

Schlussbericht, 16. Februar 2016

Qualitätssicherung Erdwärmesonden

Temperatur- und Verlaufsmessungen in Erdwärmesonden



Autoren

Dr. Vincent Badoux, GEOTEST AG

Mark Gropius, 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

16.02.2016

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Aufgabenstellung	3
2.	Verwendete Unterlagen	4
3.	Grundlagen	4
3.1	Geothermie	4
3.2	Messwerte / Ziel der Messungen	5
3.2.1	Temperaturmessungen	5
3.2.2	Verlaufsmessungen	6
4.	Eingesetzte Messgeräte	9
4.1.1	NIMO-T	9
4.1.2	Geosniff	10
4.1.3	Geothermal Testing System (GTS).....	11
4.1.4	Deepdrifter®.....	12
4.1.5	PT-100 der Firma André Voutta Grundwasserhydraulik.....	13
4.1.6	Messgeräte der Firma Geo Explorers AG	14
5.	Ergebnisse der Vergleichsmessungen	15
5.1	Ausgeführte Messungen	15
5.2	Temperaturmessungen	16
5.3	Verlaufsmessungen	19
6.	Bemerkungen und Folgerungen	23
7.	Zusammenfassung, weiteres Vorgehen	24
	Anhänge	26

16.02.2016

Version

Version	Datum	Bezeichnung
V1	22.12.2015	Finalbericht
V2	15.01.2015	Anpassung gemäss BFE Email vom 31.12.2015
V3	25.01.2016	Anpassung gemäss BFE Email vom 22.01.2016
V4	16.02.2016	Anpassung Stellungnahme Lieferanten

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Erdwärmesonden (EWS) werden vielfach genutzt, um aus dem Untergrund Energie zu Heiz- und/oder Kühlzwecken zu gewinnen. Für die Planung und Dimensionierung von EWS-Feldern sowie für die Qualitätssicherung sind Kenntnisse des Untergrundaufbaus und der Temperaturverteilung im Untergrund nötig. Dafür werden u.a. Verlaufs- und Temperaturmessungen in EWS durchgeführt.

Auf dem Markt sind unterschiedliche Anwendungen und Verfahren zur Temperatur- und Verlaufsbestimmung von Bohrungen verfügbar. Das Bundesamt für Energie (BFE) hat die GEOTEST AG beauftragt, zu diesem Thema Vergleichsmessungen durchzuführen. GEOTEST 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 ca. 601'553 / 205'277). Die GEOTEST nutzt diese seit Juni 2015 für Demonstrations-, Ausbildungs-, und Entwicklungszwecke sowie z.B. für die Messgeräteprüfung.

Im Rahmen dieses Projektes wurden zwischen August und Dezember 2015 mit unterschiedlichen Messverfahren die ungestörte Untergrundtemperatur und der Verlauf der Bohrung ermittelt. Ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse der unterschiedlichen Messverfahren erfolgt im vorliegenden Bericht.

16.02.2016

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] Produktinformation und Datenblatt NIMO-T:
<http://www.geowatt.ch/index.php?pid=22>.
- [3] Produktinformation und Datenblatt GEOSNIFF
- [4] Produktinformation und Datenblatt GTS:
http://www.geoazimut.com/site/images/PDF/Geoazimut_GTS.pdf
- [5] Produktinformation und Datenblatt DeepDrifter:
http://www.deepdrifter.ch/Downloads/FactSheet_DeepDrifter.pdf
- [6] Produktinformation und Datenblatt PT100:
http://www.avoutta.de/index.php?option=com_content&view=article&id=125:temperaturmessung-erdwaermesonde-revision&catid=89&Itemid=113

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

3. Grundlagen

3.1 Geothermie

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

Aufgrund radioaktiver Zerfälle wird im Untergrund kontinuierlich Wärme erzeugt. Als Ergebnis nimmt die Temperatur im Untergrund mit der Tiefe zu. Die Variation der Temperatur mit der Tiefe ist der geothermische Gradient (∇T). Es existiert ein prinzipieller Wärmefluss vom Erdzentrum nach aussen (Q_w). Der Wärmefluss Q_w [W/m^2], der geothermische Gradient ∇T [K/m] und die Wärmeleitfähigkeit λ [$W/(m \cdot K)$] sind abhängig voneinander und durch das Gesetz von Fourier wie folgt definiert (vereinfachte 1D Lösung):

$$Q_w = -\lambda \nabla T$$

Der durchschnittliche geothermische Gradient der Erdkruste beträgt ca. 30 K pro Kilometer Tiefe, wobei lokal deutliche Unterschiede aufgrund der geologischen und tektonischen Verhältnisse möglich sind. An Kontinentalplattenrändern, Störungs-

16.02.2016

zonen oder in vulkanischen Gebieten liegt ein deutlich höherer, in alten tektonisch ungestörten kontinentalen Schilden ein geringerer geothermischer Gradient vor.

Der geothermische Wärmefluss in der Schweiz beträgt ca. 60 – 80 mW/m².

Weil die Oberflächentemperatur mit der Zeit kontinuierlich variiert (saisonale Warm- und Kaltzeiten, Einfluss ehemaliger Eiszeiten, globale Erwärmung, urbane Abwärme, usw.), ist der ganze Prozess nicht im Equilibrium, sondern gleicht sich permanent den neuen Klimabedingungen an.

3.2 Messwerte / Ziel der Messungen

Erstes Ziel der Vergleichsmessungen ist es, die Temperatur des Untergrundes im ungestörten Zustand bestimmen zu können. Ein weiteres Ziel der Vergleichsmessung ist die Bestimmung des dreidimensionalen geometrischen Verlaufs der EWS im Untergrund.

3.2.1 Temperaturmessungen

Erdwärmesonden 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 Grundwasserströmung und in den obersten 20 m durch die saisonalen und täglichen Temperaturschwankungen an der Erdoberfläche.

Diese Abweichungen 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 bedingt eine Störung des lokalen Temperaturfeldes im Boden. Durch den Bohrvorgang zur Erstellung der Erdwärmesonde wird die Temperatur des Umgebungsgesteins verändert u.a. weil in der Regel Spülmaterien eingesetzt werden, die kühler als der Untergrund sind. Nach dem Einbau der Erdwärmesonde in das Bohrloch wird dazu Hinterfüllungsmaterial in das Bohrloch gepresst. Dieses besteht aus einer Mischung von Zement und Bentonit. Das Abbinden des Zements ist ein exothermer Prozess. Die abgegebene Wärme verändert ebenfalls lokal die Bodentemperatur.

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 ca. 8

16.02.2016

bis 10 Tage. Daher kann die Messung der ungestörten Temperatur des Untergrundes erst ca. 8 bis 10 Tage nach dem Verpressen erfolgen. Selbstverständlich muss die ungestörte Temperatur vor der Inbetriebnahme der EWS gemessen werden. Das Temperaturprofil wird mittels eines Sensors direkt in der mit Flüssigkeit gefüllten Sonde gemessen.

3.2.2 Verlaufsmessungen

Erdwärmesonden werden in der Regel vertikal installiert. Beim Bohren des Bohrloches 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 Sonde 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 in der Regel von einer Rolle in das Bohrloch herabgelassen. Eine vollständige Zentrierung der U-förmigen Sondenrohre im Bohrloch ist in der Regel 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 Vertikal 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.

16.02.2016

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. Gyroscope, Laserkreisel oder mechanischem 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.

16.02.2016

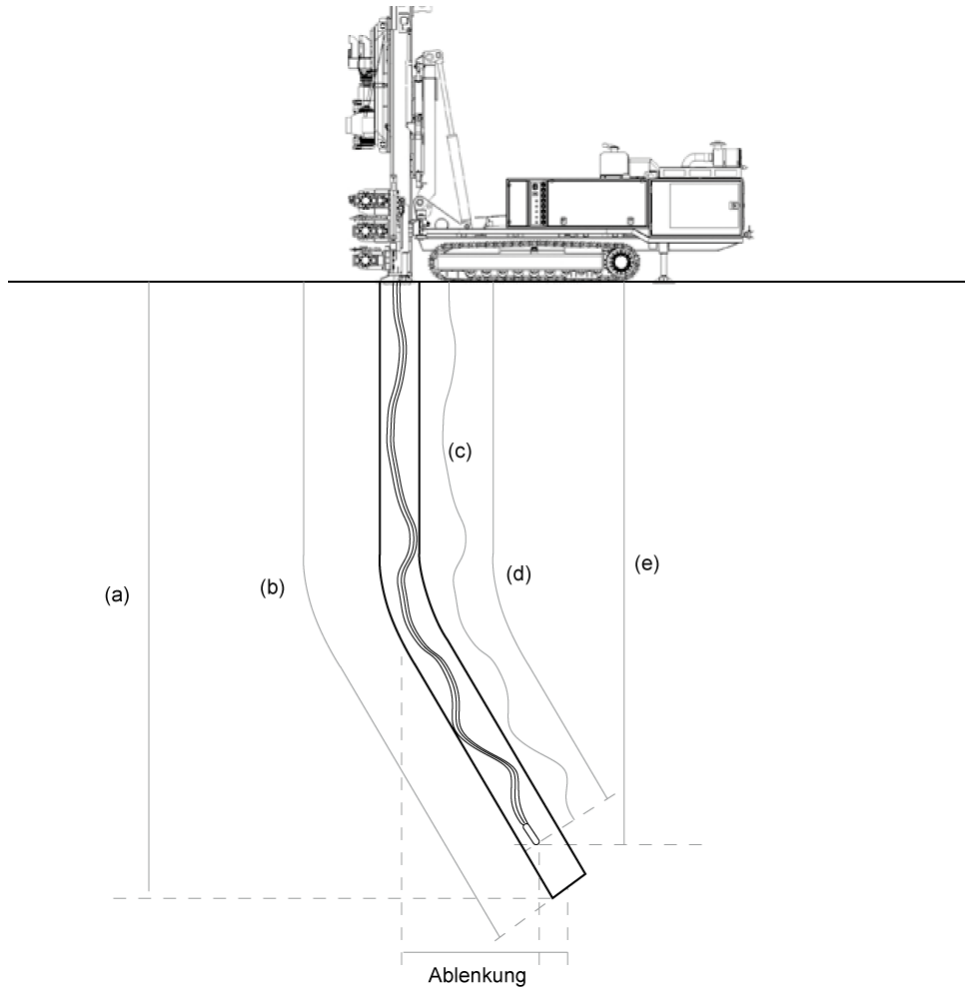


Abbildung 1: Darstellung: (a) *true vertical depth* (TVD) des Bohrlochs; (b) *measured depth* (MD) oder Länge des Bohrlochs; (c) *measured depth* (MD) oder Länge der Erdsondenrohres; (d) Bohrlochlänge bis Ende der Sonde; (e) *true vertical depth* (TVD) der Sonde (Quelle: GEOTEST AG)

16.02.2016

4. Eingesetzte Messgeräte

4.1.1 NIMO-T

Das Messgerät NIMO-T (**NON-wired Immersible Measuring Object for Temperature**) [2] wurde von der Firma GEOWATT AG in der Schweiz entwickelt und vermarktet.

Das kabellose Messgerät ist geringfügig schwerer als Wasser und sinkt deshalb mit einer konstanten Sinkgeschwindigkeit von ungefähr 0.2 bis 0.3 m/s bis zum Fuss der mit Wasser gefüllten Erdwärmesonde ab. Temperatur und Druck werden während dem Absinken der Sonde in definierbaren Zeitintervallen von 2 bis 6 Sekunden gemessen. Messdaten sind im Gerät gespeichert. Wenn das Messgerät am tiefsten Punkt angekommen ist, wird es durch Einpumpen von Wasser in das andere Ende des U-Rohres wieder hochgespült. Das NIMO-T ist standardmässig bis max. 400 m einsetzbar.

Gegenüber kabelgebundenen Messsystemen hat dies laut Hersteller den Vorteil, dass keine Probleme beim Hochziehen der Messsonde auftreten (durch die Reibung des Kabels auf das PE-Rohr).



Abbildung 2: Messsonde NIMO-T (Quelle: ACR-Bohrtechnik)

16.02.2016

4.1.2 Geosniff

Das Messgerät Geosniff [3] wurde durch die Firma ENOWARE in Karlsruhe (D) entwickelt und wird erst seit 2015 vertrieben. Es handelt sich um ein kabelloses miniaturisiertes Messgerät zur Druck- und Temperaturmessung, welches für Überwachung von Erdwärmesonden entwickelt wurde.

Das kugelförmige Gerät ist leicht schwerer als Wasser und sinkt deshalb mit einer konstanten Sinkgeschwindigkeit von ungefähr 0.1 bis 0.3 m/s bis zum Fuss der mit Wasser gefüllten Erdwärmesonde ab. Dabei werden in definierbaren Zeitintervallen von 1/32 bis zu 60 Sekunden Temperatur und Druck gemessen und die Messdaten direkt im Gerät gespeichert. Wenn das Messgerät am tiefsten Punkt angekommen ist, wird es durch Einpumpen von Wasser in das gleiche Ende des U-Rohres hochgespült. Daher gibt es eine Garantie, dass das Gerät bis zum Sondenfuss gelaufen ist.



Abbildung 3: Links: Das miniaturisierte kugelförmige Temperatur- und Druckmessgerät GEOSNIFF (Quelle: Enoware) Rechts: das Messgerät im Einsatz (Quelle: GEOTEST)

16.02.2016

4.1.3 Geothermal Testing System (GTS)

Das Messgerät GTS [4] wurde von der Firma Geoazimut Sàrl in Fribourg (CH) in Zusammenarbeit mit der Firma Swissgeotesting Sàrl in Nax (CH) entwickelt. Es handelt sich um einen Mini-Datalogger, der in regelmässigen Zeitintervallen Druck und Temperatur misst. Die Daten sind in der Sonde gespeichert. Die Messsonde wird an einem Kabel in die EWS hinuntergelassen und wieder heraufgezogen. Das Kabel überträgt weder Strom noch Daten. Gemäss Hersteller ist das Gerät bis zu einer Tiefe vom 800 m einsetzbar. Da das Kabel mit Messmarkierungen versehen ist, erlaubt das System GTS einen Vergleich der Laufmeter mit dem gemessenen Druck. Die Laufmeter werden jedoch nicht gespeichert und dienen hauptsächlich der Kontrolle.

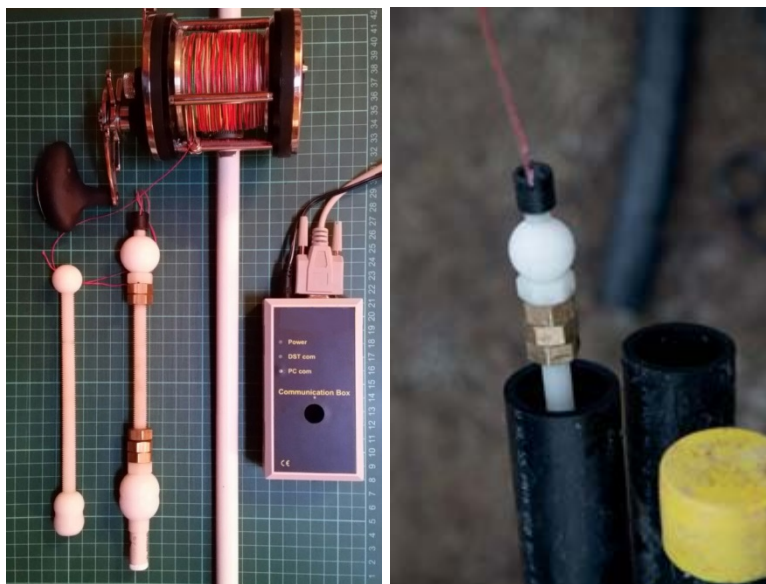


Abbildung 4: Links: Das GTS Messgerät. Rechts: GTS im Einsatz (Quelle: www.geoazimut.com)

16.02.2016

4.1.4 Deepdrifter®

Das Messgerät DeepDrifter® [5] wurde 2011 von der Firma Eberhard & Partner AG aus Aarau (CH) entwickelt. Es handelt sich um ein mobiles System zur Messung des dreidimensionalen Verlaufs, der Tiefe und der Temperatur von Erdsonden. Das Messsystem basiert auf dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion und besteht aus einer 9.5 x 1.8 cm kleinen Aluminium-Messsonde, einem Übertragungskabel, dem mobilen Rechenzentrum und der Abrollvorrichtung. Die Messsonde wird vertikal in die fertige, meist flüssigkeitsgefüllte EWS eingeführt, die Tiefenlage während des Messvorgangs wird mittels automatisiertem Zähler kontinuierlich erfasst. Die absoluten 3D-Verlaufsdaten werden relativ zum Bohransatzpunkt / Sondenkopf in diskreten Messintervallen registriert, die Daten anschliessend prozessiert und graphisch dargestellt.



Abbildung 5: Deepdrifter ® im Einsatz bei der EWS-Versuchsanlage (Quelle: Eberhard & Partner)

16.02.2016

4.1.5 PT-100 der Firma André Voutta Grundwasserhydraulik

Für die Temperaturmessungen setzt die Firma André Voutta Grundwasserhydraulik in Herrenberg (D) (anschliessend Firma André Voutta genannt) einen digitalen Temperatursensor PT100 ein, der auf einer Sonde montiert ist. Temperatursensor und Tiefensonde sind mit einem Kabel, das den Strom und die Daten überträgt, mit dem Aufzeichnungsgerät an der Erdoberfläche verbunden. Dies erlaubt eine kontinuierliche Kontrolle der Tiefe während der Messung. Gemäss Lieferant liegt der Messbereich bei 0-100°C bei einer Auflösung von 0.01 K.

Für die Verlaufsmessungen wurden Neigung und Azimuth mit einer Sonde gemessen. Mehr Informationen über die Messausrüstung können bei dem Lieferanten erfragt werden.

16.02.2016

4.1.6 Messgeräte der Firma Geo Explorers AG

Die Firma Geo Explorers AG besitzt ein Temperatur-/Tiefenmessgerät sowie 2 Ablenkungsmessgeräte. Das Temperatur- und Tiefenmessgerät misst die Tiefe kabellos anhand des hydrostatischen Druckes bis 350 m Tiefe. Ferner wurden 2 Ablenkungsmessgeräte eingesetzt (Abbildung 6). Ablenkungsgerät 1 bestimmt die Lage der EWS mit einer Kombination aus 3-Achs-Magnetometer, 3-Achs-Accelerometer und 3-Achs-Gyroskop. Dieses Gerät ist noch in der Entwicklungsphase und wird momentan nicht kommerziell eingesetzt. Ablenkungsmessgerät 2 bestimmt die Lage der EWS mit einer Kombination aus 3-Achs-Magnetometer und 3-Achs-Accelerometer. Dazu werden gleichzeitig die Temperatur und Tiefe (Druck) gemessen. Maximale Einsatztiefe des Ablenkungsmessgeräts 2 ist 800 m.



Abbildung 6: Messgeräte der Firma Geo Explorers AG (Quelle: Geo Explorers AG)

16.02.2016

5. Ergebnisse der Vergleichsmessungen

5.1 Ausgeführte Messungen

Die ausgeführten Messungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Messungen erfolgten im Zeitraum vom 28.08.2015 bis 09.12.2015.

Tabelle 1: Zusammenfassung den ausgeführten Messungen

Firma	Messgerät	Messparameter	Datum
GEOTEST AG	GEOSNIFF	Temperatur ¹	25.08.2015
ACR energiebohr AG	NIMO-T	Temperatur ¹	02.09.2015
Geoazimut GmbH	GTS	Temperatur ¹	08.09.2015
André Voutta	PT-100	Temperatur ² Lage	23.09.2015 23.09.2015
Eberhardt & Partner AG	Deepdrifter®	Temperatur ² Lage	14.10.2015 14.10.2015
Geo Explorers AG	Temperaturmessgerät Ablenkungsmessgerät 1/2	Temperatur ¹ Lage (2x)	09.12.2015 09.12.2015

¹: Tiefenbestimmung über hydrostatischen Druck

²: Tiefenbestimmung über Kabellänge

16.02.2016

5.2 Temperaturmessungen

Die Ergebnisse zeigen in erster Linie, dass die EWS bei allen Messungen bis zum tiefsten Punkt vermessen wurde. Die Endtiefe (TVD) wurde bei allen Temperaturmessungen in guter Übereinstimmung mit ca. 235 m gemessen¹ (siehe Tabelle 2).

Ein Vergleich der sechs ausgeführten Temperatur-Tiefen-Profile innerhalb der EWS ist in Abbildung 7 dargestellt. Der Vergleich zeigt für die obersten ca. 20 m deutliche Unterschiede, die auf den saisonalen Einfluss der zum Zeitpunkt der Messungen unterschiedlichen Oberflächentemperatur zurückzuführen sind.

Ab einer Tiefe von ca. 20 m bis zur Endtiefe zeigen alle Messungen vergleichbare Temperaturverläufe. Die minimalen Temperaturen werden in einer Tiefe von ca. 67 m mit ca. 12°C gemessen. Ab der Tiefe von ca. 67 m erfolgt bei allen Messungen ein kontinuierlicher Temperaturanstieg bis zu einer maximalen Temperatur vom ca. 16.5°C bei Endtiefe.

Auch wenn alle Messungen vergleichbare Temperaturverläufe zeigen, sind Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Messungen oder Geräten anzumerken. Die Abweichung zwischen allen Ergebnissen ist mit der Tiefe (ab 20 m) mehr oder weniger konstant. Der absolute Unterschied zwischen den Messungen beträgt in 20 m Tiefe ± 0.45 K und bei Endtiefe ± 0.35 K.

Auch wenn die Tendenzen generell identisch sind, zeigen die Messung der Firma Eberhard & Partner AG sowie der Firma Geo Explorers AG eine grössere Abweichung im Vergleich mit den anderen Messungen. Bei 20 m Tiefe beträgt die Abweichung der von Eberhard & Partner gemessenen Temperatur vom Mittelwert der anderen Messungen +0.9 K. Mit zunehmender Tiefe gleicht sich diese Abweichung stetig an. In 235 m Tiefe beträgt die Abweichung weniger als +0.1K. Bei Geo Explorers steigt die Abweichung mit der Tiefe an, bis zu eine maximale Abweichung vom -0.5K in 235 m Tiefe.

Die Abweichung von beiden Messungen lässt sich durch die Messgeschwindigkeit und die thermische Trägheit des Gerätes erklären. Bei zu schneller Sinkgeschwindigkeit hat den Gerät oder den Temperatursensor nicht genug Zeit, sich mit der Temperatur der Sondenflüssigkeit abgleichen zu können. Die Messung vom Geo

¹ Diese Tiefenangabe ist nicht identisch mit der Einbaulänge der EWS. Diese beträgt gemäss Angabe der Bohrunternehmung 250 m. Es ist denkbar, dass der Innendurchmesser der EWS in einer Tiefe von 235 m verengt ist.

16.02.2016

Explorers AG zeigt, dass sich die gemessene Temperatur bei Stillstand der Messsonde am Sondenfuss um ca. 0.5K an den Mittelwert angleicht.

Ausser für die Messungen der Firma Geo Explorers AG und der Firma Eberhard & Partner AG sind die übrigen vier Messungen ab 20 m beinahe identisch. Bei einer Tiefe von 20 m beträgt die Abweichung $\pm 0.1K$. Bei einer Tiefe von 65 m beträgt die Abweichung $\pm 0.01K$. Ab 65 m Tiefe steigt diese Abweichung langsam an, bis zu einer Abweichung von $\pm 0.15K$ in einer Tiefe von 235 m. Diese kann eventuell durch eine Ungenauigkeit der Temperaturmessung aber auch der Tiefenbestimmung bedingt sein.

16.02.2016

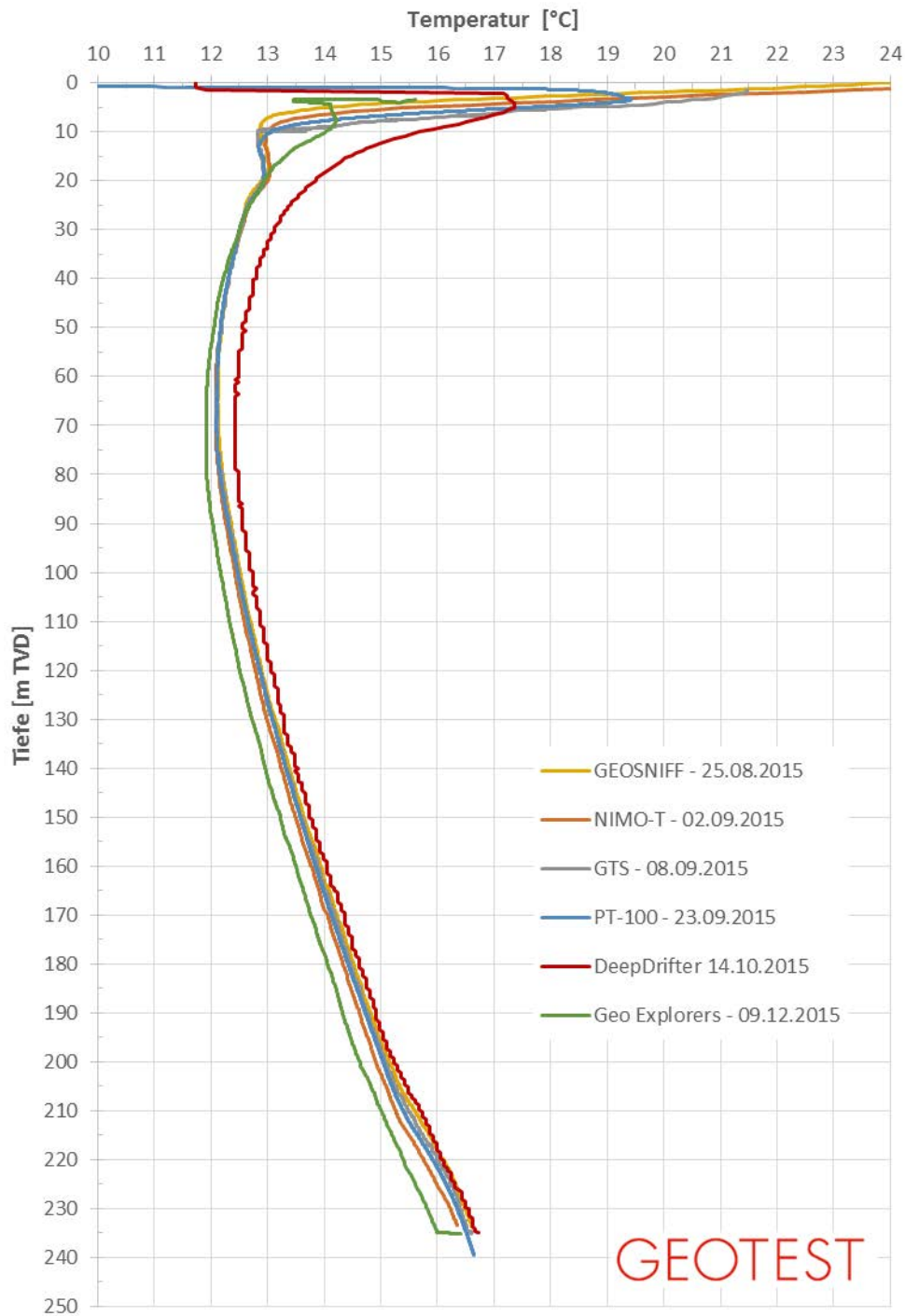


Abbildung 7: Vergleich der gemessenen Tiefen-Temperatur-Profile

16.02.2016

5.3 Verlaufsmessungen

Eine dreidimensionale Verlaufsmessung der EWS wurde mit den Messsystemen der Firma André Voutta, der Messsonde DeepDrifter® der Firma Eberhard & Partner AG sowie den Ablenkmessgeräten 1 und 2 der Firma Geo Explorers AG durchgeführt. Dabei wurden jeweils die Tiefe der EWS sowie deren Abweichung von der Senkrechten gemessen.

Bei drei der vier Messungen konnte die EWS bis zur Endtiefe vermessen werden. Bei der Messung mit dem Ablenkungsmessgerät-1 der Firma Geo Explorers (siehe Abbildung 6) konnte nur bis in eine Tiefe von 110 m vermessen werden². In der Tiefe von 110 m wurde eine Abweichung von ca. 6 m in Richtung NNO gemessen und zeigt somit einen deutlich unterschiedlichen Verlauf der EWS gegenüber den übrigen Messungen an. Gemäss der Firma Geo Explorers AG ist das Ablenkungsmessgerät-1 noch in der Entwicklungsphase und wird momentan nicht kommerziell eingesetzt. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse im Folgenden zwar dargestellt, allerdings nicht weitergehend interpretiert.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst und in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt. Abbildung 8 zeigt die absolute Abweichung von der Senkrechten und in Abbildung 9 ist die Orientierung/Richtung der Abweichung von der Senkrechten in einem Polardiagramm dargestellt. Alle drei Messungen zeigen in guter Übereinstimmung tendenziell eine Abweichung in Richtung Westen.

In Abbildung 8 ist der Tiefenverlauf der absoluten Abweichung von der Senkrechten dargestellt. Die Messungen der Firmen André Voutta, Geo Explorers und Eberhard & Partner weisen bei Endtiefe eine maximale Abweichung von 6.20 m, 7.13 m und 8.29 m von der Senkrechten aus. Das entspricht einer Prozentualen Abweichung von 2.6% bis 3.5% der Gesamttiefe.

Der Tiefenverlauf der Messungen zeigt grundsätzliche Ähnlichkeiten, aber auch einen deutlichen Unterschied. Während die Messung mit DeepDrifter® bis in eine Tiefe von ca. 60 m eine Abweichung von der Senkrechten von weniger als 1 m aufweist, wird diese bei der Firma André Voutta bis in eine Tiefe von ca. 110 m gemessen. Danach wird von beiden Verfahren eine beinahe konstante Zunahme

² Laut der Firma Geo Explorers konnte das Ablenkungsmessgerät-1 nur bis in eine Tiefe von 110 m messen, weil das Messgerät auf Grund von Verengungen im EWS-Rohr stecken geblieben ist. Der Durchmesser vom Messgerät wurde inzwischen angepasst.

16.02.2016

der Abweichung von der Senkrechten von 4.4 m (DeepDrifter®) bzw. 4.2 m (Voutta) pro 100 m Tiefe gemessen. Die Messung mit dem Ablenkmessgerät 2 der Firma Geo Explorers zeigt anfänglich bis ca. 65 m mit 2.49 m eine stärkere Abweichungen von der Senkrechten, ab einer Tiefe von ca. 110 m jedoch ebenfalls die bei den übrigen Messungen beobachtete konstante Zunahme der Abweichung von der Senkrechten bis zur Endtiefe.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Tiefen- und Verlaufsmessungen

Firma	Messgerät	Gemessene Endtiefe [m u. OKT]	Abweichung von der Senkrechten	
			Max. Betrag [m]	Orientierung
GEOTEST AG	GEOSNIFF	233.7 (TVD)	-	-
ACR energiebohr AG	NIMO-T	233.483 (TVD)	-	-
Geoazimut Sarl.	GTS	235.2 (TVD)	-	-
André Voutta	PT100	239.56 (MD)	-	-
André Voutta	Verlaufsmessgerät	238.66 (TVD)* 239.2 (MD)	6.20	W
Eberhard & Partner AG	Deepdrifter® (Temperatur)	234.9 (TVD)* 236.25 (MD)	-	-
Eberhard & Partner AG	Deepdrifter® (Verlauf)	234.62 (TVD)*	8.29	W
Geo Explorers AG	Temperaturmessgerät	235.2 (TVD)	-	-
Geo Explorers AG	Ablenkmessgerät 1	110 (MD)**	5.83	NO
Geo Explorers AG	Ablenkmessgerät 2	234.12 (TVD)	7.13	W

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

16.02.2016

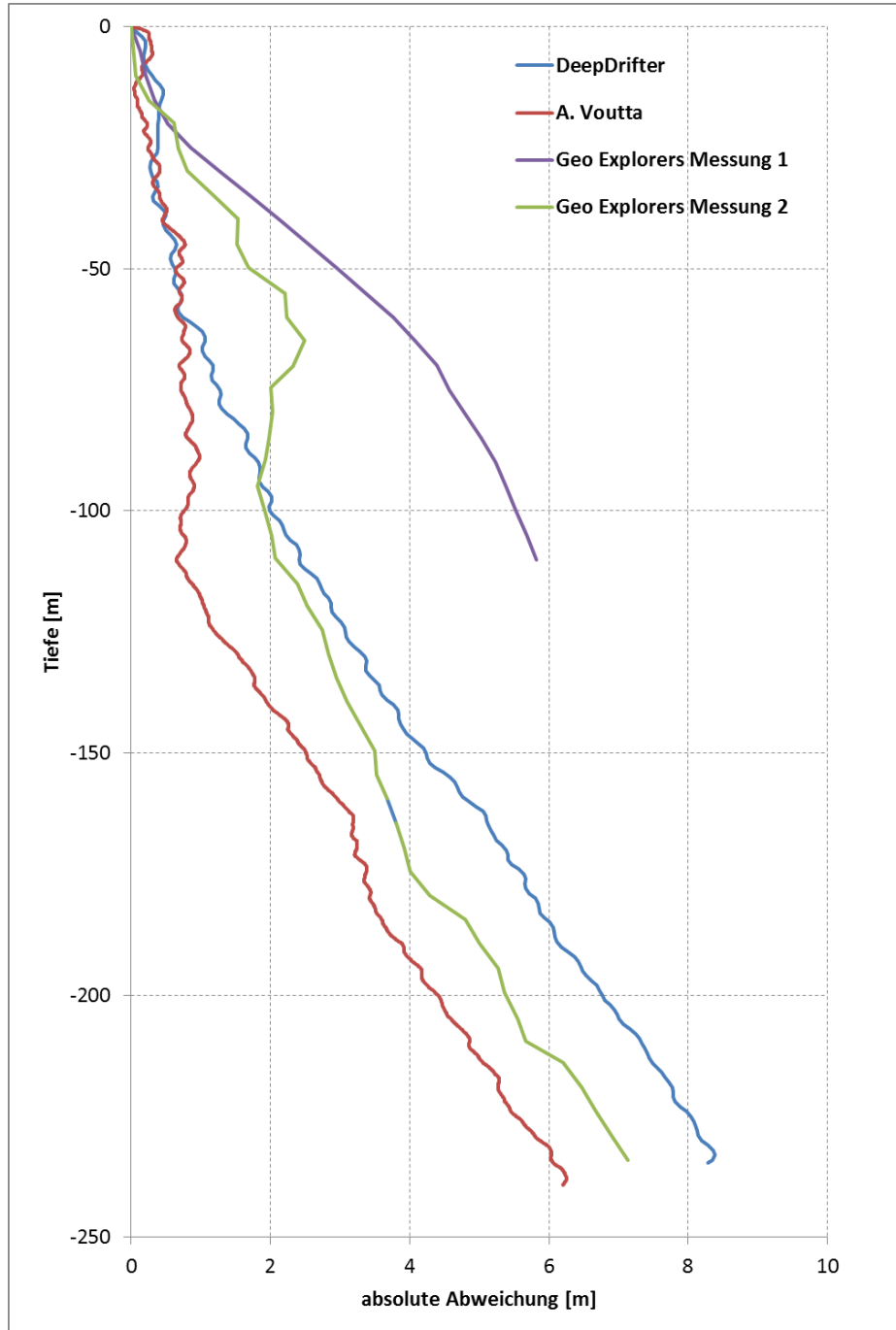


Abbildung 8: Vergleich der absoluten gemessenen Abweichung der EWS von den Senkrechten

16.02.2016

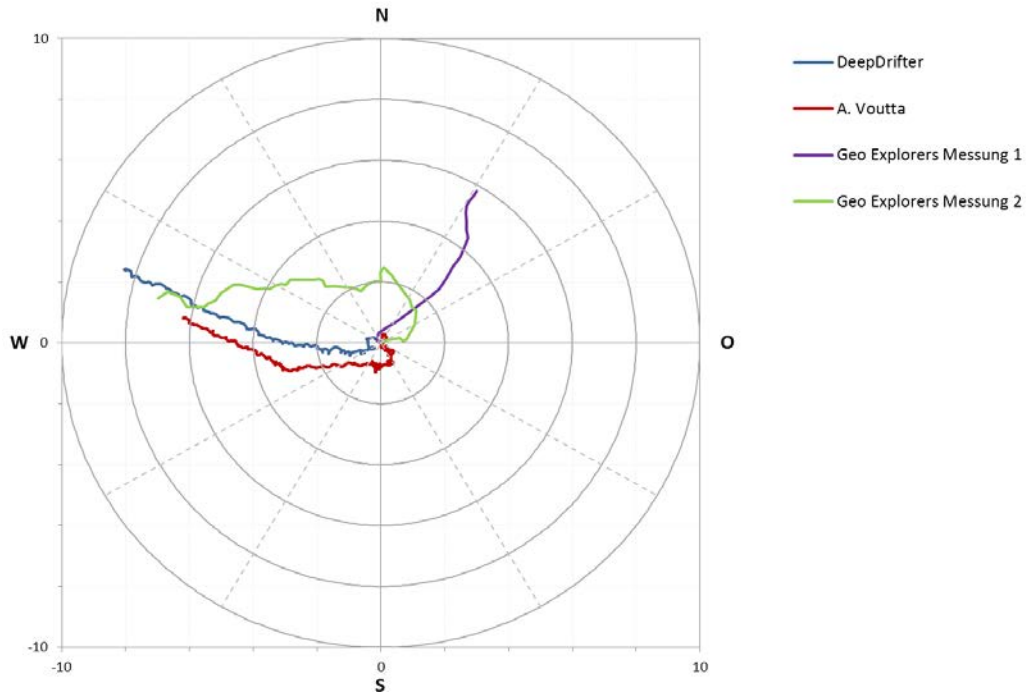


Abbildung 9: Darstellung der Richtung der gemessenen Abweichung der EWS [m] von der Senkrechten

Die Messungen der Firmen André Voutta und Eberhard & Partner weisen eine gute Übereinstimmung der Richtung der Abweichung von der Senkrechten auf. Die Messung der Firma Geo Explorers mit dem Ablenkungsmessgerät-2 zeigt für die obersten 100 m einen unterschiedlichen Verlauf in Richtung Norden. Ab ca. 100 m Tiefe wird jedoch auch mit dieser Sonde ein Verlauf in Richtung Westen gemessen.

Die Messungen der Endtiefe der EWS variieren bei allen durchgeführten Verlaufsmessungen zwischen 233.7 m und 239.6 m, wobei hier nicht zwischen der Messtiefe (MD) und der TVD unterschieden wird. Die Ähnlichkeiten bzw. Unterschiede hinsichtlich der gemessenen Endtiefe lassen sich dabei nicht durch das Messverfahren (z.B. kabellos/kabelgebunden) erklären, sondern scheinbar eher durch die Fähigkeit des Messgerätes, unterschiedlich starke Krümmungen der EWS zu durchlaufen.

16.02.2016

6. Bemerkungen und Folgerungen

Im Auftrag von der EnergieSchweiz wurden an der EWS-Versuchsanlage der GEOTEST AG in Zollikofen Vergleichsmessungen mit 10 verschiedenen Temperatur- und Tiefensonden sowie Verlaufsonden durchgeführt. Die EWS-Versuchsanlage besteht aus einer Doppel-U 40 mm PE-Rohr.

Gemessen wurden die Ruhetemperaturprofile und - mit vier Messsystemen - auch der dreidimensionale Verlauf der EWS.

Die Tiefenbestimmung erfolgt bei 5 ausgeführten Messungen durch die Bestimmung des hydrostatischen Druckes und bei 5 Messungen durch die Kabellänge.

Bis auf ein Messgerät konnten alle die Temperatur oder die Ablenkung bis zur Endtiefe der Sonde erfolgreich messen. Ein noch in der Entwicklung befindliches Messgerät konnte nur bis in eine Tiefe von 110 m eingesetzt werden.

Temperaturmessungen

Der Vergleich der Temperatur-Tiefen-Profile zeigt für alle Messungen übereinstimmende Ergebnisse. Die Abweichung der Temperaturmessungen beträgt $\pm 0.35\text{K}$ bei einer Tiefe von 234 m.

Im Wesentlichen sind die Messgeschwindigkeit und die thermische Trägheit des Geräts bei der Temperaturmessung von Bedeutung. Zwei Messungen zeigen Hinweise von zu schneller Messgeschwindigkeit oder zu langsamer thermische Angleichung. Ohne diese zwei Messungen betrüge die Messgenauigkeit bei Endtiefe $\pm 0.15\text{K}$.

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 André Voutta, Eberhard & Partner und Geo Explorers durchgeführt. Das Ergebnis des Ablenkungsmessgerätes 1 der Firma Geo Explorers wird nicht interpretiert. Die übrigen Messungen zeigen mit einer Abweichung von ca. 6-8 m in Richtung Westen eine gute Übereinstimmung (ca. 3% der Sondenlänge).

16.02.2016

Ab einer Tiefe von ca. 110 m zeigen die Messungen eine deutliche und bis zur Endtiefe kontinuierlich zunehmende Abweichung von der Senkrechten, die bei der Endtiefe ca. 6 m bis 8 m beträgt. In der Tiefe von 100 m weist das geologische Bohrprofil einen lithologischen Wechsel mit einem gegen unten zunehmenden Anteil an hartem Feinsandstein auf, was die Verlaufsänderung der Bohrung verursacht haben könnte. Alle drei Verfahren weisen vergleichbare Ergebnisse bezüglich des dreidimensionalen Verlaufs (Betrag der Ablenkung und Orientierung) aus.

Tiefenmessung

Grundsätzlich wurden für die Messungen zwei unterschiedliche Messsysteme eingesetzt – kabellose Sonden und Sonden mit Messkabel. Keiner Methode kann dabei eine grundsätzlich höhere Genauigkeit zugeordnet werden. Alle Methoden können in einer 40 mm PE-Rohr bis in Tiefen von mindestens 234 m eingesetzt werden, solange die Sonde keine Verengungen oder Querschnittsverkleinerung aufweist. Diese können in jeder Tiefe auftreten.

7. Zusammenfassung, weiteres Vorgehen

Bis auf jene Messsonden, die sich noch in der Entwicklungsphase befinden, sind aus unserer Sicht alle eingesetzten Messgeräte für die entsprechende Zielsetzung geeignet.

Die Genauigkeit der Messungen hängt ab von der Messgenauigkeit des Messgerätes selbst, der Messdurchführung und der Auswertung der Ergebnisse. Die hier untersuchten Ergebnisse der Temperaturmessungen zeigen, dass allfällige Messungenauigkeiten in der Praxis in erster Linie auf die Messdurchführung sowie Interpretation derselben und nicht auf Ungenauigkeiten der Messgeräte selbst zurückzuführen sind. Für Verlaufsmessungen ist für die Messungenauigkeit hingegen das Messsystem von grösserer Bedeutung. Aus diesen Gründen sind die Messgenauigkeiten, die Einsatzbereiche der Geräte sowie der Vorgang der Messung präzise zu dokumentieren.

Die ausgewählten Geräte sind in Sonden mit einem Durchmesser von 40 mm bis eine Tiefe von 235 m problemlos einsetzbar und für diese Verwendung geprüft. Vermutlich können unsere Folgerungen für Messgeräte mit einem Einsatz bis 300 m Tiefe extrapoliert werden. Für grössere Tiefen empfehlen wir die Ausführung weiterer Prüfungen.

16.02.2016

Temperatur- und Verlaufsmessungen liefern für die Planung, die Dimensionierung und die Qualitätssicherung von EWS wichtige Informationen. Solche Messungen sollten künftig je nach Fragestellung vermehrt eingesetzt werden. In Zukunft können in der Versuchsanlage in Zollikofen weitere Messgeräte getestet werden.

Zukünftig musste bei Messungen in Erdwärmesonden Haftungsfragen für den Fall möglicher Schäden geregelt werden.

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

GEOTEST AG



Dr. Michael Soom



Dr. Vincent Badoux

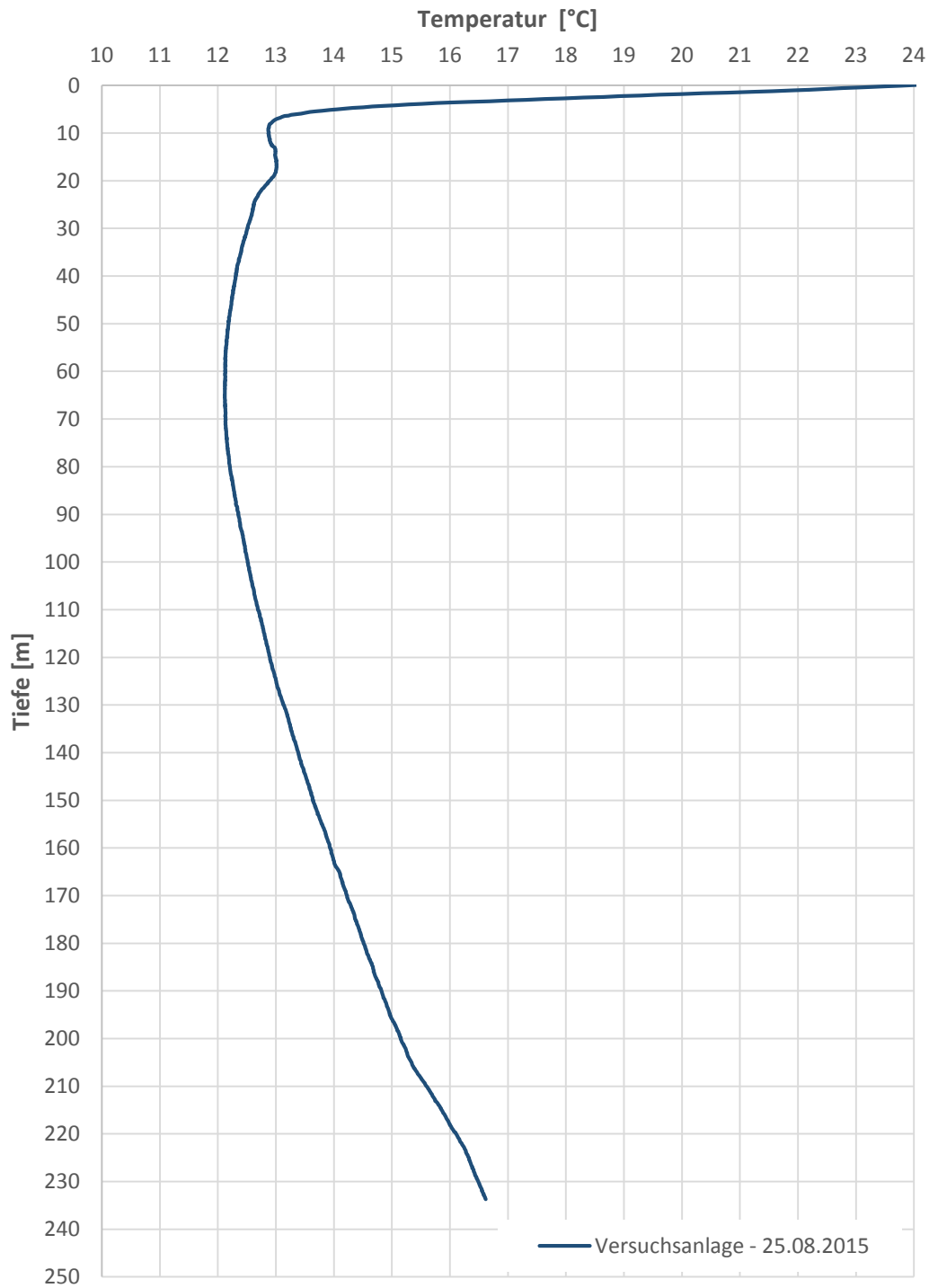
16.02.2016

Anhänge

1. Temperatur-Tiefenmessung Firma GEOTEST AG (GEOSNIFF)
2. Temperatur-Tiefenmessung Firma ACR-energiebohr AG (NIMO-T)
3. Temperatur-Tiefenmessung Firma Geoazimut Sàrl (GTS)
4. Temperatur-Tiefenmessung Firma André Voutta (PT100)
5. Temperatur-Tiefenmessung Firma Eberhard & Partner AG (DeepDrifter®)
6. Temperatur-Tiefenmessung Firma Geo Explorers AG
7. 3D Verlaufsmessung Firma André Voutta
8. 3D Verlaufsmessung Firma Eberhard & Partner (DeepDrifter®)
9. 3D Verlaufsmessungen Firma Geo Explorers AG
10. Bohrprofil EWS Zollikofen

Messgerät: GEOSNIFF
Koordinaten: 601'401 / 201'048
Rehau PE100, D=40 mm, PN 16

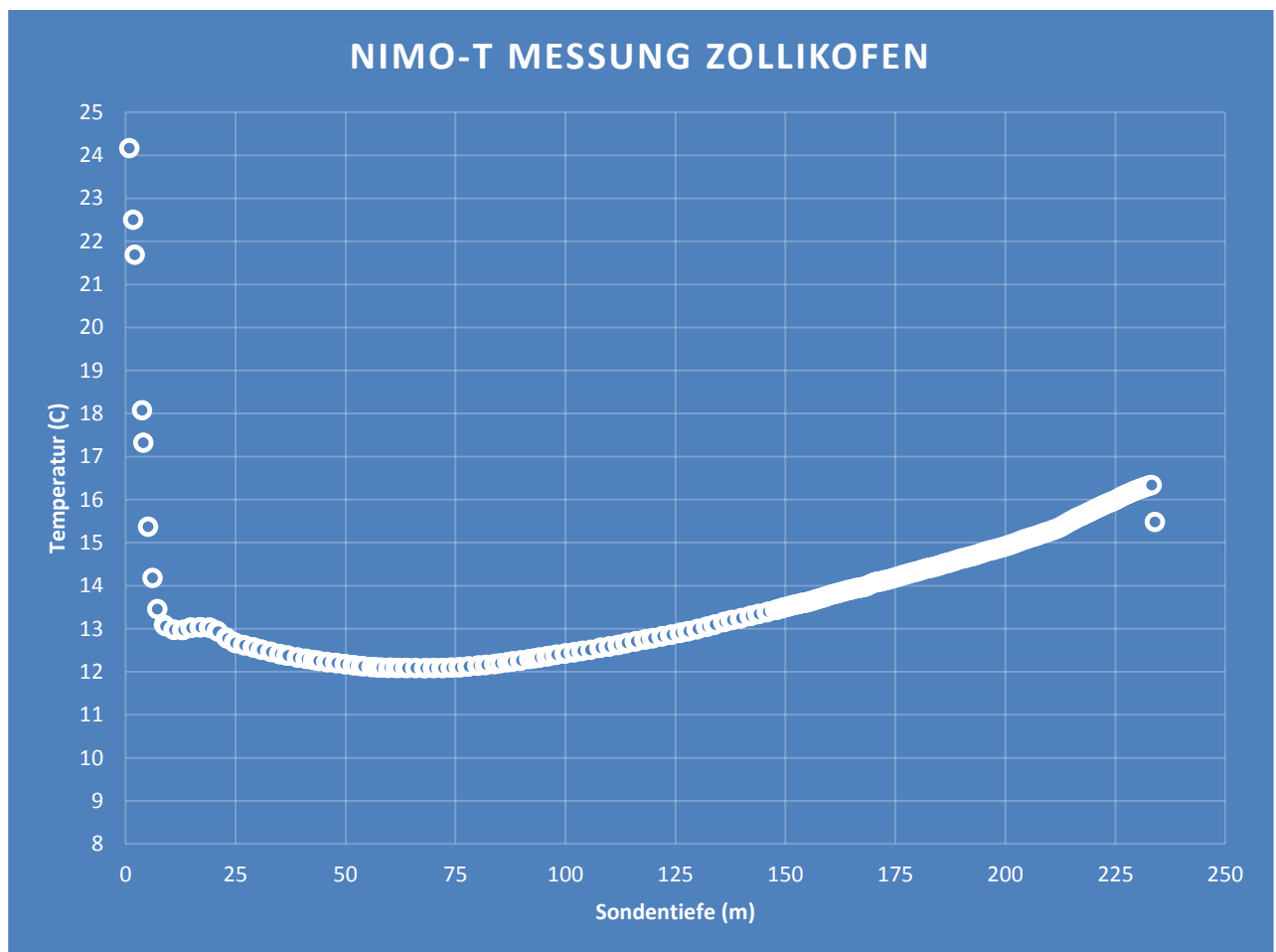
Messdatum: 25.08.2015
Höhe: 514 m ü.M.
Operator: Bav, Hf



**Birkenstrasse 15,
3052 Zollikofen**

Temperaturmessung Nimo T
Korordinaten ca. 601`553/205`277
Rehau Sonde PE100
DN = 40mm
PN 16

Sondentiefe 234 m
Temperatur 16.33 C



Auftraggeber

Geotest, Birkenstrasse 15, Zollikofen

Ausgeführte Arbeiten ACR Messung Nimo-T



Geoazimut Sàrl

Géologie - Environnement - Electronique

Profils de température

Mesures

N°	Date	N° Capteur	Ø Support
Sonde test	08.09.2015	GTS-T-1	22 mm

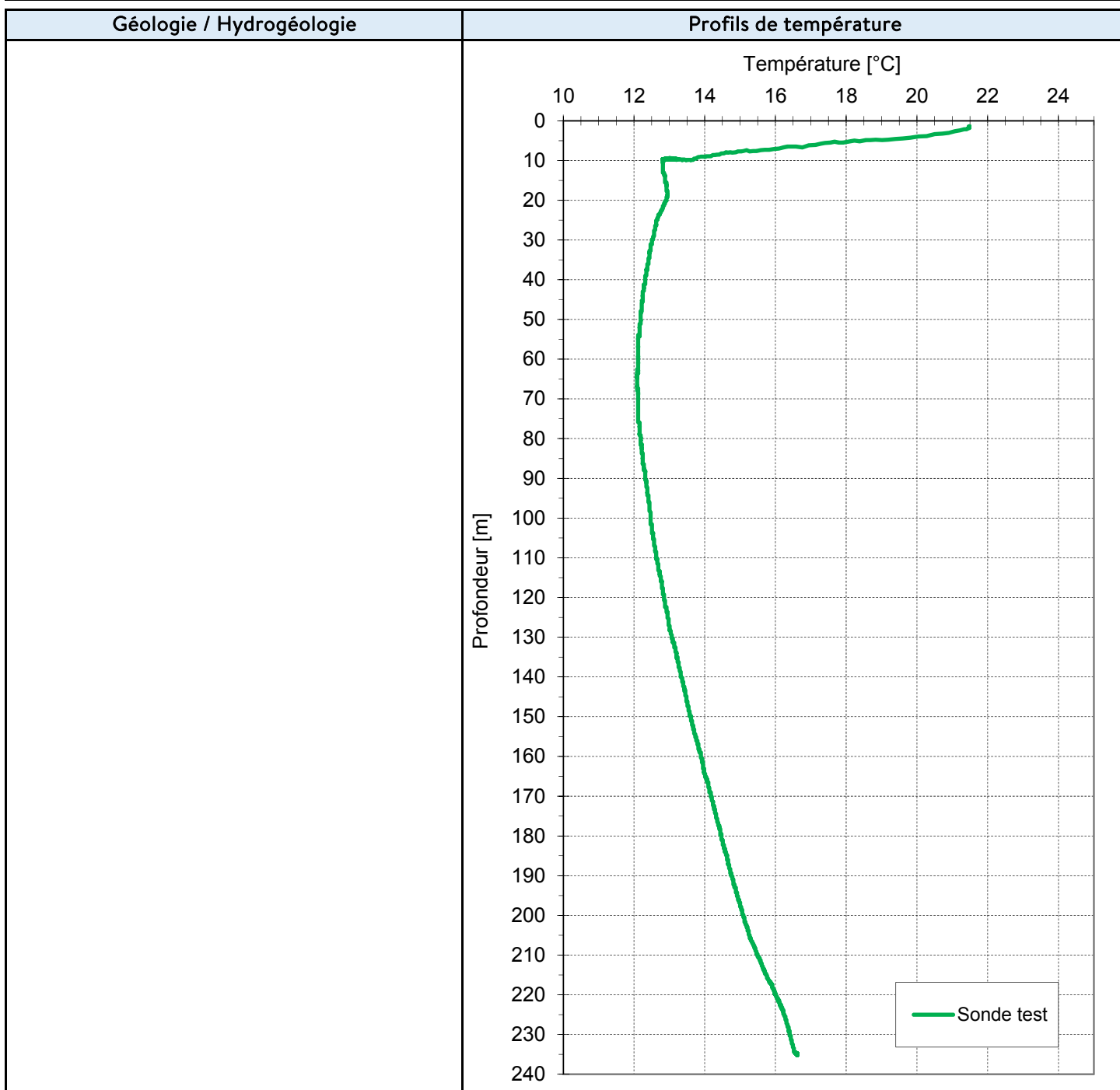
N° étude	Titre de l'étude	Commettant
GT1509301	Mesure sonde test Geotest	Geotest AG

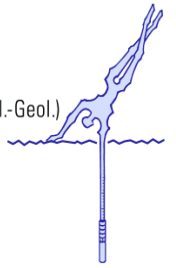
Essai / Sonde n°	Ø forage (mm)	long. forage (m)	long. sonde (m)	Ø ext. tube (mm)	Ø int. tube (mm)	type de sonde	opérateur
-	-	250,0	250,0	40	32	Double U	Mbo

Prof. sonde (MCE)	fluide	Gr. géothermique estimé entre 130 et 200 m	espaceurs oui/non	Coordonnées / altitude		
				X (m)	Y (m)	Alt. sol (m)
235	eau	3.01 °C/100m	-	601'548	205'273	557,0

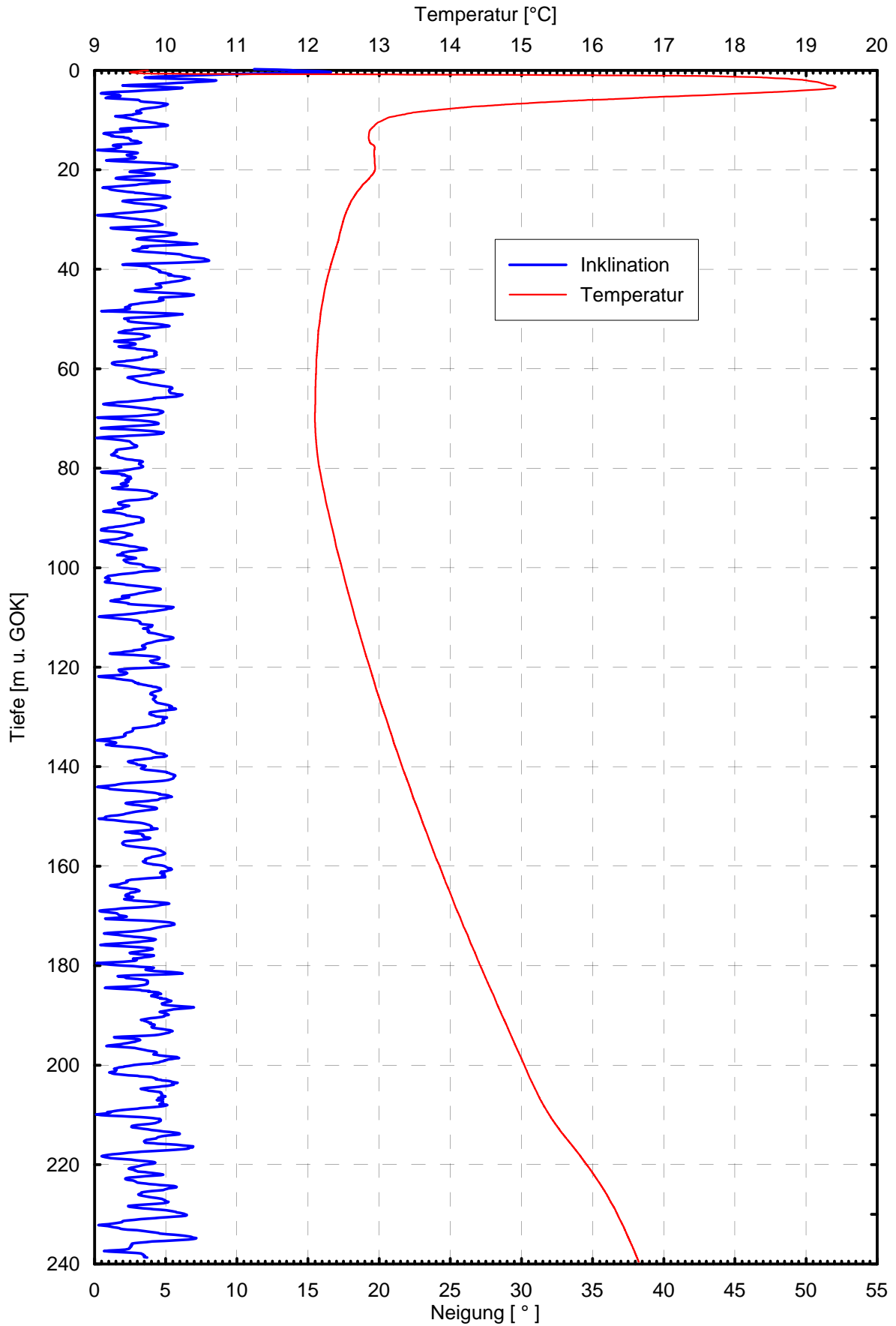
Entreprise de forage	Date du forage
-	-

Relevé géologique	Matériau de remplissage
Geotest AG	-

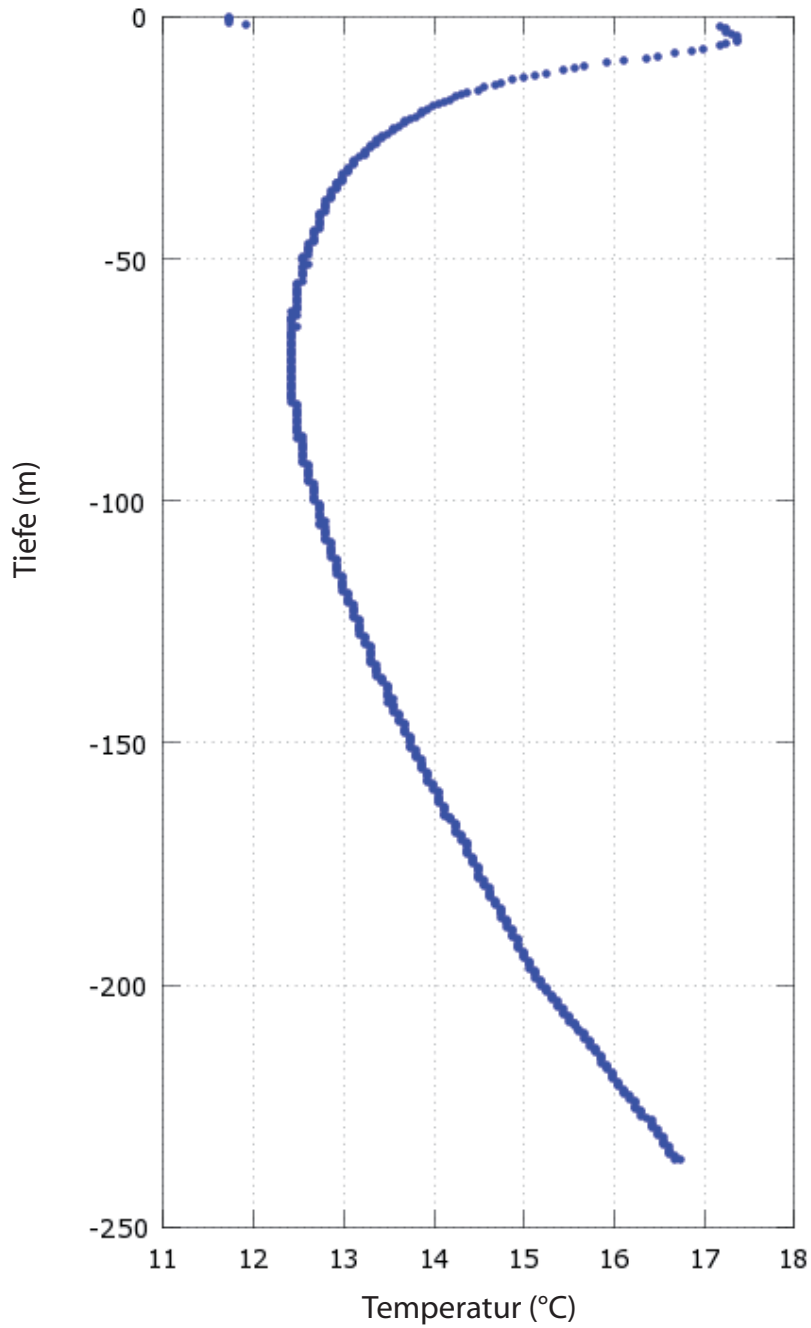




Temperatur und Neigungsprofil EWS1, Rohr1A Zollikofen, Bernstraße



Temperaturverlauf der Erdsonden,
gemessen am 14. Oktober 2015



Temperatur-Messung

Ort:	Zollikofen, Bernstrasse 165	Datum:	09. Dezember 2015
Sonde:	A1	Uhrzeit:	11.00 Uhr
Max vert. Tiefe:	235.18m	Durchgeführt von:	B. Zürcher/ C. Lehr

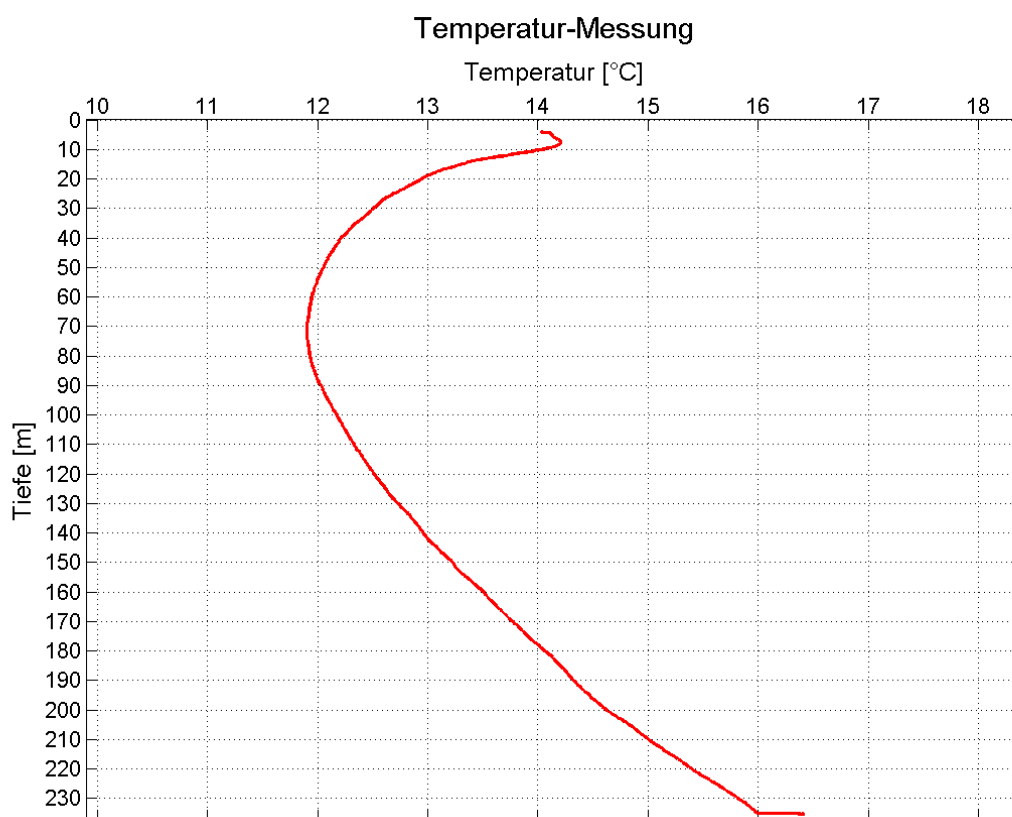


Abbildung 1: Tiefen-/Temperaturprofil

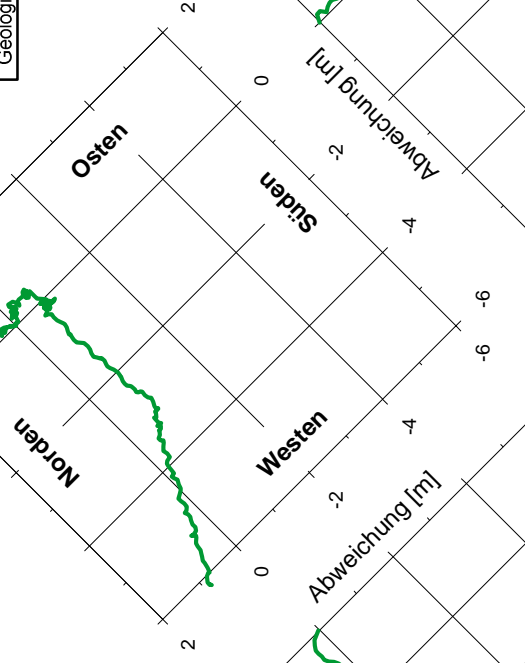
Bemerkungen:

- Die vertikale Tiefe wurde anhand des hydrostatischen Druckes gemessen.
- Auflösung Temperatur: 0.1 °C
- Durch den geringen Wassertransport nach unten, verursacht durch das Messgerät, und einer leichten Verzögerung / Anpassungszeit des Temperaturfühlers (abhängig von der Absenkungsgeschwindigkeit des Messgerätes), zeigt sich auf der Schlusstiefe bei ca. 235m ein Einpendeln der Temperatur.

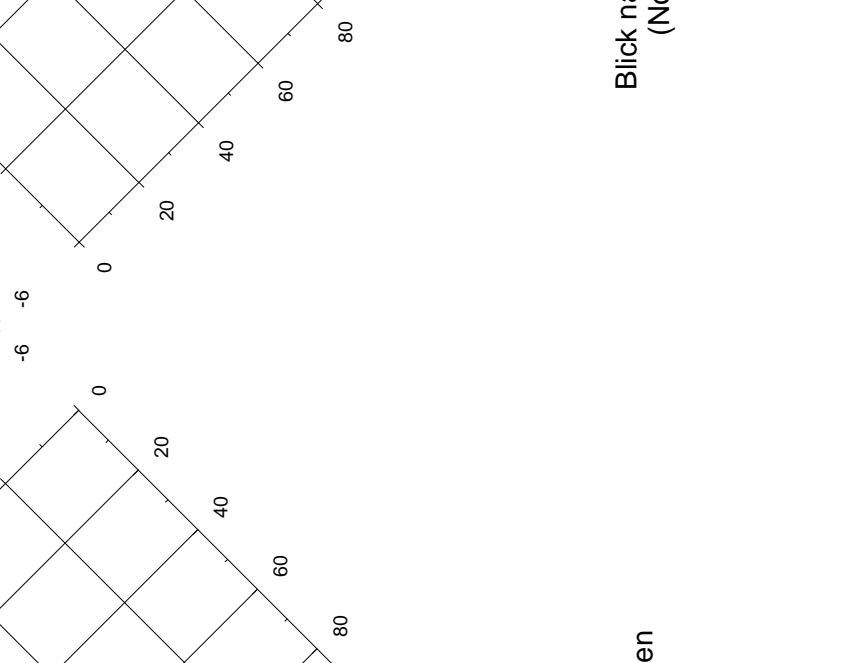
Geophysikalische Bohrlochvermessung

Messtelle:	EWS1	Projekt:	-
Sondendurchmesser:	DN 40	Ort:	Zollikofen
Tiefe:	239,2 m u. GOK	Datum:	23.9.2015
Geologie:	Molasse	ausgeführt:	Voutta

Blick von oben



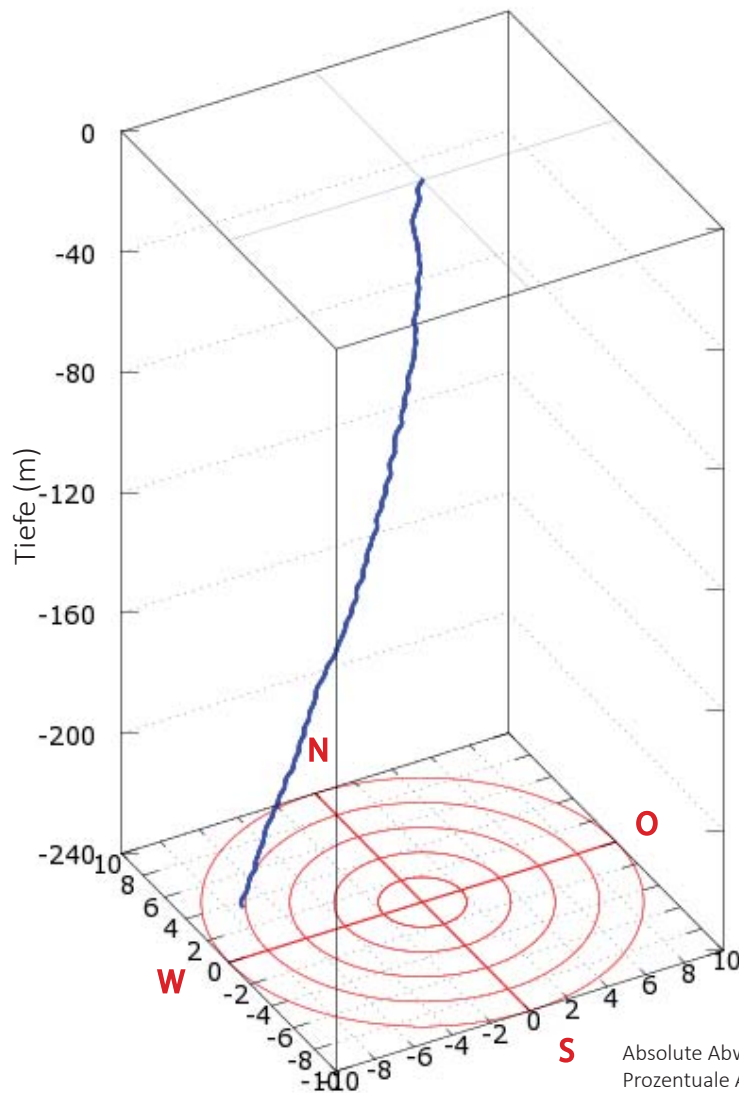
Blick nach Osten (Easting)



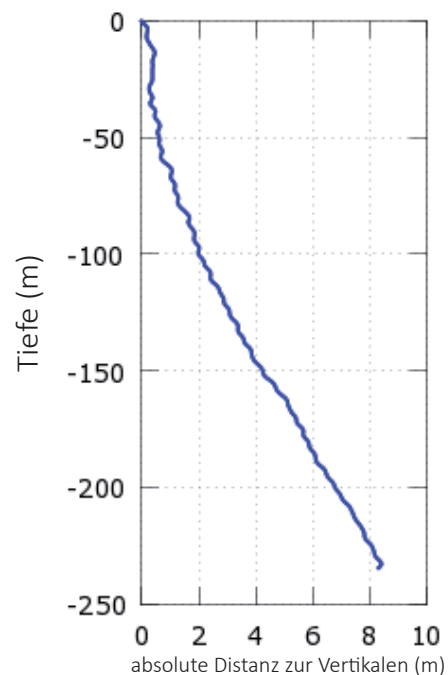
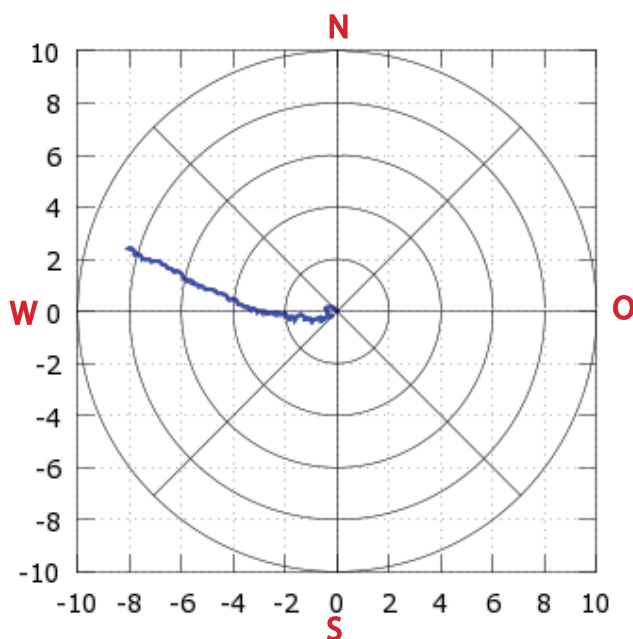
Blick nach Norden (Northing)



Ablenkung (in Metern) vom Sondenursprung



Absolute Abweichung aus der Vertikalen: 8.4 m
 Prozentuale Abweichung aus der Vertikalen: 3.6 %



Ablenkungsmessung 1

Ort: Zollikofen, Bernstrasse 165
 Sonde: B1
 Max vert. Tiefe: 110 m

Datum: 09. Dezember 2015
 Uhrzeit: 14.30 Uhr
 Durchgeföhrt von: B. Zürcher/ C. Lehr

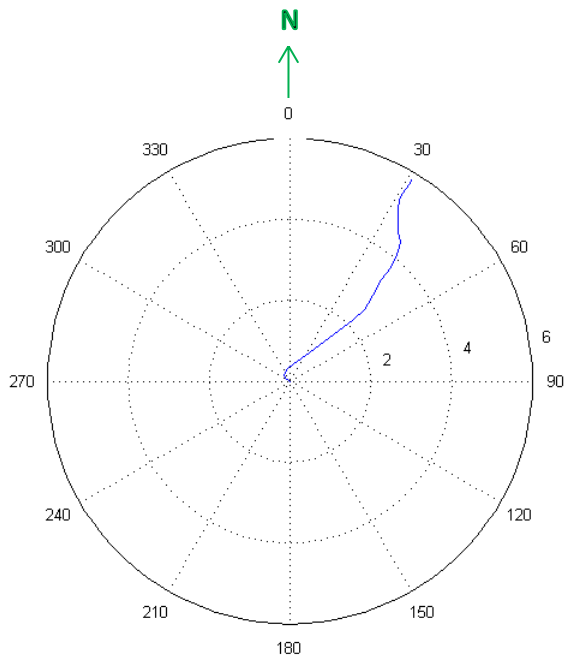


Abbildung 2: Polardarstellung der Ablenkungsmessung. Ansicht von oben. Horizontale Distanz in [m]; Azimut in [°]. 0° nach Norden

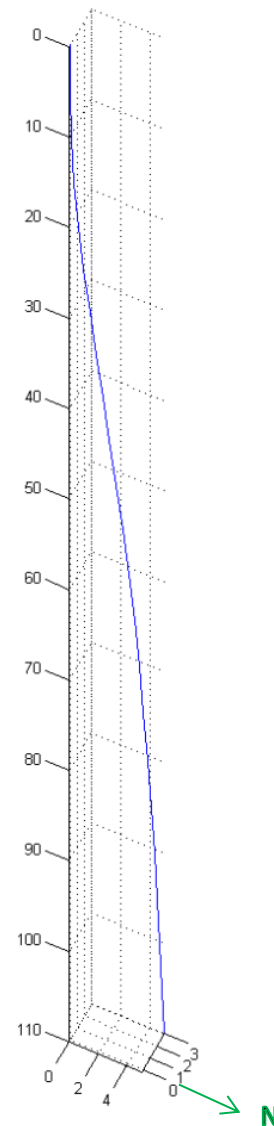


Abbildung 3: Ablenkungsmessung. Werte in [m], positive X-Achse Richtung Norden, positive Z-Achse nach unten (Tiefe)

Bemerkungen:

- Aus den Rohdaten (3-Achs-Accelerometer, 3-Achs-Magnetometer, 3-Achs-Gyroscope und Tiefe (hydrostatischer Druck)) wurden die Koordinaten der Ablenkung berechnet. Gemessen wurde vom untersten Punkt (bei 110m) hin zum obersten Punkt (Nullpunkt).
- Max horizontale Abweichung: 5.83 m
- Max horizontale Abweichung am tiefsten Punkt: 5.83 m

Ablenkungsmessung 2

Ort: Zollikofen, Bernstrasse 165
 Sonde: A1
 Max vert. Tiefe: 234.12 m

Datum: 09. Dezember 2015
 Uhrzeit: 12.15 Uhr
 Durchgeföhrt von: B. Zürcher/ C. Lehr

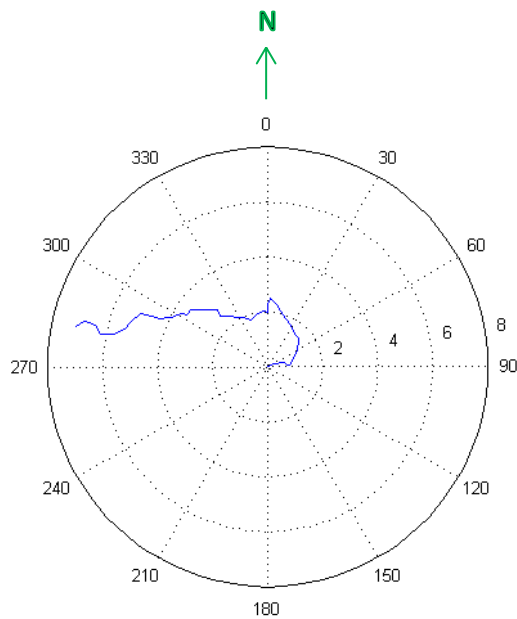


Abbildung 4: Polardarstellung der Ablenkungsmessung. Ansicht von oben. Horizontale Distanz in [m]; Azimut in [°]. 0° nach Norden.

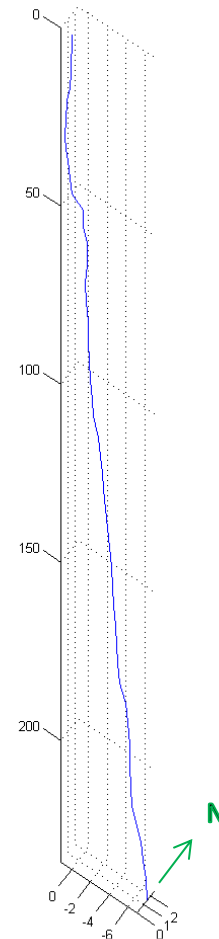



























Abbildung 5: Ablenkungsmessung. Werte in [m], positive X-Achse Richtung Norden, positive Z-Achse nach unten (Tiefe)

Bemerkungen:

- Aus den Rohdaten (3-Achs-Accelerometer, 3-Achs-Magnetometer und Tiefe (hydrostatischer Druck)) wurden die Koordinaten der Ablenkung berechnet. Gemessen wurde vom obersten Punkt (Nullpunkt) hin zum untersten Punkt (bei 234.12 m).
- Max horizontale Abweichung: 7.13 m
- Max horizontale Abweichung am tiefsten Punkt: 7.13 m

Datum : 04.04.2013	Auftrag Nr. 1511072	 GEOLOGEN INGENIEURE GEOPHYSIKER UMWELTFACHLEUTE
Objekt : Zollikofen, Bernstr. - Stämpflistr.		
Unternehmung : e-therm AG		
Bohrmethode : Immlochhammer		
Anfangsdurchmesser : 152 mm Enddurchmesser : 130 mm		
Koordinaten : ca. 601'555 / 205'270	Erdsonde Zollikofen	
Terrainkote : ca. 557.5 m ü. M.	(239/ 078)	

Wasser	Tiefe	Profil	Temporäre Verrohrung	Materialbeschreibung	Geologische Interpretation
	0.00 m	1 : 500			
	4.00			Feinkies, leicht siltig und sandig, grau	spätglaziale Rückzugsschotter
	8.00			Silt, stark sandig, hellbeige-hellgrau	
	16.00			Feinkies, leicht siltig, grau	
	20.00			Feinkies, leicht siltig, sandig, grau	
	28.00			Feinkies, leicht sandig, grau	
	40.00			Silt, leicht tonig, hellgrau	Moräne
	42.00			Feinkies, leicht siltig, grau	Karlsruheschotter (Plateauschotter)
	44.00			Grobkies (Block?), grau	
	52.00			Sand, hellgrau	
	54.00			Feinkies, leicht siltig, hellgrau	
	56.00			Silt, tonig, hellgrau	
	64.00			Feinkies, grau	
	68.00			Feinsand bis sandiger Silt, hellgrau	
	80.00			Fein- bis Mittelkies, grau	
	100.00			Mergel, bunt	Untere Süsswassermolasse (USM)
	130.00			Feinsandstein mit wenigen Mergelzwischenlagen bis 110 m: hellgrau bis 130 m: beige ab 126 zunehmend mergelig	
	142.00			Mergel, bunt	
	160.00			Mergel, leicht sandig (Sandsteinzwischenlagen), beige Sandstein nimmt gegen unten zu	
	184.00			Mergel, bunt	
	188.00			Mergel mit vielen Sandsteinzwischenlagen, bunt	
	194.00			Mergel, bunt	
	226.00			Mergel mit Sandsteinzwischenlagen, beige-bunt (vorwiegend Sandstein [Sand])	
	230.00			Mergel bis Siltstein, bunt	
	250.00			Mergel mit Sandsteinzwischenlagen, bunt Sandstein nimmt gegen unten zu	
					Gemäss Bohrrapport : sehr viel Wasser im Lockergestein Kein Spülverlust, kein Gaszutritt, keine Kavitäten, keine besonderen Vorkommnisse temporäre Verrohrung bis 78 m Aufgenommen durch: A.Rast AC01RtSw,ES13-1.ai