weiteren gilt es zu berücksichtigen, dass jede Messung einer Momentaufnahme entspricht. Resultierende thermische Eigenschaften hängen letztlich von weiteren Faktoren ab, wie zum Beispiel die Dimensionierung der Gesamtanlage, oder die Anzahl Betriebsstunden pro Jahr.

Sowohl Deep Drifter wie auch Nimo-T können durch den Vergleich zwischen Erdwärmesondenlänge und Druckdifferenz auf die Vertikalität der EWS rückschliessen.

Für alle Methoden und Geräte zwingende Voraussetzungen für die Durchführbarkeit sind vollständige Bohrprotokolle, geologische Profilaufnahmen und die Minimierung äusserer Einflüsse während der Messung (Erschütterungen, Gewitter,...). Die Messungen können aus technischer Sicht in der Regel problemlos durchgeführt werden, allerdings nicht durch die Bohrmannschaft selber, sondern nur von ausgebildeten Spezialisten.

### **Interpretation der Messergebnisse**

Der Zeitaufwand für Auswertung und Interpretation ist bei den meisten thermischen Methoden relativ gross. Mit der Nimo-T kann gemäss Angaben von Anwendern eventuell bereits auf der Baustelle eine Angabe über die thermischen Eigenschaften gemacht werden.

Die Messresultate (Druck und Temperatur) können umso besser interpretiert werden, je mehr zusätzliche Informationen aus der Bohr- und Hinterfüllarbeit bekannt sind (geologisches Profil, Bohr-, Abpress-, Druck- und Durchflussprotokoll).

Die thermischen Methoden können im Wesentlichen die Garantie liefern, dass grundsätzlich hinterfüllt worden ist. Rückschlüsse auf die Qualität der thermischen Anbindung der EWS an den Untergrund sind jedoch Bestandteil der Interpretation, da keine einfache Beziehung zwischen der Hinterfüllung und den gemessenen Werten besteht.

### **Weitere Anmerkungen und Erfahrungen**

Es ist zu beachten, dass zwischen Bohr- und Hinterfüllarbeit einerseits und der Messung andererseits häufig Tage bis Wochen liegen. Auf jeden Fall können zum Zeitpunkt der Messung mit vertretbarem Aufwand keine Änderungen am gemessenen Bohrloch mehr vorgenommen werden. Gegebenenfalls können bei EWS-Feldern Rückschlüsse für das Bohrkonzept von weiteren Bohrungen gezogen werden.

Durch Messungen wurden auch schon Erdwärmesonden beschädigt bzw. Sensoren oder Kabel eingeklemmt, sodass die betroffene Erdwärmesonde unbrauchbar wurde. In den letzten Jahren wurden die Messmethoden weiter entwickelt. So gibt es inzwischen kabellose Sensoren (z.B. Nimo-T). Bei kabellosen Sensoren besteht wiederum das Risiko, dass sie nicht mehr herausgespült werden können, wenn der Erdwärmesonden-Rücklauf gequetscht ist.

Wie bei der Bohrung und bei der Hinterfüllung passieren Fehler auch bei der Messung, bzw. bei deren Auswertung und Interpretation. Die Konsequenzen dabei sind unter Umständen weitreichend. Gemäss Aussagen verschiedener Akteure haben Fehler rund um Erdwärmesonden-Bohrungen meist mit zu hohem Zeitdruck zu tun. Vor allem auf Grossbaustellen ist der Terminplan häufig zu knapp für zeitintensive Messmethoden.

Im Zuge der Interviews wurden von verschiedener Seite auch Temperaturfühlkabel (Glasfaser) als weitere thermische Methode genannt. Diese Kabel werden mit den Erdwärmesonden ins Bohrloch abgeteuft und liefern kontinuierlich ein Messsignal. Sie erlauben somit eine langfristige und präzisere Temperaturmessung.

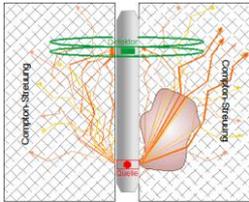
Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich je nach Gerät mit mehr oder weniger Zeitaufwand die thermischen Untergrundeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit) im Bereich der Erdwärmesonde messen lassen. Weitere integrale Eigenschaften wie der Bohrlochwiderstand lassen sich daraus ermitteln. Da die Hinterfüllung selbst nur einer von vielen Einflussfaktoren ist, sind direkte Rückschlüsse auf deren Qualität nicht möglich. Die thermischen Methoden eignen sich somit als Planungswerkzeug, jedoch nur bedingt zur Kontrolle der Hinterfüllung.

Sowohl der Thermal Response Test als auch die Ruhe-p-T-log Methoden sind bei den Akteuren auf dem Schweizer Geothermiemarkt in der Regel bekannt und werden mittels Spezialisten auch angewandt. Die gemachten Erfahrungen bezüglich Aufwand und Ertrag im Zusammenhang mit Messung der thermischen Untergrundeigenschaften sind meistens positiv. Eher wenig Erfahrung besteht mit der Kontrolle der Hinterfüllung durch diese Methoden.

## 4 Radioaktive Methoden

### 4.1 Methode Gamma-Gamma-Dichte-Anomalie Methode

#### Überblick

- |   |   |   |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezeichnung</li> <li>• Kurzbeschreibung</li> </ul> | <p>Gamma-Gamma-Dichteanomalie-Messung</p> <p>Die Gamma-Gamma-Dichte-Anomalie-Messung ist ein für Erdwärmesonden adaptiertes, geophysikalisches Messverfahren, das die Dichtehomogenität der Ringraumhinterfüllung überprüft. Über die am Detektor registrierte Rückstreuung der von einer Quelle ausgesandten Gamma-Photonen werden Dichte-Anomalien im Baustoff des Ringraumes aufgespürt.</p> |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dienstleistungsanbieter</li> </ul>                 | <p>z.B. André Voutta Grundwasserhydraulik (D); <a href="http://www.avoutta.de">www.avoutta.de</a></p>   |   |

#### Einsatzbereich

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geologische Verhältnisse</li> <li>• Länge Erdsonden</li> <li>• Durchmesser Erdsonden</li> <li>• Spezifische Voraussetzungen</li> </ul> | <p>Alle. Keine Einschränkungen.</p> <p>Bestimmt von der Befahrbarkeit der Erdwärmesonde mit Messsonde</p> <p>&gt; 20 mm</p> <p>Beachtung der nationalen Strahlenschutzregelung</p> |
|---|--|

#### Verbreitung

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geografisch</li> <li>• Marktreife</li> <li>• Urheberrechte</li> </ul> | <p>Deutschland, im Prinzip keine Einschränkung</p> <p>Reif</p> <p>keine</p> |
|--|---|

#### Aufwand

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kosten</li> <li>• Aufwand Material</li> <li>• Aufwand Personal</li> </ul> | <p>ca. 6€/m plus Aufwendung für Interpretation und Anfahrt</p> <p>1 Gamma-Gamma-Dichte-Anomaliesonde + bohrlochgeophysikalische Ausrüstung</p> <p>1 Messtechniker mit entsprechender Strahlenschutz-Ausbildung</p> |
|--|--|

#### Durchführung

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorgehen, Ablauf</li> <li>• Messdauer</li> <li>• Platzbedarf</li> <li>• Zeitpunkt</li> </ul> | <p>Gamma-Gamma Dichte-Anomalie-Profil</p> <p>1.5 Std. für 100 m Erdwärmesonde</p> <p>Geophysikwinde und Messcomputer</p> <p>Nach Abschluss des Hinterfüllvorgangs jederzeit möglich</p> |
|---|---|

#### Resultat

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dichte-Anomalie</li> </ul> | <p>Materialprüfung: Profil zur Dichtehomogenität der Hinterfüllung.</p> |
|---|---|

#### Messgenauigkeit

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Allgemein</li> <li>• Andere Angaben</li> </ul> | <p>Qualitative Erfassung der Dichtehomogenität im Ringraum</p> <p>Kombiniert mit K-TRT erhöht die Aussagekraft der Interpretation</p> |
|---|---|

## 4.2 Methode Gamma-Ray-Log (GR)

### Überblick

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| • Bezeichnung             | Gamma-Ray-Log (GR), Modifikation Segmentiertes Gamma-Ray-Log (SGL) = Messung in verschiedene Richtungen somit Nachweis einer rundum homogenen Abdichtung             |
| • Kurzbeschreibung        | Standard-Bohrlochmesssonde   |
| • Dienstleistungsanbieter | Messdurchführung als Miniaturvariante (20 mm) oder mit Knickgelenken von Bohrlochmessung-Storkow GmbH ( <a href="http://www.blm-storkow.de">www.blm-storkow.de</a> ) |



### Einsatzbereich

- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| • Geologische Verhältnisse    | Keine anstehenden stark gammaaktiven Gesteine (z.B. Arkosen)                              |
| • Länge Erdsonden             | Unbegrenzt, bei Durchmesser unter 35 mm bis maximal 200 m                                 |
| • Durchmesser Erdsondenrohre  | 24 mm   |
| • Spezifische Voraussetzungen | gammaaktiv markierte Tone oder Ton-Zement-Suspensionen (z.B. durch Zusatz von Zirkonsand) |

### Verbreitung

- |                 |  |
|-----------------|--|
| • Geografisch   | Im Einsatz und Anwendung weltweit  |
| • Marktreife    | Seit etwa 1945, zum Nachweis der Ringraumabdichtung in Brunnen und Grundwassermessstellen seit etwa 30 Jahren, in Erdwärmesonden seit 2005 |
| • Urheberrechte | keine  |

### Aufwand

- |                    |  |
|--------------------|--|
| • Kosten           | Ca. 1000 € plus Anfahrt  |
| • Aufwand Material | Messfahrzeug mit Winde   |
| • Aufwand Personal | 1 sachkundige Person für Messung, Auswertung durch Geophysiker |

### Durchführung

- |                    |  |
|--------------------|--|
| • Vorgehen, Ablauf | Einfahrt der Messsonde bis Endteufe, Messung erfolgt mit ca. 4 m/Minute aufwärts   |
| • Zeitdauer        | Ca. 45 Minuten   |
| • Platzbedarf      | Kleintransporter muss an Bohrgerät gestellt werden   |
| • Zeitpunkt        | Messung als Anstiegsmessung beim Verpressvorgang aber auch als Nachmessung möglich, Wiederholbarkeit nach Jahren möglich |

### Resultat

- |                     |                                 |
|---------------------|---------------------------------|
| • Messgrößen        | natürliche Gammastrahlung (API) |
| • Andere Messgrößen | Messteufe wird mit registriert  |

### Messgenauigkeit

- |                        |   |
|------------------------|---|
| • Angaben Kalibrierung | Kalibrierung in Gamma-Standards auf API   |
| • Andere Angaben       | Problem: Es erfolgt nur der Nachweis der gammaaktiven Markierung des eingebrachten Baustoffes. Somit werden zwar Verfülllücken auf Grund des fehlenden Signals gefunden zur Qualität des Hinterfüllmaterials (z.B. Konsistenz, Verdünnung durch Wasser und Bohrspülung oder Akkumulation von Fremdmaterial) können jedoch keine Aussagen gemacht werden.<br>Kein Nachweis der hydraulischen Wirksamkeit der Ringraumabdichtung, |

---

Auswertung der Messung möglichst nur durch erfahrenen Bohrloch-geophysiker.

---

### 4.3 Beurteilung und Diskussion

Man kann bei den radioaktiven Methoden im Wesentlichen zwei verschiedene Kategorien unterscheiden: Gamma-Ray-Log, welche die natürliche  $\gamma$ -Strahlung im Bohrloch misst, und der Gamma-Gamma-log, bei welcher das Bohrloch mit einer radioaktiven Strahlungsquelle durchfahren und die Rückstreuung gemessen wird. Um Hohlräume aufzuspüren, wird die Eigenschaft genutzt, dass das  $\gamma$ -Signal proportional zur Dichte der Umgebung ist.

Bei der Baugrunderkundung kommen diese Methoden schon seit geraumer Zeit zum Einsatz für die Analyse der erbohrten Schichten und Hohlräume. Die Durchführung geschieht dabei im nicht hinterfüllten, offenen Bohrloch. Zur Nutzung dieser Methoden für die Messung der Hinterfüllung (bzw. dessen Dichteprofil), muss der logging-Sensor den EWS-Schlauch selbst durchfahren. Ein weiterer prinzipieller Unterschied zur Baugrunderkundung besteht darin, dass die Hinterfüllung keine natürliche Radioaktivität besitzt und somit gamma-aktiv dotiert werden muss.

Generell ist zu erwähnen, dass vor allem in der Schweiz, noch kaum Erfahrungen mit der Prüfung der Hinterfüllung von Erdwärmesonden mittels dieser Methoden gemacht worden sind. Die meisten Akteure, welche im Rahmen dieser Studie befragt worden sind, haben entweder keine Erfahrungen mit diesen Methoden, oder allenfalls nur aufgrund von Arbeiten am offenen Bohrloch im Zusammenhang mit Baugrunduntersuchungen.

Ein spezielles Verfahren ist der Gasdynamische Test, welcher von Storkow GmbH angeboten wird, und Aufstiegsbahnen von Gasen messen und dadurch die Qualität von Ringraumabdichtungen (z.B. Packer) beurteilen kann. Da diese Methode nicht direkt mit Hinterfüllung und thermischer Anbindung verknüpft ist, wird sie im Rahmen dieser Studie nicht weiter besprochen.

Im Folgenden werden sowohl Gamma-Ray-Log (mit radioaktiver Dotierung) und Gamma-Gamma-log näher beurteilt und diskutiert.

#### Einsatzmöglichkeiten

Beide hier vorgestellten Methoden sind grundsätzlich bei jeder Geologie anwendbar. Allerdings bestehen auch im natürlichen Umgebungsgestein grosse Unterschiede in der Gamma-Aktivität. Zum Beispiel besitzen Tone und Tonsteine eine relative hohe Gamma-Strahlung, während dem Sand- oder Kalksteine kaum bis keine Gamma-Aktivität besitzen. Dies muss bei diesen Methoden berücksichtigt werden. Nicht zuletzt sind dadurch geologische Information über das Umgebungsgestein von enormer Bedeutung und hat direkten Einfluss auf die Realisierbarkeit der Messung.

Ob die jeweiligen radioaktiven Methoden auch in Erdwärmesonden (grössere Tiefe, geringerer Durchmesser) genutzt werden kann, hängt letztlich von den Abmessungen der einzubringenden Sensoren ab. Im Speziellen die vergleichsweise geringen Durchmesser von Doppel-U- Sonden können das Einsatzspektrum einschränken. Ausserdem muss gewährleistet sein, dass keine Verwässerung des  $\gamma$ -Signals durch den Einfluss des Umgebungsgesteins besteht. Aufgrund der grösseren Durchmesser könnten diese Methoden für die Messung in Koaxialsonden eher in Frage kommen als in Duplex-Sonden. Die Messungen benötigen im Vergleich zu den Bohrarbeiten an

sich relativ wenig Zeit und Platz. Allerdings können sie nur durch spezialisierte Unternehmungen durchgeführt werden, mit Experteneinsatz vor Ort.

### **Interpretation der Messergebnisse**

Aufgrund der direkten Beziehung zwischen dem Gamma-Signal und lokaler Dichte, kann mit den radioaktiven Methoden theoretisch direkt die Vollständigkeit und somit die Qualität der Hinterfüllung gemessen werden.

Nebst der bereits oben genannten Unsicherheit der Gamma-Aktivität im Umgebungsgestein, ist bei der Interpretation zudem auf den Umstand der unbekanntenen Bohrloch- und EWS-Geometrie zu achten: Nicht nur, dass Bohrungen so gut wie nie vertikal verlaufen, sondern auch die Erdwärmesonde in sich besitzt im Bohrloch eine eher zufällige Ausrichtung. Sie wickelt sich im Bohrloch um die eigene Achse (Spiralität), und jeder Schlauch hat einen stark veränderlichen Abstand zu den anderen Schläuchen, zur Bohrlochachse, und somit auch zur Bohrlochwand. Dies hat eine ständige Veränderung des Abstands zwischen Messsonde und Bohrlochzentrum und somit eine ständige Veränderung des  $\gamma$ -Signals zur Folge, welche unter Umständen nicht von effektiven Lücken in der Hinterfüllung unterschieden werden kann. Durch Benutzen von Abstandhaltern bei Duplex-Sonden kann diesem Umstand etwas entgegengetreten werden.

Selbst wenn oben genannte Unsicherheiten ausgeschlossen werden können, bleibt ein direkter Rückschluss auf die effektive thermische Anbindung der Erdwärmesonde an den Untergrund (im Sinne des reziproken thermischen Widerstands) schwierig, da die thermische Anbindung von weiteren Faktoren abhängt, wie z.B. die Wassersättigung oder die thermischen Eigenschaften des natürlichen Umgebungsgesteins.

### **Weitere Anmerkungen und Erfahrungen**

Radioaktive Methoden werden in der Schweiz standardmässig in offenen Bohrlöchern, z.B. bei Baugrunderkundungen angewandt. Die entsprechenden Erfahrungen bei EWS-Systemen hingegen sind momentan noch sehr gering. Messungen mit radioaktiven Methoden können nur durch erfahrene Bohrlochphysiker durchgeführt und interpretiert werden.

Zusammenfassend lässt sich aber festhalten, dass die radioaktiven Methoden vom Verfahren her attraktiv sind, weil sie im Vergleich zur Bohrung relativ wenig Platz und Zeit benötigen und praktisch jederzeit nach der Hinterfüllung durchgeführt werden können. Weiter oben genannte Unsicherheiten wie die Radioaktivität des Umgebungsgesteins und die Spiralität der Erdwärmesonde ausgeschlossen, können sie im Prinzip die Vollständigkeit der Hinterfüllung direkt messen.

Auch für diese Methoden gilt, dass zum Zeitpunkt der Messung die Hinterfüllung der Erdwärmesonden mit vertretbarem Aufwand nicht mehr angepasst werden kann. Diese Methoden sind als Kontrollwerkzeug zu verstehen, im Idealfall ergänzend zu anderen Methoden. Gegebenenfalls können bei Erdwärmesonden-Feldern Rückschlüsse für das Bohrkonzzept von weiteren Bohrungen gezogen werden.

## 5 Mechanische Methoden

### 5.1 Methode Digital Borehole Observation 3

<b>Überblick</b>	
• Bezeichnung	Digital Borehole Observation 3
• Kurzbeschreibung	Messapparatur zur digitalen Überwachung des Abdichtungsvorganges im Bohrloch.
• Dienstleistungsanbieter	Dietrich, DBO-3 oder Sotronix (Software Entwickler, Industrieelektronik) www.dietrich-erdwaerme.de
<b>Einsatzbereich</b>	
• Geologische Verhältnisse	Keine Einschränkung
• Länge Erdsonden	In Abhängigkeit von der eingesetzten Drucksonde und deren Auflösung nicht begrenzt.
• Durchmesser Erdsonden	Bei den heute üblichen Durchmessern bestehen keine Einschränkungen
• Spezifische Voraussetzungen	Angepasstes Bohrgerät. Drucksensor ist in einer Verpresslanze untergebracht.
<b>Verbreitung</b>	
• Geografisch	Deutschland, im Prinzip ohne Einschränkungen
• Marktreife	Im dauernden Einsatz seit 2011
• Urheberrechte	Deutsches Patent- und Markenamt Gebrauchsmuster Nr. 20 2011 107 616.8
<b>Aufwand</b>	
• Kosten	ca. 18'000 Euro (Kaufpreis Gerät)
• Aufwand Material	Umsetzung der Apparatur auf dem Bohrgerät. Verpresslanze. Datalogger.
• Aufwand Personal	Kein nennenswerter
<b>Durchführung</b>	
• Vorgehen, Ablauf	Die von Dietrich eingesetzte Apparatur ermöglicht eine kontinuierliche Erfassung von : Druckpotenzial, Suspensions- und Wasserständen im Bohrloch, Tiefenlagen von Verlusthorizonten, nachvollziehbaren Verpressmengen, Nachweis einer vollständig verpressten Bohrung.
• Zeitdauer	Während der Verpressung der Hinterfüllung
• Platzbedarf	Kein zusätzlicher Bedarf, da die Apparatur auf dem Bohrgerät eingesetzt ist
• Zeitpunkt	Während dem Einbringen der Hinterfüllung
<b>Resultat</b>	
• Messgrößen	Druck, Durchfluss
• Andere Messgrößen	Optional als Bohrdatenschreiber aufrüstbar
<b>Messgenauigkeit</b>	
• Angaben Kalibrierung	0 – 26 bar < $\pm 0.5\%$
• Andere Angaben	

## 5.2 Methode Hinterfüllungsmessgerät

### Überblick

- Bezeichnung Hinterfüllungsmessgerät, HMG-K oder HMG-S
- Foto



- Kurzbeschreibung HMG-S und HMG-K. Ausgabe Messprotokoll. HMG-K Messgerät im Einsatz. Das HMG-S misst kontinuierlich den Durchfluss und den Injektionsdruck der Suspension. Das HMG-K misst zusätzlich die Dichte der Suspension.
- Dienstleistungsanbieter Geowatt AG (Geräteentwicklung und Vermietung) [www.geowatt.ch](http://www.geowatt.ch)

### Einsatzbereich

- Geologische Verhältnisse Alle, keine Einschränkung
- Länge Erdsonden keine Einschränkung
- Durchmesser Erdsonden Alle, keine Einschränkung
- Spezifische Voraussetzungen keine

### Verbreitung

- Geografisch Schweiz, keine Einschränkung
- Marktreife Im Einsatz seit 2011
- Urheberrechte Patentierte

### Aufwand

- Kosten ca. 200 CHF pro Sonde + Initialpauschale in Abhängigkeit davon, ob das Gerät abgeholt/gebracht wird und ob noch Instruktionen notwendig sind.
- Aufwand Material 1 Messgerät (Vermietung) mit 2 Anschlüssen, Auswertung durch Geowatt
- Aufwand Personal 1 Bohrgehilfe auf Baustelle für die Installation und jeweilige Reinigung

### Durchführung

- Vorgehen, Ablauf Das Gerät wird zwischen Injektionspumpe und Sonde mit dem Injektionsschlauch verbunden. Während der Injektion werden die aktuellen Daten an der Geräteanzeige laufend ausgegeben. Die gespeicherten Daten werden automatisch an Geowatt geschickt. Nach der Hinterfüllung muss das Gerät sofort mit Wasser durchgespült werden, was im gleichen Arbeitsgang wie die Reinigung der Injektionsschläuche erfolgt.
- Zeitdauer Während Verpressung Hinterfüllung, in Abhängigkeit der Injektionspumpe
- Platzbedarf gering (siehe Foto)
- Zeitpunkt Während dem Einbringen der Hinterfüllung

### Resultat

- Messgrößen Suspensionsfluss, Injektionsdruck, Suspensionsdichte, Zeit/Datum, kontinuierlich
- Andere Messgrößen Anhand der Messdaten lassen sich auch die Tieflagen von allfälligen Klüften sowie das Bohrlochkaliber und die Vollständigkeit der Hinterfüllung bestimmen.

### Messgenauigkeit

• Angaben Kalibrierung	Die gemessenen Parameter (Durchfluss, Druck, Dichte) sind ca. 5% genau.
• Andere Angaben	

### 5.3 Methode HDG EWS - Datalogger

#### Überblick

• Bezeichnung	HDG EWS Datenlogger DT Memo
• Foto	-
• Kurzbeschreibung	Bei diesem System wird die Suspensionsmenge über einen magnetisch-induktiven Durchflussmesser (MID) gemessen. Dieser ist mit dem Datenlogger verbunden, welcher sowohl den aktuellen Durchfluss, als auch die Gesamtmenge der Suspension erfasst und speichert. Auf der komplett mit Wasser gefüllten und entlüfteten Erdwärmesonde wird ein Druckgeber aufgebaut, mit dem der Innendruck der Erdwärmesonde aufgenommen und an den Datenlogger übertragen wird. Durch eine Referenzmessung der ersten Verfüllung wird dieser Druckanstieg bei der nächsten Verfüllung und weitere Faktoren zur Errechnung der Suspensionstiefe herangezogen und ebenfalls im Display angezeigt.
• Dienstleistungsanbieter	HDG Umwelttechnik GmbH ( <a href="http://www.hdg-gmbh.com">www.hdg-gmbh.com</a> )

#### Einsatzbereich

• Geologische Verhältnisse	Keine Beschränkung
• Länge Erdsonden	Keine Beschränkung
• Durchmesser Erdsondenrohre	Alle
• Spezifische Voraussetzungen	Keine

#### Verbreitung

• Geografisch	Deutschland, Österreich, Schweiz, keine Einschränkung
• Marktreife	ja
• Urheberrechte	k.A.

#### Aufwand

• Kosten	ca. 18'500 € (Kaufpreis Gerät)
• Aufwand Material	Magnetisch-induktiver Durchflussmesser (MID), Datenlogger, Druckgeber
• Aufwand Personal	1 Geräteführer für Installation und für die Interpretation

#### Durchführung

• Vorgehen, Ablauf	Siehe oben
• Zeitdauer	Während Verpressung Hinterfüllmaterial
• Platzbedarf	Minimal (Messkoffer sowie induktiver Durchflussmesser max. 1m <sup>2</sup> )
• Zeitpunkt	Während dem Einbringen der Hinterfüllung

#### Resultat

• Messgrößen thermische Anbindung	Druck, Durchfluss, Gesamtmenge der Suspension
• Andere Messgrößen	-Tiefe - Durchführung und Dokumentation von Dichtheits- und Funktionsprüfung gemäß SIA 384/6 - Das Messsystem beinhaltet zusätzlich die Prüfabläufe nach SVGW W4, DVGW 400-2 zur Prüfung der horizontalen Anschlussleitungen und zur

Endabnahme nach dem Kontraktionsverfahren.  
 - Zulassung und Genauigkeit machen das System zur Prüfung von Gasleitungen bis PN5 einsetzbar.

---

#### Messgenauigkeit

---

- |                        |  |
|------------------------|--|
| • Angaben Kalibrierung | 1 x jährliche Überprüfung durch den Hersteller mit Werkszertifikat |
| • Andere Angaben       | Erfüllt Anforderung DVGW/SVGW/ÖVGW und SIA CE-Konform              |
- 

## 5.4 Beurteilung und Diskussion

Als mechanische Methoden werden jene Verfahren bezeichnet, die während des Hinterfüllvorgangs physikalische Parameter wie Injektionsdruck, Suspensionsdurchfluss und -dichte messen und aufzeichnen. Häufig werden sie auch volumetrische Methoden genannt. Von drei Lieferanten wurden nun im Rahmen dieser Studie je eine Geräte (-gruppe) beschrieben: Der DBO-3, der HMG-S/K sowie der EWS Datenlogger. Es gibt noch zahlreiche weitere Methoden oder Geräte, welche sich aber vom Prinzip her meistens nur wenig unterscheiden. Ein Beispiel dafür ist der p-V-Registrierer von Kuchler Technik.

Die mechanischen Methoden weisen prinzipielle Vorteile gegenüber den anderen Methoden auf. Erstens können sie nach Erstinstruktion von der Bohrunternehmung selbst durchgeführt werden, was die Kosten insgesamt tief hält. Zweitens können mechanische Methoden noch während des Bohrablaufs Informationen liefern, sodass auf allfällige geologisch bedingte Probleme noch reagiert werden kann. Aus diesem Grund gelten die mechanischen Methoden als die wichtigsten Mittel zur Qualitätssicherung bei der Hinterfüllung von Erdwärmesonden.

Mechanische Methoden zur Überprüfung der Hinterfüllung werden zwar ab und zu in die Ausschreibung mit aufgenommen, häufig aber aus finanziellen Gründen nicht durchgeführt. Die Einsatzgrenzen sind somit häufig nicht technisch bedingt, sondern finanzieller Natur. Diese Tatsache wird von allen interviewten Akteuren bedauert.

### Einsatzmöglichkeiten

Die mechanischen Methoden können für alle Sondendurchmesser und Bohrtiefen eingesetzt werden. Die Adhäsion (Anhaftung oder „Verklebung“) muss bei der Wahl der Pumpentechnik, des Pumpenfabrikats sowie bei der Wahl der Viskosität der Suspension beachtet werden. Um die Parameter bereits im Vorfeld der Bohr- und Hinterfüllarbeiten richtig einschätzen zu können, sind vorgängige geologische Informationen von grossem Nutzen. Diese Faktoren sind auch die wichtigsten Voraussetzungen für die Funktionstüchtigkeit der mechanischen Methoden.

Die mechanischen Methoden brauchen wenig Platz und wenig Zeit im Vergleich zur Bohrung an sich. Für die optimale Durchführung muss die Messung in den ordentlichen Bauablauf eingeplant werden, was oft nicht bzw. noch zu wenig gemacht wird, weil die Bohrunternehmungen in der Regel keine koordinativen Tätigkeiten übernehmen. Der Organisationsbedarf von der Bohrunternehmung ist aber gerade bei den mechanischen Methoden grösser als bei den anderen Methoden, da sie noch während dem Hinterfüllvorgang benutzt werden. Nach erfolgter Erstinstruktion durch den Lieferanten ist in der Regel mit wenigen Stunden zusätzlichem Zeitaufwand für eine Person des Bohrtrups zu rechnen.

Bezüglich Platzbedarf ist das Gerät DBO-3 noch explizit zu erwähnen, da es auf dem Bohrgerät montiert wird, und somit keinen zusätzlichen Platz- und Installationszeitbedarf erfordert.

### **Interpretation der Messergebnisse**

Die mechanischen Methoden funktionieren technisch gut. Die zu messenden Parameter wie Druck, Dichte und Volumen pro Zeit sind in der Regel eindeutig definiert und können digital aufgezeichnet werden. Der Interpretationsspielraum ist somit kleiner als bei den anderen Methoden.

Sie können umgehend die Garantie liefern, dass hinterfüllt wird, und das totale Volumen messen, welches ins Bohrloch injiziert worden ist. Einen allfälligen Suspensionsverlust erkennt man durch Vergleich mit dem ursprünglich erwarteten, benötigten Suspensionsvolumen. Die Gründe für den Suspensionsverlust sind allerdings wiederum Bestandteil der Auswertung und der Interpretation. Dasselbe gilt auch für die Beurteilung der thermischen Anbindung. Momentan gibt es in der Schweiz noch keine Standards oder Normen bezüglich Durchführung und Auswertung dieser bohrbegleitenden Methoden.

Ein vom Konzept her verwandte Methode wird von jeder sorgfältig arbeitenden Bohrfirma ohnehin benutzt: Vor Bohrbeginn wird das zu erwartende Volumen an Suspension für das entsprechende Bohrloch errechnet. Daraus ergibt sich aufgrund der Angaben des Baustoffherstellers das dafür notwendige Trockengewicht an Hinterfüllmaterial. Weicht dieses stark von der effektiv verwendeten Menge ab, hat man es mit signifikantem Suspensionsverlust zu tun und der Geräteführer ist angehalten, entsprechend zu reagieren. Dies erfordert eine gewissenhafte Durchführung und eine saubere Protokollierung, welche im Mindesten folgende Informationen enthält: Produkt (Fabrikat des Baustoffs), spezifisches Gewicht (gemessen an Probe), theoretisch benötigte und total verbrauchte Menge, und die Frage ob und wann die Suspension Oberkante Terrain erreicht.

### **Weitere Anmerkungen und Erfahrungen mit der Methode**

Praktisch alle ausführenden oder planenden Geothermie-Unternehmungen in der Schweiz haben Erfahrungen mit den Einrichtungen und Geräten der mechanischen Methoden. Die meisten Bohrfirmen setzen sehr ähnliche Geräte ein.

Am meisten Erfahrungen haben die Interviewpartner mit der HMG-Methode. Die Messung selbst wurde in der Regel positiv beurteilt, allerdings mit dem Zusatz, dass kaum Rückschlüsse auf die Beschaffenheit des Untergrunds oder die thermische Anbindung der Erdwärmesonde gewonnen werden konnten.

Die mechanischen Methoden sind beim Baustellenpersonal relativ gut akzeptiert, da sie intuitiv und relativ leicht verständlich funktionieren. Als einzige der vier Methodenkategorien erlauben sie ausserdem eine Überprüfung der Hinterfüllung während des Verpressvorgangs. Werden tatsächlich Probleme erkannt, kann der Hinterfüllvorgang noch aktiv beeinflusst werden, z.B. mittels Verändern der Suspensionsviskosität durch Zumischen von Bentonit, Verwenden von Spezialmaterialien wie thixotrope Tonpellets, oder auch der Einbau von Hilfsmitteln wie Geotextilstrumpf oder EWS-Packern. In bohrtechnisch anspruchsvollen Gebieten empfiehlt es sich auf jeden Fall Probebohrungen mit direkter Messung des Hinterfüllvorgangs, entsprechend hier vorgestellter Methoden.

## 6 Magnetische Methoden

### 6.1 Methode Magnetik-Cemtrakker

#### Überblick

- |   |   |   |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezeichnung</li> <li>• Kurzbeschreibung</li> </ul> | <p>CemTrakker</p> <p>Der CemTrakker ist ein präzises Messgerät zu Detektion ferromagnetischer und elektrisch leitfähiger Materialien. Zusätzlich ist ein Magnetisch Induktiver Durchflussmengenmesser (MID) notwendig. Anforderungen: Protokollierung des eigentlichen Verpressvorganges nach LQS Baden-Württemberg; Protokollierung des ausgehärteten Verpressmaterials.</p> |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dienstleistungsanbieter</li> </ul>                 | <p>Santherr-Geothermietechnik<br/>www.santherr-geothermietechnik.com</p>  |   |

#### Einsatzbereich

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geologische Verhältnisse</li> <li>• Länge Erdsonden</li> <li>• Durchmesser Erdsondenrohre</li> <li>• Spezifische Voraussetzungen</li> </ul> | <p>Alle</p> <p>Bis 250 m, kann auf Kundenwunsch auf 400m erweitert werden</p> <p>DA25 und grösser</p> <p>Magnetische Dotierung im Hinterfüllungsmaterial nötig. Z.B. Schwenk Füllbinder EWM-Plus oder Schwenk H-hs plus</p> |
|--|---|

#### Verbreitung

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geografisch</li> <li>• Marktreife</li> <li>• Urheberrechte</li> </ul> | <p>Deutschland, Österreich, Schweiz und Frankreich</p> <p>Neu</p> <p>Füllbinder kann patentiert sein.</p> |
|--|---|

#### Aufwand

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kosten</li> <li>• Aufwand Material</li> <li>• Aufwand Personal</li> </ul> | <p>CemTrakker ca. 18.500,00 € (Kaufpreis Gerät), MID ca. 2.700,00 €</p> <p>Spezielles Hinterfüllungsmaterial (Schwenk Füllbinder), CemTrakker (Messgerät) und MID</p> <p>1 Bohrergeräteleiter, 1 Sachverständiger für die Interpretation</p> |
|--|--|

#### Durchführung

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorgehen, Ablauf</li> <li>• Zeitdauer</li> <li>• Platzbedarf</li> <li>• Zeitpunkt</li> </ul> | <p>Hinterfüllung mit markiertem Zement notwendig</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Messung mit speziellem Messgerät und MID während dem Einbringen der Hinterfüllung, dabei kann durch das Zurückziehen der Messsonde der Füllstand im Bohrloch, der Durchflussrate und das Gesamtvolumen der Hinterfüllung jederzeit kontrolliert werden</li> <li>2. Kontrollmessung nach dem Hinterfüllen oder auch vor der Horizontalen Anbindung</li> </ol> <p>Zu 1. solange der Verpressvorgang dauert<br/>zu 2. ca. 30 - 60 Minuten, je nach Sondenlänge</p> <p>1-2 m<sup>2</sup></p> <p>während dem Einbringen der Hinterfüllung. Kontrollmessung nach dem Einbringen der Hinterfüllung oder auch vor der Horizontalen Anbindung, spätere Kontrollmessungen jederzeit möglich</p> |
|---|--|

<b>Resultat</b>	
• Messgrößen	Detektion ferromagnetischer und elektrisch leitfähiger Stoffe, z.B. markierte Zement.
• Andere Messgrößen	Tiefenangabe in m, Durchflussrate in l/min, Gesamtvolumen der Hinterfüllung in m <sup>3</sup>
<b>Messgenauigkeit</b>	
• Angaben Kalibrierung	Tiefenangabe 1-2 m
• Andere Angaben	

## 6.2 Methode Magnetik-Log (MAL)

<b>Überblick</b>	
• Bezeichnung	Magnetik-Log (MAL)
• Kurzbeschreibung	Messsonde mit Kabelwinde und Aufzeichnungsgerät (gesamt ca. 15 kg)
• Dienstleistungsanbieter	Fa. Sensys GmbH für Miniaturmesssonde mit von Hand betriebener Kabelwinde, ab DN 50 seit etwa 50 Jahren Standardmessverfahren der Bohrlochgeophysik Bohrlochmessung-Storkow GmbH
	
<b>Einsatzbereich</b>	
• Geologische Verhältnisse	Keine anstehenden ferromagnetischen Gesteine
• Länge Erdsonden	ca. 300 m, größere Teufen problemlos möglich
• Durchmesser Erdsondenrohre	16 mm
• Spezifische Voraussetzungen	Magnetisch markierte Tone oder Ton-Zement-Suspension (z.B. „Füllbinder EWM plus“ der Fa. Schwenk)
<b>Verbreitung</b>	
• Geografisch	Im Einsatz und Anwendung in Deutschland
• Marktreife	Seit dem Jahr 1990 in Brunnen und Grundwassermessstellen und seit 2014 in Erdwärmesonden
• Urheberrechte	keine
<b>Aufwand</b>	
• Kosten	Ca. 500 € + Anfahrt
• Aufwand Material	Tragbare Miniaturausrüstung
• Aufwand Personal	1 sachkundige Person für Messung, Auswertung durch Geophysiker
<b>Durchführung</b>	
• Vorgehen, Ablauf	Einfahrt der Messsonde bis Endteufe, Messung erfolgt mit ca. 6 m/Minute aufwärts
• Zeitdauer	Ca. 30 Minuten
• Platzbedarf	1 – 2 m <sup>2</sup> Grundfläche
• Zeitpunkt	Messung als Anstiegsmessung beim Verpressvorgang aber auch als Nachmessung möglich, Wiederholbarkeit nach Jahren möglich
<b>Resultat</b>	
• Messgrößen	Magnetisierbarkeit (SI)
• Andere Messgrößen	Messteufe wird mit registriert
<b>Messgenauigkeit</b>	
• Angaben Kalibrierung	werkseitig
• Andere Angaben	Es erfolgt nur der Nachweis der magnetischen Markierung des eingebrachten Baustoffes.

---

Somit werden zwar Verfülllücken auf Grund des fehlenden Signals gefunden. Zur Qualität des Hinterfüllmaterials (z.B. Konsistenz, Verdünnung durch Wasser und Bohrspülung oder Akkumulation von Fremdmaterial) können jedoch keine Aussagen gemacht werden. Kein Nachweis der hydraulischen Wirksamkeit der Ringraumabdichtung möglich.  
Auswertung der Messung möglichst nur durch erfahrenen Bohrlochgeophysiker

---

## 6.3 Beurteilung und Diskussion

Die magnetischen Methoden funktionieren im Wesentlichen so, dass das Hinterfüllmaterial magnetisch dotiert wird – d.h. magnetische Mineralien werden beigemischt – welche dann mittels Sensor gemessen werden. Es ergeben sich daher viele Analogien mit der Gamma-Ray-log Methode mit radioaktiv dotiertem Hinterfüllmaterial. In diesem Fall wird nun genutzt, dass das Signal der magnetischen Suszeptibilität proportional zur Dichte der Umgebung ist, womit auch Hohlräume aufgespürt werden können.

Mit den magnetischen Methoden bestehen in der Schweiz noch kaum Erfahrungen mit der Prüfung der Hinterfüllung von Erdwärmesonden. Die meisten Akteure, die im Rahmen dieser Studie befragt worden sind, haben entweder keine Erfahrungen mit diesen Methoden, oder allenfalls nur aufgrund Arbeiten am offenen Bohrloch im Zusammenhang mit Baugrunduntersuchungen.

### Einsatzmöglichkeiten

Die magnetischen Methoden mit den hier vorgestellten Geräten sind grundsätzlich bei jeder Geologie einsetzbar. Allerdings darf das umgebende Gestein nicht ferromagnetisch sein, da ansonsten das Signal aus der dotierten Hinterfüllung überlagert wird. Auch hier gilt somit, dass geologische Informationen über das Umgebungsgestein schon bereits im Planungsstadium von enormer Bedeutung sind und einen direkten Einfluss auf die Realisierbarkeit der Messung haben. Das Hinterfüllmaterial (der trockene Baustoff) muss vorgängig zur Verarbeitung magnetisch dotiert werden. Das heisst, es muss vor Bohrbeginn bekannt sein, dass diese Methode angewendet werden soll. Die Sondenlänge spielt keine entscheidende Rolle.

Die Messungen benötigen im Vergleich zu den Bohrarbeiten an sich relativ wenig Zeit und Platz. Allerdings können sie nur durch spezialisierte Unternehmungen durchgeführt werden, mit Experteneinsatz vor Ort.

### Interpretation der Messergebnisse

Aufgrund der direkten Beziehung zwischen magnetischer Suszeptibilität und lokaler Dichte, kann mit diesen Methoden theoretisch direkt die Vollständigkeit und somit die Qualität der Hinterfüllung gemessen werden.

Analog zu den radioaktiven Methoden gilt auch für die magnetischen Methoden: Nebst der bereits oben genannten Unsicherheit der magnetischen Suszeptibilität im Umgebungsgestein, ist bei der Interpretation auf den Umstand der unbekanntenen Bohrloch- und EWS-Geometrie zu achten: Nicht nur, dass Bohrungen so gut wie nie vertikal verlaufen, sondern auch die Erdwärmesonde in sich besitzt im Bohrloch eine eher zufällige Ausrichtung. Sie wickelt sich im Bohrloch um die eigene Achse (Spiralität), und jeder Schlauch hat einen stark veränderlichen Abstand zu den anderen Schläuchen, zur Bohrlochachse, und somit auch zur Bohrlochwand. Dies hat eine ständige Veränderung des Abstands zwischen Messsonde und Bohrlochzentrum und somit eine ständige

Veränderung des magnetischen Signals zur Folge, welche unter Umständen nicht von effektiven Lücken in der Hinterfüllung unterschieden werden kann. Durch Benutzen von Abstandhaltern bei Duplex-Sonden kann diesem Umstand etwas entgegengetreten werden.

Eine wichtige Kombination stellt der CemTrakker dar, da mit diesem Gerät einerseits während dem Hinterfüllvorgang analog den mechanischen Methoden Durchfluss und Volumen der Suspension gemessen werden kann, andererseits im bestehenden Bohrloch mittels Magnetik-log die effektive abgebundene, ausgehärtete Hinterfüllung gemessen werden kann. Für dieses Gerät ist in der Schweiz keine Referenz bekannt.

Selbst wenn oben genannte Unsicherheiten ausgeschlossen werden können, bleibt ein direkter Rückschluss auf die effektive thermische Anbindung der Erdwärmesonde an den Untergrund (im Sinne des reziproken thermischen Widerstands) schwierig, da die thermische Anbindung von weiteren Faktoren abhängt, wie z.B. die Wassersättigung oder die thermischen Eigenschaften des natürlichen Umgebungsgesteins.

### **Weitere Anmerkungen und Erfahrungen**

Die Erfahrungen magnetischen Methoden bei EWS-Systemen sind momentan in der Schweiz noch gering. Messungen können nur durch erfahrene Bohrlochphysiker durchgeführt und interpretiert werden.

Zusammenfassend lässt sich aber festhalten, dass die magnetischen Methoden vom Verfahren her attraktiv sind, weil sie im Vergleich zur Bohrung relativ wenig Platz und Zeit benötigen und praktisch jederzeit nach der Hinterfüllung durchgeführt werden können. Weiter oben genannte Unsicherheiten wie die magnetische Suszeptibilität des Umgebungsgesteins und die Spiralität der Erdwärmesonde ausgeschlossen, können sie im Prinzip die Vollständigkeit der Hinterfüllung direkt messen. Im Speziellen wurde bei einem Interview ein Projekt in Lausanne erwähnt, bei welchem offenbar auf diese Weise die Qualität der Hinterfüllung in 500 m tiefen EWS aufgezeigt werden konnte. Dabei sei ersichtlich, dass die Qualität der Hinterfüllung mit der Tiefe zunimmt. Ob dies auf die lokalen geologischen Bedingungen zurückzuführen ist, oder ob dies allenfalls ein generelles Merkmal von tieferen Erdwärmesonden sein könnte, kann mit aktuellem Informationsstand nicht beantwortet werden.

Auch für diese Methoden gilt, dass zum Zeitpunkt der Messung die Hinterfüllung der EWS mit vertretbarem Aufwand nicht mehr angepasst werden kann. Diese Methoden sind als Kontrollwerkzeug zu verstehen, im Idealfall ergänzend zu anderen Methoden. Gegebenenfalls können bei EWS-Feldern Rückschlüsse für das Bohrkonzept von weiteren Bohrungen gezogen werden.

## 7 Blick ins Ausland

### 7.1 Frankreich

#### Bekannte und heute eingesetzte Methoden

Bekanntermassen im Einsatz sind lediglich mechanische Methoden. Von einigen, zuverlässigen Bohrfirmen werden diese eigenständig zur Qualitätssicherung genutzt. In Nord- und Nordwestfrankreich sind vorwiegende kristalline Gesteine vorhanden. In diesen geologischen Verhältnissen werden in Frankreich die Erdwärmesonden häufig nicht hinterfüllt.

Eine aus Sicht der Behörden grundsätzlich zu empfehlende Methode wäre eine administrative Kontrolle der bestellten Menge von Hinterfüllmaterial und der effektiv genutzten. Die Anwendbarkeit dieser Methode müsste im Rahmen eines Forschungsprojektes aber noch abgeklärt werden.

#### Vorschriften und Richtlinien

Es gibt im Moment keine konkreten Richtlinie für die Überprüfung der Hinterfüllung. Im Rahmen von Forschungsprojekten wird aber diesbezüglich an einer neuen Norm gearbeitet: „NF-X10-950 (en projet homologisation pour 2016) - le coulis géothermique de scellement des sondes géothermiques“, sowie die Idee ein Normierungsverfahren an der EU-Ebene (nur Projekt).

Im Bereich Geothermie bestehen folgende Normen:

- NF X10-999 (*in 2014 revidiert und genehmigt*) - Forage d'eau et de géothermie - Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages
- NF-X10-970 (*in 2011 revidiert un genehmigt*) - Forage d'eau et de géothermie - Sonde géothermique verticale (échangeur géothermique vertical en U avec liquide caloporteur en circuit fermé) - Réalisation, mise en oeuvre, entretien, abandon
- NF-X10-960 (2013) - Forage d'eau et de géothermie - Sonde géothermique verticale - Partie 2 : boucle de sonde en polyéthylène 100 (PE 100)

Zum Teil werden durch die lokalen Behörden Audits von Bohrfirmen durchgeführt. Dazu gehören die visuelle Prüfung der Baustelle, Prüfung des Qualitätsmanagements und die Kontrolle der Ausrüstung.

Des weiteren wird für Bohrfirmen offiziell die Vorgehensweise „Qualiforage“ zur Umsetzung empfohlen (<http://www.geothermie-perspectives.fr/article/qualiforage>).

#### Weitere, generelle Bemerkungen

Es besteht die Vermutung, dass die Bohrfirmen keinen Druck haben, die Hinterfüllung vollständig einzubringen, solange es keine Methode für eine Nachprüfung für Erdwärmesonden gibt. Ausserdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass Abweichungen von der Planung zur Ausführung bzw. dem realen Bohrablauf vorkommen.

## 7.2 Deutschland (Baden-Württemberg)

### Bekannte und heute eingesetzte Methoden

In Baden-Württemberg sind alle in dieser Studie aufgeführten Methoden bekannt und werden auch eingesetzt.

Am häufigsten – aber insgesamt doch noch eher selten – zum Einsatz kommen die mechanischen Methoden, und dann meist auf Wunsch der Bauherrschaft oder eines Fachplaners. Innerhalb der mechanischen Methoden ist der DBO-3 am weitesten verbreitet, da er vom LQS EWS (Leitlinien Qualitätssicherung Baden-Württemberg) zugelassen ist und durch den Geräteführer auch relativ einfach bedient werden kann.

Thermische Methoden werden in erster Linie zu planerischen Zwecken (TRT zur Auslegung von EWS-Feldern) verwendet. Als Mittel zur Qualitätssicherung kommen sie nur selten zum Einsatz. Schliesslich können sie zu diesem Zweck (Messung Qualität Hinterfüllung) auch nur Indizien liefern und die Messergebnisse sind in der Regel nicht eindeutig zu interpretieren.

Magnetische und radioaktive Methoden werden hingegen kaum eingesetzt, bis anhin eher nur zu Forschungszwecken. Sie bieten im allgemeinen einen grossen Interpretationsspielraum. Einzig die magnetische Methode CemTrakker QS-Methode ist in Baden-Württemberg (LQS EWS) als Mittel zur Messung der Hinterfüllung zugelassen, befindet sich aber zum Teil immer noch in der Testphase bei Planungsbüros.

Durch die diversen Methoden kann die Qualität, bzw. die Vollständigkeit, der Hinterfüllung mehr oder weniger gut nachgewiesen werden. Die effektive thermische Anbindung kann mit den aktuellen Methoden hingegen noch zu wenig überprüft werden.

### Vorschriften und Richtlinien

Im Grundsatz gelten in Deutschland die VDE und VDI Richtlinien.

Bei Bohrtiefen < 100m ist eine wasserrechtliche Erlaubnis notwendig. Dieser zugrunde liegen verschiedene Wasser- bzw. Wasserhaushaltsgesetze. Bei Bohrtiefen > 100m ist zusätzlich eine Bestätigung gemäss dem Bundesberggesetz vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau erforderlich. In der wasserrechtlichen Erlaubnis wird in der Regel verfügt, dass die Bohrfirma eine DVGW-Zertifizierung oder gleichwertiges vorweisen muss. Der DVGW führt – wie auch der Bundesverband Wärmepumpe – regelmässige Audits und Baustellenkontrollen durch.

Darüber hinaus werden in Verfügungen in der Regel, und unter anderen, folgende Auflagen oder Empfehlungen bei Erdwärmesondenbohrungen erlassen:

- Die Bohrtiefe wird begrenzt auf ca. 160 m bis 170 m.
- Ein Geologe, eine Geologin muss für die geologische Überwachung permanent auf der Baustelle sein.
- Es sollen zur Hinterfüllung grundsätzlich Fertigmischungen in Form von Kolloidalmischungen und keine Baustellenmischungen verwendet werden.
- Auslegung von EWS-Feldern nach zugelassener Software.

Zur Kontrolle gibt es unangemeldete Audits durch die Behörden, bei welchen eine amtliche Person von Anfang bis Schluss der EWS-Bohrung, -abteufung und -hinterfüllung anwesend ist.

Zum Baustoff der Hinterfüllung ist noch folgendes zu ergänzen: Das Hinterfüllmaterial muss vor allem zwei Bedingungen erfüllen. Es muss eine gute Abbindequalität aufweisen und keine Lücken hinterlassen. In einem Forschungsprojekt zusammen mit einem Baustoffhersteller möchte man

diese Thematik detaillierter angehen. Das Ziel ist ein Pflichtenheft für den Baustoff EWS-Hinterfüllung.

Zur geologischen Überwachung ist zu ergänzen, dass in der Praxis nur bei anspruchsvollen geologischen und hydrologischen Untergrundverhältnissen ein Sachverständiger effektiv vor Ort ist. Der Sachverständige hat in diesem Fall aber die kompletten Verpressarbeiten zu begleiten, wenn kein automatisches Verpresssystem auf dem Bohrgerät installiert, bzw. dieses nicht einsatzfähig ist. Die Begleitung der Hinterfüllarbeiten bedeutet konkret, dass am Anfang, während und am Ende des Verpressvorgangs die Dichte gemessen wird und Rückstellproben des Verpressmaterials genommen werden. Das gelieferte Material muss nicht speziell geprüft werden, da seit November 2011 (Einführung LQS) überwiegend nur noch werkseitig geprüfte Fertigmischungen zum Einsatz kommen. Baustellenmischungen benötigen Unbedenklichkeitsnachweise vom Hersteller.

Darüber hinaus gibt es aktuell eine Leitlinie, welche zusätzlich Arbeitsanweisungen und Zuordnungstabellen enthält: die Leitlinie zur Qualitätssicherung Baden-Württemberg (LQS) aus dem Jahr 2011. Eine neue Auflage des LQS ist für Mai 2015 geplant. Diese beinhaltet voraussichtlich, dass nur noch mit automatisierter Verpressungsüberwachung gearbeitet werden darf.

### **Weitere, generelle Bemerkungen**

Ein aktuelles Forschungsprojekt kann wie folgt zusammen gefasst werden:

Das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft in Baden-Württemberg hat ein Forschungsprojekt zum Thema Qualität Hinterfüllung und deren Messung durchgeführt. Dabei wurden 35 m tiefe Erdwärmesonden installiert und nach gängigen Regeln fachgerecht hinterfüllt. Bewusst wurden ca. 1 m lange künstliche Lücken (definierte Fehlstellen) in die Hinterfüllung mit eingebaut. Zusätzlich zu den definierten Fehlstellen wurden weitere Fehlstellen erwartet, die während dem Hinterfüllungsprozess spontan entstanden sind. Anschliessend wurden die EWS von diversen Lieferanten (ohne Kenntnisse über die Fehlstellen) mit verschiedenen Methoden auf vollständige Hinterfüllung überprüft, mit dem Ziel, allenfalls vorhandene Fehlstellen zu erkennen und darzustellen. Zum Schluss wurden die EWS komplett rückgebaut und die künstlichen sowie spontan entstandenen Lücken gegen die Tiefe aufgezeichnet. Das Ergebnis des Forschungsprojekts war aus zweierlei Gründen ernüchternd. Zum einen wurde festgestellt, dass bei der Hinterfüllung viele, spontane Fehlstellen entstanden sind und über die ganze Tiefe ca. 20% der EWS nicht durch Hinterfüllmaterial ummantelt und somit nicht thermisch angebunden waren. Zum anderen musste festgestellt werden, dass keine der angewandten Messgeräte zuverlässig Fehlstellen darstellen konnte, weder künstliche noch spontan entstandene. Es konnte keine Korrelation zwischen tatsächlich bestehenden Fehlstellen und Messergebnissen erkannt werden. Somit wurde gefolgert, dass die aktuell gängigen Methoden nicht fähig sind, die Qualität der Hinterfüllung bei EWS abzubilden.

Weitere Studien in Zusammenarbeit mit Baustoffherstellern und Messtechnikern sind in Planung oder in Arbeit.

## 8 Wichtigste Ergebnisse und Fazit

### 8.1 Vorbemerkung

In der vorliegenden Arbeit geht es um Messmethoden, mit denen, basierend auf der Hinterfüllungsqualität von Erdwärmesonden, die thermische Anbindung an den Untergrund beurteilt werden kann.

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse zusammenfassend dargestellt und Schlussfolgerungen gezogen.

### 8.2 Anwendung und Aussagekraft Methoden

Die durchgeführten Arbeiten und Interviewergebnisse zeigen:

Die thermischen Methoden:

- werden nach Abschluss der Hinterfüllarbeiten angewendet.
- messen die Temperatur als Funktion der Tiefe (T-log) und/oder als Funktion der Zeit (Abkühlkurve), welche eine Funktion Gesamtsystems Erdwärmesonde, Hinterfüllung und Untergrund ist.
- lassen Rückschlüsse auf das Vorhandensein einer Hinterfüllung zu.
- liefern vor allem im Zusammenhang mit Probebohrungen wichtige Informationen für die Dimensionierung von Erdwärmesondenfeldern.

Die mechanischen Methoden:

- werden während dem Verpressvorgang eingesetzt.
- messen Menge, Durchfluss der Suspension sowie den Injektionsdruck weisen auf Hinterfüllprobleme hin, damit aktiv reagiert werden kann mittels Verändern des Baustoffs (Viskosität, Zusammensetzung) oder mittels Hilfsmittel zur Abdichtung.

Die radioaktiven Methoden:

- werden üblicherweise nach Abschluss des Verpressvorgangs eingesetzt.
- sie erlauben Aussagen zur Vollständigkeit der Hinterfüllung.
- das Hinterfüllmaterial muss bei den meisten Verfahren vorgängig dotiert werden, um ein genügendes Messsignal zu erhalten.

Die magnetischen Methoden:

- werden während und nach Abschluss der Hinterfüllarbeiten angewendet.
- erkennen Hinterfülllücken.
- das Hinterfüllmaterial muss vorgängig dotiert werden.

Die Vollständigkeit der Hinterfüllung kann mit den zur Zeit angewendeten Methoden unterschiedlich zuverlässig beurteilt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Hinterfüllung ein Teil des Bohrlochsystems darstellt und die Vollständigkeit der Hinterfüllung nur einen Teil des gesamten Bohrlochwiderstands ausmacht. Der Bohrlochwiderstand hängt ab von Wärmeleitfähigkeit des Gesteins, Wärmeleitfähigkeit in Hinterfüllung, Wärmeleitfähigkeit im EWS-Material, Strömungs-

verhältnisse in der Wärmeträgerflüssigkeit, Anordnung der EWS-Rohre im Bohrloch, und Wärmeübergänge an sämtlichen Grenzflächen (also auch die zwischen Hinterfüllung und Sondenrohr).

Nach aktuellem Stand existiert keine Methode, welche Lücken innerhalb der bestehenden Hinterfüllung von Erdwärmesonden direkt nachweisen kann.

Die Auswirkung ungenügender Hinterfüllung hängt davon ab, ob die Lücken mit Luft oder Wasser gefüllt sind. Bei Wasser kann die thermische Anbindung sogar besser werden. Eine Hinterfüllung mit schlechten thermischen Eigenschaften ist schlimmer als keine Hinterfüllung in wassergesättigtem Boden.

In der Schweiz wurden bis anhin im Zusammenhang mit der Kontrolle der Hinterfüllung noch kaum Erfahrungen mit magnetischen und radioaktiven Methoden gemacht. Die praktischen Erfahrungen von Planern, Bauherren und Bohrfirmen beschränken sich im Wesentlichen auf thermische Methoden als Planungsmittel, und auf mechanische Methoden zur Beobachtung und Kontrolle des Verpressvorgangs.

## 8.3 Fazit

Aus den durchgeführten Arbeiten ziehen wir folgendes Fazit:

### Informationen

Informationen zur Geologie sind grundsätzlich wichtig. Sowohl bei der Vorbereitung und Durchführung der Bohrarbeiten und Hinterfüllung als auch bei der Durchführung, Auswertung und Interpretation der Kontrollmethoden.

Da in der Regel nur bei Erdwärmesondenfeldern Probebohrungen durchgeführt werden ist zu prüfen, ob nicht die Informationen zu vorhandenen Bohrprofilen öffentlich zugänglich gemacht werden könnten.

### Organisation und Qualitätssicherung

Massnahmen zur Qualitätssicherung sollten konsequent als Teilleistung im Zusammenhang mit Bohrarbeiten ausgeschrieben und vergütet werden.

Die Methoden erfordern in der Regel keinen erheblichen Zeit- und Platzaufwand, müssen aber trotzdem rechtzeitig in den Bohr- und Bauablauf eingeplant werden. Der Geräteführer soll dabei eine Bauleitungsfunktion auf dem Bohrplatz haben.

Die Durchführung der Messung muss rechtzeitig in den Bohr- und Bauablauf eingeplant werden. Messungen müssen einfach umzusetzen und dürfen keinen nennenswerten Zusatzaufwand bzgl. Zeit und Geld für die Bohrfirma mit sich bringen.

Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortung zwischen allen Beteiligten über das ganze Projekt sind klar festzulegen.

Unangemeldete Audits sollten vermehrt durchgeführt werden.

### **Optimiertes Bohrkonzzept**

Im Vergleich zu Einzelsonden besteht bei Erdwärmesondenfeldern ein erhöhtes Risiko der ungenügenden Dimensionierung. Im Speziellen eine Unterdimensionierung kann erhebliche negative Folgen mit sich bringen. Auch der Qualität der Hinterfüllung kommt somit ein grosse Bedeutung zu. Gestützt auf die Erkenntnisse der vorliegenden Studie und basierend auf Erfahrung mit der Dimensionierung von EWS-Felder schlagen wir folgendes Vorgehen für die Realisierung von EWS-Feldern vor:

- a. Konzept durch Geologen / Fachplaner
- b. Probebohrung begleitet durch Geologen, und Verfolgen der Verpressung durch mechanische Methode inkl. Datenlogging
- c. Thermische Methode zur Messung der thermischen Untergrundeigenschaften als Grundlage für die Dimensionierung der Gesamtanlage.
- d. Dimensionierung auf Basis der gemessenen thermischen Untergrundeigenschaften, und Planung der Gesamtanlage, gegebenenfalls mit angepasstem Bohrkonzzept aufgrund der Erkenntnisse aus dem Verpressvorgang der Probebohrung.
- e. Bohrung und Realisierung der Gesamtanlage
- f. Läuft die EWS-Anlage nicht erwartungsgemäss und weicht von den erwarteten Betriebsdaten ab, oder treten gar Schadenfälle auf, können weitere Methoden wie radioaktive oder magnetische (falls dotiert) zur Ursachenforschung hinzugezogen werden.

### **Offene Fragen**

Die Verantwortung bei Schadenfällen, oder bei nicht effizient laufenden Anlagen, ist nicht geklärt.

Wie sind Ergebnisse von Prüfmethode rechtlich zu werten?

Mit der SIA Norm 384/6 existiert eine Norm zur Ausführung und Ausbau der Bohrung. Die Mess- und Kontrollmethoden sowie der ganze Bereich der horizontalen Anschlüsse sind aber nur geringfügig betrachtet.

## Anhang 1 Liste der Interviewpartner

Organisation	<b>Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg</b>
Name, Vorname	Bruno Lorinser
Funktion	Ref. 64 Erneuerbare Energien
Strasse, Nr.	Kernerplatz 9
PLZ, Ort	70182 Stuttgart
Internet Adresse	<a href="https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/erneuerbare-energien/geothermie">https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/erneuerbare-energien/geothermie</a>

Organisation	<b>Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)</b>
Name, Vorname	Monnot Pascal
Funktion	Commission de normalisation
Strasse, Nr.	3 Av. Claude-Guillemin, BP 36009
PLZ, Ort	45060 Orléans Cedex 2
Internet Adresse	<a href="http://www.brgm.fr">www.brgm.fr</a>

Organisation	<b>Services Industriels de Lausanne</b>
Name, Vorname	Barone Francesco
Funktion	Ingénieur en énergétique
Strasse, Nr.	Place Chauderon 23
PLZ, Ort	1002 Lausanne
Internet Adresse	<a href="http://www.lausanne.ch/de/thematiques/services-industriels.html">www.lausanne.ch/de/thematiques/services-industriels.html</a>

Organisation	<b>Heinz Burkhardt GmbH &amp; Co. KG</b>
Name, Vorname	Sonnenfroh Florian
Funktion	Dipl. Geologe
Strasse, Nr.	Tulpenstr. 15
PLZ, Ort	75389 Neuweiler
Internet Adresse	<a href="http://www.burkhardt-erdwaerme.de">www.burkhardt-erdwaerme.de</a>

Organisation	<b>Progeo GmbH</b>
Name, Vorname	Hansjakob Schächli
Funktion	Inhaber
Strasse, Nr.	Hofbergstrasse 29
PLZ, Ort	9500 Wil
Internet Adresse	<a href="http://www.progeo.ch">www.progeo.ch</a>

Organisation **e-therm ag**  
Name, Vorname Markus Graf  
Funktion Leiter Technik  
Strasse, Nr. Postgässli 23  
PLZ, Ort 3661 Uetendorf  
Internet Adresse [www.e-therm.ch/de](http://www.e-therm.ch/de)

Organisation **Augsburger Forages SA**  
Name, Vorname Marco Neva  
Funktion Leiter Administration  
Strasse, Nr. Route d'Yvonand 2  
PLZ, Ort 1522 Lucens  
Internet Adresse [www.af-sa.ch](http://www.af-sa.ch)

Organisation **Amt der Hochbauten Stadt Zürich**  
Name, Vorname Dr. Wagner Roland  
Funktion Projektleiter Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik  
Strasse, Nr. Lindenhofstrasse 21  
PLZ, Ort 8021 Zürich  
Internet Adresse [www.stadt-zuerich.ch/hbd](http://www.stadt-zuerich.ch/hbd)

Organisation **Energie 360° Erdwärme AG**  
Name, Vorname Ralph Weber  
Funktion Geschäftsführer  
Strasse, Nr. Bionstrasse 4  
PLZ, Ort 9015 St. Gallen  
Internet Adresse [www.energie360.ch](http://www.energie360.ch) bzw. [www.erdwaerme-ag.ch](http://www.erdwaerme-ag.ch)