

Versuch zur Deutung einer ungewöhnlichen  
Temperaturmessung in der KTB-Oberpfalz VB

**VERSUCH ZUR DEUTUNG EINER UNGEWÖHNLICHEN TEMPERATURMESSUNG IN  
DER KTB-OBERPFALZ VB**

G. Zoth

**ZUSAMMENFASSUNG**

Das Temperaturlog vom 5.7.1988 in der KTB-Oberpfalz VB zeigte in ihrem Verlauf ständig wiederkehrende Temperatur-Peaks, für die ein Teufenabstand von 27,3 m ermittelt wurde. Die Temperaturerhöhung der Spülung lag bei 2117 m nach 7,5 h noch 0,3 K über dem Normalniveau für die Bohrung. Es wurde mit Hilfe von Modellberechnungen festgestellt, daß die Ausgangstemperatur  $T_a$  für die Erzeugung der Peaks ca. 20 K über der Normaltemperatur der Spülung gelegen haben muß. Mehrere Modellberechnungen konnten keinen eindeutigen Beweis erbringen, daß ausschließlich die erwärmte Bohrkronen der Verursacher der Wärmeanomalie war.

**SUMMARY**

The Temperature Log of July 5, 1988, run in the pilot well KTB-Oberpfalz VB shows repeating peaks at a constant distance of 27,3 m. At a depth of 2117 m, this temperature was still 0.3 K above 'normal' even after a period of 7.5 hours. Calculations revealed that the original temperature necessary for producing those peaks should have been in order of 20 K above the normal temperature of the drilling mud at that depth. Several modelling cases could not lead to the conclusion that this heat anomaly was exclusively the result of excessive friction of the bore crown.

---

Anschrift des Autors: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, Projektleitung, Stilleweg 2, 3000 Hannover 51.

## 1 Einleitung

In der KTB-Vorbohrung werden in regelmäßigen Abständen Temperatur- und Kalibermessungen ausgeführt. Der Zeitpunkt der Messung wird im wesentlichen durch die Bohrkronen-Standzeit bestimmt, die bei ca. 100 m liegt. Die Meßzeiten zur Durchführung der Temperaturmessungen wurden als Empfehlung der Arbeitsgruppe (AGRU) Geothermik am 15.1.1987 festgelegt und mit Rücksicht auf Veränderungen im Bohrbetrieb an die besseren Standzeiten der Bohrkronen angepaßt.

Im folgenden wird der Versuch unternommen, eine Bohrloch-Temperaturmessung zu interpretieren, die mit hoher Wahrscheinlichkeit durch den Ausbau des Bohrgestänges anomale Meßergebnisse erbrachte.

## 2 Beschreibung der Meßergebnisse

Am 5.7.1988 wurde in der Vorbohrung KTB-Oberpfalz VB ein Temperaturlog aufgenommen, das sich von allen bisher gemessenen in einer Weise unterscheidet, die zunächst nicht erklärbar schien. In Abb. 1 ist ein Ausschnitt der Temperaturkurve vom 5.7.1988 dargestellt. Das Log zeigt von links nach rechts den Spülungswiderstand MRES (OHMM), die natürliche Gammastrahlung GR (GAPI), die Kabelzugspannung TENS (LB), die Temperaturmessung TMP2 (°C) und die Temperaturmessung TMP1 (°C). Die Skalenbreite für die Temperatur beträgt 10 K. TMP1 zeigt eine Meßkurve des Sensors T1, der sich 3 cm oberhalb der untersten Spitze der Bohrlochmeßsonde und TMP2 zeigt eine Meßkurve des Sensors T2, der sich 1,23 m oberhalb T1 befindet. Die Messung wurde während der Einfahrt von oben nach unten ausgeführt. Die Meßgeschwindigkeit betrug 10 m/min. Die Meßkurve TMP1 zeigt deutlich in gleichen wiederkehrenden Abständen Tempera-

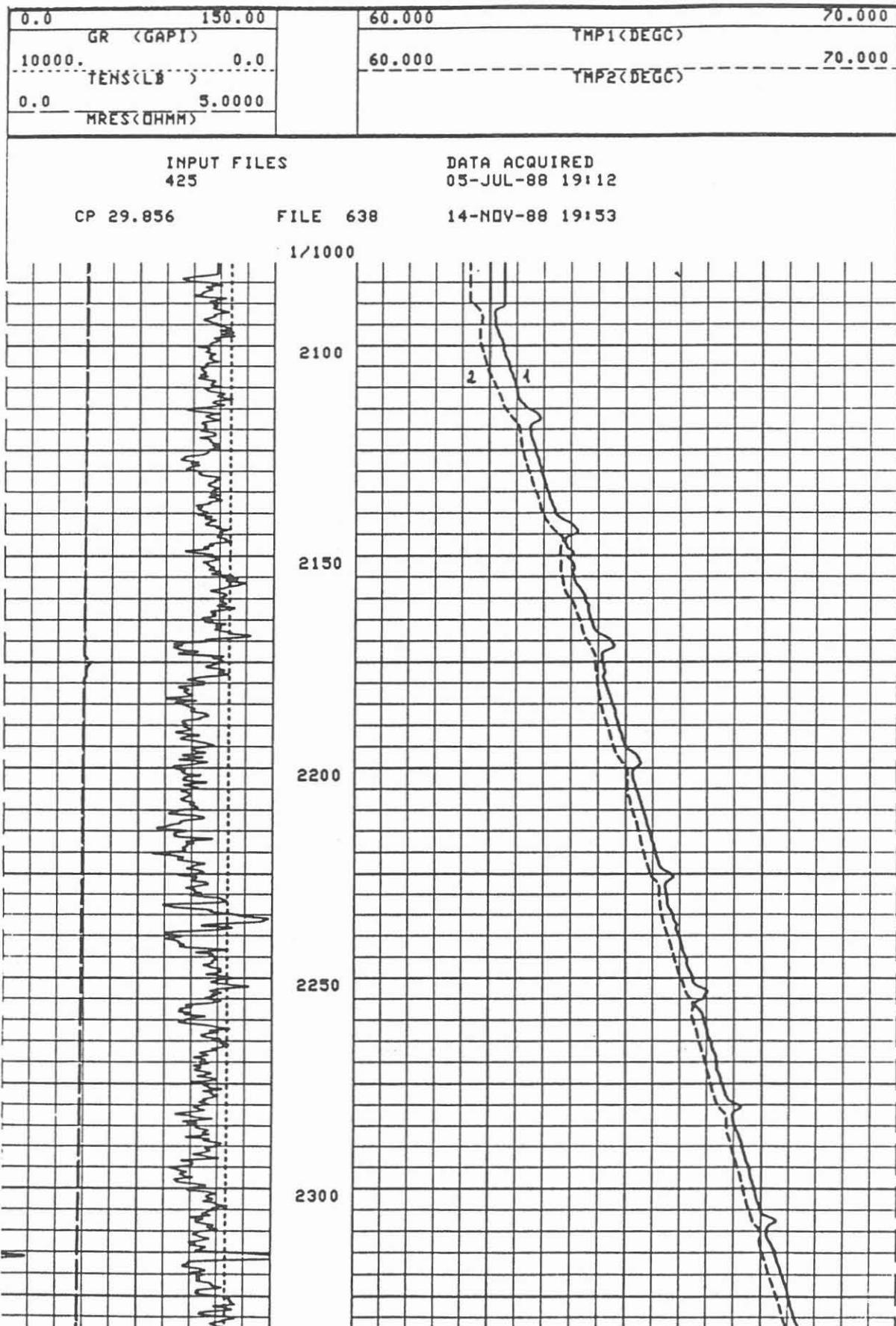


Abbildung 1:  
Ausschnitt aus einem Temperatur - Log vom 5.7.1988

turerhöhungen von  $\Delta T \approx 0,3$  K bei 2117 m mit zunehmender Teufe abnehmend bis  $\Delta T \approx 0,2$  K bei 2307 m Teufe. Ein ähnliches Verhalten, jedoch in weniger ausgeprägter Form, gibt die Meßkurve TMP2 wieder.

### 3 Interpretation der Meßergebnisse

Überprüfungen der Sensoren und Kalibrierungen der gesamten Meßelektronik ergaben, daß meßtechnisch kein Fehler vorlag. Es galt daher zu untersuchen, welche Ursache zu diesen Anomalien führt.

Zunächst wurde die genaue Teufendistanz zwischen den Temperaturmaxima ermittelt. Dies geschah mit einer Temperaturgradientendarstellung (Abb. 2). Die Abb. 2 zeigt unter T1 und T2 die Temperaturkurven TMP1 und TMP2, unter T1D und T2D die ungefilterten Temperaturgradienten und unter T1DF1 und T2DF1 die gefilterten Temperaturgradienten. Um die Teufendistanz genauer zu bestimmen, wurde der Temperaturgradient T1D in 27 m-Segmenten abgegriffen und Segment für Segment übereinandergezeichnet (Abb. 3). Hierbei war eine Optimierung möglich, indem man die Teufenvorgabe so veränderte, bis die Gradientendurchgänge durch Null die geringste Streuung zeigten. Als Ergebnis konnte mit dieser Methode eine Wiederholungsteufe der Temperaturmaxima von 27,3 m ermittelt werden. Dieser Teufenwert wurde auch zugrunde gelegt, um die Amplituden der Temperaturerhöhungen als Plot darzustellen. Die Abb. 4 zeigt die Zusammenspielung der Temperaturerhöhungen unter Subtraktion der Temperaturzunahme, bedingt durch den Temperaturgradienten. Auf der Abszisse ist das Teufensegment (27,3 m) und auf der Ordinate die Temperaturerhöhung aufgetragen. Die Teufe von 27,3 m stellt exakt die Gestängezuglänge dar, die sich beim Ausbau des Bohrstranges aus der Bohrung ergibt. Ein Gestängezug besteht

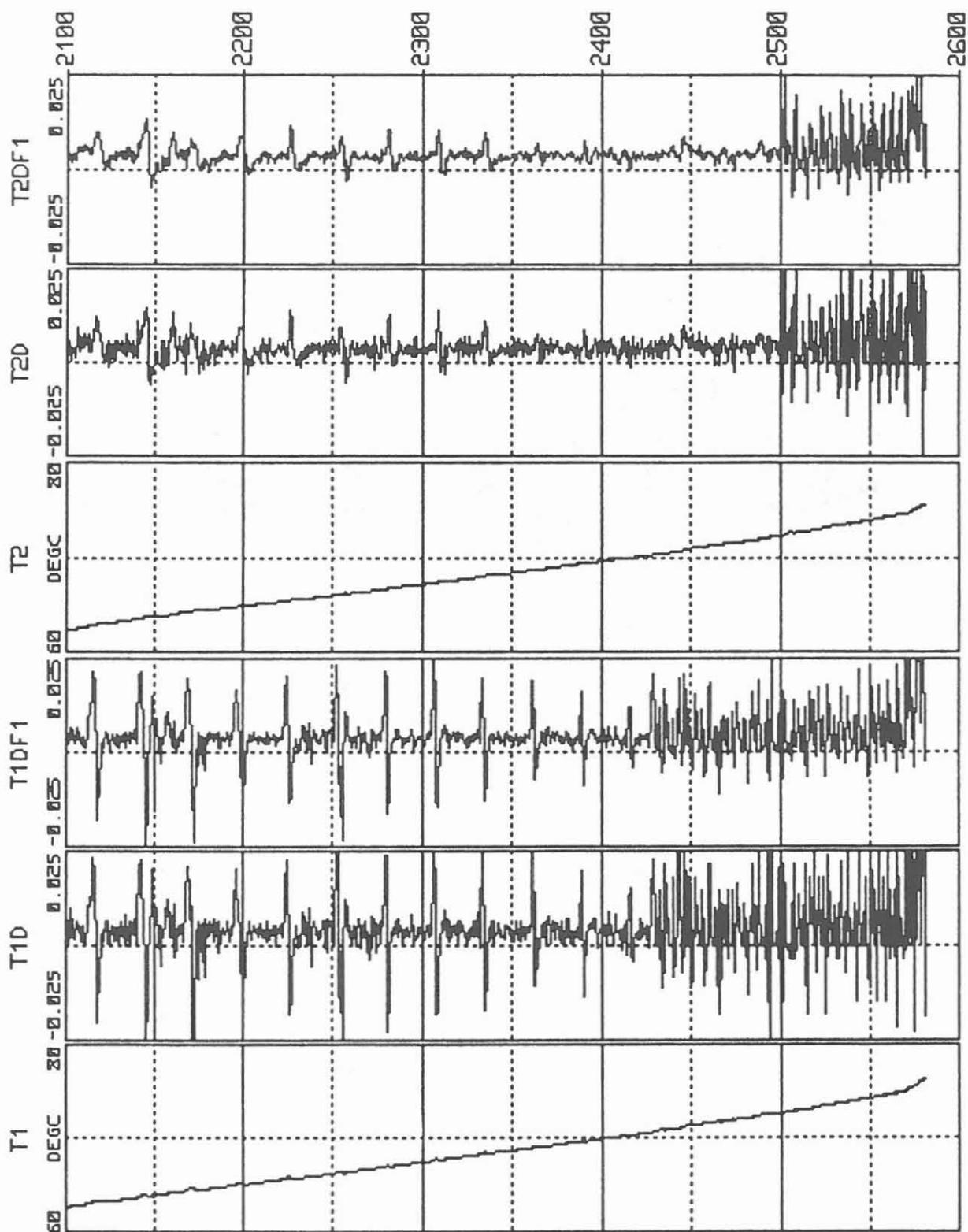


Abbildung 2:

Temperatur-Gradientendarstellung für die Sensoren TMP1 und TMP2  
T1D bzw. T2D ohne Filter  
T1DF1 bzw. T2DF1 mit Filter

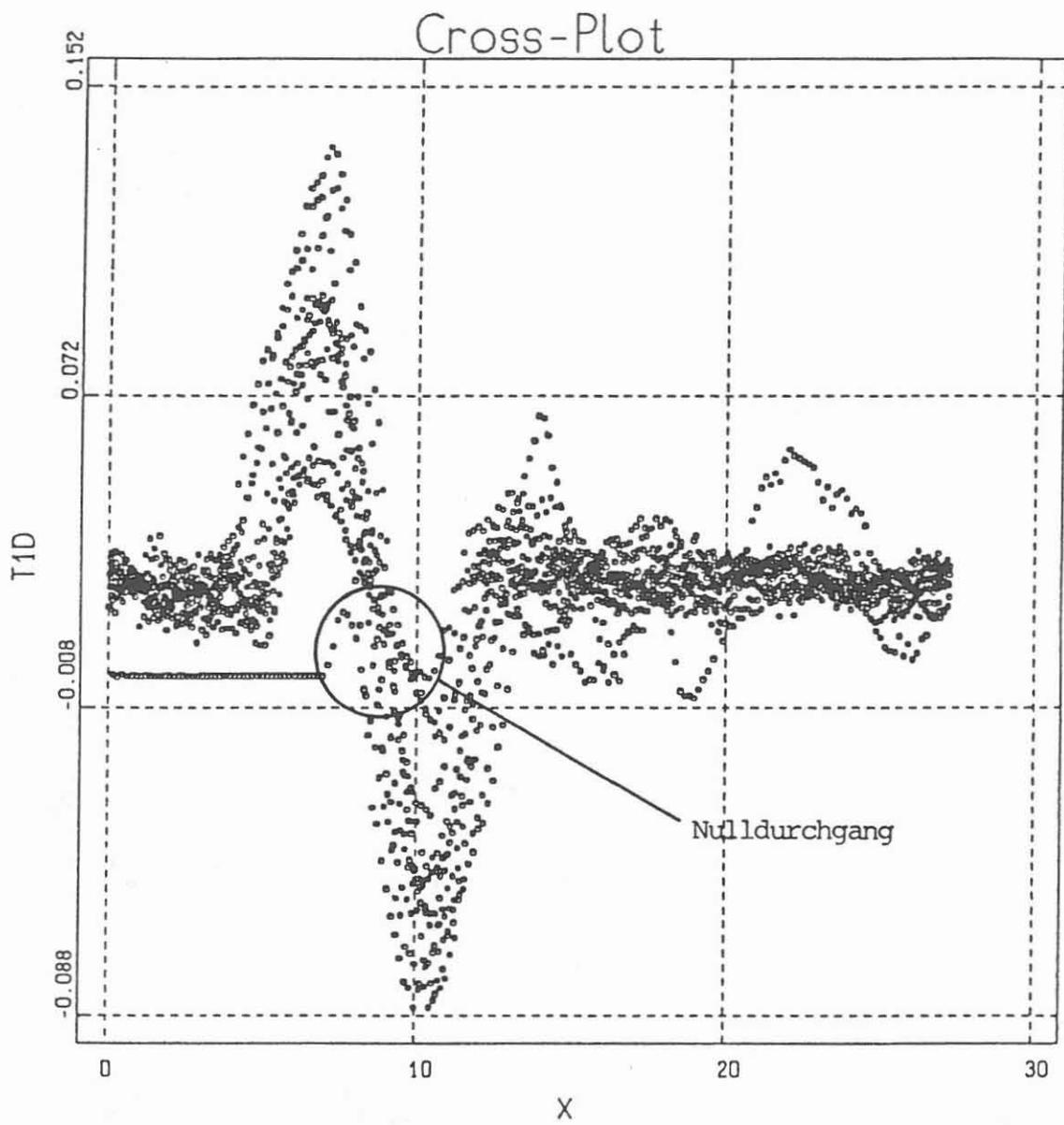


Abbildung 3:  
Versuch einer Teufen-Intervallbestimmung

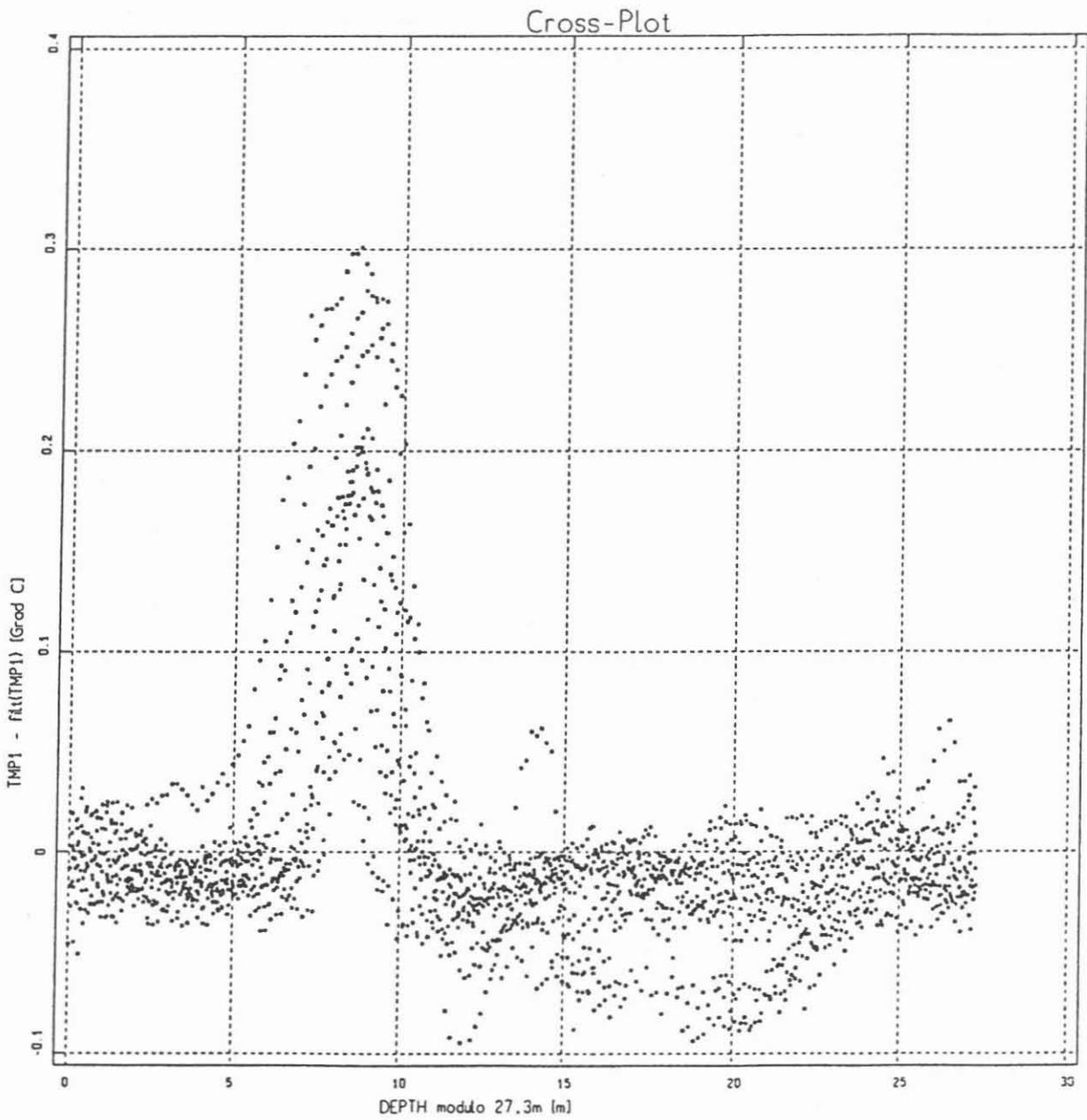


Abbildung 4:

Übereinander gezeichnete Temperatur-Peaks  
von 27,3 m Teufendistanz

aus drei Einzelgestängen von durchschnittlich 9,11 m. Als Folgerung dieser Übereinstimmung der Teufendistanz, der Temperaturmaxima mit den Gestängezuglängen wird im folgenden angenommen, daß beim Ausbau des Gestänges am 5.7.1988 eine Wärmequelle im Abstand eines Gestängezuges jeweils eine Temperaturerhöhung in der Spülung hinterlassen haben muß.

### 3.1 Betrachtungen zur Überprüfung der Temperaturerhöhungen

Bei der folgenden Beschreibung soll eine einzelne Temperaturerhöhung bei 2117 m betrachtet werden. Hierzu stellt sich die Frage: wie groß muß die Anfangstemperatur  $\Delta T_a$  an dieser Stelle gewesen sein, um nach 7,5 Stunden, das ist die Zeit zwischen Vorbeifahrt der Bohrkronen bei 2117 m Teufe und Erreichen der Temperatursonde dieser Teufe, noch eine Temperaturerhöhung von 0,3 K feststellen zu können. Die Ausbau- und Meßzeiten können dem technischen Tagesbericht der Lokation, Abb. 10, entnommen werden.

Mit Hilfe des numerischen Berechnungsprogramms "EDITE" von MUTH & KESSELS (1987) soll im folgenden die Anfangstemperatur der Anomalie ermittelt werden.

#### Annahmen für das Modell I:

- Radius der Bohrung 0,08 m
- Temperaturerhöhung zur Zeit  $t_o$  mit  $\Delta T_a = 10,20$  und 30 K

	<u>Spülung</u>	<u>Gebirge</u>
- Wärmeleitfähigkeit in W/(m K)	0,6	3,0
- spez. Wärmekapazität c in J/(m <sup>3</sup> K)	1000	887
- Dichte $\rho$ in 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	1,03	2,8

Berechnet wurde das instationäre Temperaturfeld eines zweischichtigen, eindimensionalen zylindersymmetrischen Modells. Die Abb. 5 zeigt die Ergebnisse der Berechnung für einen Temperatursprung mit der Anfangstemperatur  $\Delta T_a = 20$  K. Auf der Abszisse ist der Radius der Bohrung und die Eindringtiefe der Temperatur in das Gebirge aufgetragen. Die Ordinate zeigt die Temperaturerhöhung  $\Delta T$ . Die aufgetragenen Kurven geben die Temperaturverteilung der Anomalie bei 2117 m Tiefe nach einer Stunde, fünf und neun Stunden wieder. Daraus ist zu ersehen, daß eine Temperaturerhöhung von 0,3 K im Bereich des Bohrloches mit einer numerischen Berechnung bei  $\Delta T_a = 20$  K möglich ist. In Abb. 6 sind Berechnungskurven mit einer Anfangstemperatur von ebenfalls  $\Delta T_a = 20$  K dargestellt, aber die Berechnung erfolgte mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten für die Spülungsflüssigkeit:

$$\lambda = 0,3; 0,5; 0,6 \text{ und } 0,7 \text{ W/(m K)}.$$

Hier zeigt sich, daß selbst mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,7 - 0,8 W/(m K) eine Temperatur von  $\Delta T = 0,3$  K nach 7,5 h Wartezeit noch meßbar sein muß. In den Abb. 7 - 9 werden noch Ergebnisse aus Berechnungen mit verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten und unterschiedlichen Anfangstemperaturen  $\Delta T_a$  vorgestellt.

Als Ergebnis dieser Modellberechnungen ergibt sich, daß bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,6 - 0,8 W/(m K) eine Anfangstemperatur von  $\Delta T_a \approx 20$  K geherrscht haben muß. Geringere Wärmeleitfähigkeiten sind nicht sehr wahrscheinlich, da Labormessungen an einer 2,5%igen Dehydrillmischung schon Werte über 0,6 W/(m K) erbracht haben (mündliche Mitteilung von Herrn Erbas, TU Berlin).

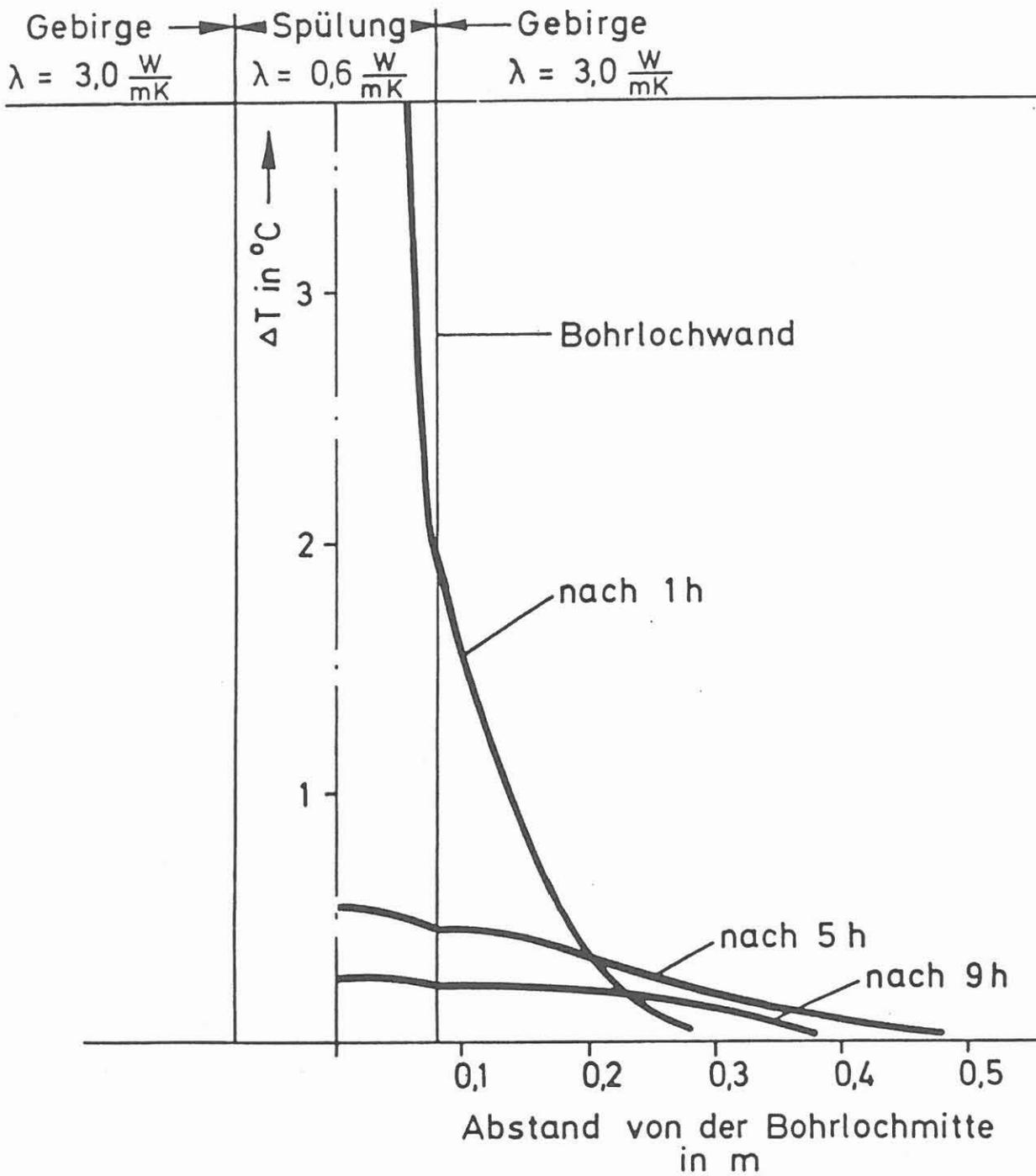
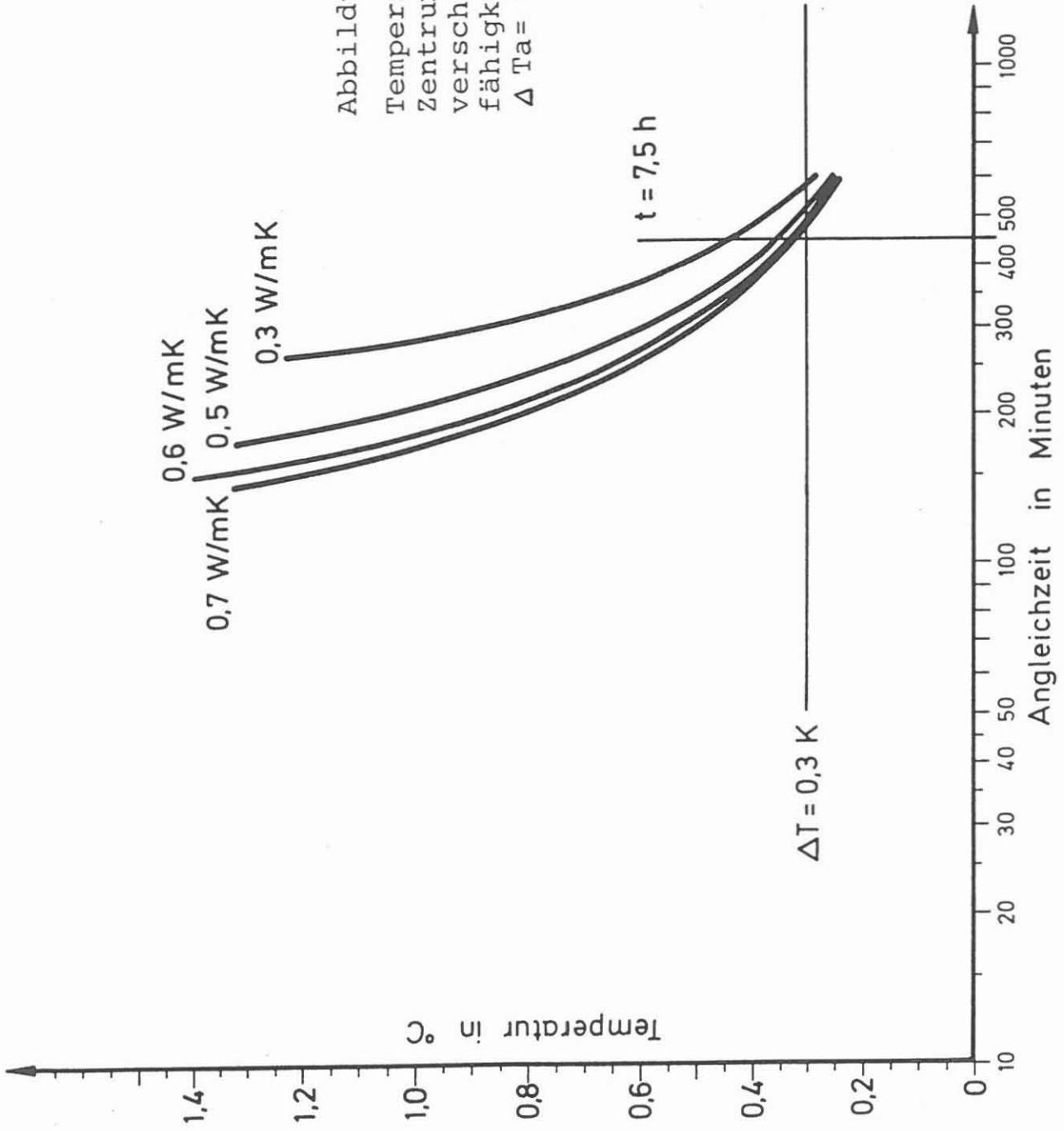


Abbildung 5:

Ergebnisse einer Modellberechnung für die Temperaturverteilung im Bohrloch bei einer Anfangstemperatur von  $\Delta T_a = 20 \text{ K}$

Abbildung 6:  
Temperaturverhalten im  
Zentrum der Bohrung bei  
verschiedenen Wärmeleit-  
fähigkeiten  
 $\Delta T_a = 20 \text{ K}$



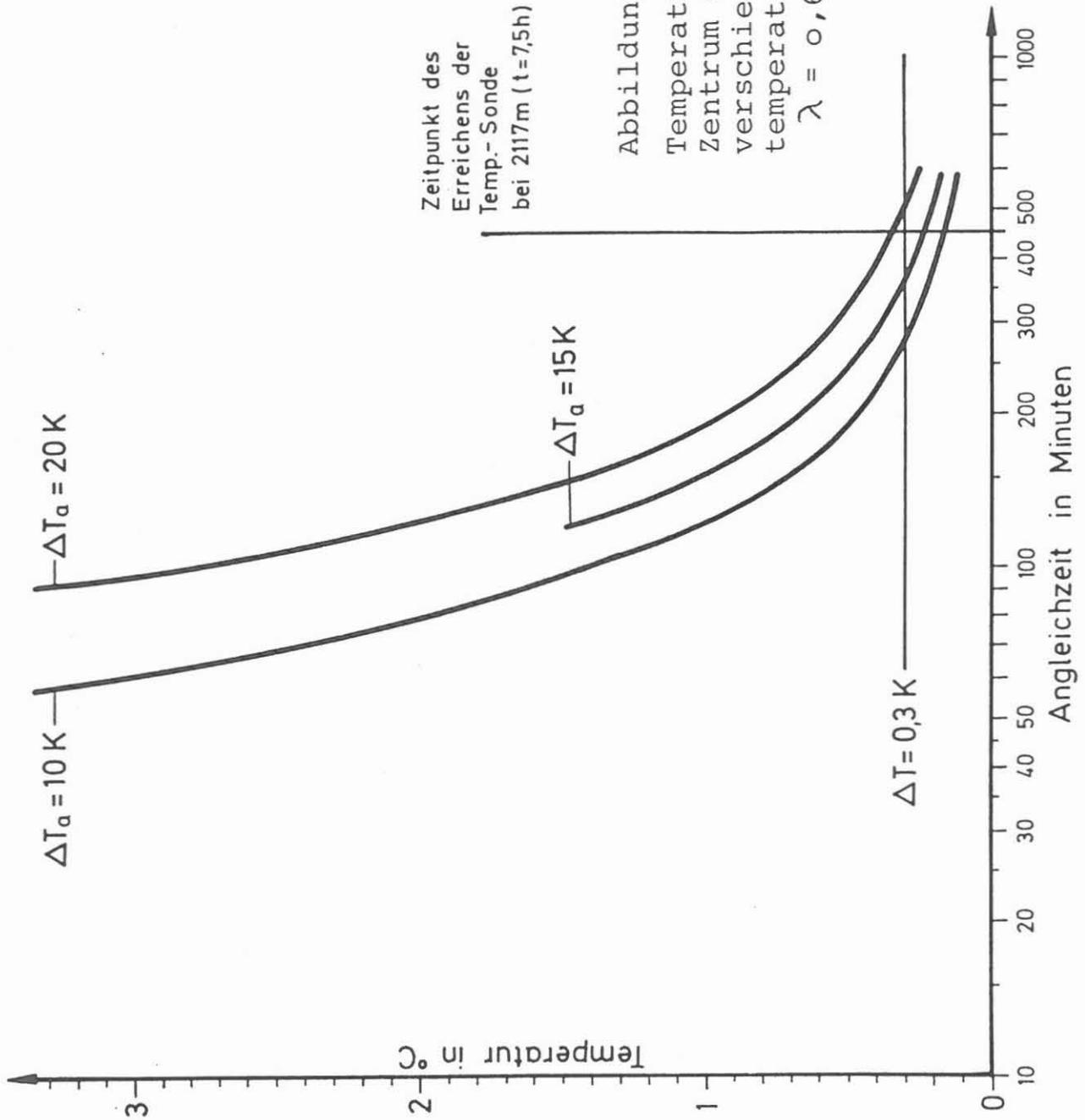


Abbildung 7:  
Temperaturverhalten im  
Zentrum der Bohrung bei  
verschiedenen Anfangs-  
temperaturen  
 $\lambda = 0,6\text{ W/(m K)}$

Abbildung 8:  
Temperaturverhalten im  
Zentrum der Bohrung bei  
verschieden Anfangstem-  
peraturen.  
 $\lambda = 0,5 \text{ W/(m K)}$

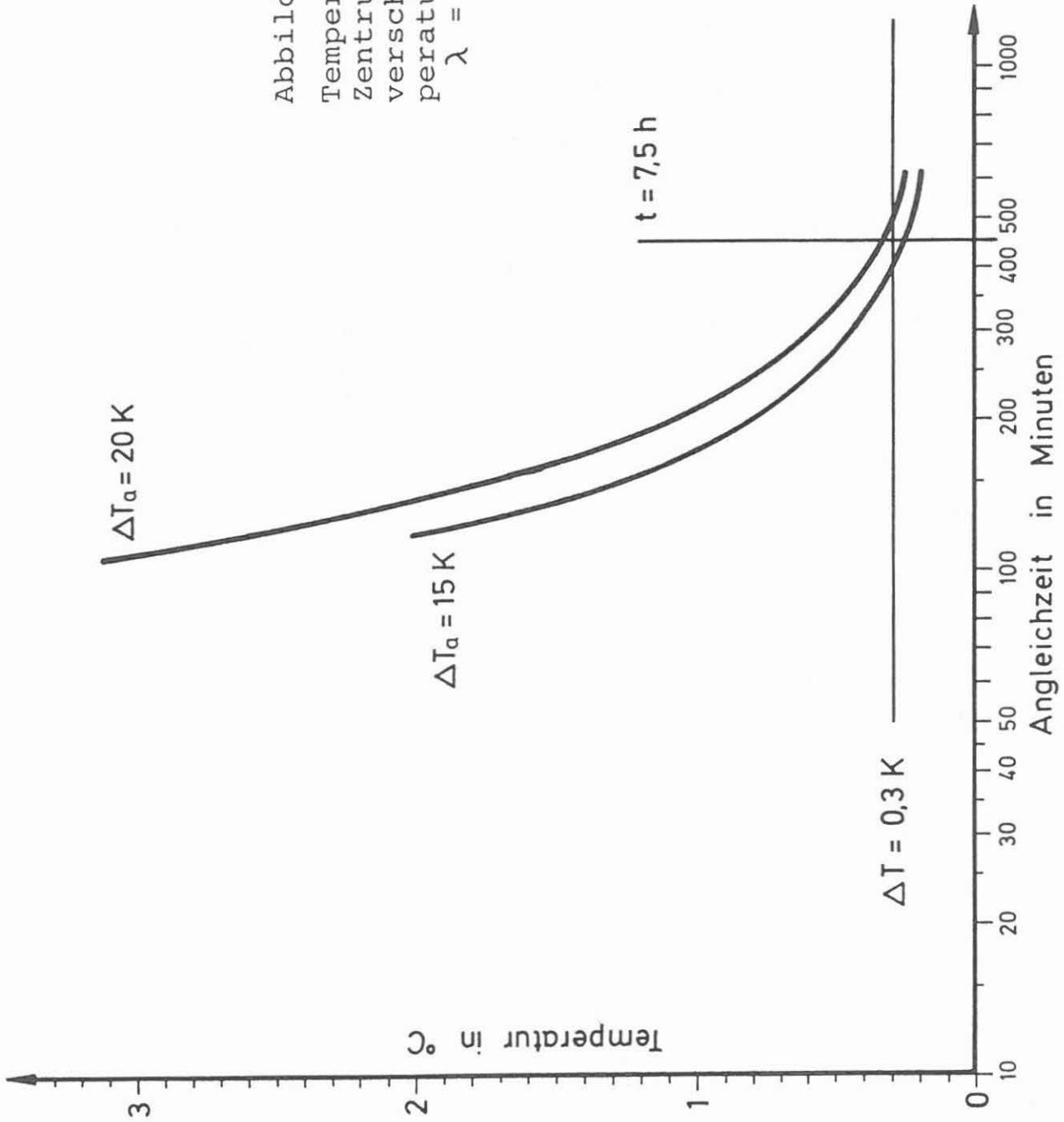
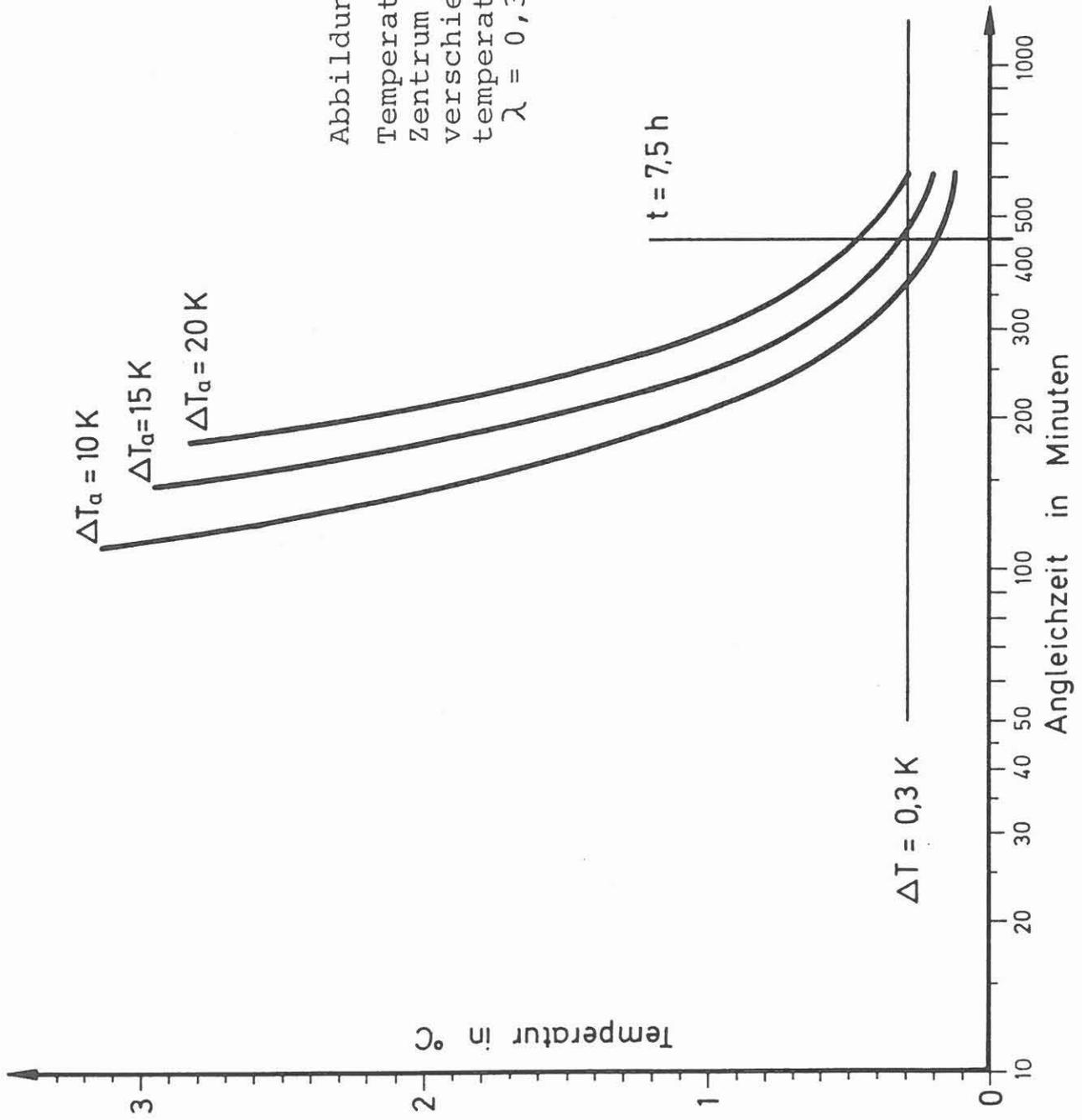


Abbildung 9:  
Temperaturverhalten im  
Zentrum der Bohrung bei  
verschiedenen Anfangs-  
temperaturen  
 $\lambda = 0,3 \text{ W/(m K)}$



### **Verursacher der Temperaturerhöhung**

Die Frage nach der Ursache der Temperaturerhöhung ist nicht eindeutig erklärbar. Nachweisbar ist nur, daß nach dem Tagesbericht vom 5.7.1988, Abb. 10, in der Zeit von 8.30 - 9.30 ohne Bohrfortschritt auf der Bohrlochsohle gebohrt wurde und dabei die Bohrkronen Nr. 87/1 so warm wurde, daß die Matrix zum Teil aufschmolz. Abb. 11 zeigt die stark beanspruchte Bohrkronen. Ferner ist aufgrund überhöhter Temperatureinwirkung das Neigungs-/Temperatur-Meßgerät ausgefallen, das in 6,5 m Höhe oberhalb der Bohrkronen fixiert ist. Und schließlich sind die Temperaturmeßergebnisse vom 5.7.1988 eindeutig auf Temperaturanomalien und nicht auf technische Meßfehler zurückzuführen.

Ausgehend von der Vermutung, daß die Bohrkronen der Verursacher der Temperaturanomalien sein könnten, soll im folgenden mittels einiger Modellrechnungen überprüft werden, ob die erwärmte Bohrkronen bzw. der untere Bereich des Gestänges in der Lage ist, die Temperaturerhöhung so lange zu halten, daß nach 7400 Sekunden noch genügend Wärme für eine Temperaturabgabe von  $\Delta T = 20 \text{ K}$  zur Verfügung steht. Die Zeitspanne von 7400 s ergibt sich aus der Wartezeit, 46 cm über der Sohle und der Ausbauphase bis 2117 m Teufe.

Zum Verständnis der folgenden Modellbetrachtungen ist an dieser Stelle eine Erläuterung des Arbeitsablaufes beim Gestängeausbau vom 5.7.1988 angebracht. Hierzu sind der Tagesbericht, Abb. 10, und der Gestängeteufenplan (Gestängeaufmaß), Tab. 1, zu betrachten. Der Kernversuch ohne Bohrfortschritt erfolgte von 8.30 - 9.30; danach wurde das Gestänge 0,46 m über die Bohrlochsohle hochgezogen und zum Ziehen des Innenkernrohres ca. 1 Stunde (3600 s) von 9.30 - 10.30 dort stehengelassen. Nach dem Ausbau des Innenkernrohres wurden zunächst drei 9 m-Gestänge einzeln abgelegt, um dann routinemäßig Gestängezüge



DEUTSCHE SCHACHTBAU- UND TIEFBOHRGESELLSCHAFT MBH

TAGESBERICHT

① Bohrung/Anlage KT B- VB 16H14/23 Datum 5.07.88 Tage seit Aufbau/Bohrbeginn 302, C-P-P

② Teufe 2578,9 m Leistung \_\_\_\_\_ m Zeit 1,0 h Bohrfortschritt \_\_\_\_\_ m/h

③ Formation \_\_\_\_\_

④ Gasanzeigen \_\_\_\_\_ ppm/% max. \_\_\_\_\_ ppm/% I.T. \_\_\_\_\_ m TG \_\_\_\_\_ ppm/% Auftrieb \_\_\_\_\_ h

⑤ Zeitaufteilung 06.00 Uhr bis

- 8:30 Uhr = 2,5 h KE-WL Gew. 5,15 m
- 9:30 Uhr = 1,0 h versucht zu koppeln DE (kein Bohrfortschritt)
- 10:30 Uhr = 1,0 h SKR gezogen
- 16:00 Uhr = 5,5 h Uhrzeitung ausgeh bis 7° RS
- 16:30 Uhr = 0,5 h 12 m Fabeisil nachgenommen
- 18:00 Uhr = 1,5 h Weiter ausgebaut Kinnrohr angelegt
- 19:00 Uhr = 1,0 h HTB-Locking
- Uhr = \_\_\_\_\_ h 1. Temp. Diff. GR, Spfg. widerstd., Spfg Temp.
- Uhr = \_\_\_\_\_ h 2. 4 1/2" Kaliber, Mag. Hzi, GR, Spfg. widerstd., Spfg Temp
- 6:00 Uhr = 4,0 h Kinnrohr aufgen. Kinnre verschraubt SKR kontrolliert
- Uhr = \_\_\_\_\_ h und eingeb. bis 1000 m
- Uhr = \_\_\_\_\_ h \_\_\_\_\_
- Uhr = \_\_\_\_\_ h \_\_\_\_\_
- Uhr = \_\_\_\_\_ h \_\_\_\_\_

⑥ Bohrstrang Kinnre, Kinnr. 3/4" Stab. 1x ULDC, 1x SST (10,22) 2x ULDC + WLDP

⑦ Lotungen EL HTB Log.  
2575 m 23 Grad 26,85 Az  
 \_\_\_\_\_ m \_\_\_\_\_ Grad \_\_\_\_\_ Az  
 \_\_\_\_\_ m \_\_\_\_\_ Grad \_\_\_\_\_ Az

⑧ Meißel-nr.	<u>87/1</u>	<u>88/1</u>
Meißel-Ø	<u>6</u>	<u>6</u>
Typ	<u>EL JP</u>	<u>EL JP</u>
Serien-Nr.	<u>47756</u>	<u>80421</u>
Düsen-Ø		
Ausbau	<u>2578,9</u>	
Einbau	<u>2488,5</u>	<u>2578,9</u>
Leistung	<u>90,4</u>	
Zeit	<u>49</u>	
Bohrfortschritt	<u>1,84</u>	
Kosten		
Zustand	<u>800</u>	
Belastung	<u>5-6</u>	
Drehzahl	<u>220</u>	
Drehmoment	<u>-420</u>	
Spulvolumen	<u>185-220</u>	
Spuldruck	<u>80-95</u>	
Auftriebsgeschw. DC/DP	<u>1</u>	<u>1</u>
Düsenstrahlgeschwindigkeit		
Pumpe 1	Zyl. Ø _____ Hub _____ bar	
Pumpe 2	<u>3 1/2</u> Zyl. Ø _____ Hub _____ bar	
DC-Laufzeit	<u>1</u> h L. Inspekt. <u>219,5</u>	
Jar-Laufzeit	_____ h L. Wechsel _____	

⑨ Spülungsanalyse
Zeit <u>9:00</u> Uhr
Typ <u>2h, dril</u>
SG <u>124</u> kg/l
az/raz <u>491/44</u> s
t <u>24,5</u> °C
ww/lk <u>165/117</u> ml/mm
pH/pt <u>10,59/0,52</u>
sd <u>0,1</u> Vol. %
Festst. <u>15</u> Vol. %
Öl _____ Vol. %
sz/szs <u>471</u> mg/l
SV <u>27</u>
PV <u>19</u>
YP <u>16</u>
gst <u>2/3</u>
cal <u>2,1</u> mg/l
mg/l <u>1,7</u> mg/l
hl <u>0,8</u> °dH
Slab. _____
Akl. _____
HT/HP <u>1</u>
Benetzg. Test _____

⑩ Feststoffkontrolle
Sieb <u>500</u> mesh Sieb <u>2500</u> mesh
Sieb 3 _____ mesh Sieb 4 _____ mesh
Desander _____ Zyklone _____ l/h _____ h/Tag
Desilter _____ Zyklone _____ l/h _____ h/Tag
Mudcleaner 1 _____ Zyklone _____ mesh _____ h/Tag
Mudcleaner 2 _____ Zyklone _____ mesh _____ h/Tag
Zentrifuge 1 <u>242</u> / <u>14000</u> l/h <u>24</u> h/Tag
Zentrifuge 2 <u>Beijersen</u> / _____ l/h <u>24</u> h/Tag
⑪ Ablufmengen
Schmutzwasser _____ m³/Tag _____ m³/Bohrung
Spülung _____ m³/Tag _____ m³/Bohrung
Feststoffe _____ m³/Tag _____ m³/Bohrung
⑫ Chemikalien-Verbrauch
_____ m³ Wasser _____ m³ Zentrat
<u>25</u> kg <u>Ferrocryl</u>
_____ kg _____

⑬ L.-Verrohrung 7 Zoll LK/RS i.T. 479,5 m Gradient am RS 2,1 bar/10 m  
 Verlust-/Zuluß-Zone i.T. \_\_\_\_\_ m Formation \_\_\_\_\_ Gradient \_\_\_\_\_ bar/10 m

⑭ Bemerkungen  
EL 9:00-9:15  
WL Seit auf K261 umgespült

Unterschrift/Anlagenf. [Signature]

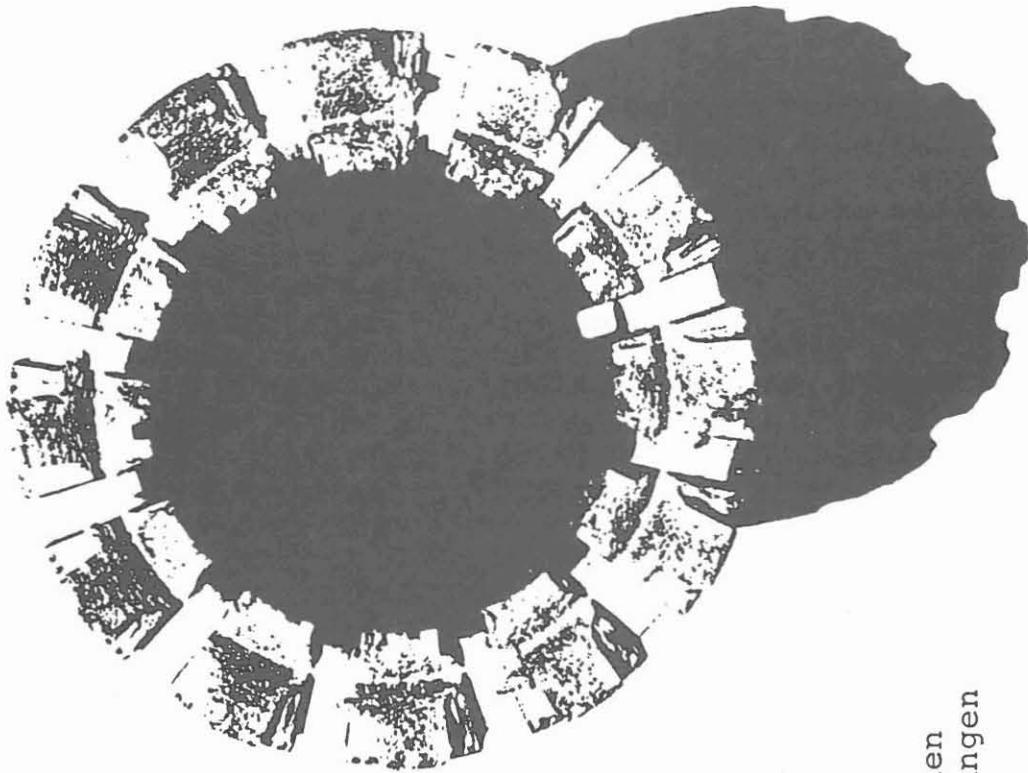


Abbildung 11:  
Bohrkrone mit starken  
Verschleißerscheinungen



Tabelle 1;

Gestängeaufmaß vom 5.7.1988, Teufe 2578,9 m bis 2090,17 m

Teufe	2578,90
	0,46
Ziehen von Sohle	2573,44
Stange defekt, einzeln abgelegt	9,05
	2569,39
Stange defekt, einzeln abgelegt	9,04
	2560,35
Stange defekt, einzeln abgelegt	9,04
	2551,31
Strang abgelegt	27,14
	2524,17
" "	27,14
	2497,03
" "	27,14
	2469,89
" "	27,10
	2442,79
" "	27,13
	2415,66
" "	27,15
	2388,51
" "	27,12
	2361,39
" "	27,12
	2334,27
" "	27,11
	2307,16
" "	27,07
	2280,09
" "	27,09
	2253,00
" "	27,19
	2225,81
" "	27,13
	2198,68
" "	27,17
	2171,51
" "	27,13
	2144,38
" "	27,08
	2117,30
" "	27,13
	2090,17

von 27 m Länge auszubauen. Kalkuliert man aus der gesamten Ausbaupzeit den Zeitpunkt, an welchem die Bohrkronen die Tiefe von 2117 m erreichte, so kommt man auf eine Abkühlungszeit von ca. 7400 s. Für die Kalkulation wurde eine Zeit von 210 s je Gestängezug zugrunde gelegt.

### Berechnung Modell II

Als Modell II wird ein 3fach zylindrisch geschichteter Vollraum betrachtet. Beginnend von der Bohrlochachse folgte die erste Schichtgrenze (linkes Bild, Abb. 12) zwischen Bohrspülung und Bohrkronen, die zweite Grenze zwischen Bohrkronen und Spülung (Clearance) und die dritte Schichtgrenze zwischen Spülung und Bohrlochwand (Gebirge).

Folgende Annahmen wurden für das Modell II gemacht:

	<u>Spülung</u>	<u>Bohrkronen</u>	<u>Gebirge</u>
- Wärmeleitfähigkeit in W/(m K)	0,6	45	3,0
- spez. Wärmekapazität c in J/(m <sup>3</sup> K)	1000	127	887
- Dichte $\rho$ in 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	1,03	7,8	2,8
- Temperaturerhöhung zur Zeit $T_0 = 600, 800$ und $1000$ K			
- Radius der inneren Spülungssäule 0,055 m			
- mittlere Wandstärke des aufgeheizten Metallkörpers = 15 mm			
- Ringraum (Clearance) = 6 mm			

Bei der Berechnung wird simultan davon ausgegangen, als hänge das erwärmte Gestänge unbewegt in der Bohrung. Der Temperaturangleich wird in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Die Abb. 12 gibt den Temperaturverlauf im Zentrum der Bohrung T1, im Zentrum der Bohrkronen T2 und an der Bohrlochwand T3 wieder. Die Kurvenscharen beziehen sich auf die Anfangstemperatur der

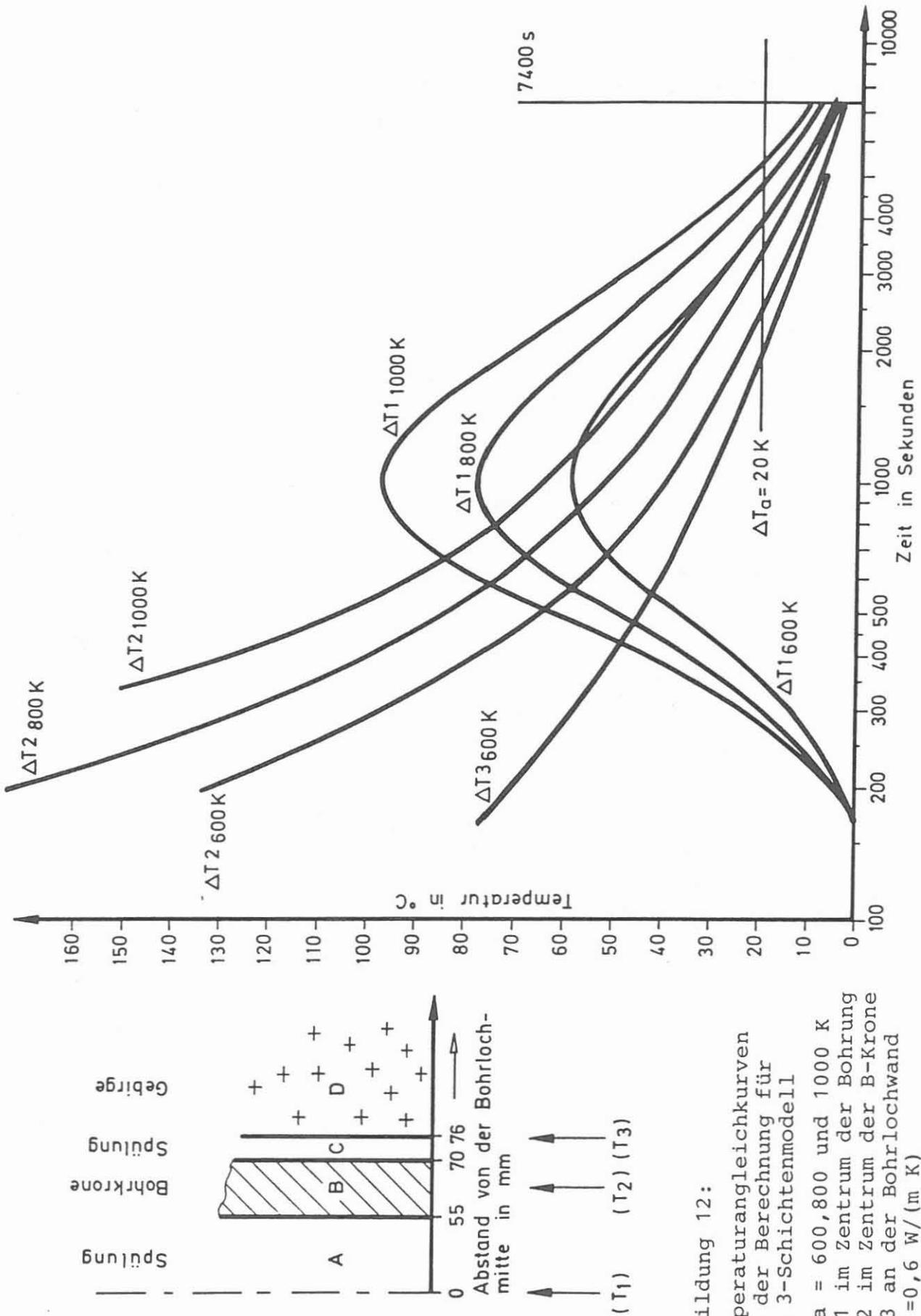


Abbildung 12:

Temperaturangleichkurven aus der Berechnung für ein 3-Schichtenmodell

- Δ T<sub>a</sub> = 600, 800 und 1000 K
- T<sub>1</sub> im Zentrum der Bohrung
- T<sub>2</sub> im Zentrum der B-Krone
- T<sub>3</sub> an der Bohrlochwand
- λ = 0,6 W/(m K)

Bohrkrone von jeweils 600, 800 und 1000 °C. Die Abbildung zeigt, daß nach 7400 s die erforderliche Temperatur von  $\Delta T = 20$  K (Modell I) nicht mehr vorhanden ist. Änderungen in den Vorgaben für das Modell II, wie z. B. die Herabsetzung der Wärmeleitfähigkeit der Spülung von 0,6 auf 0,3 W/(m K), begünstigen zwar die Aussage (Abb. 13), tragen aber nicht wesentlich zur Klärung der Herkunft der Anomalie bei. Ferner blieb bei den Vorgaben für das Modell II die jeweils wechselnde Anfangstemperatur nach jedem Gestängezug, die ebenfalls zur Erniedrigung der Endtemperatur führt, unberücksichtigt.

#### **Literatur:**

Muth, M. & Kessels, W., 1987: EDITE; ein eindimensionales Temperaturfeldberechnungsprogramm. - Abteilungsbericht, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München, 26 S.

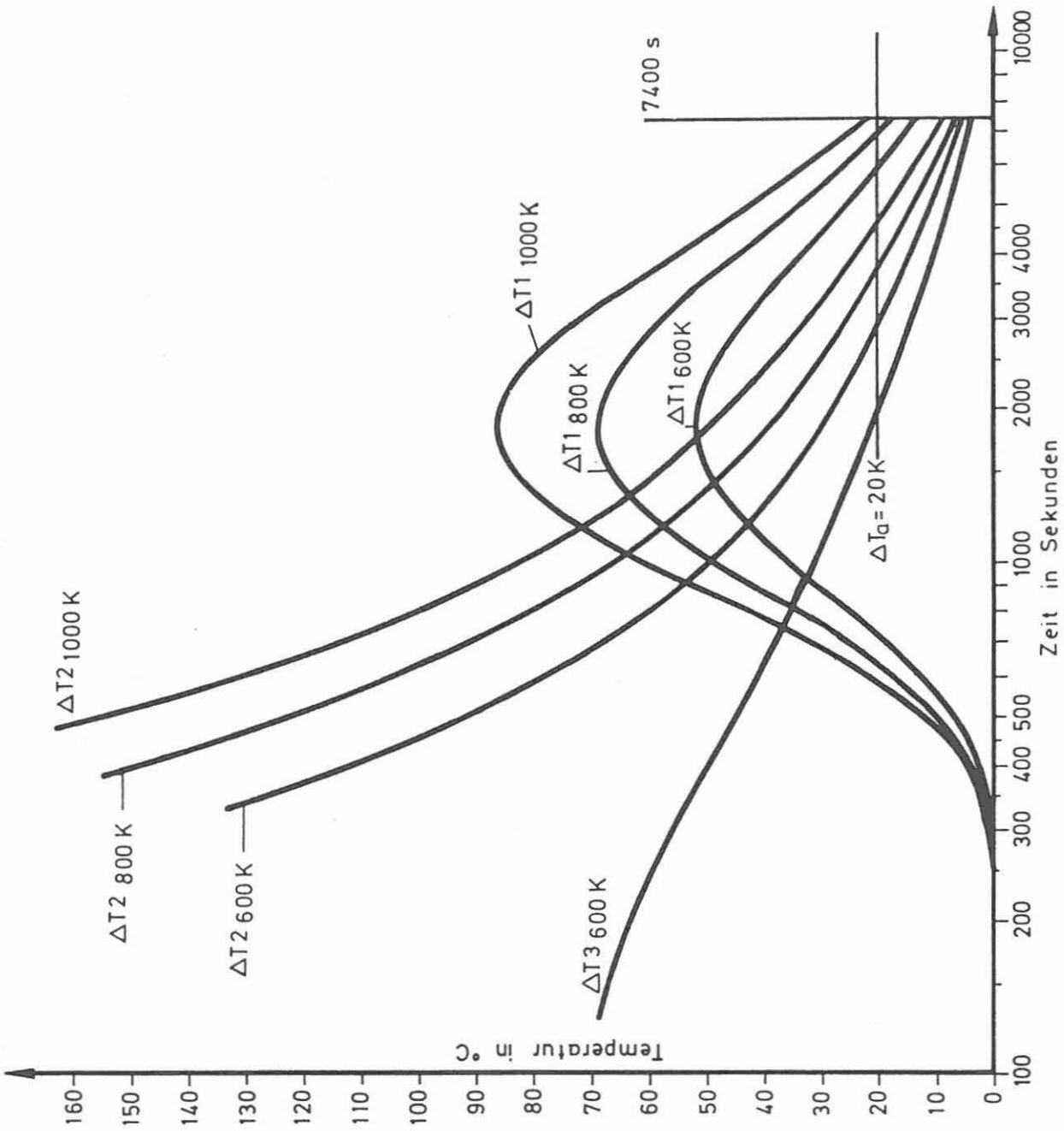


Abbildung 13:  
Temperaturangleichkurven  
aus der Berechnung für  
ein 3-Schichtenmodell  
 $\Delta T_a = 600, 800$  und  $1000$  K  
T1 im Zentrum der Bohrung  
T2 im Zentrum der B-Krone  
T3 an der Bohrlochwand  
 $\lambda = 0,3$  W/(m K)