

Technische Universität Berlin
Institut für Angewandte Geophysik, Petrologie
und Lagerstättenforschung

Ackerstraße 71-76
1000 Berlin 65

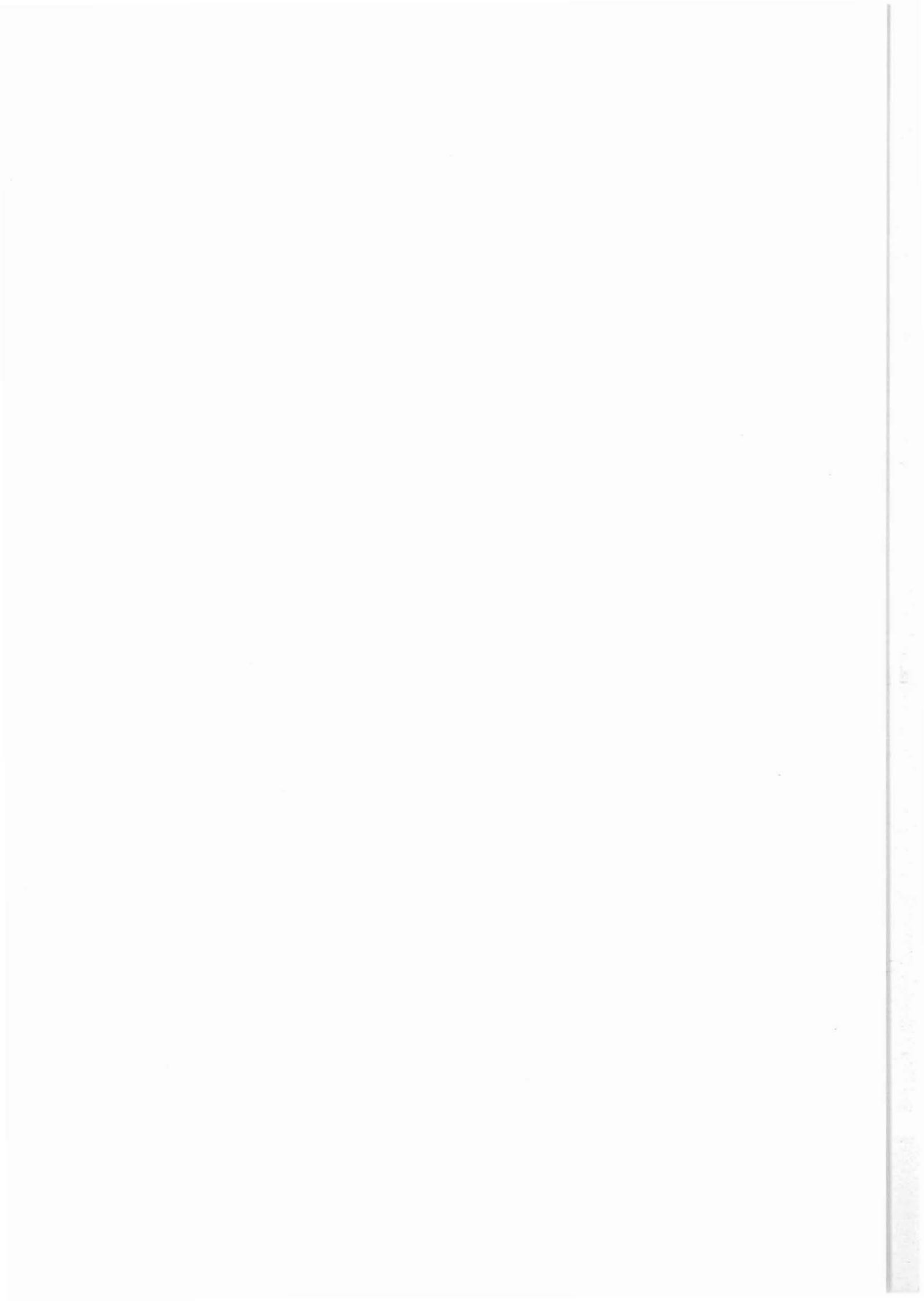
Bohrlochsonde zur in situ Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in größeren Tiefen

H. Burkhardt
K. Erbas
H. Honarmand



Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung.....	309
2. Untersuchung möglicher Verfahren zur in situ Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit.....	309
3. Zylinderquellenmethode.....	311
4. Konzept einer Bohlochsonde nach der Zylinderquellenmethode für einen Einsatz in größeren Tiefen.....	318
4.1 Quellenlänge.....	318
4.2 Energieversorgung der Sonde.....	322
4.3 Isothermie der Quelle.....	322
4.4 Packer.....	331
4.5 Sondenelektronik.....	334
5. Folgerungen und Ausblick.....	338
6. Zusammenfassung.....	339
7. Literaturverzeichnis.....	340



1 EINLEITUNG

Die Wärmeleitfähigkeit (WLF), ein entscheidender Parameter sowohl bei der Bestimmung der terrestrischen Wärmestromdichte als auch für Temperaturprognosen über die erbohrte Tiefe hinaus, ist wie andere Gesteinsparameter eine von Druck und Temperatur abhängige Größe. Labormessungen an Gesteinproben können die tatsächlichen in situ Gesteinseigenschaften nur angenähert wiedergeben.

Für in situ Messungen der WLF wird eine Bohrlochsonde benötigt. Daher wird am Institut für Angewandte Geophysik, Petrologie und Lagerstättenforschung der TU-Berlin an der Entwicklung einer derartigen Bohrlochsonde für Tiefen bis zunächst 3000 m gearbeitet. Da im Rahmen der KTB-Hauptbohrung zu einem späteren Zeitpunkt auch Messungen in größeren Tiefen durchgeführt werden sollen, muß das Konzept des Meßverfahrens aus Zeit- und Kostengründen von vornherein auch für diese Phase ausgelegt sein. Dieser Bericht schildert den derzeitigen Stand dieser Arbeiten.

2 UNTERSUCHUNG MÖGLICHER VERFAHREN ZUR IN SITU BESTIMMUNG DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT

In einem ersten Schritt wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Dabei wurde versucht, den aktuellen Stand der Verfahren zur Bestimmung der WLF zu erfassen. Es zeigte sich recht bald, daß die meisten Laborverfahren für Bohrlochmessungen ungeeignet sind, zum einen aufgrund ihres Meßprinzips (z.B. Divided-Bar-Verfahren, Plattenverfahren), zum anderen aufgrund des hohen apparativen Aufwandes (z.B. Laser-Flash-Methode). Aus diesem Grunde kamen nur noch Verfahren in die engere Wahl, die von den Autoren schon für Bohrlochmessungen vorgesehen waren oder sich eventuell entsprechend modifiziert in einer Bohrung verwenden ließen. Die folgenden Verfahren wurden im folgenden näher untersucht (Burkhardt et al., 1987):

- Zylinderquellenmethode (Villinger, 1983)
Meßprinzip siehe Kapitel 3.
- Oberflächenzylinderheizung (Oelsner et al., 1968)
Hierbei wird in die Oberfläche eines aufpumpbaren Schlauchelements ein Heizdraht flächenhaft einvulkanisiert und diese geheizte Zylinderoberfläche an die Bohrlochwand gedrückt. Die Auswertung der Messung erfolgt durch einen Vergleich mit Modellkurven. Poppendiek et al., 1982 wenden ein ähnliches Verfahren an.
- Kugelquelle (Musmann et al., 1980)
Basiert auf dem Prinzip einer thermischen Kugelquelle

- passive Sonden (Oelsner et al., 1981; Poppendiek et al., 1982)
Diese zeichnen sich durch einen Verzicht auf eine aktive Erwärmung des Gesteinsverbandes aus. Sie nützen das sich in der Sonde einstellende vertikale Temperaturfeld zur Berechnung der Gesteinswärmeleitfähigkeit aus.
- Linienquellenmethode an der Bohrlochwand (Erbas, 1985)
Stellt eine Halbraum(zylinder)quelle dar, deren Meßprinzip auf der Zylinderquellenmethode basiert.
- Begrenzte flächenhafte Heizung an der Bohrlochwandung
Ein erstmalig im Rahmen dieser Arbeit untersuchtes Prinzip, das die Vorteile der Oberflächenheizung und der Linienquellenmethode (relativ große Eindringtiefe bzw. gerichtete Wärmeabgabe) kombinieren soll.

Die näheren Untersuchungen an den o.a. Verfahren zeigten, daß den Vorteilen der ZYLINDERQUELLENMETHODE:

- . keine Kontaktprobleme,
- . erfaßtes Gesteinsvolumen relativ groß;
- . vorliegende Erfahrungen (Auswerteverfahren, technische Vorarbeiten)

hauptsächlich 3 Nachteile entgegen stehen:

- . lange Meßzeiten
- . große Sondenlänge und hoher Energiebedarf (s. Kap. 4.1 bzw. 4.2).
- . Abhängigkeit von der vorhandenen Bohrlochflüssigkeit (s. Kap. 4.3).

Alle Verfahren, die eine kurze Meßzeit aufweisen, können nur ein geringes Gesteinsvolumen erfassen. Umgekehrt werden große Volumina nur durch lange Meßzeiten erfaßt. Diese physikalische Gesetzmäßigkeit muß bei einem im Bohrloch angewandten Verfahren beachtet werden und zu einer vernünftigen Relation (Meßzeit/erfaßtes Volumen) führen. Gerade in einer Bohrung, wo die randnahen Bereiche durch den Bohrvorgang am stärksten gestört sein werden, ist die Erfassung eines möglichst großen Gesteinsvolumens unerläßlich. Daher können die großen Heizzeiten nicht zwangsläufig als nachteilig angesehen werden.

Es zeigte sich weiterhin, daß bei allen anderen Verfahren als bei der Zylinderquellenmethode die Ankopplung an den Gesteinsverband eine herausragende Rolle spielt. Eine Verringerung bzw. Vermeidung des Kontaktwiderstandes ist für die passiven Sonden, die Kugelsonde im Hauptbohrloch, die Oberflächenzylinderheizung sowie die Linienquellenmethode an der Bohrlochwand nur unter Aufdickung der Sonde über die gesamte Sondenlänge möglich. Dies ist technisch sehr aufwendig und bleibt immer mit einem großen Risiko behaftet. Deshalb scheidet die genannten Verfahren unabhängig von weiteren jeweils spezifischen Nachteilen wie:

- . geringe Meßgenauigkeit
- . große Heizzeiten
- . erfaßtes Volumen sehr gering
- . technisch aufwendig

allein aus sicherheitstechnischen Überlegungen aus, obwohl sie den Vorteil der Unabhängigkeit von der Spülung aufweisen.

Für eine begrenzte flächenhafte Heizung an der Bohrlochwand bestanden diese sicherheitstechnischen Bedenken nicht in gleichem Umfang, da die Ankopplung an die Bohrlochwand über eine relativ große Fläche geschehen könnte, ohne die Sonde insgesamt aufdicken zu müssen. Da ein Kontaktwiderstand zwischen Gebirge und Heizfläche weiterhin jedoch nicht ausgeschlossen werden konnte, wurden numerische Berechnungen für dieses Problem durchgeführt.

Es zeigte sich, daß hier noch erhebliche Probleme zu erwarten sind, obwohl eine Auswertung entsprechender Messungen grundsätzlich möglich erscheint. Da auch bei der Realisierung als Bohrlochsonde erhebliche technische Schwierigkeiten zu erwarten sind wurde eine Entscheidung zugunsten der Zylinderquellenmethode getroffen. Diese, auch in Absprache mit der KTB-Projektleitung getroffene Entscheidung zwischen zwei vom Prinzip her recht gleichwertigen Verfahren wurde weiterhin bestimmt durch die bereits vorliegenden Erfahrungen mit dem Zylinderquellen-Konzept. So sind hierbei die Überlegungen zur technischen Realisierung weiter fortgeschritten, während für eine flächenhafte Heizung noch grundlegende Untersuchungen ausstehen. Gleiches gilt für die zur Verfügung stehenden Verfahren zur Interpretation der Messungen (s. Kap. 3 und 4).

Die Konstruktion der Sonde wird somit auf dem Zylinderquellen-Konzept basieren .

3 Zylinderquellenmethode

Die theoretischen Grundlagen der Bestimmung der WLF mit zylindrischen Quellen sind bei mehreren Autoren ausführlich dargestellt (Carshaw & Jaeger (1959, Kap.10.4); De Vries et al. (1957); Von Herzen et al.(1959); Kristiansen (1982) u.a.). Das von Villinger (1983) für in situ Messungen entwickelte Verfahren basiert auf Überlegungen von Blackwell (1954, 1956) und Beck et al.(1956, 1971); es ist für die Messungen in den Bohrungen des KTB vorgesehen worden. Im Folgenden werden die verschiedenen Einflußgrößen ausführlich untersucht und der Rechengang dargestellt.

Die Messungen beruhen auf folgendem Meßprinzip: Die Erwärmung einer zylindrischen Quelle im homogenen isotropen Vollraum ergibt einen Temperaturanstieg $T(t)$, der der Gesteinswärmeleitfähigkeit λ umgekehrt proportional ist. Für lange Heizzeiten gilt näherungsweise:

Gl. 3.1 $T(t) = (Q/4 \pi \lambda) \cdot \ln(t) + \text{konst}, \quad t \rightarrow \infty$

Gleichung 3.1 gilt strenggenommen nur für eine unendlich ausgedehnte Linienquelle, jedoch werden Aufheizkurven zylindrischer Quellen in erster Näherung ebenfalls nach einer aus dieser Gleichung hergeleiteten Formel ausgewertet. Für Zeiten $t < \infty$ und einer konstanten Heizleistung pro Einheitslänge Q , errechnet sich demnach die scheinbare WLF $\lambda_a(t)$ zu:

Gl. 3.2 $\lambda_a(t) = \left(\frac{Q}{4\pi}\right) \left(\frac{\ln(t_2/t_1)}{T(t_2)-T(t_1)}\right), \quad t = t_1 + \left(\frac{t_2-t_1}{2}\right)$

Dies entspricht einer Berechnung der WLF aus der Steigung der für große Zeiten resultierenden Geraden in der halblogarithmischen Darstellung der Aufheizkurve (s. Abb. 3.1).

Für zylindrische Quellen endlichen Durchmessers ist der Fehler zwischen der tatsächlichen Gesteinswärmeleitfähigkeit und der scheinbaren WLF für eine vorgegebene Heizzeit abhängig vom Radius der Quelle (Kristiansen 1982). Aus diesem Grund muß - führt man die Auswertung der Messungen mit Gleichung 3.2 durch - die Heizzeit und damit die Meßzeit dem Quelldurchmesser angepaßt werden (s.u.).

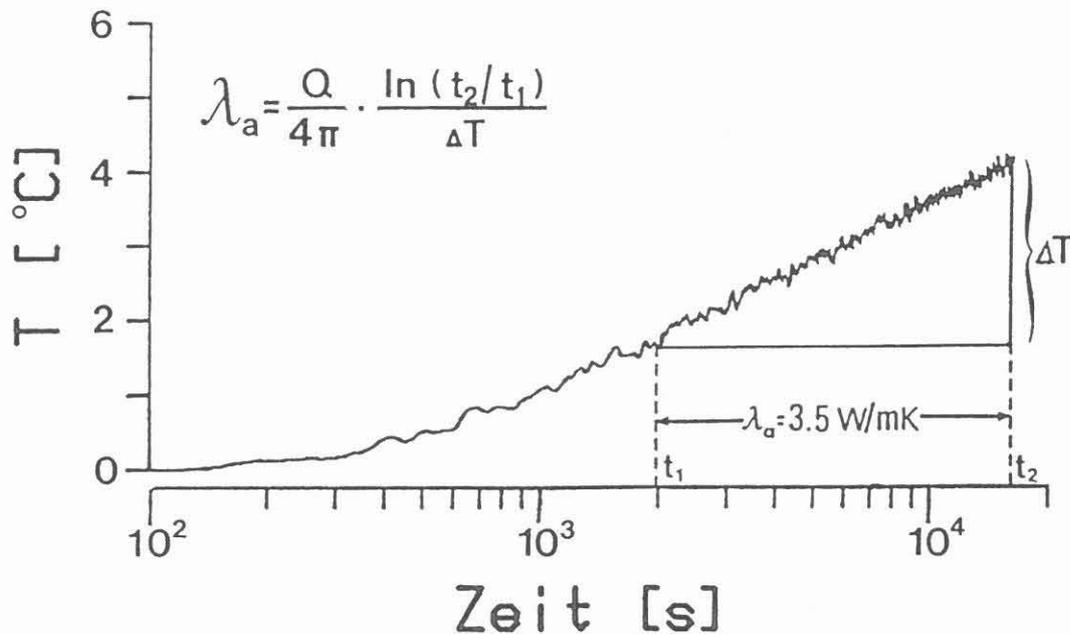


Abb.3.1 : Schematische Darstellung der Auswertung im quasi-linearen Bereich einer Aufheizkurve zylindrischer Quellen, am Beispiel einer Messung im Falkenberger Granitkomplex.

Bohrlochdurchmesser	3 3/4"
Heizleistung/Länge (Q)	50 W/m
Scheinbare Wärmeleitfähigkeit (λ_a)	3.5 W/m K

Die zylindrische Quelle wird realisiert, indem ein Teilbereich der Bohrung abgepackert und somit vom übrigen Bohrloch thermisch isoliert wird (Abb. 3.2). Dieser Teil der Bohrlochwassersäule wird erhitzt und dient damit als Zylinderquelle. Die auf diesem Prinzip basierenden Sonden haben sich beim Einsatz in Tiefen bis 300 m bewährt und sind deshalb in modifizierter Form für den Einsatz in der Tiefbohrung vorgesehen worden. Sie sind grundsätzlich sowohl in unverrohrten als auch in verrohrten Bohrlöchern einsetzbar.

Die Vorteile der Methode liegen insbesondere darin, daß das erfaßte Gesteinsvolumen mit ca. $0,85 \text{ m}^3/\text{m}$ -Sondenzlänge (Heizzeit von 10 Stunden, s.u.) relativ groß ist. Da das Bohrloch mit der in ihm enthaltenen Spülung selbst als Quelle dient, tritt im allgemeinen kein Kontaktwiderstand auf.

Die Nachteile dieser Methode werden hauptsächlich in den langen Meßzeiten, der großen Sondenzlänge sowie der Abhängigkeit von der Bohrlochflüssigkeit gesehen. Die zunächst berechnete Meßdauer von ca. 13 Stunden (Behrens et al., 1984) ist auf die Bestrebungen zurückzuführen, in den quasi-linearen Bereich der Aufheizkurve zu gelangen, um eine Auswertung nach der Gleichung 3.2 durchführen zu können. Die bis dahin angenommene Sondenzlänge von 6,5 m für eine $8\frac{1}{2}$ " Bohrung ergab sich aus einem (nach Blackwell, 1956) geforderten Längen-Durchmesser Verhältnis von 30:1. Diese Größe bestimmt zusätzlich die zum Aufheizen erforderliche Energie bei vorgegebener Temperaturauflösung der Sensoren; bei der bisher abgeschätzten Sondenzlänge ergab sich ein kontinuierlicher Leistungsbedarf von ca. 650 W. Die numerischen Berechnungen (s. Kap. 4.1) zeigen jedoch, daß die Sondenzlänge durchaus verkürzt werden kann, ohne die Genauigkeit der Ergebnisse wesentlich zu beeinträchtigen. Dadurch verringert sich auch der erforderliche Energiebedarf zur Aufheizung der Quelle erheblich, so daß keine grundsätzlichen Schwierigkeiten bei der Energieversorgung der Sonde mehr zu erwarten sind (s. Kap. 4.2).

Konstruktive Schwierigkeiten sind bei diesem Sondentyp insbesondere bei der Realisierung der Packer und der Isothermie der Quelle bei unterschiedlichen Bohrlochflüssigkeiten zu sehen. Hier sind an dem Konzept Modifikationen notwendig, die im Kapitel 4 im einzelnen beschrieben sind.

Im folgenden werden einzelne allgemeine Beurteilungskriterien für die Zylinderquellenmethode ausführlich dargestellt.

Erforderliche Meßzeiten

Behrens et al. (1984) haben anhand von Modellrechnungen die notwendigen Meßzeiten für 2 verschiedene Sondendurchmesser berechnet. Dabei wurde vorgegeben, daß der relative Fehler der nach Gl. 3.2 berechneten scheinbaren WLF unter 5 % liegen soll. In der für eine 8" Sonde berechneten Meßzeit von 46000 s (ca. 13h) ist ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor enthalten; er soll gewährleisten, daß auch bei ungünstigem Signal/Rausch-Verhältnis in den Meßwerten eine Auswertung möglich ist.

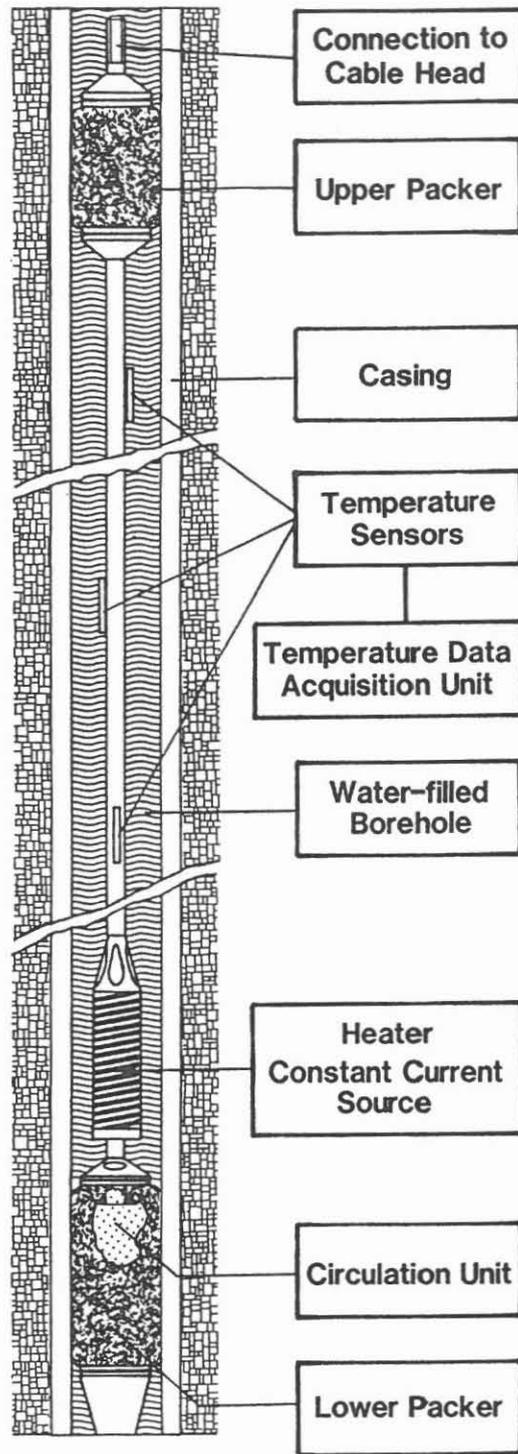


Abb.3.2 : Schematischer Aufbau einer WLF-Sonde nach der Zylinderquellenmethode.

Im Rahmen der laufenden Untersuchungen wurden mit dem gleichen Programm (Villinger, 1983, 1985) weitere Modellrechnungen durchgeführt, mit denen insbesondere der Einfluß der Wärmekapazität der Quelle abgeschätzt wurde (s. Tab. 3.1). Auch bei diesen Berechnungen ergaben sich ähnliche Werte; die Meßzeiten betragen zwischen 7.5 h und 16 h, je nach angenommener Bohrlochflüssigkeit bzw. Gesteinswärmeleitfähigkeit (2,5 W/m K bis 3,5 W/m K). Hohe Wärmekapazitäten der Quelle wirken sich dabei günstig, niedrige Gesteinswärmeleitfähigkeiten ungünstig auf die Länge der Meßzeit aus. Da bei diesen Berechnungen jeweils die Näherungsformel (Gl. 3.2) zur Berechnung der scheinbaren WLF benutzt wurde, verbesserte Auswerteverfahren aber durchaus möglich sind (Erbas, 1985), wird bei den weiteren Abschätzungen mit einer durchschnittlichen Heizzeit von 10 bis 13 Stunden gearbeitet.

Einfluß der Wärmekapazität der Quelle

Da Wasser die höchste Wärmekapazität aller innerhalb des abgepackten Bereiches zu erwartenden Materialien hat, ist für die Bohrlochspülung mit einer geringeren Wärmekapazität als der von Wasser zu rechnen. Dies bedeutet, daß sich der Fehler bei der Berechnung der scheinbaren WLF nach der Näherungsformel (Gl. 3.2) für gleiche Heizzeiten vergrößert (s. Tab. 3.1). Bei Vorgabe eines maximal zulässigen Fehlers müßten deshalb die Meßzeiten verlängert werden. Dieser Nachteil kann jedoch durch ein verbessertes Auswerteverfahren, mit dem bisher sehr gute Ergebnisse bei der Auswertung von Halbraum-Linienquellen-Messungen gemacht wurden (Erbas, 1985), wieder ausgeglichen werden.

Berechnungen des erfaßten Gesteinsvolumens, Eindringtiefe

Kristiansen (1982) gibt eine Formel an, nach der der radiale Abstand r berechnet werden kann, in dem ein bestimmter Anteil der Gesamtheizenergie einer Zylinderquelle enthalten ist. Für den Fall, daß 90% der abgegebenen Energie im Volumen mit dem Radius r enthalten sein soll, ergibt sich bei einer Heizzeit von 10 Stunden:

$$r = \sqrt{4 \cdot \theta \cdot t \cdot 1,28} = 0,43 \text{ m}$$

$$\begin{array}{ll} \text{mit: Meßdauer} & t = 36000 \text{ s (10 h)} \\ \text{Temperaturleitfähigkeit } \theta & = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s} \end{array}$$

Dies entspricht einem erfaßten Gesteinsvolumen V von:

$$\begin{array}{l} V = 0,79 \text{ m}^3 \text{ pro Meter Sondenlänge (6"-Bohrung) bzw.} \\ V = 0,87 \text{ m}^3 \text{ pro Meter Sondenlänge (8 1/2"-Bohrung).} \end{array}$$

Bei einer angenommenen Sondenlänge von 4 Metern (Kap. 4.1) für eine 8½" Bohrung, ergibt sich damit ein erfaßtes Gesteinsvolumen von 3,5 m³.

Quelle		$g \cdot c$ $10^6 [J/m^3 K]$	WLF (Gestein) [W/m K]	Heizzeit für Fehler < 5% [h]	T_{max} (Quelle) [°C]
\varnothing [Zoll]	Material				
8"	Wasser	4,175	3,5	7,5	7,86
8"	Spülung1	3,082	3,5	10	7,99
8,5"	Wasser	4,175	3,5	7,5	7,58
8,5"	Spülung1	3,082	3,5	12	7,71
8,5"	Spülung2	3,698	3,5	9	7,63
8,5"	Spülung3	4,675	2,5	10	9,39
8,5"	Wasser	4,175	2,5	11	9,49
8,5"	Spülung1	3,082	2,5	16	9,73
8,5"	Spülung4	3,649	2,5	13	9,61
11,5"	Spülung4	3,649	2,5	23	7,72

Tab. 3.1 Einfluß der Wärmekapazität auf die notwendige Heizzeit, bei Vorgabe eines maximalen relativen Fehlers von 5% für die nach Glg.3.2 berechneten scheinbaren Wärmeleitfähigkeiten. Die Berechnungen wurden mit dem Programm TFELD (Villinger, 1983) für verschiedene Spülungsparameter (g , c) und Gesteinswärmeleitfähigkeiten durchgeführt.

Einfluß von Randausbrüchen

Randausbrüche ergeben eine Vergrößerung des von Spülflüssigkeit ausgefüllten Volumens. Der Effekt wird deshalb ähnliche Auswirkungen haben wie eine Vergrößerung des Bohrlochdurchmessers. Die Volumenvergrößerung zwischen einer 8½"- und einer 9½"-Bohrung beträgt 0,0091 m³ pro m Sondenlänge.

Nach 13 Stunden Meßdauer liegt der Unterschied in der für diese Durchmesser berechneten scheinbaren WLF bei $\approx 0,1$ W/m K bei einer angenommenen WLF des Gesteins von 2,0 W/m K. Damit würde ein zusätzlicher Fehler von 5% entstehen.

Dies stellt sicherlich eine extreme Abschätzung dar, da Kalibermessungen vorliegen und zusätzliche nicht erkannte Volumenvergrößerungen um 36 Liter (bei 4m Sondenlänge) durch Randausbrüche wahrscheinlich nicht zu erwarten sind.

Die Fehler in der Auswertung könnten jedoch auch durch die Berücksichtigung eines korrigierten Durchmessers (Kalibermessung) reduziert werden. Außerdem werden WLF-Messungen zudem nicht in extrem gestörten Zonen durchgeführt.

Abschätzungen des Verhältnisses Energie im Gestein zur Energie in der Quelle

Um eine Vorstellung von der Effektivität der Zylinderquellenmethode bei den zu erwartenden Bohrlochdurchmessern zu erhalten, wurde versucht, das Verhältnis zwischen ins Gestein abgegebener und in der Quelle verbleibender Heizenergie zu berechnen. Dazu wurde für folgende Parameter das Temperaturfeld einer zylindrischen Quelle in radialer Richtung berechnet:

Radius	:	0,108 m (8½" Bohrung)
WLF-Gestein	:	2,5 W/m K
WLF-Quelle	:	200 W/m K
$\rho \cdot c$ (Spülung)	:	$3,649 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ K}$
$\rho \cdot c$ (Gestein)	:	$2,3 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ K}$
Q(Qelle)	:	100 W/m

Durch Integration über einzelne Volumenelemente mit den jeweiligen Temperaturen wurde der Energieinhalt q (Gestein) im Gesteinsverband berechnet, der Energieinhalt der Quelle q (Spülung) errechnet sich aus einem Temperaturanstieg der Quelle von $\approx 9^\circ\text{C}$. Für eine Heizdauer von 82.000 s ergaben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} q(\text{Gestein}) &= 6,63 \times 10^6 \text{ Ws/m} \\ q(\text{Spülung}) &= \frac{1,20 \times 10^6}{7,8 \times 10^6} \text{ Ws/m} \end{aligned}$$

Ein Vergleich mit der insgesamt eingespeisten Energie ($8,2 \times 10^6 \text{ Ws/m}$) zeigt die Güte der berechneten Energieabschätzung. Es ergibt sich ein Verhältnis von ca. 5:1 der Energie im Gestein zur Energie innerhalb der Quelle.

Einfluß von Spülungsverlust während der Meßzeit

Da aus bohrtechnischen Gründen der Spülungsdruck in der Kontinentalen Tiefbohrung voraussichtlich größer als der maximale Porenwasserdruck des durchbohrten Gebirges gehalten wird, ist mit einem Spülungsverlust in den Gesteinsverband zu rechnen. Kessels (1987) führte Modellrechnungen durch, um die Eindringtiefen der Spülung sowie den Druckaufbau im Gebirge zu untersuchen. Auf der Grundlage dieser ersten quantitativen Berechnungen wurde für die ersten 6 Tage nach Aufbau des Differenzdruckes ein maximaler Spülungsverlust zwischen 0,4 - 0,5 Liter pro Meter Bohrstrecke innerhalb eines Zeitfensters von 13 h (voraussichtliche max. Meßdauer) errechnet. Dies stellt einen Maximalwert dar, da sich mit wachsender Zeit der Verlust an Spülflüssigkeit verringern wird. Zusätzlich ist das Verhalten der für die Tiefbohrung in Frage kommenden thixotropen Spülflüssigkeit in der Gesteinsmatrix bisher nicht bekannt. Es wird zum Beispiel diskutiert, inwieweit sie das Gebirge zum

Bohrloch hin abdichten könnte. Der Einfluß des Spülungsverlustes auf die in situ Wärmeleitfähigkeitsmessungen ist deshalb als sehr gering einzustufen, zumal diese Messungen erst zu einem späten Zeitpunkt nach Bohrende durchgeführt werden sollen. Weiterhin ist eine Berücksichtigung in der Auswertung ist mit Hilfe numerischer Modellrechnungsverfahren denkbar; dies soll untersucht werden, sobald konkrete Werte für Parameter wie Porosität, Permabilität etc. aus der Vorbohrung vorliegen.

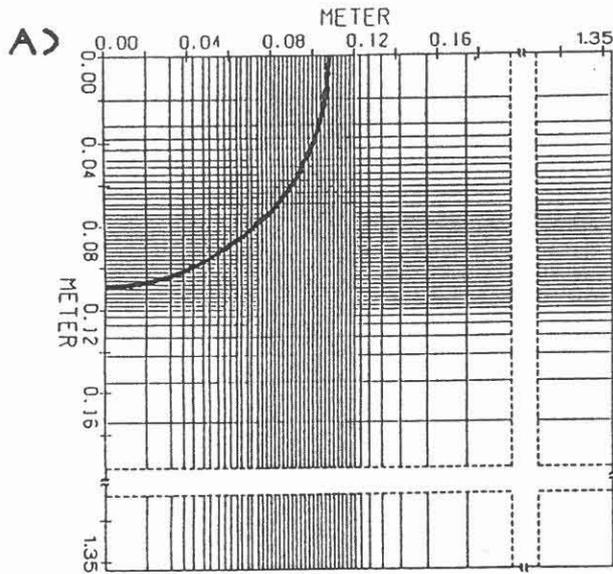
4 Konzept einer Bohrlochsonde nach der Zylinderquellenmethode für einen Einsatz in größeren Tiefen

Für den Einsatz der WLF-Sonde in großen Tiefen müssen aufgrund der zu erwartenden Extrembedingungen (Druck, Temperatur) die Leistungsgrenzen der bisher eingesetzten Sonden (Villinger, 1983) erheblich gesteigert werden. Zu diesem Zweck ist eine Optimierung der verschiedenen Sondenparameter notwendig, die im folgenden beschrieben werden.

4.1 Quellenlänge

Die Sondenlänge ist ein Parameter, der die Einsatzmöglichkeit der Zylinderquellenmethode wesentlich beeinflusst. Zum einen hängt die benötigte Heizleistung direkt von diesem Parameter ab, zum anderen wird die Sicherheit des Einsatzes der Sonde in einer Tiefbohrung mit von diesem Parameter bestimmt. Aus diesen Gründen ist es notwendig, die minimal erforderlichen Längen einer zylindrischen Quelle in Abhängigkeit des Bohrl Lochdurchmessers zu untersuchen, um die Quellenlänge möglichst gering zu halten. Für die erforderlichen numerischen Berechnungen wurde ein 3D-FD Programm (Programmpaket SHEMAT, Clauser, 1988), benutzt, welches auf der CRAY X-MP des WRB (Wissenschaftliches Rechenzentrum Berlin) installiert war.

In einem ersten Schritt wurde eine 2-dimensionale zylindrische Quelle modelliert und das Ergebnis mit dem Ergebnis einer semi-analytischen Berechnung mit dem Programm TFELD (Villinger, 1983, 1985) verglichen. Die Abb. 4.1 zeigt die sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse, jedoch auch die feine Diskretisierung, die notwendig war, um dieses Ergebnis zu erreichen. Im nächsten Schritt wurde mit dieser horizontalen Diskretisierung das in Abb. 4.2 dargestellte 3-dimensionale Modell (durch thermisch isolierende Packer abgesperrter Bohrlochabschnitt im Gesteinsverband) erstellt. Die Schichtdicken wurden einheitlich mit 1 m festgelegt, die Länge des beheizten Teils des Bohrlochs betrug 10 m. Der Vergleich der numerischen Ergebnisse mit denen der semi-analytischen Berechnungen zeigte erst bei Zeiten > 25 h eine geringfügige Diskrepanz in den Werten der scheinbaren WLF.



FINITE-DIFFERENZEN GITTER

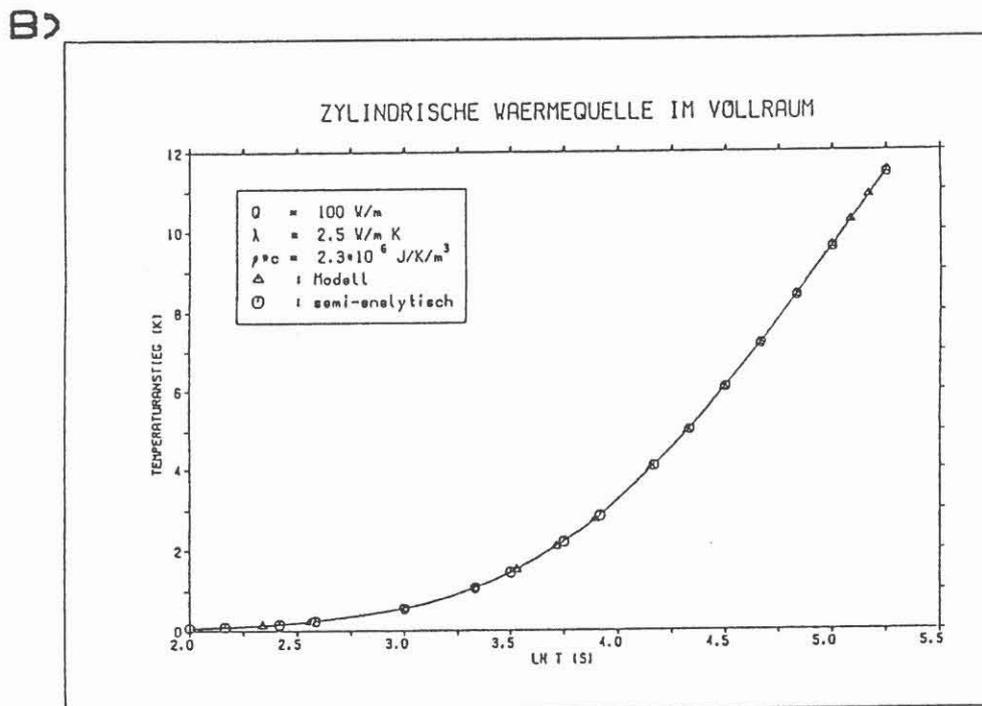


Abb.4.1 : A) 2-dimensionales Gitter zur FD Modellierung einer zylindrischen Quelle. Aus Symmetriegründen braucht nur ein Viertel des Umfanges modelliert zu werden. B) Vergleich der 2-dimensionalen Berechnungen für eine zylindrische Quelle mit dem Ergebnis eines semianalytischen Verfahrens.

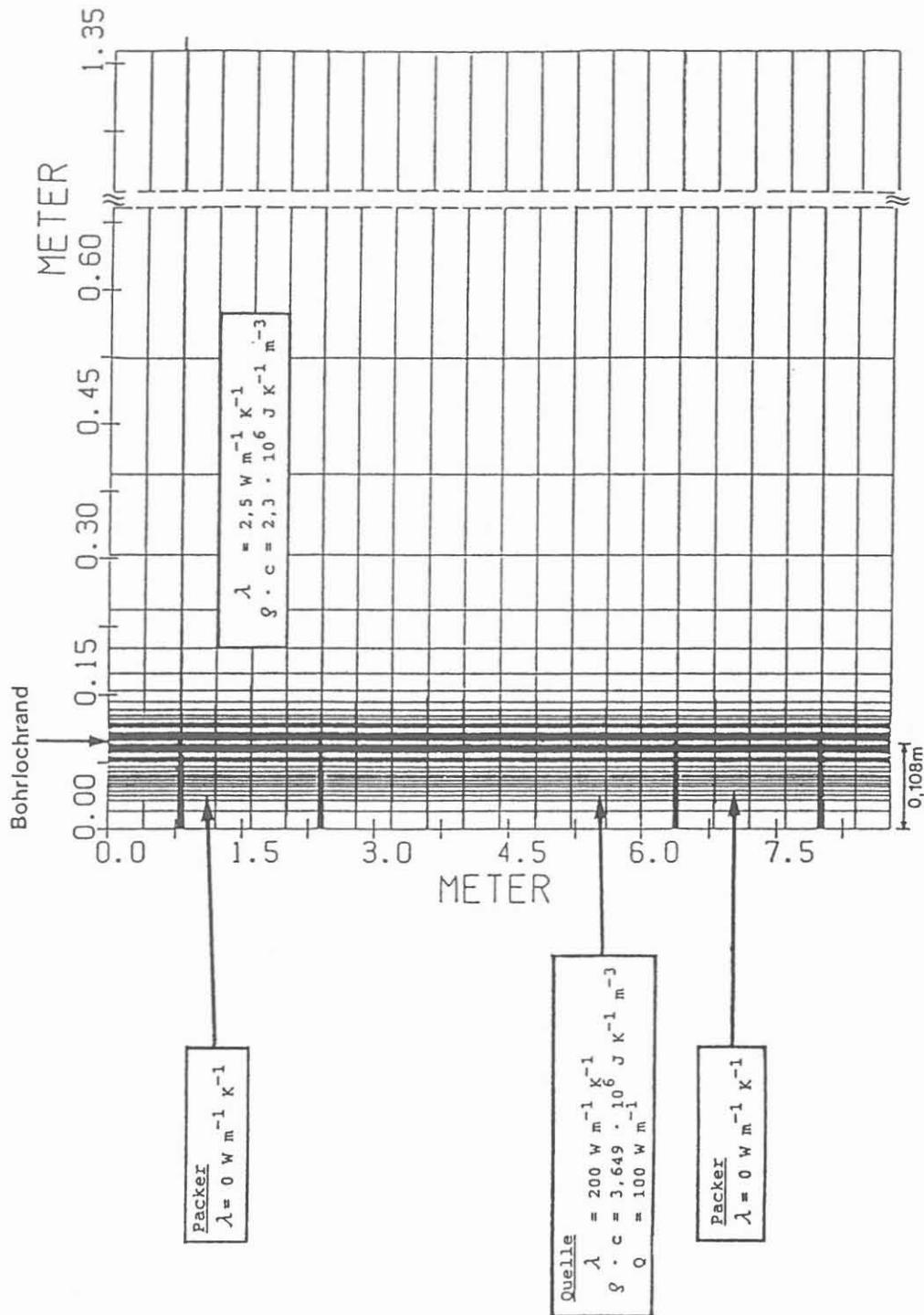


Abb.4.2 : 3-dimensionales Modell eines durch thermisch isolierende Packer abgesperrten Bohrlochabschnittes im Gesteinsverband. Darstellung des für die FD-Berechnungen verwendeten vertikalen Gitters und der verwendeten Parameter. Die horizontale Diskretisierung entspricht dem in Abb.4.1 dargestellten Modell. Die Schwärzung im Gitter ist auf den Abbildungsmaßstab zurückzuführen, (s. Abb. 4.1) der das sehr feine Gitter nicht mehr auflöst.

Damit waren die Grundlagen zur Modellierung einer endlichen Quelle geschaffen. Das Ergebnis einer sukzessiven Verringerung der Quellenlänge ist in Abb. 4.3 dargestellt. Auch bei einer 4 m langen Quelle (Durchmesser 8½") sind geringfügige Abweichungen im Verlauf der Kurve der scheinbaren WLF von der semi-analytischen Lösung für die unendlich lange Zylinderquelle erst nach ca. 15 h auszumachen. Nach einer Meßzeit von 13 h ist der Fehler bei der Berechnung der WLF aus dem Temperaturanstieg auch bei der 4 m langen Quelle <5% (7,5% bei der 3 m langen Quelle). Aufgrund dieser Ergebnisse kann für die 8½" Bohrung eine Quellenlänge von 4 m und für die 6" Vorbohrung von 3 m festgelegt werden, ohne die Genauigkeit der Ergebnisse einzuschränken.

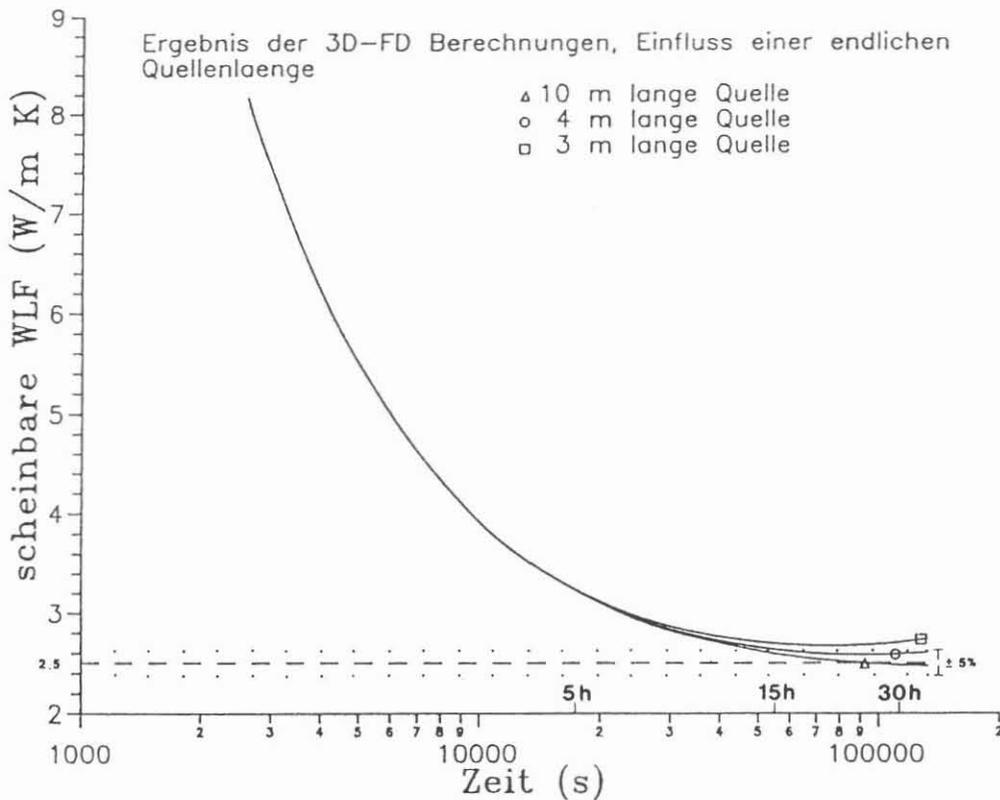


Abb.4.3 : Ergebnis der 3-dimensionalen FD Berechnungen für verschiedene Quellenlängen. Die zugrundeliegende Diskretisierung sowie die Modellparameter sind in Abb.4.2 dargestellt. Das Ergebnis zeigt, daß die Aufheizkurve einer 4 m langen Quelle durchaus mit der für Linienquellen und große Zeiten gültigen Formel ausgewertet werden kann. Der relative Fehler der scheinbaren Wärmeleitfähigkeit liegt ab ca. 12 h unter 5%.
Angenommene Gesteins-WLF 2.5 W/m K.

Damit konnten zum ersten Mal quantitative Ergebnisse über den Einfluß einer in Länge und Durchmesser endlichen zylindrischen Quelle auf die Bestimmung der WLF aus der Aufheizkurve gewonnen und die Quellenlänge über die bisherigen Abschätzungen (6.5 m) hinaus wesentlich verkürzt werden. Die Reduzierung der Quellenlänge auf 4 m (d.h. um 38%) vergrößert den bei der Auswertung gemachten Fehler nur unwesentlich, bringt gleichzeitig jedoch eine Energieersparnis von 38% mit sich, die, würde man sie nicht im vollen Umfang ausschöpfen, Spielraum zur Verbesserung des Signal-/Rausch-verhältnisses der Messungen bieten könnte.

4.2 Energieversorgung der Sonde

Das Energieversorgungskonzept der WLF-Sonde ist in der Abb.4.4 dargestellt. Den größten Teil der zur Verfügung zu stellenden Energie beansprucht die Heizung. Sämtliche Berechnungen wurden für ein 15 km langes 7-adriges Bohrloch-Meßkabel bei einer an der Sonde vorliegenden Leistungsaufnahme von 600 W durchgeführt. Für diesen Fall werden 4 Adern sowie die Armierung des Kabels zur Energieübertragung benötigt.

Die Leistungsaufnahme der Elektronikeinheit (s. Kap. 4.5), des Pumpenmotors (s. Kap. 4.3) und des Packermotors (s. Kap. 4.4) sind demgegenüber deutlich geringer. Da die Quellenlänge voraussichtlich max. 4 m betragen wird und ein minimaler Bedarf von 100 W/m besteht, ist die Energieversorgung der Sonde auch für große Einsatz Tiefen gesichert.

4.3 Isothermie der Quelle

Von der Theorie her wird eine perfekt leitende Quelle vorausgesetzt. "Perfekter Leiter" bedeutet physikalisch, daß innerhalb der Quelle keine Temperaturgradienten entstehen, d.h. zu jedem Zeitpunkt herrscht überall die gleiche Temperatur. Villinger (1983) versuchte dies bei Sonden mit einem maximalen Durchmesser von 4" mit der Erzeugung eines lokal sehr starken Temperaturgradienten am unteren Ende der Sonde und einer dadurch erzwungenen Konvektion in der Flüssigkeitssäule (Wasser) zu erreichen.

Die neu geplanten Sonden sollen für Bohrungen mit minimal 6" Durchmesser einsetzbar sein. Auch unterscheiden sich die für die Bohrung zu erwartenden Viskositäten und andere physikalische Parameter der Spülflüssigkeit erheblich von denen des Wassers. Daher mußte überprüft werden, ob bei diesen Bohrdurchmessern (6" und 8½") und Spülflüssigkeiten eine ausreichende Durchmischung der Quelle mit und ohne zusätzliche Hilfsvorrichtungen (Pumpen) überhaupt möglich ist. Eine ausreichende Durchmischung ist dann gegeben, wenn die zeitliche

Temperaturverzögerung t_v zwischen dem wärmsten und kältesten Bereich innerhalb der Flüssigkeitssäule gegenüber der Meßzeit vernachlässigbar klein ist (vergl. Abb. 4.7).

Für diese Untersuchungen und zum Test der Einzelkomponenten der Sonde unter unterschiedlichen Bedingungen wurde ein spezieller Meßaufbau errichtet (Abb. 4.5). Die Anlage besteht im wesentlichen aus einem Doppelrohr. Das innere Rohr (5½") stellt die Bohrung dar, während der Ringraum mit 13,8 cm Weite zwischen den Rohren den Gesteinsverband simuliert. Die Rohre sind aus Plexiglas, damit die Vorgänge von außen beobachtet werden können. Der Ringraum wird mit Wasser gefüllt und ständig zirkuliert, damit isotherme Verhältnisse ($\approx 13^\circ\text{C}$) in diesem Bereich gegeben sind. In einem späteren Ausbau soll dieser Wasserkreislauf über eine Kühlanlage geleitet werden. Mit zeitlich gesteuerter Kühlung des zirkulierenden Wassers können hierdurch unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten im Außenraum simuliert werden.

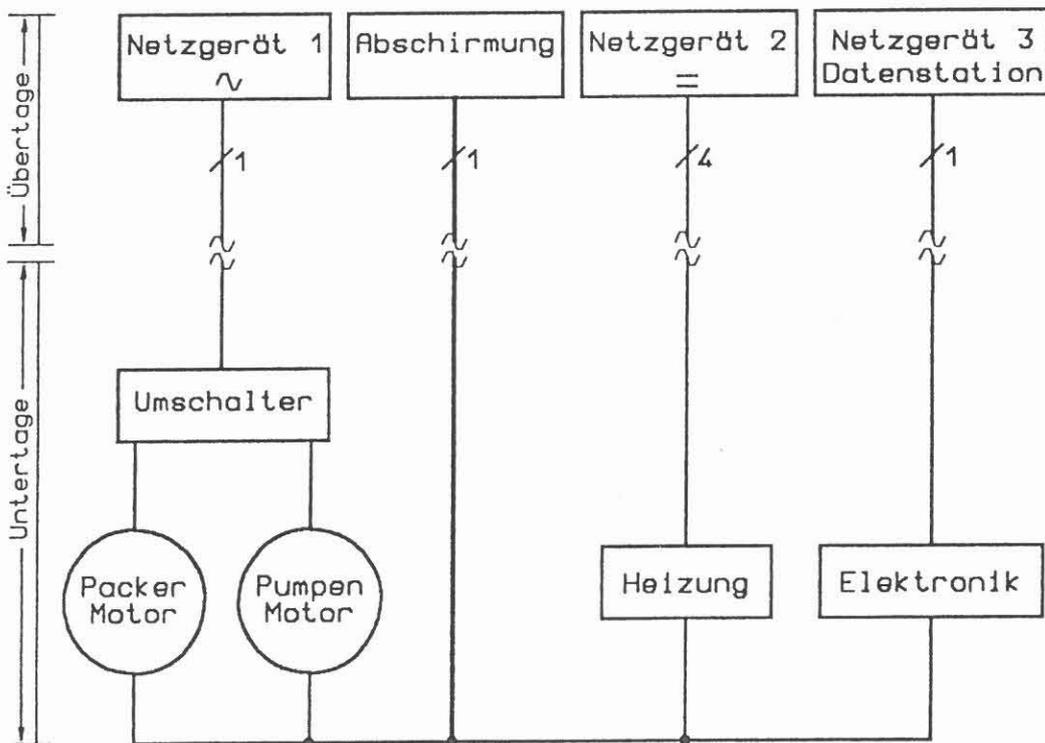


Abb.4.4 : Konzept der Energieversorgung der Sonde. Das Bohrlochmesskabel ist siebenadrig (eine Leitung ist als Reserve vorgesehen).

⎧ 4 Anzahl der Leitungen

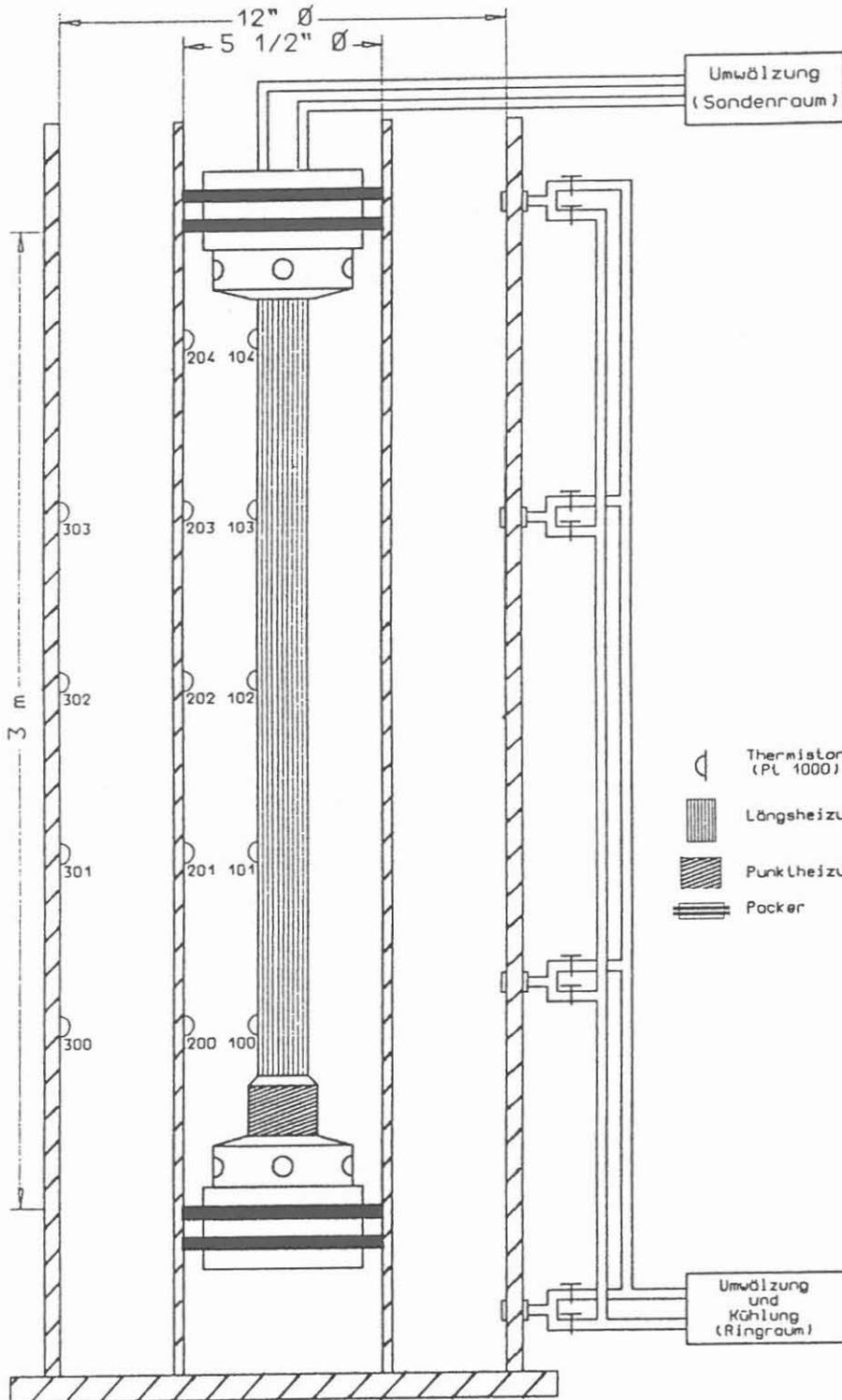


Abb.4.5 : Aufbau der Versuchsanlage zur Simulation des Bohrloches und des angrenzenden Gesteinsverbandes.

Im inneren Rohr ist eine Wärmeleitfähigkeitssonde (Quellenlänge 3 m) positioniert. Sie ist mit 2 Reibungspackern bestückt und verfügt über eine am unteren Ende der Sonde angebrachte Heizung (Punktheizung) sowie einen über die Länge verteilten Heizdraht (Längsheizung). Diese beiden Heizungsarten wurden jeweils alternativ eingesetzt, wobei die Heizleistung stets 300 Watt betrug. Ebenso alternativ ist eine Pumpe zur Durchmischung der eingeschlossenen Flüssigkeitssäule eingesetzt worden. Als Spülung wurden folgende Mittel verwendet:

Leitungswasser
Wasser-Antisol 3000-Gemisch (Fa. Wolff Walsrode AG)
Dehydril HT (Fa. Henkel KGaA)

Die Ergebnisse der umfangreichen Messungen werden im folgenden diskutiert.

Bohrlochspülung: Wasser

Abbildung 4.6A zeigt das Beispiel einer Messung mit der Punktheizung ohne zusätzliche Umwälzung. Die Streuung der Temperaturdaten deutet auf die bereits erwähnte thermisch erzwungene Konvektion hin. Sie vermag jedoch nicht eine Isothermie der Wassersäule zu bewirken. Bei gleichen Zeiten unterscheiden sich die Temperaturen erheblich voneinander und die Zeit, in der der oberste Thermistor den Wert des untersten Thermistors erreicht (zeitliche Temperaturverzögerung t_v) steigt schnell an. Große Temperaturdifferenzen in der Wassersäule und eine große, anwachsende zeitliche Temperaturverzögerung sind auch bei der Längsheizung (Abb. 4.6B) zu registrieren.

Bei dem Einsatz der Umwälzpumpe mit einer Förderrate ≈ 12 l/min und somit der Erzeugung einer zusätzlichen Konvektion zeigt sich (Abb. 4.7), daß die vertikale Temperaturdifferenz ($\approx 0.5^\circ\text{C}$) ebenso wie die zeitliche Temperaturverzögerung (≈ 10 min) deutlich verkleinert werden können. Verglichen mit den Messzeiten von 10 Stunden kann somit von ausreichender Annäherung an die Isothermie der Quelle ausgegangen werden. Durch Optimierung der Lokation der Pumpe und deren Ein- und Auslauföffnungen sind weitere Verbesserungen zu erwarten.

Der Einsatz einer Pumpe zur Durchmischung der Flüssigkeitssäule könnte speziell bei höheren Viskositäten dazu führen, daß sich im Meßraum Zonen ausbilden, in denen ein Spülsaustausch bevorzugt stattfindet, während andere Bereiche von der Konvektion ausgeschlossen werden. Dies wäre im einfachsten Fall bei laminarer Strömung vorstellbar: die Flüssigkeit haftet am Rand und strömt in der Mitte am schnellsten. In Rohren findet ein Umschlag zwischen laminarer und turbulenter Strömung bei einer Reynolds-Zahl (Re) von ca. 1000-2000 statt. Re wird sich bei unseren Messungen wegen der geringen Strömungsgeschwindigkeit auf jeden Fall unterhalb 1000 bewegen. Das bedeutet, daß wir immer im laminaren Bereich arbeiten. Dies ließ die Vermutung aufkommen, daß Randbereiche der Bohrung von der Konvektion ausgeschlossen werden. In diesen Gebieten erfolgt

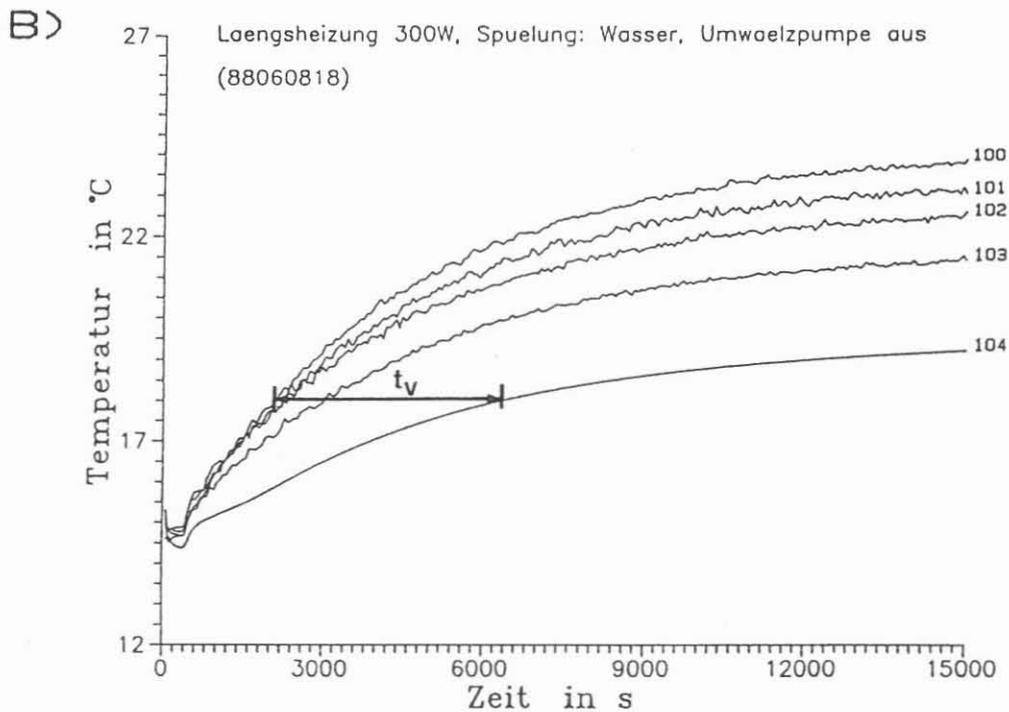
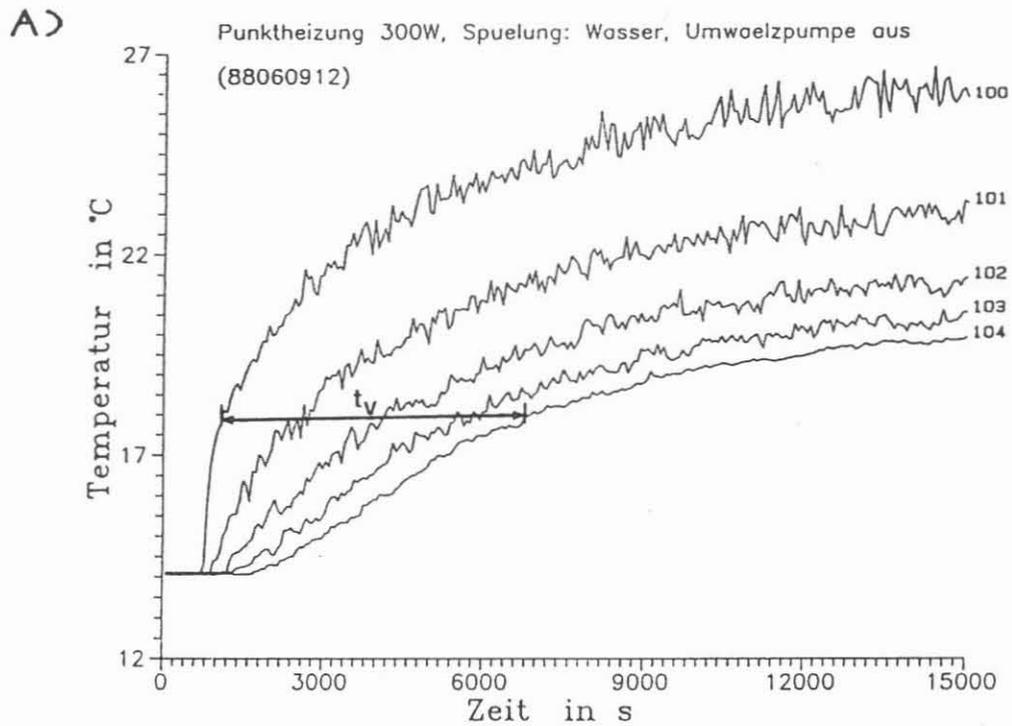


Abb.4.6 : A) Beispiel einer Messung mit Punktheizung ohne zusätzliche Umwälzpumpe.
B) Beispiel einer Messung mit Längsheizung.
Kurvenparameter: Thermistornummer (vergl. Abb.4.5)
 t_v zeitliche Temperaturverzögerung

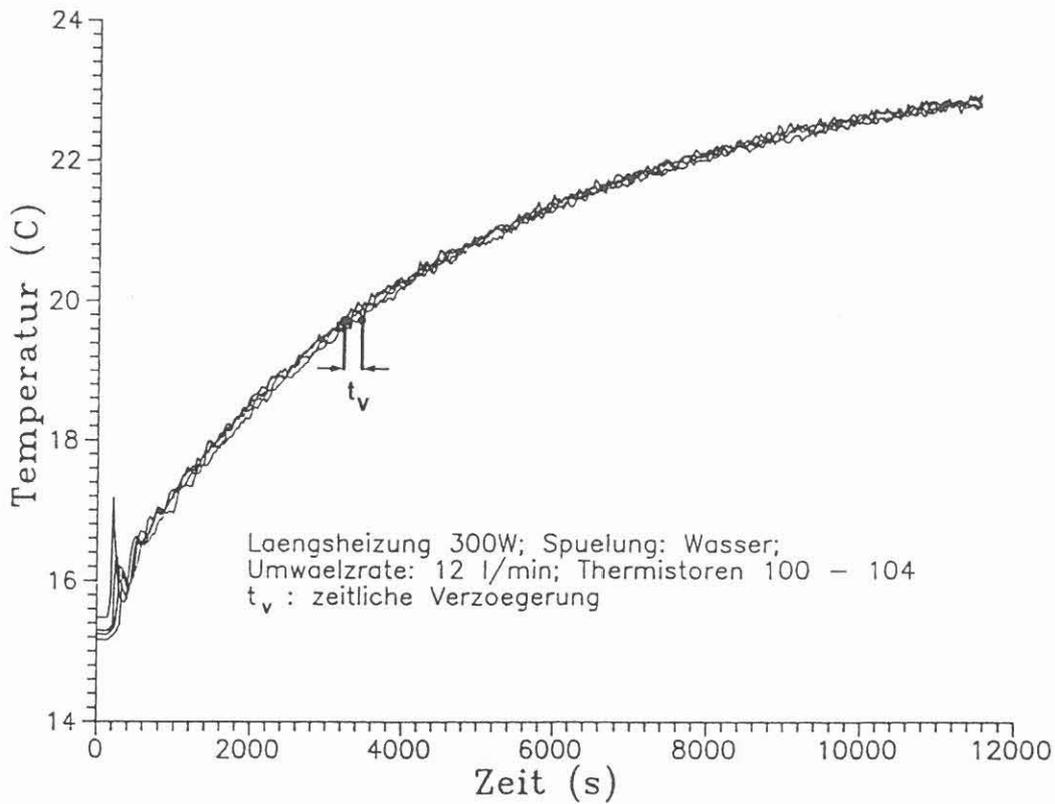


Abb.4.7 : Beispiel einer Messung mit Längsheizung und Umwälzpumpe.

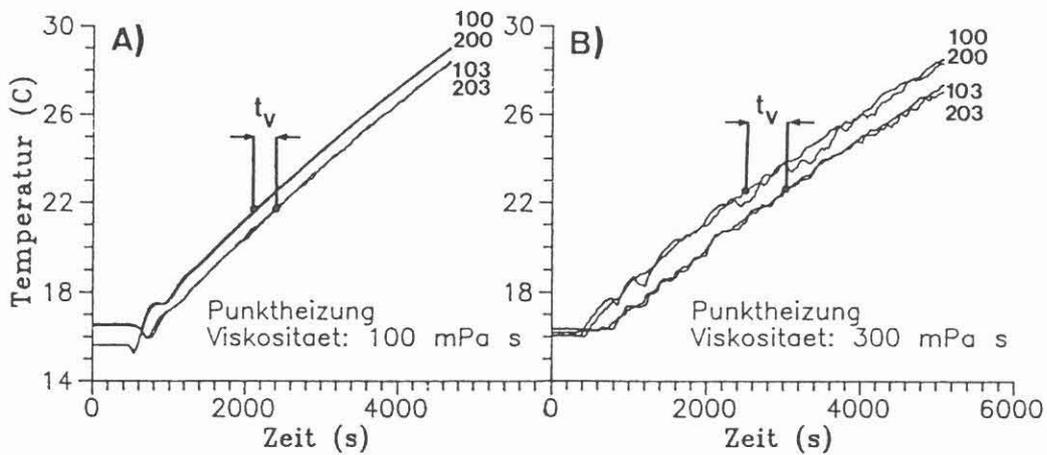


Abb.4.8 : Beispiele der Messungen mit Punktheizung und einer Spülung aus Wasser-Antisol-Gemisch. Umwälzrate 7 l/min. Dargestellt sind die Temperaturen der Thermistorenpaare in gleicher Höhe 100, 200 bzw. 103 und 203 (vergl. Abb.4.5).
A) Viskosität der Spülung 100 mPa s
B) Viskosität der Spülung 300 mPa s

dann die Wärmeübertragung konduktiv und die geforderte Annahme der Isothermie wäre trotz Pumpe in horizontaler Richtung nicht gegeben. Diese Vermutungen wurden experimentell durch Temperaturmessungen und Farbversuche überprüft.

Bei der Messung mit reinem Wasser waren die horizontalen Temperaturdifferenzen im Bereich von $\pm 0.3^\circ\text{C}$ statistisch verteilt. Auch die Farbversuche ergaben keinen Hinweis auf den Ausschluß randnaher Bereiche von der Durchmischung. Sie zeigten vielmehr lokale, scheinbar spontan entstehende, kleine Konvektionszellen über die gesamte Länge der Quelle. Diese reichen, trotz fehlender globaler Turbulenz, offensichtlich aus, um einen horizontalen Temperaturangleich zu bewirken. Damit zeigt sich auch, daß zur weiteren Verbesserung der horizontalen Temperaturkonstanz die Anbringung lokal begrenzter Strömungshindernisse durchaus überlegenswert ist.

Bohrlochspülung: Antisol 3000

Abb. 4.8A verdeutlicht, daß bei der Erhöhung der Viskosität der Flüssigkeit auf 100 mPa s ähnliche Ergebnisse wie bei reinem Wasser erzielt werden. Die Messdaten der in gleicher Höhe angebrachten Thermistorenpaare 100 und 200 bzw. 103 und 203 differieren um max. 0.3°C (vergl. Abb.4.5).

Zu beachten ist, daß diese Ergebnisse aus technischen Gründen unter erheblich ungünstigeren Bedingungen gewonnen wurden wie diejenigen für reines Wasser. Das Testrohr war mit der relativ schlecht wärmeleitenden Raumluft umgeben. Eine Isothermie im Ringraum des Meßaufbaus war somit nicht gegeben. Außerdem wurde in diesen Fällen sowohl mit der ungünstigeren Punktheizung als auch mit geringerer Pumpen-Fördermenge (≈ 7 l/min) gearbeitet. Im Vergleich zu den bisherigen Messungen (vergl. Abb. 4.7) bedingt dies im wesentlichen den unterschiedlichen Gesamtverlauf der Temperaturen. Zur Beurteilung der horizontalen Temperaturdifferenzen spielt dies jedoch keine entscheidende Rolle.

Deutliche horizontale Temperaturdifferenzen erkennt man erst, wenn die Viskosität auf 300 mPa s erhöht wird (Abb. 4.8B). Hierbei bilden sich im Testrohr größere, visuell deutlich wahrnehmbare Wirbelzellen, die sich jedoch nach einer kurzen Zeit wieder auflösen. Sie drücken sich durch ein erhöhtes Rauschen in den Temperaturdaten aus. Auch bei den vertikalen Temperaturdifferenzen, ausgedrückt durch t_v (Abb. 4.8A+B), ist kein nennenswerter Unterschied zu den Messungen mit Wasser zu erkennen. Daher ist auch bei Viskositäten < 300 mPa s eine Auswertung der Daten mit entsprechender Auswertetechnik möglich.

Bei einer weiteren Erhöhung der Viskosität auf 500 mPa s kommt es zu dem eingangs vermuteten Vorgang, daß sich unterschiedliche Zonen bei der Durchmischung herausbilden. Die Temperaturen im gleichen Höhenniveau unterscheiden sich bis zu 1.5°C voneinander. Die visuelle Beobachtung zeigte Bereiche mit zeitweiligem Ausschluß von der Konvektion.

Bohrlochspülung: Dehydril HT

Dehydril HT wird zur Zeit bei der Vorbohrung des KTB als Spülungszusatz eingesetzt, wobei im normalen Bohrbetrieb die Konzentrationen bis 1,5% betragen. Bei Dehydril HT handelt es sich um ein synthetisches, rein organisches Produkt mit stark thixotropen Eigenschaften (Herold et al., 1987). Durch Scherspannungsgradienten wird eine Absenkung der Viskosität und Fließgrenze erreicht (Thixotropie).

Untersuchungen wurden mit Dehydrilkonzentrationen von 0,5%, 1%, 1.25% und 1.5% durchgeführt.

Abbildung 4.9A zeigt das Beispiel einer Messung mit der Punktheizung ohne zusätzliche Umwälzung und einer Konzentration von 1.25%. Während die Temperatur in der Nähe der Heizung bis auf ca. 90°C ansteigt (Thermistor 100), zeigen die Thermistoren im oberen Bereich der Quelle (103, 104 u.a.) keine Temperaturerhöhung an. Anzeichen einer lokalen Konvektion sind am Fühler 100 erst bei Temperaturen über 80°C wahrnehmbar. Dies bedeutet, daß Konvektion erst ab einem vertikalen Temperaturgradienten von 60°C/m auftritt.

Die vertikalen Temperaturdifferenzen sind bei der Längsheizung (Abb. 4.9B) nicht ganz so groß. Anzeichen einer Konvektion sind hierbei nicht zu registrieren. Eine geforderte Isothermie der Quelle ist somit nicht erreichbar.

Diese Ergebnisse wurden bei normalen Druckverhältnissen erzielt. Das Verhalten von Dehydril bei hohem Druck, ein entscheidender Parameter bei einer Tiefbohrung, ist noch weitgehend unbekannt und bedarf einer weiteren Untersuchung, bei der andere Größen wie z.B. Temperatur und Lösungskonzentration berücksichtigt werden müssten.

Weitergehende Untersuchungen mit unterschiedlichen Dehydrilmischungen unter zusätzlichem Einsatz der Pumpe führten zu folgenden Ergebnissen:

- Bei Dehydril-Konzentrationen $< 1\%$ kann mit zusätzlichem Einsatz einer Pumpe eine ausreichende Annäherung an die Isothermie der Quelle erreicht werden.
- Bei Dehydril-Konzentrationen $\geq 1\%$ erfolgt die Wärmeübertragung rein konduktiv. Eine Durchmischung der Spülung zur Erzeugung einer ausreichend isothermen Quelle ist mit einfachen Mitteln (Kleinpumpe und thermischer Konvektion) nicht mehr möglich. Unter diesen Voraussetzungen kann auf die Aktivierung der Packer und der Umwälzpumpe verzichtet und die Sonde nur mit der Längsheizung betrieben werden. Erste Modellrechnungen und Messungen an einer derartigen "Heizstabsonde" sind vielversprechend. Die Meßzeiten von ca. 10 Stunden sind mit denen der "Packer-Sonde" vergleichbar. Durch spezielle Auswerteverfahren sind weitere Verkürzungen noch möglich.

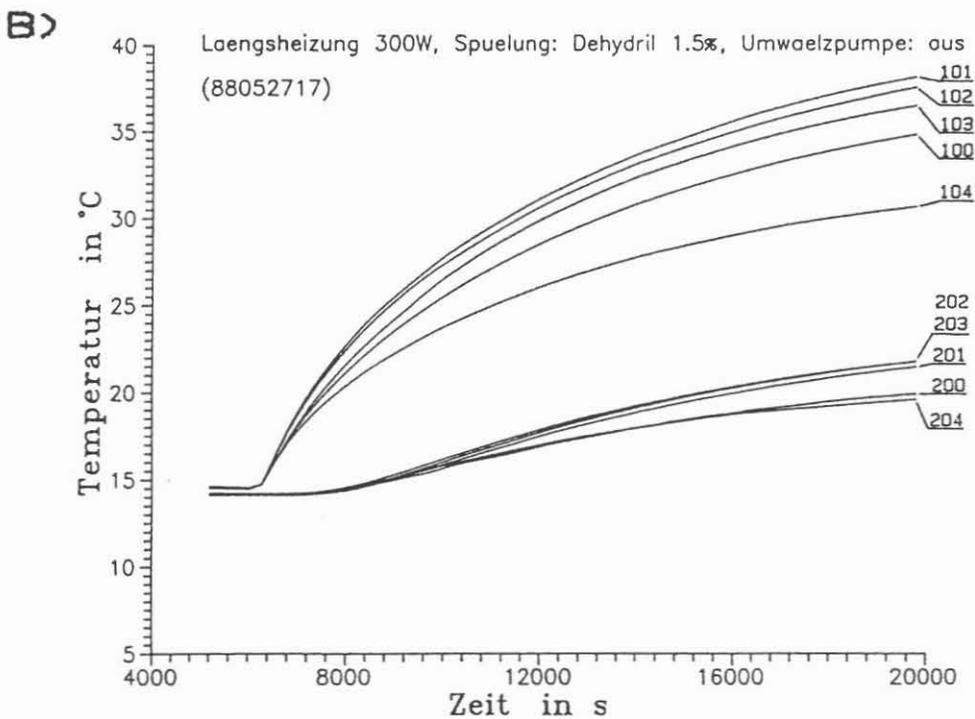
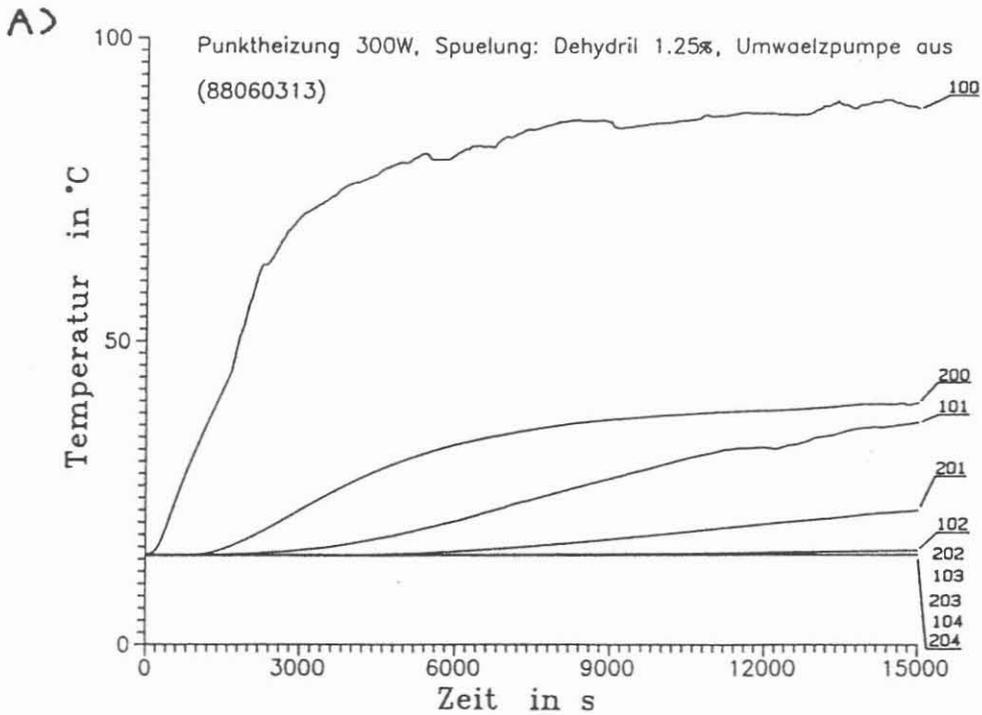


Abb.4.9 : A) Beispiel einer Messung mit Punktheizung ohne Umwälzung - Spülung Dehydril 1,25%.

B) Beispiel einer Messung mit Längsheizung ohne Umwälzung - Spülung Dehydril 1,5%.

Kurvenparameter: Thermistornummer (vergl. Abb.4.5)

Schlußfolgerungen

Für die WLF-Messungen nach der Zylinderquellenmethode in einer Tiefbohrung können je nach Bohrlochspülung 2 Meßvarianten verfolgt werden:

- A) SPÜLUNG: - Wasser oder
 - nicht thixotrope Flüssigkeit mit einer Viskosität < 300 mPa s oder
 - Wasser/Dehydril (Konzentration bis 1%)
- MEßVARIANTE: Hierbei müssen die Packer gesetzt werden. Eine Längsheizung sorgt für den Temperaturanstieg und eine Umwälzpumpe (Förderrate ≈ 10 l/min) für den Temperatureausgleich der Quelle.
- B) SPÜLUNG: - Wasser/Dehydril (Konz. > 1%)
- MEßVARIANTE: Hierbei werden die Packer nicht aktiviert, die Heizung erfolgt über die ganze Länge der Sonde ohne Einsatz der Umwälzpumpe (Heizstabvariante).

4.4 Packer

Die Packer haben die Aufgabe, den konvektiven und den konduktiven Wärmeaustausch der beheizten Wassersäule mit dem restlichen Bohrloch in axialer Richtung zu verhindern. Es muß kein nennenswerter Differenzdruck aufgebaut werden, jedoch müssen die Packer setzbar und vor allem jederzeit lösbar sein. Sie müssen außerdem über einen großen Arbeitsbereich verfügen, um die Sonde bei unterschiedlichen Bohrlochradien und in Bereichen mit den zu erwartenden Randausbrüchen einsetzen zu können. Aus diesen Gründen kommen die bei den bisherigen Sonden verwendeten Reibungspacker für einen Einsatz in der Tiefbohrung nicht infrage. Da bei der Industrie auch keine Packersysteme für den oben beschriebenen Aufgabenbereich vorliegen, mußte der Weg einer Neuentwicklung eines Doppelpackersystems für die WLF-Sonde beschritten werden.

Die von uns vorgesehenen Packer arbeiten nach dem Prinzip eines Schlauchpackers. Ein Gummibalg oder -schlauch wird durch Aufpumpen an die Bohrlochwandung gepreßt. Im industriellen Einsatz werden derartige Packer durch Zufuhr von Preßluft über eine Schlauchverbindung aktiviert. Sie zeichnen sich durch hohe Verläßlichkeit aus. Eine Variante dieser Methode, bei der der Gummibalg durch eine eingebaute Kleinpumpe mittels Spülung gesetzt und gelöst wird, ist für den Einsatz in der WLF-Sonde vorgesehen.

Die Entwicklung eines derartigen Packers wird in 2 Stufen vorgenommen:

- 1) Entwicklungsstufe
- 2) Fertigungsstufe

Mit der Bearbeitung der Entwicklungsstufe wurde die Fa. GEO-COM, Celle, beauftragt. Die Arbeiten umfassen im einzelnen:

- a) Materialstudien (Elastomere, Pumpen etc.)
- b) Materialprüfung, d.h. Eignungstests (Elastomere, Pumpen etc.)
- c) Erstellung einer Fertigungszeichnung des Doppelpackersystems mit genauer Spezifizierung der Einzelkomponenten
- d) Abschätzung über Einsatzmöglichkeiten bei 2000 bar, 250°C

Folgende grundlegenden Eckdaten und Konstruktionsdetails sind für die Entwicklung vorgegeben worden:

1. Das System soll 150° C und 700 bar standhalten
2. Stauchfestigkeit: mindestens 4 to
3. Der Außendurchmesser des Packersystems beträgt 80 mm.
4. Arbeitsbereich: mindestens 220 mm
5. Packungslänge: 1 m
6. Vorgaben zum Setzen und Lösen der Packer:
 - Der Einbau einer Pumpe muß in jeden Packer möglich sein (identischer Aufbau der Packer)
 - Folgende Optionen für den Betrieb (Setzen und Lösen der Packer) müssen gegeben sein:
 - a) eine Pumpe bedient beide Packer
 - b) die beiden Packer werden unabhängig voneinander durch eine jeweils eingebaute Pumpe bedient.
 - c) wie b), jedoch mit zusätzlicher Rohr- und Schlauchleitung zwischen den Packern zur Erhöhung der Sicherheit bei Ausfall einer Pumpe.
7. Die einwandfreie Funktion der Packerpumpe muß auch für folgende Umgebungsbedingungen (Spülung) gewährleistet sein: Spülung Dehydril HT der Firma Henkel, eine maximale Konzentration von 2% muß berücksichtigt werden. Anzunehmender Feststoffanteil der Spülung: 3%, (Angabe der Projektleitung KTB).
8. Innerhalb der Packer zwischen Packung und Trägerrohr sollen Temperaturfühler (Pt 1000) angebracht werden. Diese sollen die Temperatur des Setzmediums unverfälscht wiedergeben, damit ein evtl. Wärmeverlust vom abgepackerten Bereich über die Packung an das restliche Bohrloch erkannt werden kann. Sie sind gegen das Trägerrohr thermisch zu isolieren.
9. Der Packer muß das Bohrloch dicht abschließen. Der Setzdruck soll ca. 5 bar betragen, er soll durch ein Überdruckventil (Bereich 2 - 50 bar) begrenzt sein.
10. Zum sicheren Bergen der Sonde, bei Ausfall der Setzeinrichtung nach Setzen der Packer, soll ein mechanisches Ausreißventil installiert werden, das auf Zug reagiert (0,5 to) und die Packer freigibt.

11. Die ursprünglich vorgesehene thermische Barriere innerhalb des Packerträgerrohres ist nach neuesten Modellrechnungen nicht notwendig.

Die Entwicklungsstufe ist noch nicht abgeschlossen, jedoch liegen erste Ergebnisse inzwischen vor (Vorbericht der Fa. GEOCOM):

1. Der geforderte max. Außendurchmesser von 80 mm für das Doppelpackersystem ist realisierbar.
2. Folgende Elastomere wurden bisher untersucht:
 - a) Silicon-Schläuche
 - b) Epichlorhydril-Schläuche

Die Epichlorhydril-Schläuche erwiesen sich bei Versuchen in geschlitzten Rohren (Schlitzbreite bis 20 mm) als wesentlich widerstandsfähiger. Sie waren durch Setzdrücke bis 6 bar nicht zu zerstören oder auch nur zu beschädigen, während die Packer aus Siliconmaterial diese Behandlung nicht überstanden. Ein Langzeittemperaturtest (142 h bei 156°C) zeigte, daß die elastischen Parameter des Epichlorhydrils danach nur unwesentlich verändert wurden.

3. Die Schlauchpackungen müssen aus armiertem Material aufgebaut werden. Derzeit werden Packungen mit Kevlar-Armierung aufgebaut und getestet. Die Einbindung und Abdichtung ist ohne Probleme realisierbar.
4. Zur Erzeugung des Setzdruckes ist eine Zahnradpumpe vorgesehen, die in modifizierter Form bis ca. 400°C einsetzbar ist. Der Pumpenantrieb erfolgt in der Anfangsversion (150°C) durch einen Gleichstrommotor. Für höhere Temperaturen existieren bereits alternative Möglichkeiten. Das gleiche Pumpen-Motor-System kann auch zur Umwälzung der Flüssigkeitssäule eingesetzt werden.

RESUME:

Das technische Konzept des Doppelpackersystems ist realisierbar und nach heutigem Wissensstand auch für deutlich höhere Druck-Temperaturbereiche modifizierbar.

4.5 Sondenelektronik

Die Sondenelektronik hat die Aufgabe, die Meßwerte der Temperatursensoren zu erfassen und die Daten nach Übertage zu übertragen. Hierfür steht vom Bohrlochmeßkabel nur eine Ader zur Verfügung. Ein Labormuster für die Sondenelektronik wurde bereits entwickelt und ausgiebig getestet (Behrens et. al, 1988). Bei dem Aufbau wurde darauf geachtet, daß sämtliche Bauteile auch in Hochtemperaturversion verfügbar sind; deshalb ist eine Erweiterung des Einsatzbereiches von derzeit 125° C auf ca. 250° C jederzeit ohne prinzipielle Änderungen möglich. Auf der Basis der Modellrechnungen wurden folgende Meßgenauigkeiten gefordert:

$$\begin{aligned} \text{absolute Temperaturmessungen} &< 3 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C} \\ \text{relative Temperaturmessungen} &< 3 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

elektrischer Aufbau

Die Messung der Temperaturen erfolgt als Widerstandsmessung an PT 1000 Thermistoren. Dabei werden die einzelnen Sensoren über einen Multiplexer und bistabile Relais auf den Meßeingang geschaltet. Es wird eine Spannungs-Frequenzwandlung durchgeführt und die Frequenz auf die beiden Versorgungsleitungen aufmoduliert. Im derzeitig geschalteten Aufbau sind folgende Messungen möglich :

- 8 Kanäle für Widerstandsmessungen, vorgesehen für relative Temperaturmessungen mit der geforderten Auflösung von $2 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$
- 4 Kanäle für Widerstandsmessungen, vorgesehen für absolute Temperaturmessungen mit der geforderten Auflösung von $3 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$
- 1 Kanal Spannungsmessung
- 1 Kanal Strommessung

Die Integrationszeit (Spannungs- Frequenzwandlung) ist je nach geforderter Auflösung variabel einstellbar und beträgt in der jetzigen Beschaltung ca. 5 Sekunden pro Kanal.

Die Übertageeinheit besteht im wesentlichen aus 3 Komponenten: der Stromversorgungseinheit für die Sondenelektronik, einem Einplatinen-Mikroprozessor zur Steuerung des gesamten Ablaufs sowie einer Kontroll- und Anzeigeeinheit. Die zeitliche Abfolge der Messungen wird hier synchronisiert, eine Zuordnung der einzelnen Meßwerte zu den verschiedenen Kanälen erfolgt durch Referenzdaten, die von der Sondenelektronik gesendet werden. Für den Anschluß des Mikrocomputers ist die serielle Schnittstelle (RS 232) vorgesehen, damit kann der gesamte Ablauf durch diesen gesteuert und auch die Abspeicherung der Meßdaten vom Rechner übernommen werden.

Um zu überprüfen, ob die aus Sondenelektronik und Übertageeinheit bestehende Meßelektronik die geforderten Spezifikationen erfüllt, wurden in einem ersten Schritt umfangreiche Labortests vorgenommen. Dabei ging es insbesondere um die Lineari-

tät der Spannungs-Frequenzwandlung und die Temperaturabhängigkeit der Sondenelektronik. Als Referenz wurde eine Meßbrücke benutzt, die Genauigkeit der einstellbaren Widerstandswerte beträgt 0,002 % im betrachteten Einstellbereich.

Die Ergebnisse der Linearitätstests zeigten, daß die Spannungs-Frequenzwandlung gut realisiert wird (s. Abb. 4.10 und Abb.4.11). Für die Relativmessungen (Abb. 4.10) betragen die Abweichungen zwischen den Meßwerten und dem angepaßten Polynom 2. Grades maximal ± 2 Zählimpulse bei einem Gesamtimpulsbereich von 53000. Bei dem betrachteten Widerstandsbereich von 1080 bis 1180 Ohm (Temperaturbereich 20°C - 46 °C) entspricht dies einer Auflösung von $< 4 \cdot 10^{-3}$ °C.

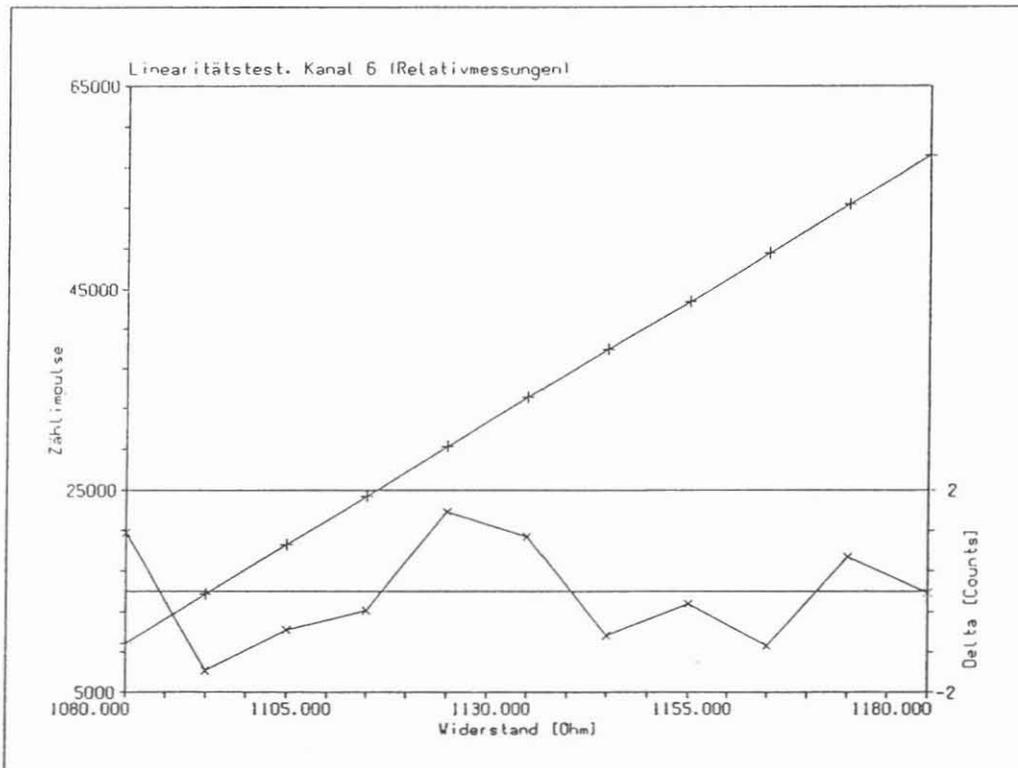


Abb.4.10 : Ergebnis der Testmessungen auf einem für Relativmessungen vorgesehenen Kanal der Sondenelektronik. Dargestellt sind die Messwerte, ein nach der Methode der kleinsten Quadrate angepaßtes Polynom 2. Grades sowie die resultierenden Abweichungen. Bei dieser Anpassung der Messwerte ergeben sich Fehler von ± 2 Zählimpulsen. Der dargestellte Widerstandsbereich entspricht einem Temperaturbereich von $\approx 20^\circ\text{C}$ bis $\approx 50^\circ\text{C}$.

Diese Auflösung kann zusätzlich dadurch erhöht werden, daß entweder der Meßbereich weiter eingeschränkt oder die Integrationszeit verlängert wird. Damit wird die geforderte Genauigkeit von $2 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$ für eine zu erwartende Temperaturdifferenz von max. $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ während der Messung erreicht. Für die Absolutmessungen (Abb.4.11) ergaben die Tests eine Auflösung von $3 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$.

Um das Temperaturverhalten der Sondenelektronik zu testen, wurde diese in einem Wärmeofen auf eine Temperatur von $107 \text{ } ^\circ\text{C}$ aufgeheizt (Abb. 4.12).

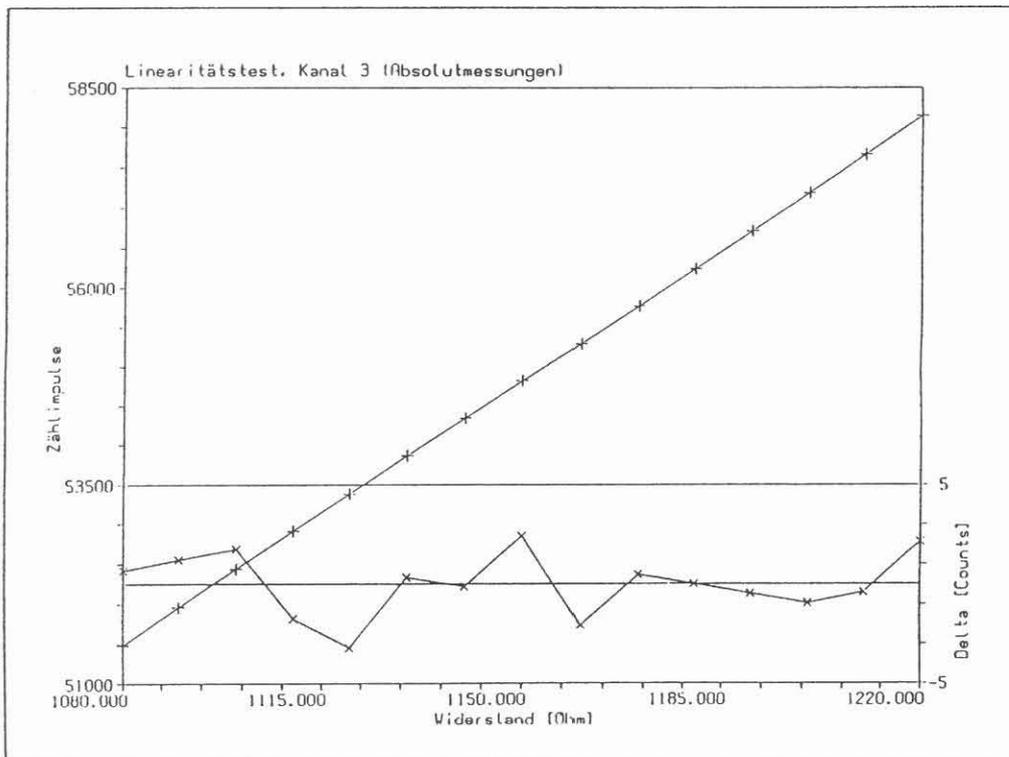


Abb.4.11 : Ergebnis der Testmessungen auf einem für Absolutmessungen vorgesehenem Kanal der Sondenelektronik. Die Messwerte wurden durch eine Gerade approximiert, die resultierenden Abweichungen sind ebenfalls dargestellt, sie betragen maximal ± 3 Zählimpulse. Der dargestellte Widerstandsbereich entspricht einem Temperaturbereich von $\approx 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ bis $\approx 60 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Obwohl in diesem Fall keine Linearität mehr gegeben ist, lassen sich die Meßwerte sehr gut durch ein Polynom 3. Grades approximieren. Dadurch ist eine Korrektur des Temperatureffektes durch Kalibrierung relativ einfach durchführbar. Da es sich bei den durchzuführenden Messungen in erster Linie um Relativmessungen handelt, spielt die Temperaturabhängigkeit nur eine untergeordnete Rolle, zumal die Sondenelektronik während der Messungen keinen großen Temperaturschwankungen ($< 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$) unterworfen sein wird.

Da die Tests sehr zufriedenstellend verliefen, wird die zunächst als Laboraufbau vorgesehene Sondenelektronik für Einsatz tiefen bis 3000 m eingesetzt.

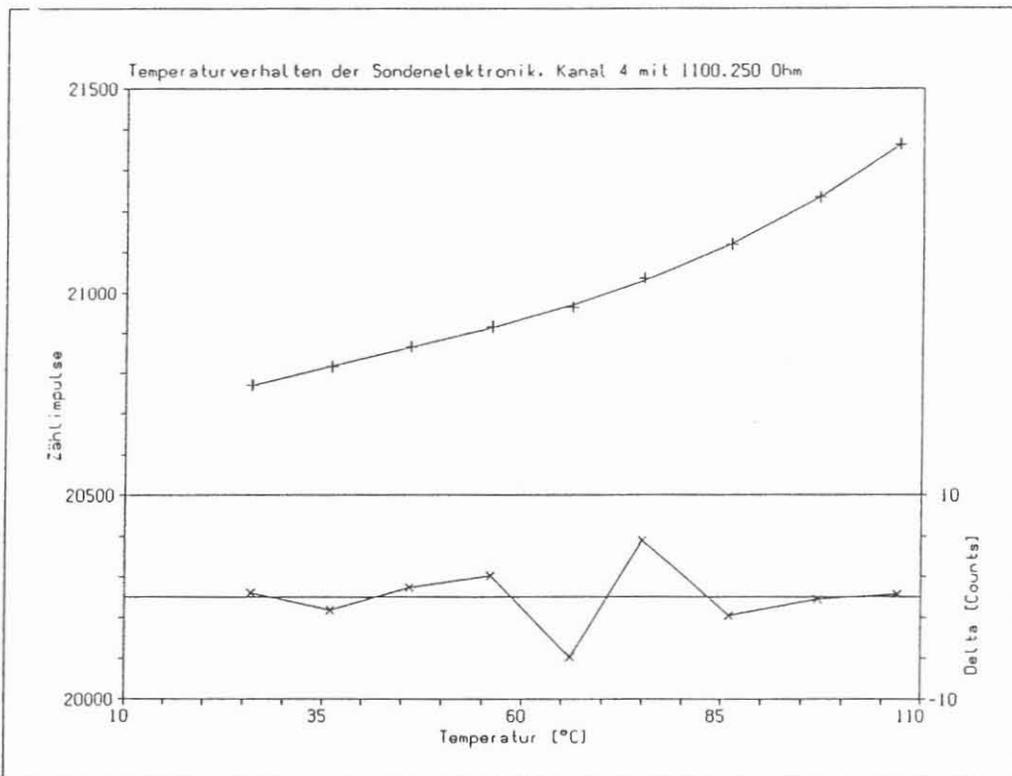


Abb.4.12 : Temperaturabhängigkeit der Sondenelektronik. Dargestellt sind die Messwerte, ein nach der Methode der kleinsten Quadrate angepaßtes Polynom 3. Grades sowie die resultierenden Abweichungen.

5 Folgerungen und Ausblick

Das bisher verfolgte Konzept der Weiterentwicklung einer WLF-Sonde für größere Tiefen auf der Basis der Zylinderquellenmethode wurde soweit verifiziert, daß mit der Fertigstellung eines Prototyps der Sonde für die Vorbohrung bis Anfang 1989 zu rechnen ist.

Die Einsatzgrenze dieser Sonde wird im Bereich um 3000 m Tiefe liegen, und ist hauptsächlich durch die Temperaturbegrenzung von 125°C für den derzeitigen Aufbau der Sondenelektronik gegeben. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand ist eine Modifizierung der Sonde für höhere Temperaturbereiche (250°C) aus Sicht der Sondenelektronik jederzeit möglich. Hinsichtlich der Einsatzgrenze der zu verwendenden Packer liegen bisher noch keine abschließenden Tests vor. Die bisherigen Erfahrungen mit unterschiedlichen Packermaterialien zeigen jedoch, daß auch hier grundsätzlich die Möglichkeit besteht, die Sonde für einen höheren Temperaturbereich zu ertüchtigen.

Untersuchungen an einem Bohrmodell mit unterschiedlichen Spülungen haben weiterhin ergeben, daß die Sonde mit geringfügigen Modifikationen für einen weiten Bereich viskoser als auch thixotroper Flüssigkeiten einsetzbar ist.

6 Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens ist die Fertigstellung des Prototyps einer Wärmeleitfähigkeitssonde für die KTB-Vorbohrung. Mit entsprechend temperaturresistenten Bauteilen soll die Sonde auch in größeren Tiefen einsetzbar sein.

Eine ausführliche Diskussion möglicher Verfahren ergab, daß die Weiterentwicklung einer existierenden, nach der Zylinderquellenmethode arbeitenden Bohrlochsonde am aussichtsreichsten ist. Bei dieser Sonde wird ein Teil des Bohrlochs durch Packer abgeschlossen und erhitzt. Die Wärmeleitfähigkeit wird aus dem zeitlichen Temperaturanstieg in der resultierenden Zylinderquelle berechnet.

Mit Hilfe umfangreicher numerischer Modellrechnungen wurden sowohl Sondenparameter, wie z.B. Länge der Sonde (3m für die Vorbohrung, 4m für die Hauptbohrung) als auch Meßzeiten (≈ 10 h) und Auswerteverfahren optimiert.

Zur Untersuchung des Temperaturfeldes innerhalb der Zylinderquelle wurden Experimente an einem 1:1 Modell des Bohrlochs mit unterschiedlichen Bohrlochflüssigkeiten durchgeführt. Es zeigte sich bei Wasser und viskosen Flüssigkeiten bis zu Viskositäten < 300 mPa s, daß die durch eine Pumpe erzeugte Konvektion eine ausreichende Annäherung an die von der Theorie geforderte Isothermie gewährleistet. Gleiches gilt für ein thixotropes Wasser-Dehydril-Gemisch mit einer Konzentration $< 1\%$. Bei Dehydril-Konzentrationen $\geq 1\%$ erfolgt die Wärmeübertragung rein konduktiv. Eine Durchmischung der Spülung zur Erzeugung einer ausreichend isothermen Quelle ist mit einfachen Mitteln nicht mehr möglich. Unter diesen Voraussetzungen kann mit einem vereinfachten Sondaufbau gearbeitet werden.

Das technische Konzept zur Fertigstellung einer Sonde bis zu einem Einsatzbereich von 125°C liegt vor. Mit der Fertigstellung des Prototyps ist Anfang 1989 zu rechnen. Dieses Konzept ist nach heutigem Wissenstand mit entsprechend geeigneten Materialien und Elektronik-Bausteinen auch für deutlich höhere Druck- Temperaturbereiche verwendbar.

7 Literaturverzeichnis

- BEHRENS, J., BURKHARDT, H., HONARMAND, H. (1984): Vorstudie über den Einsatz verschiedener geothermischer Meßverfahren im Rahmen des kontinentalen Tiefbohrprogramms der BRD, Endbericht, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Az.: Be 331/16-1.
- BEHRENS ET AL. (1988): Entwicklung einer Bohrlochsonde zur Bestimmung der in situ Wärmeleitfähigkeit für größere Tiefen, Endbericht, Deutsche Forschungsgemeinschaft, AZ.: Be 331/19-1.
- BECK, E.A., JAEGER, J.C., NEWSTEAD, G. (1956): The Measurement of the Thermal Conductivities of Rocks by Observation in Boreholes, Australian Journal of Physics, Vol. 9, 1131-1146.
- BECK E.A., ANGLIN, F.M., SASS, J.H. (1971): Analysis of Heat Flow Data - In Situ Thermal Conductivity Measurements, Canadian Journal of Earth Sciences, Vol. 8. No. 1.
- BLACKWELL, J.H. (1954): A Transient Flow Method for Determination of Thermal Constants of Insulating Materials in Bulk, Journal of Applied Physics, Vol. 25, 137-144.
- BLACKWELL, J.H. (1956): The Axial Flow Error in the Thermal Conductivity Probe, Can. J. Phys., 34, 412-417.
- BURKHARDT, H., ERBAS, K., HONARMAND, H., GEISER, B.R. (1987): Weiterentwicklung einer Bohrlochsonde zur Bestimmung der in situ Wärmeleitfähigkeit für größere Tiefen, Jahresbericht, BMFT - Projekt, AZ AZA/05 - RG 8604 0.
- CARSLAW, H.S., JAEGER, J.C. (1959): Conduction of Heat in Solids, Oxford University Press, Oxford.
- CLAUSER, C. (1988): Untersuchung zur Trennung der konduktiven und der konvektiven Anteile am Wärmetransport in einem Sedimentbecken am Beispiel des Oberrheintalgrabens, Dissertation, eingereicht am FB 16 der Technischen Universität Berlin.
- DE VRIES, D.A., PECK, A.J. (1957): On the Cylindrical Probe Method of Measuring Thermal Conductivity with Special Reference to Soils, Australian J.Phys., 11, 255 - 271.
- ERBAS, K. (1985): Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Festkörpern mit einer Halbraum-Linien-Quellen-Apparatur, unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Angewandte Geophysik, Technische Universität Berlin.

- HEROLD, C.-P., MÜLLER, H., VON TAPAVICZA, S. (1987): A New High Temperature Stable Mud Additive for Geological and Deep Drilling Operations, Third International Symposium on Deep Drilling in Crystalline Bedrock, Mora (Sweden).
- KRISTIANSEN, J.J. (1982): The Transient Cylindrical Probe Method for Determination of Thermal Parameters of Earth Materials, Doctoral Thesis, Aarhus University (Geoskrifter, 18), Aarhus.
- MUSSMANN, G., KESSELS, W. (1980): An In Situ Thermal Conductivity Probe. In: Advances in European Geothermal Research. Strub. A.S.; Ungemach P. (eds.) Dordrecht (Holland); D. Reidel Publishing Company, 556-564.
- OELSNER, C., LEISCHNER, H., PISCHEL, S. (1968): Eine kalibervariable Sonde für Wärmeleitfähigkeitsmessungen in situ, Freiburger Forschungshefte, C232, 47-65.
- OELSNER C., RÖSLER, R. (1981): Eine Bohrlochsonde zur gleichzeitigen Messung von Wärmestrom und Wärmeleitfähigkeit in situ, Neue Bergbautechnik, Jg. 11, Heft 5, 266-267.
- POPPENDIEK, H.F., CONNELLY D.J., SELLERS A.J. (1982): Development of Downhole Geothermal Heat Flux and Thermal Conductivity Transducers; Geothermal Resources Council, Transactions Vol. 6.
- VILLINGER, H. (1983): In-situ Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, Dissertation, Institut für Angewandte Geophysik, Technische Universität Berlin.
- VILLINGER, H. (1985): Solving Cylindrical Geothermal Problems Using the Graver-Stehfest Inverse Laplace Transform, Geophysics, 50(10), 1581-1587.
- VON HERZEN, R., MAXWELL, E.A. (1957): The Measurement of Thermal Conductivity of Deep Sea Sediments by a Needle Probe Method, Journal of Geophysical Research, Vol. 64, 1557-1563.