

Schlussbericht, 15. Dezember 2003

Projekt Drahtloser Minidatenlogger für Temperaturmessungen in Erdwärmesonden

Autor und Koautoren	Ladislaus Rybach; Simone Bassetti, Ralph Baumgartner, Ernst Rohner, Ulrich Schärli
beauftragte Institution	Geowatt AG
Adresse	Dohlenweg 28, 8050 Zürich
Telefon, E-mail,	01 242 14 54 – rybach@geowatt.ch
Internetadresse	www.geowatt.ch
BFE-Nummern	Projekt: 47'974 Vertrag: 88'065
Dauer des Projekts	vom 1.2.2003 bis 31.12.2003

Zusammenfassung

Im Rahmen der Projektarbeiten wurde ein drahtloser Minidatenlogger (Bohrlochsonde) entwickelt, gebaut, kalibriert und im Feldeinsatz unter realistischen Bedingungen getestet. Die Sonde dient zur kabellosen Aufnahme von Temperaturprofilen in fertig erstellten aber noch nicht in Betrieb genommenen Erdwärmesonden (EWS)-Bohrungen. Die Sonde sinkt durch das abgegliche Eigengewicht zum Sondenfuss und misst dabei Druck (entspricht der Tiefe) und Temperatur. Bergen der Sonden durch Herausspülen mit Wasser vom anderen U-Rohrende her, Auslesen der Messresultate auf einen Laptop-Computer zur weiteren Verarbeitung. Einsatzfähig bis zu ca. 350 m Tiefe.

Die Auslegung, Messelektronik und Datenerfassung entsprechen höchsten Ansprüchen. So können im Minidatenlogger dreimal 16'000 Messwerte (Zeit, Druck, Temperatur) festgehalten werden. Die Temperaturauflösung beträgt ± 0.0015 °C. Das Temperaturlogging mit dem drahtlosen Minidatenlogger weist gegenüber einer kabelgebundenen Bohrlochmessung wesentliche Vorteile auf.

In der Projektperiode konnte das Mess- und Auswerteverfahren an drei Objekten erprobt werden: EWS-Bohrungen in Arnegg/SG (Stationsstrasse 24), Bachenbülach/ZH (Buchenrain) und Bülach/ZH (Im Wisental).

Parallel zur Aufnahme von Temperaturprofilen wurden thermische Gesteinsparameter der untersuchten Bohrprofile im Labor bestimmt. Aus den gemessenen Temperaturprofilen und Gesteins-Wärmeleitfähigkeiten wurde der terrestrische Wärmefluss berechnet. Die Resultate (Buchenrain/Bachenbülach ZH: 78 ± 2 mWm⁻², Im Wisental/Bülach ZH: 82.7 ± 1.4 mWm⁻², Stationsstrasse/Arnegg SG: 66.6 ± 1.1 mWm⁻²) fügen sich problemlos in die Wärmeflusskarte der Schweiz.

Mit der einwandfrei funktionierenden Sonde kann nun eine ganze Palette von anspruchsvollen Aufgaben angegangen werden. Eine entsprechende Projektfortsetzung ist in Vorbereitung.

SUMMARY

A small, light, wireless borehole probe has been developed and built for continuous temperature profiling in borehole heat exchangers (BHEs). The probe consists of pressure and temperature sensors and a mini-datalogger/programmed microprocessor in a closed metal tube, watertight up to 100 bar. The probe (235mm long, 23mm dia, 99.8 g) sinks in completed but not yet working BHEs through its own weight to the bottom of the BHE U-tube and records pressure (=depth) and temperature at pre-selected time intervals during descent. After completion of the logging the probe is flushed back to the surface by a small pump where the probe is attached to a laptop computer for data retrieval. Design, electronics and data acquisition complies with highest standards: the probe can record up to 16'000 digital data (time, pressure, temperature). The temperature resolution is ± 0.0015 °C. The measurement run for a 300m deep BHE can take less than 30 minutes. The wireless temperature logging has numerous advantages over cable-type logging.

After calibration of the probe the measurement and data processing procedures have been tested under realistic field conditions at three sites during the project period: BHEs at Arnegg/SG (Stationsstrasse 24), Bachenbülach/ZH (Buchenrain) and Bülach/ZH (Wisental).

Parallel to the measurement of temperature profiles, thermal properties of rocks from the investigated boreholes have been determined in the laboratory. Based on the temperature logs and the measured thermal conductivities the terrestrial heat flow has been calculated. The results (Buchenrain/Bachenbülach/ZH: 78 ± 2 mWm⁻², Im Wisental/Bülach ZH: 82.7 ± 1.4 mWm⁻², Stationsstrasse/Arnegg SG: $66.6.1 \pm 1.1$ mWm⁻²) agree well with the heat flow map of Switzerland.

With the well-functioning probe, the data acquisition and processing procedures now a whole suite of demanding task can be tackled: lithological subdivision of the borehole profile, optimizing multi-BHE field during implementation, data base for paleoclimatic studies, identification of groundwater flow. A corresponding project continuation is in preparation.

Inhaltsverzeichnis

1	Projektziele.....	3
2	Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse.....	4
2.1	Konzept, Auslegung und Bau.....	4
2.1.1	Hardware.....	5
2.1.2	Sondenelektronik.....	7
2.1.3	Software.....	7
2.2	Tests, Eichung.....	16
2.3	Messungen.....	17
2.3.1	Messungen im Feld.....	17
2.3.2	Messungen im Labor.....	22
2.4	Auswertung Der Messungen.....	22
2.4.1	Labormessungen.....	22
2.4.2	Temperaturmessungen und Bestimmung des terrestrischen Wärmeflusses	27
2.5	Ergebnisse	34
3	Nationale Zusammenarbeit.....	34
4	Bewertung und Ausblick.....	34
5	Referenz.....	36

1 Projektziele

Das Ziel ist die Entwicklung, Bau und praktische Erprobung einer einfach zu bedienenden kabellosen Bohrlochsonde ("Smart instrument"; ca. 2 cm Durchmesser und max. 30 cm lang). Die Sonde enthält Minidatenlogger, Temperatur- und Drucksensor. Sie dient zur Messung des Temperaturverlaufs in U-Erdwärmesonden (Grundag Duplex, Haka EWS), welche mit den umgebenden Gesteinsformationen im thermischen Gleichgewicht stehen. Die Sonde sinkt durch das abgegliche Eigengewicht zum Sondenfuss und misst dabei Druck (entspricht der Tiefe) und Temperatur. Bergen der Sonden durch Herausspülen mit Wasser vom anderen U-Rohrende her, Auslesen der Messresultate auf einen Laptop-Computer zur weiteren Verarbeitung. Einsatzfähig bis zu ca. 350 m Tiefe; spätere routinemässige Bedienung der Messsonde durch diesbezüglich unqualifiziertes Personal (z.B. Bohrmeister).

Nach erfolgter Berechnung und Bau (Gehäuse, Sensoren, Datenerfassung, PC-Link, Übertragungssoftware) und Kalibrierung soll die Sonde in 2 – 3 Erdwärmesonden-Bohrungen eingesetzt und erprobt werden (Messung, Datenverarbeitung, Auswertung). Parallel dazu werden am Bohrklein ("cuttings") dieser Bohrungen die Wärmeleitfähigkeiten im Labor bestimmt. Dadurch soll der geothermische Wärmefluss bestimmt werden und daraus indirekt die Wärmeleitfähigkeit von Gesteinsinformationen ohne im Labor messbaren Cuttings ("kritische Formationen").

Das Fernziel ist die Optimierung von grossen Erdwärmesondenanlagen während des Anlagbaus durch gezielten Einsatz des "Smart instrument".

2 Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

2.1 KONZEPT, AUSLEGUNG UND BAU

Das Blockschaftbild der Bohrlochsonde ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

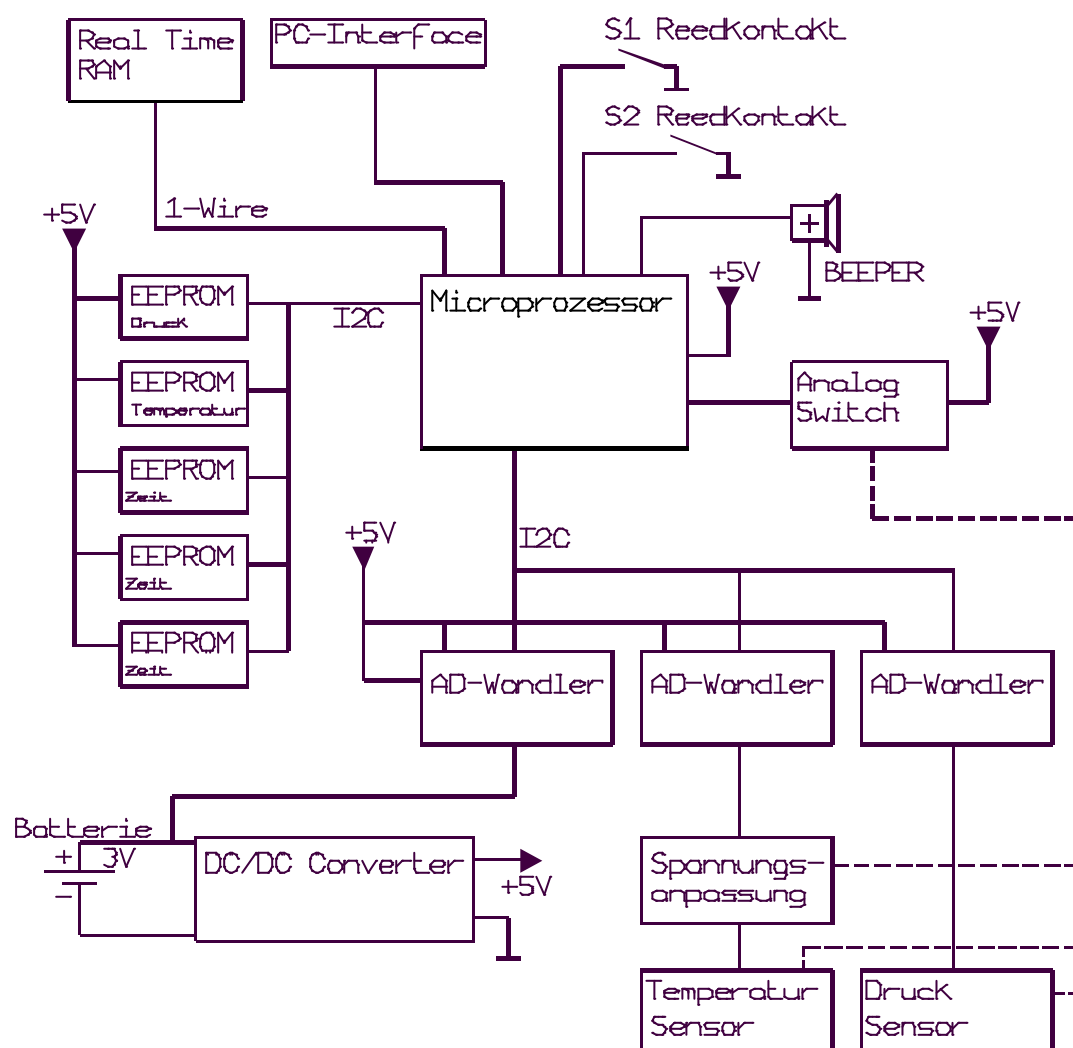


Abbildung 2.1: Blockschaftbild.



Abbildung 2.3: Die Bohrlochsonde vor dem Zusammenbau.

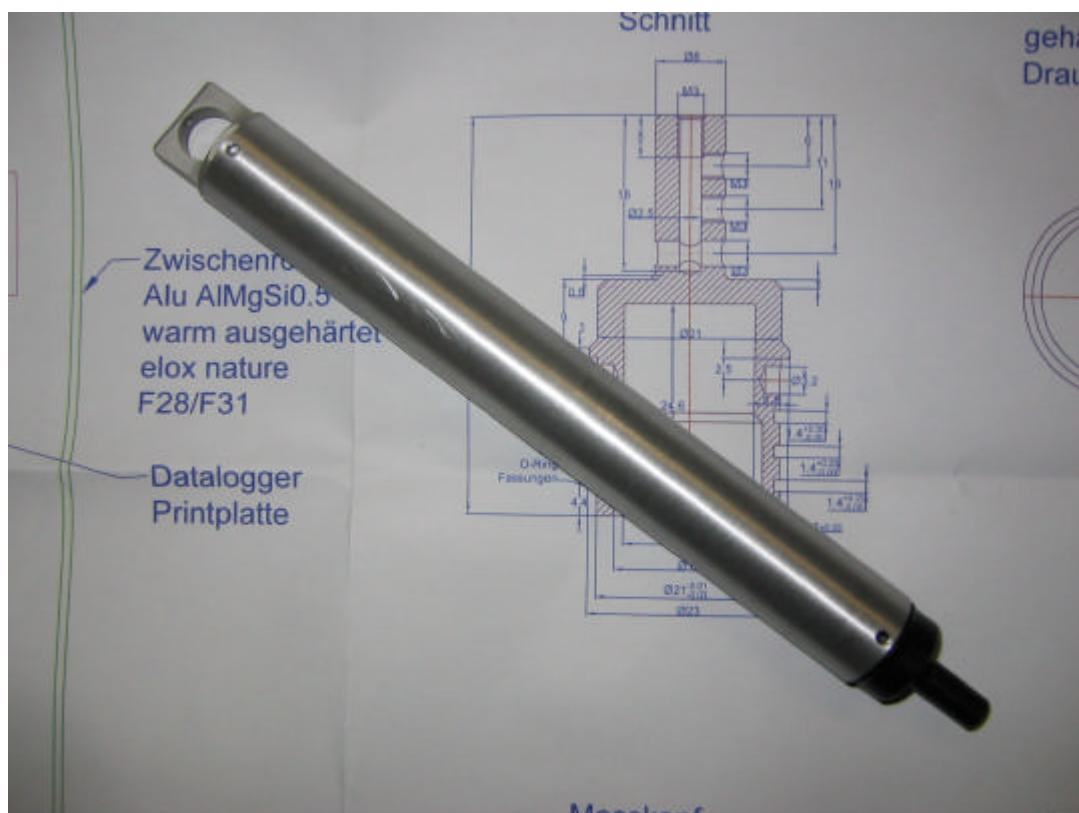


Abbildung 2.4: Zusammengebaute Sonde. Länge: 235 mm, Durchmesser: 23 mm, Gewicht: 99.8 g.

2.1.2 Sondenelektronik

Die Sondenelektronik wurde im Zwischenbericht detailliert beschrieben.

2.1.3 Software

Die Sonde wird mit einer speziellen Software betrieben. Die Software dieser kabellosen Bohrlochsonde besteht grundsätzlich aus 3 Teilen:

- Steuerung der Bohrlochsonde
- Kommunikationssoftware PC - Bohrlochsonde
- Kalibrierungssoftware.

2.1.3.1 Steuerungssoftware der Bohrlochsonde

Die Steuerungssoftware der Bohrlochsonde ist jener Teil der Software, welcher im Mikroprozessor (Basic Stamp BS2pe) der Bohrlochsonde läuft und entsprechend der Vorkonfiguration der Bohrlochsonde die eigentlichen Messungen vornimmt und die Parameter Druck, Temperatur und Zeit in den EEPROM's abspeichert.

Das grobe Konzept dieses Sourcecodes ist in Form eines Nassi-Schneidermann Diagrammes auf der folgenden Seite dargestellt.

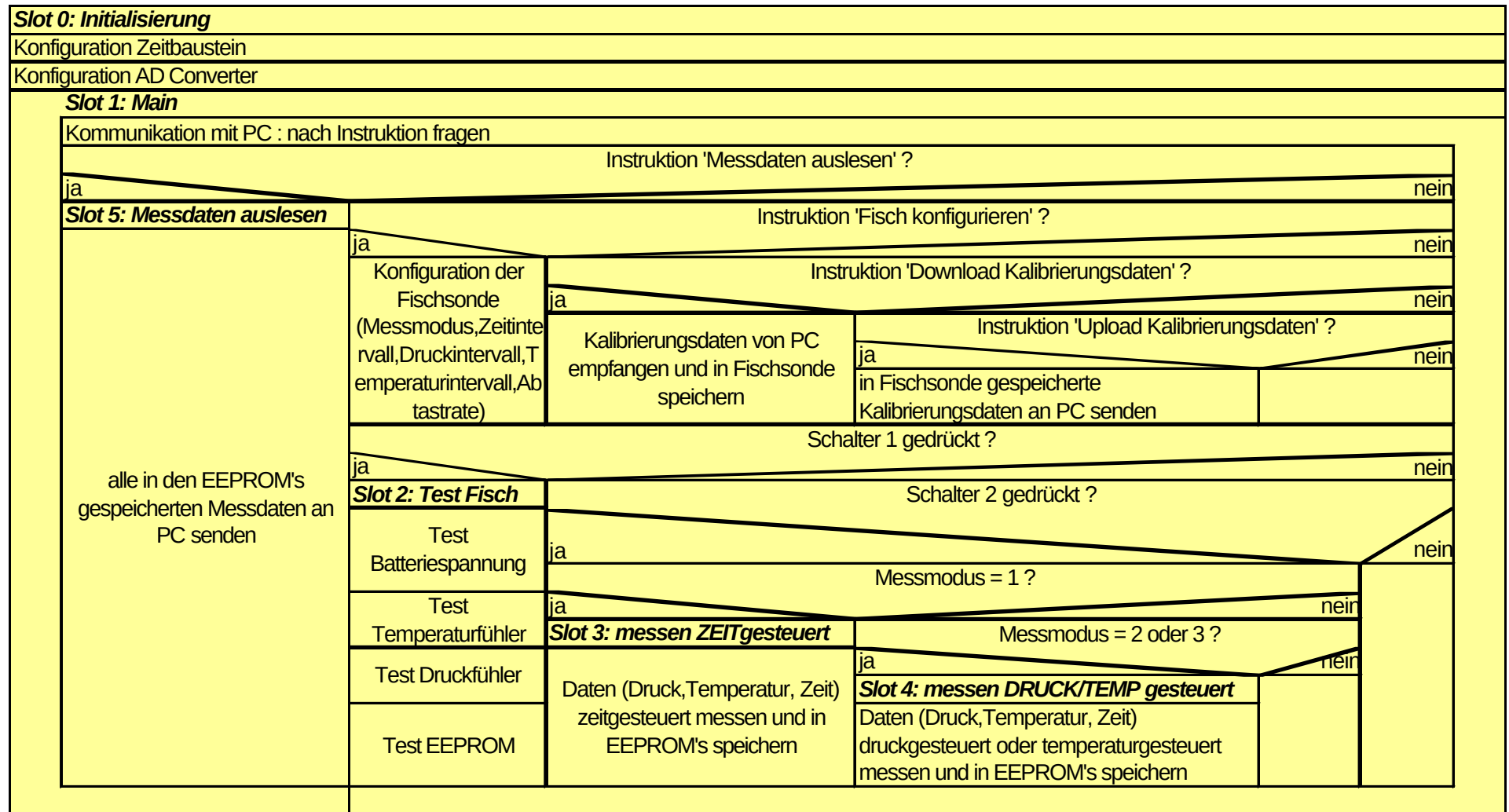


Abbildung 2.5: Konzept des Sourcecodes der Bohrlochsonde.

2.1.3.2 Kommunikationssoftware PC-Bohrlochsonde

Um eine Auswertung der gemessenen Daten zu ermöglichen ist es unbedingt nötig die Messwerte in Form einer Excel-Tabelle zur Verfügung zu haben. Deshalb ist eine Kommunikation zwischen dem PC und der Fischsonde nötig.

Die Kommunikationssoftware, welche grundsätzlich aus einem Makro in einem Excel-Workbook besteht, erlaubt gemessene Daten aus der Fischsonde in eine Exceltabelle zu lesen oder die Fischsonde für spätere Messungen zu konfigurieren. Dabei handelt es sich um ein Bedienungstool mit folgender Funktionalität:

Frei konfigurierbare Funktionen:

- Messmodus einstellen
- Zeitintervall einstellen
- Druckintervall einstellen
- Temperaturintervall einstellen
- Abtastrate einstellen

Automatische Funktionen während der Konfiguration der Bohrlochsonde:

- Messdaten löschen bei Konfiguration der Bohrlochsonde
- Zeitbaustein der Fischsonde mit PC-Systemzeit synchronisieren

Systemanforderungen:

- Windows 95 oder höher
- Microsoft Office 2000 oder höher
- Kommunikations-Port

2.1.3.3 Kalibrierungssoftware

Damit genaue Messdaten resultieren müssen vor einer ersten Messung die beiden Messfühler jeder einzelnen Bohrlochsonde kalibriert werden. Dabei werden die Kalibrierungsdaten in der Fischsonde gespeichert. Diese Kalibrierungsdaten werden später beim Auslesen der Messdaten zur Berechnung der exakten Temperatur- und Tiefenwerte benötigt.

Die Kalibrierungssoftware besteht aus einem Makro in einem Excel-Workbook und ermöglicht auf einfache Art und Weise die Kalibrierungsdaten in die Bohrlochsonde zu schreiben oder aus der Bohrlochsonde zu lesen.

Diese Kalibrierungssoftware steht nur dem Entwicklerteam zur Verfügung.

Der Benutzer muss sich nicht um die Kalibrierung der Messsonde kümmern, er kann direkt zur eigentlichen Messung übergehen.

2.1.3.4 Bedienungsanleitung

Der Benutzer kann direkt zur Konfiguration der Bohrlochsonde und somit zur eigentlichen Messung übergehen.

1. Anschliessen der Messsonde

- Schliessen Sie ein normal belegtes seriell RS232 Kabel am PC an eine freie RS232 Schnittstelle an (bei den neuen PC-Modellen sind eventuell nur USB Schnittstellen vorhanden, in diesem Fall muss ein USB-RS232 Übergangsstück mit entsprechender Treibersoftware verwendet werden).
- Verbinden Sie die Bohrlochsonde über das mitgelieferten Adapterstück mit dem seriellen RS232 Kabel.
- Schliessen Sie eine 3V Spannung an die beiden Speisungsdrähte des Adapterstückes an. **Achten Sie dabei auf eine korrekte Polarisation. (rot: + / schwarz: -).**

2. Starten der Software (SW)

- Öffnen Sie das Excelfile `KommunikationsSW` durch einen Doppelklick. Es erscheint das `Konfigurationsblatt Bohrlochsonde` („Fischsonde“, „Fisch“, Abbildung 2.6) und es öffnet sich auch das kleine Fenster `Interface zur Fischsonde` mit den Einstellungsparametern der seriellen Schnittstelle und den beiden Instruktionsknöpfen `Messdaten auslesen` und `Fisch konfigurieren`. Beim öffnen macht Excel darauf aufmerksam, dass Makros Viren enthalten können. Mit einem Klick auf den `Enable macros` Knopf muss bestätigt werden, dass diese SW aus einer vertrauensvollen Quelle stammt und somit keine Viren enthält.

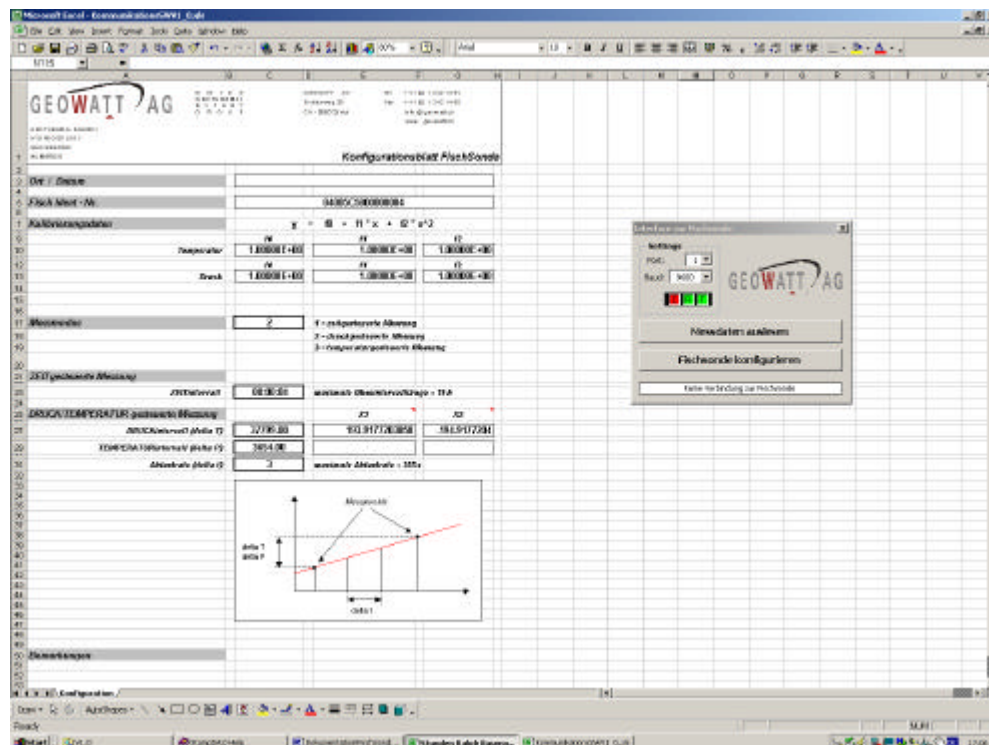


Abbildung 2.6: Konfigurationsblatt mit Fenster „Interface zur Fischsonde“.

3. Bedienoberfläche „Konfigurationsblatt Fischsonde“

Dieses Konfigurationsblatt dient dazu, die Fischsonde für eine Messung neu zu konfigurieren, falls dies vom Benutzer erwünscht ist. Weiter zeigt dieses Blatt auch die für jede einzelne Sonde spezifischen Daten wie `Identifikations-Nr.` oder `Kalibrierungsdaten` an.

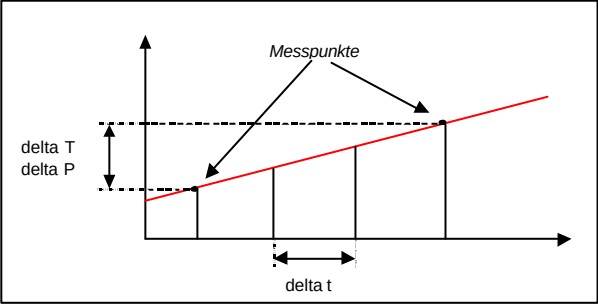
		S W I S S G E O T H E R M A L E X P E R T G R O U P		GEOWATT AG Dohlenweg 28 CH - 8050 Zürich		Tel + 41 (0) 1 242 14 54 Fax + 41 (0) 1 242 14 58 info @ geowatt.ch www .geowatt.ch		
GEOTHERMAL ENERGY HYDROGEOLOGY ENGINEERING NUMERICS		Konfigurationsblatt FischSonde						
Ort / Datum								
Fisch Ident - Nr.		04005C5800000084						
Kalibrierungsdaten		$y = f_0 + f_1 \cdot x + f_2 \cdot x^2$						
Temperatur		f_0 1.00000E+00	f_1 1.00000E+00	f_2 1.00000E+00				
Druck		f_0 1.00000E+00	f_1 1.00000E+00	f_2 1.00000E+00				
Messmodus		2		1 = zeitgesteuerte Messung 2 = druckgesteuerte Messung 3 = temperaturgesteuerte Messung				
ZEIT gesteuerte Messung								
ZEITintervall		00:00:04		maximale Messintervalllänge = 18 h				
DRUCK/TEMPERATUR gesteuerte Messung								
DRUCKintervall (delta P)		37799.00		X1 193.9177203858		X2 -194.9177204		
TEMPERATURintervall (delta T)		3654.00						
Abtastrate (delta t)		3		maximale Abtastrate = 255 s				
								
Bemerkungen								

Abbildung 2.7

- **Ort / Datum**

In dieses Feld kann der Ort und das Datum der aktuellen Messung eingegeben werden.

- **Fisch Ident – Nr.**

Beim Auslesen der Messdaten oder beim Konfigurieren der angeschlossenen Fischsonde wird automatisch auch die unverwechselbare Identifikationsnummer ausgelesen und in dieses Feld geschrieben.

- **Kalibrierungsdaten**

Ein Polynom 2. Grades ($y = f_0 + f_1 \cdot x + f_2 \cdot x^2$) beschreibt die Messkurve des Temperatur- und Druckfühlers. Bei der Kalibrierung der Sonde werden die Faktoren f_0 , f_1 und f_2 des Druck- und das Temperaturpolynoms bestimmt. Diese Faktoren sind in der Fischsonde abgespeichert, damit sie beim Auslesen der Messdaten in die Kalkulation einbezogen werden können.

Diese Kalibrierungsdaten werden beim Auslesen der Messdaten oder beim Konfigurieren der angeschlossenen Fischsonde automatisch in die entsprechenden Felder geschrieben.

- **Messmodus**

In diesem Feld wird die gewünschte Messmodusnummer eingegeben:

1. *Zeitgesteuerte Messung*

Das Auslösen einer Messung wird von der Zeit gesteuert, d.h. es werden in Zeitabständen, welche der Benutzer unter `ZEIT gesteuerte Messung` definiert Messungen vorgenommen.

2. *Druckgesteuerte Messung*

Das Auslösen einer Messung wird vom Druck gesteuert. Das bedeutet, dass immer dann, wenn sich der Druck um das Druckintervall (ΔP), welches der Benutzer unter `DRUCK/TEMPERATUR gesteuerte Messung` definiert hat, ändert, eine Messung ausgelöst wird.

3. *Temperaturgesteuerte Messung*

Das Auslösen einer Messung wird von der Temperatur gesteuert. Das bedeutet, dass immer dann, wenn sich die Temperatur um das Temperaturintervall (ΔT), welches der Benutzer unter `DRUCK/TEMPERATUR gesteuerte Messung` definiert hat, ändert, eine Messung ausgelöst wird.

- **ZEIT gesteuerte Messung**

Wenn eine zeitgesteuerte Messung (Messmodus 1) vorgenommen wird, muss in diesem Feld ein Zeitintervall (Maximum: 255 sec, Minimum: 1 sec.) angegeben werden. Die Messungen werden in Zeitabständen entsprechend dieses Zeitintervalls ausgelöst.

- **DRUCK/TEMPERATUR gesteuerte Messung**

DRUCKintervall (delta P)

Wenn eine druckgesteuerte Messung (Messmodus 2) vorgenommen wird, muss in diesem Feld ein Druckintervall angegeben werden. Immer wenn sich der Druck um das Druckintervall delta P ändert wird eine Messung ausgelöst.

TEMPERATURintervall (delta T)

Wenn eine temperaturgesteuerte Messung (Messmodus 3) vorgenommen wird, muss in diesem Feld ein Temperaturintervall angegeben werden. Immer wenn sich die Temperatur um das Temperaturintervall delta T ändert wird eine Messung ausgelöst.

Abtastrate (delta t)

Die Abtastrate delta t (max. 255 Sekunden) legt fest, in welchen zeitlichen Abständen der Druck oder die Temperatur (je nach Wahl des Messmodus) abgefragt wird. Bei jeder Abfrage wird die Änderung der Messgrösse seit dem letzten gemessenen Wert berechnet und anhand dieser entschieden, ob eine Messung ausgelöst wird oder nicht.

4. Interface zur Fischsonde

Das `Interface zur Fischsonde` dient zum einen dazu, die Einstellungsparameter der seriellen Schnittstelle vorzunehmen und zum anderen mit den beiden Instruktionsknöpfen den Befehl zu erteilen die Fischsonde zu konfigurieren oder die Messdaten auszulesen.

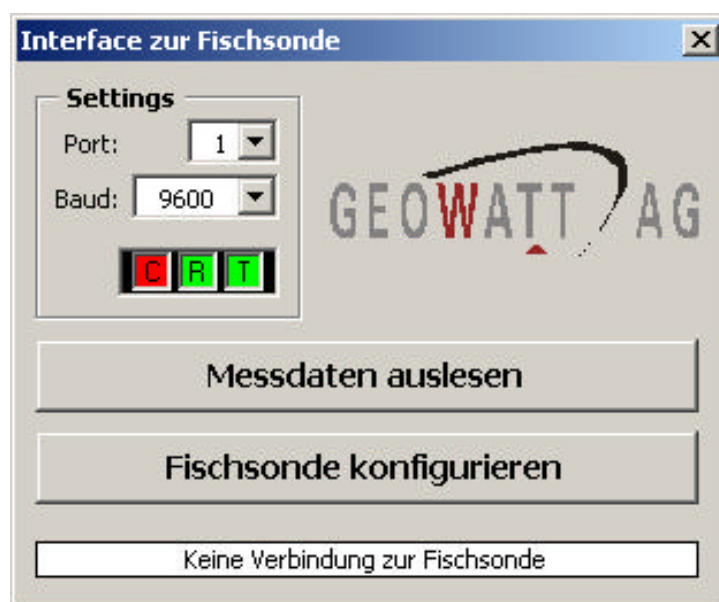


Abbildung 2.8

- **Settings**

Port

Bevor eine Verbindung zur Fischsonde aufgebaut werden kann, muss der richtige Port eingestellt werden. (Wenn die Messsonde an Port 1 angeschlossen ist muss trotz der Grundeinstellung `Port 1` nochmals die 1 aus der Liste gewählt werden.)

Baud

In dieser Box muss die Baudrate angegeben werden. Weil die Fischsonde nur mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von 9600 Baud kommunizieren kann steht in dieser Liste auch nur ein Wert zur Auswahl.

C/R/T

Funktionsanzeige Schnittstellenaktivität.

- **Messdaten auslesen**

Mit diesem Instruktionsknopf wird das Auslesen der Messdaten gestartet.

- **Fischsonde konfigurieren**

Mit diesem Instruktionsknopf wird das Konfigurieren der Fischsonde gestartet.

5. Messdaten auslesen

1. Fischsonde mit PC verbinden (wie unter `Anschliessen der Messsonde` beschrieben)
2. Software starten (wie unter `SW starten` beschrieben)
3. Im `Interface zur Fischsonde` unter Settings den Port einstellen (siehe `Settings/Port`)
4. Instruktionsknopf `Messdaten auslesen` betätigen.

Sollte die Messsonde keine Daten enthalten, so wird dies in einer Messagebox nach dem Betätigen des Instruktionsknopfes gemeldet. Weiter werden die Identifikationsnummer und die Kalibrierungsdaten aus der Fischsonde ausgelesen und ins Konfigurationsblatt geschrieben. Anschliessend werden die gespeicherten Messdaten aus der Sonde gelesen. Dabei wird jede abgeschlossene Messung auf ein neues Excel-Blatt geschrieben.

Vor dem Auslesen der Messdaten ist darauf zu achten, dass nur das `Konfigurationsblatt FischSonde` existiert, ansonsten könnten Konflikte beim Darstellen der Messungen in den einzelnen Excelblättern entstehen.

6. Fischsonde konfigurieren

1. Fischsonde mit PC verbinden (wie unter `Anschliessen der Messsonde` beschrieben)
2. Software starten (wie unter `SW starten` beschrieben)
3. Im `Interface zur Fischsonde` unter Settings den Port einstellen (siehe `Settings/Port`)
4. Die gewünschten Konfigurationseinstellung im `Konfigurationsblatt FischSonde` vornehmen: Messmodus / Zeitintervall / Druckintervall / Temperaturintervall / Abtastrate (siehe auch `Bedienoberfläche Konfigurationsblatt FischSonde`)
5. Instruktionsknopf `Fischsonde konfigurieren` betätigen.

Gleich nachdem der Instruktionsknopf gedrückt wurde, macht eine Messagebox darauf aufmerksam, dass beim Konfigurieren der Messsonde auch alle gespeicherten Messdaten gelöscht werden. Um das Konfigurieren fortzusetzen muss die YES Taste betätigt werden. Falls die Messdaten noch nie ausgelesen wurden erscheint gleich danach eine Messagebox mit einer Warnung. Auch an dieser Stelle kann der Vorgang abgebrochen

oder fortgesetzt werden. Wird mit der Konfiguration der Fischsonde fortgefahren, so werden Identifikationsnummer und Kalibrierungsdaten ausgelesen und ins Konfigurationsblatt geschrieben. Anschliessend werden die Konfigurationseinstellungen (Messmodus / Zeitintervall / Druckintervall / Temperaturintervall / Abtastrate) der Messsonde übermittelt. Zu letzt wird der Zeitbaustein der Fischsonde mit der PC-Systemzeit synchronisiert.

7. Verwaltung der Messdaten

Das Excelfile `KommunikationsSW` kann unter anderem Namen irgendwo abgespeichert werden. Somit kann je nach Wunsch für jede einzelne Messung oder für jeden Messort ein eigenes Excelfile unter eigenem Namen gespeichert werden. Auf diese Art ist eine übersichtliche Verwaltung der Messdaten möglich.

8. Fischsonde testen

Um sich zu vergewissern, dass die Fischsonde voll funktionsfähig ist, sollte vor jeder Messung ein Selbsttest durchgeführt werden.

1. Selbsttest starten

Durch das Hinhalten eines Magneten am Gehäuse der Sonde an die markierte Stelle `Schalter 1` wird dieser betätigt und der Selbsttest gestartet. Dabei werden Batteriespannung, Temperaturfühler, Druckfühler und EEPROM getestet. Für die 4 verschiedenen Tests ertönen 4 verschiedene Frequenzen.

Batteriespannung:	1x Piepton=3V Batteriespannung in Ordnung Jeder weitere Piepton bedeutet eine Reduktion der Batteriespannung von 0.1V.
Temperaturfühler:	1x Piepton= Temperaturfühler in Ordnung 2x Piepton=Temperaturfühler hat Unterbruch 3x Piepton=Temperaturfühler hat Kurzschluss
Druckfühler:	1x Piepton=Druckfühler in Ordnung 3x Piepton=Druckfühler nicht in Ordnung
EEPROM	1x Piepton=EEPROM in Ordnung, freier Speicherplatz: 14400-16000 Messpunkte Jeder weitere Piepton bedeutet eine Reduktion des freien Speicherplatzes um 1600 Messpunkte

9. Messen

Bevor eine Messung gestartet wird muss die Sonde konfiguriert werden (siehe `Fischsonde konfigurieren`)

1. Messung starten

Durch das Hinhalten eines Magneten am Gehäuse der Sonde an die markierte Stelle `Schalter 2` wird dieser betätigt und eine Messung gestartet. Dies wird durch ein langes akustisches Signal bestätigt.

Während der Messung ertönt in regelmässigen Abständen ein kurzes akustisches Signal und bestätigt damit das einwandfreie Funktionieren.

2. Messung stoppen

Um eine laufende Messung zu stoppen muss der Schalter 2 nochmals betätigt werden, was wiederum durch ein langes akustisches Signal bestätigt wird.

Sobald eine Messung gestoppt wurde, kann die nächste gestartet werden. Auf diese Art können maximal 50 Messungen in der Fischsonde gespeichert werden.

2.2 TESTS, EICHUNG

Die fertiggebaute Sonde ist besonders leistungsfähig und hat eine extrem hohe Auflösung. Erfasst und gespeichert werden können dreimal 16'000 Messungen (Zeit, Druck und Temperatur); die Auflösung der Temperaturmessung beträgt 0.003 °C. Die Zeitkonstante bei der Temperaturmessung beträgt 3.5 sec.

Erste Funktionstests nach Prüfung der Druckfestigkeit (siehe Zwischenbericht) erfolgten unter Laborbedingungen. Die Temperatureichung erfolgte in einem Thermostatbad, die Druckeichung hydraulisch.

Abbildung 2.9 zeigt die Temperatur-Eichvorrichtung. Die Temperatureichung wurde im Temperaturbereich 0 – 50 °C durchgeführt.



Abbildung 2.9: Temperatureichung

2.3 MESSUNGEN

Die Projektarbeiten beinhalten sowohl Messungen der Temperatur-Tiefenprofile in ausgewählten Erdwärmesonden-Bohrungen im Feld sowie auch Labormessungen an Bohrproben der untersuchten Bohrungen.

2.3.1 Messungen im Feld

Vor der Messung wird die Bohrlochsonde konfiguriert und die Datenaquisition gestartet. Die Sonde wird in einen Ast des EWS U-Rohres gegeben wo sie unter dem Eigengewicht bis zur Umbiegung des U-Rohres im Bohrlochtiefsten absinkt. Während der Tauchfahrt werden in der Sonde in vorgegebenen Zeitintervallen an den jeweiligen Positionen die Druck- und Temperaturwerte festgehalten. Nach Abschluss der Messfahrt wird die Sonde vom anderen Ende des U-Rohres her herausgespült. In einer eigens konstruierten Auffangvorrichtung wird die wieder zu Tage geförderte Sonde gefasst. Anschliessend wird die Sonde an ein Laptop-Computer angeschlossen zum Herauslesen der Messdaten.

Messungen der Temperaturprofile wurden bislang an drei Objekten durchgeführt:

- **EWS-Bohrung Stationsstrass 24, Arnegg SG.**

Diese Bohrung weist eine längere Standzeit auf (Wassersäule in Ruhe, d.h. im thermischen Gleichgewicht mit dem umgebenden Gestein)

- **EWS-Bohrung Buchenrain, Bachenbülach ZH.**

Diese Bohrung befindet sich auf einer Baustelle.

- **EWS-Bohrung Im Wisental, Bülach ZH.**

Auch diese Bohrung befindet sich auf einer Baustelle.

Abbildung 2.10 zeigt einen Messdatenblatt-Ausschnitt.

Für die Messungen im Feld wurden noch verschiedene Hilfseinrichtungen (Hand- und Motorpumpen, Schläuche, diverse Werkzeuge etc.) bereitgestellt. Ferner wird noch ein Stromanschluss benötigt.

Die folgende Abbildungen (Abbildung 2.11 bis Abbildung 2.13) geben einen Eindruck des Aufwandes bei den Feldarbeiten. Das Messteam bestand aus den Herren Ralph Baumgartner, Ernst Rohner, Ladislaus Rybach, und Ulrich Schärli.

Zeit1 [s]	Tiefe	Temperatur
12.8.2003 14:41:24	50.58 m	12.336 °C
12.8.2003 14:41:28	51.66 m	12.364 °C
12.8.2003 14:41:32	52.76 m	12.402 °C
12.8.2003 14:41:36	53.86 m	12.436 °C
12.8.2003 14:41:40	54.98 m	12.464 °C
12.8.2003 14:41:44	56.02 m	12.495 °C
12.8.2003 14:41:48	57.06 m	12.519 °C
12.8.2003 14:41:52	58.17 m	12.550 °C
12.8.2003 14:41:56	59.21 m	12.584 °C
12.8.2003 14:42:00	60.30 m	12.615 °C
12.8.2003 14:42:04	61.41 m	12.646 °C
12.8.2003 14:42:08	62.47 m	12.677 °C
12.8.2003 14:42:12	63.55 m	12.701 °C
12.8.2003 14:42:16	64.62 m	12.729 °C
12.8.2003 14:42:20	65.72 m	12.767 °C
12.8.2003 14:42:24	66.81 m	12.794 °C
12.8.2003 14:42:28	67.86 m	12.829 °C
12.8.2003 14:42:32	68.96 m	12.863 °C
12.8.2003 14:42:36	70.01 m	12.894 °C
12.8.2003 14:42:40	71.13 m	12.925 °C
12.8.2003 14:42:44	72.23 m	12.956 °C
12.8.2003 14:42:48	73.25 m	12.994 °C
12.8.2003 14:42:52	74.35 m	13.031 °C
12.8.2003 14:42:56	75.41 m	13.059 °C
12.8.2003 14:43:00	76.52 m	13.090 °C
12.8.2003 14:43:04	77.61 m	13.124 °C
12.8.2003 14:43:08	78.68 m	13.155 °C
12.8.2003 14:43:12	79.75 m	13.190 °C
12.8.2003 14:43:16	80.83 m	13.224 °C
12.8.2003 14:43:20	81.92 m	13.262 °C
12.8.2003 14:43:24	82.95 m	13.296 °C
12.8.2003 14:43:28	84.04 m	13.327 °C
12.8.2003 14:43:32	85.15 m	13.358 °C
12.8.2003 14:43:36	86.22 m	13.399 °C
12.8.2003 14:43:40	87.32 m	13.430 °C
12.8.2003 14:43:44	88.41 m	13.468 °C
12.8.2003 14:43:48	89.51 m	13.505 °C
12.8.2003 14:43:52	90.53 m	13.543 °C
12.8.2003 14:43:56	91.65 m	13.581 °C
12.8.2003 14:44:00	92.75 m	13.622 °C
12.8.2003 14:44:04	93.83 m	13.660 °C
12.8.2003 14:44:08	94.87 m	13.701 °C
12.8.2003 14:44:12	95.93 m	13.752 °C
12.8.2003 14:44:16	97.06 m	13.800 °C
12.8.2003 14:44:20	98.10 m	13.845 °C
12.8.2003 14:44:24	99.21 m	13.886 °C
12.8.2003 14:44:28	100.22 m	13.931 °C
12.8.2003 14:44:32	101.33 m	13.972 °C
12.8.2003 14:44:36	102.40 m	14.023 °C
12.8.2003 14:44:40	103.52 m	14.057 °C
12.8.2003 14:44:44	104.57 m	14.105 °C
12.8.2003 14:44:48	105.67 m	14.146 °C

Abbildung 2.10: Messdaten der EWS-Bohrung Im Wisental: Datum, Zeit, Tiefe, Temperatur.



Abbildung 2.11: Zirkulationspumpe, Auffangvorrichtung.



Abbildung 2.12: Die Fischsonde in guten Händen.



Abbildung 2.13: Es braucht nur wenig zusätzliches Wasser.

2.3.2 Messungen im Labor

In den drei untersuchten Erdwärmesondenbohrungen wurden nebst dem gemessenen Temperatur-Tiefen-Profil auch mehrere petrophysikalische Messungen an Gesteinsproben im Labor durchgeführt. Diese wurden von Dr. U. Schärli am Institut für Geophysik der ETH Zürich durchgeführt.

Es wurden folgende Parameter gemessen:

Tabelle 2.1: Anzahl der untersuchten Proben und Parameter.

Bohrung	Wärmeleitfähigkeit	Dichte	Porosität	Max. Bohrtiefe
	λ_m	ρ_m	ϕ_{eff}	
Im Wisental/Bülach ZH	10	10	8	306 m
Buchenrain/Bachenbülach ZH	5	5	4	264 m
Stationsstrasse/Arnegg SG	36	36		265 m

Die Messmethoden, mit welchen die verschiedenen petrophysikalischen Kennwerte bestimmt wurden, sind im Zwischenbericht beschrieben.

Zusammen mit den Temperaturprofilen werden die Ergebnisse und geothermischen Berechnungen für jede Bohrung beschrieben.

2.4 AUSWERTUNG DER MESSUNGEN

Die Temperaturmessungen in den Erdwärmesonden-Bohrungen und die Labormessungen der thermischen Gesteinsparameter werden zunächst für die Bestimmung des terrestrischen Wärmeflusses verwendet. Die Auswertemethodik ist im Zwischenbericht beschrieben sowie auch die Darstellung des geologischen Profils zusammen mit dem Temperatur-Tiefenprofil.

2.4.1 Labormessungen

2.4.1.1 Buchenrain (Bachenbülach ZH)

Tabelle 2.2: petrophysikalische Daten von Bohrproben der Bohrung *Buchenrain*.

Probe	Tiefe	Lithologie	λ_m W/m,K	$\Delta \lambda_m$ W/m,K	ρ_m g/cm ³	f_{eff}	Δf_{eff}	λ_f	$\Delta \lambda_f$
B-1	9 - 15 m	Sand	3.23	0.02	2.54	0.20	0.05	2.32	0.08
B-2	39 - 60 m	Sandstein	2.99	0.36	2.55	0.12	0.01	2.48	0.08
B-3	114 - 147 m	Sandstein	4.27	0.16	2.61	0.21	0.03	2.85	0.08
B-4	171 - 177 m	Mergel/Feinsandstein	2.48	0.11	2.55	0.14	0.01	2.03	0.01
B-5	208 - 229 m	Mergel/Feinsandstein	2.02	0.04	2.47	0.16	0.01	1.68	0.01

kursive Zahlen: geschätzte Werte

λ_m = Matrixwärmeleitfähigkeit, ρ_m = Matrixdichte, ϕ_{eff} = effektive Porosität, λ_f = Wärmeleitfähigkeit des wassergesättigten Gesteins, Δ = Messfehler.

Tabelle 2.3: Porositätsbestimmungen von Bohrproben der Bohrung *Buchenrain*.

Probe	Tiefe [m]	Lithologie	G_{beh} [g]	$G_{beh}+G_{pf}$ bergfeucht [g]	$G_{beh}+G_{pt}$ getrocknet [g]	m_m [g]	m_w [g]	ρ_m [g/cm ³]	f	D f	W_{tot}	DW_{tot}
B-1	9 - 15	Sand						2.54				
B-2	39 - 60	Sandstein	29.91	147.78	141.85	111.94	5.93	2.55	11.9	0.0089	0.0530	0.0045
B-3	114 - 147	Sandstein	29.99	63.97	60.83	30.84	3.14	2.61	21.0	0.0265	0.1018	0.0162
B-4	171 - 177	Mergel/Feinsandstein	29.20	176.76	167.63	138.43	9.13	2.55	14.4	0.0069	0.0660	0.0036
B-5	208 - 229	Mergel/Feinsandstein	29.83	95.07	90.44	60.61	4.63	2.47	15.9	0.0145	0.0764	0.0082

Messfehler:

 $G_{pf} \quad \pm 0.5$ $G_{pt} \quad \pm 0.05$ $\rho_m \quad \pm 0.03$

mit

 G_{beh} Gewicht des leeren Probenhalters G_{pf} Gewicht der feuchten Probe $G_{pt} (=m_m)$ Gewicht der trockenen Probe m_w Gewicht des Porenwassers ρ_m Dichte der Gesteinsmatrix ϕ Effektive Porosität W_{tot} Anteil des Poreswassers ($=m_w/m_m$) Δ Messfehler

2.4.1.2 Im Wisental (Bülach ZH)

Tabelle 2.4: Petrophysikalische Daten von Bohrproben der Bohrung *Im Wisental*.

Probe	Tiefe	Lithologie	λ_m [W/mK]	$\Delta \lambda_m$ [W/mK]	ρ_m [g/cm ³]	ϕ_{eff}	$\Delta \phi_{eff}$	λ_f [W/mK]	$\Delta \lambda_f$ [W/mK]
IW-1	5 - 18 m	Ton						1.69	0.05
IW-2	18 - 28 m	Kies	3.55	0.18	2.69	0.20	0.05	2.50	0.11
W-1	72 - 80 m	Mittel-/Grobsandstein	2.89	0.07	2.48	0.20	0.05	2.12	0.06
W-2	104 - 106 m	Mergel	2.19	0.09	2.34	0.20	0.04	1.70	0.02
IW-3	112 - 126 m	Mergel/Feinsandstein	2.17	0.09	2.48	0.17	0.02	1.74	0.01
W-3	148 - 152 m	Feinsandstein/Mergel	2.37	0.20	2.59	0.15	0.01	1.95	0.03
IW-4	150 - 160 m	Feinsandstein/Mergel	2.64	0.07	2.53	0.12	0.02	2.23	0.02
IW-5	210 - 226 m	Feinsandstein/Mergel	2.69	0.20	2.57	0.13	0.01	2.22	0.03
IW-6	228 - 248 m	Mittelsandstein/Mergel	2.62	0.14	2.57	0.13	0.01	2.17	0.02
W-4	252 - 272 m	Mergel/Siltstein	2.20	0.07	2.55	0.16	0.01	1.79	0.01
IW-7	278 - 298 m	Mergel	2.07	0.15	2.46	0.17	0.02	1.69	0.02

λ_m = Matrixwärmeleitfähigkeit, ρ_m = Matrixdichte, ϕ_{eff} = effektive Porosität, λ_f = Wärmeleitfähigkeit des wassergesättigten Gesteins, Δ = Messfehler.

Tabelle 2.5: Porositätsbestimmungen von Bohrproben der Bohrung *Im Wisental*.

Probe	Tiefe [m]	Lithologie	G_{beh} [g]	$G_{beh}+G_{pf}$ bergfeucht [g]	$G_{beh}+G_{pt}$ getrocknet [g]	m_m [g]	m_w [g]	r_m [g/cm ³]	f	D f	W_{tot}	DW_{tot}
W-2	104-106	Mergel	29.62	53.08	51.09	21.47	1.99	2.75	20.3	0.0407	0.0927	0.0233
W-3	148-152	Feinsandstein/Mergel	29.49	148.43	140.99	111.50	7.44	2.57	14.6	0.0085	0.0667	0.0045
IW-3	112-126	Mergel/Feinsandstein	29.35	90.84	86.06	56.71	4.78	2.48	17.3	0.0151	0.0843	0.0088
IW-7	278-298	Mergel	29.38	87.77	83.33	53.95	4.44	2.46	16.8	0.0159	0.0823	0.0093
IW-5	210-226	Feinsandstein/Mergel	29.50	109.50	105.04	75.54	4.46	2.57	13.2	0.0129	0.0590	0.0066
IW-6	228-248	Mittelsandstein/Mergel	30.11	105.64	101.43	71.32	4.21	2.57	13.2	0.0136	0.0590	0.0070
IW-4	150-160	Feinsandstein/Mergel	29.84	93.55	90.38	60.54	3.17	2.53	11.7	0.0163	0.0524	0.0083
W-4	252-272	Mergel/Siltstein	29.69	107.30	101.81	72.12	5.49	2.55	16.3	0.0125	0.0761	0.0069

Messfehler:

G_{pf}	± 0.5
G_{pt}	± 0.05
ρ_m	± 0.03

mit

G_{beh}	Gewicht des leeren Probenhalters
G_{pf}	Gewicht der feuchten Probe
$G_{pt} (=m_m)$	Gewicht der trockenen Probe
m_w	Gewicht des Porenwassers
ρ_m	Dichte der Gesteinsmatrix
ϕ	Effektive Porositat
W_{tot}	Anteil des Poreswassers ($=m_w/m_m$)
Δ	Messfehler

2.4.1.3 Stationstrasse (Arnegg SG)

Tabelle 2.6: Petrophysikalische Daten von Bohrproben der Bohrung *Stationstrasse*.

Probe	Bezeichnung	Tiefe	λ_m	ϕ_{eff}	λ_f	ρ_m
		[m]	[W/mK]		[W/mK]	[g/cm ³]
36	Konglomerat	18 - 36	4.16	0.16	3.07	2.70
35	Mergel	37 - 40	2.35	0.03	2.26	2.33
34	Feinsandstein?	41 - 47	2.20	0.14	1.84	2.37
33	Feinsandstein?	48 - 49	1.81	0.14	1.55	2.14
32	Mergel	50 - 65	1.72	0.03	1.67	2.32
31	Feinsandstein	66 - 70	2.29	0.10	2.01	2.55
30	Siltstein & Mergel	71 - 74	1.93	0.05	1.82	2.37
29	Mergel	82 - 84	2.26	0.05	2.12	2.45
28	Mittelsandstein	85 - 88	2.45	0.16	1.97	2.46
27	Konglomerat	75-81 & 89-91	3.02	0.15	2.38	2.67
26	Feinsandstein	92- 98	2.13	0.13	1.81	2.40
25	Feinsandstein&Mergel	99 - 104	2.02	0.10	1.79	2.42
24	Mergel	105 - 118	2.16	0.05	2.03	2.37
23	Konglomerat	119 - 121	3.15	0.15	2.47	2.62
22	Mergel	122 - 128	2.00	0.04	1.92	2.39
21	Siltstein	128 - 133	1.67	0.07	1.56	2.31
20	Feinsandstein	134 - 140	2.31	0.15	1.90	2.43
19	Feinsandstein	141 - 143	1.88	0.10	1.68	2.37
18	Mergel/Siltstein	144 - 147	1.85	0.04	1.77	2.46
17	Feinsandstein	148 - 160	2.53	0.06	2.33	2.51
16	Konglomerat	161 - 164	3.15	0.15	2.47	2.57
15	Sandstein	165 - 165	2.37	0.10	2.07	2.36
14	Sandstein	166 - 167	3.12	0.07	2.78	2.55
13	Sandstein	168 - 171	3.32	0.07	2.95	2.60
12	Konglomerat	172 - 181	5.00	0.15	3.65	2.74
11	Feinsandstein	182 - 188	2.40	0.12	2.04	2.56
10	Mittelsandstein	189 - 199	3.30	0.12	2.70	2.41
9	Konglomerat	200 - 203	4.51	0.10	3.70	2.74
8	Konglomerat	204 - 215	3.79	0.10	3.16	2.62
7	Konglomerat	216 - 223	2.48	0.10	2.16	2.73
6	Feinsandstein	224 - 227	2.84	0.08	2.52	2.68
5	Mittelsandstein	228 - 237	3.90	0.10	3.25	2.64
4	Mittelsandstein	238 - 248	3.19	0.05	2.94	2.55
3	Konglomerat	249 - 254	4.21	0.10	3.47	2.73
2	Mittelsandstein	255 - 258	2.53	0.08	2.26	2.41
1	Mittelsandstein	259 - 264	2.41	0.08	2.17	2.60

λ_m = Matrixwärmeleitfähigkeit, ρ_m = Matrixdichte, ϕ_{eff} = effektive Porosität (geschätzt), λ_f = Wärmeleitfähigkeit des wassergesättigten Gesteins, Δ = Messfehler

2.4.2 Temperaturmessungen und Bestimmung des terrestrischen Wärmeflusses

2.4.2.1 Buchenrain (Bachenbülach ZH)

Das Temperaturprofil in der Bohrung *Buchenrain* (Abbildung 2.14) kann in 4 lineare Gradientenabschnitte eingeteilt werden. Die Bodentemperatur im obersten Tiefen-Intervall ist durch klimatische Einflüsse geprägt und für die Wärmeflussbestimmung nicht verwendbar.

Der vertikale Wärmefluss im Untergrund wird nach der Bullardplot-Methode bestimmt:

$$T(z) = T_0 + q_z \cdot \sum_i \frac{\Delta z_i}{\lambda_i}$$

mit Δz_i : Mächtigkeit des i-ten Schicht, λ_i : Wärmeleitfähigkeit der i-ten Schicht.

Tabelle 2.7: Basisdaten für den Bullard-Plot in der Bohrung *Buchenrain*.

Index i	Tiefe [m u. OKT]	Dz_i/λ_i [m ² K/W]	$S Dz_i/\lambda_i$ [m ² K/W]	Temperatur [°C]	$\lambda_{f_{\text{gew}}} (z_i - z_{i-1})$ [W/m,K]	$D \lambda_i$ [W/m,K]	$D(S Dz_i/\lambda_i)$ [m ² K/W]
0	0.0						
1	13.9				2.32	0.08	
2	63.9	18.83	18.83	12.08	2.65	0.08	0.87
3	146.4	31.03	49.86	14.63	2.66	0.18	1.26
4	169.5	12.49	62.36	15.65	1.85	0.18	1.70
5	260.9	49.37	111.73	19.43	1.85	0.19	2.62

$\Delta z_i/\lambda_i$ = thermischer Widerstand der Schicht i, $\lambda_{f_{\text{gew}}}$ = gewichtete Wärmeleitfähigkeit der Schicht Δz_i , Δ = Fehler.

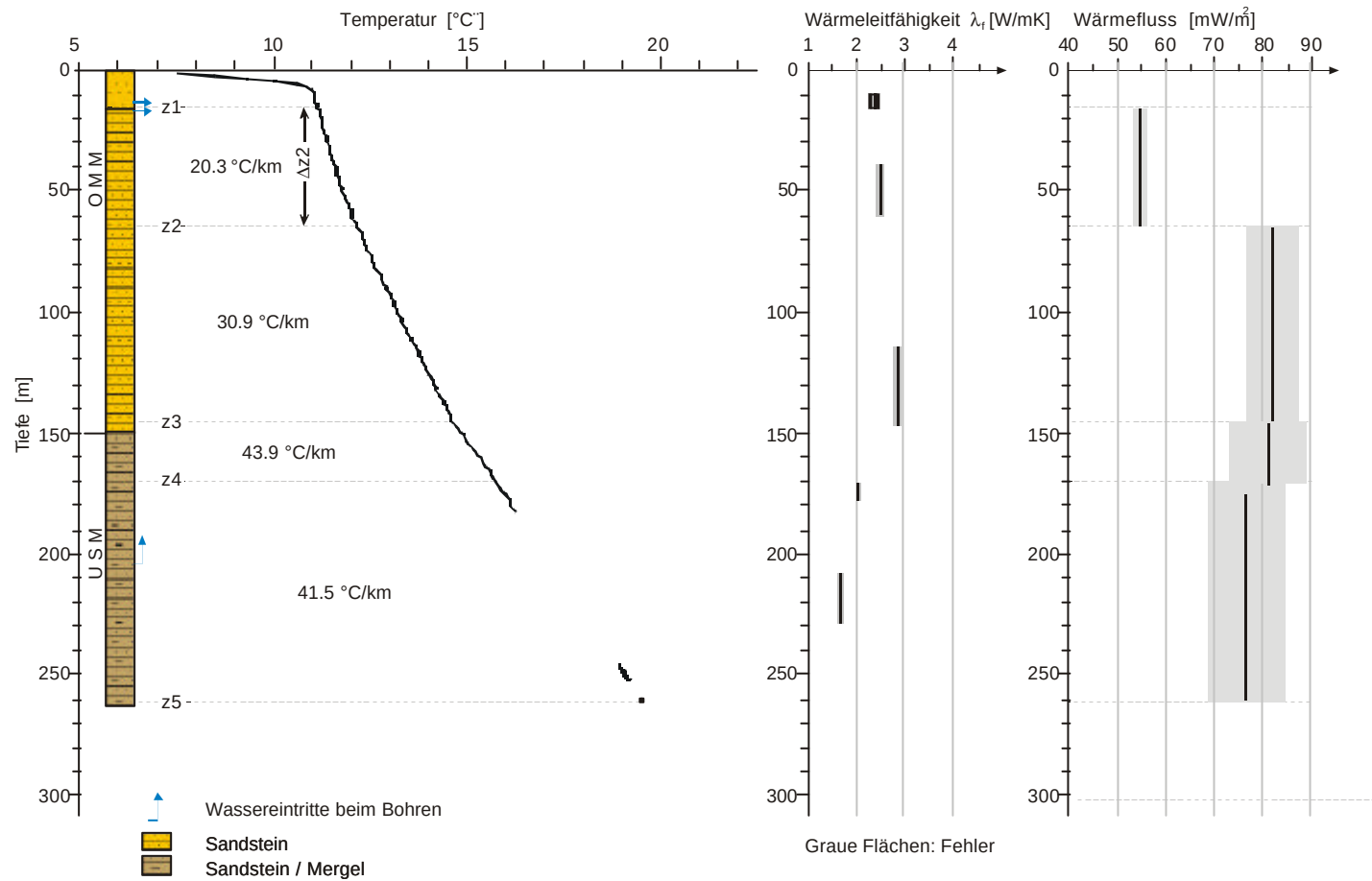


Abbildung 2.14: EWS-Bohrung Buchenrain: geothermische Auswertung. Im Temperaturprofil fehlen Daten im Tiefenbereich 185-245 m (Ausfall Stromversorgung).

Tabelle 2.8: Ergebnisse der Bullard-Plot-Berechnung in der Bohrung *Buchenrain*.

Tiefe [m u.T.]		n (T)	R^2	$R^2 (Dq)$	q_z	Dq_z	T_0	DT_0
von	bis				[mW/m ²]	[mW/m ²]	[°C]	[K]
63.9	260.9	4	0.9996	0.9960	78.90	1.89	10.66	0.12

$n(T)$ = Anzahl Temperaturmesspunkte, R^2 = Korrelationskoeffizient der linearen Regression, $R^2(Dq)$, Korrelationskoeffizient der linearen Regression der Endpunkte der Fehlerbalken im Bullardplot, q_z = vertikaler Wärmefluss, Δ = Messfehler, T_0 = mittlere Jahrestemperatur an der Erdoberfläche aus Bullardplot.

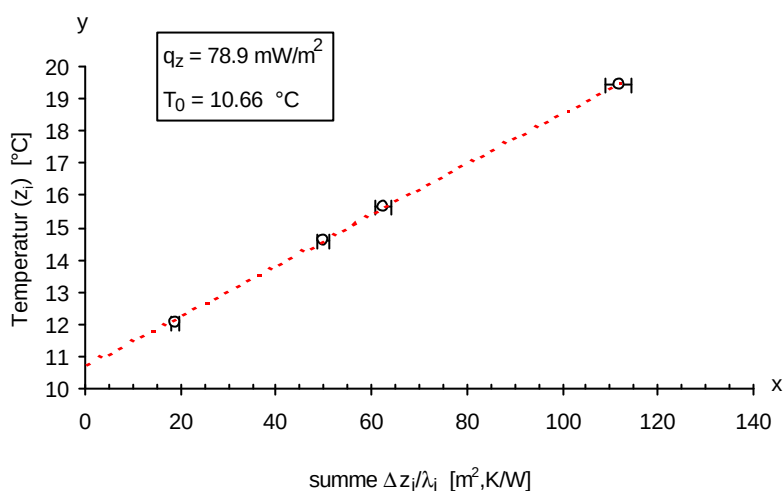


Abbildung 2.15: EWS-Bohrung Buchenrain: Bullardplot zwischen 63.9 und 260.9 m.

2.4.2.2 Im Wisental (Bülach ZH)

Das Temperaturprofil in der Bohrung *Im Wisental* (Abbildung 2.16) kann in 3 lineare Gradientenabschnitte eingeteilt werden. Die Bodentemperatur im obersten Tiefen-Intervall ist durch klimatische Einflüsse geprägt und für die Wärmeflussbestimmung nicht verwendbar.

Tabelle 2.9: Basisdaten für den Bullrad-Plot der Bohrung *Im Wisental*.

Index i	Tiefe [m] [m u. OKT]	Dz_i/l_i [m²K/W]	$S Dz_i/l_i$ [m²K/W]	Temperatur [°C]	$l_{\text{gew}} (z_i - z_{i-1})$ [W/mK]	$D l_i$ [W/mK]	$D(S Dz_i/l_i)$ [m²K/W]
0	0.0				0.00		
1	18.0				1.69		
2	47.4	13.87	13.87	12.25	2.12	0.06	0.97
3	92.7	17.07	30.93	13.62	2.66	0.60	1.84
4	301.5	104.39	135.32	22.28	2.00	0.23	3.73

$\Delta z_i/\lambda_i$ = thermischer Widerstand der Schicht i, λ_{gew} = gewichtete Wärmeleitfähigkeit der Schicht Δz_i , Δ = Fehler.

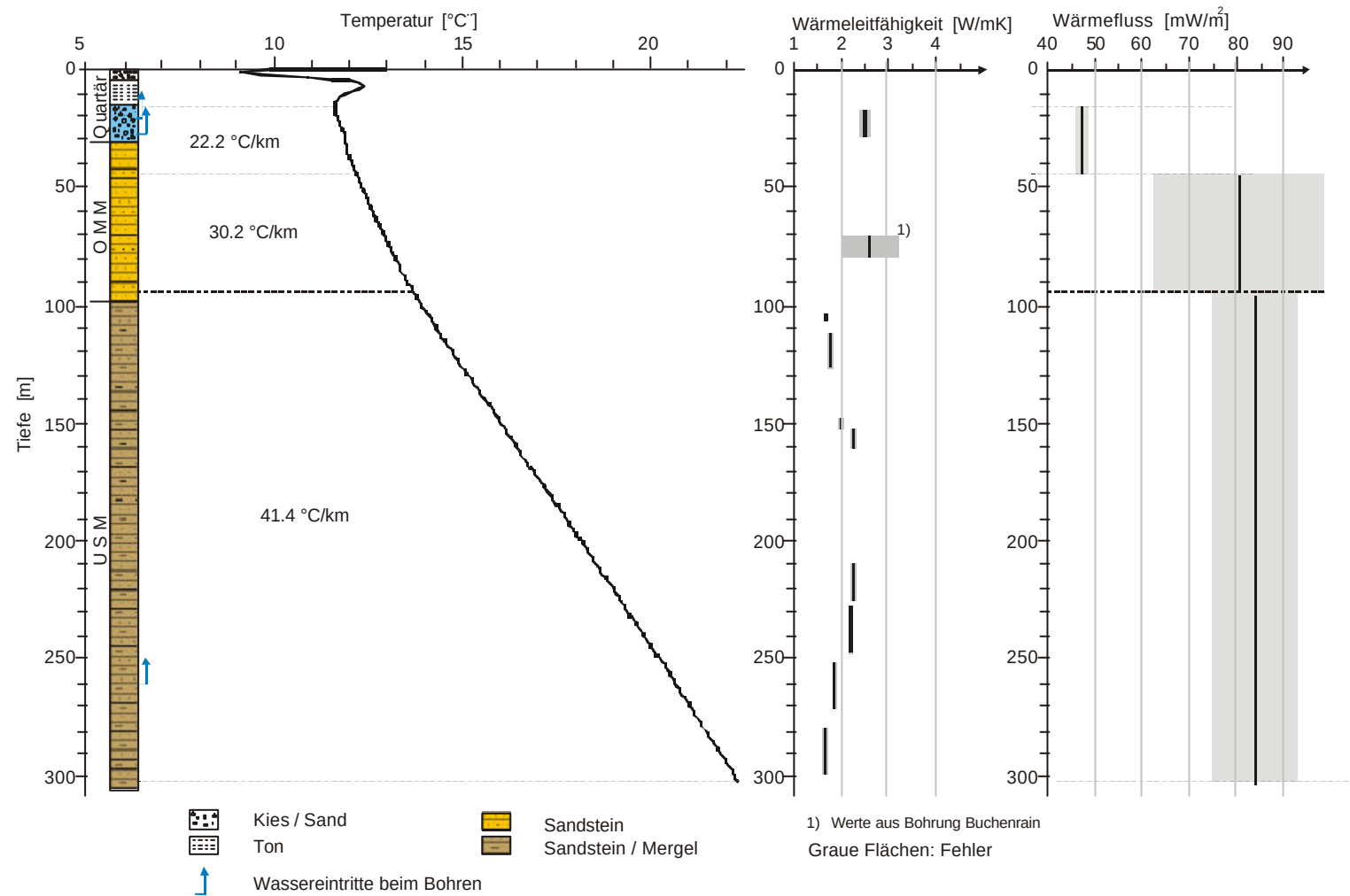


Abbildung 2.16: EWS-Bohrung Im Wisental: geothermische Auswertung.

Tabelle 2.10: Ergebnisse der Bullard-Plot-Berechnung in der Bohrung *Im Wisental*.

Tiefe [m u.T.]	n (T)	R^2	$R^2 (Dq)$	q_z	Dq_z	T_0	DT_0
von	bis			[mW/m ²]	[mW/m ²]	[°C]	[K]
47.4	301.5	3	1.0000	82.70	1.43	11.09	0.11

$n(T)$ = Anzahl Temperaturmesspunkte, R^2 = Korrelationskoeffizient der linearen Regression, $R^2(Dq)$, Korrelationskoeffizient der linearen Regression der Endpunkte der Fehlerbalken im Bullardplot, q_z = vertikaler Wärmefluss, Δ = Messfehler, T_0 = mittlere Jahrestemperatur an der Erdoberfläche aus Bullardplot.

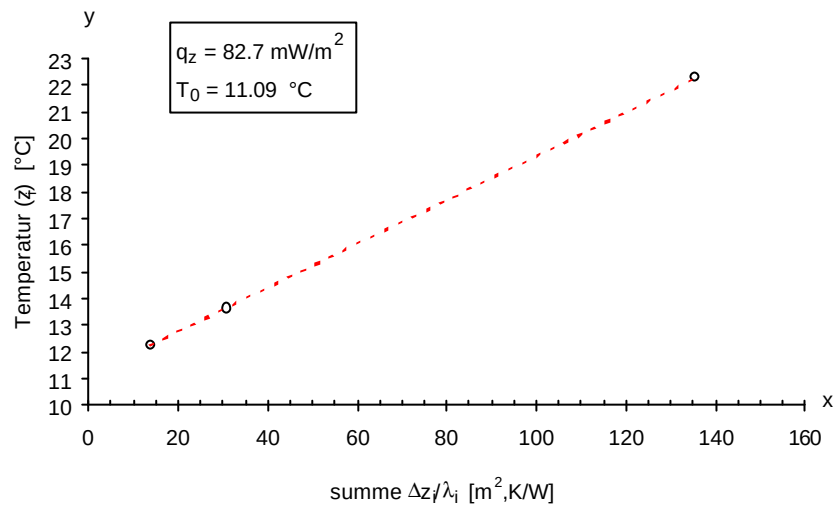


Abbildung 2.17: EWS-Bohrung Im Wisental: Bullardplot zwischen 47.4 und 301.5 m.

2.4.2.3 Stationstrasse (Arnegg SG)

Das Temperaturprofil in der Bohrung *Stationstrasse* (Abbildung 2.18) kann in 4 lineare Gradientenabschnitte eingeteilt werden. Die Bodentemperatur im obersten Tiefen-Intervall ist durch klimatische Einflüsse geprägt und für die Wärmeflussbestimmung nicht verwendbar.

Tabelle 2.11: Basisdaten für den Bullard-Plot in der Bohrung *Stationstrasse*.

Index i	Tiefe [m] [m u. OKT.]	Dz_i/l_i [m ² K/W]	$S Dz_i/l_i$ [m ² K/W]	Temp [°C] [°C]	$l_{gew}(z_i - z_{i-1})$ [W/mK]	Dl_i [W/mK]	$D(S Dz_i/l_i)$ [m ² K/W]
0	0.0						
1	47.0						
2	97.9	29.59	29.59	11.74	1.72	0.24	1.24
3	156.9	29.21	58.80	13.62	2.02	0.28	1.74
4	247.0	30.77	89.57	15.73	2.93	0.53	2.71
5	263.1	5.62	95.18	16.45	2.86	0.59	2.02

$\Delta z_i/\lambda_i$ = thermischer Widerstand der Schicht i, λ_{tgew} = gewichtete Wärmeleitfähigkeit der Schicht Δz_i , Δ = Fehler.

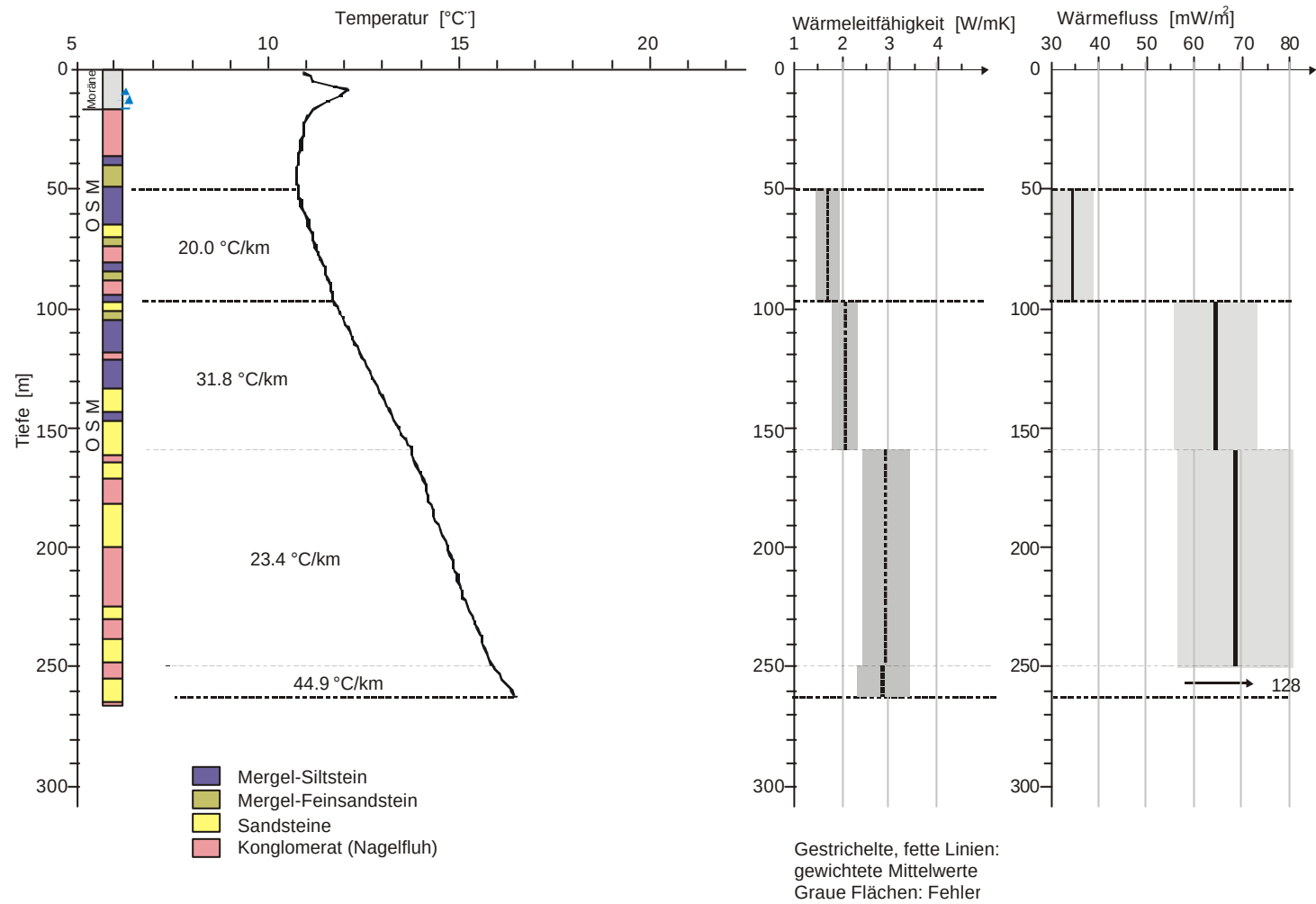


Abbildung 2.18: EWS-Bohrung Stationstrasse: geothermische Auswertung.

Tabelle 2.12: Ergebnisse der Bullard-Plot-Berechnung in der Bohrung *Stationstrasse*.

Tiefe [m u.T.]		n (T)	R^2	$R^2 (Dq)$	q_z	Dq_z	T_0	DT_0
von	bis				[mW/m ²]	[mW/m ²]	[°C]	
47.0	247	3	0.9996	0.9955	66.60	1.13	9.75	0.07

$n(T)$ = Anzahl Temperaturmesspunkte, R^2 = Korrelationskoeffizient der linearen Regression, $R^2(\Delta q)$, Korrelationskoeffizient der linearen Regression der Endpunkte der Fehlerbalken im Bullardplot, q_z = vertikaler Wärmefluss, Δ = Messfehler, T_0 = mittlere Jahrestemperatur an der Erdoberfläche aus Bullardplot.

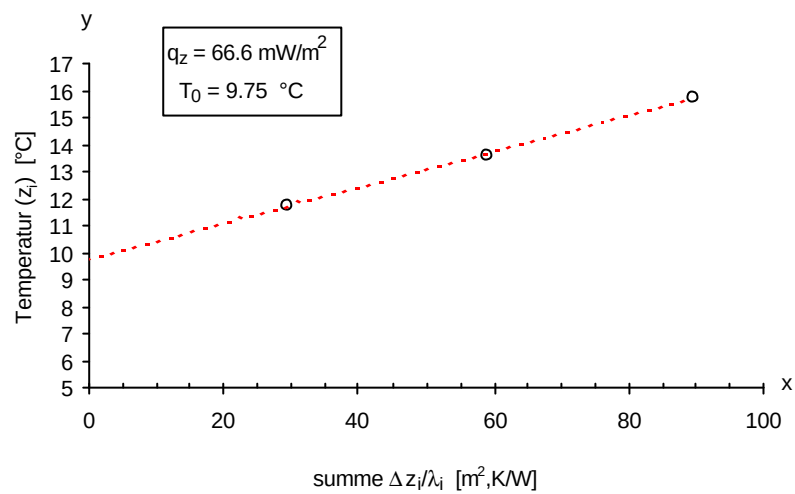


Abbildung 2.19: EWS-Bohrung Stationstrasse: Bullardplot zwischen 47 und 247 m.

2.5 ERGEBNISSE

Die gewählte Sondenauslegung- und Konstruktion erlaubt eine hochauflösende Messung von Temperatur-Tiefenprofilen in Erdwärmesonden-Bohrungen. Die Verknüpfung der Feld- und Labormessungen, im Besonderen der Temperatur-Tiefenprofile mit den Gesteinswärmeleitfähigkeiten, erlauben die Bestimmung des terrestrischen Wärmeflusses. Die gefundenen Werte (Buchenrain/Bachenbülach ZH: $78 \pm 2 \text{ mWm}^{-2}$, Im Wisental/Bülach ZH: $82.7 \pm 1.4 \text{ mWm}^{-2}$, Stationsstrasse 24/Arnegg SG: $66.6 \pm 1.1 \text{ mWm}^{-2}$) fügen sich problemlos in die Wärmeflusskarte der Schweiz (Medici and Rybach 1995).

Nun ist es grundsätzlich möglich, die Wärmeleitfähigkeiten im geologischen Schichtprofil der mit Präzisions-Temperaturmessungen erfassten Bohrungen sehr detailliert darzustellen. Hierzu wird der geothermische Gradient, dessen Variation mit der Tiefe nun mit noch nie dagewesener Präzision bestimmt werden kann, herangezogen. Solche weiterführende Arbeiten, welche für genauere Auslegung von grösseren EWS-Felder von grosser Bedeutung sind, bleiben einer Projektfortsetzung vorbehalten.

3 Nationale Zusammenarbeit

Das Elektrizitätswerk des Kantons Zürich (EKZ) betreibt in grösserem Stil „Energy-Contracting“ für EWS-Anlagen. Bei grösseren Anlagen ist das EKZ auf eine möglichst verlässliche Auslegung angewiesen. Die mit der kabellosen Bohrlochsonde beschaffbare Information über die thermische Beschaffenheit des Untergrundes ist dabei von ausschlaggebender Bedeutung. Das grosse Interesse manifestiert sich schon allein dadurch, dass das EKZ zwei der untersuchten Messobjekte (EWS-Bohrungen in Bülach und Bachenbülach) zur Verfügung gestellt hat.

Auch für die Wissenschaft kann man mit der neuen Bohrlochsonde wertvolle, bislang noch nie erbrachte Beiträge leisten. Am Institut für Geophysik der ETH Zürich ist kürzlich ein paläoklimatisches Forschungsprojekt angelaufen: „Determination of short-term climate history by three-dimensional inversion of borehole temperature data“. Bei einem ersten Kontakt bekundete der verantwortliche Sachbearbeiter, Dr. Scott Putnam, grosses Interesse.

4 Bewertung und Ausblick

Konzept, Konstruktion und praktische Erprobung der kabellosen Bohrlochsonde kann als ein grosser Erfolg bewertet werden. Die erreichten technischen Spezifikationen (geringes Gewicht bei hoher Druckfestigkeit, hohe Auflösung und Stabilität) sind einzigartig.

Die Temperaturlog-Messung mit der kabellosen Sonde weist gegenüber der kabelgebundenen Messung wesentliche Vorteile auf:

- Die aufwändige Messung im offenen Bohrloch (teure Wartezeiten der Bohrequippe, schwere Kabelrollen) entfällt.
- Die Messung kann zeitlich auf die Bohrlochabkühlung abgestimmt werden. Die Messqualität wird dadurch entschieden verbessert, ohne zusätzliche Kosten zu verursachen. Beim offenen Bohrloch kann dies nur durch entsprechende lange Wartezeiten und entsprechenden Bohrlochausbau erreicht werden.
- Die Messgenauigkeit und vorallem deren effektive Auflösung wird erhöht. Die Erdwärmesonde ist durch die Injektionsmasse sehr gut mit dem umliegenden Gestein thermisch gekoppelt. Durch den kleinen Durchmesser werden interne Rohrzirkulationen wirksam unterbunden. Die Fischsonde selbst ist sehr gut abgeschirmt und da die Messumwandlung direkt beim Sensor stattfindet, entfällt die Problematik von einge-

streuten Störsignalen. Dieses Konzept erlaubt die Realisation einer sehr hohen Auflösung ($\pm 0.0015 \text{ }^{\circ}\text{C}$) bei äusserst geringem Rauschen (1 LSB).

- Die Messung selber dauert für eine 300 m EWS weniger als eine Stunde. Die Fischsonde kann mit geringem Aufwand mit einer kleinen Jetpumpe wieder aus der EWS gespült werden.
- Das Sicherheitsrisiko eines verlorenen Messkopfes ist wesentlich geringer als bei der kabelgebundenen Messung, da letztere in Erdwärmesonden nur bis zu einer Tiefe von ca. 60m relativ einfach ist. Ab 60m Tiefe steigt das Risiko, dass der kabelgebundene Messkopf nicht mehr hochgezogen werden kann, da sich das Kabel mit der spiralförmig eingebauten EWS quasi verseilt, d.h. je mehr gezogen wird, um so stärker wird die Reibungskraft. In diesem Fall kann der Messkopf nur noch mit einer sehr starken Hochdruckpumpe ausgespült werden.
- Durch die Einfachheit, Schnelligkeit und hohe Auflösung der Messung können auch ganze EWS Felder vermessen werden, um nebst dem Gradienten, auch Inhomogenitäten und Schichtverläufe festzustellen.
- Es können für andere Zwecke abgeteufte Erdwärmesonden vor deren Zusammenschluss mitbenutzt werden. Die eingebaute Duplex-EWS fungiert als Bohrverrohrung.

Allerdings bedingte die anspruchsvolle Auslegung einen erheblichen Mehraufwand.

Vor künftigen Einsätzen sind an der Messsonde noch diverse hard- und softwaremässige Verbesserungen anzubringen wie z.B. ein anderer Batterie-Typ zur internen Stromversorgung.

Auch soll eine genaue Kalibrierung in einer zertifizierten Eichstätte durchgeführt werden.

Mit der einwandfrei funktionierenden Sonde kann nun eine ganze Palette von anspruchsvollen Aufgaben angegangen werden:

- Messungen in einem Sondenfeld mit verschiedenen „alten“ Bohrungen (unterschiedliche Standzeiten der Wassersäule) zwecks Bestimmung des thermischen Ausgleichs Bohrlochsonde – Umgebungsgestein.
- Verwendung der Messergebnisse zur Optimierung von Erdwärmesondenanlagen während der Ausführung;
- Aufgrund von Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Cutting-Proben mehrerer Bohrungen in diversen Gesteinsformationen im Labor (soweit möglich auch Porositätsmessungen an trocken gebohrten Cuttings). Bestimmung des vertikalen geothermischen Wärmeflusses;
- Indirekte Bestimmung der in-situ Wärmeleitfähigkeit an Formationen mit schwierig zu messender Wärmeleitfähigkeit (Lockergesteine, Tonsteine, Mergel) aus Wärmefluss und Temperaturgradient;
- Lithologische Gliederung des Bohrprofils anhand der gemessenen geothermischen Parameter;
- Verwendung für die geothermische Forschung (Wärmeflusskarten, Erweiterung des Kataloges von thermischen Eigenschaften der Schweiz);
- Erforschung von Paläoklimaeffekten aus Temperatursignalen im Untergrund;
- Identifizierung von Grundwasserströmungen im Untergrund durch Temperaturanomalien und Druckdaten.

Eine entsprechende Projektfortsetzung ist in Vorbereitung

5 REFERENZ

Medici, L., Rybach, L. (1995): Geothermal Map of Switzerland 1995 (Heat flow density). Matér. Géol. Suisse, Géophys. 30, Schweiz. Geophys. Komm., Zürich

Zürich, den 12. Dezember 2003

Ladislaus Rybach