

**Niedersächsisches  
Landesamt  
für Bodenforschung  
Hannover**

---

**Geowissenschaftliche  
Gemeinschaftsaufgaben**

**Korrekturverfahren  
für  
Temperaturmessungen**

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG  
HANNOVER

Einfache Korrekturverfahren  
für Temperaturmessungen

- Bericht -

Sachbearbeiter:	Dr. R. Schulz, Dipl.-Math. K.-H. Werner, Dipl.-Phys.
Auftraggeber :	Europäische Gemeinschaft EN 3 G - 0011 - D (B)
Berichtsdatum :	19.02.1987
Archiv-Nr. :	99 914
Anlagen :	1

<u>Inhalt</u>	<u>Seite</u>
1 Einleitung . . . . .	3
2 Liste der verwendeten Symbole . . . . .	4
3 Temperaturangleich in Bohrlöchern . . . . .	5
3.1 Bottom Hole Temperatures . . . . .	5
3.2 Mathematische Grundlage . . . . .	6
3.3 Linienquelle . . . . .	6
3.4 Zylinderquelle . . . . .	8
4 Korrekturverfahren . . . . .	10
4.1 Korrekturverfahren für 3 BHT-Werte . . . . .	10
4.2 Korrekturverfahren für 2 BHT-Werte . . . . .	12
4.3 Korrekturverfahren für 1 BHT-Wert . . . . .	14
4.4 Anwendung der Korrekturverfahren . . . . .	15
5 Auslauftemperaturen . . . . .	17
5.1 Mathematische Grundlage . . . . .	17
5.2 Anwendung . . . . .	18
6 Zusammenfassung . . . . .	19
7 Schriften . . . . .	20

## 1 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens

"Geothermische Ressourcen und Reserven: Weiterführung und Verbesserung der Temperaturdatensammlung"

sollen alle Temperaturdaten im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland gespeichert und die Erstellung der Temperaturkarten automatisiert werden. Ein Großteil der vorhandenen Daten stammt aus Messungen im Bohrlochtiefsten (BHT-Messungen), die von ungenügender Datenqualität sind. Bei Messungen vor dem Jahre 1970 fehlen häufig Angaben über Spüldauer und Standzeiten. WOHLBERG (1979) hat deshalb versucht, Temperaturdaten für ein bestimmtes Gebiet, z.B. eine TK 25, zusammenzufassen und aus den Maximalwerten der Temperatur ein Temperaturtiefenprofil zu erstellen. Für eine großräumige Darstellung wie in HAENEL (1980) erscheint das noch ausreichend, obwohl nach bisher vorliegenden Überprüfungen die Temperaturen häufig zu niedrig angesetzt worden sind.

Mittlerweile liegen eine Reihe von Arbeiten zur Korrektur von BHT-Werten vor (s. Schriftenverzeichnis). Dabei werden aber häufig mehrere geothermische Parameter über Spülung und umgebendes Gebirge benötigt, die bei den uns vorliegenden Daten nicht vorhanden sind. Es wird in diesem Bericht deshalb versucht, einfache Korrekturformeln für Daten schlechter Qualität zusammenzustellen, wobei bisher benutzte empirische Korrekturen eine mathematische Grundlage erhalten.

Darüberhinaus wird am Ende des Berichtes auf die Korrektur von Temperaturen von artesisch auslaufenden Brunnen oder Bohrungen eingegangen.

2 Liste der verwendeten Symbole

A	(1/m)	siehe Formel (17)
a	(m)	Bohrlochradius
BHT	(°C)	Bottom Hole Temperature
c	(J/kg K)	spezifische Wärmekapazität
$\delta$		Diracsche Deltafunktion
d	(m)	Bohrlochdurchmesser; $d = 2a$
$\Delta T$	(°C, K)	Temperaturänderung; $\Delta T = T_{\infty} - \text{BHT}$
Ei		Integralexponentialfunktion
h	(m)	Höhe über Bohrlochentiefe
$I_0$		modifizierte Besselfunktion
$\kappa$	(m <sup>2</sup> /s)	Temperaturleitfähigkeit; $\kappa = \lambda / (\rho c)$
$\lambda$	(W/m K)	Wärmeleitfähigkeit
$\Phi$	(W/m)	Wärmemenge einer Linienquelle je Längen- und Zeiteinheit
Q	(J/m)	Wärmemenge einer Linienquelle je Längeneinheit
r	(m)	radialer Abstand von der Bohrlochachse
$\rho$	(kg/m <sup>3</sup> )	spezifisches Gewicht
s	(s)	Zeit des Spülungsumlaufes
T	(°C, K)	Temperatur
$T_E$	(°C)	Auslauftemperatur
$T_O$	(°C)	mittlere Jahres-Temperatur an der Erdoberfläche (z = 0)
$T_m$	(°C)	Temperatur der Spülung am Ende des Bohrens (t = 0)
$T_{\infty}$	(°C)	ungestörte Gebirgstemperatur (t $\rightarrow$ $\infty$ )
t	(s)	Zeit, insbesondere Zeit seit Spülungsstillstand, bzw. Bohrende
W	(m <sup>3</sup> /s)	Auslaufrate
z	(m)	Teufe

Indizes

m	Bohrlochspülung (mud)
r	umgebendes Gebirge (rock)

### 3 Temperaturangleich in Bohrlöchern

#### 3.1 Bottom Hole Temperatures

Durch den Bohrvorgang wird das Temperaturgleichgewicht in einer Bohrung und in ihrer unmittelbaren Umgebung entscheidend gestört. Bohrlochmessungen werden meist im direkten Anschluß an das Bohren - manchmal nach einem Spülungsumlauf - durchgeführt. Dabei wird häufig die maximale Temperatur, die im Bohrlochtiefsten angenommen werden kann (Bottom Hole Temperature, BHT), mitgemessen. Diese Temperatur liegt aber für größere Tiefen erheblich unter der tatsächlichen Temperatur. Allerdings ist im Bohrlochtiefsten die Störung durch den Bohrvorgang am geringsten, so daß der Temperaturangleich an die natürliche Gebirgstemperatur hier am schnellsten zu erwarten ist (KAPPELMEYER & HAENEL 1974).

Sind mehrere BHT-Messungen zeitlich hintereinander in einer Bohrung vorgenommen worden, so kann man bei Kenntnis von Spüldauer und Zeitpunkt der Temperaturmessungen auf die ungestörte Gebirgstemperatur schließen:

$$T_{\infty} = \text{BHT}(t) + \Delta T \quad (1)$$

Der Temperaturangleich wird dabei im wesentlichen durch die Geometrie der Bohrung, durch die Eigenschaften der geologischen Formation, durch die thermische Eigenschaften von Bohrspülung und Formation, gegebenenfalls auch durch Konvektion beeinflusst. Bei der mathematischen Beschreibung wird man zuerst nur einfache Modelle untersuchen; insbesondere werden die Medien als isotrop und homogen angenommen und konvektive Einflüsse ausgeschlossen. Zu beachten ist, daß BHT-Messungen meist nur auf 1 K genau erfolgen.

### 3.2 Mathematische Grundlage

Das zeitliche Temperaturverhalten innerhalb und außerhalb der Bohrung wird durch die Lösung der Wärmeleitungsgleichung (in Zylinderkoordinaten)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2)$$

beschrieben. Die Bohrung wird dabei als ein unendlich ausgehnter Kreiszyylinder mit dem Radius  $r = a$  aufgefaßt. Da die BHT-Messungen in der Regel einige Meter über der tatsächlichen Endteufe durchgeführt werden, kann das Bohrlochende vernachlässigt werden; d.h. man benutzt die sogenannte Vollraumlösung. LUHESHI (1983) hat nachgewiesen, daß bei Messungen in einer Höhe über der Endteufe, die größer als das Zehnfache des Bohrlochradius ist ( $h/a \geq 10$ ), dieser Ansatz zulässig ist.

Die Herleitung der im folgenden benutzten Formeln findet man im wesentlichen bei CARSLAW & JAEGER (1959). Das Bohren und Spülen wird thermisch durch Wärmequellen, bzw. -senken simuliert.

Die Lösungen unterscheiden sich durch die Art der Wärmequellen, durch die Temperatur-Anfangsbedingungen und die thermischen Randbedingungen. Eine Zusammenstellung der unterschiedlichen Ausgangsparameter findet man in Tab. 1.

Als Wärmequellen können Linien- oder Zylinderquellen angenommen werden.

### 3.3 Linienquelle

Der Ort der Linienquelle ist die Bohrlochachse ( $r = 0$ ), d.h. der Radius der Bohrung wird vernachlässigt ( $a \rightarrow 0$ ). Die Quelle, genauer die Senke, habe die Stärke  $-Q$  (freigesetzte

Wärmemenge pro Längeneinheit der Quelle). Bei Ende des Bohrens oder Spülens ( $t = 0$ ) soll diese Wärmemenge schlagartig freigesetzt werden, d.h. in der mathematischen Beschreibung tritt zur Zeit  $t = 0$  eine Singularität auf:

$$T_m = T_\infty - \frac{Q}{\rho c} \delta(r) \quad (3)$$

Die Temperaturänderung für eine solche Explosionswärmequelle wird beschrieben durch Formel 10.3(1) bei CARSLAW & JAEGER (1959)

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi\lambda} \frac{1}{t} \exp\left(-\frac{r^2}{4kt}\right) \quad ; \quad t > 0 \quad (4)$$

In der Mitte der Bohrung ( $r = 0$ ) beträgt demnach die Temperaturänderung

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi\lambda} \frac{1}{t} \quad (5)$$

Diesen Ansatz benutzen LACHENBRUCH & BREWER (1959).

Bei einer kontinuierlichen Linienquelle soll sich am Anfang Gebirgs- und Spülungstemperatur im Gleichgewicht befinden ( $T_m = T_\infty$ ). Nach dem Durchteufen der Meßtiefe wird dem Gebirge durch den Spülungsumlauf kontinuierlich Wärme entzogen. Für eine konstante Linienquelle der Stärke  $-\bar{\Phi}$  (Wärmemenge je Längen- und Zeiteinheit) in der Bohrlochachse gilt nach Formel 10.4(5) bei CARSLAW & JAEGER (1959)

$$\Delta T = -\frac{\bar{\Phi}}{4\pi\lambda} Ei\left(-\frac{r^2}{4ks}\right) \quad (6)$$

mit der Integralexponentialfunktion

$$-Ei(-x) = \int_x^{\infty} \exp(-u)/u \, du$$

Das Ende des Spülungsumlaufes (Dauer  $s$ ) zum Zeitpunkt  $t = 0$  wird durch eine zusätzliche Wärmequelle der Stärke  $+\bar{\Phi}$  simuliert, und man erhält (BULLARD 1947)

$$\Delta T = \frac{\bar{\Phi}}{4\pi\lambda} \left( Ei\left(-\frac{r^2}{4kt}\right) - Ei\left(-\frac{r^2}{4k(s+t)}\right) \right) \quad t > 0 \quad (7)$$

In der Bohrlochmitte ( $r = 0$ ) gilt

$$\Delta T = \frac{\bar{\Phi}}{4\pi\lambda} \ln \frac{s+t}{t} \quad (8)$$

Die Formel (8) kann auch durch Integration von (5) erhalten werden (LACHENBRUCH & BREWER 1959) und ist die Grundlage für den sogenannten "Horner-Plot" (Abschnitt 4.2).

### 3.4 Zylinderquelle

Bei Betrachtung einer Zylinderquelle wird die endliche radiale Ausdehnung des Bohrloches mitberücksichtigt. Als Anfangsbedingung wird angenommen, daß am Ende des Bohrens oder Spülens ( $t = 0$ ) die Spülung in der Meßstufe eine konstante Temperatur  $T_m$  hat, die von der ungestörten Gebirgstemperatur  $T_\infty$  abweicht. Die zeitliche Temperaturänderung in der Stillstandzeit wird durch Formel 10.3(12) bei CARSLAW & JAEGER (1959) beschrieben:

$$\Delta T = \frac{T_\infty - T_m}{2kt} \exp\left(-\frac{r^2}{4kt}\right) \int_0^a \exp\left(-\frac{x^2}{4kt}\right) I_0\left(\frac{rx}{2kt}\right) x \, dx \quad ; \quad t > 0 \quad (9)$$

Die Integration in (9) kann für  $r > 0$  nur numerisch durchgeführt werden. Speziell in der Bohrlochachse ( $r = 0$ ) gilt

$T_{\infty} - 347$

$$\Delta T = (T_{\infty} - T_m) \left(1 - \exp\left(-\frac{a^2}{4\lambda t}\right)\right) \quad (10)$$

LEBLANC et al. (1982) haben diese Formel für ihre Untersuchungen benutzt.

Für kleine Bohrlochradien und große Stillstandzeiten kann man die Exponentialfunktion in (10) entwickeln und erhält in erster Näherung ( $a^2 \ll 4 \lambda t$ )

$$\Delta T = (T_{\infty} - T_m) \frac{a^2 \rho c}{4\lambda t}$$

Mit  $Q = (T_{\infty} - T_m) \pi a^2 \rho c$  entspricht das Ergebnis der Formel (5), bzw. nach Integration der Formel (8).

Bisher wurde vorausgesetzt, daß die Spülung und das Gebirge die gleichen thermischen Parameter haben. Für unterschiedliche Temperaturleitfähigkeiten ( $\kappa_m, \kappa_r$ ) läßt sich die Lösung (9) verallgemeinern; die Formeln sind bei CARSLAW & JAEGER (1959) im Kapitel 13.8 angegeben. SHEN & BECK (1986) haben darüberhinaus noch die Temperaturänderung im Gebirge während des Spülungsumlaufes mitberücksichtigt und den Einfluß von lateraler und radialer Konvektion betrachtet. Alle Lösungen können geschlossen angegeben werden; im wesentlichen sind es Integrale über Besselfunktionen, die aber numerisch ausgewertet werden müssen.

Eine weitere Ergänzung zur Lösung (9) hat MIDDLETON (1982) vorgenommen. Statt einer konstanten nimmt er eine exponentiell abklingende Wärmesenke an, die einer Explosionswärmequelle überlagert ist.

Eine numerische Behandlung des Problems hat LUHESHI (1983) durchgeführt. Hiermit kann insbesondere der Einfluß des endlichen Abstandes  $h$  zum Bohrlochtiefsten untersucht werden.

#### 4 Korrekturverfahren

Mit Hilfe der theoretischen Ansätze für die Temperaturänderungen kann man versuchen, aus den in einer Teufe gemessenen BHT-Werten auf die ungestörte Gebirgstemperatur zu schließen. Je mehr BHT-Werte vorliegen und je besser die Kenntnisse der benutzten thermischen Parameter ist, desto besser ist die Korrektur. Es sollen deshalb der Vollständigkeit halber auch Korrekturverfahren erwähnt werden, die bei BHT-Daten mit schlechter Qualität nicht angewendet werden können.

##### 4.1 Korrekturverfahren für 3 BHT-Werte

Voraussetzung für die folgenden Verfahren sind mindestens 3 verschiedene BHT-Werte, die in einer Teufe zu verschiedenen Zeiten gemessen worden sind. Bei der Anwendung der Verfahren müssen eine Reihe von Parametern bekannt sein.

##### a) Simulationsverfahren

Parameter: Zeit	: t und s
thermisch	: $\kappa_r, \kappa_m, \lambda_r, \lambda_m$
Bohrlochradius:	a
Konvektion	: lateral, radial

##### 1) Finite Elemente Verfahren

Diese Verfahren (LUHESHI 1983) können auf Grund ihres rein numerischen Charakters nahezu alle denkbaren Einflüsse berücksichtigen, u.a. laterale und radiale Flüssigkeitsbewegungen oder inhomogene Formationsparameter. Sie liefern allerdings nur dann sinnvolle Informationen zur Korrektur von Meßdaten, wenn die Eingangsparameter hinreichend genau bekannt sind.

## 2) Analytische Verfahren

Dieses Verfahren (SHEN & BECK 1986) vermeidet die numerischen Probleme, die bei Finite Elemente Verfahren auftreten können, beschränkt sich allerdings auf den homogenen Vollraum. Es berücksichtigt den thermischen Eigenschaftskontrast zwischen Zylinderquelle und Formation und kann auch Konvektionen behandeln. Eine wichtige Eigenschaft besteht in der Möglichkeit, Meßwerte bereits nach kurzen Standzeiten zu korrigieren. Allerdings müssen auch hier die Eingangsparameter hinreichend genau bekannt sein.

### b) Iterative Verfahren

#### 1) Zylindrische Explosionswärmequelle mit Eigenschaftskontrast

Parameter: Zeit :  $t$   
thermisch :  $\kappa_m, \kappa_r$   
Bohrradius:  $a$

Methode: Bestapproximation nach MIDDLETON (1982).  
Diese Lösung erfordert mehrfache numerische Integration über modifizierte Besselfunktionen.

#### 2) Zylindrische Explosionswärmequelle mit Nachzirkulation

Parameter: Zeit :  $t$   
Quelle :  $b$  (Abklingkonstante)  
 $A$  (Anfangsstärke)

Methode: Bestapproximation durch Variation von  $A$ ,  $b$  und  $a^2/\kappa$ . Der reinen Explosionswärmequelle ist eine Quelle mit exponentiell abfallender Charakteristik (MIDDLETON 1982) überlagert, die Nachzirkulationen berücksichtigt.

### 3) Zylindrische Explosionswärmequelle

Parameter: Zeit:  $t$

Methode: Bestapproximation nach (10) durch Variation von  $a^2/\kappa$ . Da das Verfahren rein analytisch ist, ist es auch für die Korrektur größerer Datensätze geeignet. Bei drei und mehr zeitlichen Meßpunkten in einer Teufe ist es als Standardverfahren anzusetzen (LEBLANC et al. 1982).

In Anlage 1 findet sich ein Beispiel für die Anwendung dieses Verfahrens.

#### 4.2 Korrekturen für 2 BHT-Werte

-----

Die folgenden Verfahren setzen mindestens 2 zeitlich verschiedene BHT-Werte in einer Teufe voraus. Sie können als Standardverfahren für BHT-Korrekturen angesehen werden.

##### a) Horner-Plot

Parameter: Zeit:  $t$  und  $s$

Methode : Gemäß Formel (8): Auftragen in einem einfach logarithmischen Maßstab (HORNER 1951, DOWDLE & COBB 1975, FERTL & WICHMANN 1977).

In Anl. 1 wird an einem Beispiel die Ermittlung der ungestörten Temperatur  $T_{\infty}$  gezeigt. In einer Reihe von Fällen bringt bei unbekannter Dauer des Spülungsumlaufes eine Annahme von  $s = 8 - 16h$  brauchbare Ergebnisse, insbesondere wenn  $t$  groß ist.

b) Explosionslinienquelle

Parameter: Zeit:  $t$

Methode : Gemäß Formel (5): Auftragen der BHT-Werte gegen  $1/t$  (LACHENBRUCH & BREWER 1959).

Die Methode liefert gegenüber dem Horner-Plot nur dann genauere Werte, wenn die wahre Zirkulationszeit vernachlässigbar ist. In Anl. 1 wird das Vorgehen an einem Beispiel gezeigt.

c) Zylinderquelle

Parameter: Zeit :  $t$   
Bohrlochradius:  $a$

Annahme : Schätzwert für Temperaturleitfähigkeit  
z.B.  $\kappa = 0.35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (LEBLANC et al. 1982)

Methode : Ausgehend von Formel (1) und (10) ergibt sich

$$T_{\infty} = \text{BHT}(t_1) + (\text{BHT}(t_2) - \text{BHT}(t_1)) \frac{1 - f(t_1)}{f(t_2) - f(t_1)} \quad (11)$$

mit

$$f(t) = \exp(-a^2/4\kappa t)$$

Diese Methode kann als zusätzliches Korrekturverfahren angesehen werden. Wegen der Annahme über die mittlere Temperaturleitfähigkeit  $\kappa$  liefert sie Ergebnisse, die weniger gesichert sind als die der vorhergehenden Verfahren. Die Methode ist aber auch schon für kürzere Standzeiten  $t$  gültig.

#### 4.3 Korrekturverfahren für einen BHT-Wert

-----

Liegt nur ein BHT-Wert aus einer Tiefe vor, so kann man durch eine Reihe von Annahmen auch diesen Wert korrigieren. Bisher wurden diese Werte mit empirisch gewonnenen Kurven, z.B. HAENEL (1975), verbessert. Im Gegensatz dazu wird jetzt der Ansatz für die Zylinderquelle, Gleichung (10), als Grundlage genommen. Die wesentlichste Annahme muß bezüglich der Spülungstemperatur  $T_m$  in der Meßteufe am Ende des Bohrens bzw. Spülens ( $t = 0$ ) gemacht werden. Eine mögliche Schätzung für die Spülungstemperatur ist die Temperatur, die im mittleren Bereich der Bohrung herrscht:

$$T_m = (T_\infty + T_0)/2 \quad (12)$$

##### a) Geschätzte Korrektur mit Zeitangabe

Parameter: Zeit : t  
Bohrlochradius: a

Annahmen : Schätzwert für Temperaturleitfähigkeit  $\kappa$ ,  
z.B.  $\kappa = 0.12 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .  
Schätzwert für Spülungstemperatur  $T_m$   
zum Zeitpunkt  $t = 0$ , z.B. (12)

Methode : Ausgehend von Formel (10):

$$T_\infty = \text{BHT} + (1/f(t) - 1) (\text{BHT} - T_m) \quad (13)$$

mit  $f(t) = \exp(-a^2/4\kappa t)$ .

Für die spezielle Wahl von  $T_m$ , (12),  
folgt

$$T_\infty = \text{BHT} + \frac{1-f(t)}{1+f(t)} (\text{BHT} - T_0) \quad (14)$$

Bei vielen Bohrungen, die vor 1970 niedergebracht worden sind, fehlt leider häufig auch die Angabe über die Stillstandzeit  $t$ . Hier kann man nun versuchen, auch noch  $t$  abzuschätzen. Die Stillstandzeit  $t$  wird wesentlich von der Dauer des Bohrgestängenausbaues abhängen, in zweiter Linie auch von der mittleren Fahrgeschwindigkeit bei der Einfahrt der Meßsonde (meist ca. 3600 m/h). Sieht man von der reinen Wartezeit der Meßfirma ab, ist die Stillstandzeit  $t$  damit von der zeitlichen Endteufe  $z$  der Bohrung abhängig:  $t$  läßt sich in Abhängigkeit von  $z$  durch Vergleich mit ähnlichen Bohrungen abschätzen.

b) Geschätzte Korrektur ohne Zeitangabe

Parameter: Bohrlochradius  $a$

Annahmen : Temperaturleitfähigkeit, z.B.  $\kappa = 0.12 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$   
Spülungstemperatur  $T_m$ , z.B. nach (12)  
Meßzeit  $t$

Methode : Benutzung von (13), bzw. (14)

Natürlich sind die so gewonnenen Temperaturwerte von geringer Qualität, aber sie sind bei kritischer Anwendung der Methode besser als unkorrigierte Werte.

4.4 Anwendung der Korrekturverfahren

Sind drei oder mehr BHT-Werte in einer Teufe gemessen worden, so sollte grundsätzlich das Iterationsverfahren für eine zylindrische Explosionsquelle (4.1 b3) als Standardverfahren angewendet werden. Zusätzlich können der Horner-Plot (4.2a) und der Explosions-Linienquellenansatz (4.2b) angewendet werden. Man sollte aber nur die Werte für große Zeiten zur Auswertung heranziehen, um die Näherungsbedingung für den

Linienquellenansatz zu erfüllen. Im Gegensatz zur Zylinderquelle führt die Approximation sonst zwangsläufig zu zu niedrigen Formationstemperaturen. In Anlage 1 ist ein Beispiel für die Anwendung angegeben.

Bei zwei Meßpunkten sollten sowohl Horner-Plot (4.2a) wie Explosions-Linienquellenansatz (4.2b) benutzt werden. Der Linienquellenansatz eignet sich besonders dann, wenn die Zirkulationszeit vernachlässigbar ist. Als Formationstemperatur kann in der Regel die höhere Temperatur gewählt werden. Bei fehlenden Angaben über die Spülungszeit  $s$  sind Schätzungen von  $s$  zwischen 7 und 16 Stunden durchaus brauchbar.

Liegt nur ein BHT-Wert in einer Teufe mit einer zeitlichen Angabe vor, so ist das Verfahren (4.3a) anzuwenden. Dabei sind die verwendeten Schätzwerte möglichst gut abzusichern. Liegt die Bohrung in einem Gebiet mit einer größeren Menge weiterer Bohrungen, so sollte die Spülungstemperatur  $T_m$  genauso wie die Wärmeleitfähigkeit  $\kappa$  statistisch aus den Messungen ermittelt werden, bei denen das Iterationsverfahren für eine Zylinderquelle (4.1 b3) angewendet werden kann.

Liegen ein oder mehrere BHT-Werte ohne Zeitangabe vor, so soll der erste gemessene BHT-Wert genommen und entsprechend dem Verfahren (4.3b) korrigiert werden. Die Schätzung der Meßzeit sollte ebenfalls durch Vergleich mit ähnlichen Bohrungen statistisch abgesichert werden.

## 5 Auslauftemperaturen

Zur Erstellung von Temperaturtiefenkarten liegen einige Temperaturdaten als Temperaturen von artesisch auslaufenden Brunnen oder Bohrungen vor. Aus diesen Werten kann man versuchen, auf die tatsächliche Temperatur im tiefen Grundwasser zu schließen.

### 5.1 Mathematische Grundlage

RAMEY (1962) berechnete den Temperaturverlauf in einer Bohrung für die Injektion von Wasser. Derselbe Formalismus kann auch für die Extraktion von Wasser benutzt werden. Für die Auslauf-temperatur  $T_E$  an der Erdoberfläche  $z = 0$  gilt dann

$$T_E(t) = T_0 + A (T_0 - T_\infty) (\exp(-z/A) - 1)/z \quad (15)$$

Hieraus ergibt sich für die gesuchte Zulauf-temperatur  $T_\infty$  in der Tiefe  $z$

$$T = T_0 + z (T_E(t) - T_0) / (1 - \exp(-z/A)) / A \quad (16)$$

Für Auslaufzeiten von mehr als einem Monat kann die Größe  $A$  angegeben werden mit (RAMEY 1962)

$$A = \frac{W}{2\pi k} \left( - \ln \frac{a}{2\sqrt{k t}} - 0.290 \right), \quad (17)$$

wobei  $W$  die Auslauf- rate ist. Unter Berücksichtigung der thermischen Parameter für Wasser gilt

$$A = \left( - \ln \frac{a}{\sqrt{t}} - 7.48 \right) \cdot 1.1 \cdot 10^{-6} \frac{s}{m^2} \cdot W \quad (18)$$

## 5.2 Anwendung

Mit den Formeln (16) und (18) läßt sich leicht aus der Auslauf-temperatur die Grundwassertemperatur berechnen. Die entscheidenden Parameter sind dabei die Tiefe  $z$  und die Zuflußrate  $W$ , während sich für verschiedene Bohrlochradien  $a$  und Auslaufzeiten  $t$  die Größe  $A$  nur wenig ändert, z.B. für  $a = 0,09$  m und  $t = 0,5$  Jahre und für  $a = 0,19$  m und  $t = 10$  Jahre nur um den Faktor 2.

Für kleine Tiefen  $z$  und großen Zuflußraten  $W$  läßt sich durch Entwicklung der Exponentialfunktion die Formel (16) in erster Näherung ( $z/A \ll 1$ ) abschätzen zu

$$T_{\infty} = T_0 + (T_E - T_0)(1 + z/2A) \quad (19)$$

Für Bohrlochradien  $a \leq 0,2$  m und Auslaufzeiten  $t \geq 0,5$  Jahre gilt

$$T_{\infty} = T_E$$

mit einer Genauigkeit von 1 %, falls  $z \leq W \cdot 5,5 \cdot 10^4$  s/m<sup>2</sup>.

Die Anwendung der Korrektur soll an einem Beispiel (Bohrung Birnbach T 4) gezeigt werden:

Bohrlochradius:  $a = 0,089$  m (7/2")

Pumpdauer :  $t = 165$  d

Zulauftiefe :  $z = 1303$  m

Auslaufrate :  $W = 14$  l/s

Oberflächentemperatur :  $T_0 = 8,6$  °C

Auslauftemperatur :  $T_E = 62$  °C

Lagerstättentemperatur:  $T = 62,71$ °C gem. (16), (19)

gemessene Temperatur :  $T = 63,45$ °C

6 Zusammenfassung

Um aus Messungen von BHT-Werten auf die tatsächlichen Gebirgstemperaturen schließen zu können, müssen Korrekturverfahren angewendet werden. Neben den bekannten Standardverfahren (Horner-Plot, Linienquelle) bietet sich auch der Exponentialansatz für eine Zylinderquelle an. Mit Hilfe dieses Ansatzes gelingt es, auch Korrekturverfahren für einen BHT-Wert mit oder ohne Zeitangabe zu entwickeln, der ansonsten nicht korrigiert werden kann. Damit konnten bisher benutzte empirische Formeln verbessert werden.

Eine einfache Formel wurde angegeben, um aus der Auslauftemperatur artesischer Bohrungen auf die Grundwassertemperatur zu schließen.

Die mit diesen Verfahren gewonnenen Temperaturwerte können allerdings wegen ihrer Ungenauigkeit nicht für weitergehende geothermische Untersuchungen, z.B. Wärmestromdichtebestimmungen, benutzt werden. Sie sollten nur zur Erstellung von Temperaturkarten und Tiefenprofilen herangezogen werden.

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT  
FÜR BODENFORSCHUNG

Im Auftrag



Prof. Dr. J. Homilius  
Professor u. Direktor

Sachbearbeiter



Dr. R. Schulz  
Wiss. Rat



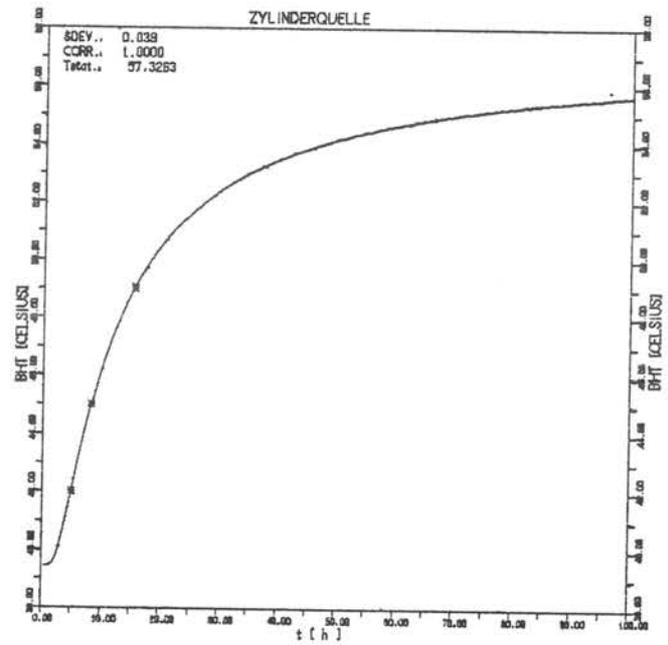
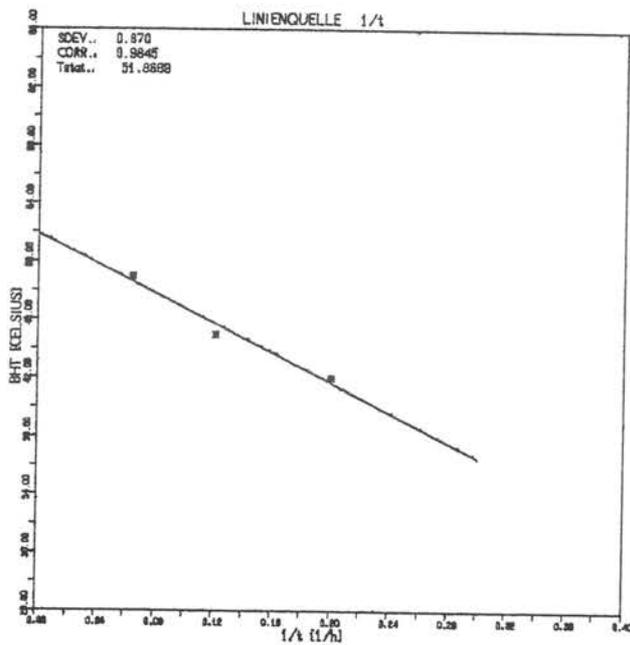
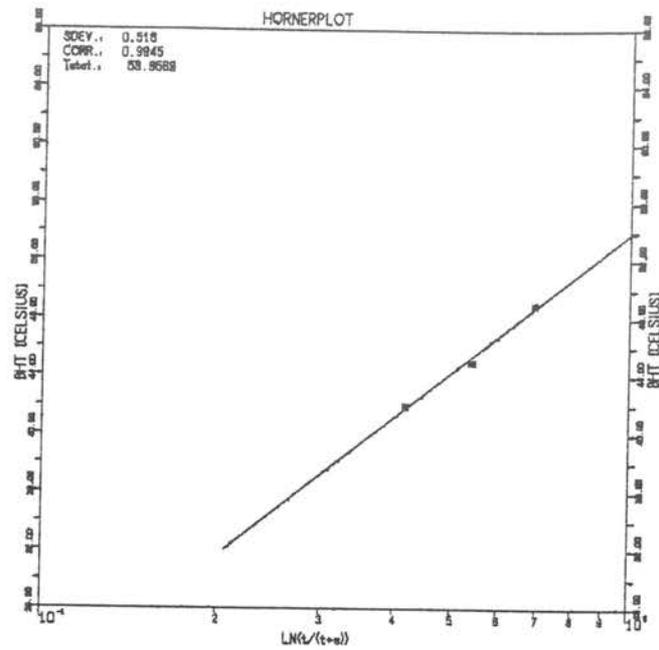
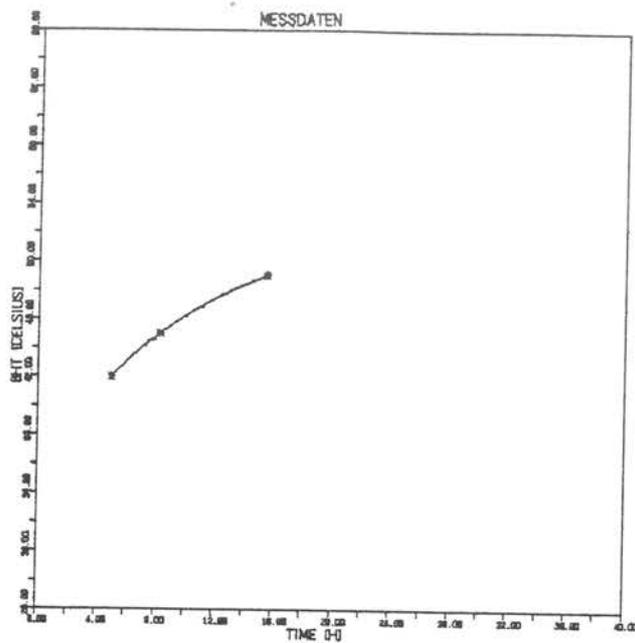
K.H. Werner  
Dipl.-Phys.

7 Schriften

- BULLARD; E. C. (1947): The time necessary for a bore-hole to attain temperature equilibrium. - Mon. Not. R. Soc., 5: 127 - 130.
- CARSLAW, H. S. & JAEGER, J. C. (1959): Conduction of Heat in Solids. - Oxford (Clarendon Press)
- DOWDLE, W.L. & COBB, W.M (1975): Static formation temperature from well logs - An empirical method. - J. of Petr. Techn., 27: 1326-1330.
- FERTL, W.H. & WICHMANN, P.A. (1977): How to determine static BHT from well-log data. - World Oil, 184: 105-108.
- HAENEL, R. (1975): Flächenhafte Darstellung von Temperaturdaten aus dem Untergrund Deutschlands. - NLfB/BGR Archiv-Nr. 66 728; Hannover.
- HAENEL, R. (ed.) (1980): Atlas of Subsurface Temperatures in the European Community. - Hannover (Th. Schäfer).
- HORNER, D. R. (1951): Pressure build-up in wells. - Proc. Third World Petroleum Congress, 34, 316; The Hague.
- KAPPELMEYER, O. & HAENEL, R. (1974): Geothermics with Spezial Reference to Application. - Berlin (Borntraeger).
- LACHENBRUCH, A. H. & BREWER, M. C. (1959): Dissipation of the temperature effect of drilling a well in Arctic Alaska. - Geological Survey Bulletin 1083 - C, 73-109; Washington.

- LEBLANC, Y., LAM, H.-L., PASCOE, L. J. & JONES, F. W. (1982):  
A comparison of two methods of estimating static  
formation temperature from well logs. - Geophys.  
Prosp., 30: 348 - 357.
- LUHESHI, M. N. (1983): Estimation of formation temperature from  
borehole measurements. - Geophys. J.R. astr. Soc.,  
74: 747 - 776.
- MIDDLETON, M.F. (1982): Bottom-hole temperature stabilization  
with continued circulation of drilling mud. -  
Geophysics, 47, 1716-1723.
- RAMEY, H. J. (1962): Wellbore heat transmission. - J. Petrol.  
Technol.: 427 - 435.
- SHEN, P. Y. & BECK, A. E. (1986): Stabilization of bottom hole  
temperature with finite circulation time and  
fluid flow. - Geophys. J.R. astr. Soc., 86:  
63 - 90.
- WOHLENBERG, J. (1979): The subsurface temperature field of the  
Federal Republic of Germany. - Geol. Jb., E 15:  
3 - 29.





Anl. 1: Standard-Korrekturverfahren für BHT-Werte

Beispiel: Bohrung Hebertshausen 1

- |                   |                               |
|-------------------|-------------------------------|
| a) Meßdaten       | maximaler BHT-WERT : 49 °C    |
| b) Horner-Plot    | Formationstemperatur: 54,0 °C |
| c) Linienquelle   | Formationstemperatur: 51,8 °C |
| d) Zylinderquelle | Formationstemperatur: 57,3 °C |

Erratum zum NLFb-Bericht, Archiv-Nr. 99914  
(Einfache Korrekturverfahren für Temperaturmessungen)

Seite 17, letzter Abschnitt, muß lauten:

Für Auslaufzeiten von mehr als einem Monat kann die Größe A angegeben werden mit (RAMEY 1962)

$$A = \frac{W}{2\pi} \frac{S_m C_m}{\lambda_r} \left( - \ln \frac{a}{2\sqrt{\kappa_r t}} - 0.290 \right) \quad (17)$$

wobei W (m<sup>3</sup>/s) die Auslaufrate ist. Unter Berücksichtigung der thermischen Parameter für Wasser und Durchschnittswerten für Gestein ( $\lambda_r = 2.5$  W/mK und  $\kappa_r = 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s) gilt

$$A = 2.67 \cdot 10^5 \cdot W \left( - \ln \frac{a}{2\sqrt{t}} - 7.2 \right) \quad (18)$$

Entsprechend muß auf Seite 18 geändert werden:

..., falls  $z \leq 1.8 \cdot 10^4$  W.

Lagerstättentemperatur: T = 64,2 °C gem. (16), (19)