

### 8.3 Temperaturstörungen

**Ausführender:** Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover,  
KTB-Arbeitsgruppe Bohrlochgeophysik, Dr. W. Kessels

<u>Lfd.-Nr.</u>	<u>Datum</u>	<u>Projekt/Messung</u>	<u>Status</u>
VB-A33	18.04.88	NLFB-103 167	Vortrag DGG-Tagung in Köln

**Thema:**

Abschätzung der zu erwartenden Temperaturstörungen im Gebirge durch das Erstellen der Kontinentalen Tiefbohrung der Bundesrepublik Deutschland (KTB).

**Ziel:**

Rechtzeitiges Erkennen der zu erwartenden Temperaturstörungen für Abschätzungen dieses Einflusses auf bestimmte Größen und Vorgänge, wie z. B. auf das Spannungsfeld in der Umgebung der Bohrung, auf die Bohrlochmeßtechnik im ausgekühlten Bohrloch etc.

**Zusammenfassung:**

Die Beherrschung der hohen Temperaturen, die beim Erstellen der kontinentalen Tiefbohrung zu erwarten sind, ist ein wesentliches für die Projektplanung zu lösendes Problem. Für die Abschätzung der Temperatur in der Bohrung auch während der Bohrphasen wurde das FD-Programm BOA entwickelt. Nach einer einführenden Erläuterung des Problems Wärmetauscher Bohrung wurde das Programm anhand von in der KTB-Vorbohrung gewonnenen Meßdaten verifiziert. Mit den bei der technischen Durchführung gewonnenen Daten als Eingangs- und Randparameter für eine numerische Simulationsrechnung wurde eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen erzielt.

Abschließend wurden dann einige Rechnungen durchgeführt, die der Abschätzung dienen sollen, welche Temperaturen in einer 10000 m tiefen Bohrung während der Betriebsphase zu erwarten sind.

## Einleitung

Bei der Planung der supertiefen Bohrung des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland (KTB) spielen Temperaturprobleme in der Planung und Durchführung eine besondere Rolle.

In der nachfolgenden Tabelle ist dies skizziert.

**Tabelle 1: Die Bedeutung der durch den Bohrvorgang hervorgerufenen Temperaturstörung im Gebirge für die Projektierung der Kontinentalen Tiefbohrung**

**\*\*aus geowissenschaftlicher Sicht:**

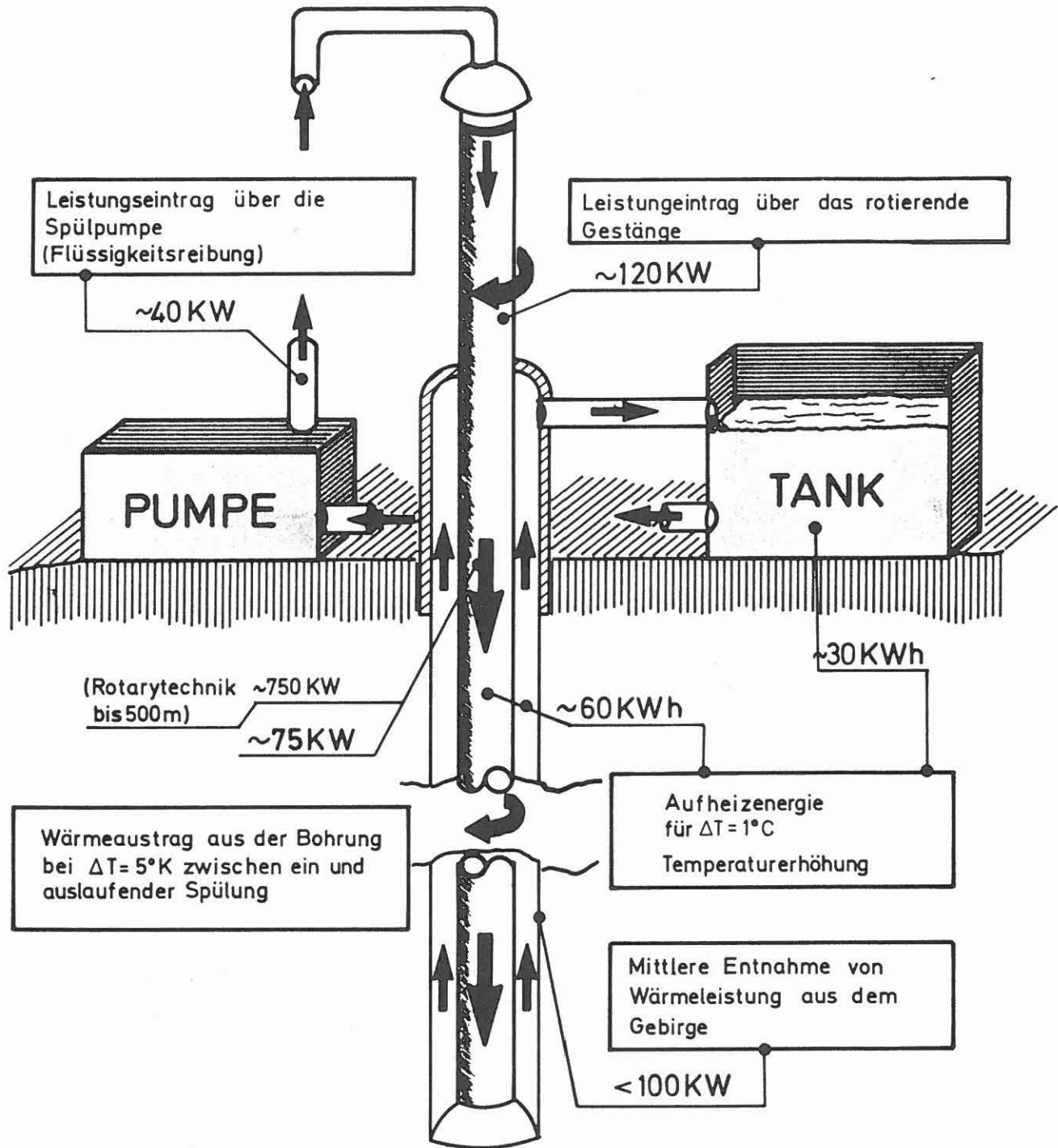
- Ermittlung der ungestörten Gebirgstemperatur
- Beeinflussung des mechanischen Spannungsfeldes in der Umgebung der Bohrung
- Bestimmung der Bereiche von Spülungszu- und -abflüssen
- Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit aus dem Temperaturangleichsvorgang

**\*\*aus Sicht der technischen Durchführung:**

- Meißelaufheizung
- Spülungsstabilität und Austragsfähigkeit
- Bohrlochmeßtechnik im ausgekühlten Bohrloch
- Bohrlochstabilität

In Abb.8.17 wird zunächst der Energieumsatz und die Energiespeicherung in einer Bohrung betrachtet. Die hier aufgeführten Werte ergaben sich aus den bisherigen Daten der KTB Vorbohrung (Engeser, Heinisch - Unveröffentlichte Ergebnisse der Mud Logging Unit der KTB Vorbohrung, 1988), extrapoliert auf 3000 m Tiefe.

Als Wärmespeicher sind hier insbesondere die Spülung im Bohrloch selbst und im Spültank zu nennen. Nicht zu vernachlässigen sind der mechanische Wärmeleistungseintrag über das rotierende Gestänge und über die Spülungszirkulation, denn letztendlich wird der wesentliche Teil der aufgebrachten Leistung in Wärme umgesetzt. In der Vorbohrung wurde deutlich, wie unterschiedlich Bergbaubohrtechnik (Mining Drilling) und Ölfeldbohrtechnik (Rotary Drilling) den Wärmehaushalt einer Bohrung beeinflussen. Beim Rotary-Drilling beträgt die Spüldurchflußmenge ein Mehrfaches dessen, was beim Mining Drilling üblich ist. Beim Rotary-Verfahren ist schon bei kleinen Temperaturdifferenzen zwischen ein- und auslaufender Spülung die aus dem Bohrloch abtransportierte Wärmemenge so groß, daß sie bei einer 3000 m tiefen Bohrung gegenüber den anderen Wärmemengen dominiert.



Größenordnung der Energiespeicherung und des Energietransportes in der KTB Vorbohrung in 3000 m Tiefe (Seilkerntechnik)

[KESSELS]

Abb. 8.17  
KTB

Will man ein so kompliziertes Wärmetauschersystem wie eine Bohrung in seinen Abhängigkeiten erfassen, benötigt man zeitabhängige Temperaturmessungen an möglichst verschiedenen Punkten des Wärmetauschersystems. Dabei ist davon auszugehen, daß eine Berechnung der Spülungstemperaturen während der Bohrphase nur mit einem instationären Berechnungsverfahren möglich ist (Bentsen R. und Marshall D., 1982, Raymond L., 1969).

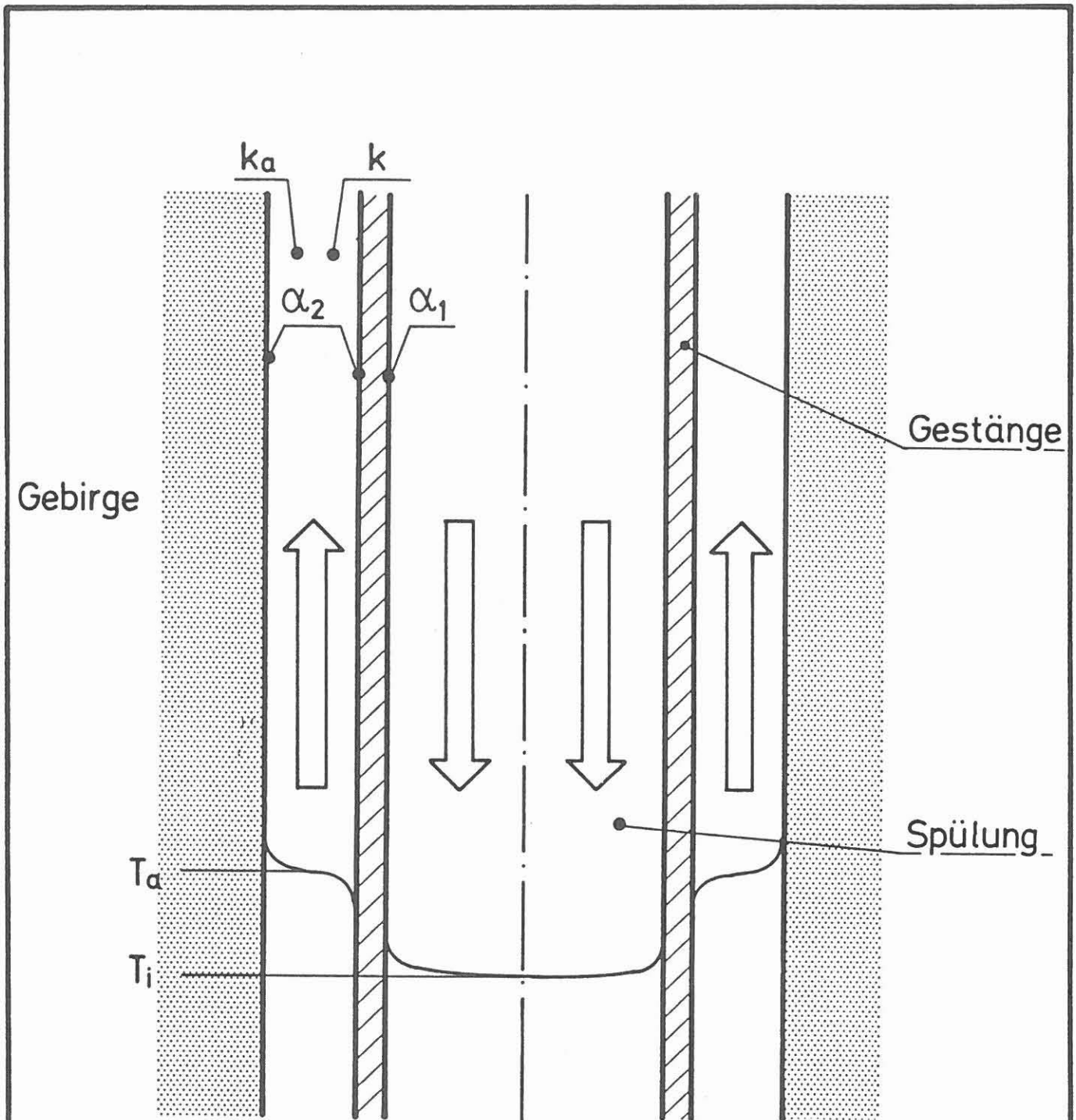
In der KTB-Vorbohrung werden während der Spülungszirkulation kontinuierlich Temperaturmessungen am Ein- und Auslauf des Spültanks durchgeführt. Im Gestänge wird in ca. 8 m über dem Meißel die Temperatur der absteigenden Spülung mit einem Memorygerät der Fa. Christensen aufgezeichnet und kann nach jedem Kernmarsch in einstellbarer Samplingrate abgelesen werden. Gerade diese Zirkulationstemperatur im Bohrlochtiefsten ist für die Erfassung des Wärmetauschersystems Bohrung besonders wichtig. Nach Beendigung der Bohrarbeiten kann die Temperatur in der Bohrung durch zu verschiedenen Zeiten gefahrene Temperaturlogs beobachtet werden (Dornstätter, 1987). Letztere Messungen können u. U. dazu dienen, die Temperaturleitfähigkeit des Gebirges zu bestimmen (Dornstätter, 1987). Notwendig sind sie auch, um auf die ungestörte Gebirgstemperatur extrapolieren zu können (Hänel, 1980).

Diese an der KTB Vorbohrung gewonnenen Meßdaten werden nun dazu verwandt, das von der KTB-Projektleitung entwickelte Programm BOA zu verifizieren.

BOA steht hier für Bohrlochauskühlung. Bei diesem Programm handelt es sich um ein numerisches instationäres Finite-Differenzen-Programm unter Einbeziehung der Spülrheologie in die Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten sowie Einbeziehung des Bohrfortschritts.

Eine besondere Bedeutung kommt in der Berechnung des Wärmetauschers Bohrung der Bestimmung der Wärmeübergangs-Koeffizienten und dem Wärmedurchgangskoeffizienten zu (Kessels, 1987). Die Abb. 8.18 soll dies veranschaulichen.

Der Kehrwert von  $1/\alpha$  gibt dabei an, welcher Wärmewiderstand zu überwinden ist, um eine Wärmemenge aus dem Inneren der Spülung zum Gestänge zu transportieren. Diese Wärmeübertragung erfolgt durch Wärmeleitung und Konvektion (Turbulenzen) in der Spülung. Bei einer sehr hochviskosen Spülung wird der konvektive Transportanteil unterdrückt und so der Wärmeaustausch zwischen auf- und absteigender Spülung und dem Gebirge verringert.



Der Wärmedurchgangs-Koeffizient  $k$  gibt den Wärmedurchgang durch das Gestänge bei gegebenen mittleren Temperaturen  $T_i$  und  $T_a$  in der ab- bzw. aufsteigenden Spülung an.  $\alpha$  sind die Wärmeübergangskoeffizienten.

Schematische Abbildung des Wärmeaus-tausches zwischen absteigender und aufsteigender Spülung [Kessels]

Abb. 8.18

KTBB

Die Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten bei gegebenen Spülungstemperaturen erfolgt im Programm BOA durch die Berechnung

1. der Prandtl-Zahl  $Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda}$

2. der Reynolds-Zahl  $Re = \frac{vL\rho}{\eta}$

3. der Nusselt-Zahl  $Nu = Nu(Re, Pr)$

4. Berechnung der Wärmeübergangszahl  $\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L}$

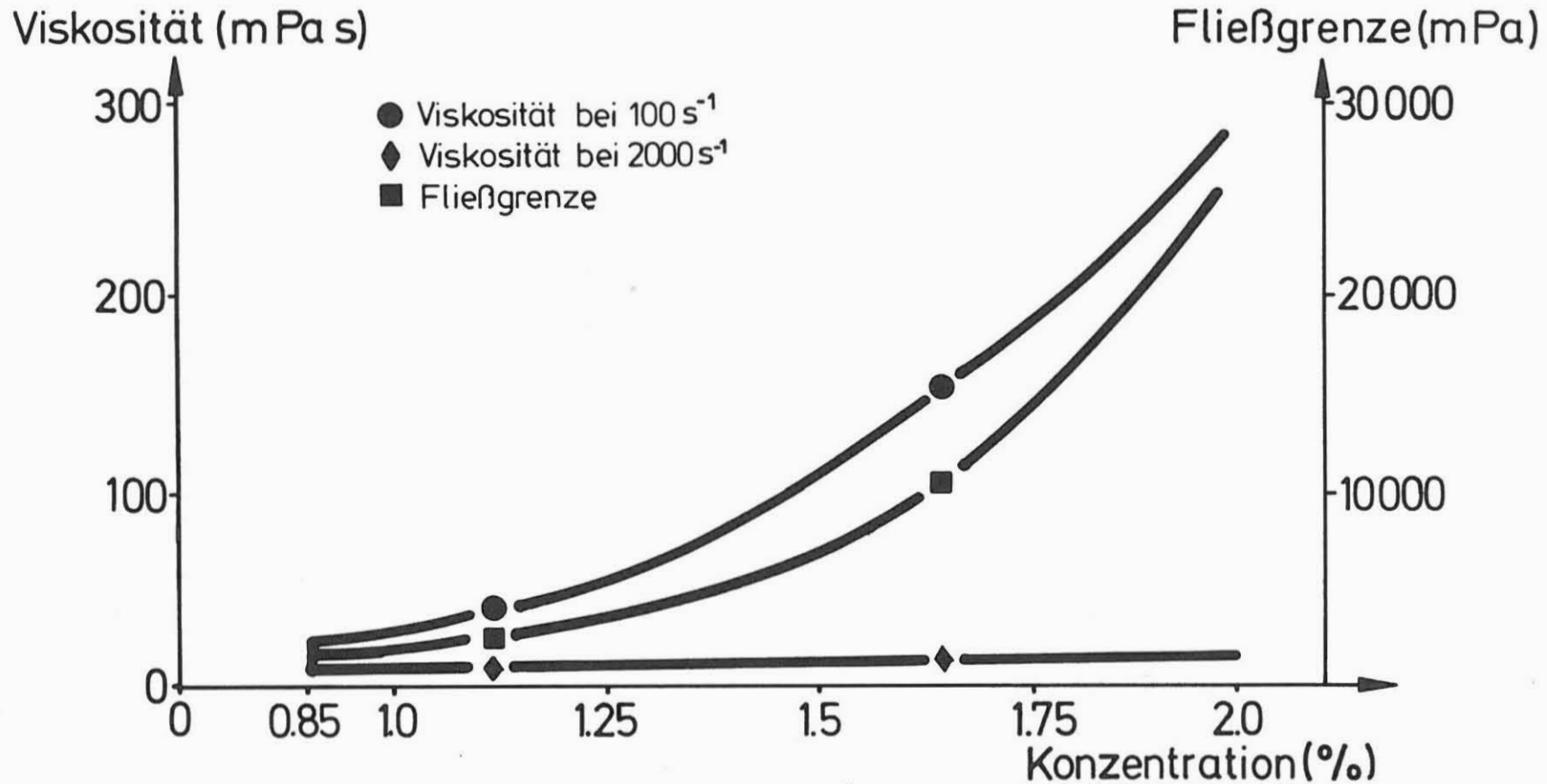
mit  $v$  = mittlere Strömungsgeschwindigkeit  
 $\rho$  = Dichte der Flüssigkeit  
 $\eta$  = Viskosität  
 $\alpha$  = der gesuchten Wärmeübergangszahl  
 $\lambda$  = der Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeit  
 $L$  = charakteristische Längenabmessung für den Wärmeaustauschprozeß (z. B. Rohrdurchmesser)  
 $c_p$  = spezifische Wärme

Dieses Berechnungsverfahren ist als ein in der Verfahrenstechnik erprobtes Berechnungsverfahren für Wärmetauscher zu bezeichnen (VDI Wärmeatlas, 1977).

In der Anwendung auf den Wärmetauscher Bohrung findet sich eine Erläuterung des Verfahrens bei Kessels (1987).

Kompliziert wird jedoch die Berechnung für den Wärmetauscher Bohrung, da sich die Bohrspülung im allgemeinen Fall mehr oder weniger stark thixotrop verhält. Diese Thixotropie ist aus bohrtechnischer Sicht sehr erwünscht, denn sie verbessert den Bohrkleinaustrag. Der Spülung in der KTB-Vorbohrung wird der Zusatz "Dehydril HT" zugegeben, um die Austrageigenschaften der Spülung zu verbessern.

In Abb. 8.19 ist die Viskosität der Spülung in Abhängigkeit von der Dehydril-Konzentration aufgezeichnet (Engeser, 1988). Beim Seilkernverfahren schwankt die Konzentration zwischen 0,5 % und 1,5 %, während sie nach jetziger Planung beim Rotary-Verfahren auf 1,5 % - 1,75 % eingestellt werden soll.



Rheologisches Verhalten von Dehydril HT in Abhängigkeit von der Konzentration nach Henkel KGaA

Abb. 8.19  
**KTB**

Zum Vergleich besitzt Wasser eine Viskosität von ca. 1 mPas bei einer zu vernachlässigenden Fließgrenze. Außerdem besitzt die Spülung mit Dehydril-Zusatz noch eine Fließgrenze, die auf der rechten Skala dargestellt ist. Diese gibt an, welche Scherspannung in der Flüssigkeit vorhanden sein muß, damit diese zu fließen beginnt.

Da die Viskosität als der dominierende Parameter für das Wärmetauschsystem Bohrung anzusehen ist, wurde eine analytische Formel für Viskosität an Hand von Labormessungen der Fa. Henkel wie folgt ermittelt:

Zugrunde gelegt ist ein Casson-Modell

$$\eta = 1,26 \left( \sqrt{\frac{794 \cdot C^{4,05}}{D}} + \sqrt{1,22 e^{1,105 C}} \right)^2 e^{-9,17 \cdot 10^{-3} \cdot T} \text{ [mPas]}$$

für die Abhängigkeit der Viskosität vom Schergefälle und eine exponentielle Temperaturabhängigkeit. In dieser Gleichung sind das Schergefälle in %, D in  $s^{-1}$  und die Temperaturen in °C anzusetzen. Die Abweichung von den Mußwerten liegt mit dieser Formel in der Größenordnung von 10 %.

Die in der Mud Logging Unit ermittelten Viskositätswerte bei den Schergefällen  $D = 300$  und  $600 s^{-1}$  weichen allerdings durch pH-Wertschwankungen der Spülung und Verunreinigungen von obiger Formel ab. Für die folgenden Temperaturrechnungen, durchgeführt zum Vergleich mit gemessenen Temperaturdaten, wurde daher die bei einem Schergefälle von  $300 s^{-1}$  gemessene Viskosität zugrundegelegt. Die in die numerischen Rechnungen eingegebenen Dehydril-Konzentrationen sind also auf Viskositätsmessungen bezogen. Neben einer Iteration, die die nichtlinearen Viskositätseigenschaften der Spülung bei der Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten mitberücksichtigt, wird bei dem Programm BOA der zeitabhängige Bohrfortschritt und der Eintrag an Reibungswärme über das Gestänge und den Meißel mit eingerechnet.



### **Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen der KTB-Vorbohrung**

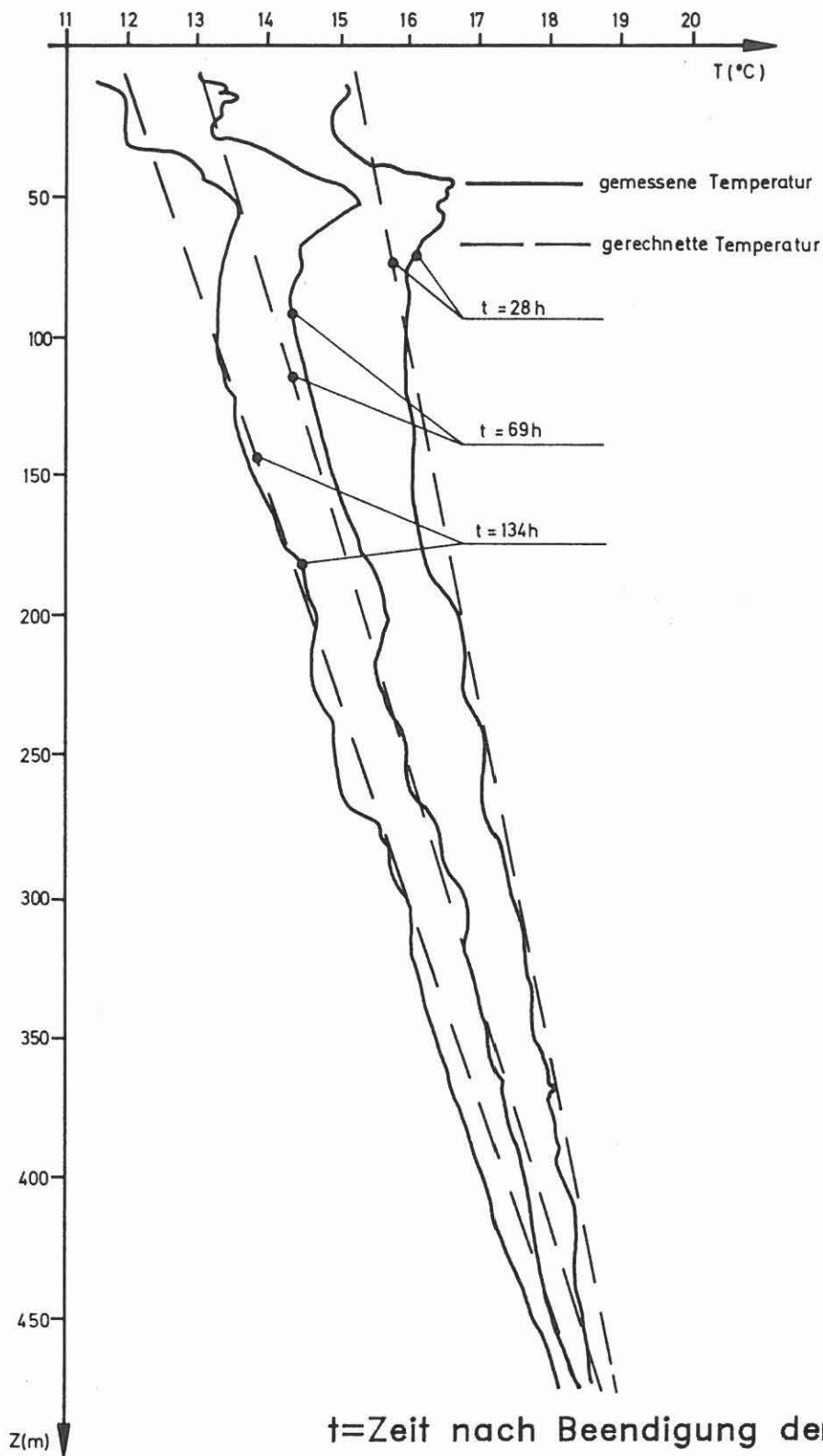
An zwei Meßbeispielen aus der KTB Vorbohrung sollen nun Genauigkeit und Grenze des Berechnungsprogramms überprüft werden.

Die erste Rechnung betrifft den Teufenabschnitt der KTB-Vorbohrung bis 480 m. Hier wurde mit dem Rotary-Verfahren gebohrt, und nach Beendigung der Bohrarbeiten der Temperaturangleichprozeß durch mehrfach ausgeführte Temperaturmessungen in der Bohrung beobachtet. Für eine Simulationsrechnung sind die Eingabeparameter, wie durch die bohrtechnischen Messungen vorgegeben, eingesetzt. Diese Parameter werden von bohrtechnischer Seite so vollständig ermittelt, daß in die Rechnung nur die thermischen Parameter des Gebirges eingehen; für die Wärmeleitfähigkeit des Gebirges wurde immer ein Wert von 3,5 W/mK (Burkhardt, 1987) eingesetzt. Aufgrund der großen Bohrlochrandausbrüche mußte für den Bohrlochdurchmesser nicht das Soll-Maß des Meißels sondern das Ist-Maß aus den Kalibermessungen als gemittelter Wert eingesetzt werden.

Gemessene und gerechnete Temperaturen gehen für drei Zeitpunkten nach Beendigung der Bohrarbeiten aus Abb. 8.20 hervor. Man erkennt, daß Rechnungen und Messung im Mittel und in der Zeitabhängigkeit relativ gut übereinstimmen. Die Berechnung wurde nicht hinsichtlich einer bestmöglichen Anpassung der Wärmeleitfähigkeit des Gebirges und des Temperaturgradienten optimiert. Hier sollte nur die prinzipielle Richtigkeit der berechneten Werte verifiziert werden.

Einige Vergleichsrechnungen mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten des Gebirges zeigten allerdings, daß die Temperaturstörung einer Bohrung relativ unempfindlich auf Änderungen der Wärmeleitfähigkeit des Gebirges reagiert. Eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit führt zwar zu einem schnelleren Temperaturausgleich, aber während der Bohrarbeiten wird auch eine größere Wärmemenge in das Gebirge abgegeben, so daß durch die beiden gegenläufigen Prozesse nur eine relativ schwache Beeinflussung in der Temperatur der Bohrung selbst auftritt. Einen wesentlich stärkeren Einfluß auf die Auskühlung besitzt die Variation der Viskosität der Bohrspülung auf die Temperaturstörung, wie aus dem nächsten Beispiel hervorgeht.

Bei einer Bohrtiefe von ca. 1.500 m wurde ein größeres Bohrloch-Meßprogramm durchgeführt, so daß im tieferen Teil der Bohrung bei Beginn der Bohrarbeiten von einem wieder relativ ausgeglichenen Temperaturprofil ausgegangen werden konnte. Bei Beginn der Bohrarbeiten zeichnete der Temperatur- und Neigungsrekorder, der in Meißelnähe in der absteigenden Spülung installiert ist, die Meßwerte wie in Abb. 8.21 dargestellt auf. Deutlich sieht man hier die verschiedenen Abschnitte des Bohrprozesses vom Ausbau des Kernrohres bis zur reinen Bohrtätigkeit.



t=Zeit nach Beendigung der Bohrarbeit  
Wärmeleitfähigkeit des Gebirges in der  
Berechnung: 3,5W/mK  
Ungestörter Temperaturgradient in der  
Rechnung: 22K/km

Gemessene und mit dem Programm BOA  
berechnete Temperaturen im ersten  
Abschnitt der KTB Vorbohrung [Kessels]

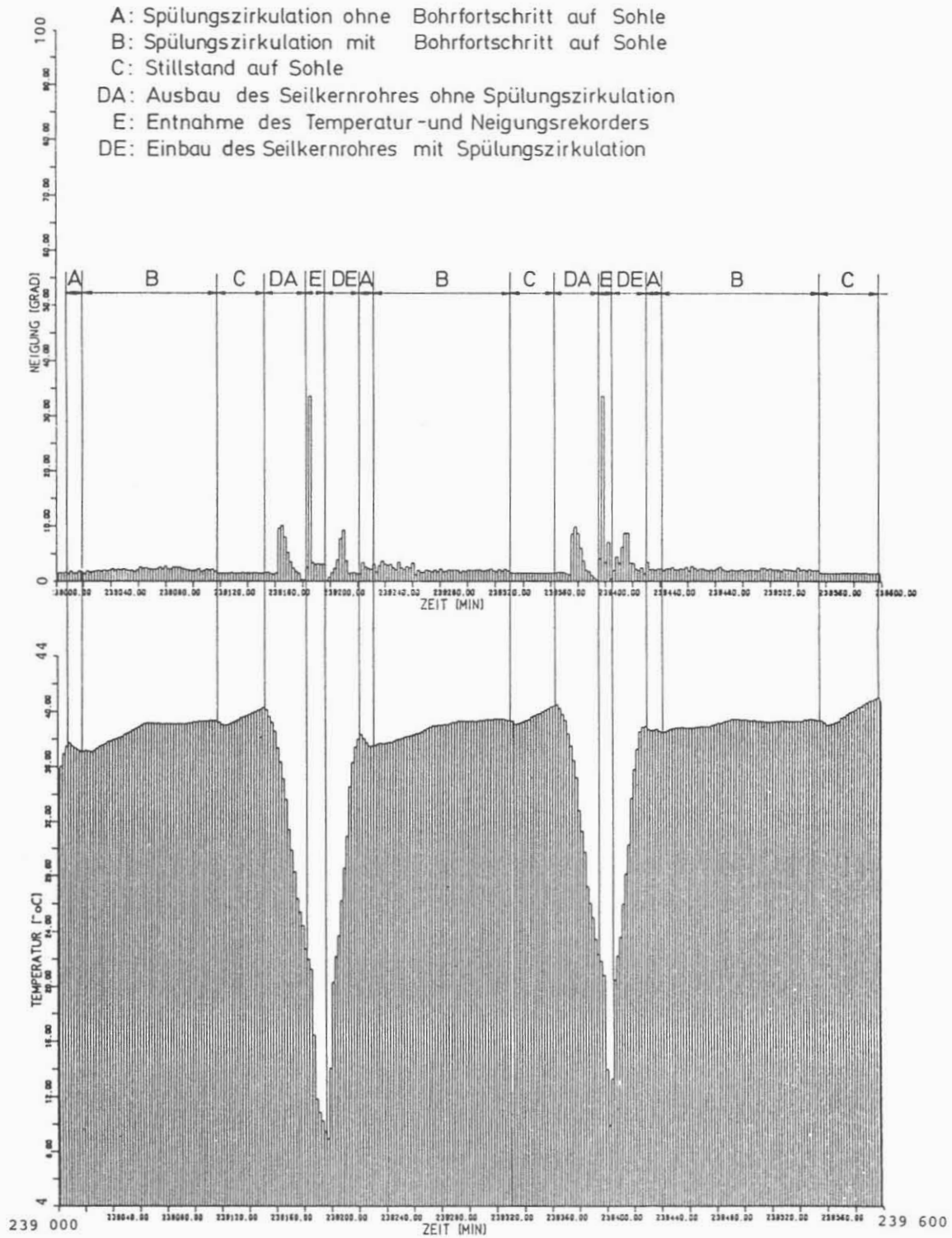
Abb. 8.20  
**KTB**

Das erste kleine Temperaturmaximum nach dem Einbau kennzeichnet hier die Spülungszirkulation ohne Bohrtätigkeit. Der anschließende Anstieg der Temperatur ist durch die Meißelwärme zu erklären, die über den Ringraum abtransportiert wird und im Wärmeaustausch auch den Gestängeinnenraum erwärmt. Insbesondere wenn die Spülungszirkulation unterbrochen wird, erzeugt die Wärmeübertragung vom wärmeren Ringraum in den kühleren Gestängeinnenraum einen Temperaturanstieg (Abschnitt C).

Der Ausbau des Kernrohres mit dem Temperatur- und Neigungsrekorder wird sowohl bei den Temperaturwerten, als auch bei den Neigungswerten deutlich. In dieser Aufzeichnung ergab sich eine Spülungstemperatur von ca. 38 bis 40 °C während der Zirkulation (nach 6 h Bohrzeit). Eine numerische Simulationsrechnung wurde mit den zur Anwendung gekommenen technischen Parametern durchgeführt. Die Spülung besaß einen aus der gemessenen Viskosität berechneten Dehydril-Zusatz von 0,75 %. Um den Einfluß der Viskosität auf die Temperatur in der Bohrung zu dokumentieren, wurde die erste Rechnung mit einem Dehydril-Zusatz von 1 % durchgeführt (s. Abb. 8.22). Die gemessene Temperatur ist in dieser und den folgenden Abbildungen durch Schwärzung markiert. Man sieht, daß die Auskühlung für diese hochviskose Spülung an der Bohrlochwand wesentlich größer ist als der berechnete Wert. In Abb. 8.23 wurde eine solche Rechnung für einen Dehydril-Zusatz von 0,5 % durchgeführt, was nach den 6 h Bohrzeit eine erheblich geringere als die gemessene Auskühlung ergab.

Eine Rechnung für eine Konzentration von 0,75 % ergab einen Temperaturwert an der Bohrlochwand (Abb. 8.24), der der gemessenen Temperatur am nächsten kommt. Die Übereinstimmung von Messung und Rechnung wird nun noch besser, wenn man aus der Rechnung nicht die Bohrlochwandtemperatur sondern die Temperatur der absteigenden Spülung betrachtet (s. Abb. 8.25).

Diese Übereinstimmungen dokumentieren die Verlässlichkeit der durchgeführten Rechnungen.

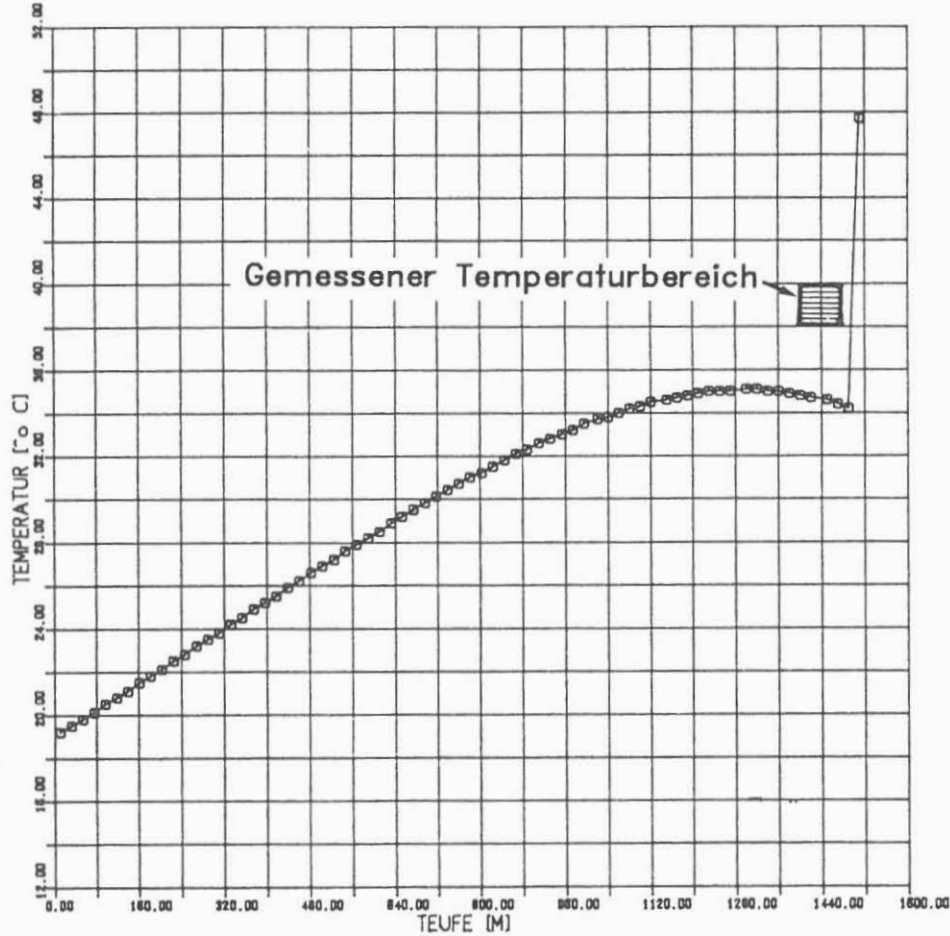


Temperatur und Neigungsaufzeichnung in der KTB  
Vorbohrung im Bohrstrang bei einer Bohrteufe von ca.1550m  
(Abstand vom Bohrmeißel = 6,5m)

Abb. 8.21  
**KTB**

PARAMETER

SYMBOL  $\odot$   
 ZEIT (H) 0.750E+01  
 RADIUS (M) 0.760E-01



EINGEBEDATEN

BERECHNUNGSZEITSCHRITT (S)	6.000
ENDZEITPUNKT (S)	0.27E+05
AUSTRUCKINTERVALL	500
BERECHNUNGSTIEFE IN RADIALER RICHTUNG (UNTEN) (M)	10.0000
SPUELUNG, DURCHFLUSSMENGE (L/MIN)	220.0000
EINTRITTSTEMPERATUR (C)	16.00
SPUELUNGSINTERVALL (H)	24.00
ROUNDTripINTERVALL (H)	0.03
DICHTE (G/CM <sup>3</sup> )	1.000
→ KONZENTRATION DES ADDITIVES (o/o)	1.000
REIBUNGSWAERME GESTAENGE (W/M)	40.000
REIBUNGSWAERME MEISSEL (W)	15000.
CHAR. HYDRODYNAMISCHE LAENGE INNEN (M)	20.00
CHAR. HYDRODYNAMISCHE LAENGE AUSSEN (M)	5.00
VERROHRUNG, DURCHMESSER (AUSSEN) (CM)	12.70
WANDDICKE (CM)	1.00
WAERMELEITFAEHIGKEIT (W/M*K)	30.00
BOHRGESCHWINDIGKEIT (M/H)	0.0001
ANFANGSTEUFE (M)	1500.00
TIEFE DER BOHRLOCHABSATZE (M) 1. ABSATZ	1520.00
BOHRLOCHDURCHMESSER (CM) 1. ABSATZ	15.20
BODENOBERFLAECHENTEMPERATUR (C)	8.50
TEMPERATURGRADIENT IM GEBIRGE (C/KM)	26.00
GEOLOGISCHE SCHICHTEN, GRENZE DER 1. SCHICHT (M)	1620.00
WAERMELEITFAEHIGKEIT (W/MK)	3.50
SPEZ. WAERMEKAPAZITAET (J/M <sup>3</sup> )	2000000.00

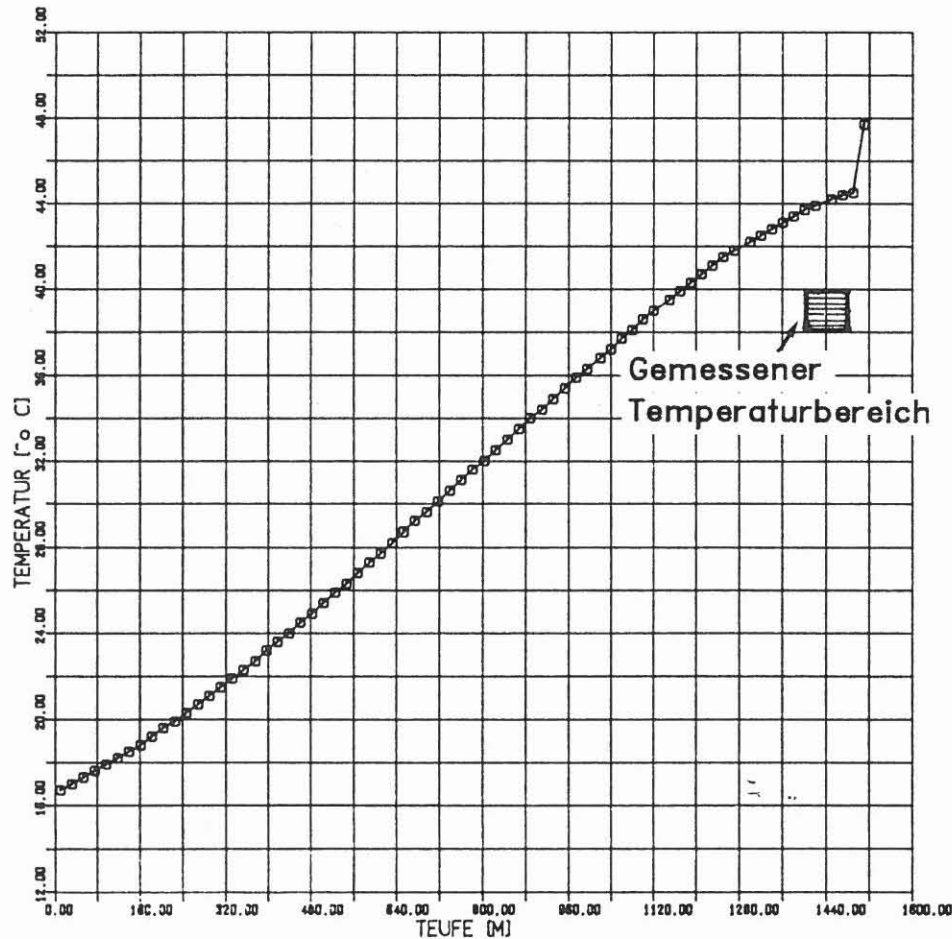
Berechnetes Temperaturprofil an der Bohrlochwand  
 in der KTB Vorbohrung

[KESSELS]

Abb. 8.22  
**KTB**

PARAMETER

SYMBOL  $\square$   
 ZEIT (H) 0.750E+01  
 RADIUS (M) 0.760E-01



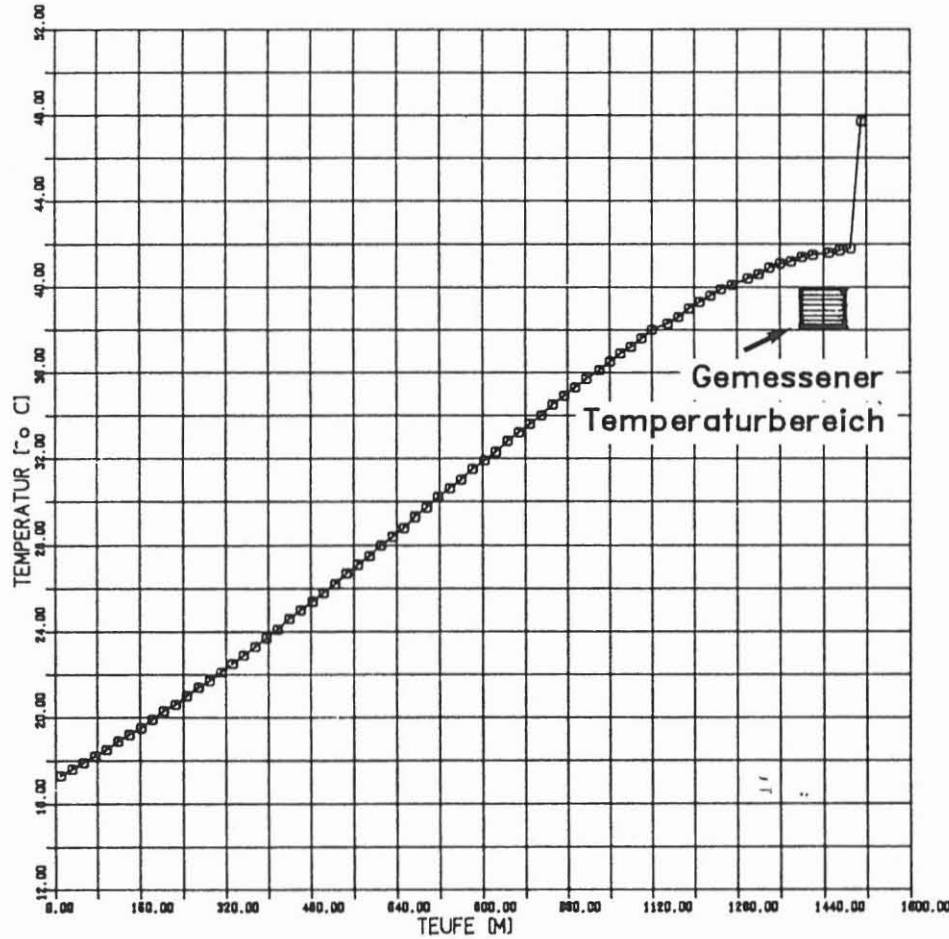
EINGEBEDATEN

BERECHNUNGSZEITSCHRITT (S)	6.000
ENDZEITPUNKT (S)	0.27E+05
AUSDRUCKINTERVALL	500
BERECHNUNGSTIEFE IN RADIALER RICHTUNG (UNTEN) (M)	10.0000
SPÜELUNG, DURCHFLUSSMENGE (L/MIN)	220.0000
EINTRITTSTEMPERATUR (C)	16.00
SPÜELUNGSINTERVALL (H)	24.00
ROUNDTRIPINTERVALL (H)	0.03
DICHTE (G/CM <sup>3</sup> )	1.000
KONZENTRATION DES ADDITIVES (o/o)	0.500
REIBUNGSWAERME GESTAENGE (W/M)	40.000
REIBUNGSWAERME MEISSEL (W)	15000.
CHAR. HYDRODYNAMISCHE LAENGE INNEN (M)	20.00
CHAR. HYDRODYNAMISCHE LAENGE AUSSEN (M)	5.00
VERROHRUNG, DURCHMESSER (AUSSEN) (CM)	12.70
WANDDICKE (CM)	1.00
WAERMELEITFAEHIGKEIT (W/M*K)	30.00
BOHRGESCHWINDIGKEIT (M/H)	0.0001
ANFANGSTEUFE (M)	1500.00
TIEFE DER BOHRLOCHABSATZE (M) 1. ABSATZ	1520.00
BOHRLOCHDURCHMESSER (CM) 1. ABSATZ	15.20
BODENOBERFLAECHENTEMPERATUR (C)	8.50
TEMPERATURGRADIENT IM GEBIRGE (C/KM)	26.00
GEOLOGISCHE SCHICHTEN, GRENZE DER 1. SCHICHT (M)	1620.00
WAERMELEITFAEHIGKEIT (W/MK)	3.50
SPEZ. WAERMEKAPAZITAET (J/M <sup>3</sup> )	2000000.00

Berechnetes Temperaturprofil an der Bohrlochwand  
 in der KTB Vorbohrung [KESSELS]

Abb. 8.23  
**KTB**

PARAMETER  
 SYMBOL  $\square$   
 ZEIT (H) 0.750E+01  
 RADIUS (M) 0.760E-01



EINGEBEDATEN

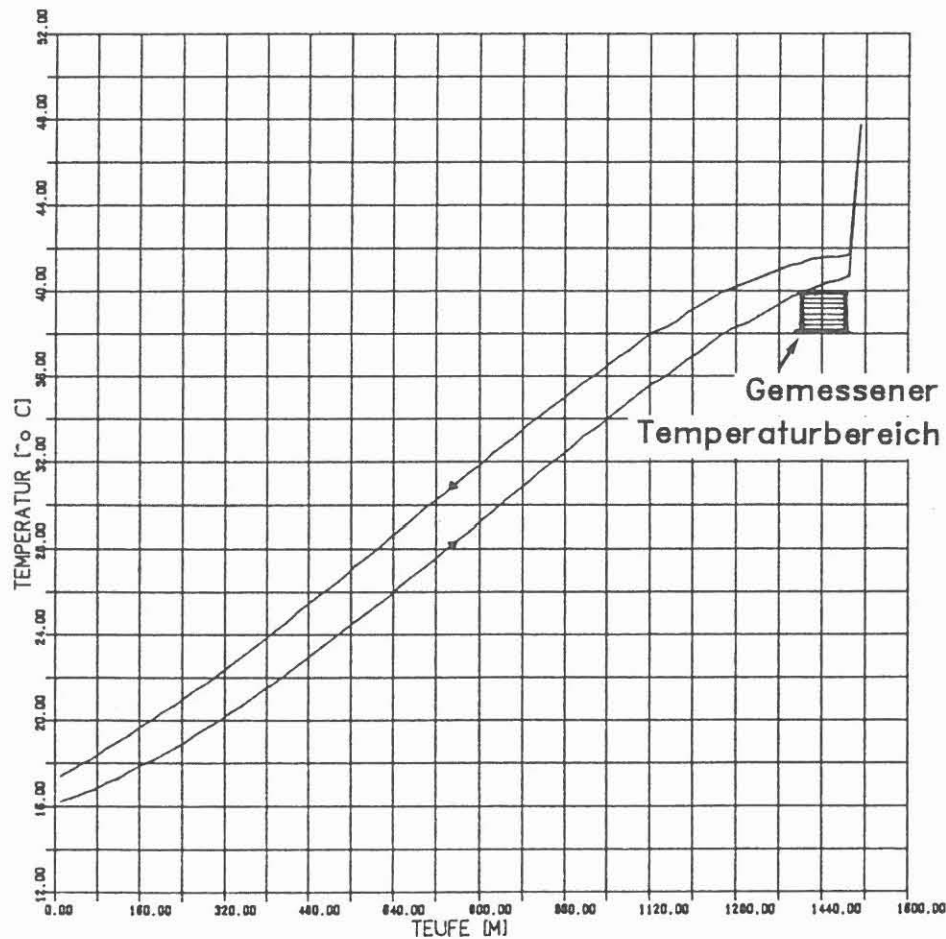
BERECHNUNGSZEITSCHRITT (S)	6.000
ENDZEITPUNKT (S)	0.27E+05
AUSDRUCKINTERVALL	500
BERECHNUNGSTIEFE IN RADIALER RICHTUNG (UNTEN) (M)	10.0000
SPUELUNG, DURCHFLUSSMENGE (L/MIN)	220.0000
EINTRITTSTEMPERATUR (C)	16.00
SPUELUNGSINTERVALL (H)	24.00
ROUNDRIPINTERVALL (H)	0.03
DICHTE (G/CM <sup>3</sup> )	1.000
→ KONZENTRATION DES ADDITIVES (o/o)	0.750
REIBUNGSWAERME GESTAENGE (W/M)	40.000
REIBUNGSWAERME MEISSEL (W)	15000.
CHAR. HYDRODYNAMISCHE LAENGE INNEN (M)	20.00
CHAR. HYDRODYNAMISCHE LAENGE AUSSEN (M)	5.00
VERROHRUNG, DURCHMESSER (AUSSEN) (CM)	12.70
WANDDICKE (CM)	1.00
WAERMELEITFAEHIGKEIT (W/M*K)	30.00
BOHRGESCHWINDIGKEIT (M/H)	0.0001
ANFANGSTEUFE (M)	1500.00
TIEFE DER BOHRLOCHABSATZE (M) 1. ABSATZ	1520.00
BOHRLOCHDURCHMESSER (CM) 1. ABSATZ	15.20
BODENOBERFLAECHENTEMPERATUR (C)	8.50
TEMPERATURGRADIENT IM GEBIRGE (C/KM)	26.00
GEOLOGISCHE SCHICHTEN, GRENZE DER 1. SCHICHT (M)	1620.00
WAERMELEITFAEHIGKEIT (W/MK)	3.50
SPEZ. WAERMEKAPAZITAET (J/M <sup>3</sup> )	2000000.00

Berechnetes Temperaturprofil an der Bohrlochwand  
 in der KTB Vorbohrung [KESSELS]

Abb. 8.24  
**KTB**

PARAMETER

SYMBOL	△	▽
ZEIT (H)	0.750E+01	0.750E+01
RADIUS (M)	SPUELUNG I	SPUELUNG A



EINGEBEDATEN

BERECHNUNGSZEITSCHRITT (S)	6.000
ENDZEITPUNKT (S)	0.27E+05
AUSDRUCKINTERVALL	500
BERECHNUNGSTIEFE IN RADIALER RICHTUNG (UNTEN) (M)	10.0000
SPUELUNG, DURCHFLUSSMENGE (L/MIN)	220.0000
EINTRITTSTEMPERATUR (C)	16.00
SPUELUNGSINTERVALL (H)	24.00
ROUNDRIPINTERVALL (H)	0.03
DICHTE (G/CM <sup>3</sup> )	1.000
KONZENTRATION DES ADDITIVES (g/o)	0.750
REIBUNGSWAERME GESTAENGE (W/M)	40.000
REIBUNGSWAERME MEISSEL (W)	15000.
CHAR. HYDRODYNAMISCHE LAENGE INNEN (M)	20.00
CHAR. HYDRODYNAMISCHE LAENGE AUSSEN (M)	5.00
VERROHRUNG, DURCHMESSER (AUSSEN) (CM)	12.70
WANDDICKE (CM)	1.00
WAERMELEITFAEHIGKEIT (W/M*K)	30.00
BOHRGESCHWINDIGKEIT (M/H)	0.0001
ANFANGSTEUFE (M)	1500.00
TIEFE DER BOHRLOCHABSATZE (M) 1. ABSATZ	1520.00
BOHRLOCHDURCHMESSER (CM) 1. ABSATZ	15.20
BODENOBERFLAECHENTEMPERATUR (C)	8.50
TEMPERATURGRADIENT IM GEBIRGE (C/KM)	26.00
GEOLOGISCHE SCHICHTEN, GRENZE DER 1. SCHICHT (M)	1620.00
WAERMELEITFAEHIGKEIT (W/MK)	3.50
SPEZ. WAERMEKAPAZITAET (J/M <sup>3</sup> )	2000000.00

Berechnetes Temperaturprofil in der Spülung in der  
KTB Vorbohrung [KESSELS]

Abb. 8.25  
**KTB**



### **Abschätzung der zu erwartenden Temperaturstörungen in einer 10000 m tiefen Bohrung**

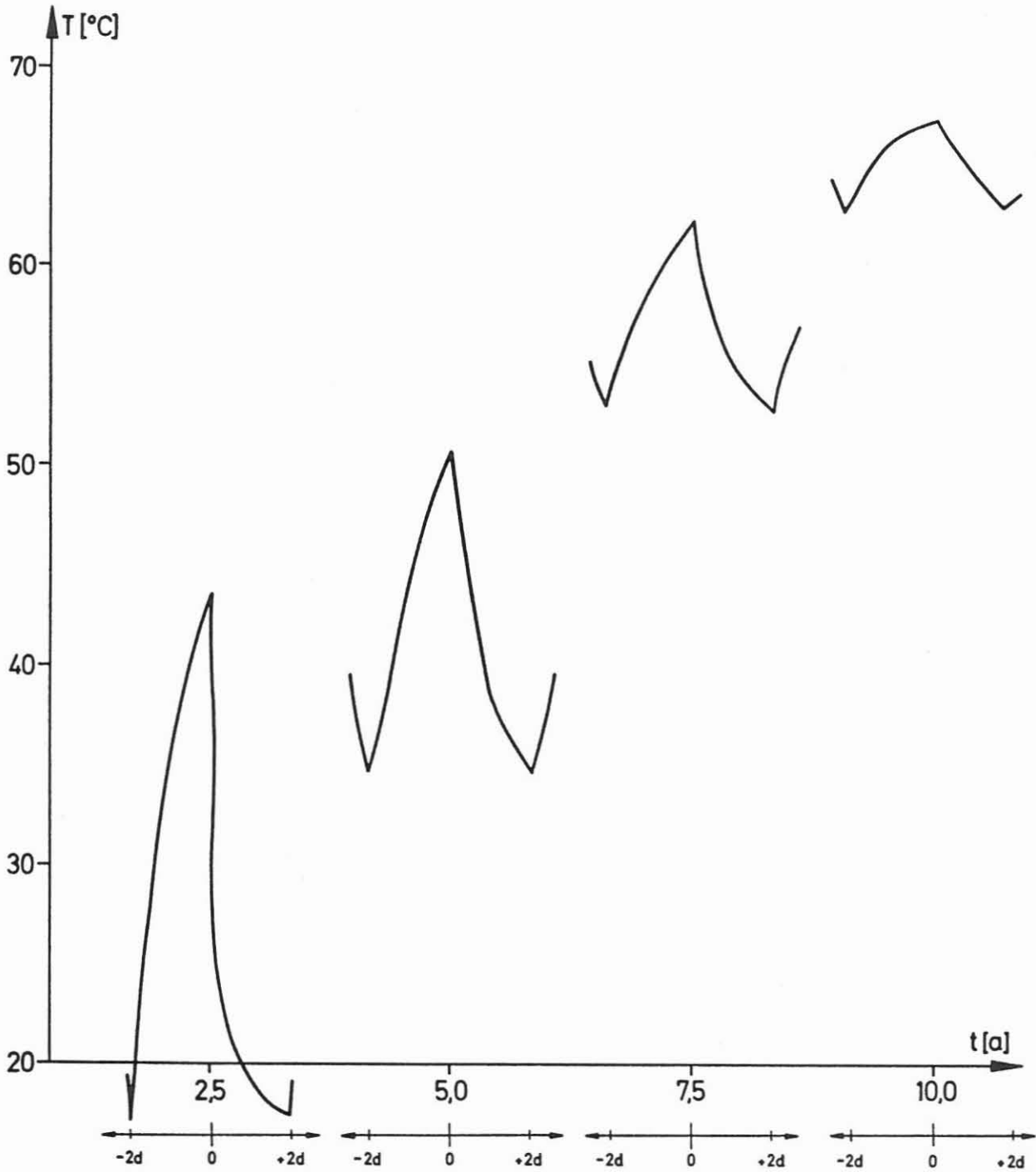
Ein nächster Schritt soll nun die Berechnung der Temperaturen für eine 10000 m tiefe Bohrung erfolgen.

Eine erste Rechnung, wie in Abb. 8.26 dargestellt, zeigt, wie in einer ungestörten 10000 m tiefen Bohrung schon ein Zirkulationsintervall von 2 Stunden zu Temperaturschwankungen von 20 bis 30 °C und einer Auskühlung von ca. 50 °C in 20 h führt. Weiter zeigt dieser instationäre Temperaturverlauf, daß jede Temperaturrechnung mit einem stationären Modell für eine Berechnung der Zirkulationstemperatur nicht geeignet ist.

Im folgenden wird die Gesamtbohrzeit auf 10 Jahre festgelegt. Zur Vereinfachung wurde der Bohrfortschritt konstant angesetzt. In dieser Rechnung ging es nicht darum, die zu erwartenden Temperaturen exakt festzulegen, sondern die zu erwartenden Auskühlungen abzuschätzen.

Abb. 8.27 zeigt das Ergebnis der Rechnung für verschiedene Bohrtiefen (bzw. Zeitpunkte). Dargestellt sind die Temperaturen an der Bohrlochwand am Ende einer Zirkulationsperiode, die mit 2 Tagen festgesetzt wurde. Die Stillstandszeit betrug ebenfalls 2 Tage. In 10000 m Tiefe ist dabei mit einer Gesamtauskühlung von ca. 120 bis 130 °C zu rechnen. Es ergibt sich, daß nach einer sehr raschen Auskühlung des Gebirgsverbandes in z. B. 5000 m Tiefe nach weiteren Bohrarbeiten eine Wiedererwärmung einsetzt, die durch die aus größeren Tiefen abtransportierte Wärme erzeugt wird.

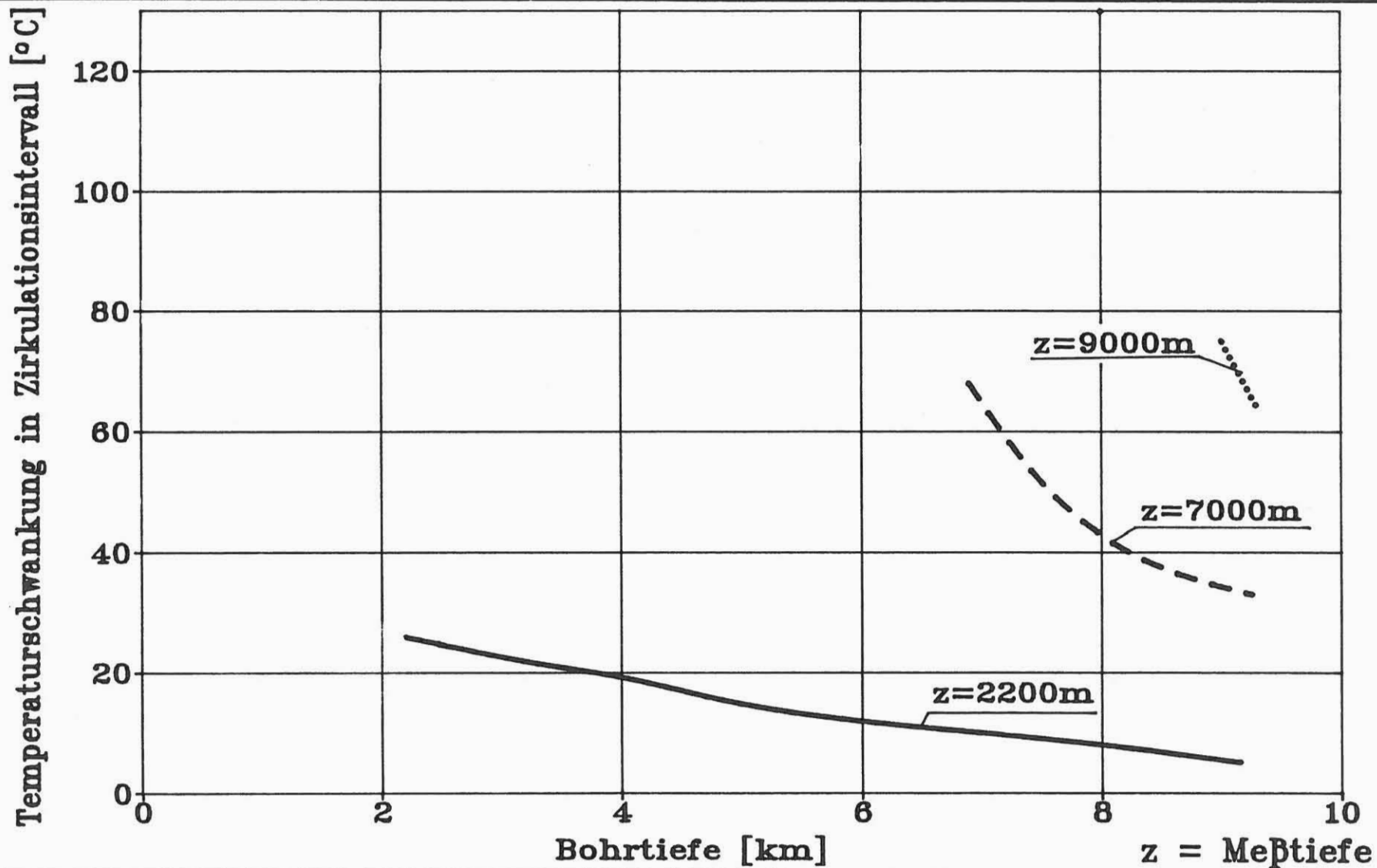
Diesem relativ glatten Temperaturverlauf am Ende einer Bohrphase überlagert sich allerdings noch die periodische Temperaturschwankung durch die Unterbrechung der Spülungszirkulation.



Temperaturschwankungen in 2200m Tiefe einer 10000m tiefen Bohrung in Abhängigkeit von der Bohrzeit  $t$  bei einem Zirkulationsintervall von  $2d$

[KESSELS]

Abb. 8.26  
**KTB**



Die zu erwartende Temperaturschwankung an der Bohrloch-  
wand in einem Zirkulationsintervall von 48h Zirkulations-  
zeit und 48h Zirkulationsstillstand

[KESSELS]

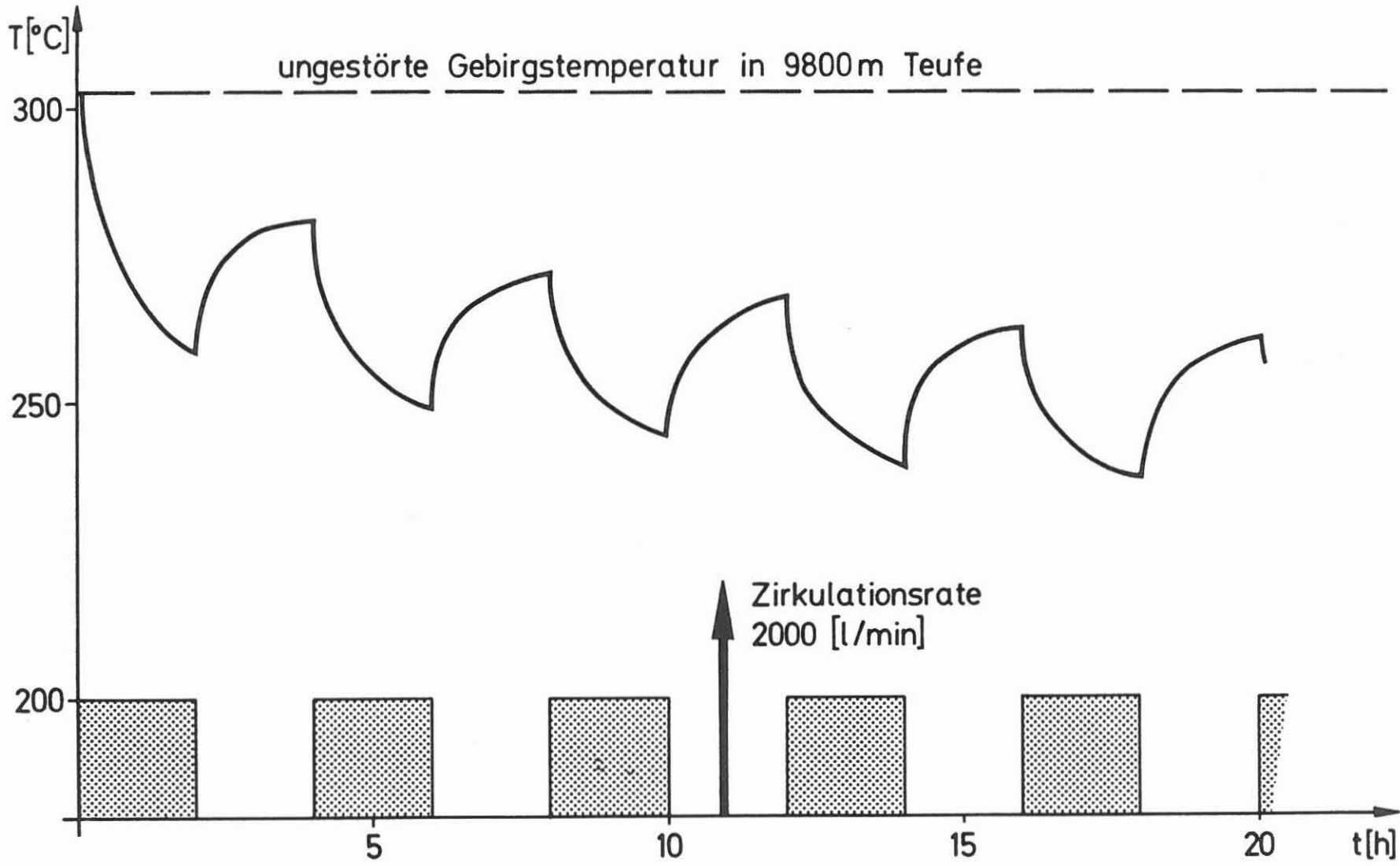
Abb. 8.27  
**KTB**

Diese ist in Abb. 8.28 für die Teufe von 2200 m dargestellt. Hier sieht man, daß sich in dem frisch erbohrten Bereich die Schwankungen, hervorgerufen durch die Spülungs-zirkulation, besonders stark auswirken. Mit wachsender Bohrteufe steigt dann die Temperatur in 2200 m Tiefe an, wobei allerdings die Temperaturschwankungen während des 2 Tage-Intervalles kleiner werden.

Die Amplituden dieser Temperaturschwankungen gehen auch aus Abb. 8.29 hervor.

In 9000 m Tiefe betragen diese Schwankungen dann schon ca. 70 °C.

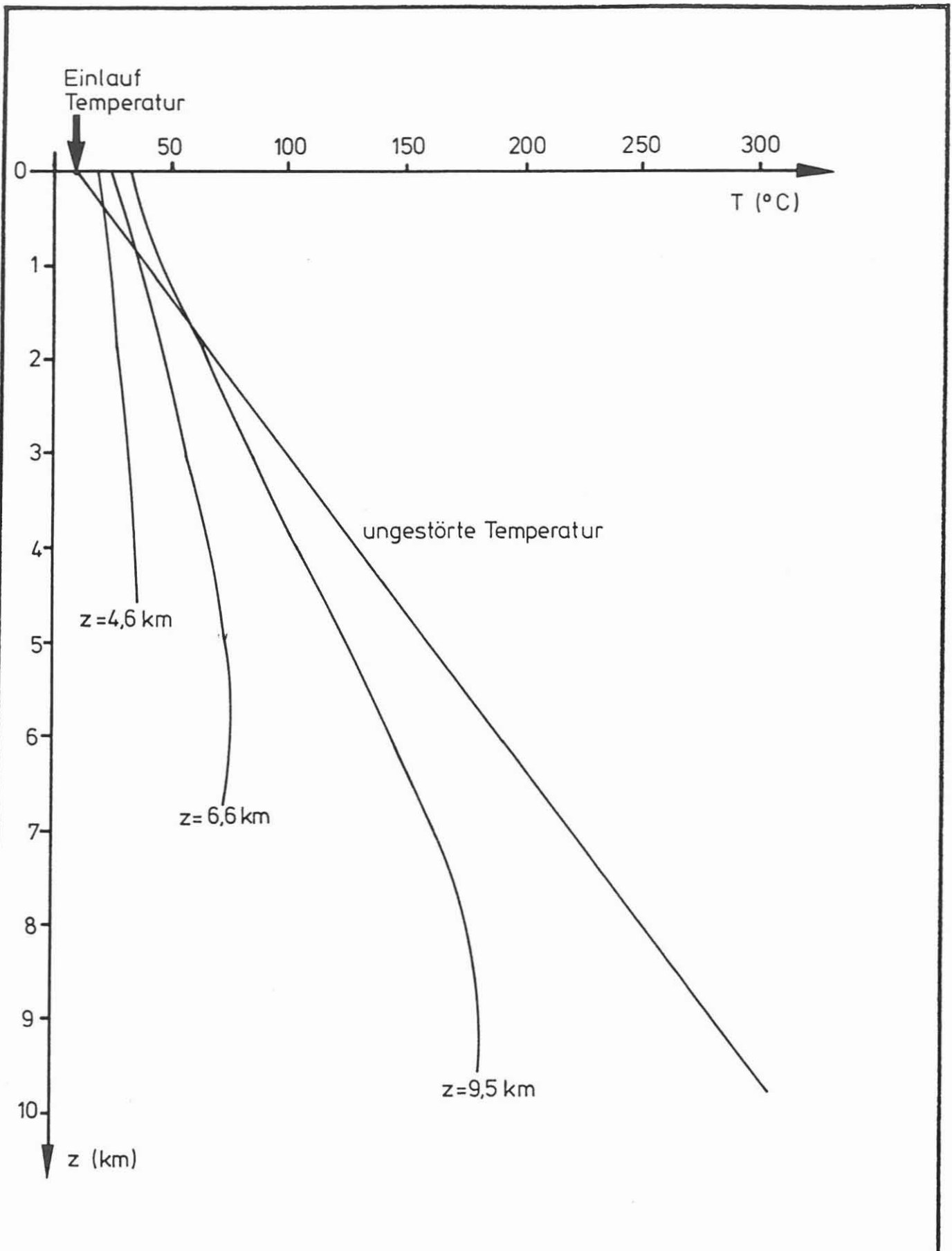
Dies ist insbesondere für Betrachtungen der Bohrlochstabilität von Bedeutung, weil hier beträchtliche thermomechanische Spannungen in der Bohrlochwand induziert werden.



Temperaturverlauf in 9800m Bohrlochtiefe während einer periodischen Spülungszirkulation in einer 10000m tiefen Bohrung ohne Bohrfortschritt

Abb. 8.28  
**KTB**

[KESSELS]



Temperaturen an der Bohrlochwand für verschiedene Bohr-  
teufen der KTB Hauptbohrung während der Spülungs-  
zirkulation berechnet mit dem Programm BOA. [KESSELS]

Abb. 8.29

**KTB**

Literaturverzeichnis

- Bentsen, R. G., Marshall, D. W.: A Computer Model to Determine the Temperature Distributions in a Wellbore. Journal of Canadian Petroleum Technology, Jan./Feb. 1982
- Burkhardt, H.: Persönliche Mitteilung über Messungen in der Oberpfalz. Technische Universität Berlin, 1987
- Dornstätter, J.: Das Temperturvergleichsverfahren. Diplomarbeit. Institut für Geophysik TU Karlsruhe, 1987
- Engeser, B.: Persönliche Mitteilung zum Spülungssystem der Vorbohrung. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, KTB, Hannover, 1987
- Engeser, B., Heinisch M.: Unveröffentlichte Ergebnisse der Mud Logging Unit der KTB Vorbohrung. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, KTB, Hannover, 1988
- Hänel, R. (Ed.): Atlas of Subsurface Temperatures in the European Community, Hannover, 1980; Th. Schäfer.
- Kessels, W.: Das Wärmetauschersystem einer Tiefbohrung. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, KTB, Hannover, Archiv-Nr. 101 304, 1987
- Raymond, L. R.: Temperature Distribution in a Circulating Drilling Fluid. Journal of Petroleum Technology, Vol. 21, No. 3, 333-341, 1969.
- VDI-Wärmeatlas: VDI-Verlag, Düsseldorf, 1977.