

Schlussbericht, 06. Oktober 2017

Qualitätssicherung Erdwärmesonden

Temperatur-, Verlaufsmessungen
und Thermal Response Tests
in Erdwärmesonden



Autoren

Dr. Vincent Badoux, GEOTEST AG

Ursula Ritter, GEOTEST AG

Dr. Håkon Fischer, GEOTEST AG

Dr. Michael Soom, GEOTEST AG

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

Adresse

GEOTEST AG, Bernstrasse 165, CH-3052 Zollikofen

Tel. 031 910 01 01, Fax 031 910 01 00, zollikofen@geotest.ch, www.geotest.ch

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Einleitung | 4 |
| 2. | Verwendete Unterlagen | 5 |
| 3. | Projekt | 6 |
| 4. | Eigenschaften der EWS | 7 |
| 5. | Grundlagen | 8 |
| 5.1 | Geothermie | 8 |
| 5.2 | Messwerte / Ziel der Messungen | 9 |
| 5.3 | Temperaturmessungen | 9 |
| 5.4 | Verlaufsmessungen | 10 |
| 5.5 | Thermal Response Test (TRT) | 12 |
| 6. | Eingesetzte Messgeräte..... | 14 |
| 6.1 | TRT-Geräte | 14 |
| 6.1.1 | Das Mini-Modul – TRT | 14 |
| 6.1.2 | TRT-Gerät der Firma GEOWATT AG | 14 |
| 6.1.3 | TRT-Gerät der Firma Geo Explorers AG | 16 |
| 6.1.4 | GeoGert 2.0 | 16 |
| 6.2 | Andere Messgeräte..... | 17 |
| 6.2.1 | Ablenkungsmessgerät der Firma Geo Explorers AG | 17 |
| 6.2.2 | Ablenkungsmessgerät der Firma Terratec GmbH | 18 |
| 6.2.3 | Temperaturmessgerät der Firma Terratec GmbH | 18 |
| 6.2.4 | Temperaturmessgerät der Firma Tachyon | 18 |
| 6.2.5 | Faseroptische Temperaturmessung | 19 |
| 7. | Untersuchungsergebnisse | 20 |
| 7.1 | Temperaturmessung | 20 |
| 7.2 | Verlaufsmessungen | 25 |
| 7.3 | Thermal Response Tests..... | 29 |
| 7.3.1 | Wärmeleitfähigkeit..... | 30 |
| 7.3.2 | Ungestörte Untergrundtemperatur | 31 |
| 7.3.3 | Thermischer Bohrlochwiderstand | 32 |
| 8. | Schlussfolgerungen..... | 33 |
| 9. | Zusammenfassung, weiteres Vorgehen | 35 |

1. Einleitung

Erdwärmesonden (EWS) werden vielfach genutzt, um aus dem Untergrund Energie zu Heiz- und/oder Kühlzwecken zu gewinnen. Für die Planung und Dimensionierung von EWS-Anlagen sowie für die Qualitätssicherung sind Kenntnisse über den Aufbau des Untergrunds, der Eigenschaften des Untergrunds sowie Kenntnisse der Temperaturverteilung im Untergrund nötig. Dafür werden unterschiedliche Messungen und Tests vor Ort ausgeführt, wie z.B. Temperaturmessungen oder Thermal Response Tests. Zusätzlich liefern Verlaufsmessungen wichtige Angaben zur räumlichen Anordnung der ausgeführten Erdwärmesonde.

Die Firma GEOTEST AG hat im Jahr 2015 eine aus technischen Gründen nicht mehr benötigte EWS eines aktuell im Bau befindlichen EWS-Feldes erworben und zur permanenten Messstelle und Versuchsanlage umgebaut (Koordinaten der EWS ca. 2'601'553 / 1'205'277). Die GEOTEST AG nutzt diese seit Juni 2015 für Demonstrations-, Ausbildungs- und Entwicklungszwecke sowie z.B. für die Messgeräteprüfung oder Vergleichsmessungen.

Die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds ist ein primärer Kennwert für eine optimale Planung und Dimensionierung einer EWS-Anlage. Seit den Achtzigerjahren ist es möglich, diesen Parameter mittels eines sogenannten „Thermal Response Test“ (TRT) vor Ort experimentell bestimmen zu können. Mit einem TRT wird über die Erdwärmesonde eine bekannte Menge von Wärme in den Untergrund eingespeist und die zeitliche Temperaturänderung der Sonde gemessen.

TRT werden in der Schweiz durch mehrere Firmen angeboten. Die Ausführung eines TRT kann zwischen den Anbietern unterschiedlich sein. Ein Vergleich zwischen den verschiedenen Verfahren ist in der Praxis schwierig, weil die Tests kaum je an einer Bohrung mehrmals durchgeführt werden können und weil der Zeitraum für die Ausführung eines TRT auf einer Baustelle oft beschränkt ist.

Andere auf dem Markt verfügbare Verfahren sind Temperaturmessungen und Messungen zur Verlaufsbestimmung von Bohrungen. Entsprechende Vergleichsmessungen wurden in der EWS-Versuchsanlage der GEOTEST AG im Jahr 2015 ausgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im EnergieSchweiz Bericht „Qualitätssicherung Erdwärmesonden, Temperatur- und Verlaufsmessungen in Erdwärmesonden“ ausführlich erläutert [1].

Im Rahmen dieses Projektes wurden zwischen Oktober 2016 und Februar 2017 mit unterschiedlichen Messverfahren und Geräten Thermal Response Tests ausgeführt sowie ungestörte Temperatur- und Verlaufsmessungen vorgenommen.

Ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse der unterschiedlichen Messverfahren erfolgt im vorliegenden Bericht.

2. Verwendete Unterlagen

- [1] Geologisches Profil Erdsonde Zollikofen, GEOTEST Auftrags-Nr. 1511072, WAWIS-Nr. 601/205.102, Geoportal, Geologische Sondierungen <http://www.map.apps.be.ch>
- [2] Qualitätssicherung Erdwärmesonden: Temperatur- und Verlaufsmessungen in Erdwärmesonden. EnergieSchweiz Bericht vom 16.02.2016.
- [3] SIA-Norm 384/6 Erdwärmesonden. Zürich, 2010.
- [4] Medici F. und Rybach (1995), Geothermal map of Switzerland 1995 (heat flow density map). SGPK, Beiträge zur Geologie der Schweiz, GEOPHYSIK Nr. 30. Zürich
- [5] Leu, W., Mégel, Th., Schärli, U. (2006) SwEWS-Geothermische Eigenschaften der Schweizer Molasse (Tiefenbereich 0-500 m). Datenbank für Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Gesteinsdichte und Porosität.

Weitere Angaben zur Erstellung der EWS-Versuchsanlage befinden sich im Archiv der GEOTEST AG.

3. Projekt

Zwischen Oktober 2016 und Februar 2017 wurden an der EWS-Versuchsanlage der GEOTEST AG in Zollikofen Thermal Response Tests (TRT) sowie Temperatur- und Verlaufsmessungen von verschiedenen Firmen ausgeführt.

Die beteiligten Firmen sowie die Zeitperiode, wann die Messungen durchgeführt wurden, sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Auflistung der ausgeführten Messungen. DTS steht für „Distributed Temperatur Sensing“ mit faseroptischer Technologie.

| Firma | Messung | Zeitperiode |
|------------------|---|---|
| Tachyon | T-Messung | 7. Oktober 2016 |
| Geo Explorers AG | TRT Verlaufsmessung | 17. bis 21. Oktober 2016 16. Oktober 2016 |
| GeoAzimut GmbH | TRT Ruhe T-Messung Ruhe T-Messung (DTS) | 4. bis 11. November 2016 4. November 2016 4. Oktober 2016 |
| Terratec GmbH | Verlaufsmessung Ruhe T-Messung | 17. November 2016 17. November 2016 |
| Geowatt AG | TRT | 5. bis 8. Dezember 2016 |
| Forasol SA | TRT | 14. bis 17. Februar 2017 |
| GEOTEST AG | TRT ¹ Ruhe T-Messung (DTS) ¹ | 13. bis 20. Januar 2016 14. Oktober 2016 bis am 13. Januar 2017 |

¹ Die TRT- und die DTS-Messung des GEOTEST AG wurden unabhängig von dieser Studie ausgeführt und sind hier als Vergleich und zur Kontrolle aufgelistet.

4. Eigenschaften der EWS

Die Eigenschaften der EWS-Versuchsanlage sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Eigenschaften der EWS-Versuchsanlage.

| | |
|--|---|
| Ausführung | April 2013 |
| Bohrfirma | e-therm AG, Uetendorf |
| Lage / Koordinaten (CH1903+ /LV95) | 2'601'555 / 1'205'270 |
| Kote OK Sonde | ca. 558 m ü.M. |
| Endtiefe der Bohrung | 250 m |
| Verrohrungstiefe Verrohrungsdurchmesser | 78 m 152 mm |
| Bohrdurchmesser ab 78 m u.T. | 131 mm |
| Sondentyp | „Double U“ Polyethylen (PE) <ul style="list-style-type: none">• Durchmesser aussen: 40 mm• Durchmesser innen: 32.6 mm• Wandstärke: 3.7 mm |
| Injektionsart / Injektionsmittel | Küchler / Bentonit-Zement |
| Druck- und Durchflussprüfung der Sonde | Durch Bohrfirma |
| Wärmeträger während TRT | Wasser |

5. Grundlagen

5.1 Geothermie

Die Temperatur des Untergrunds wird durch den lokalen Wärmefluss, die thermischen Eigenschaften der verschiedenen geologischen Schichten sowie durch die Temperatur an der Oberfläche definiert.

Aufgrund radioaktiver Zerfallsprozesse wird im Untergrund kontinuierlich Wärme erzeugt. Als Ergebnis nimmt die Temperatur im Untergrund generell mit der Tiefe zu. Die Veränderung der Temperatur mit der Tiefe ist der geothermische Gradient (∇T). Prinzipiell existiert ein Wärmefluss vom Erdzentrum nach aussen. Der Wärmefluss Q_w [W/m^2], der geothermische Gradient ∇T [K/m] und die Wärmeleitfähigkeit λ [$W/(m \cdot K)$] sind voneinander abhängig und durch das Fourier Gesetz vereinfacht wie folgt definiert:

$$Q_w = -\lambda \nabla T \quad (1)$$

Der durchschnittliche geothermische Gradient der Erdkruste beträgt ca. 30 K pro Kilometer Tiefe, wobei lokal deutliche Unterschiede aufgrund der geologischen und tektonischen Verhältnisse sowie aufgrund von Grundwasserströmungen möglich sind.

Der geothermische Wärmefluss in der Schweiz beträgt ca. 60 – 80 mW/m^2 [1].

Weil die Oberflächentemperatur mit der Zeit variiert (Jahreszeiten, Einfluss ehemaliger Eiszeiten, globale Erwärmung, urbane Abwärme, usw.), gleichen sich Wärmefluss und Temperaturgradient im Untergrund permanent den aktuellen Klima- und Oberflächenbedingungen an.

Die Wärmeleitfähigkeit beschreibt den Wärmestrom bei einem Temperaturgefälle von einem Kelvin pro Meter unter stationären Verhältnissen in einem homogenen Stoff oder Gesteinstyp [3]. Die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes ist unter anderem abhängig von der Temperatur, der mineralischen Zusammensetzung sowie vom Wassersättigungsgrad. Durch die Heterogenität des geologischen Schichtaufbaus kann daher dieser Kennwert räumlich stark variieren. Wertebereiche aus der Literatur für unterschiedliche Gesteinstypen sind in der SIA-Norm 384/6 [3] zusammengefasst. Die Werte aus der Datenbank für die Schweizer Molasse sind in [5] zu finden.

Mit der Untergrundtemperatur ist die Wärmeleitfähigkeit ein primär bestimmender geophysikalischer Parameter für die Dimensionierung einer Erdwärmesonde oder eines Erdwärmesondenfeldes sowie für jene von Energiepfahlanlagen.

5.2 Messwerte / Ziel der Messungen

Die Ziele der Vergleichsmessungen sind die Bestimmung und der Vergleich der folgenden Messwerte:

- die Temperatur des Untergrundes im ungestörten Zustand
- der dreidimensionale geometrische Verlauf der EWS im Untergrund
- die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes, zusammen mit dem thermischen Widerstand der Sonde.

5.3 Temperaturmessungen

Erdwärmesonden (EWS) erreichen im Allgemeinen Tiefen von 100 m bis 400 m. Mit der Tiefe kommt es zu Abweichungen vom durchschnittlichen geothermischen Gradienten aufgrund unterschiedlicher thermischer Eigenschaften der verschiedenen Gesteinsschichten, durch die Grundwasserströmung und - in den obersten 20 m - durch die saisonalen Temperaturschwankungen an der Erdoberfläche.

Die Abweichungen vom durchschnittlichen geothermischen Gradienten können durch die Messung von Temperatur-Tiefen-Profilen in einer EWS ermittelt und im Zusammenhang mit den geologischen Informationen der Bohrprofile interpretiert werden.

Das Erstellen einer EWS verursacht eine vorübergehende Störung des lokalen Temperaturfeldes im Boden. Durch den Bohrvorgang zur Erstellung der EWS wird die Temperatur des Umgebungsgesteins verändert, u.a. weil in der Regel Spülungsmaterialien eingesetzt werden, die kühler als der Untergrund sind. Nach dem Einbau des Rohres in das Bohrloch wird Hinterfüllungsmaterial in den Ringraum gepresst. Dieses besteht in der Regel aus einer Mischung von Zement und Bentonit. Das Abbinden des Zements ist ein exothermer Prozess. Die abgegebene Wärme verändert ebenfalls lokal die Untergrundtemperatur. Um die ungestörte Temperatur des Untergrundes zu bestimmen, muss nach dem Bohrprozess das thermische Gleichgewicht wieder hergestellt sein. Der Ausgleich der lokalen Temperaturveränderungen durch die Erstellung der EWS dauert mehrere Tage.

Daher sollte die Messung der ungestörten Temperatur des Untergrundes erst ca. 8 bis 10 Tage nach dem Verpressen der EWS erfolgen. Die Messung eines unge-

störten Temperaturprofils muss selbstverständlich vor der Inbetriebnahme der EWS erfolgen.

Das Temperaturprofil wird mittels eines Sensors entweder direkt in der mit Flüssigkeit gefüllten Sonde oder im Hinterfüllungsmaterial gemessen. Im ersten Fall wird ein Fühler an einem Kabel oder kabellos in die Sonde hinabgelassen. Im zweiten Fall muss der Sensor zusammen mit der Sonde vor dem Verpressen im Bohrloch eingebaut werden.

5.4 Verlaufsmessungen

Erdwärmesonden werden in der Regel vertikal installiert. Beim Bohren kommt es aber häufig zu Abweichungen des Bohrungsverlaufes von der Senkrechten (Abbildung 1). Dadurch werden mitunter die angestrebten Zieltiefen der Bohrung bzw. der EWS nicht erreicht oder Abstände zu bestehenden Objekten im Untergrund, wie z. B. zu anderen EWS, nicht eingehalten.

Ausser für abgelenkte Bohrungen ist eine Abweichung zur Senkrechten unbeabsichtigt. Die Abweichung der EWS von der Senkrechten ist in erster Linie mit der Abweichung der Bohrung verbunden. In zweiter Linie ist die Abweichung eine Folge des Verlaufes der U-förmigen Sondenrohre im Bohrloch. Die Sondenrohre werden beim Einbau in das Bohrloch meistens von einer Rolle in das Bohrloch hinabgelassen. Eine vollständige Zentrierung der U-förmigen Sondenrohre im Bohrloch ist in der Regel ohne Abstandhalter nicht realisierbar. Zudem kann es beim Einbau zu Verdrehungen der Sondenrohre im Bohrloch kommen. Die Länge der eingebauten Sondenrohre kann dadurch von der Länge des Bohrloches abweichen (Abbildung 1).

Zur Ermittlung der Tiefe wird entweder die Länge des Messkabels oder der hydrostatische Druck gemessen. Der hydrostatische Druck der Wassersäule über der Sonde kann in eine Tiefe unter Wasserspiegel bzw. unter Terrain umgerechnet werden. Für die Umrechnung muss die Dichte der Flüssigkeit bekannt sein. Mit diesem Verfahren wird die absolute Tiefe unter Oberkante Terrain (*True Vertical Depth*, TVD) bestimmt.

Die Tiefe kann auch anhand der Länge des Messkabels (wenn vorhanden) bestimmt werden. Mit diesem Verfahren wird die Länge entlang des Bohrungsverlaufes bzw. des Sondenverlaufes bestimmt (*measured depth*, MD). Die Kabellänge wird dabei visuell mit Messmarken oder digital am Kabelgewinde gemessen.

Bei vollständig senkrechten Bohrungen und zentriert eingebauter Sonde sind TVD und MD identisch. Bei Abweichungen des Bohrlochverlaufes von der Senkrechten weichen TVD und MD voneinander ab (Abbildung 1) und MD kann nur dann in TVD umgerechnet werden, wenn der Verlauf der EWS bekannt ist.

Für die Verlaufsmessungen sind drei Messverfahren vorhanden. Das erste Verfahren basiert auf der Neigungsmessung mit Pendelsystemen (Inklinometer in zwei orthogonalen Richtungen) oder mit triaxialen elektronischen Beschleunigungsmessern (Accelerometer). Das zweite Verfahren basiert auf der Richtungsmessung mittels kardanisch gelagertem Kompass, triaxialem Fluxgate-Magnetometer oder Kreiselsystem. Das dritte Verfahren basiert auf einer Neigungs- und Richtungsmessung über Inertialsysteme, wie z.B. Gyroskope, Laserkreisel oder mechanische Kreisel. Detaillierte Beschreibungen dieser Methoden können einschlägiger Literatur entnommen werden.

Der Verlauf der Bohrung kann entweder im kartesischen oder orthogonalen Koordinatensystem (X; Y; Z), in welchem die Lage eines Punktes durch Vektoren und Strecken dargestellt wird, oder im polaren bzw. sphärischen Koordinatensystem (α ; β ; γ) beschrieben werden, wo die Lage durch Azimut (Abweichung der Bohrlochrichtung gegen Nord) und Neigung (auch Inklinatation; Abweichung von der Senkrechten) dargestellt wird.

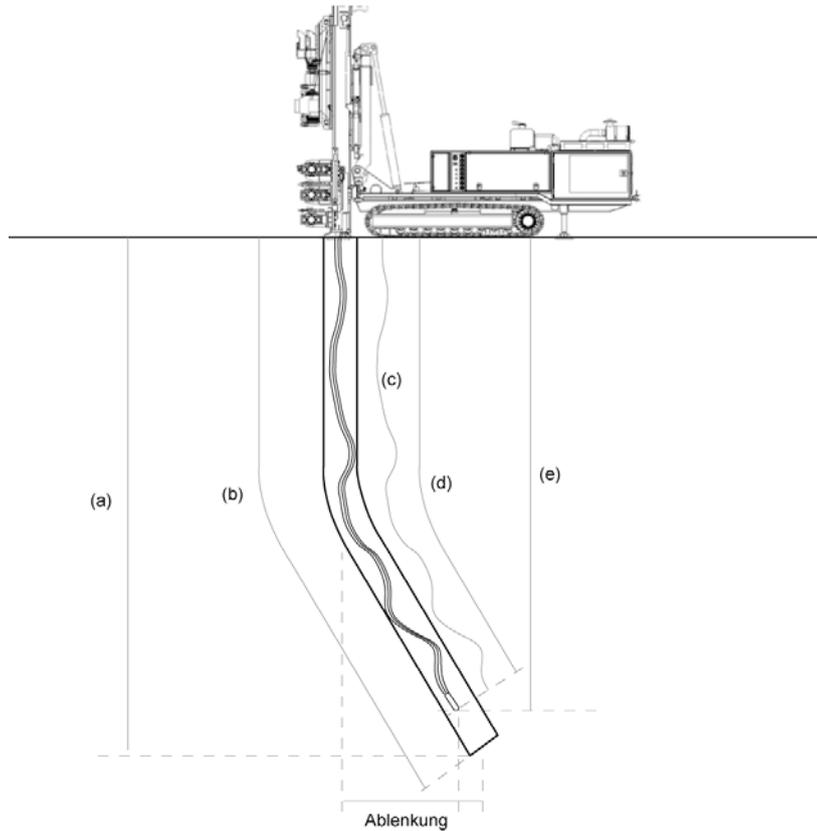


Abbildung 1: Darstellung: (a) *true vertical depth* (TVD) des Bohrlochs; (b) *measured depth* (MD) oder Länge des Bohrlochs; (c) *measured depth* (MD) oder Länge der Erdsondenrohres; (d) Bohrlochlänge bis Ende der Sonde; (e) *true vertical depth* (TVD) der Sonde (Quelle: GEOTEST AG).

5.5 Thermal Response Test (TRT)

Ein Thermal Response Test (TRT) ist eine In-situ-Messung zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds sowie des thermischen Bohrlochwiderstandes einer Erdwärmesonde. Der TRT wird an einer fertig eingebauten Erdwärmesonde durchgeführt.

Geothermal Response Test (GRT) ist eine andere Bezeichnung für TRT.

Während des TRT wird über das Sondenfluid Wärme in den Untergrund injiziert. Dabei wird die Temperatur des Fluids überwacht. Wie das Fluid bzw. der Untergrund thermisch reagiert, ist eine Funktion der Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds.

Auf dem Markt gibt es hauptsächlich zwei Kategorien von TRT-Geräten:

1. Das Sondenfluid wird mittels eines angeschlossenen Geräts mit einer konstanten Leistung ausserhalb der Sonde geheizt.
2. Das Fluid wird innerhalb der Sonde mittels Kupferkabeln geheizt.

Die erste Kategorie ist das klassische Verfahren und wird in der Schweiz am meisten angewendet. In dieser Studie werden aus diesem Grund nur TRT verglichen, die durch dieses erste, klassische Verfahren ausgeführt werden.

An der EWS werden eine Umwälzpumpe, ein Heizelement sowie Sensoren zur Aufzeichnung von Vor- und Rücklauftemperatur angeschlossen. Das Fluid, i.d.R. Wasser, wird bis zum Erreichen der durchschnittlichen ungestörten Untergrundtemperatur über mehrere Stunden bis zu einem Tag im Kreis gepumpt. Danach wird das Heizelement zugeschaltet, um das Wasser zu erwärmen. Das so erwärmte Wasser strömt durch die Erdwärmesonde und kühlt sich dabei ab. Die Austrittstemperatur des Wassers aus der Sonde wird kontinuierlich gemessen.

Klassischerweise basiert die Auswertung der Ergebnisse auf der Linienquellentheorie (Ingersoll, 1954). Der Verlauf der Durchschnittstemperatur vom Fluid verfolgt mit der Zeit eine logarithmische Kurve, die mit der folgenden Gleichung beschrieben werden kann:

$$T_f(t) - T_0 = \frac{q_c}{4\pi\lambda} \ln(t) + q_c \left[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4\alpha}{r_B^2}\right) - 0.5772 \right) \right] \quad (2)$$

| | | |
|-----------|---|--|
| $T_f(t)$ | = | durchschnittliche Fluidtemperatur zur Zeit t (°C) |
| T_0 | = | ungestörte durchschnittliche Untergrundtemperatur (°C) |
| q_c | = | Konstante Heizleistung pro Meter (W/m) |
| λ | = | Wärmeleitfähigkeit des Bodens (W/(m·K)) |
| R_b | = | Thermischer Bohrlochwiderstand (K·m/W) |
| r_B | = | Bohrlochradius |

Die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes sowie der thermische Bohrlochwiderstand können aus (2) ermittelt werden. Durch das Verfahren kann die ungestörte Untergrundtemperatur ebenfalls ermittelt werden.

Mit einem Standard TRT wird für die Wärmeleitfähigkeit des Bodens, für den thermischen Bohrlochwiderstand sowie für die ungestörte Bodentemperatur jeweils ein Mittelwert über die gesamte Sondenlänge ermittelt. Um die Wärmeleitfähigkeit in einzelnen Abschnitten bzw. Schichten des Untergrunds bestimmen zu können, muss ein sogenannter erweiterter TRT (e-TRT) durchgeführt werden. Weitere Informationen über e-TRT können einschlägiger Literatur entnommen werden.

6. Eingesetzte Messgeräte

6.1 TRT-Geräte

6.1.1 Das Mini-Modul – TRT

Das Mini-Modul TRT-Gerät wurde an der EPFL in Lausanne entwickelt und von der Firma Swiss Geo Testing GmbH in Nax (VS) modernisiert. Das Gerät hat die Dimensionen 0.6 m x 0.3 m x 0.7 m und wiegt ca. 50 kg.

Das Mini-Modul wird von unterschiedlichen Firmen in der Schweiz angewendet wie z.B. von GeoAzimut GmbH in Fribourg oder von der GEOTEST AG in Zollikofen.

Das Gerät ist mit zwei oder drei Heizkörpern mit einer stufenlos einstellbaren Leistung bis 15 kW ausgestattet. Der Durchfluss der Kreislaufpumpe beträgt maximal 3 m³/h. Das Expansionsgefäss hat ein Volumen von 8 l. Das System wird konstant bei einem Druck von 2 bar gehalten.

Das System misst und zeichnet die folgenden Parameter auf:

- Vor- und Rücklauftemperatur der Wärmeträgerflüssigkeit
- Lufttemperatur inner- und ausserhalb des Moduls
- Durchflussrate der Wärmeträgerflüssigkeit
- Stromverbrauch
- Druck im Vor- und Rücklauf der Wärmeträgerflüssigkeit

Das Gerät ist mit einem Datenlogger und einem GPRS- und WiFi-Fernübertragungssystem ausgerüstet. Damit können die Daten automatisch auf einen Server übertragen und online visualisiert werden. Stromabbrüche oder andere Störungen können damit sofort identifiziert werden. Das Gerät kann auch durch das Fernübertragungssystem gesteuert werden.

Das Gerät ist ISO/CEI 17'025 zertifiziert.

Weitere Informationen über das Mini-Modul können beim Hersteller eingeholt werden.

6.1.2 TRT-Gerät der Firma GEOWATT AG

Die Firma GEOWATT AG hat ein leistungsgeregeltes TRT-Messgerät für den Eigengebrauch entwickelt. Das Gerät hat die Dimensionen 0.83 m x 0.64 m x 0.61 m und wiegt 63 kg.

Das Gerät erfasst die Temperatur an 6 verschiedenen Stellen z.T. redundant. Diese sind:

- 2 x am Sondereingang
- 2 x am Sondereingang
- 1 x vor dem eingebauten Ultraschall-Durchflusszähler
- 1 x nach dem eingebauten Ultraschall-Durchflusszähler

Das Gerät misst mit PT-100 Sensoren und überprüft deren Werte durch parallel angebrachte NTC Sensoren.

Die Heizleistung wird sowohl elektrisch als auch thermodynamisch gemessen.

Die elektrische Messung der Heizleistung geschieht im isolierten Bereich des Geräts. Die Heizleistung wird vom Gerät als Kontrollmass protokolliert. Die thermodynamische Leistungserfassung erfolgt redundant zur elektrischen Leistungserfassung. Einerseits wird die Heizleistung von einem industriellen Wärmezähler erfasst und geloggt. Andererseits wird sie parallel dazu aus Temperaturmessungen am Ein- und Ausgang des isolierten Gerätes, sowie aus einer Ultraschall-Durchflussmessung hergeleitet. Die zuletzt erwähnte Leistungserfassung ist am präzisesten und wird zur Auswertung des TRTs verwendet.

Ein Filter am Eingang des Geräts verhindert, dass Fremdkörper die Ultraschall-Durchflussmessung verfälschen. Ein Entlüftungssystem am höchsten Punkt des Systems verhindert die Bildung eines Luft-Fluidgemischs, das sowohl Heizleistungsabgabe als auch Messung stören kann.

Die Heizleistung kann stufenlos bis 10 kW eingestellt werden. Heizleistung und Zirkulation sind unabhängig voneinander regulierbar. Die Genauigkeit der elektrischen und hydraulischen Leistungsmessung beträgt 1.5 % bzw. 2.0 %.

Das System wird konstant bei einem Druck von 2 bar gehalten.

Die Datenaufzeichnung erfolgt vollautomatisch. Das TRT-Gerät ist mit einem Mobiltelefonnetz-Modem ausgerüstet. Steuerung, Überwachung sowie Datensicherung können jederzeit direkt am Computer des TRT-Geräts, über das Mobilfunknetz oder über jeden PC der GEOWATT AG erfolgen.

Für die Messung werden die zwei Vorlauf-Rohre sowie die beiden Rücklaufrohre der Erdwärmesonden über ein y-Stück zusammengefasst und an das Messgerät angeschlossen. Die oberirdischen Rohre zur EWS werden mit PU-Schaum isoliert und in Wärmedämmfolien eingepackt. Die Installation wird während der Messung mit einer Plane abgedeckt.

Weitere Informationen über dieses Gerät können beim Hersteller eingeholt werden.

6.1.3 TRT-Gerät der Firma Geo Explorers AG

Die Firma Geo Explorers AG verfügt über ein mit einer Partnerfirma entwickeltes TRT-Gerät mit den Massen 0.62 m x 0.54 m (mit Leitungen 0.73 m) x 0.48 m mit einem Gewicht von ca. 30 kg.

Das elektrische Heizelement hat eine variable Leistung bis max. 9 kW. Der Durchlauf der Kreiselumwälzpumpe beträgt total ca. 1.4 m³/h. Der Durchlauf wird temperaturkorrigiert mit Ultraschall-Durchflusssensoren für jedes Teilvolumen gemessen. Das Gerät verfügt über inline Temperaturfühler für Vor- und Rücklauf.

Heizleistung, Durchfluss, sowie Temperatur von Vor- und Rücklauf werden alle 10 Sekunden gemessen und pro Minute als Mittelwert gespeichert. Sie werden mittels Batterie, also unabhängig vom Baustrom gemessen, auf einen internen Datenlogger geschrieben und auf einem Gerätedisplay für die Vorort-Kontrolle angezeigt.

Alle Leitungen sind isoliert.

Das GRT-Gerät ist mit einem Membranausdehnungsgefäß und einem Überdruck-Ventil (ca. 2.5 bar), sowie einem Überhitzungsschutz (max. 50°C) gesichert. Der optimale Betriebsdruck liegt bei ca. 1 bar.

Die Software-gebundene Auswertung erfolgt mit konstanter oder variabler Heizleistung. Letztere erfolgt nach dem Superpositionsverfahren. Die Berechnung basiert wahlweise auf der Kelvin'schen Linienquelle oder Zylinderquelle.

Für die Auswertung relevant ist der Wärmeübergangswiderstand R_b zum Zeitpunkt des ersten Wasserwechsels nach dem Einschalten der Heizung. Die Parameter Wärmeleitfähigkeit und volumetrische Wärmekapazität werden mittels numerischem Verfahren so berechnet, dass die Summen der Fehlerquadrate minimal sind.

Weitere Informationen über dieses Gerät können beim Hersteller eingeholt werden.

6.1.4 GeoGert 2.0

Das TRT-Gerät GeoGert 2.0 wurde durch die Firma Geoenergia s.r.l. mit Sitz in Italien entwickelt und kommerzialisiert.

Das GeoGert 2.0 Gerät wird von unterschiedlichen Firmen in der Schweiz verwendet wie z.B. von FORASOL SA in Bioley-Orjulaz (VD) oder von der Firma DAWI-ROCA in Wollerau (SZ).

GEOgert 2.0 ist ein System, dessen einzelne Teile für die Durchführung von separaten, verlässlichen Messungen entwickelt wurden, wie z.B. für Druckprüfung, Durchflussprüfung, für die Messung der ungestörten Temperatur im Erdreich sowie von Geothermal Response Test (GRT bzw. TRT).

Der GEOgert kann via Satellit, mit dem Internet und mit Mobiltelefonen kommunizieren. So können die Ergebnisse in Echtzeit übermittelt werden. Der GEOgert 2.0 ist ein modulares System, bestehend aus zwei mobilen Geräten. Diese beiden Module können drahtlos miteinander kommunizieren. Dimensionen und Gewicht der zwei Module sind wie folgt:

- Modul 1: 80 x 45 x 70 cm (LxBxH), 59 kg
- Modul 2: 80 x 45 x 62 cm (LxBxH), 49 kg

Weitere Kennwerte:

- Maximaldruck: 16 bar
- Maximaler Volumenstrom: 2.3 m³/h
- Elektrische Leistung: 8 kW
- Minimale Abtastrate / Messintervall: 1 s
- Messbereich: -55 °C – 110 °C

Weitere Informationen über das GeoGERT können beim Hersteller eingeholt werden

6.2 Andere Messgeräte

6.2.1 Ablenkungsmessgerät der Firma Geo Explorers AG

Die Firma Geo Explorers AG besitzt zwei unterschiedliche Ablenkungsmessgeräte. Beide Geräte wurden im Rahmen der im Jahr 2015 von EnergieSchweiz ausgeführten Vergleichsmessungen getestet [2]. Eines der Ablenkungsmessgeräte war zu dieser Zeit noch in der Entwicklungsphase und konnte 2015 den Verlauf der EWS nicht mit genügender Präzision messen. Dieses Gerät wurde fertig entwickelt und ist nun marktreif im Einsatz. Im Rahmen dieser Studie wurde dieses erneut getestet.

Das getestete Ablenkungsgerät bestimmt die Lage der EWS mit einer Kombination aus 3-Achs-Magnetometer, 3-Achs-Accelerometer und 3-Achs-Gyroskop.

6.2.2 Ablenkungsmessgerät der Firma Terratec GmbH

Die Firma Terratec Geophysical Services GmbH verwendet für die Messung des Bohrlochverlaufs die Mini-Verlaufssonde (MBDV). Um den Verlauf der Bohrung zu messen, wird ein EWS-Strang mit der Mini-Verlaufssonde befahren. In der Messsonde befinden sich ein 3-achs Accelerometer und ein 3-achs Magnetometer. Mit dem Accelerometer wird die Neigung gegen die Vertikale ermittelt, mit dem Magnetometer die Richtung im Erdmagnetfeld, also der Azimut (Abweichung zu magnetisch Nord) bestimmt. Die Präzision der Sensoren beträgt laut Hersteller $\pm 1^\circ$ für die Neigung und $\pm 2^\circ$ für den Azimut.

6.2.3 Temperaturmessgerät der Firma Terratec GmbH

Zur Messung des Temperaturprofils in der Sonde verwendet die Firma Terratec GmbH die Mini-Gamma-Temperatur-Sonde (MGamT). Mit der MGamT-Sonde werden während einer Messfahrt die beiden Parameter Temperatur des Sondenfluids sowie die natürliche Gammastrahlung der Gesteine aufgezeichnet. Das Temperaturprofil wird mit Hilfe eines an der Sondenspitze angebrachten Messfühlers erfasst.

Die Sonde kann pro Minute eine Distanz von 1 – 2 m in der Sonde zurücklegen. Die räumliche Auflösung der Messung beträgt dabei ca. 1 cm. Die Temperatur wird mit einer Auflösung von 0.1 K aufgezeichnet.

6.2.4 Temperaturmessgerät der Firma Tachyon

Das Temperaturmessgerät von Tachyon besteht aus einem Kabel mit vordefinierten und vorkonfigurierten Messzonen. Diese Messzonen werden als « zones sensibles » bezeichnet. Weitere Angaben zur Messmethode werden von Tachyon nicht offen gelegt.

Das Intervall zwischen den Messzonen kann unterschiedlich definiert werden. Für diese Messung wurden Intervalle von 10 m definiert. Durch die Verwendung weiterer „zones sensibles“ könnten die Intervalle im untersuchten Tiefenbereich verkürzt werden.

Das Kabel wurde in die wassergefüllten Rohre bis eine Tiefe von 40 m eingebaut.

Für die Messung wird das Kabel mit einem externen Datenlogger verbunden. Die Messdaten wurden kontinuierlich über ein Modem auf einen Server geschickt und online visualisiert.

6.2.5 Faseroptische Temperaturmessung

Das faseroptische „*Distributed Temperature Sensing*“ (DTS)-System basiert auf dem physikalischen Prinzip der Raman-Streuung: Ein Laser-Puls wird in das Glasfaserkabel gesendet und das im Kabel gestreute und reflektierte Signal mit einem Messgerät erfasst. Die Auswertung des Signals erlaubt die Bestimmung der Temperatur auf der ganzen Länge des Glasfaserkabels.

In der EWS-Versuchsanlage der GEOTEST AG wurde ein Glasfaserkabel bis eine Tiefe von ca. 230 m installiert. Dies erlaubt eine kontinuierliche Überwachung der Untergrundtemperatur. Da die Sonde zum Zeitpunkt der Installation des Glasfaserkabels bereits eingebaut und die Hinterfüllung abgebunden war, wurde das Kabel direkt in den Rohren installiert.

Das in der Sonde eingebaute faseroptische DTS-System hat eine Auflösung von 2 m.

Das DTS-Gerät wurde von der Firma GeoAzimut zur Verfügung gestellt. Die erhobenen Daten wurden von der GEOTEST AG ausgewertet und interpretiert.

7. Untersuchungsresultate

7.1 Temperaturmessung

Die ausgeführten Temperaturmessungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Messungen erfolgten im Zeitraum vom 04.10.2016 bis 17.02.2017.

Tabelle 3: Auflistung der ausgeführten Temperatur-Messungen.

| Firma | Gerät | Zeitperiode |
|----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| GEOTEST AG | GEOsniff® DTS - Glasfaser | 4. Oktober 2016 4. Oktober 2016 |
| GeoAzimut GmbH | DTS - Glasfaser GTS ¹ | 4. Oktober 2016 4. November 2016 |
| Tachyon | Câble multi-sensible | 7. Oktober 2016 |
| Terratec GmbH | MGamT | 17. November 2016 |
| Geowatt AG | NIMO-T ¹ | 5. Dezember 2016 |

¹Die Temperaturmessung wurde im Zusammenhang mit dem TRT ausgeführt.

Die EWS-Versuchsanlage ist mit faseroptischer DTS-Technologie (Digital Temperatur Sensing) ausgerüstet. Diese Technologie wurde vorgängig mit GEOsniff® Messungen überprüft und dient als Kontrolle bzw. Vergleichswert für die Temperaturmessungen. Sie wurde als kontinuierliche Überwachung während der TRT-Messungen verwendet.

Ein Vergleich der sechs ausgeführten Temperatur-Tiefen-Profile innerhalb der EWS ist in Abbildung 3 dargestellt. Der Vergleich zeigt für die obersten ca. 20 m deutliche Unterschiede, die auf den saisonalen Einfluss der zum Zeitpunkt der Messungen unterschiedlichen Oberflächentemperaturen zurückzuführen sind.

Ab einer Tiefe von ca. 20 m bis zur Endtiefe zeigen alle Messungen eine Absenkung der Temperatur in den ersten 70 m und eine Zunahme der Temperatur in den folgenden 70 bis 225 m. Daher weisen alle Messungen vergleichbare Temperaturverläufe auf.

Auch wenn alle Messungen vergleichbare Temperaturverläufe zeigen, sind die unterschiedlichen Messungen in der Temperatur versetzt. Die Messung der Firma Terratec (MGmaT) ist z.B. im Durchschnitt um 1.5 K höher als das Referenzprofil. Der Grund dafür sind die Thermal Response Tests (TRT), die zwischen den unterschiedlichen Temperaturmessungen ausgeführt wurden (siehe Kapitel 7.3). Während der Durchführung des TRT wird Wärmeenergie in die EWS eingespeist, was eine Erhöhung der Temperatur bewirkt. Um nach dem TRT auf das ursprüngliche Temperaturniveau zurückzukehren, braucht der Untergrund eine gewisse Zeit. Diese Zeit ist abhängig von der Dauer des TRT und beträgt 2-4 Wochen (Abbildung 2). Zum Zeitpunkt der Messungen der Firmen Terratec, GeoAzimut und Geowatt hatte der Untergrund seinen Ausgangszustand noch nicht wieder vollständig erreicht, wodurch die Resultate der Temperaturmessung höher ausfallen.

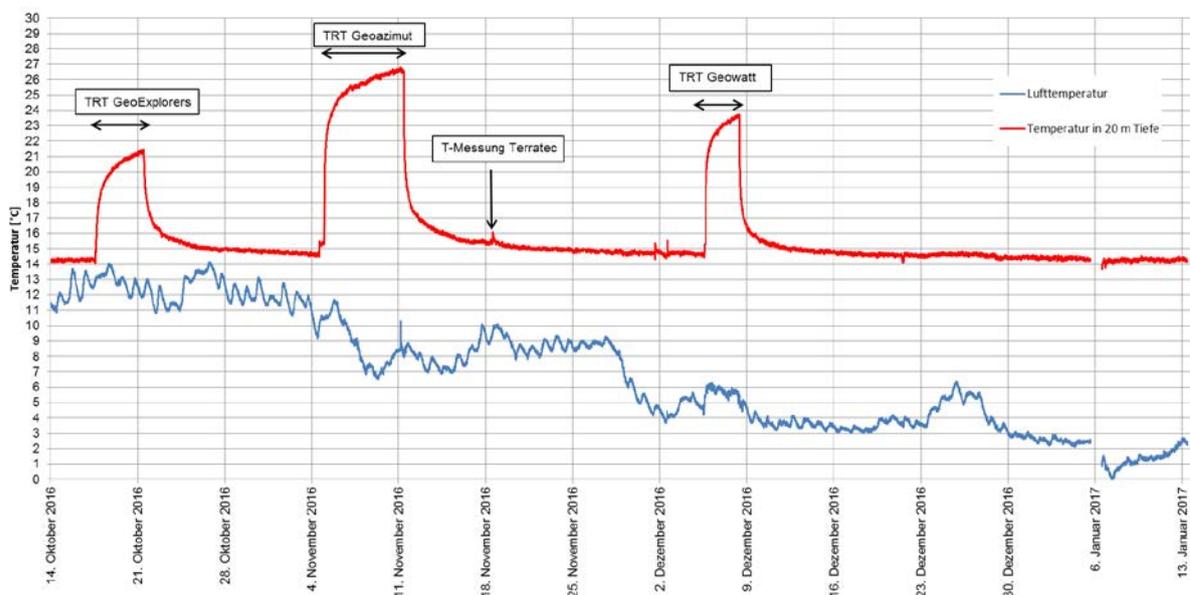


Abbildung 2: Zeitliche faseroptische Temperaturmessung während der Ausführung der TRT-Messung (Lufttemperatur und Temperatur in 20 m Tiefe).

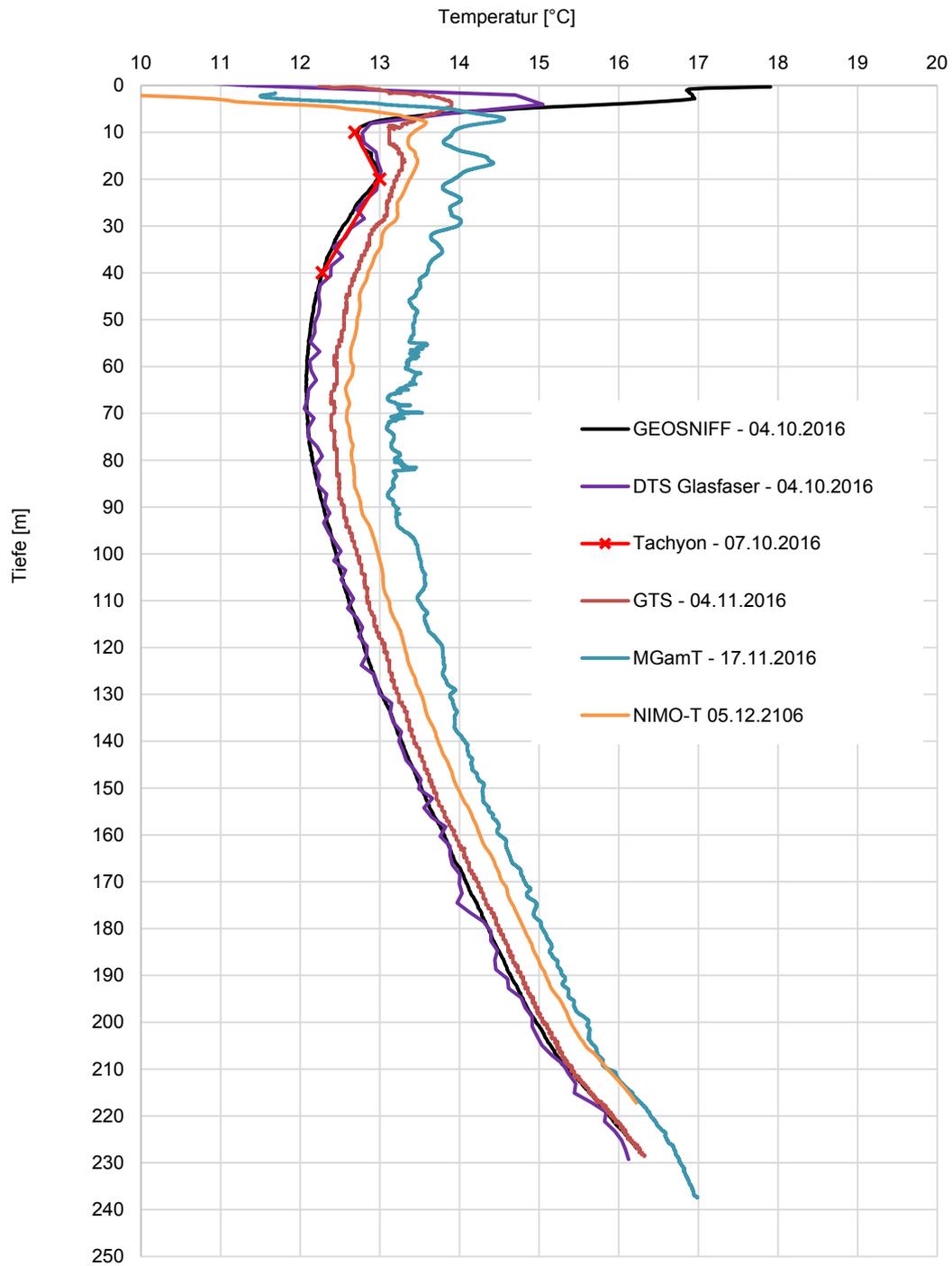


Abbildung 3: Vergleich der gemessenen Tiefen-Temperaturprofile.

Abgesehen von der GEOsniff®- und den DTS Messungen vom 4.10.2016 sowie von der Tachyon Messung vom 7.10.2016 sind alle Temperaturprofile durch die TRT Messungen gestört und können nicht ohne Korrekturen verglichen werden.

Der Vergleich zwischen den einzelnen Temperaturmessungen mit den unterschiedlichen Geräten sowie mit der kontinuierlichen faseroptischen Temperaturmessung am entsprechenden Datum sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit der Messung mittels faseroptischer Technologie.

Die Abweichung von der Messung mit der faseroptischen Technologie ist ab einer Tiefe von 20 m mehr oder weniger konstant. Der absolute Unterschied zwischen den Messungen beträgt in 20 m Tiefe maximal ± 0.45 K und bei der Endtiefe noch ± 0.35 K.

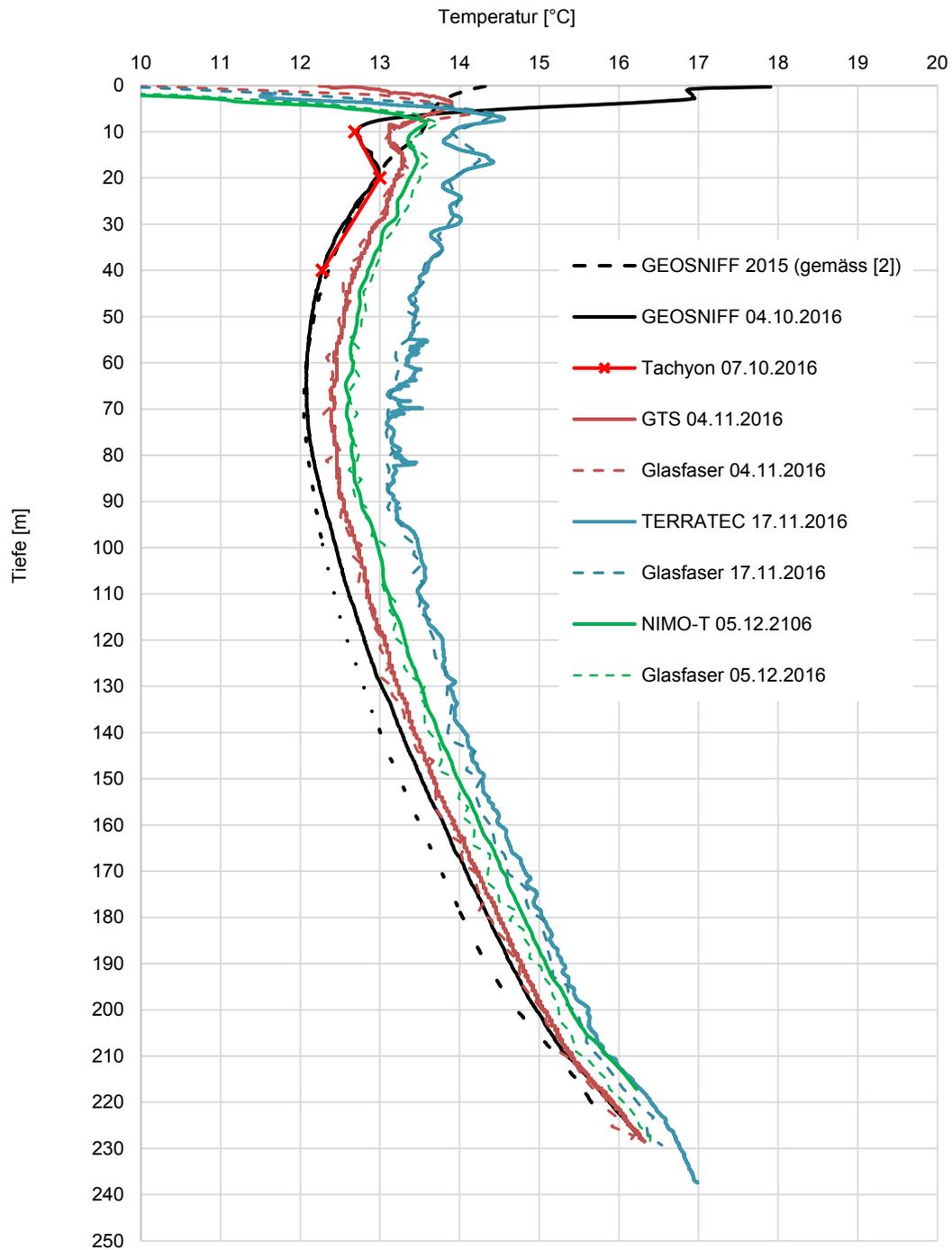


Abbildung 4: Vergleich der gemessenen Tiefen-Temperaturprofile, zusammen mit dem faseroptischen Tiefen-Temperaturprofil am entsprechenden Datum (gestrichelte Linien).

7.2 Verlaufsmessungen

Im Jahr 2015 wurden dreidimensionale Verlaufsmessungen der EWS mit den Messsystemen der Firma André Voutta, mit der Messsonde DeepDrifter® der Firma Eberhard & Partner AG sowie mit den Ablenkungsmessgeräten 1 und 2 der Firma Geo Explorers AG durchgeführt [1]. Dabei wurden jeweils die Tiefe der EWS sowie deren Abweichung von der Senkrechten gemessen.

Bei der Messung mit dem Ablenkungsmessgerät-1 der Firma Geo Explorers wurde eine Abweichung in Richtung NO gemessen. Diese Messung weicht damit deutlich von den übrigen Messungen ab. Laut der Firma Geo Explorers AG war das Ablenkungsmessgerät-1 damals noch in der Entwicklungsphase. Das Gerät wurde in der Zwischenzeit fertig entwickelt und wurde im Rahmen dieser Studie nochmals geprüft.

Im Jahr 2016 wurde ebenfalls ein Ablenkungsmessgerät der Firma Terratec geprüft.

Die aktuellsten Ergebnisse der verschiedenen Messgeräte sind in Tabelle 4 zusammengefasst und in Abbildung 5 und Abbildung 6 dargestellt. Abbildung 5 zeigt die absolute Abweichung von der Senkrechten, in Abbildung 6 ist die Orientierung/Richtung der Abweichung von der Senkrechten in einem Polardiagramm dargestellt.

Alle Messungen zeigen in guter Übereinstimmung tendenziell eine Abweichung in Richtung Westen.

In Abbildung 5 ist der Tiefenverlauf der absoluten Abweichung von der Senkrechten dargestellt. Das neue Messgerät der Firma Geo Explorers hat nur bis in eine Tiefe 168.4 m gemessen. Bei der Endteufe weisen die Messungen eine maximale Abweichung von 6.20 m, 7.13 m, 8.29 m und 8.22 m von der Senkrechten aus. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von 2.6% bis 3.5% der Gesamttiefe.

Der Tiefenverlauf der Messungen zeigt grundsätzlich, dass die erste Strecke der Sonde relativ senkrecht zur Oberfläche verläuft. Je nach Messungen reicht diese erste senkrechte Strecke bis in eine Tiefe von 40 m bis 110 m. Danach nimmt die Abweichung von der Senkrechten mit der Tiefe bis zur Endteufe mehr oder weniger konstant zu.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Ergebnisse der Tiefen- und Verlaufsmessungen (Messkampagne 2015 und 2016).

| Firma | Messgerät | Jahr der Messung | Gemessene Endtiefe [m u. OKT] | Abweichung von der Senkrechten | |
|-----------------------|---------------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------|
| | | | | Max. Betrag [m] | Orientierung |
| GEOTEST AG | GEOSniff® | 2015 | 233.7 (TVD) | - | - |
| ACR energiebohr AG | NIMO-T | 2015 | 233.5 (TVD) | - | - |
| GeoAzimut GmbH | GTS | 2015 | 235.2 (TVD) | - | - |
| André Voutta | PT100 | 2015 | 239.6 (MD) | - | - |
| André Voutta | Verlaufsmessgerät | 2015 | 238.7 (TVD)* 239.2 (MD) | 6.2 | W |
| Eberhard & Partner AG | Deepdrifter® (Temperatur) | 2015 | 234.9 (TVD)* 236.3 (MD) | - | - |
| Eberhard & Partner AG | Deepdrifter® (Verlauf) | 2015 | 234.6 (TVD)* | 8.3 | W |
| Geo Explorers AG | Temperaturmessgerät | 2015 | 235.2 (TVD) | - | - |
| Geo Explorers AG | Ablenkungsmessgerät 2 | 2015 | 234.1 (TVD) | 7.1 | W |
| Geo Explorers AG | Ablenkungsmessgerät 1 | 2016 | 168.6 (TVD)** 168.4 (MD)** | 3.8 | W |
| Terratec GmbH | Verlaufsmessgerät | 2016 | 237.5 | 8.2 | W |

*: aus Messergebnissen umgerechnet; **: Messung auf Grund von steckengebliebenem Gerät abgebrochen.

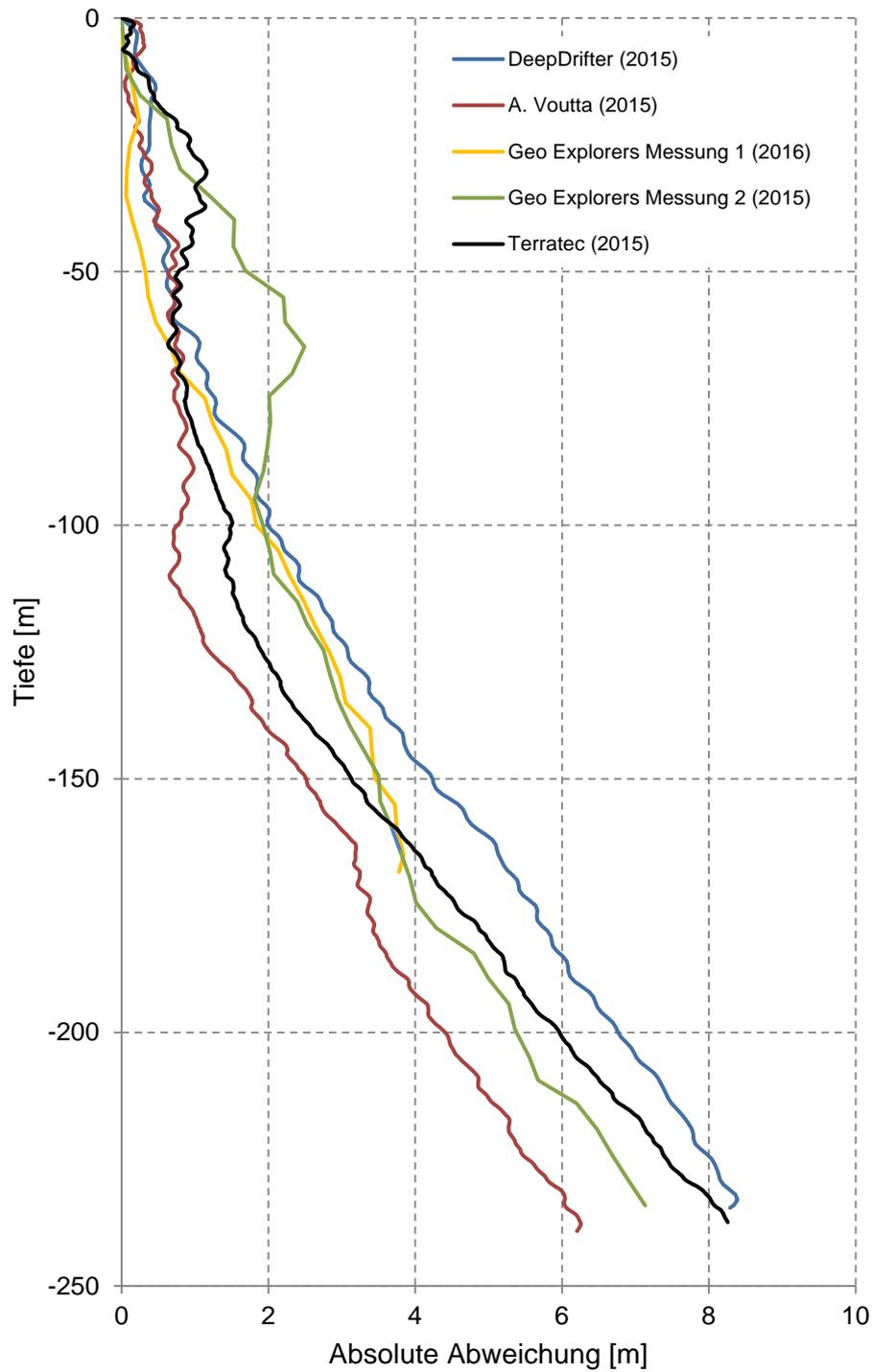


Abbildung 5: Vergleich der absoluten, gemessenen Abweichung der EWS von der Senkrechten.

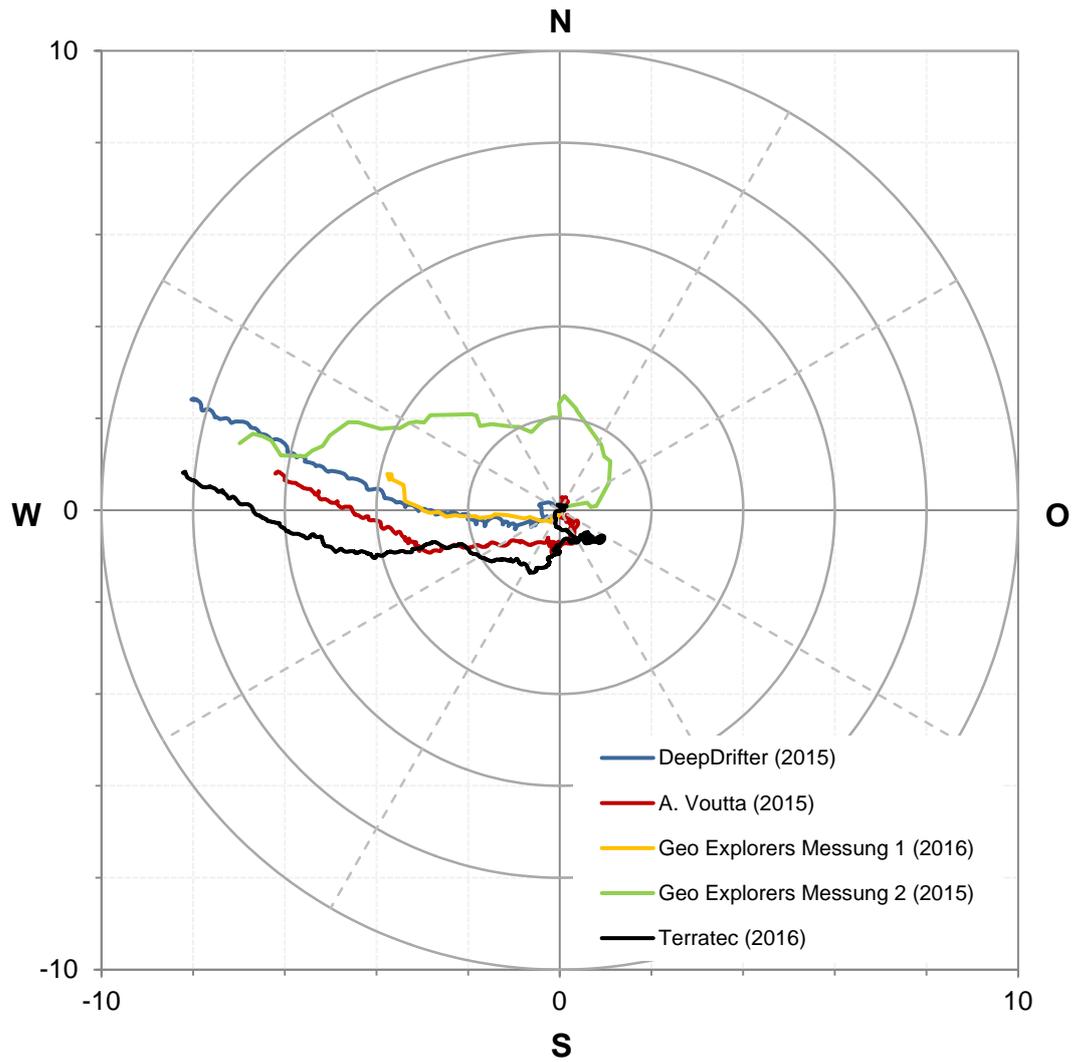


Abbildung 6: Darstellung der Richtung der gemessenen Abweichung der EWS [m] von der Senkrechten bei der Messkampagne 2015.

7.3 Thermal Response Tests

Thermal Response Test erlauben die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, des Bohrlochwiderstands sowie der ungestörten durchschnittlichen Untergrundtemperatur. Die Angaben zu den TRTs und die Ergebnisse der Tests sind für die drei Kennwerte in Tabelle 5 bzw. Tabelle 6 zusammengefasst. Als Vergleich dazu sind die Ergebnisse der GEOTEST AG vom Januar 2016 in der letzten Spalte aufgeführt.

Zwischen den TRT-Messungen wurde eine Wartezeit von jeweils 2 Wochen eingeplant, damit die Messungen nicht durch das vorhergehende TRT thermisch beeinträchtigt sind.

Die Ergebnisse werden dazu in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

Tabelle 5: Kenndaten der TRT-Messungen.

| Firma | Geo Explorers | Geo-Azimut | Geowatt | Forasol | GEOTEST ² |
|---------------------------|-----------------|------------------|------------|------------------|----------------------|
| Heizleistung | 8.8 kW | 10 kW | 8.3 kW | 4 kW | 9.6 kW |
| Durchfluss | 21.7 l/min | 32.9 l/min | 31.7 l/min | 25.7 l/min | 28.5 l/min |
| Heizungszeit ³ | 4 Tage | 6 Tage | 3 Tage | 3 Tage | 5 Tage |
| Geräthersteller | Geotechnik Lehr | Swiss-geotesting | Geowatt | Geoenergia s.r.l | Swiss-geotesting |

² Als Kontrolle verwendet

³ Gemäss SIA-Norm beträgt den Mindestlaufdauer 60 Stunden bzw. 2.5 Tage.

Tabelle 6: Ergebnisse der TRT-Messungen mit Abweichung vom Mittelwert in % (in Klammern).

| | Geo Explorers | Geo- Azimut | Geowatt | Forasol | GEO- TEST | Mittel- wert |
|--|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)] | 2.33 (0.6) | 2.42 (3.2) | 2.47 (5.4) | 2.05 (12.5) | 2.45 (4.5) | 2.34 |
| Ungestörte Unter- grundtemperatur [°C] | 13.4 (1.2) | 13.7 (1.0) | 13.7 (1.0) | 13.7 (1.0) | 13.3 (1.9) | 13.6 |
| Thermischer Bohr- lochwiderstand R_b [K·m/W] | 0.09 (12.5) | 0.08 (0.0) | 0.07 (12.5) | 0.08 (0.0) | 0.09 (12.5) | 0.08 |

7.3.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Ergebnisse der Vergleichs TRT-Messungen ergeben Wärmeleitfähigkeiten zwischen 2.05 und 2.47 [W/(m·K)], was einer Abweichung von 17% entspricht (Abbildung 7).

Die ermittelte Wärmeleitfähigkeit von GeoAzimut, Geowatt und GEOTEST sind untereinander sehr ähnlich (Abweichung ca. 1%). Die Firma Geo Explorers ermittelt einen etwas tieferen Wert (Abweichung ca. 5%). Der niedrigste Wert wurde von der Firma Forasol ermittelt (Abweichung ca. 17%).

Der Untergrund am Messstandort besteht aus Sedimentgesteinen der Unteren Süsswassermolasse (USM). Gemäss Literatur [5] liegt der Wertebereich für die USM zwischen 2.2 und 3.1 [W/(m·K)]. Dieser Wertebereich weist eine gute Übereinstimmung mit den im Rahmen dieser Studie gemessenen Werten auf.

Der Wert der Firma Forasol liegt unterhalb der Untergrenze des Wertebereiches. Diese Abweichung ist möglicherweise durch eine zu geringe Heizleistung oder zu kurze Heizungszeit bedingt.

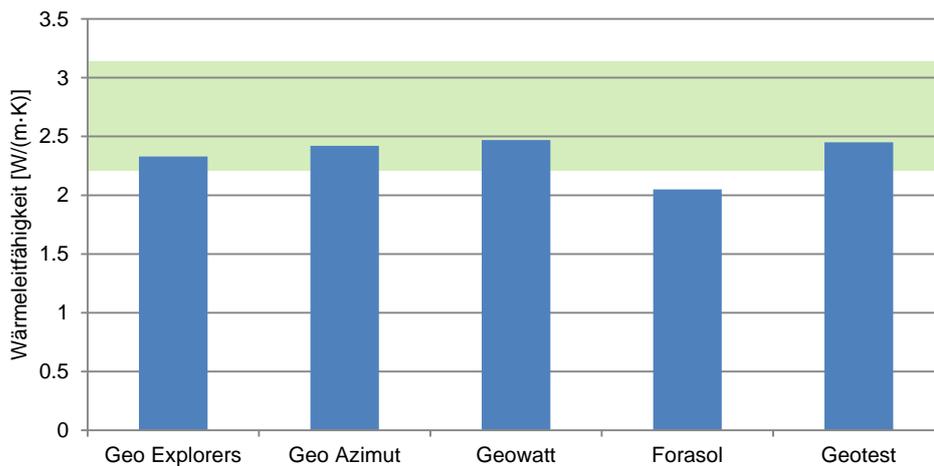


Abbildung 7: Vergleich zwischen den mit TRT-Messungen ermittelten Wärmeleitfähigkeiten. In grün ist der Wertebereich für die Gesteine der Unteren Süsswassermolasse gemäss [5] dargestellt.

7.3.2 Ungestörte Untergrundtemperatur

Die mit dem TRT-Gerät gemessenen durchschnittlichen Temperaturen liegen zwischen 13.3 und 13.7 [°C]. Diese wurde während der Zirkulationsphase vor dem Einschalten des Heizkörpers ermittelt.

Da die Temperatur in den obersten 20 m durch die Oberflächentemperatur beeinflusst wird, sind geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Messungen zu erwarten.

Die durch die TRT-Messung gemessene durchschnittliche Temperatur weist eine gute Übereinstimmung mit der über die gesamte Sondenlänge gemittelten Temperatur auf (siehe Kapitel 7.1).

Ein Teil der Abweichung zwischen den einzelnen gemessenen Temperaturwerten ist dabei auch den durchgeführten TRT's zuzuschreiben.

7.3.3 Thermischer Bohrlochwiderstand

Der thermische Bohrlochwiderstand liegt zwischen 0.07 und 0.09 [K·m/W]. Der Mittelwert beträgt 0.08 [K·m/W]. Alle Messungen liegen daher in einer Bandbreite von ca. $\pm 12.5\%$.

Die ermittelten Werte liegen im erwarteten Bereich. Erfahrungsgemäss befinden sich die Werte für den thermischen Bohrlochwiderstand unter 0.1 [K·m/W]. Höhere Werte können auf ein Problem mit der Hinterfüllung hinweisen.

Beim thermischen Bohrlochwiderstand ist zu beachten, dass der ermittelte Wert vom Bohrdurchmesser und von der Durchflussrate abhängig ist und daher nur für die Versuchsbedingungen gilt.

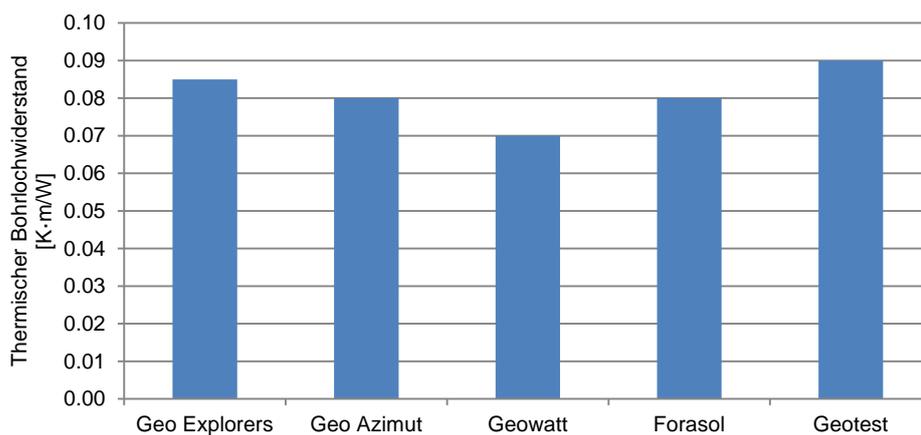


Abbildung 8: Vergleich zwischen den mit TRT-Messungen ermittelten thermischen Bohrlochwiderständen.

8. Schlussfolgerungen

Im Auftrag von EnergieSchweiz wurden an der EWS-Versuchsanlage der GEO-TEST AG in Zollikofen Vergleichsmessungen mit 13 verschiedenen Geräten durchgeführt. Gemessen wurden Ruhetemperaturprofile (6 Messsysteme), der dreidimensionale Verlauf der EWS (2 Messsysteme), die Wärmeleitfähigkeit sowie der thermische Bohrlochwiderstand (5 Messsysteme).

Die EWS-Versuchsanlage besteht aus einem Doppel-U 40 mm PE-Rohr mit einer Länge von ca. 250 m.

Temperaturmessungen

Der Vergleich der Temperatur-Tiefen-Profile zeigt für alle Messungen gut übereinstimmende Ergebnisse.

Alle Geräte konnten die Temperatur bis zur Endtiefe der Sonde messen, ausser dem Gerät von Tachyon, welches im Rahmen dieser Studie nur bis eine Tiefe von 40 m getestet wurde. Es wurde dazu mit einer Anordnung von 4 „zones sensibles“ getestet. Das Gerät liefert daher nur punktuelle Messungen und ist kein Logging-Instrument. Es ist jedoch gemäss Angabe des Herstellers möglich, dieses Gerät mit einer höheren Auflösung zu verwenden.

Die Temperatur des Untergrunds wird lokal durch das Erstellen der EWS beeinträchtigt. Daher sollten Temperaturmessungen der ungestörten Temperatur des Untergrundes erst ca. 8 bis 10 Tage nach dem Verpressen der EWS erfolgen.

Die Temperatur des Untergrunds ist dazu durch die Ausführung der TRT beeinflusst. Für weitere Messungen der ungestörten Temperatur wird eine Wartezeit von 2 bis 4 Wochen nach einem TRT empfohlen.

Im Wesentlichen sind die Messgeschwindigkeit und die thermische Trägheit des Geräts bei der Temperaturmessung von Bedeutung.

Die Ergebnisse der einzelnen Messsysteme können als vergleichbar angesehen werden. Für weiterführende Analysen und Planungsarbeiten sind die Temperatur-Tiefen-Profile bezüglich ihrer Genauigkeit aus unserer Sicht ausreichend, wenn die Messgeschwindigkeit entsprechend angepasst wird.

Verlaufsmessungen

Die Verlaufsmessungen wurden mit den Messsystemen der Firmen Terratec und Geo Explorers durchgeführt. Das Gerät der Firma Geo Explorers wurde bereits im Jahr 2015 getestet und wurde in der Zwischenzeit fertig entwickelt.

Beide Verfahren weisen vergleichbare Ergebnisse bezüglich des dreidimensionalen Verlaufs (Betrag der Ablenkung und Orientierung) auf.

Thermal Response Test (TRT)

Für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit sind alle getesteten Geräte vergleichbar, obwohl die Messverfahren sich leicht unterscheiden.

Für die Dimensionierung einer EWS-Anlage ist gemäss SIA Norm 384/6 von der ermittelten Wärmeleitfähigkeit ein Sicherheitsabzug von 5 % bis 10 % zu machen.

Nach der Erstellung einer Erdwärmesonde ist es wichtig, mit der Durchführung des TRT sowie mit den Temperaturmessungen so lange zu warten, bis sich eine ungestörte Untergrundtemperatur eingestellt hat. Durch die Abbindwärme der Hinterfüllung wird diese beim Einbau der EWS gestört. Eine Wartezeit von 8 – 10 Tagen ist empfehlenswert.

Um eine ungestörte Bodentemperatur zu erfassen, ist nach einem TRT eine Wartezeit von 3 Mal der TRT Messdauer nötig.

Bei der Ausführung von TRT ist es zu beachten, dass die Ungenauigkeit, bzw. der zu erwartende Fehler im Bericht kommuniziert ist. Die Durchführung des TRT (Leistung, Dauer,...) muss an die Sondenanordnung angepasst werden. Je länger die TRT-Messungen dauern, desto genauer wird deren Auswertung.

Die Kosten für TRT's werden durch den Markt kontrolliert und liegen im Bereich von einigen Tausend Schweizerfranken (Stand 2017). Die Kosten sind abhängig von der Dringlichkeit der Messung, der Verfügbarkeit der Geräte sowie von anderen Faktoren, wie z.B. vom Messstandort oder allfälligen Rabatten.

Gemäss SIA-Norm 384/6 (Absatznummer 2.3.2.3, Tabelle 1), muss für TRT-Tests die Laufdauer mindestens 60 Stunden (2.5 Tage) betragen, was nach den Ergebnissen dieser Studie ausreichend ist.

Weiter muss die Heizleistung der Sondenlänge angepasst werden.

Die ermittelten thermischen Bohrlochwiderstände sind alle ähnlich.

Es ist zu beachten, dass die gemessenen Bohrlochwiderstände nur für die Versuchsbedingungen gelten. Für die Dimensionierung muss der gemessene Wert den Betriebsbedingungen angepasst werden.

Der Bohrlochwiderstand ist für die Dimensionierung von EWS-Feldern wichtig, kann aber in der Simulationssoftware für übliche Erdsonden auch analytisch berechnet werden (z.B. nach Hellström).

9. Zusammenfassung, weiteres Vorgehen

Temperatur-, Verlaufs- und TRT-Messungen liefern für die Planung, die Dimensionierung sowie für die Qualitätssicherung von EWS wichtige Informationen. Solche Messungen sollten künftig je nach Fragestellung und Komplexität der Anlage vermehrt eingesetzt werden.

Die hier beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass allfällige Messungenauigkeiten in der Praxis in erster Linie auf die Durchführung der Messung sowie auf die Interpretation derselben und nicht primär auf Ungenauigkeiten der Messgeräte zurückzuführen sind.

Bei TRT-Messungen ist gemäss SIA-Norm 384/6 für die Dimensionierung und Auslegung von Anlagen eine Toleranz von 5 bis 10 % von der gemessenen Wärmeleitfähigkeit abzuziehen. Dieser Abzug berücksichtigt Ungenauigkeiten beim Messvorgang und wird durch die vorliegenden Messresultate weitgehend bestätigt.

Auch die Messung des thermischen Bohrlochwiderstandes liefert bei allen Messungen ähnliche Resultate. Hier ist zu beachten, dass der gemessene Bohrlochwiderstand nur für die Versuchsbedingungen gilt und für die Dimensionierung den Betriebsbedingungen angepasst werden sollte.

Für Verlaufsmessungen ist die Genauigkeit des Messsystems von grösserer Bedeutung. Aus diesen Gründen sind die Messgenauigkeiten, die Einsatzbereiche der Geräte sowie der Vorgang der Messung präzise zu dokumentieren.

Aus unserer Sicht haben alle eingesetzten Messverfahren die entsprechende Zielsetzung erreicht.

Die ausgewählten Geräte sind für Messeinsätze in Erdwärmesonden mit einem Innendurchmesser von 40 mm und bis in einen Tiefenbereich von rund 235 m gut

geeignet und für diese Verwendung geprüft. Diese Feststellung trifft für das Messverfahren der Firma Tachyon nicht zu, weil dieses im Rahmen der vorliegenden Studie nur bis in eine Tiefe von 40 m getestet werden konnte. Vermutlich können unsere Folgerungen für Messergebnisse bis in eine Tiefe von 300 m extrapoliert werden. Für grössere Tiefen empfehlen wir die Ausführung weiterer Prüfungen.

Die Ausführung von Messungen in Erdwärmesonden beinhaltet ein gewisses Risiko, dass beim Messvorgang die eingesetzten Geräte beschädigt werden könnten (z.B. bei Verengungen des Sondenquerschnittes) und/oder die Erdwärmesonde selbst beeinträchtigt werden könnte. Für solche Fälle sollten die Verantwortlichkeiten und Haftungsfragen bereits im Vorfeld der Messkampagne geregelt sein.

Die Anwendung solcher Messungen in der Praxis müssten in technischen Richtlinien genauer geregelt werden. Zudem gilt es in der Anwendung, ebenfalls wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen, damit in der Zukunft eine optimierte Nutzung der Wärme aus dem Untergrund gewährleistet ist.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden in der Schweiz von insgesamt 7 Firmen für kommerzielle Zwecke eingesetzte Geräte geprüft. Die Versuchsanlage der GEOTEST AG in Zollikofen steht für Vergleichsmessungen mit neu entwickelten Geräten und/oder anderen Anbietern solcher Messverfahren zur Verfügung.