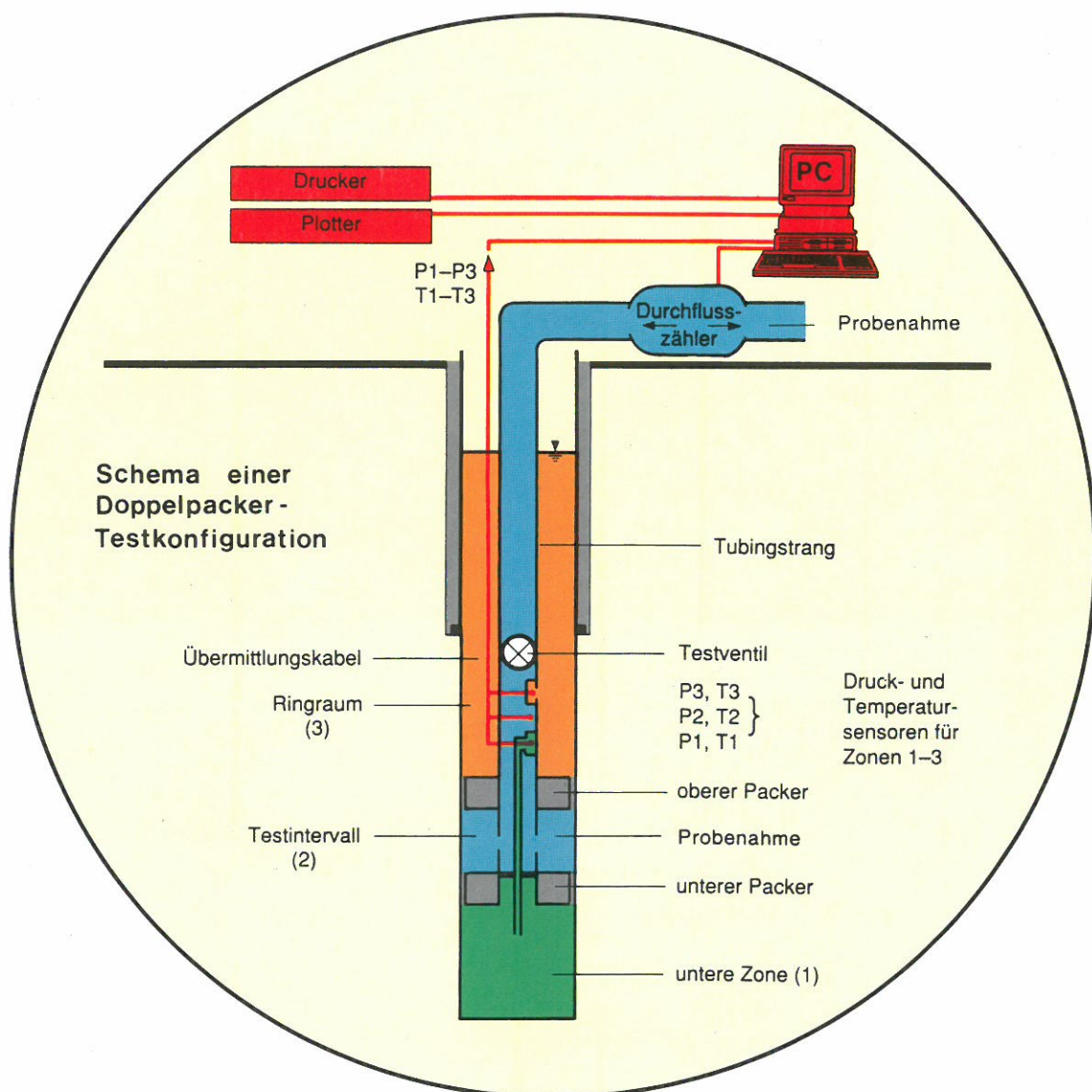


KTB REPORT 90-5

Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik (Bericht 9)

Hydraulische Untersuchungen in der Bohrung KTB-Oberpfalz VB



Herausgegeben von der
Projektleitung Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland
im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung

W. Kessels

Redaktion: Dr. W. Kessels

Druck: Wittmann & Wäsch, 3007 Gehrden

Titelbild: Schema einer Doppelpacker-Testkonfiguration mit Druck- und Temperatursensoren und Testventil sowie Datenakquisitionssystem

nach Küpfer, Th.; Hufschmied, P.; Pasquier, F.:
"Hydraulische Tests in Tiefbohrungen der Nagra",
Nagra informiert Nr. 3+4, 1989.

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (Forschungskennzeichen: RG 8604-0) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
- Hannover 1990 -

Nachdrucke, Vervielfältigungen und Übersetzungen, Verwendung in Funk und Fernsehen, Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und Speicherung in DV-Anlagen sind - auch auszugsweise - genehmigungspflichtig.

Alle Rechte bleiben vorbehalten.

Anschrift des Herausgebers: Projektleitung KTB im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung, Postfach 51 01 53, D-3000 Hannover 51. Telefon: (05 11) 643-2675.

Vorwort

Voraussetzung für intensive Untersuchungen zum Flüssigkeits- und Gastransport in der Kruste ist die Durchführung hydraulischer Tests. In diesem KTB-Report soll gezielt über diese in der Bohrung KTB-Oberpfalz VB durchgeführten Untersuchungen berichtet werden. Zielsetzungen waren dabei:

- die quantitative Erfassung der in der Kruste vorhandenen Fließwege und
- die Gewinnung möglichst unkontaminierter Flüssigkeits- und Gasproben, um aus Chemie- und Isotopenanalysen auf die in der Vergangenheit abgelaufenen Transportprozesse schließen zu können.

Technische Durchführung, Auswahlverfahren zur Bestimmung der testwürdigen Zonen, hydraulische Auswertung der Druckdaten und die ersten Analysen der gewonnenen Fluidproben sind in dieser Reihenfolge dokumentiert.

Eine Einbindung dieser Ergebnisse in ein Modell des Fluidtransportes im KTB Umfeld bleibt einer noch durchzuführenden integrativen Interpretation aller geowissenschaftlichen Erkenntnisse vorbehalten.

(W. Kessels)

Inhaltsverzeichnis

	Seite
TESTDURCHFÜHRUNG UND TECHNISCHER ABLAUF	
Zielsetzung und Durchführung hydraulischer Untersuchungen in der Bohrung KTB-Oberpfalz VB W. Kessels	3
Technische Durchführung hydraulischer Teste in der KTB-Oberpfalz VB Engeser, B. und Kessels, W.	21
Untertage-Probennahmesysteme zur Gewinnung von in situ-Fluidproben G. Zoth	85
Probennahme übertage und in situ M. Heinisch	123
AUSWAHL HYDRAULISCHER TESTZONEN	
Auswahl hydraulischer Testzonen in der KTB-Oberpfalz VB anhand von Bohrlochmessungen W. Kessels, G. Pusch	139
Vergleich der Ergebnisse von Absenk- und Injektionstest im Hinblick auf Klüfterkennung M. Jobmann, F. Reifenstahl	167
HYDRAULISCHE AUSWERTUNGEN	
Auswertung Geohydraulischer Tests in der Bohrphase der KTB-Vorbohrung C. Enacescu, R. Miehe, G. Pusch	173
Erste Ergebnisse eines Absenkungs- und Injektionstestes in der KTB-Oberpfalz VB W. Kessels, G. Zoth, J. Kück	235
Hydraulische Auswertung des Absenk-/Injektionstestes und des Leitfähigkeits-Fluid-Loggings F. Reifenstahl, I. Stober	287
Thermischer Injektionstest M. Jobmann	319

In situ Permeability Measurements in the KTB Pilot Hole VB
Using a Wireline-Operated
Hydraulic Fracturing Straddle Packer Assembly
J. Baumgärtner, F. Rummel 333

Abschätzung der beim Pumpstest in der KTB-Oberpfalz VB
zu erwartenden Zuflußmengen anhand der Ergebnisse des
Absenktestes
W. Kessels, G. Zinner 343

Hydraulisches Testprogramm KTB-VB
Ergebnisse der Feldauswertungen
L. Ostrowski 359

CHEMISCHE UND ISOTOPENANALYSEN

Ergebnisse der geochemischen Bearbeitung
gewonnener Fluidproben
H. - J. Heinschild 439

Zwischenbericht über erste Ergebnisse der Hydrochemie
(Pumpversuch vom 07.04.90 - 11.04.90) an der KTB-VB.
A. Pekdeger, C. Sommer-von Jarmersted, H. Woith..... 473

Ergebnisse der Helium- und Neonisotopenmessungen
S. Weise..... 485

Isotopenhydrologische Untersuchungen im Rahmen der
Hydraulik- und Fluidtests in der KTB-Vorbohrung.
Erste Ergebnisse
M. Lodemann und P. Fritz 497

C- und H- Isotopenverhältnisse in leichtflüchtigen Kohlen-
wasserstoffen, Kohlendioxid und Wasserstoff aus Testunter-
suchungen der KTB-Vorbohrung
E. Faber und M. J. Whiticar 521

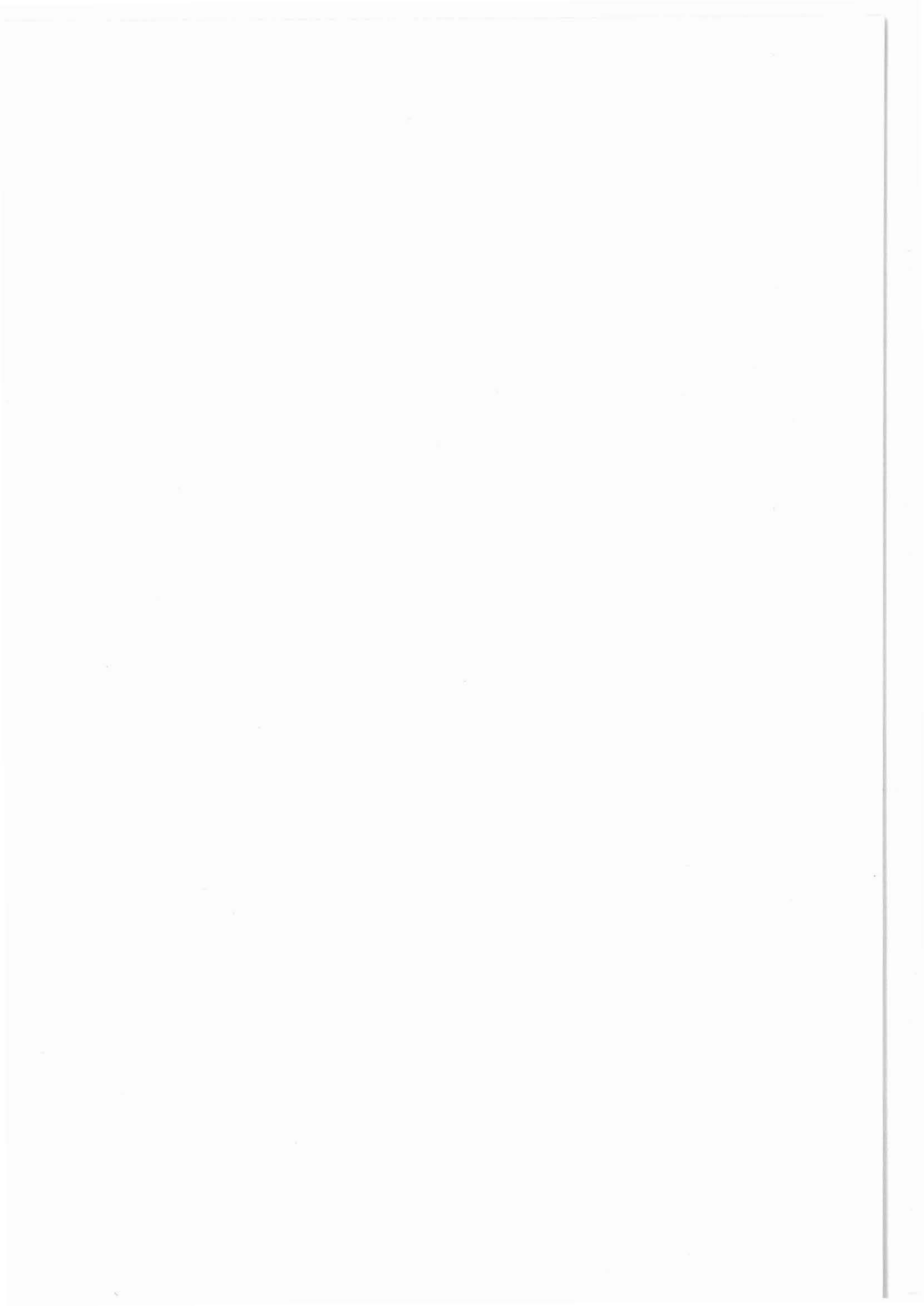
Radium-Isotopenuntersuchungen in Wässern aus
3000 - 4000 m Teufe der KTB-Vorbohrung
L. Eichinger, M. Forster, S. Hurst, F. Buheitel 541



Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Projektgruppe KTB

Stilleweg 2
3000 Hannover 51

Zielsetzung und Durchführung hydraulischer Untersuchungen in der Bohrung KTB-Oberpfalz VB



**ZIELSETZUNG UND DURCHFÜHRUNG HYDRAULISCHER UNTERSUCHUNGEN IN
DER BOHRUNG KTB-OBERPFALZ VB**

W. Kessels

ZUSAMMENFASSUNG

Die hydraulischen Untersuchungen in der KTB-Vorbohrung waren ausgerichtet auf eine quantitative Erfassung der wesentlichen Kluftbereiche hinsichtlich ihrer hydraulischen Eigenschaften und die Gewinnung von möglichst unkontaminierten Formationsfluiden. Eine detaillierte Auswertung von Bohrlochlogs zur Erkundung hydraulisch leitfähiger Kluftbereiche in der Bohrung und zur Festlegung von Testhorizonten wurde durchgeführt. Ein integraler Absenk- und Injektionstest, 6 Packerteste und 1 Pumpstest ergaben deutliche Zuflußbereiche im oberen Bohrlochabschnitt von 480 m bis 800 m und im Bohrlochtiefsten. Im oberen Bohrlochabschnitt trat niedrigsalinare Formationsflüssigkeit mit einem geringen Gasgehalt zu. Im Bohrlochtiefsten ist über eine Störungszone hochsalinare Flüssigkeit mit einem hohen Gasgehalt zugeflossen. Bemerkenswert ist der hohe Anteil von Kohlenwasserstoffen am Gasgehalt der Formationsflüssigkeit aus dem untersten Bohrlochabschnitt, der ca. 30% betrug. Der gesamte Gasgehalt betrug hier $0,8 \text{ m}^3$ unter Normalbedingungen pro m^3 Formationsflüssigkeit.

SUMMARY

Aim of the hydraulic experiments in the KTB-Pilot hole was the determination of the hydraulic parameters for the fractured zones and a recovery of formation fluid without contamination as far as possible. The choice of the fractured zones for testing was done by an intensive log interpretation. A draw-down and injection test, 6 packer tests and a pump test were carried out. Prominent inflow was found between 480 m and 800 m and in the deepest part of the hole. In the upper part low salinity fluid with a negligible gas content was found. From the deepest part high salinity fluid with remarkable gas content of $0.8 \text{ m}^3/\text{m}^3$ water were recovered. Remarkable was also the 30 % CH₄ content of total gas.

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

1.0 Einleitung

Schon in den ersten Diskussionen Ende der siebziger Jahre über das Projekt einer Kontinentalen Tiefbohrung, sah man in der Untersuchung der Fluidsysteme in der tieferen Kruste eine besondere Zielsetzung eines solchen Projektes.

In den 14. Mitteilungen der "Kommission für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung" schreiben Althaus et. al (1984), daß die Erforschung der Fluidsysteme, Fluidquellen und Fluidbewegungen in der tieferen Kruste mit ihrem Einfluß auf Metamorphose, Magmenbildung und globale Dynamik, eine der wesentlichen Zielsetzungen einer Kontinentalen Tiefbohrung ist.

Neben der bekannten Bedeutung des Fluidtransportes für die Lagerstättenbildung wurde dabei besonders auf die Bedeutung der Krustenfluide für alle geodynamischen Prozesse hingewiesen. Damit hat die Erfassung der Transportmechanismen und der Druckregime, die in den Kluft- und Porensystemen in großer Tiefe herrschen, eine direkte Auswirkung auf praktisch alle geowissenschaftlichen Fragestellungen, die als wesentliche Zielsetzungen des KTB-Projektes formuliert worden sind.

Im weiteren Verlauf des KTB-Projektes hat dementsprechend die Fluidproblematik nichts von ihrer aktuellen wissenschaftlichen Bedeutung verloren. Bewahrheitet hat sich, wie aus diesem KTB-Report hervorgeht, schon in der Vorbohrung die abschließende Bemerkung von Althaus et. al (1984), die lautet:

"Allerdings stellt die Erfassung der fluiden Phasen, ihre Probennahme und die entsprechende Analytik eine besondere Herausforderung dar."

Die Untersuchungen in der KTB-Vorbohrung zeigten, daß diese Einschätzung sowohl hinsichtlich der technischen Durchführung als auch der geowissenschaftlichen Interpretation zutreffend ist.

Grundlegend für alle geowissenschaftlichen Interpretationen des Fluidtransportes ist, daß die durch Messungen gefundenen Gegebenheiten von Wegsamkeiten für Fluide und ihre Inhaltsstoffe geprägt sind durch eine räumliche und zeitliche Entwicklung der Kruste und Prozesse, die sich zwischen dem Gestein und den Formationsflüssigkeiten abspielen.

Diese sehr komplexen Zusammenhänge und Wechselwirkungen, die im allgemeinen durch nicht Gleichgewichtszustände charakterisiert werden können, erschweren zwar die Interpretation der gewonnenen Meßdaten, eröffnen aber andererseits die Möglichkeit, über das "Gedächtnis" der aus der Kruste gewonnenen Formationsfluide auf in der Vergangenheit abgelaufene Prozesse und Krustenentwicklungen zu schließen.

Voraussetzung für einen solchen Schluß ist allerdings eine möglichst gute meßtechnische Bestimmung der heute vorhandenen Gegebenheiten sowohl hinsichtlich des Kluft- und Reservoirsystems der Kruste als auch hinsichtlich seiner Fluidinhaltsstoffe.

Für sehr langsame Austauschprozesse muß selbstverständlich auch mit betrachtet werden, daß die Reservoirs selbst und die Fließwege zeitlichen Veränderungen unterworfen sind, so daß hier eine Ankopplung an Fragen der Tektonik und des Spannungsfeldes der Kruste gegeben sind. Entscheidend für die tektonischen Bewegungen ist dabei wieder die Rückkopplung zum Fluidtransport, da für das Eintreten von Bruchvorgängen, insbesondere in größeren Tiefen der Kruste, ein hoher Fluiddruckaufbau im Kluft- bzw. Porensystem der Kruste erforderlich ist. Hier ist in der Interpretation eine enge Rückkopplung zu diesen Fachbereichen erforderlich (s. Abb. 1).

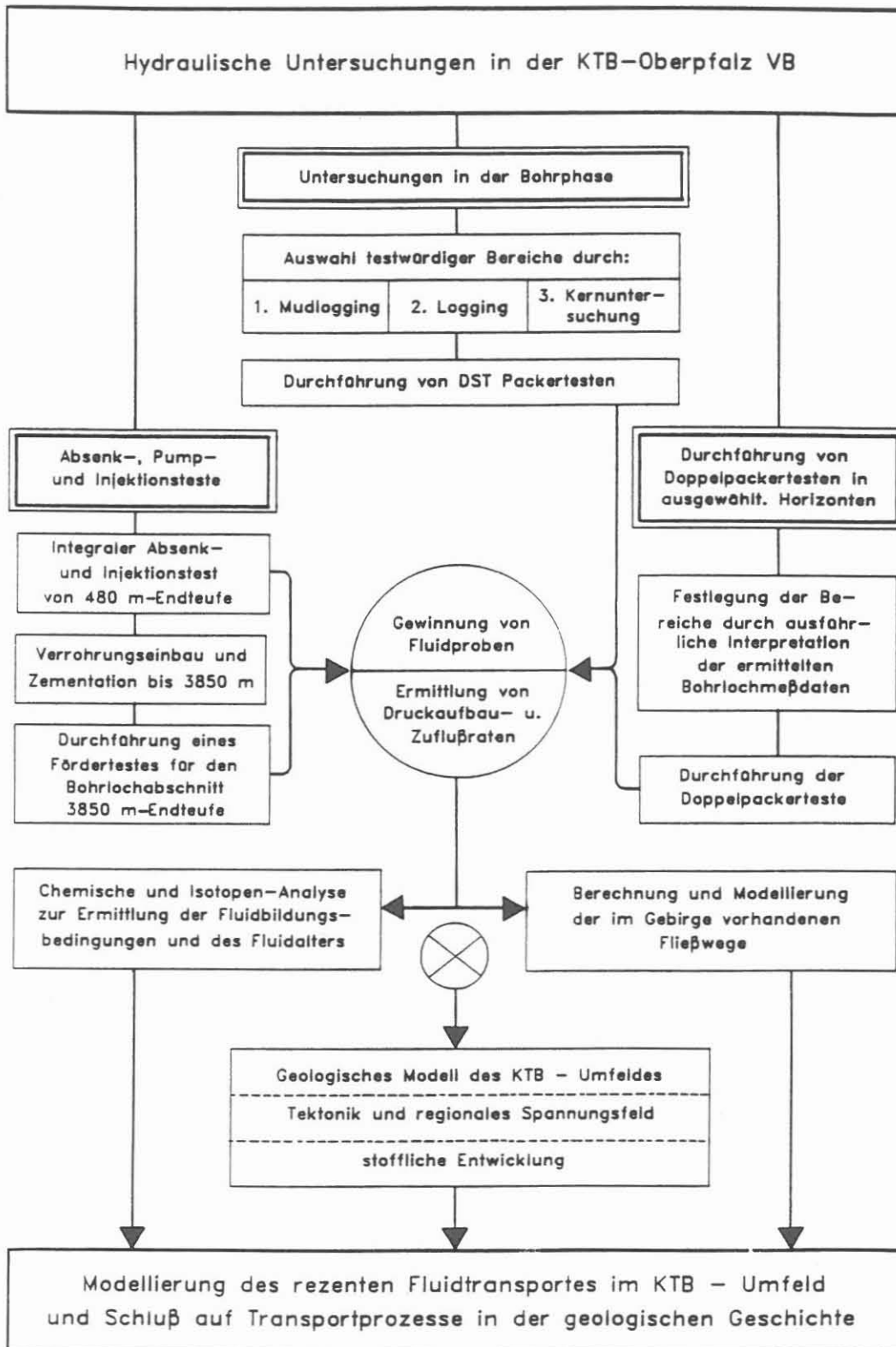


Abb. 1

Schematische Darstellung der in der KTB-Oberpfalz VB durchgeführten hydraulischen Tests und ihr Beitrag zur Modellierung des Fluidtransportes im KTB-Umfeld.

Die technische Herausforderung, die schon in der Vorbohrung zu bewältigen war, geht aus den technischen Berichten von Engesser u. Kessels, Zoth u. Heinisch (KTB-Report 90-5) hervor. Hier werden die aufgetretenen Probleme beim Einsatz der Packerelemente, der Fluid-Sampler und der übertägigen Probenahme beschrieben.

Die bedeutendste Methode zur Untersuchung des Fluidsystems der Kruste sind die hydraulischen Teste.

Mit diesen kann durch eine Druckabsenkung in der Spülung und eine genaue Beobachtung der hierdurch erzeugten Zuflußraten aus dem Gebirge in die Bohrung auf die Transportwege geschlossen und durch Probennahme Formationsfluide gewonnen werden.

Der Informationsgehalt eines hydraulischen Testes wächst mit dem Zeitraum, über den eine Druck- und Zuflußbeobachtung durchgeführt wird. Mit wachsender Testzeit dringt die in der Spülung erzeugte Druckänderung immer tiefer in das Gestein ein und auch die Formationsfluide werden aus einem größeren Abstand von der Bohrung gewonnen. Weitergehende Informationen lassen sich aus einem solchen Test noch gewinnen, wenn eine Kombination mit einem Tracertest vorgenommen wird.

Im folgenden sind einige der wesentlichen Untersuchungsziele der hydraulischen Teste in der KTB-Vorbohrung aufgelistet, wobei die Fragestellungen als Zielsetzungen anzusehen sind und viele dieser Fragen durch die in der KTB-Vorbohrung durchgeführten hydraulischen Teste nur zum Teil beantwortet werden können.

*** Hydraulische Fragestellungen -**

- Untersuchung der räumlichen Erstreckung des hydraulischen, leitfähigen Systems.

- Schließt sich das hydraulische Rißsystem an ein großräumiges Reservoir an?
- Ist der hydraulische Fluß im Rißsystem im wesentlichen laminar oder turbulent?
- Wie ändert sich die hydraulische Leitfähigkeit, wenn anstatt der hochsalinaren Formationsflüssigkeit normales, niedrigrigsalinates Frischwasser injiziert wird?
- Verhält sich das Rißsystem mechanisch bei Druckänderung im Rißbereich linear oder nichtlinear?
- Untersuchung der hydraulischen Leitfähigkeit und der Speicherfähigkeit des Reservoirsystems als Funktion des Abstandes von der Bohrung.
- Wieviele und welche Risse an welcher Stelle der Bohrung haben hydraulische Verbindung zu weiter entfernten Reservoirien bzw. werden alle Risse aus einem Reservoir gespeist?

*** Spezielle geochemische und geologische Fragestellungen -**

- Ist die chemische Zusammensetzung der Formationswässer im gesamten vermuteten Reservoir konstant?
- Liegt eine hydraulische Verbindung mit den sedimentären Fluiden in Richtung "Weidener Trog" oder in westlicher Richtung zur einfallenden Fränkischen Linie vor?
- Haben die gefundenen Kohlenwasserstoffe einen sedimentären Ursprung?
- Welches Alter haben die Wässer und ändert sich das Alter mit steigender Entnahme aus dem Reservoir?

*** Geothermische Fragestellungen -**

- Wie groß ist der konvektive Anteil am Wärmetransport?
Wie beeinflusst er das Temperaturfeld?
- Aus dem zeitlichen Temperaturverlauf während und nach den Testen läßt sich die in situ Wärmeleitfähigkeit bestimmen. Bestehen signifikante Unterschiede zu den Labormessungen an Bohrkernen?
- Ändert sich die Wasserzutrittstemperatur in Abhängigkeit von der Pumpzeit? Sind damit Rückschlüsse auf die Herkunft und die Teufenlage des Wassers möglich?
- Verhalten sich die Rißsysteme bei unterschiedlichen Injektionsraten verschieden? (Hydraulische Fragestellung - Nachweis mit Temperaturmessung)
- Haben die Reservoirs unterschiedliche Temperaturen zur eingestellten Gleichgewichtstemperatur an den Eintrittsstellen der Rißsysteme in die Bohrung? Kann eine Bestimmung des Wärmeaustausches im Rißsystem versucht werden?

*** Fragestellungen zum Stofftransport -**

- Welche Rückhaltekoefizienten besitzt das Rißsystem für die verschiedenen Inhaltsstoffe der Formationswässer?
- Einfluß des pH-Wertes auf die Rückhaltung?
- Trennung von chemischer Rückhaltung und hydraulischer Dispersion?

*** Fragestellungen zur Verfahrens- und Auswertetechnik -**

- Lassen sich die hydraulisch ermittelten hydraulischen Parameter mit Hilfe des Fluid-Logging und der Thermo-Flowmetermessung verifizieren?
- Mit welchen hydraulischen Rechenmodellen lassen sich die Meßergebnisse am besten verifizieren, und wie unterscheiden sich die hydraulischen Parameter, die mit den verschiedenen Rechenmodellen (Einzelfrac, homogener Leiter, eindimensionale analytische Rechnung, ein- und zweidimensionale FE-Rechnung, Rechnung für Fracsysteme) gewonnen wurden?

Auch wenn die Beantwortung dieser hydraulischen oder geochemischen Fragestellungen im KTB-Projekt eine sehr hohe Priorität besitzt, mußten in der praktischen Durchführung Beschränkungen gegenüber den ersten Testplanungen in Kauf genommen werden. Technische Randbedingungen und der große zeitliche und finanzielle Aufwand für die Durchführung der hydraulischen Tests sind dabei als wesentliche Gründe zu nennen.

Die sehr interessanten Ergebnisse der durchgeführten Tests belegen, daß auch im Kristallin in größerer Tiefe Fluide in größeren Mengen vorhanden sind und viele der angesprochenen Fragestellungen beantwortet werden können.

2.0 Durchführung der hydraulischen Untersuchungen in der KTB-Vorbohrung

Die in der KTB-Vorbohrung durchgeführten hydraulischen Untersuchungen sind ihrem zeitlichen Ablauf nach in

1. Untersuchungen während der Bohrphase und
2. Untersuchungen während des Langzeitmeß- und Testprogrammes nach Abschluß der Bohrphase

aufzuteilen.

Eine ausführliche Beschreibung der Planung findet sich bei Hänel (1987) und Pusch (1988).

So dienten die in der KTB-Vorbohrung durchgeführten Drillstem-Tests (DST) in erster Linie der Gewinnung möglichst unkontaminierter Fluidproben. Die Tests sollten daher möglichst kurz nach dem Durchteufen eines als hydraulisch interessant einzustufenden Gesteinsbereiches durchgeführt werden, um die Invasion von Bohrspülung in das zu untersuchende Kluftsystem möglichst klein zu halten.

Die hydraulischen Tests (HT) des Langzeitmeß- und Testprogrammes sollten dann auf die Hauptzielsetzung der Ermittlung hydraulischer Parameter ausgerichtet sein.

Durch eine Vielzahl von Diskussionen in der Arbeitsgruppe Geohydraulik, einer Untergruppe der Arbeitsgemeinschaft Fluide des KTB-Schwerpunktes, wurde dann ein Meßprogramm vorgelegt, das neben Absenk- und Fördertesten die Durchführung von 10 DST-Testen während der Bohrphase und 40 hydraulischen Testen während der Langzeitmeß- und Testphase vorsah (Draxler und Hänel, 1987).

oberen Teil der Bohrung getrennt beobachten zu können (Kessels, Zoth, Kück, 1989; Reifenstahl, Stober, 1990). In diesem Test konnte überraschend nachgewiesen werden, daß im Bohrloch-tiefsten ein starker Zufluß an hochsalinaren Wässern auftrat. Dieser Bohrlochabschnitt wurde dann zum Abschluß des hydraulischen Testprogrammes nach Einbringen und Zementation der Verrohrung durch einen Pumpversuch getestet, bei dem die vorher abgeschätzten Zuflußmengen an hochsalinärer Formationsflüssigkeit gefördert werden konnten. Ein gesamtes Fördervolumen von 71 m^3 (Ostrowski 1990) Flüssigkeit zeigt (im Tagesbericht werden nach einer anderen Berechnungsmethode 75 m^3 genannt), daß im Bereich des Bohrloch-tiefsten ein großes Reservoir an Formationsfluiden angebohrt wurde. Eine Begrenzung dieses Reservoirs konnte in dem zur Verfügung stehenden Pumpzeitraum nicht nachgewiesen werden.

Zusammenfassend ist der gesamte Ablauf der hydraulischen Untersuchungen in einem Diagramm dargestellt (siehe Abb. 1).

Nicht aufgeführt sind hier die Permeabilitätswerte, die als Vorversuche im Rahmen der Hydrofrac-Spannungsmessungen ermittelt wurden (Baumgärtner, 1990). Auch ein Testeinsatz des Repeat-Formation-Testers (RFT) der zeigte, daß der Einsatz dieses Gerätes im Kristallin kaum erfolgversprechend ist, ist nicht mit berücksichtigt.

3.0 Ergebnisse im Überblick

In Tabelle 1 ist eine Zusammenstellung der wesentlichsten Ergebnisse der in der KTB-VB durchgeführten hydraulischen Tests aufgeführt. In Klammern sind die Berichte dieses Reports aufgelistet, in denen der Leser näheres über die Untersuchungsergebnisse finden kann.

ERRATA

Nachtrag fehlender Seiten im Bericht: Zielsetzung und Durchführung hydraulischer Untersuchungen in der Bohrung KTB-Oberpfalz VB. (Kessels, W.)

Getestet werden sollten dabei im Langzeitmeß- und Testprogramm sowohl Bereiche ohne nennenswerte Klüftigkeit (Matrix-Teste) als auch solche Bereiche, in denen eine gute hydraulische Durchlässigkeit zu erwarten ist.

Im ersten Abschnitt der Vorbohrung wurden entsprechend der Planung 3 Drillstem-Teste durchgeführt. Im Verlauf des letzten Testes im Teufenbereich von 813 - 839 m traten dabei so große Bohrlochstabilitätsprobleme auf (Kessels, 1988), daß die Durchführung weiterer DST-Teste ausgesetzt wurde (Protokoll der Arge 7 vom 03.03.1988). Erst als im Teufenbereich von 3447 m sich ein besonders markanter hydraulischer Klufbereich zeigte, wurde in diesem Bereich noch ein weiterer DST-Test durchgeführt.

Auch in der Langzeitmeß- und Testphase mußten an der ursprünglich geplanten Testdurchführung erhebliche Abstriche vorgenommen werden. Ursache für diese Abstriche waren ein gegenüber der ursprünglichen Planung stark reduzierter Zeit- und Finanzrahmen. Ein Absenk- und Injektionstest, 3 Doppelpackerteste und 1 Pumpertest ergaben aber dennoch wertvolle Ergebnisse über hydraulisch leitfähige Bereiche im Kristallin der ZEV. Diese Ergebnisse zu dokumentieren und darzustellen dient dieser KTB-Report. Markant sind dabei zwei besonders gut hydraulisch leitfähige Bereiche im oberen Teil der Bohrung von 480 - 800 m, wo eine Formationsflüssigkeit relativ niedriger Salinität festgestellt wurde und der Bereich im Bohrlochtiefsten, in dem ein Zutritt von hochsalinarer, gashaltiger Formationsflüssigkeit zu dem wohl markantesten hydraulischen Ergebnis in der KTB-Vorbohrung führte.

Eine besondere Bedeutung für die Festlegung der hydraulischen Testbereiche hatte eine intensive Auswertung der Ergebnisse des Bohrlochloggings, des Mudloggings und der gewonnenen Kerne. So wurde gewährleistet, daß die sehr kostenintensiven hydraulischen Packerteste in den Teufenbereichen durchgeführt wurden, wo eine den Zielsetzungen entsprechende Gesteinsformation anzutreffen ist. Entsprechend der während der Durchführung der KTB-Vorbohrung reduzierten Anzahl der hydraulischen Teste wurde 1989 eine Beschränkung der Testplanung auf solche Testbereiche vorgenommen, in denen ein Fluidgewinn möglich erschien. Eine erste Auflistung solcher Zonen für den oberen Bereich findet sich im KTB-Report 87/4 (Draxler, Hänel 1987).

Für die Auswahl der Testzonen, die im Langzeitmeß- und Testprogramm untersucht werden sollten, wurde eine entsprechende Ausarbeitung von Kessels und Miehe (1989) der Arbeitsgruppe Geohydraulik vorgelegt und von dieser dann eine Festlegung von 12 Testzonen besonders hoher Priorität vorgenommen. Bei dieser Auswahl mußte berücksichtigt werden, daß im Kristallin viele der Standard-Loginterpretationen, die für das Sediment erprobt sind, nicht angewandt werden können. Beschreibungen solcher Interpretationen im Kristallin finden sich bei Hänel (1989) und Kessels (1990). Gleiches gilt selbstverständlich auch für die hydraulischen Parameter selbst, bei denen immer berücksichtigt werden muß, daß im Kristallin im allgemeinen mit einem sehr niedrig porösen Gestein gerechnet werden muß, in dem Kluftleiter als hydraulische Wegsamkeiten dominieren, so daß hydraulische Parameter wie z. B. der Speicherkoeffizient des Gesteines gegenüber den Definitionen im Lockersediment modifiziert werden müssen (Kessels, 1989).

Als besonders erfolgreich ist die Durchführung eines integralen Absenktestes in der KTB-Vorbohrung vom 10.05. bis zum 25.05.1989 anzusprechen. Hier wurde erstmals versucht, durch Setzen einer Spülungspille die Zuflüsse im unteren Teil und im

BEZEICHNG	TEST ZEIT	TEUFEN INTERVALL	PERMEABILITÄT (K)	SKINFAKTOR (s)	FORDERVOLUMEN (INJEKTIONSVOL.)	TRANS - MISSIVITÄT	SAMPLER EINSATZ	CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG	ISOTOPEN ANALYSE
TEST 1	05.11.87	218.8 m	45E-18 m ² (1)	-0.5 (1)		1.72E-15 m ³	nein		
	07.11.87	257.0 m	57E-18 m ² (2)	-0.11 (2)		2.13E-15 m ³			
			6.6E-18 m ² (3)						
TEST 3	06.01.88	813.0 m	42E-18 m ² (1)(2)	45.0 (1)(2)	6.3 l (1)	1.56E-15 m ³	nein		
	07.01.88	839.0 m	6.6E-18 m ² (3)	5.0 (3)		0.17E-15 m ³			
TEST 4	03.11.88	3442.9 m	200E-18 m ² (1)	55.6 (1)	133 l (1)	8.80E-15 m ³	ja	Gase: N ; CH ; CO ; He ; Ar ; H... (8) Kat- und Anionen: Na ; Ca ; Sr ; Cl... (8)	Ra-226;Ra-228 (12) Pa-3;He-4;Ne-20; Ne-21;Ne-22 (13) H-3;H-2;O-18 (11) C-13/C-12 am Methan, Ethan,Propan weisen auf organischen Urspr. der KW hin (10)
	06.11.88	3486.9 m							
TEST 5	25.02.90	478.0 m	14.0E-18 m ² (4)	-0.80 (4)	930 l (4)	4.50E-15 m ³	ja	Leitfähigkeit; pH; Cl ; Na (8)	H-2;O-18 (11) Oberflächen Wasser Ne-20;Ne-21;Ne-22 (13)
	02.03.90	799.6 m	20.0E-18 m ² (5)	-0.85 (5)		6.40E-15 m ³			
TEST 6	06.03.90	1373.3 m	0.5E-18 m ² (4)	-0.80 (4)		7.50E-21 m ³	nein		
	09.03.90	1388.8 m							
TEST 7	02.03.90	2135.0 m	0.01E-18 m ²	-2.3	22 l (4)	0.60E-18 m ³	ja	Leitfähigkeit; pH; Cl (8)	
	05.03.90	2190.0 m	0.05E-18 m ² (4)	-4.5 (4)		2.80E-18 m ³			
PUMPTEST	03.04.90	3850.5 m	200.E-18 m ² (4)	18.4 (4)	71700 l (4)	3.00E-14 m ³	ja	Gase: N ; CH ; CO; C H ; He ; Ar ; H;Rn; pH; Leitfähig.(8)(9) Kat- und Anionen: Na ; Ca ; Sr ; Cl ; So ; K;... (8)(9)	H-2;O-18 (11) He-3;He-4;Ne-20;Ne-21; Ne-22 (13)
	12.04.90	4000.1 m							
ABSENKTEST	10.04.89	478.0 m	36.7E-18 m ² (6)		7800 l (7)	129.E-15 m ³	ja	Gase: N ; CH ; CO; C H ; He ; Ar ; H; pH; Leitfähig.(8) Na ; Ca ; Sr ; Cl (8)	Ethan,Propan weisen auf organischen Urspr. der KW hin (durch bakterielle/thermische Zersetz. entstanden)(10) Ra-226;Ra-228 (12) He-2;O-18 (11)
	22.05.89	4000.1 m	23.0E-18 m ² (5)			81.E-15 m ³			
		478.0 m	27.4E-18 m ² (6)			58.E-15 m ³			
		2600.0 m	32.3E-18 m ² (6)			6.E-15 m ³			
		2800.0 m	20.0E-18 m ² (6)			22.E-15 m ³			
		3900.0 m	213.0E-18 m ² (6)			21.E-15 m ³			
		4000.1 m							
		799.6 m	23.4E-18 m ² (5)	20.1 (5)	6900 l (7)	75.E-15 m ³			
		4000.1 m							
		3850.5 m	400.0E-18 m ² (5)	20.1 (5)	5500 l (5)	60.E-15 m ³			
	4000.1 m								
INJEKTION TEST	22.05.89	478.0 m	0.24E-18 m ²		2350 l (7)	0.8E-15 m ³	nein		
	29.05.89	4000.1 m	9.80E-18 m ² (6)			42.E-15 m ³			

Tabelle 2

Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse und Untersuchungen der hydraulischen Teste. Die Angabe der hydraulischen Parameter erfolgte in SI-Einheiten. Die entsprechenden hydrogeologischen Einheiten können den nachfolgend zitierten Berichten entnommen werden, die Teil des KTB-Reports 90-5 sind.

Enacesecu, Miehe, Pusch [Ramey] (1); Enacesecu, Miehe, Pusch [Simulation] (2); Enacesecu, Miehe, Pusch [Dual Porosity] (3); Ostrowski (4); Kessels, Zinner (5); Reifenstahl, Stober (6); Kessels, Zoth, Rück (7); Heinschild (8); Pekdeger, Sommer-von Jarmersted, Woith (9); Faber (10); Lodemann, Fritz (11); Hurst, Eichinger, Buheitel (12); Weise (13).

Die bisher vorliegenden Ergebnisse dokumentieren, wie anhand der Ergebnisse des Absenktestes erwartet, das Vorliegen eines süßwasserführenden Horizontes im oberen Bereich der Bohrung und eines höhersalinaren im unteren Abschnitt.

Offen bleiben muß z. Zt. der Ursprung der beim Pumpstest gewonnenen Fluide. Hier steht im Vordergrund die Frage, ob eine Verbindung über das hier angetroffene Kluftsystem zu den Sedimenten westlich der Fränkischen Linie besteht. Die ersten Untersuchungen der Kohlenstoffisotope von Faber (1990) deuten darauf hin.

Der relativ hohe Gehalt an Tochterelementen aus den Uran- und Thoriumreihen legt allerdings auch nahe, daß eine hydraulische Verbindung zum östlich gelegenen Granitkomplex existiert (siehe Bericht Pekdeger et al., 1990)

Nicht geklärt werden konnte, in welchem Teufenbereich der Bohrung sich die Übergangszone zwischen dem Süßwasser- und dem Salzwasserhorizont befindet. Die Permeabilität in diesen Bohrlochabschnitten war so gering, daß hier kein ausreichender Fluidgewinn wenig kontaminierter Fluide realisiert werden konnte.

Hydraulisch konnte gezeigt werden, daß im unteren Abschnitt der Bohrung ein großräumiges Reservoir vorliegt. Bei einer Entnahme von 71 m^3 Formationsflüssigkeit ergab der Pumpstest keinen Hinweis auf die Grenzen des Reservoirs. Diese hätten sich in einem deutlichen Abfall der Förderleistung am Ende des Pumpversuches zeigen müssen. Eine genaue Aussage über die Erstreckung des Kluftsystems war durch einen frühzeitigen Ausfall des Druckaufnehmers nicht möglich (Ostrowski, 1990).

Die zum Teil abweichenden hydraulischen Parameter, die von verschiedenen Autoren für die gleichen Tests angegeben wurden haben ihre Ursache in den unterschiedlichen Modellen, die bei der Auswertung zugrunde gelegt wurden. Auch andersartige Verfahren zur Anpassung der Druckkurven können hierfür Ursache sein. Für Modellrechnungen zur Simulation des großräumigen Fluidtransportes geben sie einen Hinweis auf den Spielraum, der für solche Modellierungen möglich ist.

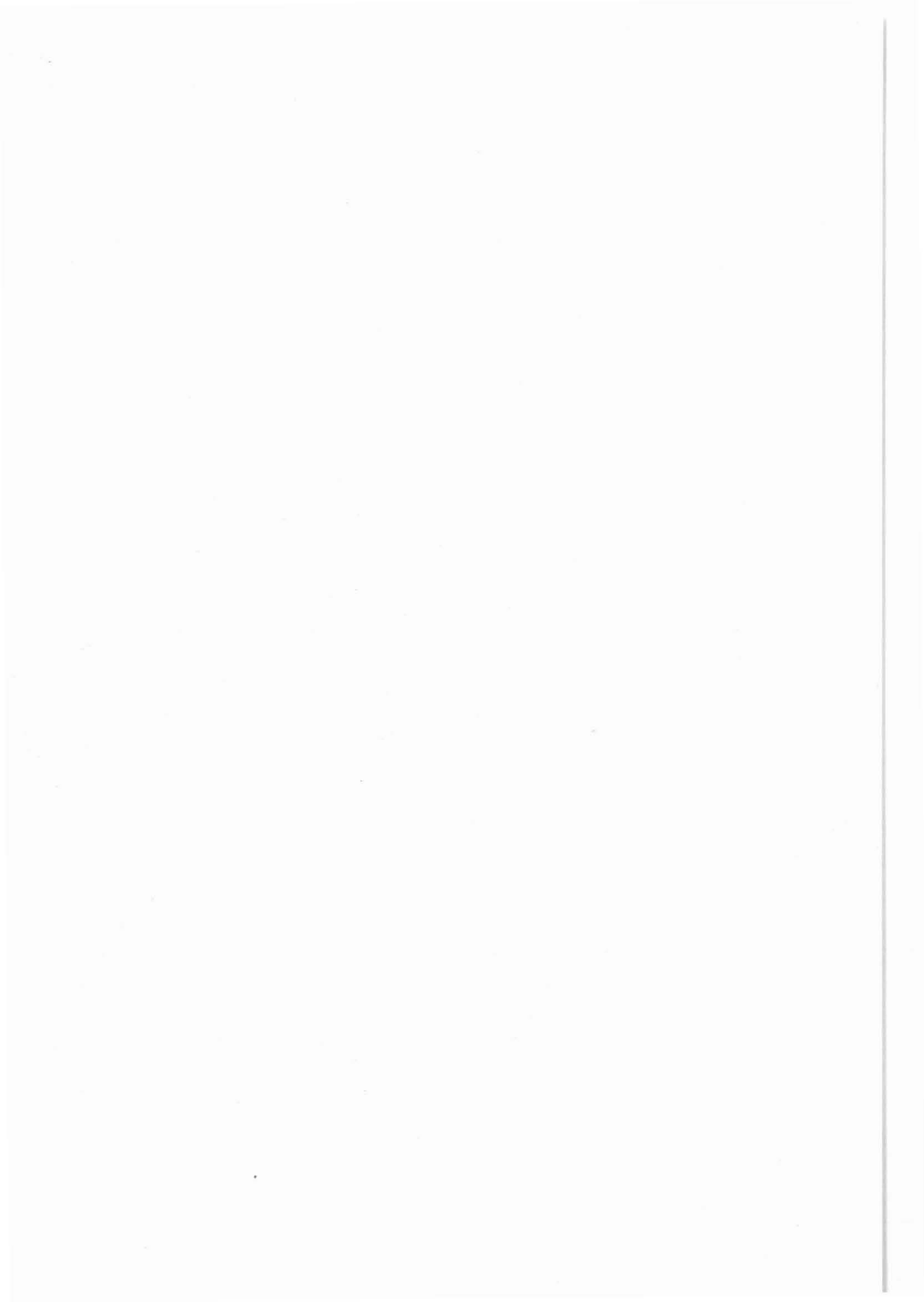
- Althaus, E., Behr, H., Eder, W., Goerlich, F., Maronde, D., Ziegler, W. (1984): Kontinentales Tiefbohrprogramm ("KTB") der Bundesrepublik Deutschland - Fortschritte und Stand 1984, Mitteilung XIX der Kommission für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung, DFG, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim
- Baumgärtner, J., Rummel, F. (1990): In Situ Permeability Measurements in the KTB Pilot Hole VB, Using a Wireline-Operated, Hydraulic Fracturing Straddle Packer Assembly, KTB-Report 90-5, NLFb, Hannover
- Draxler, J. und Hänel, R. (1987): Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik (Bericht 3), KTB-Report 87-4, S. 52 - 55, NLFb, Hannover
- Engeser, B. und Kessels, W. (1990): Technische Durchführung hydraulischer Teste in der KTB-Oberpfalz VB, KTB-Report 90-5, NLFb, Hannover
- Faber, E. und Whiticar, M. (1990): C- und H- Isotopenverhältnisse in leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen, Kohlendioxid und Wasserstoff aus Testuntersuchungen der KTB-Vorbohrung, KTB-Report 90-5, NLFb, Hannover
- Hänel, R. (1987): Arbeitsprogramm KTB Bohrlochgeophysik sowie Bohrlochmeßprogramm KTB-Oberpfalz VB, KTB Report 87-3, S. 129 - 135, NLFb, Hannover
- Hänel, R. (1989): Versuch zur Ermittlung von permeablen Klüften in der Pilotbohrung KTB-Oberpfalz VB mittels Stoneley Wellen, KTB-Report 89-1, S.123 - 134, NLFb, Hannover
- Kessels, W. (1988): Untersuchungen zur Stabilisierbarkeit einer übertiefen Bohrung. In: Emmermann, R. und Giese, P., KTB-Report 88-10, NLFb, Hannover
- Kessels, W. (1989): Bewertungskriterien zur Interpretation von Logdaten hinsichtlich hydraulisch testwürdiger Zonen, unveröffentlicher Bericht, NLFb/KTB, Hannover
- Kessels, W. (1989): The storage coefficient with regard to matrix compressibility, KTB-Report 89-1, S. 231 - 260, NLFb, Hannover
- Kessels, W., Zoth, G., Kück, J. (1989): Erste Ergebnisse eines Absenk- und Injektionstestes in der KTB-Oberpfalz VB, Bericht, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Arch.-Nr. 105 585, Hannover
- Kessels, W. (1990): Bohrlochmeßtechnische Kriterien zur Auswahl hydraulischer Testzonen, KTB-Report 90-5, NLFb, Hannover
- Miehe, R., Pusch, G. (1989): Bewertung hydraulisch testwürdiger Horizonte aufgrund von BHIV-Kluftigkeitsziffern und Stoneley-Wellen, Energieverlusten, unveröffentlicher Bericht, Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl und Erdgasgewinnung, TU Clausthal

Ostrowski, L. (1990): Hydraulisches Testprogramm KTB-VB, Ergebnisse der Felddauswertungen, KTB-Report 90-5, NLFb, Hannover

Pekdeger, A., Sommer-von Jarmerstedt, C. u. Woith, H. (1990): Zwischenbericht über erste Ergebnisse der Hydrochemie (Pumpversuch vom 07.04.90 - 11.04.90) an der KTB-VB, KTB-Report 90-5, NLFb, Hannover

Pusch, G. (1988): Das geohydraulische Testprogramm in KTB, Beitrag zum 1. KTB-Kolloquium, KTB-Report 88-10, NLFb, Hannover

Reifenstahl, F., Stober, I. (1990): Hydraulische Auswertung des Absenk-/Injektionstestes und des Leitfähigkeits-Fluid-Loggings, KTB-Report 90-5, NLFb, Hannover



Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Projektgruppe KTB

Stilleweg 2
3000 Hannover 51

Technische Durchführung hydraulischer Teste in der KTB-Oberpfalz VB

B. Engeser
W. Kessels



**TECHNISCHE DURCHFÜHRUNG HYDRAULISCHER TESTE IN DER
KTB-OBERPFALZ VB**

B. Engeser, W. Kessels

ZUSAMMENFASSUNG

Die Gewinnung möglichst unkontaminierter Formationsflüssigkeit und die Ermittlung der hydraulischen Parameter des Kristallins waren das wesentliche Ziel des hydraulischen Testprogramms in der KTB-Vorbohrung.

Durchgeführt wurden insgesamt 7 Packerteste, davon 3 in der Bohrphase. Die drei während der Bohrphase durchgeführten Drillstem-Teste (DST) hatten dabei die besondere Zielsetzung, vor erfolgter Spülungsinvansion den Gewinn von Formationsfluiden zu realisieren.

Die im Rahmen des Langzeitmeß- und Testprogramms ausgeführten hydraulischen Teste waren insbesondere für die Bestimmung hydraulischer Parameter ausgelegt.

Im untersten Horizont der Bohrung, in dem im Rahmen eines Absenktestes starke Zuflüsse beobachtet wurden, erfolgte ein einwöchiger Pumpstest.

Die technische Planung und Durchführung der Teste war durch beträchtliche bohrlochstabilitätsbedingte Risiken und Probleme gekennzeichnet. Die Beschreibung der zum Einsatz gekommenen Testausrüstung, die Planung und der technische Ablauf der Teste mit den gewonnenen Erfahrungen, ist Inhalt dieses Berichtes.

SUMMARY

The main objectives of the KTB-pilot hole hydraulic test programme were defined by gaining a sufficient amount of uncontaminated formation fluid samples and the determination of hydraulic rock parameters.

This was realized by carrying out a total number of 7 packer tests, three of them during the drilling phase.

The main objectives of the Drillstem-Tests was the gathering of formation fluid samples before contamination by deep invasion of drilling mud into the rock.

Within the longterm Logging and Testing programme run after the drilling phase three hydraulic tests were performed mainly for the determination of the hydraulic rock parameters. In the bottom section of the hole characterized by a strong in flux of formation fluid during a drawdown test, a one week production test was carried out subsequently.

The implementation of the tests was strongly hampered by borehole stability problems.

The following article describes the technical planning including the selection of the test equipment as well as the technical implementation and the experiences gained.

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

1.0 Einleitung

Bei hydraulischen Packertests wird ein Bohrlochabschnitt mit Hilfe von Packern hydraulisch vom übrigen Teil des Bohrloches isoliert. Die mechanische Stabilität eines Packers wird durch ein Stahlinnenteil gewährleistet. An diesem sind stahl-armierte Gummimanschetten angebracht, die zur hydraulischen Isolation an die Bohrlochwand angedrückt werden.

Im Regelfall werden Packer am Gestänge in das Bohrloch eingefahren. Über eine am Kabel setzbare Version wird von Baumgärtner und Rummel (1990) in diesem Report berichtet. Wesentlich für eine erfolgreiche technische Durchführung eines Packertests ist die Fähigkeit der Manschetten, sich nach dem Lösen des Packers möglichst in die Ausgangsform zurückzubilden. Insbesondere bei hohen Drucken und Temperaturen ist bei allen Packerelementen mit plastischen Deformationen zu rechnen.

Technisches Ziel eines Packertests ist es, nach dem Setzen der Packer das Testintervall mit einem Differenzdruck relativ zum Druckniveau der Formationsflüssigkeit zu versehen. Hierbei kann nach

- Injektionstesten - positiver Differenzdruck - und
- Fördertesten - negativer Differenzdruck -

unterschieden werden.

Eine Druckabsenkung im Testintervall kann erfolgen durch:

1. Einbau des leeren Gestänges mit geschlossenem Testventil;
2. Swabben, indem eine mit Gummimanschetten versehene Stange am Kabel in das flüssigkeitsgefüllte Gestänge eingelassen

wird und beim Wiederziehen Flüssigkeit aus dem Gestänge nach Übertage transportiert wird;

3. Gaslift-Verfahren mit Stickstoff im Testgestänge (Herausdrücken der Flüssigkeit aus dem Gestänge durch das Gas mit anschließendem Druckablassen nach dem Setzen der Packer);
4. Elektrisch oder mechanisch über ein Pumpgestänge betriebene Untertage-Pumpen.

Eine wesentliche Funktionseinheit eines Packersystems ist das Testventil (Tester). Mit ihm wird eine hydraulische Verbindung zwischen Testintervall und Gestänge hergestellt oder unterbunden. Es gibt Testventile mit

- mechanischer Betätigung über das Gestänge (Rotation, Auf/AB)
- hydraulischer Betätigung über den Ringraumdruck oder den Druck im Testgestänge.

Das Testventil wird zur Realisierung der verschiedenen Phasen eines Tests benötigt (Pulse-Test zur Untersuchung des Druckausgleichs bei geschlossenem Ventil, Slug-Test zur Ermittlung des Druckausgleichs bei offenem Ventil).

Die Meßdatenaufzeichnung (Druck und Temperatur) kann erfolgen über:

- Mechanische Aufzeichnung (Bourdon Rohr/Metallfolie),
- Elektronische Memory-Geräte,
- Online-Datenübertragung mit außen am Testgestänge geführtem Kabel,
- Online-Datenübertragung mit im Testgestänge eingeführtem

Kabel (Anschluß an die Packereinheit über einen "Wet-Connector").

Abhängig von der Anordnung und der Art der Ausrüstung können Druck und Temperatur

1. im Testintervall,
 2. unterhalb des Testintervalls,
 3. oberhalb des Testintervalls im Ringraum,
 4. in den Packern
- gemessen werden.

Bei einem Pumptest ist übertägig zusätzlich ein Flowmeter zur Bestimmung der Förderrate sinnvoll.

Über weitere technische Details wird in einem zur Zeit in Arbeit befindlichen KTB-Report zur technischen Durchführung der KTB-Vorbohrung berichtet werden.

Ein Großteil der hier aufgeführten Techniken kam in der KTB-Vorbohrung zum Einsatz, wie aus den nachfolgenden Kapiteln zu entnehmen ist. Entsprechend der unterschiedlichen Anforderungen an die Tests wird dabei eine Unterteilung in Drillstem-Tests (DST) während der Bohrphase, die hydraulischen Doppelpacker-Tests (HT) während des Langzeitmeß- und Testprogramms und dem Pumptest nach Einbau der zweiten Verrohrung unterschieden.

2.0 Durchführung von Drillstem-Testen während der Bohrphase

Entsprechend der Planung sollten hydraulische Tests während der Bohrphase beim Vorliegen einer Zuflußanzeige durchgeführt werden. Grundlage für die Festlegung der Testintervalle waren dabei die Spülungsanalytik und das Ergebnis von Bohrlochmes-

sungen. Die Hauptzielsetzung dieser Teste sollte die Gewinnung von Formationsflüssigkeit sein. Aus Zeit- und Kostengründen wurden diese Tests entsprechend der Hauptzielsetzung nur mit relativ kurzen Testzeiten durchgeführt. Hydraulisch ließen sich daher nur die Parameter im näheren Bohrlochbereich ermitteln. Eine genauere hydraulische Untersuchung sollte dann dem Langzeitmeß- und Testprogramm vorbehalten bleiben. Gegenüber den ursprünglich geplanten zehn DST-Testen konnten während der Bohrphase nur drei Teste erfolgreich durchgeführt werden. Der Grund hierfür ist im wesentlichen in Problemen der Bohrlochstabilität zu sehen. Mehrere instabile Bohrlochabschnitte führten zu einem erhöhten Risiko bei der Durchführung der Teste, das durch die Reduzierung der Anzahl so klein als möglich gehalten werden sollte.

2.1 Drillstem-Teste vor Einbau der ersten Verrohrung (DST 1 und DST 2)

Vor Einbau der ersten Verrohrung bis in eine Teufe von 478,5 m war geplant, zwei Drillstem-Teste in den Teufen zwischen 220 m - 257 m (DST 1) und 348 m bis 365 m (DST 2) durchzuführen. Zum Einsatz kam ein Doppelpackersystem der Firma Lynes. Die Testdurchführung erfolgte unter schwierigen Bohrlochbedingungen. Das Bohrloch wies große Auskesselungen auf und es mußte während der Testarbeiten mit Nachfall gerechnet werden. Ein hydraulisch dichtes Setzen der Packer war deshalb nur in wenigen Horizonten möglich. In Abb. 1 ist das Kaliber des Bohrlochabschnittes mit den eingezeichneten Testintervallen dargestellt. Ein erster Bericht über die Testdurchführung findet sich bei Draxler und Hänel (1987).

Wie aus dem in Tabelle 1 aufgelisteten Protokoll hervorgeht, konnte nur die Zone des DST 1 hinsichtlich einer Permeabilitätsauswertung erfolgreich getestet werden. Ein Fluidgewinn war aufgrund der niedrigen Permeabilität auch in diesem Test

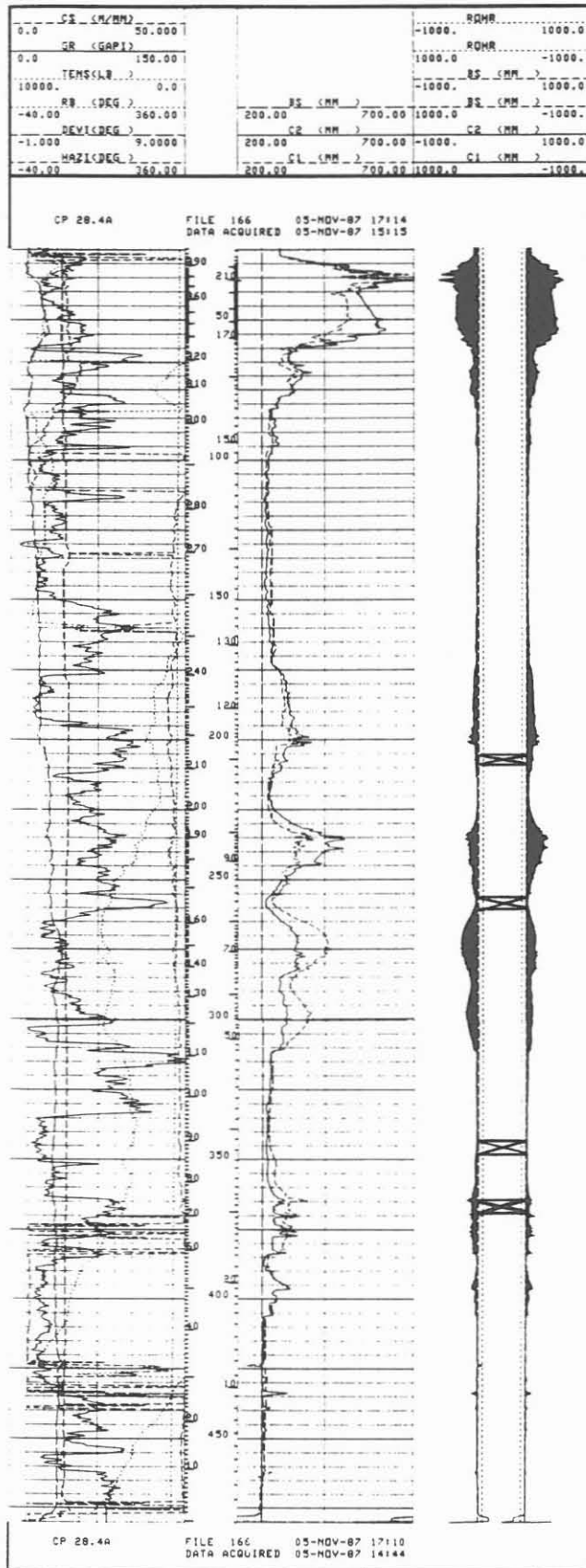


Abb. 1: Kalibermessung vor Durchführung der Drillstern-Teste 1 und 2 mit den Testintervallen

nicht möglich. Die in Tabelle 1 chronologisch aufgelisteten mehrfachen Setzversuche der Packergarnitur spiegeln die schwierigen Bohrlochbedingungen wieder. Dies gilt sowohl für die Auskesselungen als auch für das erstmals eingesetzte Spülungssystem Dehydril HT, das mit seinen hochthixotropen Fließeigenschaften die technische Durchführung der Tests erschwert hat.

Ein wesentliches technisches Problem bei der Durchführung der Drillstem-Tests 1 und 2 trat durch die mit Gesteinsmaterial angereicherte Bohrspülung auf. Durch den hohen "Yield Point" der Spülung wurde ein Absinken von Nachfall und Cuttings verhindert, sodaß alle Siebe und Filter sich nach kurzer Pump- und Fließzeit zusetzten. Ein Austausch der Spülung mit Frischwasser konnte aufgrund des hohen technischen Risikos (Bohrlochinstabilitäten) nicht durchgeführt werden. Das hohe Sicherheitsrisiko führte auch zu einem Verzicht auf eine online-Datenübertragung für die Druck- und Temperaturofzeichnung mit einem außen geführten Kabel. Die Testgarnitur ist in Abb. 2 dargestellt.

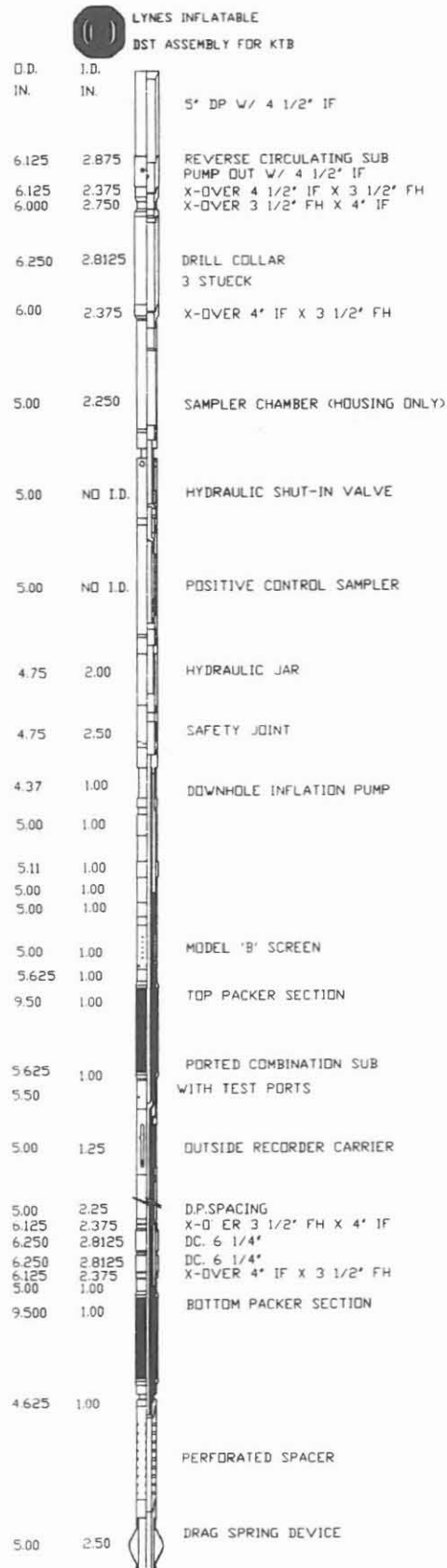


Abb. 2: Testkonfiguration für die Drillstem-Teste 1 und 2

Tabelle 1
Detaillierter Testablaufplan der Drillstem-Teste vor Einbau
der ersten Verrohrung (Bericht der Firma Lynes)

05.11.1987

23.30 h Aufbau der Übertage ausrüstung und Drucktest bis 70 bar in Verbindung mit dem Bohrgestänge. Drucktest verlief ordnungsgemäß.

06.11.1987

05.26 h Laden der DMRs 314 (Quarz-Speicher-Meßgeräte) S/N 1527 und 1531
Meßintervall: 2 min/34 Std.
Anlaufverzögerung von 60 min.
Laden des K-3 Kuster Meßgerätes 3000 PSI S/N 7949 mit einer 48 Stundenuhr S/N 22700.

05.30 h Beginn des Einbaus der Testgeräte.

06.00 h Auffüllen der Schwerstangenkammer mit Wasser, das mit einem Tracer angereichert war.

07.19 h Inflate Doppel-Packer-Test Nr. 1 auf Teufe Testzone 219,81 bis 257,0 m
Überstand über Drehtisch: 1,53 m.

07.20 h Beginn der Rotation des Bohrgestänges zum Aufpumpen der Packer mit 60 U/min.

07.40 h Stop der Rotation.

07.45 h Erneuter Beginn der Rotation mit 60 U/min.

07.55 h Stop der Rotation (die gesamte Pumpzeit belief sich auf 30 min mit 60 U/min).

07.58 h Überprüfung der Packersitze durch Zugbelastung 10 t Überlast.

08.30 h Belastung mit 5 t Stranggewicht zum Öffnen des Testventils.

08.42 h Testventil geöffnet ohne Anzeichen (Blasen) Übertage.

09.00 h Testventil geschlossen und dann mit dem gesamten Stranggewicht zum Öffnen beaufschlagt.

- 09.08 h Testventil geöffnet ohne Anzeichen (Blasen) übertage.
- 09.20 h Versuch mittels Lichtlot den Flüssigkeitsspiegel zu messen - kein Erfolg.
- 10.30 h Einbau des elektrischen KTB-Einström Probennehmers (GEOCOM). Der Probennehmer steht auf in einer Teufe von 178,0 m. (Teufe des Kugelventils in der Schwerstankammer).
- 12.20 h Testventil geschlossen.
- 12.25 h Packer entlastet - Ausbau.
- 13.40 h Testgeräte übertage. Meßgeräte ausgebaut und Druckdiagramm vs-Zeit erstellt. Das Druckdiagramm zeigt, daß das Testgerät unmittelbar nach dem Öffnen verstopft war. Es wurde die Entscheidung getroffen, den Wiedereinbau ohne das Drill Pipe Safety Valve vorzunehmen. Reinigen des Filters mit Wasser, Reinigung der Pumpenkupplung und Rückstellung in Pumpposition. Entleeren der Probekammern. Ablesen der Meßgeräte und Vorbereiten für den nächsten Einbau. Ausbau des Kugelventils und der 3,5" IF-Übergänge.
- 15.19 h Laden der Meßgeräte (gleiches Intervall wie vorher).
- 15.31 h Ein Zug Schwerstangen oberhalb des Testventils verschraubt und mit Wasser gefüllt, bis zum Testventil aufgefahren und in den Keilen abgesetzt, um die Zuflußöffnungen zu reinigen und zu überprüfen. Die Zuflußöffnungen waren frei.
- 16.01 h Start des Einbaus der Testgeräte.
- 16.40 h Inflate Doppel-Packer-Test Nr. 1.2 auf Teufe Testzone 219,81 - 257,0 m. Überstand über dem Drehtisch: 2,02 m.
- 17.02 h Start der Rotation zum Aufpumpen des Packers mit 60 U/min.
- 17.20 h Stop der Rotation.
- 17.25 h Erneuter Start der Rotation.
- 17.35 h Stop der Rotation - Überprüfung der Packer - freie Bewegung.

- 17.40 h Erneuter Start der Rotation.
- 17.50 h Stop der Rotation - Überprüfung der Packer - freie Bewegung (gesamte Rotationszeit: 40 min).
- 17.55 h Ausbau der Testgarnitur. Beim zweiten Zug mittlere Stange zeigte der Gewichtsmesser 10 t Überlast an.
- 19.00 h Testgeräte übertage. Dabei wurde festgestellt, daß der obere Packer nicht entlastet war (auf ca. 10,5" aufgepumpt). Packer bis zur Pumpe aufgefahren, in den Keilen abgesetzt und beide Packer in normaler Prozedur durch die Zuflußöffnungen entlastet. Nachdem sich gezeigt hatte, daß der obere Packer teilweise aufgepumpt war, wurde die Entscheidung getroffen, die Pumpe auszuwechseln und den Teststrang wieder einzubauen.
- 20.00 h Nach Auswechseln der Pumpe und Durchspülen (Reinigen) des Druck- und Ansaugsystems oberhalb des oberen Packers wurde die Testgarnitur wieder eingebaut.
- 20.30 h Inflate Doppel-Packer-Test Nr. 1.3 auf Testteufe 219,31 - 256,50 m. Überstand über dem Drehtisch: 2,52 m.
- 20.50 h Start der Rotation zum Aufpumpen der Packer mit 60 U/min.
- 21.10 h Stop der Rotation.
- 21.15 h Erneuter Start der Rotation.
- 21.25 h Stop der Rotation zum Überprüfen der Packer-sitze - kein Widerstand - Geräte hängen frei im Loch.
- 21.30 h Erneuter Start der Rotation mit 90 U/min.
- 21.40 h Stop der Rotation zum Überprüfen der Packer-sitze - Geräte frei im Loch (gesamte Rotationszeit: 40 min).
- 22.00 h Eine Stange ausgebaut und zwei Passenden eingebaut.
- 22.10 h Inflate Doppel-Packer-Test Nr. 1.4 auf Testteufe 216,81 m - 254,0 m. Überstand über dem Drehtisch: 1,44 m.

- 22.20 h Start der Rotation zum Aufpumpen der Packer mit 60 U/min.
- 22.40 h Stop der Rotation.
- 22.45 h Erneuter Start der Rotation.
- 22.55 h Stop der Rotation zur Überprüfung der Packersitze - Geräte frei im Loch (gesamte Rotationszeit: 30 min).
- 23.05 h Abbau der Übertageausrüstung und Ausbau Einbau für Test Nr. 2.
- 24.00 h Lastabnahme auf ca. Teufe 369,0 m (untere Packer-Dichtfläche) - Testgerät durch Auf- und Abbewegung freigefahren. Auf ca. 387 m 10 t Überlast, nach unten frei. Da angenommen wurde, daß die Packer gerinfügig aufgepumpt waren (wahrscheinliche Ursache für die Überlast bei der Aufwärtsbewegung in Teufe 369 bis 370 m), wurde entschieden, die Packer aufzupumpen und gleich wieder zu entlasten.

07.11.1987

- 00.45 h Start der Rotation zum Aufpumpen der Packer.
- 01.10 h Stop der Rotation (gesamte Rotationszeit: 23 min). Überprüfung der Packersitze mit 10 t Überlast und 5 t Belastung. Packersitze in Ordnung.
- 01.15 h Packer entlastet.
- 01.25 h Inflate Doppel-Packer-Test Nr. 2 auf Testteufe 347,81 m - 385,0 m. Überstand über dem Drehtisch: 1,92 m. Start der Rotation zum Aufpumpen der Packer mit 60 U/min.
- 01.45 h Stop der Rotation.
- 01.50 h Erneuter Start der Rotation.
- 02.00 h Stop der Rotation - Überprüfung der Packersitze - Testgerät frei im Loch.
- 02.02 h Erneuter Start der Rotation mit 40 U/min.

02.19 h Stop der Rotation.

02.24 h Erneuter Start der Rotation.

02.44 h Stop der Rotation (gesamte Rotationszeit:
68 min). Überprüfung der Packersitze - Test-
gerät frei im Loch.

02.50 h Aufgefahren zur Testzone Nr. 1.

03.20 h Inflate Doppel-Packer-Test Nr. 1.5 auf Test-
teufe 219,81 m - 257,0 m. Überstand über dem
Drehtisch: 2,02 m.

03.25 h Start der Rotation zum Aufpumpen der Packer
mit 60 U/min.

03.45 h Stop der Rotation.

03.50 h Erneuter Start der Rotation.

04.00 h Stop der Rotation (gesamte Rotationszeit:
40 min). Überprüfung der Packersitze - Test-
gerät frei im Loch.

04.15h Ausbau.

05.10 h Testgerät übertage.

09.30 h Testgerät verladen.

10.30 h Abfahrt von der Bohrung.

2.2 Drillstem-Test DST 3 im Teufenbereich von 813 - 839 m

Nach Erreichen einer Bohrteufe von 992 m sollten im unverrohrten Bohrlochabschnitt drei Teste in den Teufen 813 m - 839 m, 556 m - 592 m und 505 m - 531 m durchgeführt werden. Der Openhole-Bereich zeichnete sich auch hier, insbesondere im oberen Abschnitt, durch starke Auskesselungen aus. Wie in Abb. 3 in der rechten Kalibermessung, ausgeführt vor Testausführung, deutlich wird. Aufgrund möglicher Bohrlochstabilitätsprobleme während der Testdurchführung wurde die Testgarnitur in Abweichung von der ersten Testdurchführung mit einer Schlagschere versehen, die ein Freischlagen eines möglicherweise festsitzenden Packers ermöglichen sollte. Um während der Testdurchführung eine online-Druck- und Temperaturbeobachtung zu realisieren, wurde der Test mit einem "Surface Read-out" über ein im Testgestänge geführtes Kabel durchgeführt. Die Druckabsenkung im Testintervall sollte möglichst schonend, d. h. in Stufen, erfolgen. Hierzu wurde mit einer Stickstoffvorlage im Testgestänge die Spülung erst bis zur gewünschten Druckabsenkung verdrängt und dann nach Setzen des Packers eine Druckabsenkung durch stufenweises Ablassen des Stickstoffes erzeugt. Aufgrund der Erfahrungen aus dem DST 1 wurde zur Vermeidung des Verstopfens der Filter an der Downhole-Pumpe die Viskosität der Spülung durch Zusatz von Wasser verringert. Der in Tabelle 2 aufgeführte Testablauf dokumentiert dann, daß trotz dieser Sicherheitsmaßnahmen erhebliche Bohrlochinstabilitäten auftraten. Diese führten dazu, daß schon beim ersten Test im Teufenbereich 839 m - 813 m die Packer mehrfach festsäßen und nur mit Hilfe hoher Zuglasten und des Einsatzes der Schlagschere freigezogen werden konnten. Dies führte dann allerdings zu einer Zerstörung der Packerelemente, wie in Abb. 4 dargestellt ist. Eine nach dem Test durchgeführte Kalibermessung (siehe Abb. 3) zeigte beträchtliche Bohrlocherweiterungen, deren Ursache in der Verdünnung der Spülung zu suchen ist. Nach Ausbau des Testgestänges und der

Tabelle 2
Testablauf des Drillstem-Test Nr. 3 im Teufenbereich 839 m - 813 m

06.01.1988

08.30 h	an der Bohrung Chicksan, Manifold und Kopf aufgebaut für Drucktest.
11.00 h	Anfang Drucktest Übertageausrüstung mit 132 bar - in Ordnung.
11.15 h	Druck abgelassen, Kabelstopfbuchse aufge- baut.
11.53 h	Drucktest Kabelstopfbuchse mit Spülung.
12.12 h	Drucktest Kabelstopfbuchse mit N2/60 bar - N2 leckt langsam aus Stopfbuchse.
12.15 h	Ende Drucktest - N2 abgeblasen - Kopf und Chicksanleitung abgebaut.
14.00 h	Testgeräte auf dem Gestängelager zusamme- geschraubt.
15.30 h	Anfang Testgeräte einzubauen.
15.45 h	Bottom Packer im Loch.
18.00 h	Meßgeräte eingebaut.
18.20 h	Anfang Schwerstangen einzubauen.
21.26 h	Auf Teufe - Stranggewicht 24 t - 22t.
21.30 h	Anfang Packer aufzupumpen.
21.50 h	Pumpe gestoppt.
22.00 h	Weitergepumpt.
22.10 h	Ende Packer setzen.
22.12 h	Packersitz mit 6 t Überlast geprüft - in Ordnung.
22.15 h	Testkopf und Chicksanleitungen aufgebaut.
23.22 h	Einbau CWL 300 mit Schlumberger.

23.57 h CWL auf Teufe.
24.00 h Stopfbuchse zugepumpt - Stopfbuchse hält das Kabelgewicht nicht - Umlenkrollen an Gestängebühne befestigt.

07.01.1988

00.50 h Beginn N₂ einzublasen (siehe beigefügtem Surface Read-out).
01.23 h Manifold an N₂ Flaschen eingefroren.
01.28 h weiter N₂ eingeblasen.
01.39 h Ende N₂ einzublasen bei 50 bar Kopfdruck.
01.44 h Beginn Testventil zu öffnen.
01.50 h Testventil offen.
02.50 h Beginn 20 bar N₂ abzublasen.
03.07 h Stop N₂ abzublasen bei 29,5 bar Kopfdruck.
03.15 h Kabelstopfbuchse undicht - leichter Druckabfall.
03.37 h Beginn N₂ abzublasen.
03.48 h Stop N₂ abzublasen.
04.19 h Beginn N₂ abzublasen.
04.35 h N₂ abgeblasen - 0,80 bar Kopfdruck.
07.31 h Testventil geschlossen.
07.37 h CWL ausgebaut.
10.31 h Anfang Packer zu lösen - 12 Versuche ohne Erfolge - 6 t Überlast gezogen (30 t auf Gewichtsmesser).
11.15 h 2 t Gewichtsabnahme.
11.40 h 10 t Überlast gezogen (34 t auf Gewichtsmesser).
11.48 h Schlagschere betätigt mit 10 t Überlast.
11.49 h 14 t Überlast gezogen.

11.53 h Auf Neutrallast gefahren.
11.56 h Mit den Strang auf- und abgefahren - 10 t Überlast und 10 t Belastung - kein Erfolg.
12.10 h Auf Neutrallast gefahren.
12.30 h Testkopf aufgebaut.
12.34 h Beginn Testventil zu öffnen.
12.38 h Testventil offen - Ringraum füllt langsam ab.
12.42 h Strangbewegung nach unten.
12.43 h 1 Stange nachgesetzt.
12.50 h Angefangen zu fahren - 18 bis 40 t auf Gewichtsmesser.
13.00 h Testventil geöffnet - Ringraum füllt nicht ab.
13.03 h Testventil geschlossen.
13.04 h 20 t Überlast gezogen.
13.05 h 26 t Überlast gezogen.
13.06 h Schlagschere betätigt.
13.07 h 36 t Überlast gezogen.
13.10 h 46 t Überlast gezogen.
13.11 h Nach unten gefahren.
13.12 h 26 t Überlast gezogen.
13.13 h Schlagschere betätigt.
13.14 h 46 t Überlast gezogen.
13.16 h Schlagschere betätigt.
13.17 h 46 t Überlast gezogen.
13.18 h Beginn Testventil zu öffnen.
13.20 h Testventil offen - Ringraum füllt nicht ab.

13.22 h 26 t Überlast gezogen.

13.25 h Schlagschere betätigt.

13.26 h 56 t Überlast gezogen und Gewicht stehen-
gelassen - Packer rutscht nicht.

13.45 h Angefangen zu schlagen - 10mal mit 36 t
Überlast.

13.53 h 56 t Überlast gezogen - kein Erfolg.

13.55 h Anfang Schlagen 10mal mit 36 t Überlast -
bei 8mal Schlagen Strang frei nach unten.

14.02 h Versuch Gestänge zu ziehen.

14.04 h 1 Stange mit 20 t gezogen.

14.05 h 1 Stange eingefahren - bei 18 t aufgesetzt.

14.07 h 2 Stangen ausgefahren.

14.10 h 2 Stangen abgeschraubt.

14.21 h Anfang Ausbau.

14.57 h 56 t Überlast gezogen bei 22. Zug.

15.00 h Anfang mit Schlagen - kein Erfolg.

15.30 h Testkopf aufgebaut.

15.47 h Aufwerfstange gelöst.

15.57 h Kein Abfall im Ringraum, obwohl Zirkulati-
onsventil offen.

16.05 h Auf Bohrstrang gepumpt.

16.12 h Zirkulation mit 12 bar - 255 l/min.

16.15 h Anfang Schlagen.

16.49 h Strang ist frei.

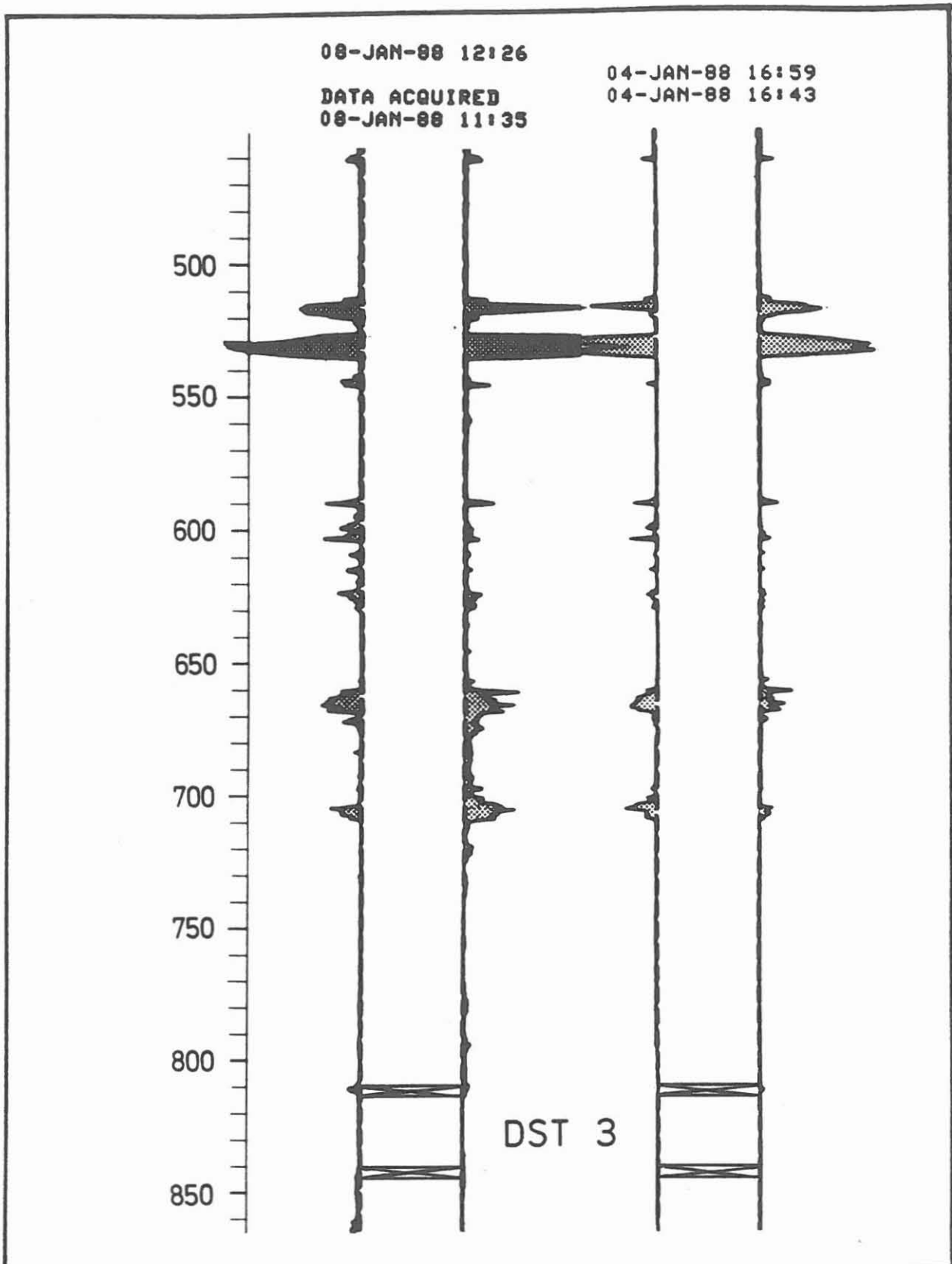
16.51 h Chicksanleitung und Kopf abgebaut.

16.55 h Weiterer Ausbau.

19.10 h Gestänge aus dem Loch.

21.30 h Testgeräte aus dem Turm.

22.00 h Auslesen der Meßdaten.



Kalibermessungen vor (4.1.88) und nach (8.1.88)
Verringerung der Spülungviskosität und
Spülungsgelstärke in der KTB Vorbohrung

Abb. 3
KTB

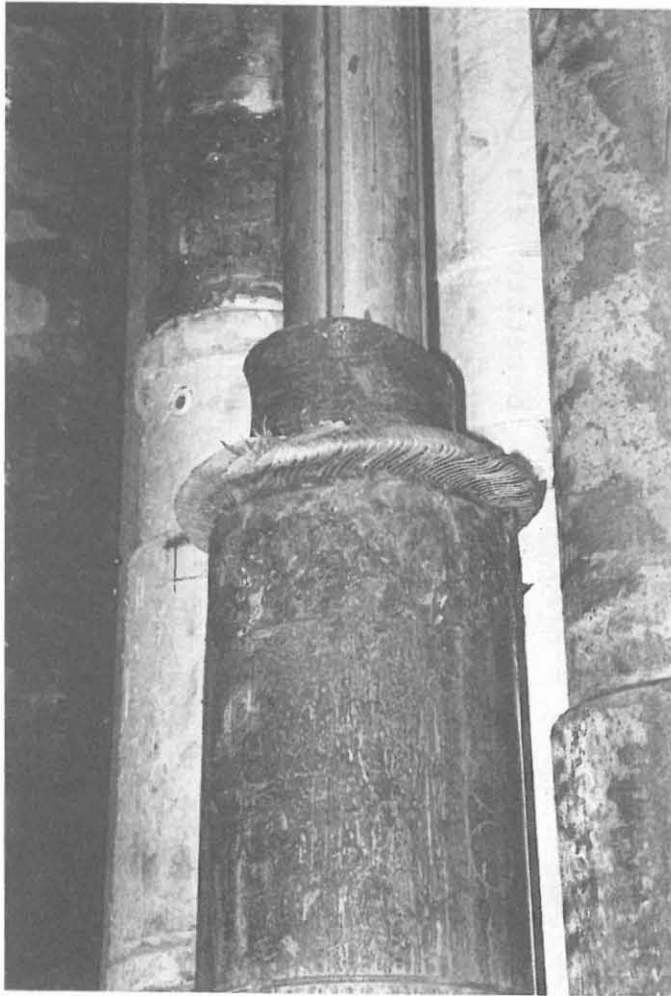


Abb. 4: Zerstörte Packerelemente nach Beendigung
des Tests DST 3

Reste des Packersystems wurde dann die Entscheidung getroffen, bis auf weiteres Testdurchführungen auszusetzen und so die beiden verbliebenen Teste zurückzustellen. Die Testgarnitur entsprach der in Abb. 2 dargestellten.

Der Drillstem-Test 3 kann hinsichtlich der Auswertbarkeit der Druckaufbaukurve zur Ermittlung hydraulischer Parameter als erfolgreich bezeichnet werden. Die Permeabilität war allerdings so gering, daß der beim Test erreichte Zufluß für eine Probennahme nicht ausreichend war.

2.3 Drillstem-Test (DST 4) im Teufenbereich 3 442,0 m - 3 486,9 m

Im Teufenbereich bei 3 450 m zeigte die Spülungs- und Gasanalytik einen deutlichen Anstieg der Chlorid-, Strontium-, Kalzium-, Helium- und Methanwerte (Wittenbecher et al., 1989). Die ersten Bohrlochmessungen in diesem Teufenbereich zeigten ebenfalls eine deutliche Leitfähigkeitserhöhung der Spülung in diesem Bohrlochabschnitt über einen Bereich von ca. 50 m (Kessels und Pusch, 1990). Die Kernentnahme ergab, daß bei 3 447 m eine offene, mit Kalzit besetzte Kluft durchbohrt worden war. Eine kurzfristig getroffene Entscheidung führte dann zur Durchführung eines Stützankertestes in diesem Teufenbereich.

Die Testkonfiguration geht aus Abb. 5 hervor. Zum Einsatz kam ein mechanisch setzbarer Packer der Firma Halliburton. Die Druck- und Temperaturmessung wurde mit zwei unabhängigen Meßgeräten (elektrische und mechanische Aufzeichnung) ausgeführt.

Erstmalig fand der Test mit dem KTB-Seilkernbohrstrang als Testgestänge statt, da das Risiko des Festwerdens hiermit reduziert werden konnte.

TEST STRING CONFIGURATION

	O. D. (in)	I. D. (in)	LENGTH (m)	DEPTH (m)
WIRELINE LUBRICATOR.....				
PREVENTER.....				
CROSSOVER.....				
5-15 LIFT NIPPLE.....				
CROSSOVER.....				
DRILL PIPE.....	3.500			
CROSSOVER.....	6.000			
SG-10 QUICK DISCONNECT.....	6.000	2.300	0.731	
SG-10 MASTER VALVE.....	6.000	2.600	0.565	
SG-10 REMOTE CONTROL VALVE.....	6.000	2.620	1.118	
SG-10 PRESSURE BALANCED SWIVEL..	6.000	2.600	0.737	
SG-10 MASTER VALVE.....	6.000	2.600	0.565	
CROSSOVER.....	6.000	2.250		
CROSSOVER.....	5.500			
DRILL PIPE.....	5.500		3093.140	
DRILL COLLARS.....	5.500		216.450	3081.77
CROSSOVER.....	5.500		0.370	3298.22
CROSSOVER.....	4.750	2.000	0.320	3298.54
DRILL COLLARS.....	4.630	2.000	37.830	3298.91
CROSSOVER.....	4.626	2.165	0.310	3336.74
CROSSOVER.....	3.850	1.772	0.180	3337.05
PUMP OUT REVERSING SUB.....	3.750	1.750	0.370	3337.23
FUL-FLO HYDROSPRING.....	3.900	1.800	3.410	3337.60
CROSSOVER.....	3.622	1.969	0.220	3341.01
DRAIN VALVE.....	3.800	1.890	0.360	3341.21
CROSSOVER.....	3.850	1.575	0.200	3341.59
CROSSOVER.....	3.976	2.205	0.200	3341.79
CROSSOVER.....	4.626	2.717	0.200	3341.99
CROSSOVER.....	4.626	2.323	0.310	3342.19
DRILL COLLARS.....	4.630	2.000	28.000	3342.50
CROSSOVER.....	4.626	2.283	0.400	3370.50
CROSSOVER.....	4.626	2.402	0.200	3370.90
SLIP JOINT.....	3.900	1.800	3.000	3371.10
CROSSOVER.....	4.626	2.441	0.200	3374.90
CROSSOVER.....	4.626	2.126	0.310	3375.10
DRILL COLLARS.....	4.630	2.000	56.410	3375.41
CROSSOVER.....	4.626	2.165	0.310	3431.02
CROSSOVER.....	3.850	1.969	0.330	3432.13
DRAIN VALVE.....	3.800	1.870	0.360	3432.46
CROSSOVER.....	3.850	1.969	0.240	3432.82
HYDROSPRING TESTER.....	3.900	0.620	1.500	3433.06
MULTIPLE CIP SAMPLER.....	3.900	0.620	2.030	3434.56
ELECTRONIC GAUGE RUNNING CASE...	3.800	3.000	1.500	3436.59
ELECTRONIC GAUGE RUNNING CASE...	3.800	3.000	1.500	3438.09
JAR.....	3.900	1.250	1.530	3439.59
VR SAFETY JOINT.....	3.800	0.750	0.750	3441.12
OPEN HOLE PACKER.....	5.250	0.750	1.370	3442.93
ANCHOR PIPE SAFETY JOINT.....	3.750	0.700	1.100	3443.24
FLUSH JOINT ANCHOR.....	3.750	1.750	10.940	3444.42
CROSSOVER.....	4.626	1.890	0.310	3455.36
CROSSOVER.....	4.626	1.890	0.310	3455.67
DRILL COLLARS.....	4.630	2.000	28.110	3455.98
CROSSOVER.....	4.626	2.362	0.310	3484.09
CROSSOVER.....	4.626	1.693	0.330	3484.44
FLUSH JOINT ANCHOR.....	3.750	1.750	0.910	3484.73
BLANKED-OFF RUNNING CASE.....	3.750	2.500	1.000	3485.64
SHOE.....	3.750	0.000	0.260	3486.64

Abb. 5: Testkonfiguration für den Stützankertest DST 4

Die Druckabsenkung erfolgte, um schlagartige Entlastung zu vermeiden, wie im DST 3, mit einer Stickstoffvorlage.

Der Ablauf der Testdurchführung ist in Tabelle 3 dokumentiert.

In der in Abb. 6 dargestellten Druck- und Temperaturlaufzeichnung der Memorygeräte sind die markanten Punkte des Testablaufes markiert.

Aus technischer Sicht ergab sich schon beim Packereinbau eine wertvolle Information über die beim Einbau durch die Verdrängung auftretenden Druckstöße (Surge).

Trotz der schrittweisen Reduzierung der Einbaugeschwindigkeit von 20 m/min auf 2 m/min stiegen die Druckstöße mit der Einbautiefe an und erreichten Werte bis 50 bar. In Abb. 7 und Abb. 8 zeigen die Druckaufzeichnungen dies für die in Abb. 6 gekennzeichneten Einbauintervalle A-B und C-D. Beim anschließenden Gestängeausbau konnten die durch den Kolbeneffekt (Swab) erzeugten Druckabsenkungen ebenfalls mitaufgezeichnet werden. Die Erfassung der beim Ein- und Ausbau auftretenden Druckstöße hat besondere technische Bedeutung für Fragen der Bohrlochstabilität, wie anhand einer Vielzahl in der KTB-Bohrung durchgeführten Kalibermessungen nachgewiesen werden konnte (Kessels, 1989).

Nach erfolgter stufenweiser Druckabsenkung im Testintervall (Abschnitt F-G in Abb. 6) zeigte die Druckmessung stark streuende Werte an (siehe Abb. 9). Zur Zeit gibt es dafür noch keine schlüssige Erklärung.

Tabelle 3
Testablauf des Drillstem-Tests Nr. 3 im Teufenbereich
3 442,0 m - 3 486,9 m

03.11.1988

- 06.00 - 17.50 h Teststrang mit 410 bar abgedrückt i.O.
17.50 - 20.00 h Otis Abdichtstopfen gezogen.
20.00 - 24.00 h Bohrung gespült und 3 m³ 1,0 % Dehydrilpille auf die Sohle von 3 486,9 m bis 3 371,9 m einzirkuliert.
24.00 - 06.00 h Strang zum Teil ausgebaut.

04.11.1988

- 06.00 - 09.00 h Strang fertig ausgebaut.
09.00 - 13.00 h Testgeräte zusammengebaut.
13.00 - 06.00 h Teststrang zum Teil eingebaut
Einbaugeschwindigkeit:
bis 2 000 m 20 m/min
bis 3 000 m 12 m/min
bis 3 400 m 6 m/min
bis 3 450 m 2 m/min
Start des oberen Memorygerätes 10.10.37.
Start des unteren Memorygerätes 10.15.23.

05.11.1988

- 06.00 - 06.45 h Teststrang fertig eingebaut.
06.45 - 10.25 h Testkopf mit Wireline-Schleuse aufgebaut
Hakenlast beim Hängen 36 t,
beim Auffahren 107 t.
10.25 - 10.38 h Selingdruckmeßgerät (SRO) bis Teufe 3 300 m eingefahren und Druck der Wasservorlage gemessen $P_{WV} = 112,8$ bar (a).
12.38 - 13.29 h Stickstoffvorlage mit 151 bar (a) Kopfdruck in den Teststrang gepumpt, dabei Druck in 3 300 m von 302 bar (a) gemessen.
13.29 - 13.40 h Hakenlast beim Auffahren 91 t,
beim Hängen 40 t.
Strang frei bei 112 t Hakenlast.
13.40 - 13.42 h Packer belastet.

- 13.42 - 13.58 h Tester geöffnet,
1. Fließzeit.
Während der 1. Fließzeit wurde die Bohrung gegen geschlossenen Kopf gefahren. Die gemessenen Bodendrücke mit dem Selinggerät sind der Anlage 2 und 3 zu entnehmen.
- 13.58 - 15.30 h 1. Schließzeit, dabei 1 bar Kopfdruckabfall registriert.
- 15.31 - Beginn 2. Fließzeit, dabei
- 15.32 - 15.51 h Stickstoff mit ca. 8 000 m³ (V_n)/h abgelassen. Kopfdruck von 149 bar auf 102 bar abgebaut.
- 15.51 - 16.01 h Bohrung am Kopf geschlossen.
- 16.01 - 16.22 h Kopfdruck von 102 bar auf 52 bar abgelassen.
- 16.22 - 16.32 h Bohrung am Kopf geschlossen.
- 16.32 - 17.11 h Kopfdruck von 52 bar auf 1 bar abgelassen.
- 17.39 h Schwebekörperdurchflußmesser montiert - kein Zufluß zu beobachten.
- 17.11 - 19.45 h Bodendruck in Teufe 3 300 m beobachtet, dabei Druckschwankungen in der Säule der Wasservorlage registriert (siehe Anlage 4).
- 19.45 - 19.58 h Selinggerät in Teufe 3 250 m gefahren.
- 19.58 - 21.00 h Druckschwankungen in der Säule der Wasservorlage weiter beobachtet.
- 21.00 - 03.00 h 2. Schließzeit.
- 03.00 - 03.06 h Testgarnitur mit 115 t freigezogen.
- 03.06 - 04.45 h Testkopf mit Wirelineschleuse abgebaut, Halliburton Pumpaggregat zum Einzirkulieren der Spülung in den Teststrang aufgebaut.
- 04.45 - 06.10 h Teststrang aufgefüllt und Pumpout-Sub mit 165 bar aktiviert.

06.11.1988

- 06.10 - 09.36 h Wasservorlage rechtsherum auszirkuliert.
- 09.36 - 10.03 h Halliburton Pumpaggregat ausgebaut.

- 10.03 - 10.05 Teststrang mit 138 t freigezogen.
- 10.05 - Ausbaubeginn
- 23.00 Full Flo-Tester zutage. Gas- und Flüssigkeitsprobe der Kammer entnommen (Anlage 5).
- 01.00 Hydrospringtester zutage. Sampler im KTB-Labor entleert (Anlage 5).
- 01.45 Memory-Druckmeßgeräte ausgebaut.
- 02.00 Ausbau beendet, BT-Druckmeßgerät entnommen.

Die starke Fluktuation der Druckmeßwerte begann bereits bei einer Druckabsenkung auf 100 bar. Die Oszillationen verschwanden nach dem Schließen des Testventils (siehe H-I in Abb. 6). Die hydraulische Auswertung dieses Testes und auch der Drillstem-Teste 1 und 3 findet sich bei Enacescu et al. (1990) in diesem Report. Von technischer Seite konnte der Test trotz der erheblichen Risiken erfolgreich durchgeführt werden.

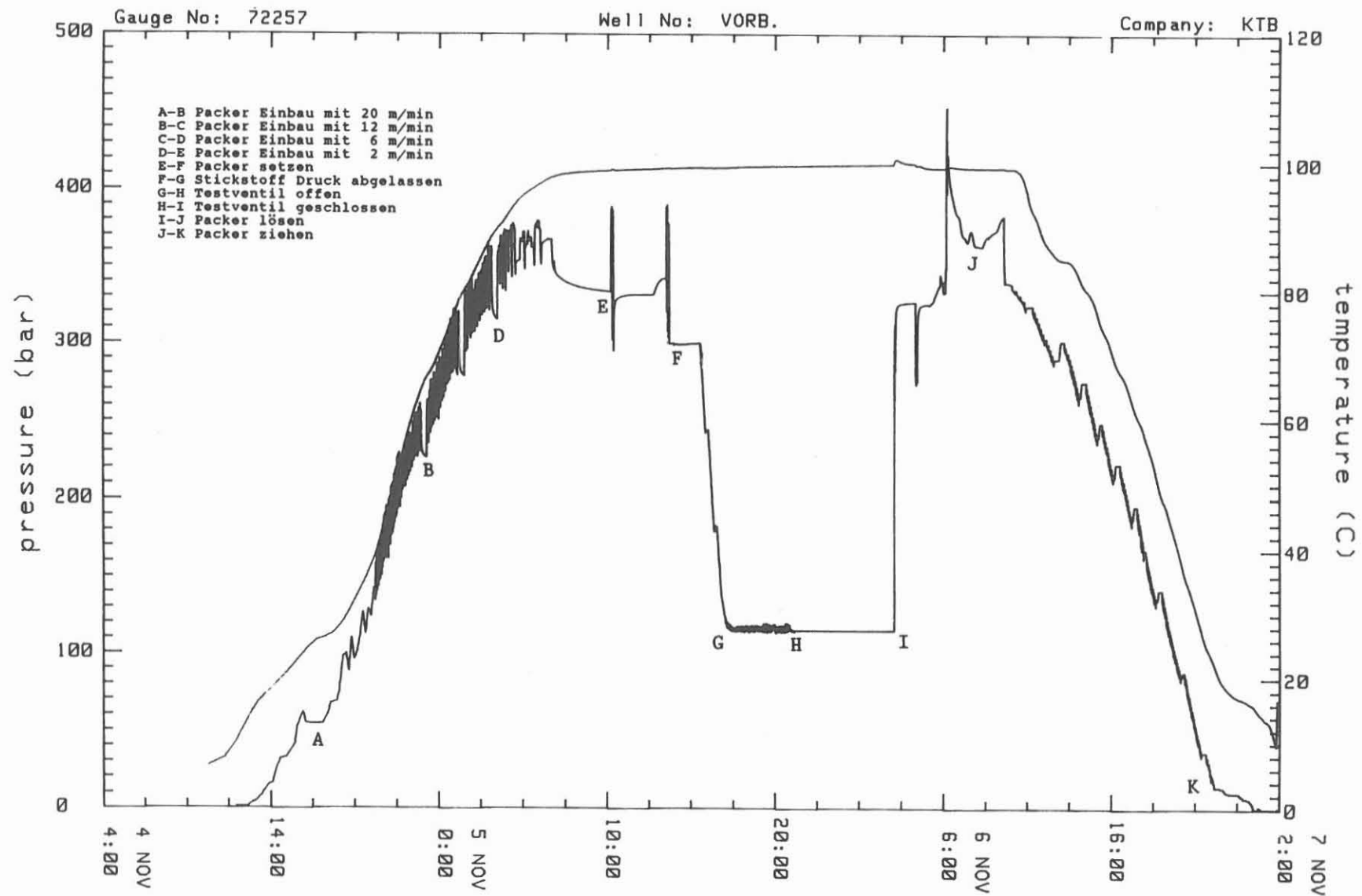


Abb. 6: Druck- und Temperaturlaufzeichnung während des Stützankertests DST 4

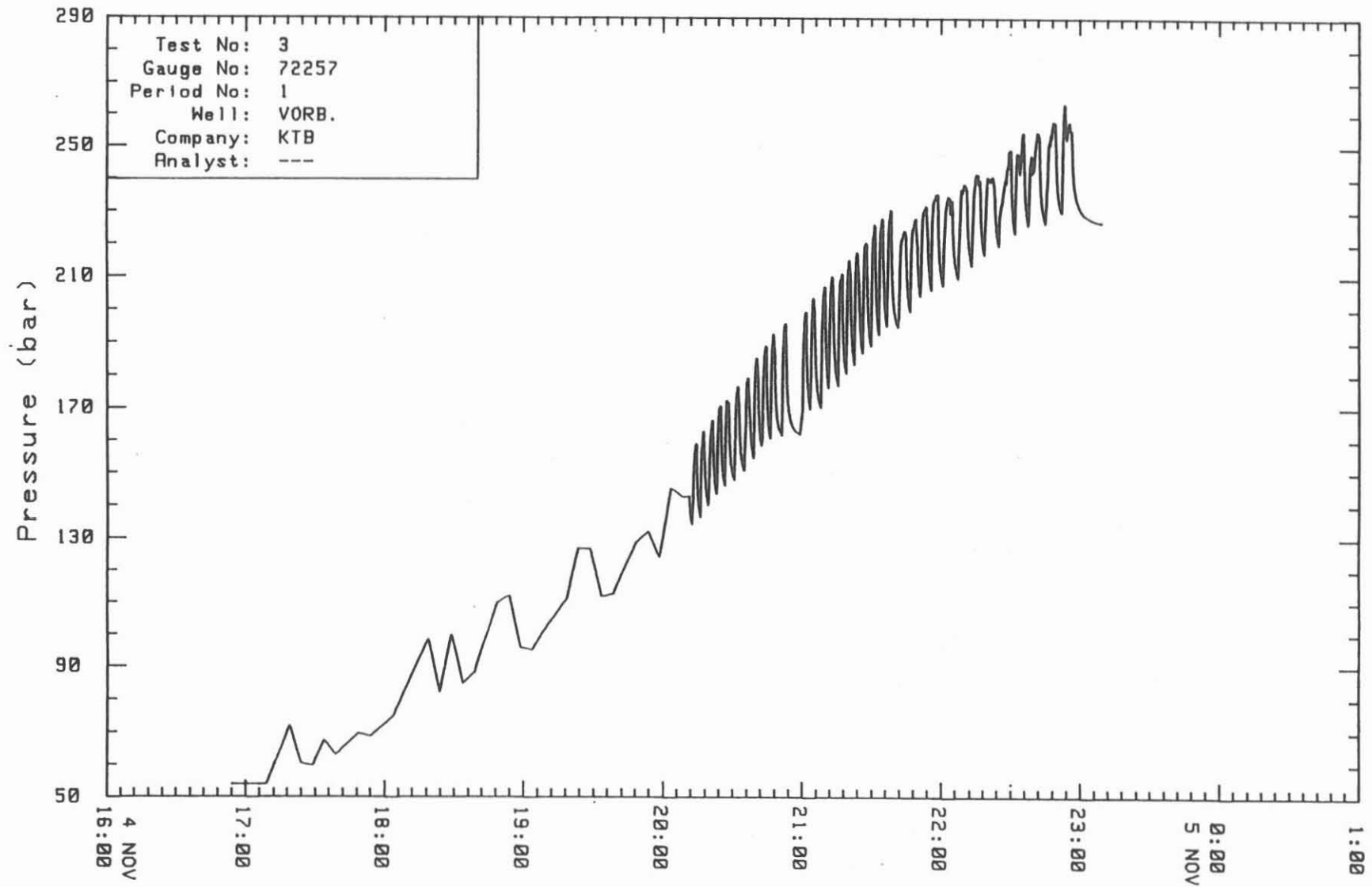


Abb. 7: Druckaufzeichnung während der ersten Einbauphase (siehe A-B in Abb. 6)

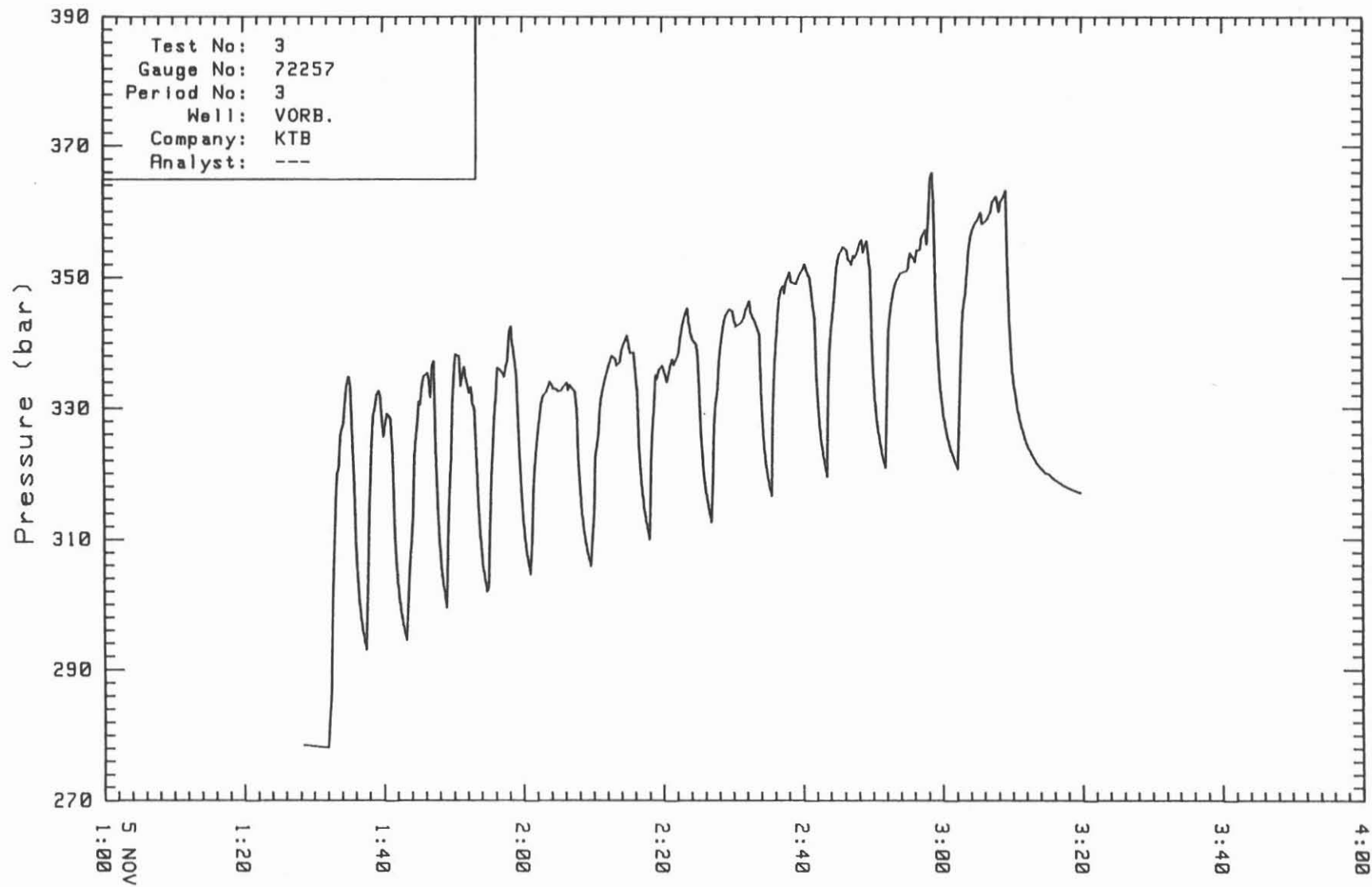


Abb. 8: Druckaufzeichnung in der dritten Einbauphase (siehe C-D in Abb. 6)

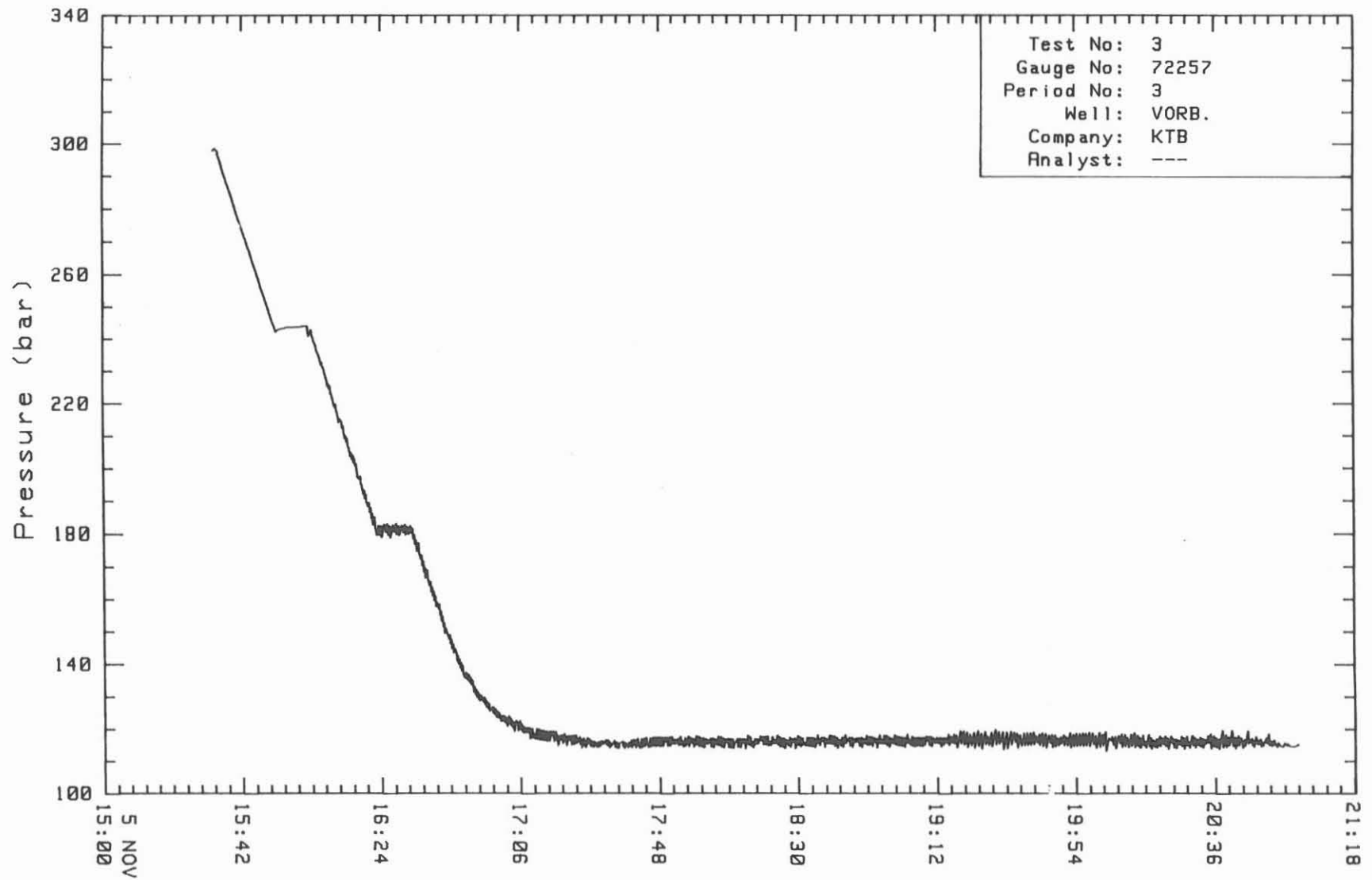


Abb. 9: Druckaufzeichnung während der ersten Fließphase (siehe F-H in Abb. 6)

3.0 Doppelpackerteste im Rahmen des Langzeitmeß- und Testprogrammes

Entsprechend der Vorauswahl der Arbeitsgruppe Geohydraulik (siehe Kessels und Pusch, 1990) wurden in der KTB-Vorbohrung drei Doppelpackertests durchgeführt. Im Vordergrund stand hierbei wieder der Gewinn von Formationsfluiden und eine Ermittlung der hydraulischen Parameter der Testzonen.

Ein ausführlicher Bericht über die hydraulischen Auswertungen findet sich bei Ostrowski (1990) in diesem Report.

3.1 Doppelpackertest im Teufenbereich 478 m - 799,6 m (HT 1)

Der hier getestete Bohrlochabschnitt entsprach dem Bereich, der schon während der Bohrphase getestet werden sollte. Der Test war aufgrund von Bohrlochstabilitätsproblemen ausgesetzt worden (siehe Abschnitt 2.2). Während des Absenkttests hatte sich in diesem Teufenbereich ein deutlicher Süßwasserzufluß gezeigt, so daß hier der Probennahme mit einem Sampler eine besondere Bedeutung zukam. Um eine Probennahme im Testintervall während der Zuflußphase durchführen zu können, kam ein Packersystem zum Einsatz, das mit einem kleinkalibrigen Probennehmer der Firma Preussag durchfahren werden konnte. Abbildung 10 zeigt den Aufbau der Doppelpacker-Testeinrichtung. Der obere Packer befindet sich noch in der Verrohrung bei 468,8 m während die untere Abdichtung mittels eines Bridge Plugs bei 799,6 m in "open hole" erfolgte. Der Bridge Plug wurde nach dem Setzen mit einem Gel aufgesandet, um bei Bohrlochinstabilitäten ein Freispülen des Packers gewährleisten zu können.

Der Einbau des oberen Packers erfolgte mit leerem Gestänge und geschlossenem Ventil, um eine erste Druckabsenkung zu gewährleisten. Die weiteren Absenkungen wurden mit einer Swabgarnitur vorgenommen.

Der genaue Testablauf geht aus Tabelle 4 hervor.

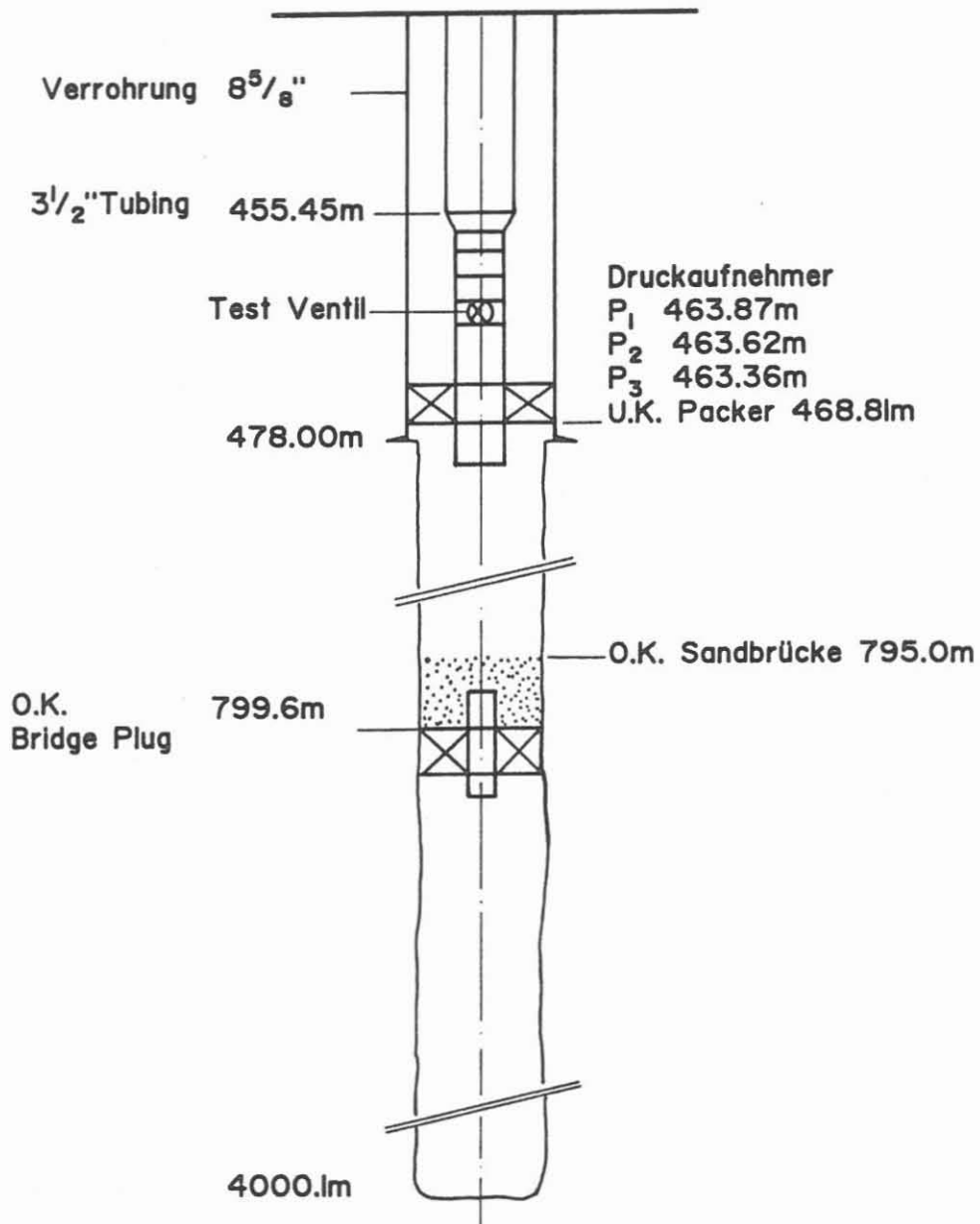


Abb. 10: Testkonfiguration beim Test HT 1

KTB

Tabelle 4
Technischer Ablaufplan des Doppelpackertests im Teufenbereich
478 m - 799,6 m (HT 1)

25.02.90

03.00 - 06.00 Uhr 4 5/8" Inflatable-Bridge-Plug der Fa. Lynes am 3 1/2" DP zum Teil eingebaut, dabei Gestänge zugweise mit Spülung aufgefüllt.

26.02.90

06.00 - 07.00 Uhr Bridge-Plug fertig eingebaut. In Setzteufe gefahren und mit 140 bar gesetzt. Bridge Plug mit 5 t Zuglast beaufschlagt i.O. Overshot vom Bridge Plug gelöst und Strang 2,5 m höher gefahren.

07.00 - 08.00 Uhr 0,5 m³ Hydropack Gel "Go" angemischt, 84 l Sand (3 Sack) und Enzym breaker GBW-3 zugemischt und über den DP-Strang in die Bohrung verpumpt. Nachpumpmenge 3,0 m³ Spülung (Halliburton).

08.00 - 10.00 Uhr Obertägiges Equipment der Fa. Lynes mit 150 bar abgedrückt i.O. (Halliburton).

10.00 - 11.30 Uhr 3 1/2" DP ausgebaut.

11.30 - 13.00 Uhr Vorbereitungen zum Einbau der Testgarnitur.

13.00 - 14.30 Uhr Testgarnitur zusammengestellt und gekontert.

14.30 - 17.30 Uhr 5 3/4" Inflatable Packer mit dem HTT-Tester und mit zwei 1/8" Hydraulic Control-Line und mit einem Meßkabel bis 149,6 m eingebaut. Meßkabel in dieser Teufe durchgemessen i.O.

17.30 - 19.00 Uhr Stillstand wegen Gewitters und Stromausfalls.

19.00 - 22.00 Uhr Testgarnitur weiter eingebaut. Bei 300 m Meßkabel erneut durchgemessen i.O. Strang mit Controlline und Meßkabel weiter eingelassen bis 427,42 m. Wegen einer Verbindung im Controlline, der sich in der Umlenkrolle verklemmte, wurde das Meßkabel im Spleiß ausgerissen.

22.00 - 00.30 Uhr Kabel und Controllineverbindung repariert. Kabelkontrolle i.O.

27.02.1990

00.30 - 01.30 Uhr Testgarnitur fertig eingebaut. Testkopf aufgebaut und an den Choke manifold angeschlossen.

- 01.30 - 01.45 Uhr Controlline mit N₂-Druck beaufschlagt und 5 3/8" Packer gesetzt.
- 01.45 - Uhr Druckabbaumessung des durch die Expansion der Packermanschette auf die Formation ausgeübten Druckes.
- 06.00 - 10.30 Uhr Druckabbaumessung.
- 10.30 - 20.00 Uhr Slug Withdrawal - Zuflußbeobachtung, dabei Druckanstieg von 7 bar auf 32 bar - entspricht einem Zufluß 978,0 l.
- 20.00 - 06.00 Uhr Schließzeit.
dabei
- 20.40 - 21.15 Uhr Tubing in Keilen abgesetzt und Testkopf abgebaut. Schlumberger zur Probenahme aufgebaut.
- 21.45 - 22.00 Uhr Sampler am DMST-Kabel eingefahren bis 451,8 m, da Aufstand (XO 3 1/2" PH-6 x 2 7/8" Eu). Probe genommen und Sampler abgebaut (Sampler O 38 mm L=4,60 m). Die Probe wurde im Labor aus dem Sampler genommen.
- 22.00 - 24.00 Uhr Vorbereitung zum Swabben. Die neuen Swabmanschetten konnten in den Tubing nicht eingefahren werden (O 69,0 mm Manschette; Tubing ID = 68,25 mm).

28.02.90

- 00.00 - 04.00 Uhr Gebrauchte Swabmanschette OD = 68 mm eingefahren. Spiegel bei ca. 200 m angetroffen. Insgesamt 780 l ausgewabbt in 10 Runs.

1. Run	170 m	keine Flüssigkeit
2. Run	200 m	Flüssigkeit zu Tage
3. Run	260 m	"
4. Run	320 m	"
5. Run	400 m	"
6. Run	450 m	keine Flüssigkeit
7. Run	450 m	"
8. Run	450 m	Flüssigkeit zu Tage
9. Run	450 m	keine Flüssigkeit
10. Run	450 m	"

- 04.00 - 09.10 Uhr Weiterhin Druckabbaumessung.
- 09.10 - 14.30 Uhr Fließzeit.

- 09.30 - 14.30 Uhr **Samplerfahrten**
1. Probe 480 m o.E.
2. Probe 540 m ca. 2 cl Fluid zu Tage
3. Probe 650 m Fluid zu Tage
4. Probe 720 m ca. 1 dl Fluid zu Tage
5. Probe 540 m o.E.
6. Probe 720 m o.E.
- 14.30 - 15.00 Uhr Vorbereitung zum Swabben.
- 15.00 - 18.00 Uhr **Swabarbeiten**
1. Run 350 m Fluid zu Tage; Cup OD=6mm
2. Run 450 m o.E.
3. Run Aufstand in 70 m; Cup OD=68 mm
4. Run 355 m Fluid zu Tage;
Cup OD = 67,5 mm
5. Aufstand in 70 m; Cup OD = 67,5 mm
6. Run 440 m Fluid zu Tage.
- 18.00 - 18.30 Uhr 7. Samplerprobe in Teufe 650 m o.E.
- 18.30 - 19.30 Uhr 7. Run 440 m Fluid zu Tage
8. Run 450 m Fluid zu Tage
Ausgeswabhte Fluidmenge 1-8 V:870 l.
- 19.30 - 20.30 Uhr 8. Samplerprobe in Teufe 650 m, 0,1 l
9. Samplerprobe in Teufe 650 m, o.E.
- 20.30 - 21.00 Uhr 9. Run 450 m Fluid zu Tage 180 l
10. Run 450 m Fluid zu Tage 180 l.
- 21.00 - 23.00 Uhr Zuflußbeobachtung (Lynesmonitor).
- 23.00 - 23.45 Uhr 10. Samplerprobe in Teufe 650 m o.E.
- 23.45 - 00.30 Uhr 11. Run 450 m Fluid zu Tage ca. 180 l
12. Run 450 m Fluid zu Tage ca. 180 l.
- 01.03.1990
- 00.30 - 04.00 Uhr Zuflußbeobachtung
- 04.00 - 05.12 Uhr 13. Run 450 m Fluid zu Tage 230 l
14. Run 450 m Fluid zu Tage 290 l.
Wegen des Stromausfalles konnte die Swabb-
garnitur erst um 05.12 Uhr gezogen werden.
- 05.12 - 06.00 Uhr Zuflußbeobachtung.
- Laut Tankmessung wurden in 14 Swabrungen insgesamt 2110 l
ausgeswabht.
- Bemerkung:** Wegen des starken Gewitters konnte ab 05.12 Uhr
nicht weiter geswabht werden. Samplerproben
konnten auch nicht gezogen werden.
- 06.00 - 10.00 Uhr Wegen des Gewitters konnten die geplanten
Samplerproben nicht gezogen werden.
Zuflußbeobachtung.

- 10.00 - 10.30 Uhr DMST-Meßkabel abgebaut.
- 10.30 - 11.30 Uhr Vorbereitung zum Ausbau der Testgarnitur. Controlline des Packers Druck entlastet und 5 3/8" Packer deaktiviert.
- 11.30 - 16.30 Uhr Testgarnitur ausgebaut. Der Teststrang wurde mit geschlossenem Testventil ohne auszirkulieren des Zuflusses ausgebaut. Der Wasserspiegel im Strang stand 159,71 m oberhalb des Testventils. Diese Wasserhöhe im Teststrang entspricht einem Volumen von 600 l. Proben wurden beim Abschrauben in einzelnen 3 1/2" Tubingen (16) genommen.
- 16.30 - 17.15 Uhr DMST-Meßkabel zur Durchführung von AMS-Messung aufgebaut.
- 17.15 - 18.30 Uhr AMS-Messung.
Anhand der AMS-Messung - Widerstand des Bohrlochfluides - wurden zur Beprobung folgende Teufen festgelegt:
1. Teufe 505,0 m
2. Teufe 635,0 m
3. Teufe 648,0 m
4. Teufe 768,0 m
- 19.00 - Probenahme mittels Geocom-Probenehmer.
- 19.00 - 19.45 Uhr 19.30/1. Probe in T. 505 m, Gewinn: 0,5 l
20.25/2. Probe in T. 505 m, Gewinn: 3,5 l
oberes Ventil der Probenehmer undicht.
- 21.00 - 21.45 Uhr 21.15/3. Probe in T. 635 m, Gewinn: ca 2l
22.10/4. Probe in T. 648 m, Gewinn: keiner
22.42/5. Probe in T. 768 m, Gewinn: 3,5 l
00.52/6. Probe in T. 648 m, Gewinn: 3,5 l
Feststoffe und ausgeflockte Spülung.

02.03.1990

- 01.05 - 04.00 Uhr DMST-Meßkabel abgebaut.
- 02.00 - 04.30 Uhr Overshot zum Fangen des Bridge-Plugs mit Hydraulik-Jar am 3 1/2" DP eingebaut.
- 04.30 - 05.00 Uhr gespült in Teufe 797 m mit 600-800 l/min. 15-20 bar.
- 05.00 - 06.00 Uhr Overshot mit 4 5/8" Bridge-Plug verbunden und deaktiviert. Weiter gespült mit 300 l/min. bei 32 bar.
- 06.00 - 10.00 Uhr h 5/8" Bridge-Plug ausgebaut und abgeleert. Die Manschette des Bridge-Pluges war im oberen Bereich auf einer Länge von ca. 12 cm umgekrempelt.

3.2 Doppelpackertest im Teufenbereich 1 374 m - 1 389 m (HT 2)

Dieser Test wurde in einem Bohrlochabschnitt durchgeführt, der zu den kaliberhaltigsten in der Vorbohrung zu zählen ist. Nur kleine Ausbrüche im Testintervall markierten hier eine Störungszone, die als potentiell testwürdig angesehen werden konnte. Zum Einsatz kam ein Standard-Doppelpackersystem der Firma Lynes. Die Absenkung erfolgte unter Einsatz einer Swabgarnitur. Die Testdurchführung begann am 06.03.1990, 03:45 Uhr, und war am 09.03.1990, 09:00 Uhr, beendet.

Der genaue Testablauf ist in Tabelle 5 aufgelistet.

Probleme ergaben sich nur durch das außen am Testgestänge geführte Kabel, von dem vier Befestigungsschellen abrissen und im Bohrloch verblieben. Der Gesamttest ist ansonsten aus technischer Sicht einwandfrei verlaufen. Der im zeitlich vorher durchgeführten Test HT 3 zum Einsatz gekommene Bridge Plug (siehe Abb. 11) wurde erst nach Beendigung des Tests HT 2 gezogen.

3.3 Doppelpackertest im Teufenbereich 2 135 m - 2 190 m (HT 3)

Der Test HT 3 wurde wieder wie der Test HT 1 aufgrund möglicher Bohrlochstabilitätsprobleme unter Verwendung eines Bridge Plugs als untere Abpackerung durchgeführt. Der Bridge Plug wurde ebenfalls aufgesandet. Gezogen wurde er erst nach Durchführung des Testes HT 2.

Der genaue Aufbau der Testgarnitur geht aus Abb. 12 hervor. Der Testablauf ist in Tabelle 6 dokumentiert.

Tabelle 5
Technischer Ablaufplan des Doppelpackertests im Teufenbereich
1 374 m - 1 389 m (HT 2)

06.03.90

03.45 - 05.15 Uhr	4 5/8" Straddle-Garnitur (HTT-Tool) zusammengestellt und mit Süßwasser aufgefüllt.
05.15 - 06.00 Uhr	Testgarnitur an 3 1/2" Steigrohren , die vom Lager genommen wurden, z.T. eingebaut. Steigrohre stangenweise mit Süßwasser aufgefüllt.
06.00 - 16.00 Uhr	Steigrohrstrang vom Lager weiter eingebaut und stangenweise mit Süßwasser aufgefüllt.
16.00 - 16.30 Uhr	Lynes Straddle Packer mit 120 bar gesetzt. Durch Zugbelastung Sitz überprüft. Oberer Packer U.K. - 1374,34 m Unterer Packer O.K. - 1389,40 m.
16.30 - 18.30 Uhr	Pressure Static Recovery - Swabarbeiten.
16.48 - 16.52 Uhr	1. Run bis 100 m 300 l
16.52 - 16.58 Uhr	2. Run bis 200 m 360 l
16.58 - 17.06 Uhr	3. Run bis 300 m 480 l
17.06 - 17.19 Uhr	4. Run bis 450 m 405 l
17.19 - 17.34 Uhr	5. Run bis 700 m 810 l
17.34 - 18.00 Uhr	6. Run bis 800 m 220 l
18.00 - 18.15 Uhr	7. Run bis 850 m 45 l
	gesamt noch im Tank 2620 l
	nicht im Tank aufgefangen 180 l
	Gesamt 2800 l
18.30 - 06.00 Uhr	Pulse Withdrawal, Testventil kurz geöffnet und sofort wieder geschlossen. Druckaufbaumessung.

Nachtrag zum Bericht vom 05.03.90:
Die Probennahme mit Geocom Probennehmer in Teufe von 2176 m am 06.03.90 um 02.37 Uhr brachte 3,5 l Fluid zu Tage.

07.03.90

06.00 - 20.21 Uhr	Pulse Withdrawal - Druckaufbaumessung.
20.21 - 21.26 Uhr	Slug Withdrawal - Fließzeit. Testventil durch Hochziehen des Stranges geöffnet.

21.26 - 06.00 Uhr Shut in Pressure Recovery.
Testventil durch Belastung geschlossen -
Druckaufbaumessung.
Strang mit 20 l Wasser aufgefüllt, um die
Stellung des Testventils zu überprüfen,
i.O.

08.03.90

06.00 - 12.13 Uhr Shut in Pressure Recovery - Druck-
aufbaumessung, dabei ab
10.30 - 12.13 Uhr Teststrang mit Süßwasser aufgefüllt.
12.13 - 12.18 Uhr Testventil geöffnet. Differenzdruck
zwischen Casing-Tubing beobachtet.
12.18 - 12.30 Uhr Lynes Straddle-Packer druckentlastet und
deaktiviert.
12.30 - 20.00 Uhr 3 1/2" Hydril Steigrohrstrang auf das
Lager ausgebaut, dabei Meßkabel
aufgerollt.
20.00 - 21.00 Uhr Testgarnitur und Packer ausgebaut,
zerlegt und abgelegt.
21.00 - 01.30 Uhr Overshot für den 4 5/8" Bridge Plug bis
2182 m eingebaut. Wegen des Fehlens der
Hydraulikpumpe der Bohranlage wurde das
Gestänge mit Kettenzangen verschraubt.
01.30 - 02.30 Uhr Drehkopf mit DP-Strang verschraubt und
Zirkulation hergestellt und bis 2188,0 m
gespült.
02.30 - 03.00 Uhr Bridge-Plug spülend angefahren und
gefangen. Bridge-Plug durch Rechtsdrehen
gelöst und freigezogen mit 5 t Überlast.
03.00 - 06.00 Uhr Bridge Plug z.T. ausgebaut.

Bemerkung: Beim Ausbau der Steigrohre sind zwei Bänder von
der Kabelbefestigung im Bohrloch verblieben.

09.03.90

06.00 - 08.00 Uhr DP-Strang mit dem 4 5/8" Lynes
Bridge-Plug fertig ausgebaut.
08.25 Uhr Bridge-Plug zu Tage. Die Manschette vom
Bridge-Plug auf eine Länge von ca. 20 m
im oberen Bereich umgekrepelt.
Von insgesamt 4 im Bohrloch verbliebenen
Befestigungsbänder für das Meßkabel kam
keines zu Tage.

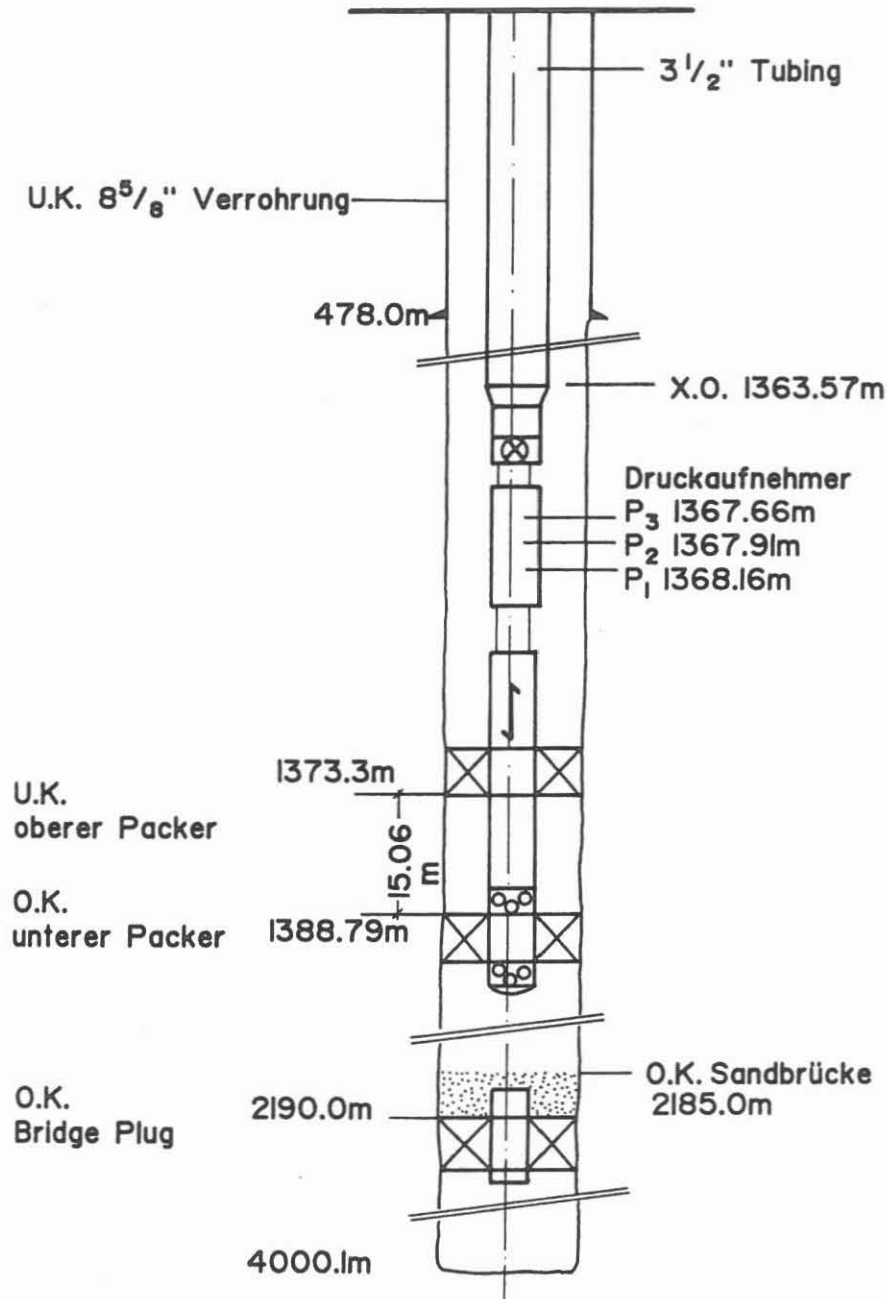


Abb. 11: Testkonfiguration beim Test HT 2

KTB

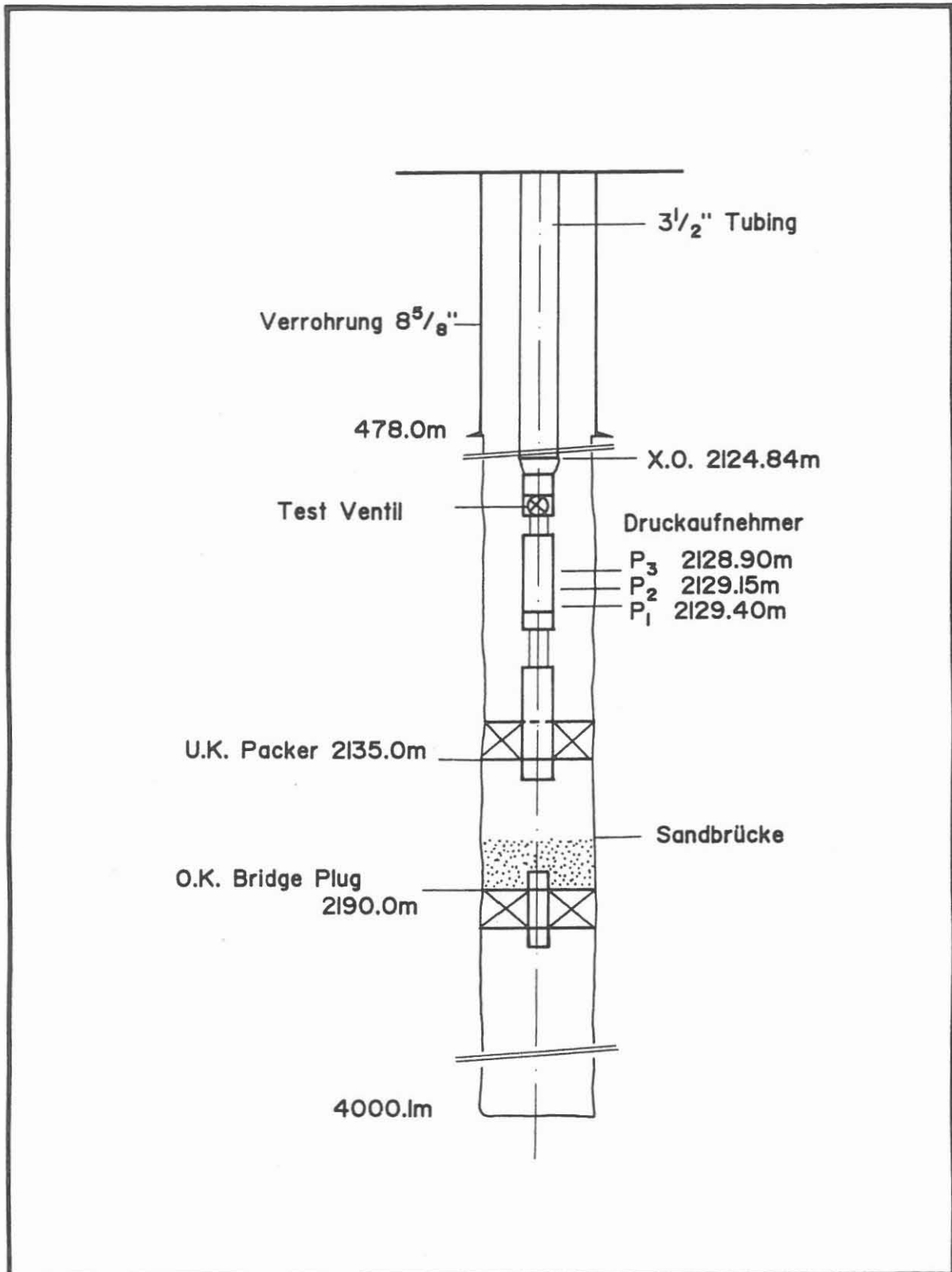


Abb. 12: Testkonfiguration beim Test HT 3

KTB

Tabelle 6
Technischer Ablaufplan des Doppelpackertests im Teufenbereich
2 135 m - 2 190 m (HT 3)

02.03.90

- 06.00 - 10.00 Uhr 4 5/8" Bridge Plug ausgebaut und abgelegt. Die Manschette des Bridge Plugs war im oberen Bereich auf eine Länge von ca. 12 cm eingekrepelt.
- 10.00 - 17.00 Uhr 4 5/8" Bridge Plug am 3 1/2" DP bis Teufe 2190,0 m eingebaut, dabei Gestänge zugweise aufgefüllt mit Spülung.
- 17.00 - 17.30 Uhr Bridge Plug durch Erhöhung des Druckes im Strang auf 125 bar gesetzt.
- 17.30 - 19.00 Uhr Halliburton aufgebaut. Hydropackgel 2,0 m³ angemischt, Leitungen abgedrückt mit 300 bar. 1,5 m³ Hydropackgel ohne Sand und 0,5 m³ mit 3 Sack Sand (96 l Sand) in den DP-Strang gepumpt und mit 8,3 m³ Spülung nachgepumpt.
- 19.00 - 19.30 Uhr DP-Strang bis Teufe 2120 m ausgebaut.
- 19.30 - 21.00 Uhr Bohrloch gespült und Spülung konditioniert.
- 21.00 - 00.30 Uhr 3 1/2" DP-Strang ausgebaut.
- 00.30 - 06.00 Uhr 4 5/8" Single Packer mit "J" Tool, Meß-Geräteträger, Shut in Tool zusammengestellt und am 3 1/2" Hydril PH-6 Steigrohre zum Teil eingebaut, dabei Steigrohre einzeln vom Lager in den Turm gezogen. Steigrohre stangenweise mit Leitungswasser aufgefüllt. Das Meßkabel wurde mit Stahlkabel an den Steigrohrstrang über Verbinder befestigt. Einbaugeschwindigkeit ca. 10 Stangen pro Stunde.

03.03.90

- 06.00 - 22.30 Uhr 4 5/8" Lynes Single Packer an 3 1/2" Steigrohre weiter eingebaut bis Teufe 2135 m.
- 22.30 - 23.30 Uhr Packer durch Druckbeaufschlagung des Steigrohrstranges mit 120 bar gesetzt. Zwecks Abbau des Squeezedruckes im Testintervall Testventil geöffnet und wieder geschlossen. Druckabbaumessung.
- 23.30 - 01.30 Uhr Obere Meßkabelrolle in den Haken genommen,

Swabseil in die Rolle eingezogen.
Gewichtsanzeige an der DMST und am
Drillometer. Swabgarnitur zusammengestellt
und mit Swabmanschetten OD = 66 mm wie
folgt gewabbt:

00.00 - 00.10 Uhr	1. Run bis	50 m	60 l Flüssigkeit
00.10 - 00.14 Uhr	2. Run bis	100 m	120 l Flüssigkeit
00.14 - 00.20 Uhr	3. Run bis	200 m	360 l Flüssigkeit
00.20 - 00.30 Uhr	4. Run bis	300 m	300 l Flüssigkeit
00.30 - 00.39 Uhr	5. Run bis	400 m	360 l Flüssigkeit
00.30 - 00.55 Uhr	6. Run bis	500 m	300 l Flüssigkeit
00.55 - 01.15 Uhr	7. Run bis	600 m	240 l Flüssigkeit
	Gesamt	1740 m	1740 l Flüssigkeit

Rechnerische Spiegelteufe 454,3 m.

01.15 - 01.30 Uhr Obere Meßkabelrolle abgelegt.

01.30 - 03.58 Uhr Druckabbaumessung fortgesetzt.

03.58 - 04.00 Uhr Testventil geöffnet und wieder geschlossen
für den Pulse Withdrawal.

04.00 - 06.00 Uhr Druckaufbaumessung - Pulse Withdrawal.

04.03.90

06.00 - 11.45 Uhr Druckaufbaumessung - Pulse Withdrawal,
dabei den Flüssigkeitsspiegel im
Steigrohrstrang weiter abgesenkt:

8. Run bis	600 m	420 l Flüssigkeit
9. Run bis	750 m	300 l Flüssigkeit
10. Run bis	800 m	10 l Flüssigkeit
11. Run bis	823 m	420 l Flüssigkeit
Gesamt:		1140 l Flüssigkeit

Insgesamt ausgewabbt 2870 l (lt. Tank-
messung).

Die rechnerische Spiegelteufe befindet sich bei 749,3 m.

11.45 - 19.36 Uhr Fließzeit - Slug Withdrawal.

19.36 - 06.00 Uhr Schließzeit - Druckaufbaumessung.

05.03.90

06.00 - 10.20 Uhr Schließzeit - Druckaufbaumessung
dabei

09.00 - 10.20 Uhr Tubingstrang mit Süßwasser aufgefüllt.

10.20 - 10.30 Uhr 4 5/8" Lynes Single Packer deaktiviert.

10.30 - 01.15 Uhr 3 1/2" Steigrohre mit Lynes Packer und
HTT-Tool auf Lager fertig ausgebaut und
abgelegt.

01.15 - 01.50 Uhr Aufbau für Bohrlochmessung, DMST

01.50 - 03.25 Uhr AMS-Meßgerät mit Geocom Probennehmer
eingelassen. Im Bereich von 2050 m -
2186 m AMS-Messung durchgeführt.
In Teufe 2176,6 m mit Geocom Probennehmer
Probe genommen.

03.25 - 03.45 Uhr Bohrlochmessungen Ende, Abbau.

Aus technischer Sicht waren keine besonderen Vorkommnisse in der Testdurchführung zu verzeichnen.

4.0 Pumpstest (Fördertest) im Teufenbereich 3 850 m - 4 000,1 m

Bereits aus den Informationen während des Durchteufens und den Ergebnissen der anschließenden Bohrlochmessungen, aber vor allem durch die eindrucksvollen Erkenntnisse aus einem im Mai 1989 durchgeführten Absenktest (Kessels et al., 1990) wurde deutlich, daß im Teufenbereich 3 920 m - Endteufe (4 000,1 m) in der Vorbohrung eine Zone erhöhter Permeabilität mit saliner Fluidführung erschlossen wurde. Die Auswertung der Absenkteste zeigte, daß diese Zone die mit Abstand höchste Zuflußkapazität aller in der Vorbohrung als testwürdig erkannten Zonen aufwies.

Im Rahmen einer Besprechung einer Untergruppe des Koordinierungsausschusses Geowissenschaften am 22.05.1989 wurde daher empfohlen, den untersten Bohrlochbereich mit vorrangiger Priorität zu untersuchen.

Infolge der besonderen Bohrlochsituation (Ablenkung der Bohrung in Teufe 3 740 mittels Keil) sah die Empfehlung einen hydraulischen Test nach Einbringen einer Verrohrung mit folgender Zielsetzung vor:

- Gewinnung einer ausreichenden, repräsentativen und möglichst geringkontaminierten Menge an Fluiden zur Klärung der geochemischen Fragestellungen.

- Auswertung der Druckinformation zur Klärung der reservoirtechnischen Fragestellungen wie Permeabilität, Druckverhältnisse, Ausdehnung, Art des Reservoirs.

Weitere Empfehlungen für einen vorrangigen Test dieser Zone finden sich im

- Protokoll der 5. Arbeitssitzung der ARGE 7 (Fluide) vom 08./09.06.89.
- Schriftverkehr Erzinger/Behr vom 14.06.89.

4.1 Technische Planung

4.1.1 Bohrlochsituation

Entsprechend der Empfehlung des Koordinierungsausschusses Geowissenschaften vom 26.10.1989 erfolgte die Entscheidung, das Bohrloch nach Abschluß des Langzeitmeß- und Testprogramms (LMTP) durch das Einbringen einer Verrohrung zu sichern und damit auch eine langfristige Befahrbarkeit zu gewährleisten. Planung und Durchführung der Verrohrung erfolgten unter Berücksichtigung der Zielvorgaben:

- Sicherstellung optimaler Voraussetzungen für einen hydraulischen Fördertest auf den untersten Bohrlochbereich (Arbeitsbespr. der Arbeitsgruppe Geohydraulik vom 19.12.89).
- Kostengünstige Realisierung durch Verwendung des im Rahmen von KTB nicht mehr weiter einsetzbaren Seilkernbohrstranges als Verrohrung.

Beide Zielsetzungen konnten durch folgende technische Vorgehensweise realisiert werden:

- Schutz des untersten offenen Bohrlochbereiches vor Kontamination während Verrohrung und Zementation durch Einzirkulieren einer hochviskosen Dehydril-HT-"Pille".

- Einbau der Verrohrung bis max. 3850 m mit offenem Bohrlochbereich von Rohrschuh bis Endteufe.
- Zur Gewährung eines ausreichenden Ringraumquerschnittes für einen hydraulisch dichten Zementmantel Verwendung von 5" OD-Rohren anstelle der 5 1/2" OD-Rohre des Seilkernstranges.
- Zementation des untersten Rohrabschnittes (ca. 200 m) zur hydraulischen Abdichtung des Ringraumes als Voraussetzung für einen hydraulischen Fördertest aus den Rohren heraus.

Verrohrung und Zementation wurden vom 20.03.90 bis 02.04.90 erfolgreich durchgeführt. Nach Aufbohren des Rohrschuhs und Auszirkulieren der hochviskosen Dehydril-HT "Pille" wurde die im Bohrloch befindliche Spülung gegen Süßwasser ausgetauscht. Dies entspricht der Bohrlochsituation unmittelbar vor Beginn des Fördertests (Abb. 13).

4.1.2 Testplanung

Auf der Grundlage der aufgeführten Hauptzielsetzungen des Fördertests wurde unter Berücksichtigung der technischen Gegebenheiten (s. Bohrlochsituation), der zeitlichen sowie budgetmäßigen Beschränkungen vom FB Technik ein Testvorschlag ausgearbeitet.

Dieser Vorschlag wurde am 19.12.89 im Rahmen einer Besprechung der Arbeitsgruppe Geohydraulik (ARGE 7/Fluide) diskutiert und abgestimmt. Er beinhaltet folgende technische Vorgehensweise (Abb. 14):

- Hydraulische Isolierung des offenen Bohrlochbereiches durch einen Einfachpackertest am Gestänge aus den Rohren heraus.

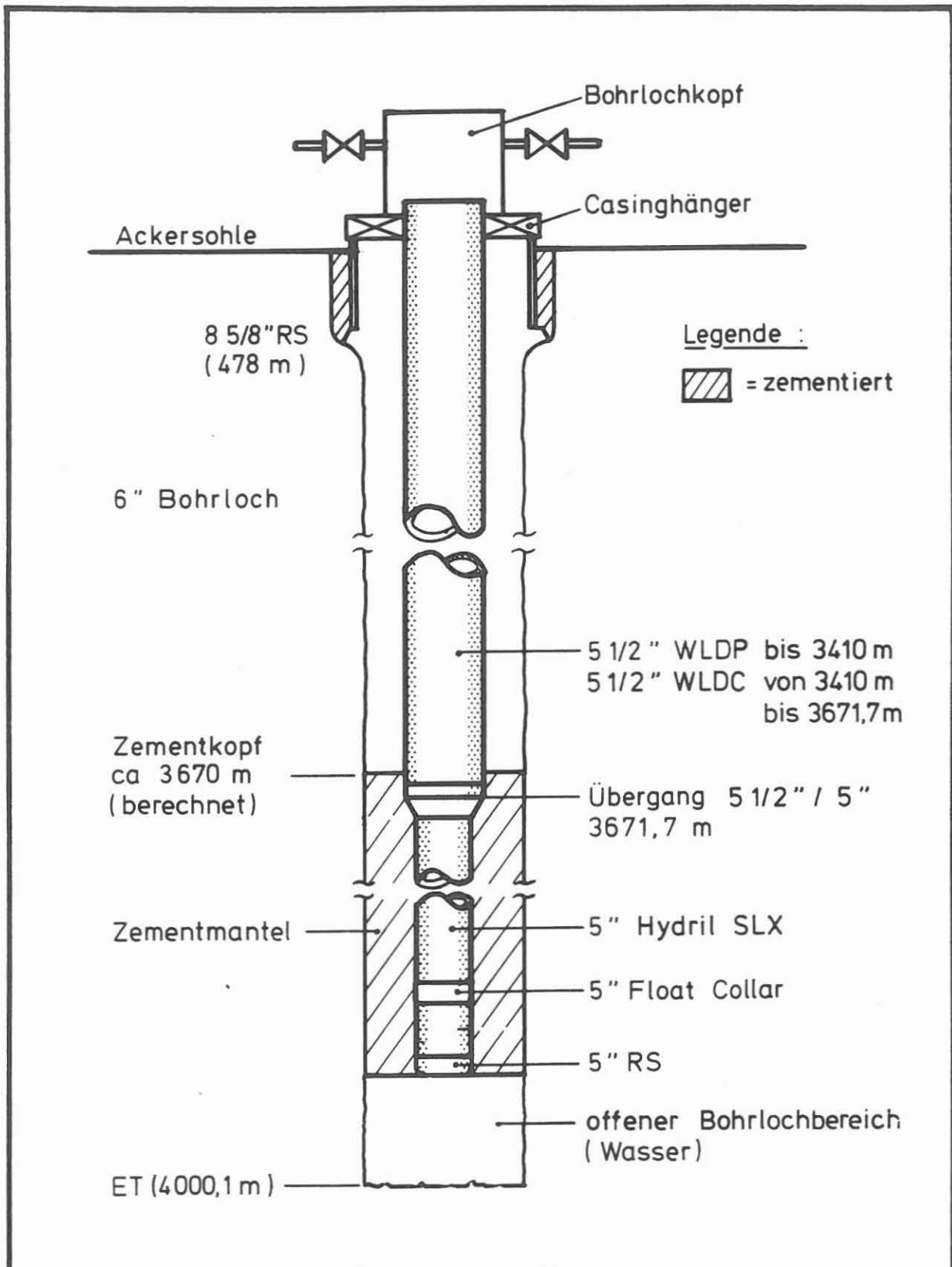


Abb. 13 KTB - Oberpfalz VB
Bohrlochsituation vor Fördertestbeginn

KTB

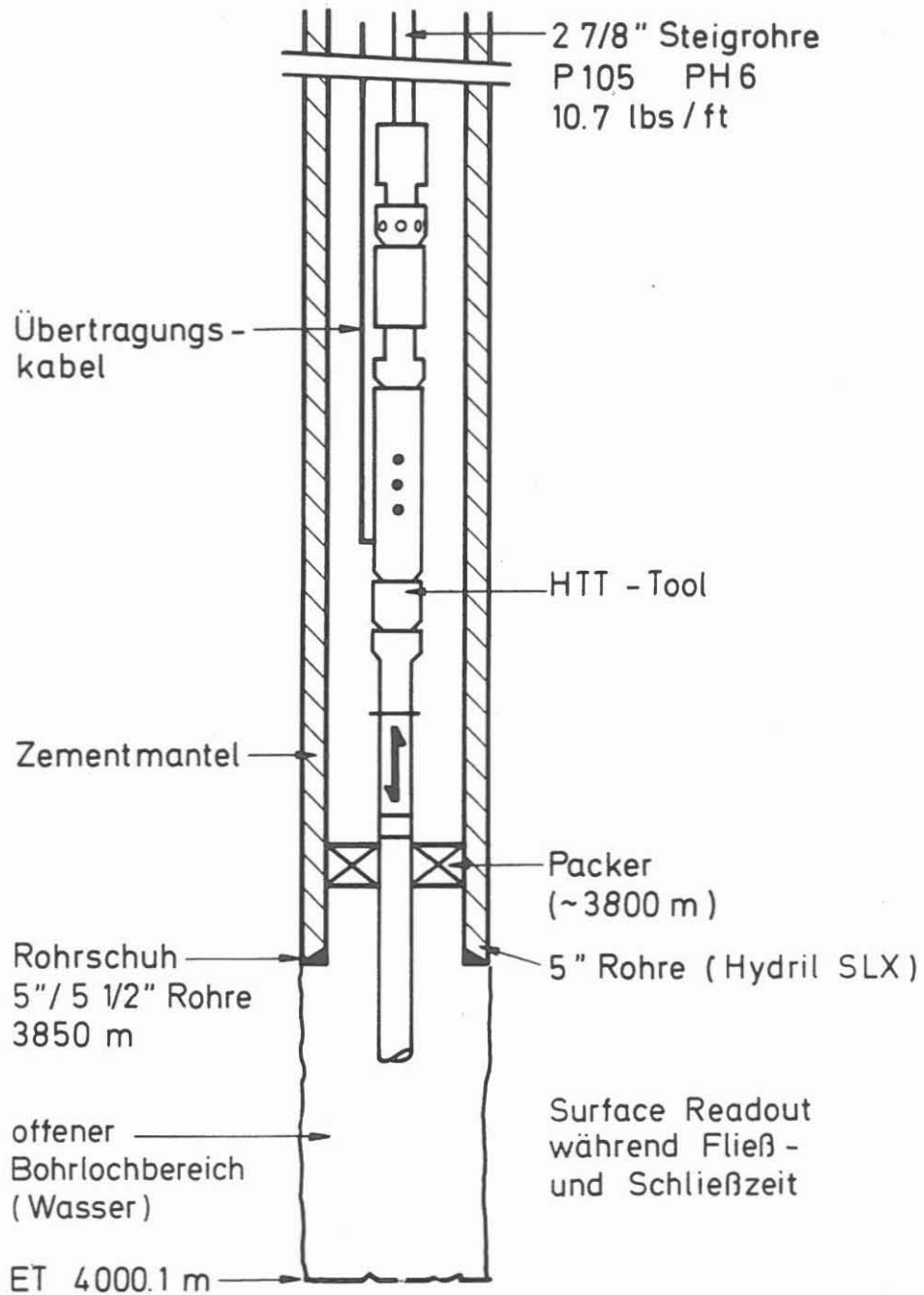


Abb. 14

Geplante Testausrüstung für Fördertest

KTB

- Packersitz möglichst tief (ca. 3800 m, um das auszufördern-
de Totvolumen klein zu halten und gute Voraussetzungen für
die Auswertung des Druckverlaufs sicherzustellen (well
bore storage).
- Einsatz der HTT-Testausrüstung der Fa. Lynes zur optimalen
Steuerung des Testablaufs (Surface Read-out mit online
Druckauswertung über angeschlossenen Computer).
- Zutage-Förderung einer ausreichenden Menge an
Formationsflüssigkeit alternativ durch:
 - . Swabben
 - . Einsatz einer Untertage-Pumpe am Pumpgestänge (Moineau-
Prinzip)

Wegen der klaren Vorteile hinsichtlich Druckauswertung und
geochemischer Analytik erfolgte aus wissenschaftlicher Sicht
die Empfehlung, eine Untertage-Pumpe zu verwenden (Abb. 15).
Die technische Detailplanung erfolgte im Rahmen einer intensi-
ven interdisziplinären Kooperation im Bereich der Fachdirekto-
rate der Projektleitung und den beteiligten wissenschaft-
lichen Gruppen.

Zur Sicherstellung einer fachspezifischen Beratung wurden zu-
sätzliche Serviceleistungen der einschlägigen Industrie in den
Bereichen

- Testdurchführung (Preussag, Hannover)
- reservoir-technische Planung, Durchführung und Auswertung
(ITA, Clausthal) in Anspruch genommen.

Detailfragen der Ablaufplanung, insbesondere bei der Zusammen-
arbeit zwischen wissenschaftlichen Gruppen und Projektleitung,
wurden im Rahmen einer Arbeitsbesprechung am 15.03.90 disku-
tiert und abgestimmt.

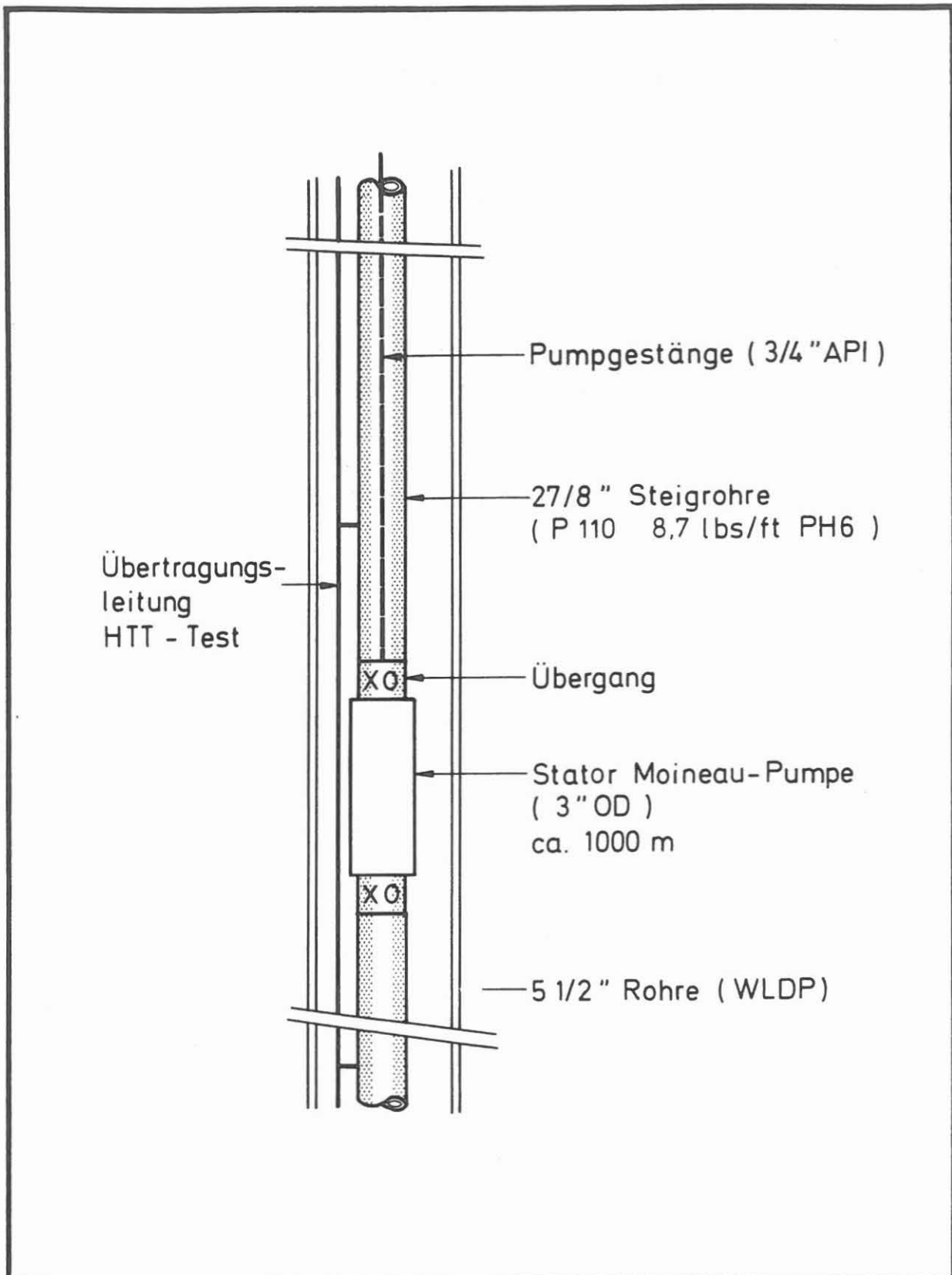


Abb. 15
Geplante Pumpausrüstung für Fördertest

KTB

4.2 Technische Durchführung

Die technische Ausführung des Fördertestes erfolgte im Zeitraum vom 03.04.90 - 12.04.90. Aufgrund der Schwierigkeiten den Packer bei der 1. Einfahrt in Teufe 3 808,6 m zu setzen, kann der Ablauf in zwei Phasen gegliedert werden:

Phase 1 (03.04. - 06.04.)

Wie in Abb. 16 dargestellt, wurde der Packer bis Teufe 3 808,6 m eingebaut. Die Versuche den Packer in der Verrohrung zu setzen (06.04.) blieben erfolglos.

Aufgrund des technischen Ablaufs bei den Setzversuchen mußte eine Beschädigung der Packerelemente angenommen werden. Dies führte zur Entscheidung, die Testgarnitur auszubauen.

Während der Ausbauoperation wurde der Teststrang (2 7/8"-Steigrohre) in den Teufen von 2 060 m und 2 070 m (Packer-teufe) fest. Der Strang konnte schließlich durch wiederholte Ziehversuche mit bis zu 150 KN Überlast freigezogen und weiter ausgebaut werden. Im Bohrloch verblieben:

6 Stahlbänder zur Befestigung der Kabelprotektoren;
(ein Kabelprotector wurde plattgedrückt geborgen)

1 Packermanschette mit einer Länge von 135 cm
bestehend aus: - loser innerer Gummimanschette
- 105 Stück 135 cm lange, 2 cm breite
Edelstahllamellen, die in die
äußere Gummimanschette des Packers
einvulkanisiert waren (Abb. 17).

Die Manschette des Packers ist vermutlich beim Ausbau durch verkeilte, abgerissene Metallbänder oder den Kabelprotector umgestülpt und abgerissen worden.

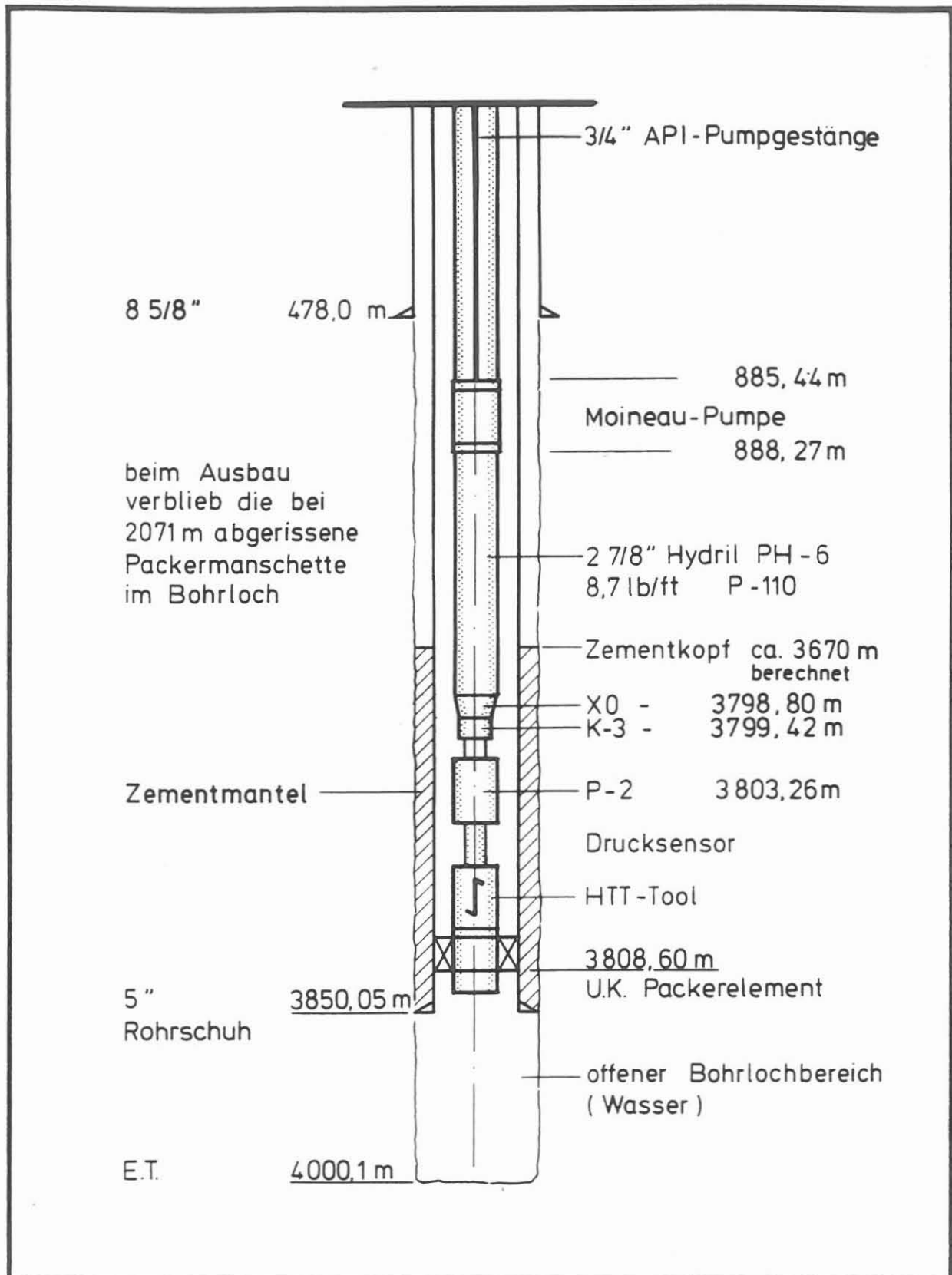


Abb. 16 **Fördertestkonfiguration**
(1. erfolgloser Versuch)

KTB



Abb. 17: Zerstörte Packerelemente nach dem Ausbau aus der Setzteufe von 3 808,6 m

Ein/Ausbau- relevante Abmessungen:

Testgarnitur (Einbaumaße)

Verrohrung

max. Außendurchmesser

min. Innendurchmesser

Testgarnitur + Kabel

mit Kabelprotektor : 100 mm

5" Hydril SLX : 109,9 mm

Packermanschette : 89 mm

5 1/2" WLDP : 110,0 mm

5 1/2" WLDC : 111,3 mm

Zur Wiederherstellung der Befahrbarkeit der Bohrung bis zur Endteufe wurden folgende Lösungen diskutiert:

- Durchstoßen bzw. Durchdrücken der Packermanschette bis außerhalb des Rohrschuhs.
- Zerfräsen und Austragen der Metall- und Gummiteile mittels Spülungszirkulation.

Der dazu erforderliche Mindestaufwand wurde mit 8 - 12 Tagen Operationszeit und ca. 300 000 DM Kosten abgeschätzt.

Zugunsten einer Durchführung des Fördertestes innerhalb des gegebenen Zeit- und Kostenrahmens wurde deshalb auf die Maßnahmen zur Herstellung der Wiederbefahrbarkeit zunächst verzichtet (Beschluß KTB-PL Direktorium vom 10.04.1990).

Phase 2 (06.04. - 12.04.90)

Aufgrund der Erfahrungen beim Einbau des ersten Packers erfolgte eine Änderung des Testablaufes. Die Einbauteufe des Packers wurde bei max. 1 100 m - oberhalb der ersten starken Richtungsänderung des Bohrloches - festgelegt. Die verbleibende Testzeit sollte genutzt werden zur Förderung von Forma-

tionsflüssigkeit mittels in den Teststrang eingebauter Moineapumpe (Abb. 18).

Der Packer konnte am 07.04. gesetzt werden. Nach Absenken des Spiegels im Teststrang durch Swabben und Einbau des Gestänges zum Antrieb der Moineapumpe wurden bis zum 11.04.90 insgesamt ca. 71 m^3 Flüssigkeit mit z. T. erheblichem Gasgehalt (bis $0,8 \text{ m}^3 \text{ (V}_n/\text{m}^3)$) gefördert. Die Zuflußrate betrug im genannten Zeitraum 9 bis 14 l/min. Von den insgesamt 71 m^3 an zugeflossenen Volumen errechnet sich nach Abzug des Bohrlochinhalt ein Volumen von ca. 33 m^3 an zutage geförderter Formationsflüssigkeit.

Bis auf die in situ-Probennahme von Flüssigkeit aus dem Testintervall infolge der eingeschränkten Befahrbarkeit bis max. 2 070 m konnten alle wesentlichen Zielsetzungen erreicht und der Test erfolgreich abgeschlossen werden.

Beim Ausbau der Testgarnitur traten zwar erneut Probleme mit dem Festwerden des Teststranges auf, doch konnte die Testgarnitur mit umgestülpter und eingerissener Packermanschette bis auf zwei im Bohrloch verbliebene Metallbänder geborgen werden (Abb. 19).

4.3 Situation des Bohrloches nach Abschluß des LMTP

Das Bohrloch ist befahrbar bis Teufe 2 071 m. Dort befindet sich die abgerissene Packermanschette. Diese Teufe wurde durch eine Kontrollfahrt mit einer CCL-sonde ermittelt.

Die Bohrung ist mit Formationsflüssigkeit aufgefüllt und hydraulisch zum Bohrlochtiefsten offen. Die Zementation ist dicht (Ringraumdruckbeobachtungen während des Fördertests). Nach Abbau der Bohranlage wurde die KTB-Bohrlochverflanschung entsprechend Abb. 20 montiert.

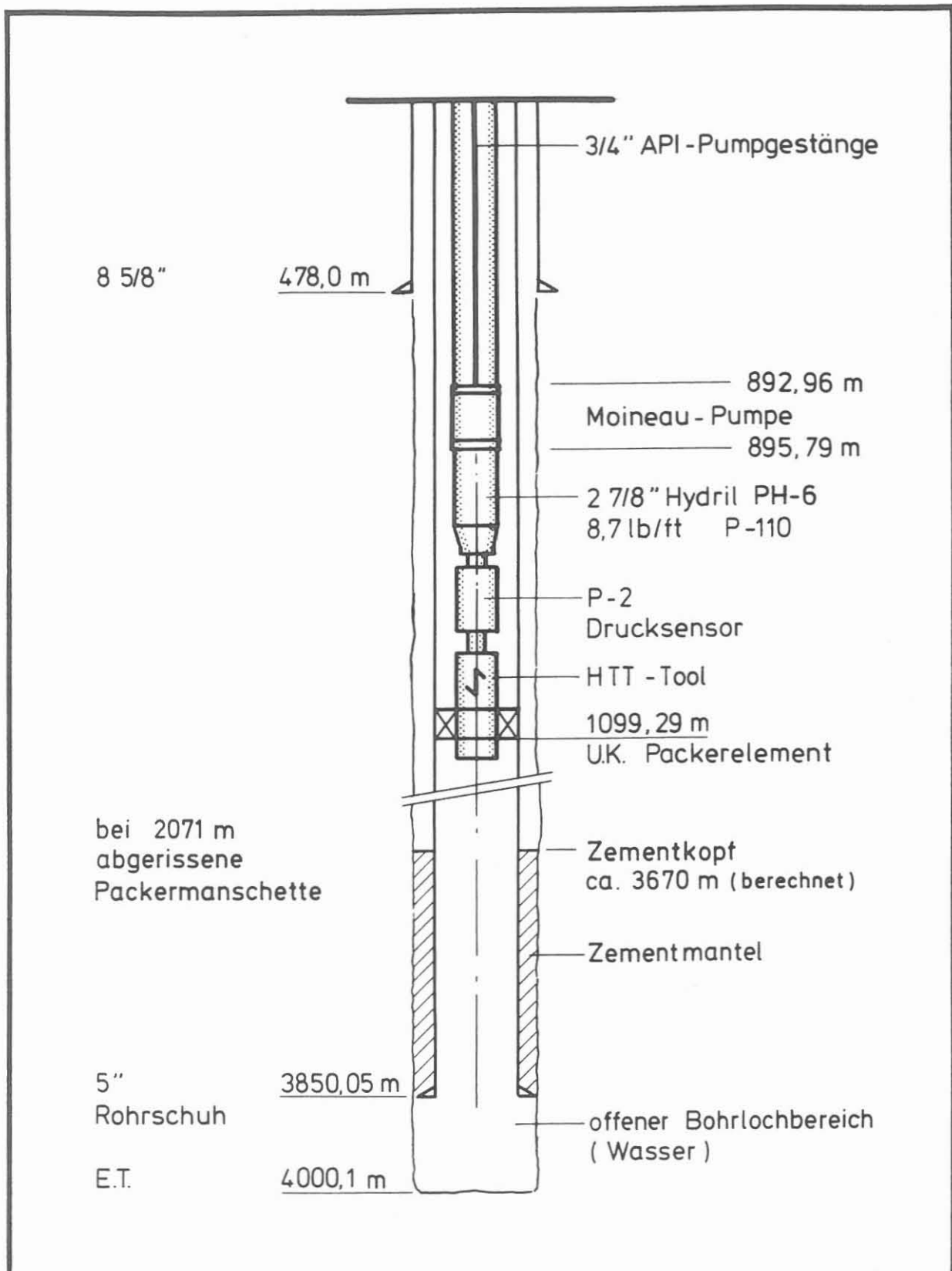


Abb.18 Fördertestkonfiguration
(2. erfolgreicher Versuch)

KTB



Abb. 19: Umgekrempelte Packermanschette nach Ausbau des Packerelements aus der Setzteufe 1 099,29 m

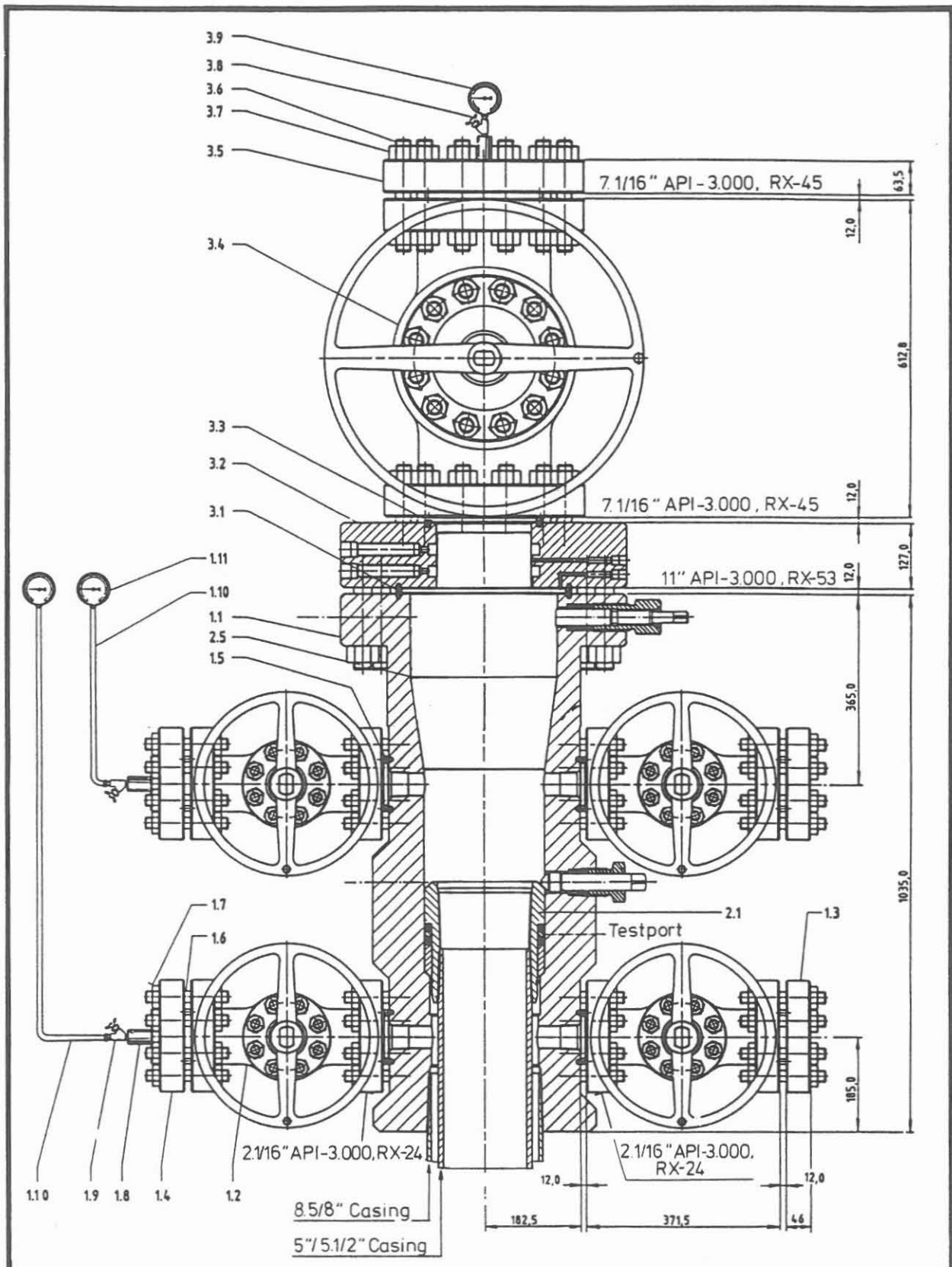
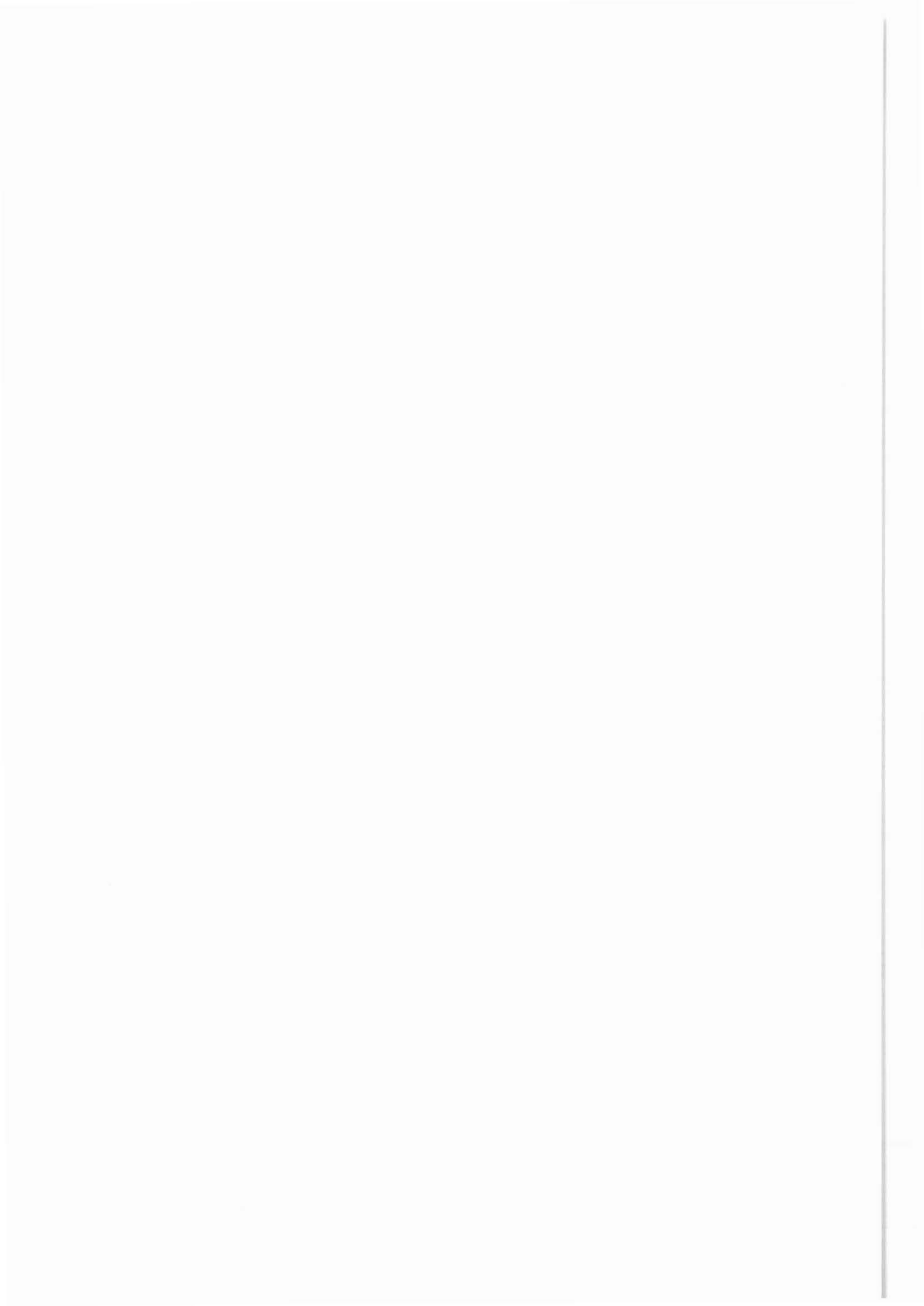


Abb. 20 Bohrlochkopf nach Abzug der Bohranlage

KTB

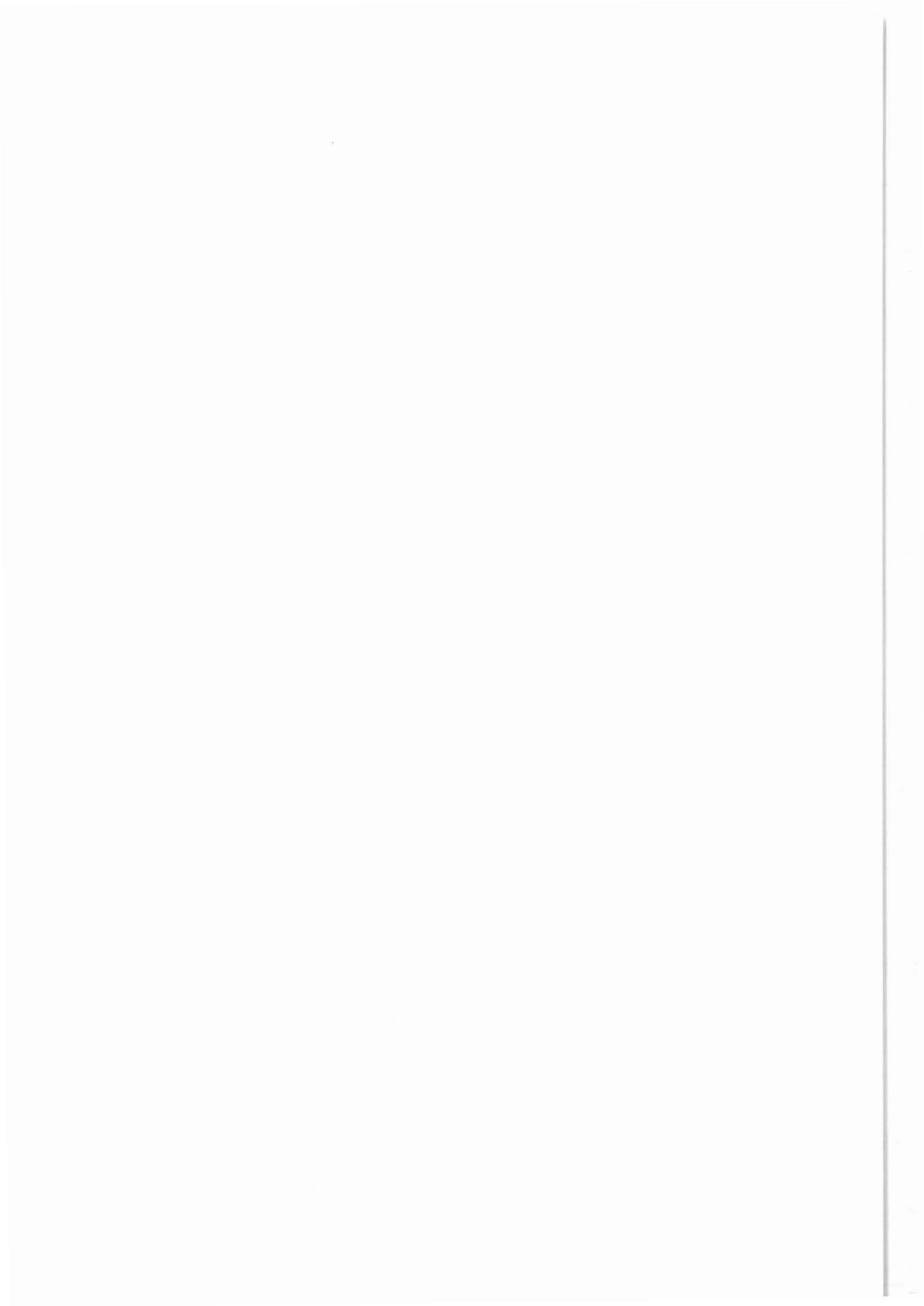
LITERATURVERZEICHNIS

- Baumgärtner, J., Rummel, F. (1990): In Situ Permeability Measurements in the KTB Pilot Hole VB, Using a Wireline-Operated, Hydraulic Fracturing Straddle Packer Assembly, KTB-Report 90-5, NLFb, Hannover
- Draxler, J. Hänel, R. (1987): Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik (Bericht 3), KTB-Report 87-4, S. 52 - 55, NLFb, Hannover
- Enacescu, C., Miehe, R., Pusch, G. (1990): Auswertung geohydraulischer Tests in der Bohrphase der KTB-Vorbohrung. In: Kessels, W., KTB-Report 90-5, NLFb, Hannover
- Kessels, W. (1989): Bewertungskriterien zur Interpretation von Logdaten hinsichtlich hydraulisch testwürdiger Zonen, unveröffentlicher Bericht, NLFb/KTB, Hannover
- Kessels, W., Pusch, G. (1990): Auswahl hydraulischer Testzonen in der KTB-Oberpfalz VB anhand von Bohrlochmessungen. In: Kessels, W., KTB-Report 90-5, NLFb, Hannover
- Kessels, W., Zoth, G., Kück, J. (1990): Erste Ergebnisse eines Absenkungs- und Injektionstestes in der KTB-Oberpfalz VB. In: Kessels, W., KTB-Report 90-5, NLFb, Hannover
- Ostrowski, L. (1990): Hydraulisches Testprogramm KTB-VB: Ergebnisse der Feldauswertungen. In: Kessels, W., KTB-Report 90-5, NLFb, Hannover
- Wittenbacher, A., Heinschild, H.-J., Stroh, A., Tapfer, M. (1989): Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor - Teufenbereich von 3009,7 bis 3500,0 m. In: Emmermann, R., Dietrich, H.-G., Heinisch, M., Wöhrle, Th., KTB-Report 89-5, NLFb, Hannover



Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Projektgruppe KTB
Stilleweg 2
3000 Hannover 51

Untertage-Probennahmesysteme zur Gewinnung von in situ-Fluidproben



**Untertage-Probennahmesysteme zur Gewinnung
von in situ-Fluidproben**

G. ZOTH

ZUSAMMENFASSUNG

Die Probennahmegeräte werden im wesentlichen nach Durchström- und Einströmprobennehmer unterschieden. Beide Systeme werden erläutert und ihre Vor- und Nachteile aufgezeigt. Eine Auflistung von Fluidprobennehmern mit kurzen technischen Beschreibungen soll einen Überblick über die verfügbaren Geräte geben. Die in der KTB-Oberpfalz VB eingesetzten Fluidprobennehmer werden ausführlicher beschrieben und ihre Meßergebnisse vorgestellt.

SUMMARY

In general, fluid samplers are distinguished between flow-through and in-flow types. Both types will be explained and their advantages and disadvantages will be compared. A list of fluid samplers and their short technical description shall give an overview of the tools available. The fluid samplers which were applied in the pilot hole will be described in detail and their logging results will be presented.

1 EINLEITUNG

Die Schlüsselexperimente und Ziele, die zum Abteufen einer über-tiefen Bohrung führen sollen, sind festgelegt und bestimmen die Planung und Durchführung aller Arbeiten des KTB.

Eines der Ziele ist die möglichst genaue Erfassung aller Krusten-fluide. Dazu gehören auf Klüften und in Störungssystemen frei zirkulierende Flüssigkeiten und Gase, aber auch eine große Zahl von Paläofluidsystemen, die in Gesteinen und Mineralen eingeschlossen, chemisch gebunden oder durch anderweitige physikali-sche Prozesse im Gefüge fixiert sind.

Zur Erfassung der frei zirkulierenden Fluide sind geeignete Pro-bennahmetechniken erforderlich, die auch Beeinflussungen durch den Bohrvorgang (Kontamination mit der Spülung) oder gerätespezi-fische Beeinflussungen (Expansion, Kontakt mit Ölen u.a.) nach Möglichkeit ausschließen.

2 FLUID-PROBENNAHME AM BOHRLOCHMESSKABEL

In dieser Arbeit sollen nur die Probennahmegeräte behandelt wer-den, die am Bohrlochmeßkabel gefahren werden können; nicht aber die klassischen Testeinrichtungen am Gestänge, die zur Gewinnung nicht-kontaminierter Fluide eingesetzt werden. Ferner werden auch die Geräte nicht behandelt, die vorwiegend nur in geringen Teufen eingesetzt und auch nicht für KTB modifiziert werden können.

Bei den Probennahmegeräten (Fluidsampler) unterscheidet man im wesentlichen zwei Gerätetypen, die Durchströmprobennehmer und die Einströmprobennehmer.

2.1 Durchströmprobennehmer

Ein Durchströmprobennehmer besteht aus einer Stahlkammer (Probenflasche) mit Ein- und Auslaßventil und einer Steuereinheit zum Schließen der Ventile. Die Steuerung kann mechanisch, aber auch elektrisch ausgelegt sein. Durchströmprobennehmer werden mit geöffneten Ventilen in die Bohrung eingefahren. Während des Einfahrens soll das im Bohrloch befindliche Medium durch das Einlaßventil ein- und durch das Auslaßventil wieder ausströmen. Nach Erreichen der Probennahmetiefe werden die Ventile der Probenflasche geschlossen und die eingeschlossene Probe zu Tage gezogen.

Vorteile eines Durchströmprobennehmers:

- bei einer Einfahrt können mehrere Probenflaschen hintereinandergeschaltet werden (nur bei mechanischer Steuerung),
- kein Evakuieren der Probenkammern (Zeitersparnis),
- keine Gasexpansion beim Befüllen der Probenflaschen unter Tage.

Nachteile eines Durchströmprobennehmers:

- die Probe kann nicht mit Sicherheit der beabsichtigten Entnahmetiefe zugeschrieben werden,
- dadurch sind Mischproben möglich,
- keine Funktionskontrolle möglich (bei mechan. Steuerung),
- bei Dehydril-Spülung kann der Durchfluß durch Vergelen unterbrochen werden,
- bei ausgeflocktem Dehydril kein Durchfluß möglich.

2.2 Einströmprobennehmer

Ein Einströmprobennehmer setzt sich prinzipiell, wie der Durchströmprobennehmer, aus einer Probenflasche mit Ventilen und einer Steuereinheit zusammen. Der wesentliche Unterschied liegt in der Ausführung des Meßverfahrens. Der Einströmprobennehmer wird mit

geschlossenen Ventilen in das Bohrloch eingefahren, und erst an der Probenentnahmestelle werden die Ventile geöffnet, um die Probenkammer (bzw. -kammern) zu füllen. Hier kann man wieder zwei Typen der Einströmprobennehmer unterscheiden:

- Einströmprobennehmer mit evakuierbarer Probenkammer und
- Einströmprobennehmer mit Verdrängerflüssigkeit.

2.2.1 Einströmprobennehmer mit evakuierbarer Probenkammer

Vor dem Einsatz dieses Fluidsamplers werden die Ventile geschlossen und die Probenkammern über einen Adapter evakuiert. Dadurch wird

- a) eine Druckdifferenz für das selbsttägige Einströmen der Probe erreicht und
- b) eine nahezu sauerstofffreie und u.U. sterile Probenkammer für die Entnahme vorbereitet.

In der Entnahmeteufe wird das Einlaßventil geöffnet und die Probe strömt, bedingt durch die Druckdifferenz, in die Kammer ein. Nach Schließen des Ventils wird der Fluidsampler mit der Fluidprobe, die unter "in situ-Bedingungen" eingeschlossen wurde, zu Tage gezogen.

Vorteile:

- Probennahme exakt aus der vorbestimmten Teufe,
- Funktionskontrolle mittels Drucksensor im Probenbehälter.

Nachteile:

- Gasdifferentiationen und Gasfreisetzungen durch das Einströmen in den evakuierten Behälter,
- starke Verschleißerscheinungen am Einlaßventil bei Probenahme in großen Bohrlochteufen.

2.2.2 Einströmprobennehmer mit Verdrängerflüssigkeit

Probennehmer mit Verdrängerflüssigkeit werden ebenfalls mit geschlossenen Ventilen eingefahren. Bei diesem Typ ist die Probenkammer mit einer Flüssigkeit (normalerweise ein Öl) gefüllt. Nach dem Öffnen des Einlaßventils in der Entnahmetiefe verdrängt die im Bohrloch befindliche Flüssigkeit mit ihrem "in situ-Druck" die Kammerflüssigkeit in eine Nebenkammer mit geringerem Druck. Die Geschwindigkeit der Überführung des Öls in die Nebenkammer und somit die Gewalt des Einströmens der Probenflüssigkeit kann mittels der Durchlaßöffnung in die Nebenkammer geregelt werden. Nach der Befüllung wird das Probennahmegerät zu Tage gezogen.

Vorteile:

- Probennahme exakt aus der vorbestimmten Teufe,
- Funktionskontrolle möglich.

Nachteile:

- Kontamination der Probe mit der Verdrängerflüssigkeit,
- Gasdifferentiationen und Gasfreisetzungen möglich.

3 TECHNISCHE BESCHREIBUNGEN VON PROBENNEHMERN

In der folgenden Aufstellung sollen die dem Autor bekannten Fluidsamplers beschrieben werden. Die Liste hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die technischen Angaben entstammen in den meisten Fällen den Prospekten und Beschreibungen der Firmen.

3.1 Technische Beschreibungen von Durchströmprobennehmern

Die folgende Abbildung zeigt den Weg der Flüssigkeit durch den Probennehmer.

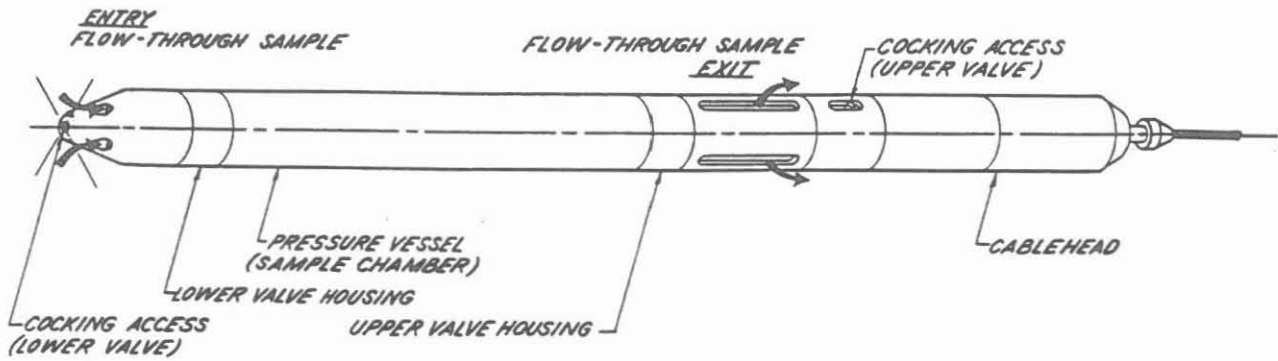
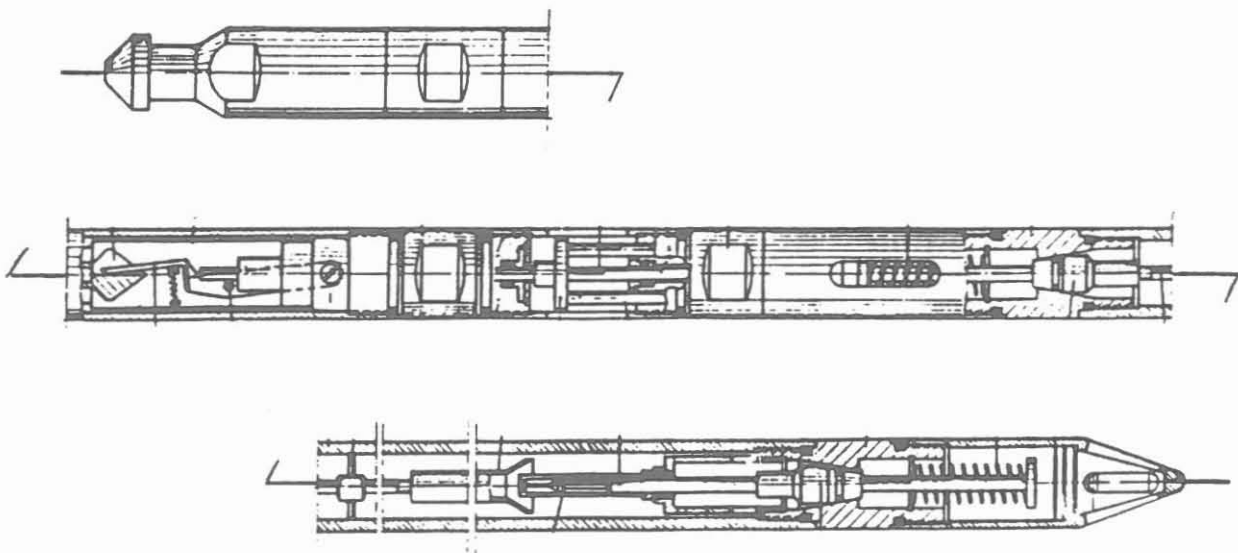


Abb. 3.1 Durchströmprobennehmer

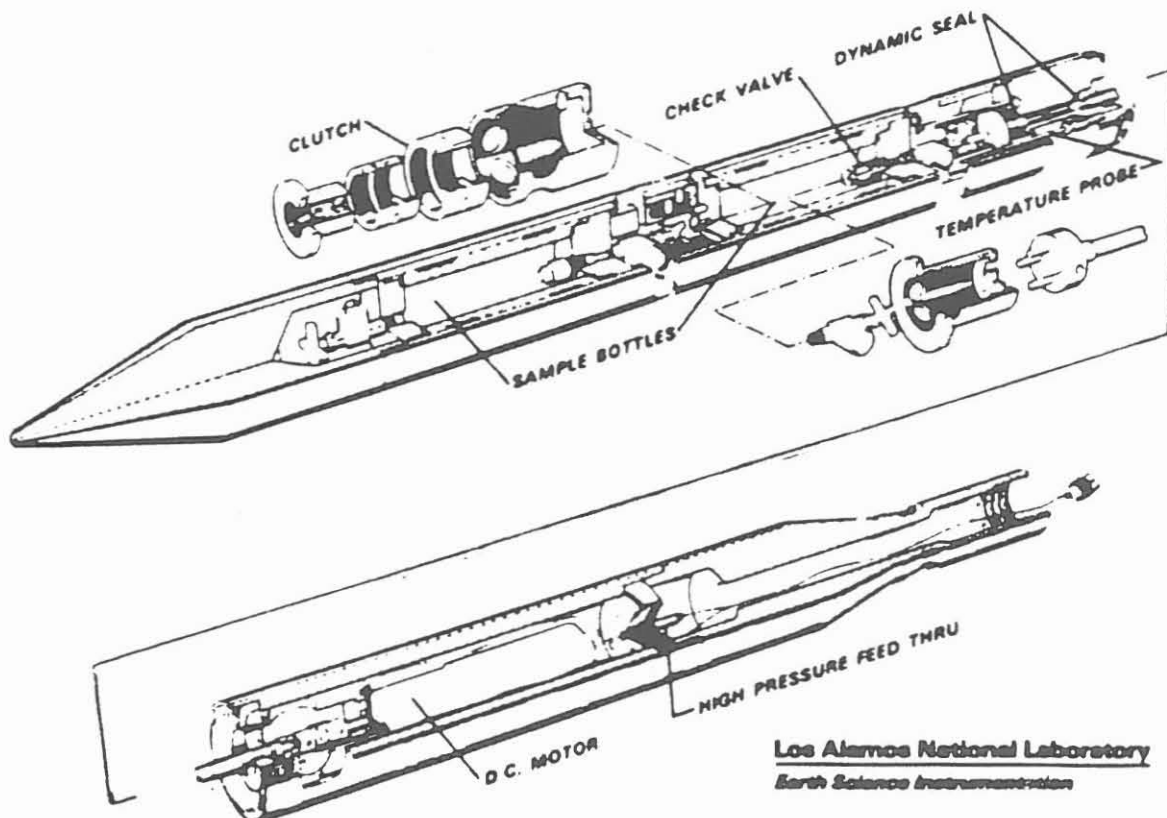
3.1.1 Typ: Durchströmprobennehmer PNL 64
Firma: Leutert, D-3146 Adendorf

Durchmesser (max):	40	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	2450 - 3380	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	500	mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:		mm
Volumen der Kammern:	500 - 1000	ml
Steuereinheit elektrisch:	nein	
Steuereinheit mechanisch:	ja	
Einstellbereich des Uhrwerkes:	2,5 - 24	Std
Funktionskontrolle über Tage	nein	
Druckstufe (max):	300 - 700	bar
Temperatur (max):	150	°C



3.1.2 Typ: Durchströmprobennehmer (Hochtemperatur)
Firma: "Los Alamos National Laboratory"

Durchmesser (max):	127	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	2260	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	--	mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:		mm
Volumen der Kammern:	270 bzw. 780	ml
Steuereinheit elektrisch:	ja	
Steuereinheit mechanisch:	nein	
Einstellbereich des Uhrwerkes:		
Funktionskontrolle über Tage:	ja	
Druckstufe (max):	1000	bar
Temperatur (max):	300	°C



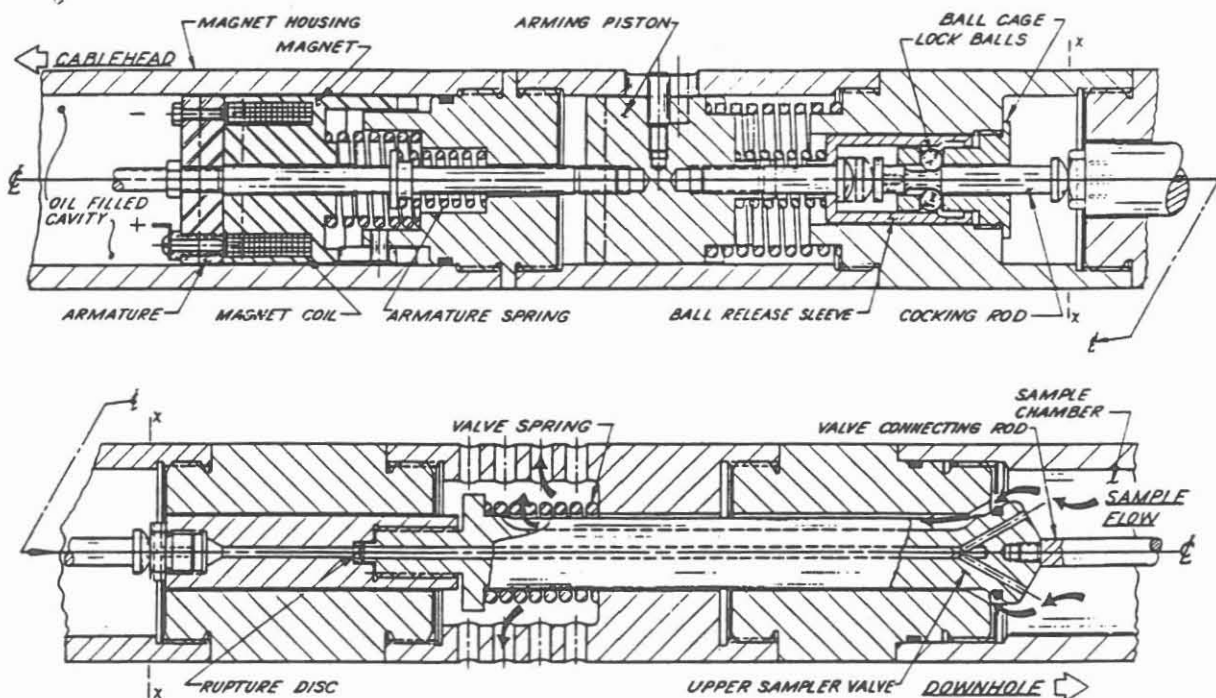
Los Alamos National Laboratory
Earth Science Instrumentation

3.1.3 Typ: Durchströmprobennehmer (HT-Version, LASL)
Firma: "Los Alamos National Laboratory"

Durchmesser (max):	58	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	3050	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	--	mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:		mm
Volumen der Kammern:	1000	ml
Steuereinheit elektrisch:	ja	
Steuereinheit mechanisch:	ja	
Einstellbereich des Uhrwerkes:	2 - 36	Std
Funktionskontrolle über Tage:	nein	
Druckstufe (max):	1380	bar
Temperatur (max):	350	°C

Bemerkungen:

Der F.S ist eine Modifikation des Leutert-Typs PNL 64. Das Schließen der Ventile kann variabel, elektronisch oder mechanisch mit einem Uhrwerk erfolgen. Die Abbildung zeigt einen Schnitt durch das Gerät; Ventile sind in geöffneter Position.



3.1.4 Typ: Durchströmprobennehmer mit Zwangsdurchführung
Firma: Salvamoser, D-8031 Wörthsee

Durchmesser (max):	40	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	ca. 3000	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	80, 100, 820	mm
Anzahl der Kammern (max):	8	Stck
Länge der Kammern:	80, 100, 820	mm
Volumen der Kammern:	20, 50, 500	ml
Steuereinheit elektrisch:	ja	
Steuereinheit mechanisch:	nein	
Einstellbereich des Uhrwerkes:		
Funktionskontrolle über Tage:		
Druckstufe (max):	600	bar
Temperatur (max):	150	°C

Bemerkungen:

Das Gerät ist in Dehydril-Spülung nicht brauchbar, da dabei die Zwangsdurchführung ohne Wirkung bleibt. Die Weiterentwicklung dieses Gerätes ist aus Kostengründen zunächst eingestellt.

3.1.5 Typ: Durchströmprobennehmer
Firma: Preußag, D-3155 Edemissen

Durchmesser (max):	38	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	2675	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	--	mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:	1445	mm
Volumen der Kammern:	620	ml
Steuereinheit elektrisch:	nein	
Steuereinheit mechanisch:	ja	
Einstellbereich des Uhrwerkes:	5 min - 4	Std
Funktionskontrolle über Tage:	nein	
Druckstufe (max):	700	bar
Temperatur (max):	130	°C

3.2 Einströmprobennehmer

3.2.1 Typ: Einströmprobennehmer (Vakuumsystem)

Firma: Preußag, D-3155 Edemissen

Durchmesser (max):	38	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	2135	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je		mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:	1445	mm
Volumen der Kammern:	650	ml
Steuereinheit elektrisch:	ja	
Steuereinheit mechanisch:	nein	
Einstellbereich des Uhrwerkes:		
Funktionskontrolle über Tage:	nein	
Druckstufe (max):	700	bar
Temperatur (max):	150	°C
<u>Bemerkungen:</u>	Hochdruckkammer	

3.2.2 Typ: Einströmprobennehmer (Vakuumsystem)

Firma: Preußag, D-3155 Edemissen

Durchmesser (max):	50	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	3640	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	--	mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:	2950	mm
Volumen der Kammern:	3500	ml
Steuereinheit elektrisch:	ja	
Steuereinheit mechanisch:	nein	
Einstellbereich des Uhrwerkes:		
Funktionskontrolle über Tage:	nein	
Druckstufe (max):	300	bar
Temperatur (max):	150	°C
<u>Bemerkungen:</u>	Großraumkammer	

3.2.3 Typ: Einströmprobennehmer (Vakuumsystem)

Firma: Preußag, D-3155 Edemissen

Durchmesser (max):	44,5	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	3440	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	--	mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:	2700	mm
Volumen der Kammern:	3200	ml
Steuereinheit elektrisch:	ja	
Steuereinheit mechanisch:	nein	
Einstellbereich des Uhrwerkes:		
Funktionskontrolle über Tage:	nein	
Druckstufe (max):	150	bar
Temperatur (max):	150	°C
<u>Bemerkungen:</u>	Niederdruckkammer	

3.2.4 Typ: Einströmprobennehmer (Verdrängersystem)

Firma: Preußag, D-3155 Edemissen

Durchmesser (max):	38	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	3600	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	--	mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:	1445	mm
Volumen der Kammern:	620	ml
Steuereinheit elektrisch:	nein	
Steuereinheit mechanisch:	ja	
Einstellbereich des Uhrwerkes:	5 min bis 4	Std
Funktionskontrolle über Tage:	nein	
Druckstufe (max):	700	bar
Temperatur (max):	130	°C

3.2.5 Typ: Einströmprobennehmer (BFS-A)

Firma: Halliburton, London WC2N 4AA (EX-Gearhart)

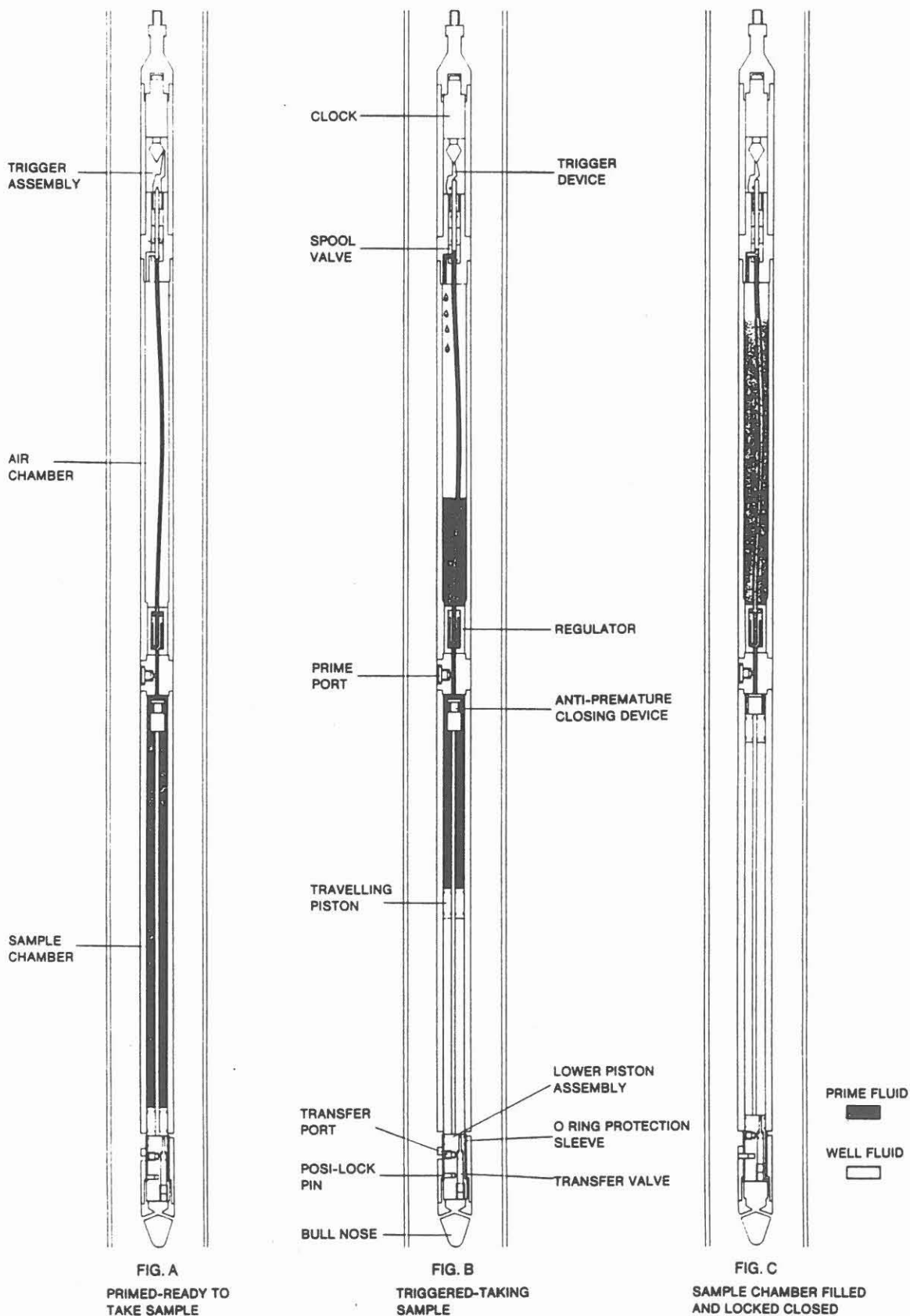
Durchmesser (max):	43	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	1830	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	--	mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:		mm
Volumen der Kammern:		ml
Steuereinheit elektrisch:		
Steuereinheit mechanisch:		
Einstellbereich des Uhrwerkes:		
Funktionskontrolle über Tage:		
Druckstufe (max):	1300	bar
Temperatur (max):	204	°C

3.2.6 Typ: Einströmprobennehmer (Verdrängersystem)

Firma: Leutert, D-3146 Adendorf

Durchmesser (max):	43	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	3810	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	--	mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:		mm
Volumen der Kammern:	600	ml
Steuereinheit elektrisch:	ja	
Steuereinheit mechanisch:	nein	
Einstellbereich des Uhrwerkes:		
Funktionskontrolle über Tage:	ja	
Druckstufe (max):		bar
Temperatur (max):		°C

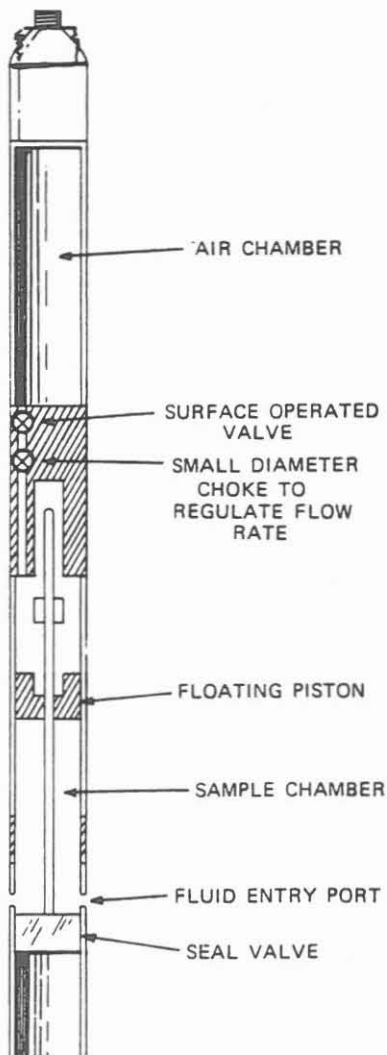
3.2.6 Typ: Einströmprobennnehmer (Verdrängersystem)
Firma: Leutert, D-3146 Adendorf



3.2.7 Typ: Einströmprobennehmer (Verdrängersystem)
Firma: Western Atlas International, D-2805 Stuhr 1

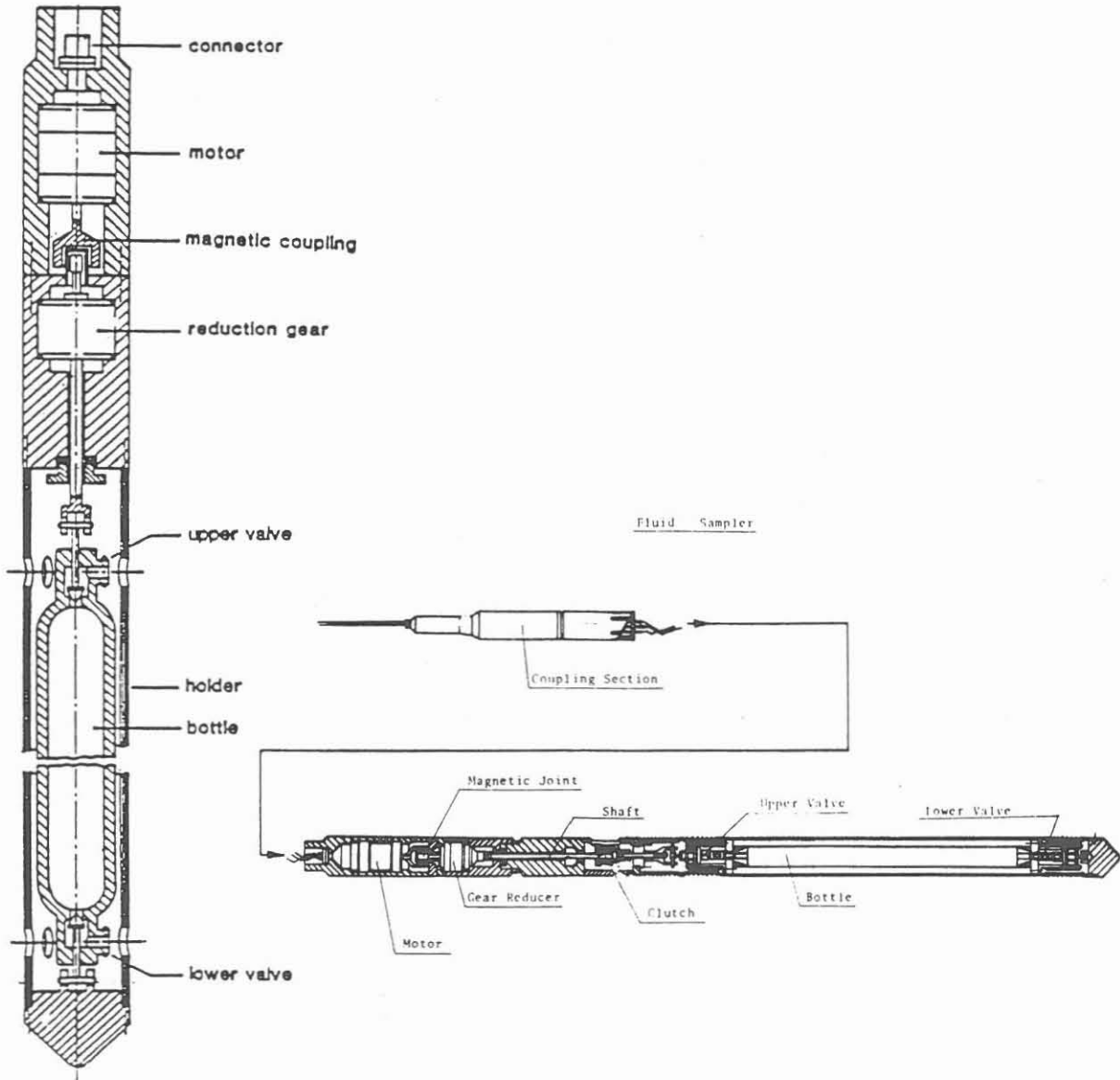
Durchmesser (max):	43	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	3200	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	--	mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:		mm
Volumen der Kammern:		ml
Steuereinheit elektrisch:	ja	
Steuereinheit mechanisch:		
Einstellbereich des Uhrwerkes:		
Funktionskontrolle über Tage:	ja	
Druckstufe (max):	630	bar
Temperatur (max):	150	°C

Bemerkungen: Sonden-Typ PFL



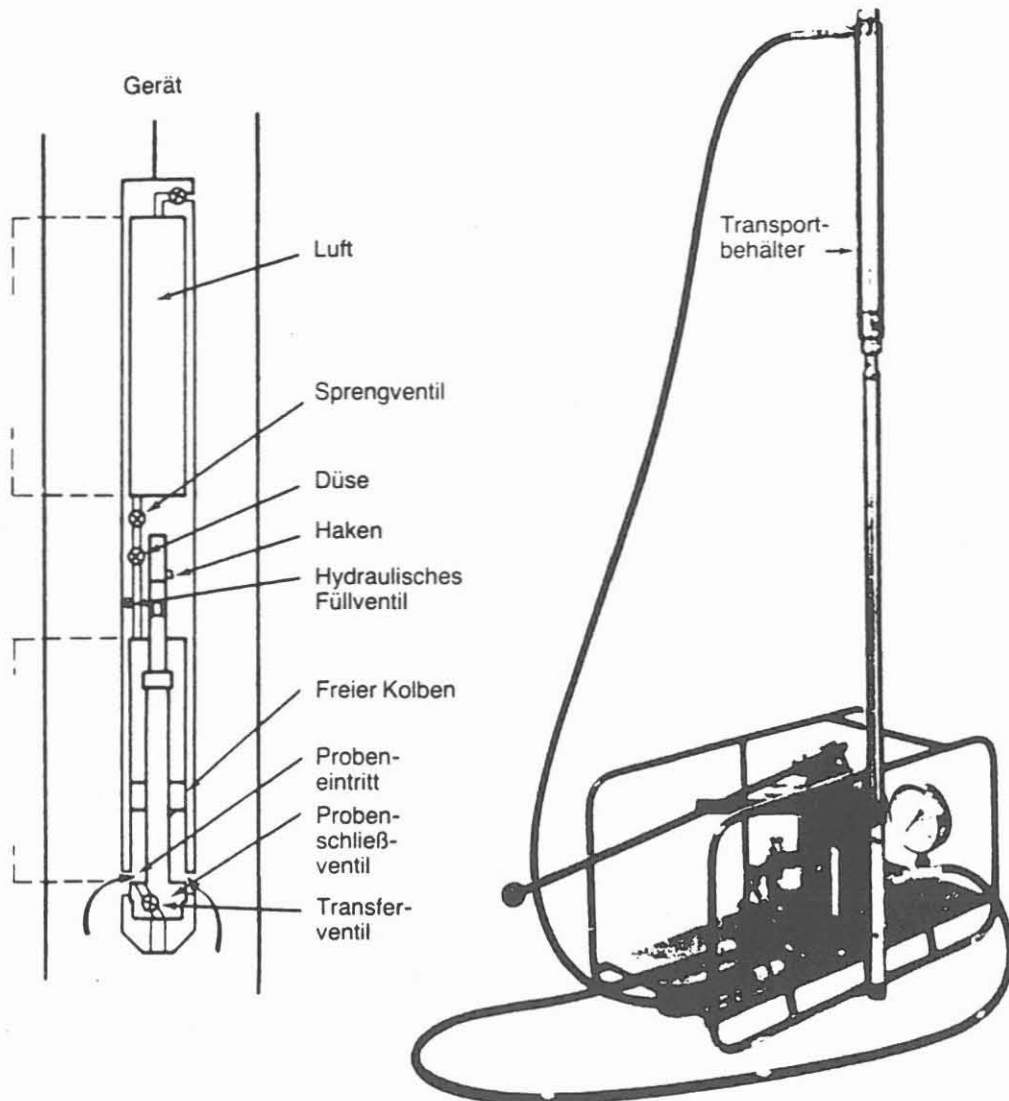
3.2.8 Typ: Einströmprobennehmer (Vacuumsystem)
Firma: ENEL, I-Pisa

Durchmesser (max):	80	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):		mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je		mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:		mm
Volumen der Kammern:	2800	ml
Steuereinheit elektrisch:	ja	
Steuereinheit mechanisch:		
Einstellbereich des Uhrwerkes:		
Funktionskontrolle über Tage:	ja	
Druckstufe (max):	250	bar
Temperatur (max):	250	°C



3.2.9 Typ: Einströmprobennehmer (Verdrängersystem) PSR-C
Firma: Schlumberger Verfahren, D-2840 Diepholz 1

Durchmesser (max):	64	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):		mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je		mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:	850	mm
Volumen der Kammern:	770	ml
Steuereinheit elektrisch:	ja	
Steuereinheit mechanisch:		
Einstellbereich des Uhrwerkes:		
Funktionskontrolle über Tage:	ja	
Druckstufe (max):	700	bar
Temperatur (max):	150	°C



Surface Transfer Equipment

3.2.10 Typ: Einströmprobennehmer (Verdrängersystem)
Firma: Schlumberger Verfahren, D-2840 Diepholz 1

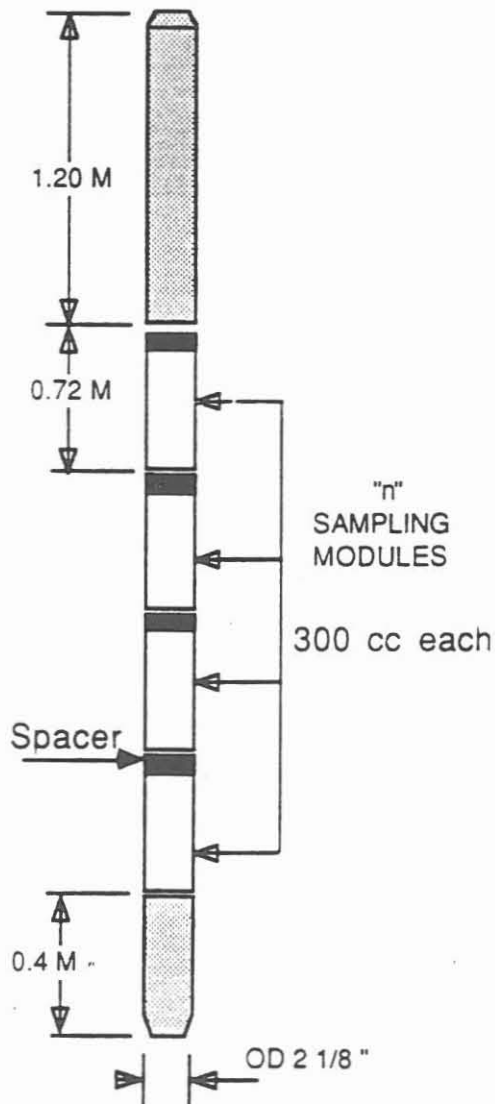
Durchmesser (max):	43	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	3665	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	--	mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:	1550	mm
Volumen der Kammern:	656	ml
Steuereinheit elektrisch:	ja	
Steuereinheit mechanisch:		
Einstellbereich des Uhrwerkes:		
Funktionskontrolle über Tage:	ja	
Druckstufe (max):	700	bar
Temperatur (max):	175	°C
<u>Bemerkung:</u>	Hochtemperatur-Version PSM-D	

3.2.11 Typ: Einströmprobennehmer (Verdrängersystem)
Firma: Schlumberger Verfahren, D-2840 Diepholz 1

Durchmesser (max):	76	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):		mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	--	mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:	865	mm
Volumen der Kammern:	730	ml
Steuereinheit elektrisch:	ja	
Steuereinheit mechanisch:		
Einstellbereich des Uhrwerkes:		
Funktionskontrolle über Tage:	ja	
Druckstufe (max):	700	bar
Temperatur (max):	85	°C
<u>Bemerkung:</u>	Niedrigtemperatur-Version PSR-D	

**3.2.12 Typ: Einströmprobennehmer (Verdrängersystem)
Firma: Schlumberger Verfahren, D-2840 Diepholz 1**

Durchmesser (max):	54	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	2300	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	720	mm
Anzahl der Kammern (max):	n*	Stck
Länge der Kammern:	720	mm
Volumen der Kammern:	300	ml
Steuereinheit elektrisch:	ja	
Steuereinheit mechanisch:		
Einstellbereich des Uhrwerkes:		
Funktionskontrolle über Tage:	ja	
Druckstufe (max):	700	bar
Temperatur (max):	150	°C

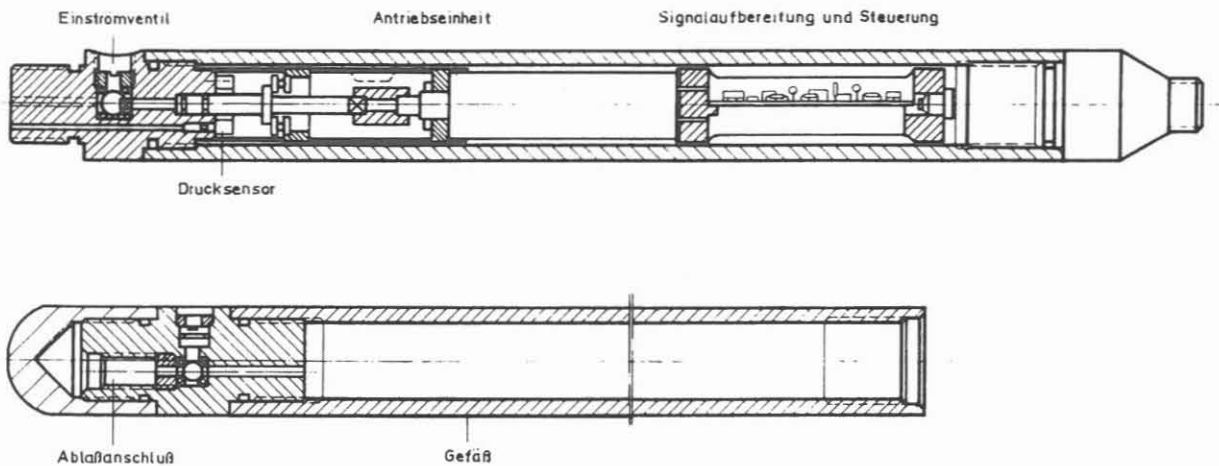


Bemerkungen:

*
Multi-Fluidsampler
MSSM-B. Die Begrenzung der Anzahl der Probenkammern liegt nur in der Einbauhöhe zwischen Turmrolle und Arbeitshöhe.

3.2.13 Typ: Einströmprobennehmer (Vacuumsystem)
Firma: GEOCOM, D-3100 Celle

Durchmesser (max):	50	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	1930	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	--	mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:		mm
Volumen der Kammern:	1400	ml
Steuereinheit elektrisch:	ja	
Steuereinheit mechanisch:		
Einstellbereich des Uhrwerkes:		
Funktionskontrolle über Tage:	ja	
Druckstufe (max):	700	bar
Temperatur (max):	150	°C



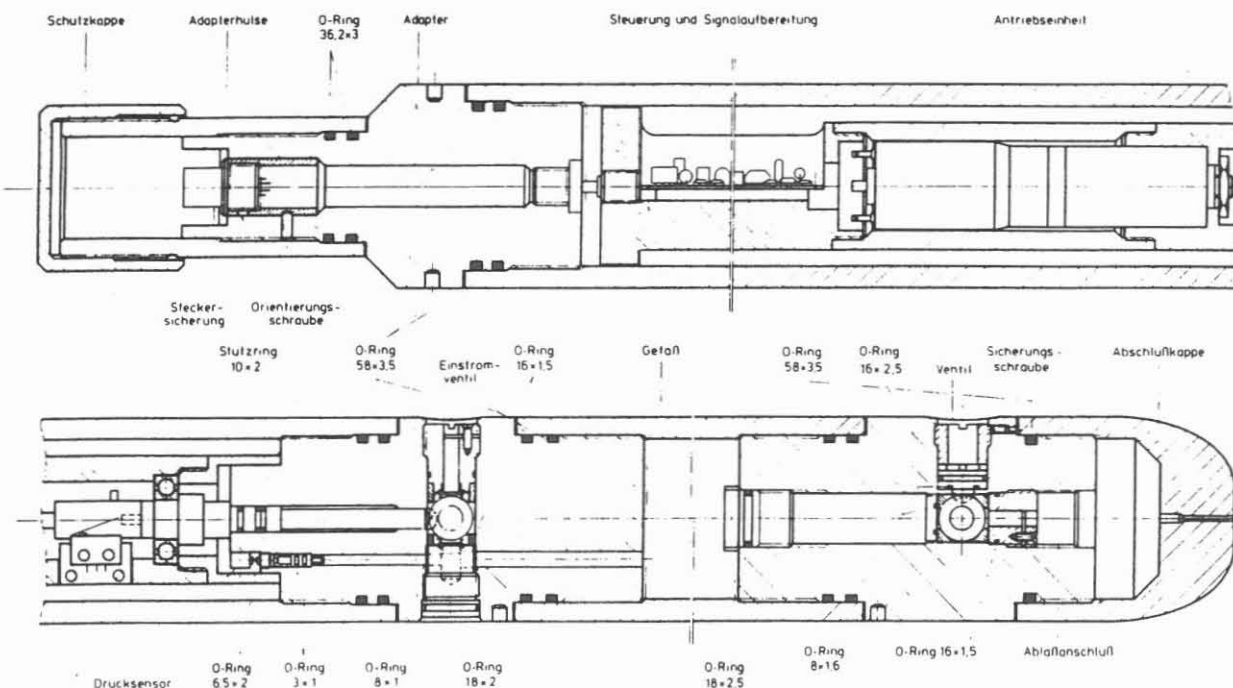
3.2.14 Typ: Einströmprobennehmer (Vacuumsystem)

Firma: GEOCOM, D-3100 Celle

Durchmesser (max):	80	mm
Gesamtlänge (min) (Kammer + Steuereinheit):	2600	mm
Verlängerung durch weitere Kammern um je	--	mm
Anzahl der Kammern (max):	1	Stck
Länge der Kammern:	450 - 1000	mm
Volumen der Kammern:	1400 - 3000	ml
Steuereinheit elektrisch:	ja	
Steuereinheit mechanisch:		
Einstellbereich des Uhrwerkes:		
Funktionskontrolle über Tage:	ja	
Druckstufe (max):	600	bar
Temperatur (max):	150	°C

Bemerkungen:

Die Funktionskontrolle erfolgt über einen Drucksensor in der Probenkammer.



4 EINSATZ VON PROBENNEHMERN IN DER KTB-OBERPFALZ VB

Zur Klärung der technischen Anforderungen an den Fluidprobennehmer wurde im Kreise der Fluidabnehmer eine Umfrage gestartet, um spezielle Wünsche noch vor der Beschaffung der Geräte berücksichtigen zu können. Als Ergebnis der Umfrage kam nur eine Beantwortung zurück.

Nach einer weiteren telefonischen Abstimmung bei verschiedenen Anwendern und Diskussionen anlässlich der ARGE7-Sitzungen am 09.02.87, 12.03.87 und 27.03.87 kam man dann zu folgendem Anforderungskatalog:

a) Einströmprobennehmer:

- Probenkammer soll evakuierbar sein,
- Probe soll unter in situ-Bedingungen eingeschlossen werden,
- Probe gasdicht zu Tage fördern,
- Probenmenge ≥ 100 ml,
- gedämpftes Einströmen erwünscht, aber keine Bedingung,
- das Innere der Probenkammer darf nicht mit Schmiermitteln in Verbindung kommen,
- Multikammersystem ist anzustreben.

b) Durchströmprobennehmer

- Durchmesser < 40 mm, dadurch auch für Drillstem-Teste geeignet,
- Zwangsdurchströmung während der Einfahrt in das Bohrloch,
- keine Expansion der Gase bei der Probennahme unter Tage,
- Sicherheit, daß die Proben aus der geforderten Tiefe stammen,
- garantierte Gasdichtigkeit der Probenflasche bis ins Labor,

- Probenflaschen sollen gleichzeitig Transportflaschen sein (kein Umfüllen an der Bohrstelle),
- Anzahl der Größe der Probenflaschen soll variabel sein,
- keine Verunreinigungen durch gefettete bewegliche Bauteile (z.B. Kolben),
- Prüfdruck der Geräte mind. 550 bar,
- Temperaturbeständigkeit mind. 120°C,
- Bedienung muß über ein Kabel (7-adrig) elektrisch möglich sein,
- Leistungsaufnahme darf die vorhandene Kabelkapazität nicht überschreiten.

Es wurde daraufhin ein Einströmprobennehmer bei der Firma GEOCOM, Celle, und ein Durchströmprobennehmer mit Zwangsdurchströmung bei der Firma Salvermoser, München, bestellt.

4.1 Einströmprobennehmer der Firma GEOCOM

Der Einströmprobennehmer der Firma GEOCOM, Celle, besteht im wesentlichen aus dem Antriebs- und Steuersegment und der Probenkammer mit Ein- und Auslaßventil (Abb. 4.1).

4.1.1 Antriebskartusche

Im Antriebsteil befindet sich ein Elektromotor mit einem entsprechenden Untersetzungsgetriebe, der stark genug ist, um das Einlaßventil unter den Außendruckbedingungen bis 700 bar zu öffnen. Ferner ist in diesem Bauteil die Steuerelektronik für den Motor und der Drucksensor zur Kontrolle des Probenkammerdruckes untergebracht. Die Leitungsdurchführung zum Kabelkopf erfolgt im druckfreien Bereich über eine 16-polige Steckverbindung.

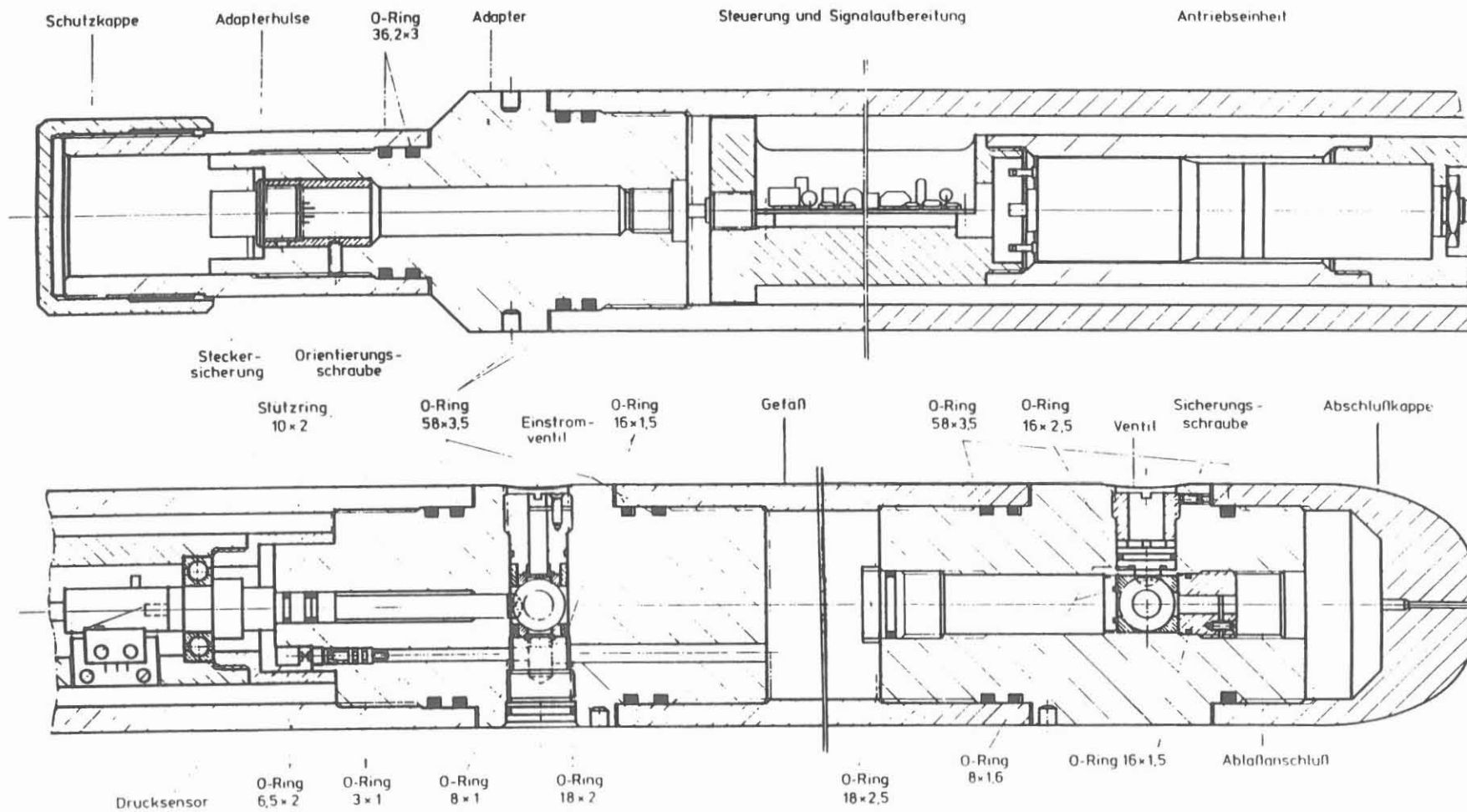


Abb. 4.1: Einströmprobenehmer der Firma GEOCOM

4.1.2 Probenkammer

An die Antriebskartusche wird die Probennahmekammer mittels einer Überwurfmutter angeschraubt. Alle Abdichtungen erfolgen durch O-Ringe. Es werden O-Ringe aus Viton mit einer Shore-Härte 80-90 verwendet. Die Probenkammer hat ein Volumen von ca. 1500 ml, sie ist mit einem Einlaß- und einem Auslaßventil ausgerüstet. Das Auslaßventil wird manuell mit einem Spezialschlüssel geöffnet und geschlossen. Das Einlaßventil jedoch wird mittels der Antriebswelle, die aus der Antriebskartusche in den Kammerteil durchgeführt wird, geöffnet und geschlossen.

4.1.3 Ein- und Auslaßventil

Beide Ventile sind Kugelventile. Die Kugel besteht aus Stahl mit einer gehärteten Oberfläche. Sie hat einen Durchmesser von 18 mm und im Zentrum eine 6 mm-Durchlaßbohrung. Je nach Stellung der Bohrung zum Einströmkanal ist das Ventil geschlossen oder geöffnet. Die Kugel ist ferner mit einer ausgefrästen Nut versehen, in die die Antriebswelle fassen und diese drehen kann. Die Kugel ist in zwei Halbschalen aus temperaturfestem Kunststoff gelagert, diese wiederum sind mit O-Ringen gegen das Metallgehäuse abgedichtet.

Die Ventile sind die sensibelsten Bauteile des Systems. Diese Eigenanfertigung der Firma GEOCOM ist aus den Erfahrungen mit anderen Fluidsamplern und anderen Ventilen, Schiebern und Hähnen und aus früheren Arbeiten mit der Fa. GEOCOM gemeinsam entwickelt und befürwortet worden. Die Ausfallquote durch Undichtigkeiten ist bei sorgfältiger Wartung gering. Mehrfacheinfahrten ohne Austausch der Kugel waren auch bei Teufen bis 4000 m möglich.

Der Verschleiß der Kugel und der Lagerschalen, der zu Undichtigkeiten führen kann, tritt durch das einströmende Medium unter Mitreißen harter Mineralpartikelchen im Bereich der 6 mm-Bohrung auf. Dies insbesondere im Moment des Öffnens, bis der gesamte Querschnitt der 6 mm-Bohrung den Einlaß freigibt.

4.1.4 Evakuieren des Probenkörpers

Zur Evakuierung der Probenkammer steht eine Drehschieber-Vakuumpumpe der Firma Vacuubrand, Wertheim, zur Verfügung. Sie ist ausgerüstet mit einer Absorptionsfalle, Heizung und weiterem Zubehör, um in möglichst kurzer Zeit ein Vakuum bis ca. $2 \cdot 10^{-4}$ mbar (Leistung der Vakuumpumpe) in der Probenkammer zu erreichen.

Bei einem Kammervolumen von 1,4 l (1400 ml) und einem erreichten Vakuum von $2 \cdot 10^{-4}$ mbar verbleibt in der Kammer ein Luftrest von:

$$\text{VOL}_{\text{Luft}} = \frac{1400 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{1000} = \underline{\underline{2,8 \cdot 10^{-4} \text{ ml}}}$$

Wenn die Fluidprobe in 4000 m Teufe unter ca. 400 bar Druck entnommen wird, kann man die Luftverunreinigung in Volumenprozent des Kammerinhaltes ausdrücken:

$$\text{VOL } \% = \frac{2,8 \cdot 10^{-4} \cdot 100}{400 \cdot 1400} = \underline{\underline{5 \cdot 10^{-8} \%}}$$

Dies ist analytisch vermutlich nicht mehr erfaßbar.

4.1.5 Probentransfer

Solange die gewonnene Probe neben der Gasphase aus einem fließfähigen Medium besteht, bereitet der Probentransfer keine Schwierigkeiten. Da aber auch in Teufen gesampelt wurde, in denen die Dehydril-Spülung durch hochsaline Zuflüsse zum Ausflocken neigte, war ein Transfer allein über die Druckdifferenz nicht mehr möglich. Der plastische, manchmal auch feste Inhalt der Probenkammer, konnte nur durch mechanische Unterstützung, durch Aus-

stoßen gewonnen werden. Insbesondere trat dies bei der Beprobung der Kluft in 3447 m Teufe am 28.10.88 aber auch bei anderen Teufen und zu anderen Zeiten auf.

Die Transferarbeiten werden im Feldlabor ausgeführt. Die Planung für die Hauptbohrung sieht eine Transferanlage in der Dauermeßstation (DMSt) vor.

4.1.6 Einsatz des GEOCOM-Fluidsamplers

Die folgende Tabelle zeigt die Anzahl der Einsätze, die Einsatzteufen und ob die Probe gasdicht gefördert wurde:

Datum	Teufe (m)	Anzahl der Einfahrten	Probe ja	gasdicht nein
04.01.87	178	1	1	-
04.11.87	235	2	2	-
05.11.87	478	4	4	-
04.01.88	582-371	7	6	1
01.02.88	545-585	3	3	-
11.02.88	1230-1295	3	3	-
05.06.88	1933	1	1	-
17.08.88	2164-2833	3	3	-
07.09.88	2833	1	1	-
08.09.88	2163	1	1	-
16.09.88	2327	1	-	1
16.09.88	1927	1	-	1
28.10.88	3446	1	1	-
12.12.88	3446	1	1	-
13.12.88	3567	1	1	-
03.01.89	3736	1	1	-
14.01.89	3645	1	1	-
17.01.89	3817-3445	4	-	4
12.05.89	3984	1	1	-
13.05.89	3930	1	1	-
17.05.89	3993	1	1	-
17.05.89	3976	1	1	-
12.12.89	3202	1	1	-
01.03.90	505-768	6	3	3
06.03.90	2176	1	1	-
12.04.90	1100	1	1	-
12.04.90	1950	1	1	-
12.04.90	2000	1	1	-
12.04.90	2050	1	1	-
		53	43	10

4.2 Durchströmprobennehmer der Firma Salvamoser

Bei Durchströmprobennehmern herkömmlicher Bauart wiegt der Nachteil der Mischprobennahme sehr hoch (Abschnitt 2.1). Wenn, wie in diesem Falle, trotzdem ein solcher Samplertyp beschafft wurde, so nur deshalb, weil das geplante Gerät als wesentlichen Aspekt eine Zwangsdurchströmung der Spülung während der Fahrt und bei Erreichen der Samplerteufe ermöglichen sollte.

4.2.1 Technische Beschreibung des Gerätes

Der Außendurchmesser des Entnahmegerätes beträgt 40 mm.

Das Gerät besteht aus einzelnen Entnahmebehältern, die beliebig aneinandergeschaltet werden können:

Probenbehälter 500 ml: für chem. Analysen, Gesamtgasmengenbestimmung, allg. Gasanalysen, Gewicht 4.5 kg, Länge 820 mm, Prüfdruck 600 bar, Material Edelstahl 1.4541

Probenbehälter 50 ml: für $^3\text{He}/^4\text{He}$ Analysen und andere Edelgasisotope, Gewicht 0.5 kg, Länge 100 mm, Prüfdruck 600 bar, Material Edelstahl 1.4541

(Probenbehälter 20 ml: (Cu-Spirale), Edelgasisotope)

Die Maximaltemperatur ist durch den eingesetzten Motor auf 150°C begrenzt.

Die einzelnen Probenbehälter werden untereinander mit 1/4" Cu-Rohren und Swagelock- bzw. Serto-Verschraubungen geschaltet. Über einen Klammerflansch werden dann die Probenbehälter zu einer mechanisch stabilen Einheit verschraubt. Zur optimalen Probenentnahme werden die Behälter unter "in situ"-Bedingungen zwangs-

durchströmt, über eine Verdrängerpumpe, die am unteren Ende des Entnahmegerätes sitzt. Dadurch werden Entgasungseffekte auf ein Minimum reduziert. Nach mehrmaligem Spülen der Behälter erfolgt der druckdichte Abschluß des Entnahmegerätes durch zwei Konusventile. Der Antrieb der Pumpe und der Ventile erfolgt elektrisch.

Zum Transport werden die Entnahmebehälter mit Abquetschklammern einzeln gasdicht verschlossen und voneinander getrennt. Der Probentransfer kann dann über die 1/4" Cu-Leitung erfolgen. Zur Bestimmung der Gesamtgasmenge bzw. dem Gas/Wasser-Verhältnis sind die 500 ml Probenbehälter direkt an die Gasextraktionsanlage anschließbar.

Bei einem erneuten Einsatz sind die Cu-Leitungen auszutauschen.

Eine Auskleidung der Entnahmebehälter mit Teflon oder anderen Materialien war bislang nicht vorgesehen.

4.2.2 Erfahrungen in der Testphase

Die Testmessungen verliefen nach anfänglichen Schwierigkeiten positiv. Leider konnte das Gerät aufgrund des Vergelungsverhaltens der Spülung nicht weiter in der Pilotbohrung eingesetzt werden. Die Spülung vergelte in den Leitungen und Kammern so schnell, daß die Verdrängerpumpe ohne Wirkung blieb. Aus Kostengründen wurde die Weiterentwicklung zunächst eingestellt.

4.3 Test des LASL-Probennehmers im Hinblick auf den Einsatz in der Hauptbohrung

Als Fortsetzung der Prüfung von Meßmethoden und Meßgeräten für den Einsatz in der Hauptbohrung bot sich am 11.12. und 12.12.1989 die Gelegenheit, einen Hochtemperatur-Fluidsampler in der KTB-Oberpfalz zu testen. Das Gerät, ursprünglich vom Typ Leutert PNL64 wurde im Auftrage der "Los Alamos National Laboratory", Los

Alamos (LASL), New Mexico, vom "Lawrence Berkely Laboratory" für den Einsatz unter extremen Druck- und Temperaturbedingungen modifiziert.

Das Meßprinzip des Durchströmprobennehmers ist dabei erhalten geblieben. Der Fluidsampler wird mit geöffneten Ventilen in die Bohrung eingefahren. Während des Einfahrens strömt Bohrlochflüssigkeit durch das Einlaßventil in die Probenkammer und durch das Auslaßventil wieder in die Bohrung (Abb. 4.2).

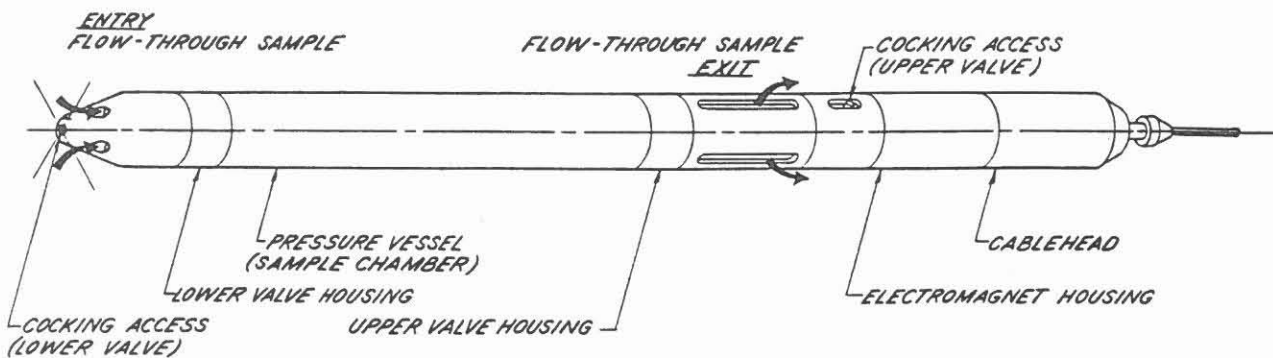


Abb. 4.2: Ansicht des Fluidsamplers mit seinen wichtigsten Komponenten und dem Weg der Flüssigkeit durch den Probennehmer (aus Solban et al. 1986).

Die Ventile werden von einem Elektromagneten offen gehalten. Dessen Energieversorgung erfolgt entweder über das Bohrlochmeßkabel oder über ein Batteriepaket, das in einem eigens entwickelten Dewar-Schutzgehäuse untergebracht ist. Außer der elektrischen ist aber auch eine mechanische Auslösung der Ventildfedern möglich. Dies erfolgt über ein Hochtemperatur-Uhrwerk der Firma Leutert.

Nach Erreichen der Probennahmeteufe wird die Energiezufuhr zum Elektromagneten unterbrochen bzw. durch ein Uhrwerk ein Mechanismus ausgelöst, so daß die Ventile sich mittels Federkraft schließen können. Die eingeschlossene Fluidprobe kann sodann gasdicht zu Tage gezogen werden.

Die folgenden Abbildungen 4.3 und 4.4 zeigen den mechanischen Aufbau und die Ventilanordnungen des LASL-Fluidsamplers (Solban et al. 1986).

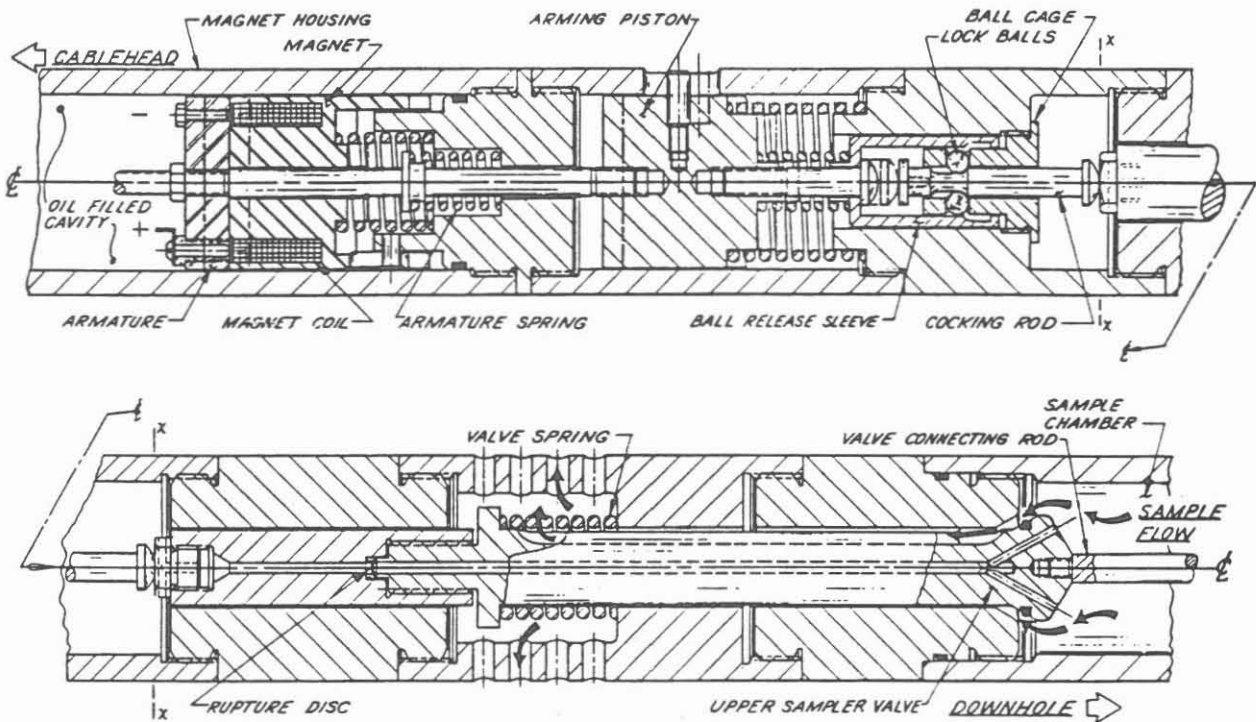


Abb. 4.3: Schnitt durch den elektrisch betriebenen LASL-Fluidsampler. Ventilstellung in geöffneter Position.

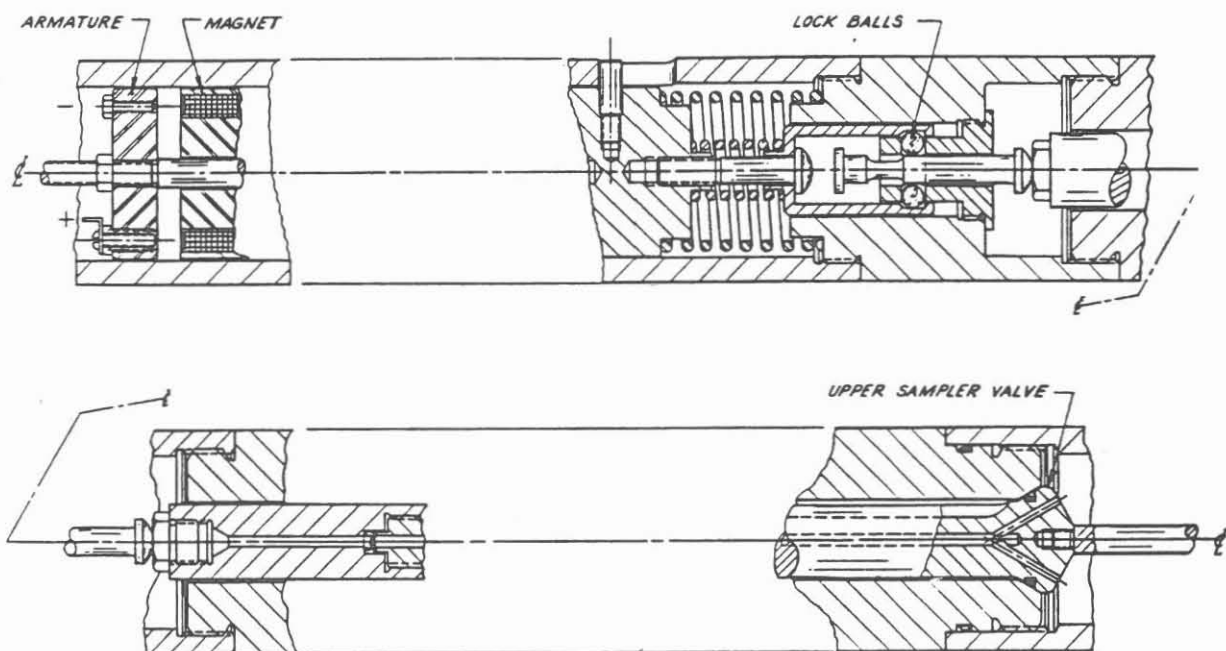


Abb. 4.4: Schnitt durch den elektrisch betriebenen LASL-Fluidsampler. Ventilstellung in geschlossener Position.

4.3.1 Technische Daten

Länge (incl. Kabelkopf)	3050 mm
Durchmesser	58 mm
Kammervolumen	1000 ml
Umgebungsdruck	1380 bar
Umgebungstemperatur	350 °C
Haltestrom für Elektromagnet	40 mA

Eine genaue technische Beschreibung einzelner Komponenten kann folgender Veröffentlichung entnommen werden:

Solban, R., Weres, O., Hansen, L. and Dudak, B. (1986):

Description of a High Temperature Downhole Fluid Sampler. - Geothermal Resources Council, TRANSACTIONS. VOL. 10., California.

Der Fluidsampler wurde in einer Umgebung von 1380 bar und 350°C hydrostatisch getestet. Im Feldeinsatz konnte das Gerät erfolgreich im "Salton Sea Scientific Drilling Project" eingesetzt und eine Probe aus 3109 m zu Tage gefördert werden. Die Temperatur in dieser Teufe betrug ca. 350°C.

4.3.2 Probennahme in der KTB-Oberpfalz VB

Zur Zeit der Testfahrten in der KTB-Vorbohrung war das Bohrloch nur bis zu einer Teufe von 3205 m befahrbar. Die erste Probennahme war daher in einer Teufe von 3203 m vorgesehen. Zum Test kam die mechanische Version mit Uhrwerkauslösung zum Einsatz. Das Gerät wurde mittels eines Adapters an das Meßkabel der DMSt angeschlossen. Die Teufenbestimmung erfolgte nur mit dem Zählwerk. Eine Gamma-Ray Sonde zur Teufenkontrolle konnte aus technischen Gründen nicht mitfahren werden. Der Fluidsampler wurde mit offenen Ventilen bis 3203 m Teufe gefahren, dann die Ventile geschlossen und die eingeschlossene Probe (1000 ml) zu Tage gezogen. Für eine weitere Testfahrt hat man die Teufe 3195 m fest-

gelegt. Die technische Durchführung der Messungen verlief reibungslos. Für einen qualitativen Vergleich war eine Probennahme mit dem KTB-Fluidsampler (GEOCOM-Einströmprobennehmer) aus vergleichbarer Teufe (3203 m) erforderlich.

Die folgende Tabelle zeigt die Analyseergebnisse einiger ausgewählter Ionen- und Gasgehalte. Die Probenbearbeitung erfolgte im Feldlabor durch Heinschild, A., Kamm, H., Lippert, R., Merz, S. und Wittenbecher, M..

Tabelle

Kationen und Anionen in ppm	Probennehmer			Spülung (D-HT 25%)
	LASL 3195 m	LASL 3203 m	GEOCOM 3202 m	
Na	1400	1670	2070	440
Ca	44	46	255	50
K	43	51	79	14
Sr	0.9	0.9	4.3	0.5
Cl	320	390	390	
(Li)	(21)	(17)	(75)	(75)
(Mg)	(810)	(1100)	(3900)	(3420)

Gasanalytik:

N ₂	(%)	77.2	25.1	86.8
O ₂	(%)	20.8	0	0.05
He	(ppm)	15	740	1290
CO ₂	(%)	0.07	4.58	2.50
CH ₄	(ppm)	160	1960	1500
H ₂ O	(%)	0.92	70.04	7.24
Ar	(%)	1.02	0.41	1.70

4.3.3 Bewertung der Analysen nach M. Wittenbecher

Kationen- und Anionenanalytik:

Die aus den Spülungsproben des Los-Alamos-Fluidsamplers gewonnenen Ergebnisse zeigen deutlich erhöhte Werte an Na. Die Li- und Mg-Gehalte lassen auf einen Dehydril-HT-Gehalt (D-HT) von ca. 0.6 - 0.7 Gew-% schließen. Da die Spülung nicht ausgefallen ist, scheiden präparative Fehler durch Abzentrifugieren des D-HT aus. Somit lassen sich die geringen Gehalte der in D-HT enthaltenen Elemente Li und Mg durch eine Verdünnung erklären. Das Li/Mg-Verhältnis entspricht dem des D-HT.

Die Li- und Mg-Gehalte des GEOCOM-Fluidsamplers aus Teufe 3202 m entsprechen einer ca. 2.5 %igen D-HT-Konzentration. Deutliche Anreicherungen an Na, Ca und Sr in dieser Fluidprobe werden von nicht signifikant erhöhten Cl-Gehalten begleitet, die in allen Fluidproben relativ konstant sind. Anreicherungen dieser Größenordnung an den genannten Elementen führten bislang nicht zu der in dieser Probe beobachteten Vergelung.

Gasanalytik:

Die Analyse der entgasten Phase des Los-Alamos-Fluidsamplers aus Teufe 3203 m sowie des GEOCOM-Fluidsamplers aus Teufe 3202 m zeigt eine Anreicherung der Gase He, CH₄, CO₂ und Ar. Dies läßt auf einen Gaszutritt in diesem Teufenbereich schließen. Beide Proben zeichnen sich durch ein ungewöhnlich niedriges Methan- zu Heliumverhältnis aus. Nach der zweiten Einfahrt des Los-Alamos-Fluidsamplers in Teufe 3195 m wurde während der Probenentnahme ein hoher Gasdruck festgestellt. Die spätere Analyse zeigte eine fast luftidentische Zusammensetzung. Das Ergebnis läßt auf durch den Fluidsampler in das Bohrloch eingebrachte Luft schließen.

Diese Analysenergebnisse zeigen deutlich, besonders in der Gasanalyse, wie hoch der Nachteil zu bewerten ist, daß bei einem

Durchströmprobennehmer die Zuordnung der Probenteufe nicht sicher und Mischprobennahme möglich ist.

4.3.4 Zusammenfassung der Testergebnisse

In der technischen Bewertung der Testmessungen mit dem LASL-Fluidprobennehmer gab es keine Beanstandungen, jedoch ist zu bemerken, daß die Umgebungsbedingungen im Bohrloch mit 95°C und ca. 345 bar keine besonderen Anforderungen an die Ausrüstung stellten. Die Messung in der "Salton Sea-Bohrung" ist aber Beweis genug für die Arbeitsfähigkeit auch unter extremen Bedingungen.

Ein wichtiges Testziel war auch, das Verhalten des Gerätes in der Dehydril-Spülung zu studieren. Die Spülung kann auf dem Wege durch den Probennehmer vergelen und somit den Durchstrom verhindern. Bei ausgeflockter Dehydrilspülung im Bereich hochsaliner Zuflüsse kann das Durchströmen sogar unmöglich sein. Erfahrungen bei der Beprobung der Kluft bei 3447 m und auch anderen Teufen sowie die Erfahrungen mit dem Durchströmprobennehmer der Firma Salvamoser haben dies gezeigt. Leider konnte die Tiefe, in der Ausflockungen auftraten, wegen der Dichtstelle bei 3205 m nicht angefahren werden, so daß sich der Test auf normale Dehydril-Spülung und auf einen Zufluß mit geringerem Na-Gehalt beschränken mußte. Wie die Gasanalysen zeigen, ist die erste Probennahme ohne Schwierigkeiten verlaufen, während der zweiten Einfahrt des LASL-Fluidsamplers zur Teufe 3195 m ist vermutlich jedoch eine Verstopfung oder Vergelung im Gerät aufgetreten, sonst hätte eine derartige Komprimierung von Luft nicht auftreten können. Der Vergleich der Analysen mit der GEOCOM-Probe bestätigt die Annahme.

Zusammenfassend kann gesagt werden: Wenn das Risiko einer Mischprobennahme akzeptiert wird, könnte unter der Voraussetzung günstiger Spülungsverhältnisse (kein Ausflocken) aus funktionstechnischer Sicht der Einsatz des LASL-Probennehmers in der Hauptbohrung empfohlen werden. Die größere Sicherheit liegt aber bei

einem Einströmprobennehmer, falls zur Einsatzzeit ein solcher zur Verfügung stünde.

4.3.5 Danksagung

An dieser Stelle sei dem "Los Alamos National Laboratory", insbesondere Herrn Robert Charles, gedankt für die gute Zusammenarbeit und die kostenlose Bereitstellung und den Transfer für Gerätschaft und Personal. Herrn Greg Bayhurst danke ich besonders für die ausgezeichnete technische Information und bereitwillige Unterstützung an der Bohrstelle.

4.4 Testmessung eines Multi-Fluidsamplers (Prototyp) der Firma Schlumberger

Am 01.06. und 02.06.1989 konnte in der Vorbohrung ein Fluidsampler getestet werden, der vom technischen Konzept dem Anforderungskatalog, Abschnitt 4, weitgehendst entspricht.

Das Gerät (siehe Beschreibung 3.2.12) besteht aus einem elektro-/hydraulischen Steuergerät, einer Kartusche für die Einzelprobenkammern und einer Führungskartusche, die der Stabilisation des Gerätes dient. Die Steuerung und Funktionskontrolle des Gerätes erfolgt von Übertage aus. Es können beliebig viele Probenkammern hintereinander montiert und während einer Einfahrt einzeln befüllt werden. Die Begrenzung der Anzahl der Kammern liegt nur in der Einbauhöhe zwischen Turmrolle und Arbeitsbühne. Das Volumen einer Kammer beträgt 300 ml. Die Kammern werden gasdicht zu Tage gefördert und können nach der Demontage des Gerätes einzeln direkt in das Labor oder zu einer beliebigen Transferstelle gebracht werden.

Die Testphase im Bohrloch verlief nach einigen Anfangsschwierigkeiten, die aber im wesentlichen auf Montagefehler zurückzuführen

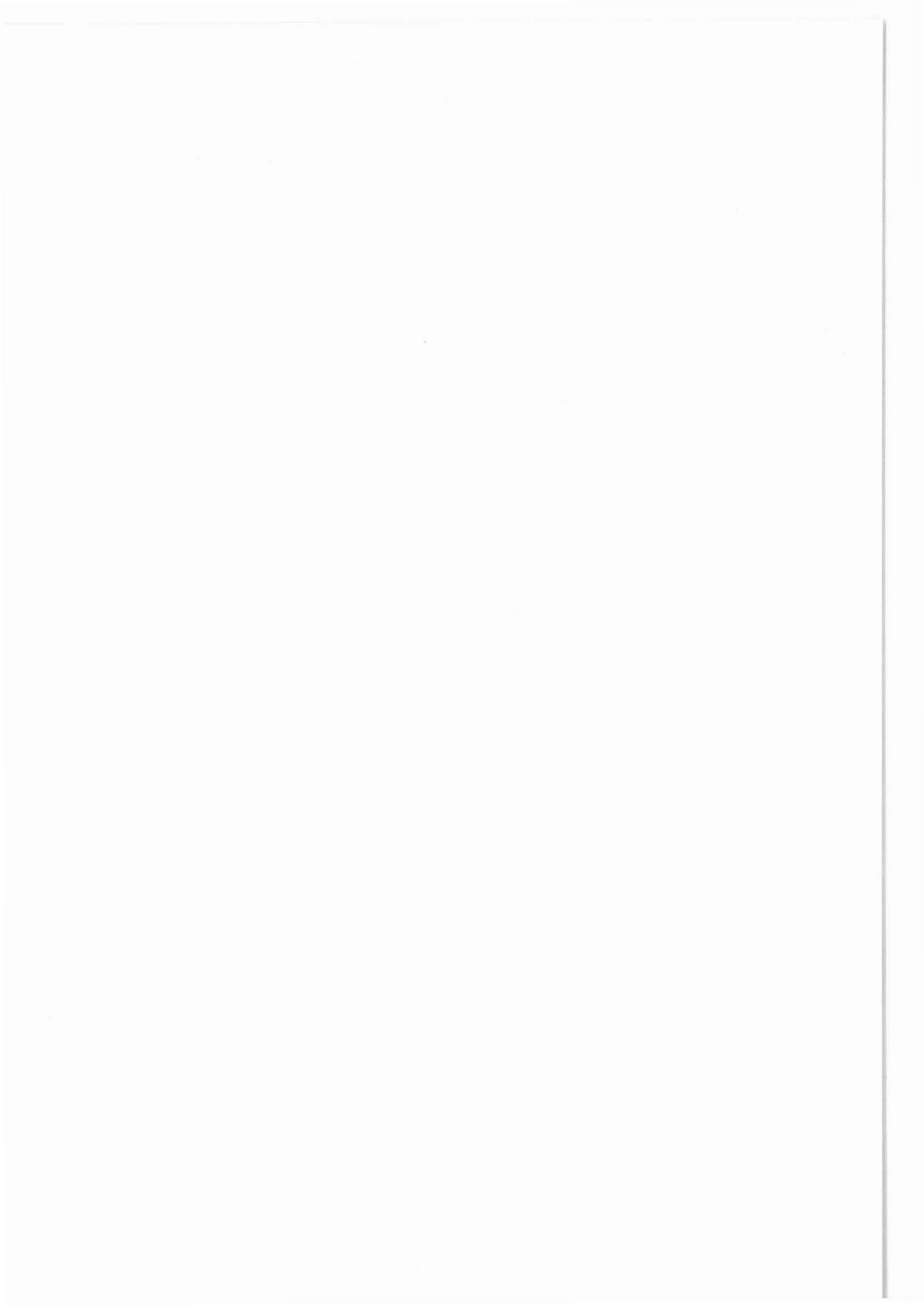
waren, positiv. So konnte am 01.06.89 nur eine Probe aus 3830 m Teufe, am 02.06.89 jedoch neun von zehn eingebauten Probenkammern gefüllt und gasdicht aus folgenden Teufen zu Tage gebracht werden:

3300 m	3600 m	3675 m
3400 m	3625 m	3700 m
3500 m	3650 m	3730 m

Die Einsatzgrenzen liegen bei 150°C und 700 bar Umgebungsbedingungen. Leider stehen uns noch keine weiteren Angaben technischer Art über diesen Prototyp zur Verfügung. Die Firma beabsichtigt aber, für die kommerzielle Nutzung eine entsprechende Publikation darüber zu erstellen.

Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland
Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Außenstelle Windischeschenbach
Postfach 67
8486 Windischeschenbach

Probennahme übertage und in situ



Probenahme übertage und in situ

M. Heinisch

Zusammenfassung

Eines der zentralen wissenschaftlichen Ziele des KTB ist die Erforschung der für den Energie- und Stofftransport in der Erdkruste verantwortlichen Fluide, ihrer Entstehung und ihres Transports. Kontinuierliche Spülungs- und Gasanalytik im Feldlabor während der Vorbohrung ergaben Hinweise auf potentielle Zuflußzonen. Die tiefste dieser Zonen wurde am Ende der Langzeitmeßphase nach Abschluß der Vorbohrung getestet. Dabei konnten 38 m³ Formationsfluide zutage gefördert und für Spezialuntersuchungen beprobt werden.

Summary

One of the essential scientific objectives of the Continental Deep Drilling Programme of the Federal Republic of Germany (KTB) is the investigation of fluids, responsible for the transport of energy and material in the earth's crust as well as their origin and their conveyance. Continuous analysis of drilling mud and dissolved gases carried out in the field laboratory during the drilling of the pilot hole established indications of potentially productive zones. The deepest of these zones was tested at the end of the long time measuring phase after completion of the pilot well. During the production test 38 m³ of fluids could be pumped to the surface and sampled for special analyses.

Anschrift des Autors:

Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Außenstelle Windischeschenbach, Postfach 67, 8486 Windischeschenbach

1. Einleitung

Eines der wissenschaftlichen Ziele des KTB ist die Erforschung der Fluide, ihrer Entstehung und ihres Transports, wobei unter dem Begriff "Fluide" sowohl Flüssigkeiten als auch Gase zu verstehen sind. Sie sind (Abb. 1) für den Energie- und Stofftransport in der Erdkruste verantwortlich, beeinflussen die physikalischen Gesteinseigenschaften und sind an der Bildung von Lagerstätten beteiligt (EMMERMANN, 1986).

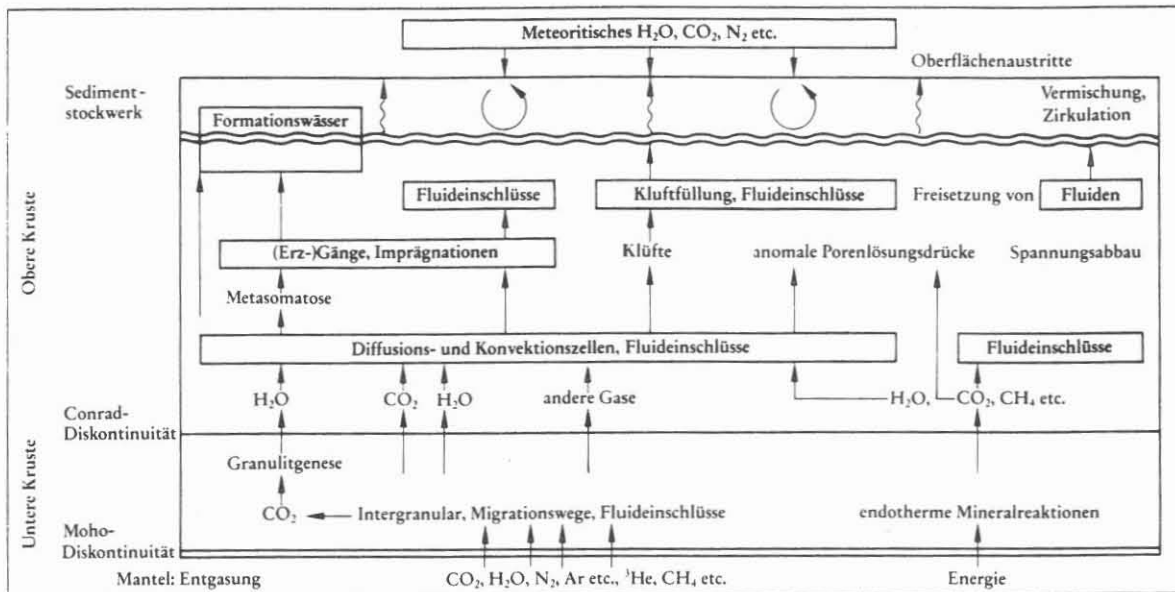


Abb. 1: Fluide und Fluidbewegungen in der kontinentalen Kruste (EMMERMANN, 1986)

Die die KTB Vorbohrung begleitende kontinuierliche Spülungs- und Gasanalytik im Feldlabor hat als eines der unerwarteten Ergebnisse erbracht, daß das Gebirge bis in eine Tiefe von 3200 m nahezu "trocken" war. Erst bei 3447 m, 3817 m (offene Klüfte) und im Bohrlochtiefsten (Störungszone bei 3980 - 4000 m) wurden deutliche saline Zuflüsse und Gaszutritte detektiert.

Ziel des Förder- und Hydrauliktests am Ende der Langzeitmeßphase war es - nach der Verrohrung des Bohrlochs bis 3850 m -, Fluide aus dem untersten Zuflußbereich zu fördern und gleichzeitig Informationen über hydraulische Parameter wie Porosität und Permeabilität zu gewinnen. Auf Ablauf und Ergebnisse dieses und der anderen Hydrauliktests soll hier nicht eingegangen werden.

2. Testablauf

Nach Einbau der Testgarnitur und des Pumpgestänges fand der eigentliche Fördertest in der Zeit von Samstag, dem 07.04.90 um 23 Uhr bis Mittwoch, dem 11.04.90 um 18 Uhr statt (Tab. 1). Während dieser Zeit wurden mittels der im Bohrloch installierten Moineapumpe zunächst der Bohrlochinhalt (Wasser), später zunehmend Zuflüsse aus dem Gebirge gefördert. Die Gesamtfördermenge betrug dabei 71 m³ über 91 h, von denen 38 m³ bis übertage gelangten. Die Förderrate betrug zunächst 14 l/min, fiel jedoch mit steigenden Gasgehalten auf unter 10 l/min ab.

Nach Ausbau von Pumpgestänge und Testgarnitur erfolgte ein erster Einsatz des Fluid Samplers bis 1100 m, der im wesentlichen der Überprüfung der Funktionstüchtigkeit des von der GSF (München) gebauten Überführungsmechanismus für Fluide aus dem Fluid Sampler in Sekundär-Probenbehälter diente.

Die anschließende Kontrollfahrt mit einer CCL-Sonde (Casing Collar Locator) ergab, daß das Bohrloch nach dem Abreißen einer Packermanschette beim ersten Ausbau der Testgarnitur am 06.04.90 (Tab. 1) lediglich bis 2071 m befahrbar war. Es wurde daraufhin beschlossen, das Testprogramm mit drei Einsätzen des Fluid Samplers in den Teufen 1950 m, 2000 m und 2050 m abzuschließen, um die Bohranlage am Freitag, dem 13.04.90 um 15 Uhr freigeben zu können.

3. Probenahme

3.1. Probenahme übertage

Die Probenabnehmer und ihre Forschungsziele sind in Tab. 2 aufgelistet.

3.1.1. Probenahmeinstallation

Der Ermittlung von Meßparametern an den Zuflüssen, ihrer Entgasung und Beprobung diente das übertage installierte System (Abb. 2):

Vom oberen Ende der Testgarnitur, dem Eruptionkopf der Firma Lynes (Celle) auf der Arbeitsbühne der Bohranlage, wurden die Fluide über einen KTB-eigenen Druckschlauch mit 2" ID zunächst einem Durchflußmesser (Lynes) zugeleitet.

Das Leitungssystem hinter dem Durchflußmesser bestand durchweg aus Schläuchen mit 1" ID. Als T-Stücke, Ventile und Kupplungen wurden solche der Firma GEKA verwendet. Die Zuflüsse wurden einerseits der Gasfalle der Firma Geodata (Garbsen) zugeleitet, die das Prozeßgasmassenspektrometer im Feldlabor ständig mit Gas versorgte, andererseits dem Entgaser der GSF (München) zugeführt, wo gegen Ende des Fördertests während des Auftretens größerer Gasmengen Gasproben entnommen und abgefüllt wurden.

Testablaufplan

Ausbau Testgarnitur (23 h)	Fr 06.04.90	00 h - 23 h
Einbau Testgarnitur, Kabeltest (10 h)	Fr 06.04.90 Sa 07.04.90	23 h - 09 h
Packer setzen und PSR, Swabben (3 h)	Sa 07.04.90	09 h - 12 h
Slug Withdrawal, Einbau Pumpgestänge (11 h)	Sa 07.04.90	12 h - 23 h
Open Shut-in Tool, Pumpen Probenahme (91 h)	Sa 07.04.90 Mi 11.04.90	23 h - 18 h
Ende Pumpen und Beprobung	Mi 11.04.90	18 h
Ausbau Pumpgestänge und Test- garnitur (13 h)	Mi 11.04.90 Do 12.04.90	18 h - 7 h
Fluid Sampler-Einsatz (FS-GR-AMS) mit Geocom-Sampler bis 1100 m (2 h)	Do 12.04.90	07 h - 09 h
Einsatz GR/CCL mit 10 m/min (4 h)	Do 12.04.90	09 h - 13 h
Dreimaliger Fluid Sampler-Einsatz (FS-GR-AMS) mit Geocom-Sampler bis 1950 m, 2000 m, 2050 m (9 h)	Do 12.04.90	13 h - 22 h
Umrüstung von Preventer auf Bohr- lochkopf, Freigabe der Anlage (17 h)	Do 12.04.90 Fr 13.04.90	22 h - 15 h

**Tab.1: Testablaufplan für den Fördertest am Ende der Langzeit-
meßphase**

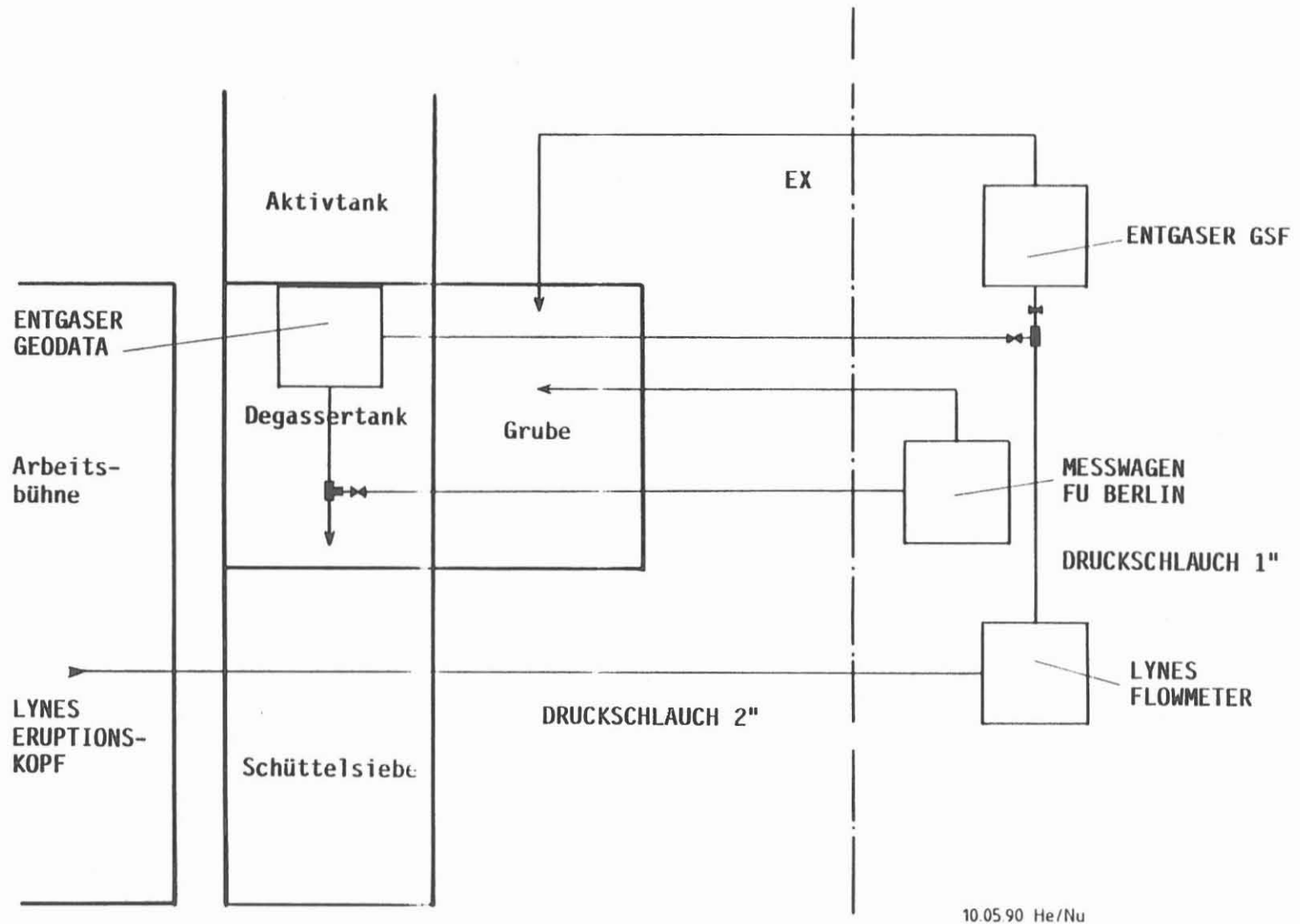


Abb. 2: Probenahmeinstallation zur Gewinnung von Fluiden übertage. Die strichpunktierte Linie markiert die Grenze des Explosionsschutzbereiches (Ex).

Probenabnehmer in		Untersuchung auf
Attenkirchen:	Fa. Hydro- isotop	Rn/Ra-Isotope
Bamberg:	Geochemie	U/Th-Isotope
Berlin:	FU	Hydrochemie
Braunschweig:	GSF	Inhaltsstoffe der Fluide unter in situ P/T-Bedingungen
Gießen:	IGL	Gase, N-Isotope
Hannover:	BGR	Kohlenwasserstoffisotope
Heidelberg:	MPI	Edelgasisotope
Marburg:	Kernchemie	Pu
München:	GSF	Ar, He, ¹³ C, ¹⁴ C, ³⁶ Cl, ² H, ³ H, ¹⁸ O, ³⁴ S
Münster:	Mineralogie	Sr-Isotope
Regensburg:	Mikrobiologie	Bakterien
Windischeschen- bach:	Feldlabor	Gase, Hydrochemie

Tab. 2: Probenabnehmer und deren Forschungsziele

Die Beprobung der geförderten Flüssigkeit erfolgte hinter den beiden Entgasungsvorrichtungen (Fa. Geodata, Garbsen; GSF München).

Die gesamte Anordnung ergab sich aus der Tatsache, daß lediglich die Gasfalle der Firma Geodata den Explosions-schutz-Bestimmungen genügte.

Die Zuflußmessungen wurden dadurch behindert, daß der Durchflußmesser mehrfach durch Farbabrieb des Pumpgestänges verstopft wurde und ausfiel.

3.1.1.1. Gasprobenahme

Gase wurden während der gesamten Testphase mittels der Geodata-Gasfalle den Zuflüssen entzogen und dem Massenspektrometer im Feldlabor eingespeist. Messungen von N₂, CH₄, Ar, O₂ und CO₂ dienten dabei der Trennung von geförderter Spülung (hier Wasser) und Zuflüssen. Proben der gewonnenen Gase wurden seitens des Feldlabors in Gasmäuse von 250 ml Inhalt abgefüllt (Anl. 1).

Mit dem von der GSF entwickelten Flüssigkeitsentgaser wurden am 10.04.90 etwa 320 l (Mitteilung der GSF) Zufluß entgast. Diese Gase wurden mittels Kompressoren in Stahlflaschen verpreßt. Zu Beginn des Fördertests betrug der Gasgehalt ca. 80 l/m³ Sole und stieg später auf bis zu 160 l gemessenen Volumens an. Ab ca. 14 h war eine Angabe der Gasgehalte nicht mehr sinnvoll, da teilweise nur noch Gas anfiel.

Aus den bis 14 h und nach 14 h gewonnenen Gasfraktionen wurden zwei getrennte Probenbehälter von je 5 l Inhalt befüllt, um unterschiedliche Gaszusammensetzungen untersuchen zu können. Parallel dazu wurden zwischen 4 h und 21 h desselben Tages 200 l akkumulierte Gase für Probenabnehmer der GSF gewonnen.

3.1.1.2. Flüssigkeitsprobenahme

Die Beprobung der geförderten Flüssigkeit durch das Feldlabor (1 l) und die FU Berlin (150 ml) erfolgte in Abständen von etwa 2 h hinter der Geodata-Gasfalle. Diese Beprobung wurde gegen Ende des Fördertests verdichtet, die Probenmengen teilweise erhöht (Anl. 2).

Die Flüssigkeitsprobenahme durch die GSF (München) wurde stellvertretend für einen Großteil der Probenabnehmer (Tab. 2) hinter dem GSF-eigenen Entgaser durchgeführt, wobei dieser während der Probenahme stillgelegt war (Anl. 3).

Die Trennung von Wasser und Zuflüssen erfolgte durch ständige Messungen von Leitfähigkeit, R_n , O_2 , pH und Eh an einen dem Meßwagen der FU Berlin zugeführten Flüssigkeitsteilstrom sowie Gasanalysen auf N_2 , CH_4 , Ar, O_2 und CO_2 am Massenspektrometer im Feldlabor (3.1.1.1.). Begleitet wurden diese Messungen durch erste Analysen an Zuflußproben auf Na, Ca, Sr und Cl durch das Feldlaborpersonal.

3.2 Probenahme in situ

Der erste Einsatz des Fluid Samplers (Geocom, Einströmprobennehmer) bis 1100 m diente im wesentlichen der Überprüfung der von der GSF (München) entworfenen und gebauten Überführungsapparatur für Fluide aus dem Fluid Sampler in Sekundär-Probenbehälter. Hierzu wurde das obere Ventil des senkrecht stehenden Fluid Samplers mit einer Neon-Flasche verbunden, deren Druck über dem im Fluid Sampler herrschenden lag. Das untere Ventil wurde über ein evakuiertes Verteilersystem an ebenfalls evakuierte Sekundär-Probenbehälter aus Kupferrohr oder Edelstahl angeschlossen und dann geöffnet; die einzelnen Sekundär-Probenbehälter wurden nacheinander befüllt und gasdicht verschlossen. Ihr Gesamtvolumen betrug 3 l.

Nach dem erfolgreichen Test der Überführungsapparatur wurden Fluidproben von jeweils 3 l aus den Teufen 1950 m, 2000 m und 2050 m genommen und in die Sekundär-Behälter überführt, wobei die Probe aus 2000 m mit einem Sampler genommen wurde, dem die erforderlichen Anschlußmöglichkeiten fehlten und der vom Feldlaborpersonal entleert wurde. Die Probenabnehmer und die Zielsetzungen ihrer Untersuchungen sind in Tab. 2 aufgelistet.

4. Erste Ergebnisse

Neben ersten Untersuchungsergebnissen, die an anderer Stelle dieses Reports zitiert werden, liegt bisher lediglich vom Lehrstuhl für Mikrobiologie der Universität Regensburg die mündliche Mitteilung vor, daß der Befund der am 11.04.90 zwischen 12 und 14 Uhr genommenen 600 ml Flüssigkeitsprobe in Bezug auf Bakterien negativ ist. Die Ergebnisse der in Tab. 2 aufgelisteten Untersuchungen der entsprechenden Institute werden in einem späteren Report veröffentlicht.

Literatur

EMMERMANN, R., 1986: Das deutsche Kontinentale Tiefbohrprogramm, Forschungskonzeption und Zielsetzungen. - Geowiss. in unserer Zeit, 4. Jahrg 1986, Nr. 1, S. 19-33.

Anlage 1: Vom Feldlabor genommene Gasproben

Datum	Zeit	Menge
09.04.90	22.50	250 ml
10.04.90	00.20	250 ml
10.04.90	00.30	250 ml
10.04.90	00.55	250 ml
10.04.90	01.10	250 ml
10.04.90	01.30	250 ml
10.04.90	01.30	250 ml
10.04.90	01.45	250 ml
10.04.90	07.30	250 ml
10.04.90	07.30	250 ml
10.04.90	08.00	250 ml
10.04.90	17.20	250 ml
10.04.90	20.00	250 ml
10.04.90	20.00	250 ml
10.04.90	20.30	250 ml
10.04.90	22.50	250 ml
10.04.90	23.00	250 ml
11.04.90	07.30	250 ml
11.04.90	09.45	250 ml
11.04.90	10.30	250 ml
11.04.90	12.45	250 ml
11.04.90	13.00	250 ml
11.04.90	13.55	250 ml
11.04.90	15.00	250 ml
11.04.90	15.00	250 ml
11.04.90	15.05	250 ml
11.04.90	15.10	250 ml
11.04.90	15.15	250 ml
11.04.90	16.00	250 ml
11.04.90	16.05	250 ml
11.04.90	16.45	250 ml
11.04.90	16.45	250 ml
11.04.90	17.35	250 ml

Anlage 2: Vom Feldlabor und der FU Berlin genommene
Flüssigkeitsproben *

Datum	Zeit	Menge
07.04.90	10.25	1 l
08.04.90	01.05	1 l
08.04.90	03.00	1 l
08.04.90	05.00	1 l
08.04.90	07.00	1 l
08.04.90	09.05	1 l
08.04.90	11.00	1 l
08.04.90	13.00	1 l
08.04.90	15.00	1 l
08.04.90	17.00	1 l
08.04.90	19.00	1 l
08.04.90	21.00	1 l
08.04.90	23.00	1 l
09.04.90	01.00	1 l
09.04.90	03.00	1 l
09.04.90	05.00	1 l
09.04.90	08.00	1 l
09.04.90	11.00	1 l
09.04.90	13.00	1 l
09.04.90	16.15	1 l
09.04.90	18.08	1 l
09.04.90	21.00	1 l
10.04.90	22.00	1 l
10.04.90	00.15	1 l
10.04.90	00.30	5 l
09.04.90	23.30	5 l
10.04.90	01.30	5 l
10.04.90	02.00	1 l
10.04.90	04.10	1 l
10.04.90	07.00	1 l
10.04.90	07.00	1 l
10.04.90	08.30	5 l
10.04.90	09.00	1 l
10.04.90	10.45	1 l
10.04.90	11.30	5 l
10.04.90	13.00	1 l
10.04.90	14.40	5 l
10.04.90	17.00	1 l
10.04.90	19.00	1 l
10.04.90	20.30	5 l
10.04.90	21.15	1 l
10.04.90	23.00	1 l
10.04.90	23.00	5 l
11.04.90	01.00	1 l
11.04.90	03.00	1 l
11.04.90	06.00	1 l
11.04.90	07.30	5 l
11.04.90	08.00	1 l
11.04.90	09.45	5 l
11.04.90	11.00	1 l
11.04.90	11.15	5 l
11.04.90	13.00	5 l
11.04.90	13.30	1 l

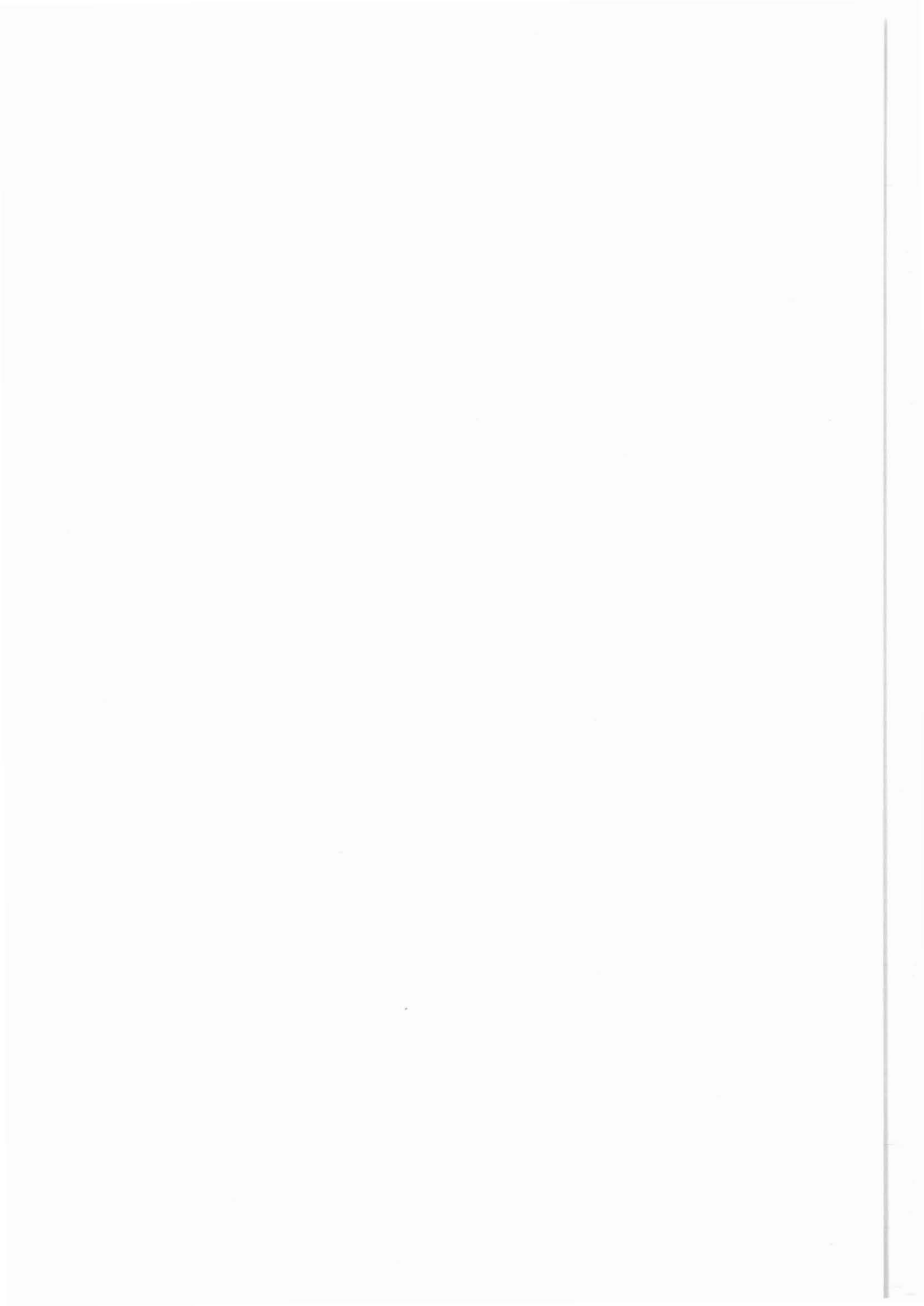
11.04.90	13.50	5 l
11.04.90	14.15	1 l
11.04.90	15.00	1 l
11.04.90	15.00	5 l
11.04.90	15.00	10 l
11.04.90	16.00	1 l
11.04.90	16.00	15 l
11.04.90	17.00	1 l
11.04.90	17.00	5 l
11.04.90	17.20	10 l
11.04.90	17.40	5 l
11.04.90	17.40	30 l
11.04.90	18.00	1 l
11.04.90	18.00	0.5l
11.04.90	18.00	0.5l

* Zu den angegebenen Zeiten wurden jeweils zusätzlich
150 ml für die FU Berlin genommen.

Anlage 3: Von der GSF genommene Flüssigkeitsproben

Datum	Zeit	Menge
08.04.90	01.15	50 l
08.04.90	01.35	50 l
08.04.90	01.50	1 l
08.04.90	02.00	0.5 l
08.04.90	02.00	1 l
08.04.90	02.00	100 ml
08.04.90	02.00	5 l
08.04.90	02.00	5 l
08.04.90	02.00	0.5 l
08.04.90	08.15	1 l
08.04.90	11.10	5 l
08.04.90	11.15	1 l
08.04.90	11.15	100 ml
08.04.90	11.20	0.5 l
08.04.90	13.15	5 l
08.04.90	15.15	5 l
08.04.90	18.00	100 ml
08.04.90	24.00	10 l
09.04.90	11.40	5 l
09.04.90	16.40	5 l
09.04.90	22.10	5 l
10.04.90	09.30	1 l
10.04.90	09.40	1 l
10.04.90	09.45	5 l
10.04.90	10.30	1 l
10.04.90	10.30	100 ml
10.04.90	10.30	50 l
10.04.90	10.35	5 l
10.04.90	10.45	25 l
10.04.90	10.50	50 l
10.04.90	11.00	0.5 l
10.04.90	11.00	0.5 l
10.04.90	11.00	5 l
10.04.90	11.00	0.5 l
10.04.90	13.00	1 l
10.04.90	17.00	1 l
10.04.90	17.10	100 ml
10.04.90	17.15	1 l
10.04.90	17.30	5 l
10.04.90	18.50	5 l
10.04.90	23.00	5 l
10.04.90	23.00	1 l
10.04.90	23.00	1 l
10.04.90	23.00	1 l
10.04.90	23.10	5 l
10.04.90	23.10	25 l
10.04.90	23.10	50 l
10.04.90	23.25	0.5 l
10.04.90	23.25	0.5 l
10.04.90	23.25	0.5 l
10.04.90	23.25	0.5 l
10.04.90	23.30	50 l
10.04.90	23.40	100 ml
11.04.90	01.10	100 ml

11.04.90	01.10	1 l
11.04.90	01.10	1 l
11.04.90	01.20	5 l
11.04.90	03.00	5 l
11.04.90	06.00	5 l
11.04.90	09.10	1 l
11.04.90	11.10	5 l
11.04.90	11.10	1 l
11.04.90	11.10	100 ml
11.04.90	11.15	1 l
11.04.90	11.30	5 l
11.04.90	11.30	20 l
11.04.90	13.30	1 l
11.04.90	13.30	1 l
11.04.90	16.05	50 l
11.04.90	16.25	1 l
11.04.90	16.30	1 l
11.04.90	16.30	50 l
11.04.90	17.00	5 l
11.04.90	17.00	50 l
11.04.90	17.10	5 l
11.04.90	17.20	5 l
11.04.90	17.30	1 l
11.04.90	17.30	5 l
11.04.90	17.40	25 l
11.04.90	18.00	10 l
11.04.90	18.00	50 l
11.04.90	18.00	10 l



Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Projektgruppe KTB
Stilleweg 2
3000 Hannover 51
ITE TU Clausthal
Agricolastr. 10
3392 Clausthal-Zellerfeld

Auswahl hydraulischer Testzonen in der KTB-Oberpfalz VB anhand von Bohrlochmessungen

W. Kessels
G. Pusch



**AUSWAHL HYDRAULISCHER TESTZONEN IN DER KTB-OBERPFALZ VB
ANHAND VON BOHRLOCHMESSUNGEN**

Kessels, W. *, Pusch, G. **

ZUSAMMENFASSUNG

Hydraulische Packerteste gehören zu den technisch anspruchsvollsten und zeitaufwendigsten Bohrlochmessungen, die im Rahmen des KTB-Projektes durchgeführt wurden. Sie sind daher besonders sorgfältig zu planen. Für die Auswahl dieser Bohrlochabschnitte mußte daher eine intensive Auswertung des in der KTB-VB durchgeführten Loggings erfolgen. Die Loginterpretation liefert allerdings nur Indikationen für hydraulisch leitfähige Bereiche und gestattet nur unter bestimmten Voraussetzungen die Abschätzung der hydraulischen Parameter. Um mit einer erhöhten Zuverlässigkeit hydraulisch gut leitfähige Bereiche ermitteln zu können, wurde eine simultane Auswertung mehrerer Logs unterschiedlicher physikalischer Verfahren durchgeführt. In diesem Beitrag werden die Grundlagen des Auswahlverfahrens beschrieben und die ausgewählten Testbereiche vorgestellt.

SUMMARY

Hydraulic packer tests belong to the most technical pretentious and time consuming borehole measurements carried out in the KTB pilot hole. Test intervals were chosen after a comprehensive interpretation of the logging data. The log interpretation can only give an indication of interesting zones. Only under special conditions it is possible to estimate the hydraulic parameters. For a good reliability, the determination of zones with a sufficient hydraulic conductivity was interpreted simultaneously on logs for different physical parameters. In this contribution the fundamentals of the interpretation are described and the selected intervals are shown.

Anschrift der Autoren:

*Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, Projektleitung, Stilleweg 2, 3000 Hannover 51

**ITE TU Clausthal, Agricolastr. 10, 3392 Clausthal-Zellerfeld

1.0 EINLEITUNG

Eine indirekte Bestimmung der hydraulischen Permeabilität mit Hilfe von elektrischen, akustischen und radioaktiven Bohrlochlogs in sedimentären Formationen ist ein Wunsch der meisten Bohrlochmessungen, die in Erdöl- bzw. Erdgasbohrungen durchgeführt werden. Eine Zusammenstellung solcher Verfahren findet sich bei Draxler (1988). Im Kristallin sind viele dieser Standardverfahren allerdings nur begrenzt anwendbar, da hier als hydraulische Wegsamkeiten Kluftleiter gegenüber homogenen permeablen Formationen dominieren. Die Aufgabenstellung besteht hier nicht darin, einen Permeabilitätswert zu ermitteln, der für eine Kluft nicht definiert ist, sondern im Aufspüren von Diskontinuitäten, die möglicherweise als offene Klüfte bzw. offene Kluftsysteme angesprochen werden können. Bei der Auswahl der testwürdigen Zonen in der KTB-VB wurden auch die Ergebnisse des Mudloggings und der Kernuntersuchungen mit berücksichtigt. Dies galt insbesondere für die Durchführung der Drillstem Teste während der Bohrphase. So führte insbesondere ein starker Anstieg des Salz- und Gasgehaltes in der Spülung sowie eine deutlich sichtbare Kluft im Kern zur Durchführung des Drillstem Testes im Teufenbereich bei 3447 m. Auf diese Untersuchungen soll hier nicht näher eingegangen werden. Zusammenfassend ist in Kapitel 3, Tab. 3, eine Auflistung der an den Kernen gefundenen geologischen Besonderheiten für die mit Hilfe des Loggings ausgewählten testwürdigen Zonen von Müller (1989) aufgeführt.

Für die Festlegung der hydraulisch testwürdigen Zonen in der KTB-VB wurde in Zusammenarbeit zwischen der TU Clausthal (Miehe, Pusch; 1989) und der KTB-Projektleitung (Kessels, 1989) eine intensive Logauswertung vorgenommen und der Arbeitsgruppe Geohydraulik als Vorschlag für testwürdige Zonen vorgelegt. Die endgültige Prioritätenfestsetzung der einzelnen Testbereiche erfolgte unter besonderer Berücksichtigung der Ergebnisse der Geothermik-Arbeitsgruppen des NLFb, Hannover

(Jobmann, Schulz; 1989) und der Arbeitsgruppe TU Karlsruhe (Stiefel, Reifenstahl; 1989).

Der nach dieser Festlegung durchgeführte Absenk- und Injektionstest führte dann zu einer weitgehenden Bestätigung der aus dem Logging gefundenen testwürdigen Bereiche und zu einer endgültigen Festlegung der dann durchgeführten hydraulischen Tests. Alle hier dargestellten Bohrlochmessungen sind Ergebnis des vom Referat Bohrlochmessungen der KTB-Projektleitung durchgeführten Logging-Programms.

2.0 Grundlagen

In der KTB-Vorbohrung wurde ein umfangreiches Meßprogramm durchgeführt, mit dem die unterschiedlichsten physikalischen Gesteinsparameter bestimmt wurden. Dabei können insbesondere die Änderungen dieser Gesteinsparameter mit der Teufe relativ genau erfaßt werden, so daß für eine Loginterpretation hinsichtlich offener Klüfte oder klüftiger Bereiche den Bereichen eines Logs besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muß, in denen starke Abweichungen von den Parametern vorliegen, die für die jeweilige Gesteinsformation charakteristisch sind. Erst im zweiten Schritt einer Interpretation werden dann die Absolutwerte der Messungen einbezogen. Praktisch alle Auffälligkeiten eines Logs, die als ein Hinweis auf offene Klüfte oder Klufbereiche gedeutet werden können, sind im einzelnen prinzipiell auch durch Gegebenheiten des Gesteins erklärbar, die nicht an offene Klüfte gekoppelt sind. Die Wahrscheinlichkeit für eine Fehlinterpretation nimmt allerdings ab, wenn man eine Vielzahl von einander unabhängiger physikalischer Parameter durch Bohrlochmessungen bestimmt und dadurch mehrere Hinweise auf hydraulisch leitfähige Klufbereiche erhält.

Ein noch nicht gelöstes Problem stellt bei einer solchen Bewertung die Quantifizierung der Wahrscheinlichkeit dar, mit

der eine hydraulische Indikation vorliegt. Hierzu ist es notwendig, eine normierte Werteskala für die einzelnen Logs zu erstellen und für eine simultane Bewertung aller Logs mit Hilfe von Gewichtsfaktoren die Wertigkeit der verschiedenen gemessenen physikalischen Parameter untereinander hinsichtlich einer Bestimmung offener Klüfte festzulegen. Ein Peak in einer Spülungsleitfähigkeitsmessung ist z. B. ein wesentlich gewichtiger Indikator für eine hydraulisch leitfähige Kluft als ein Peak einer Gamma-Ray-Messung. Treten beide Peaks aber gemeinsam auf, so ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein hydraulisch leitfähiger Bereich vorliegt, höher als bei der Betrachtung eines Einzellogs. Da bisher noch kein allseitig akzeptiertes Bewertungssystem existiert, erfolgte die Gesamtbewertung der Logs für die KTB-VB durch die Arbeitsgruppe Geohydraulik nach subjektiven Gesichtspunkten der einzelnen beteiligten Wissenschaftler. Unstrittig war dabei, daß Anomalien in der Spülungsleitfähigkeitsmessung als die gewichtigsten hydraulischen Indikatoren anzusehen sind.

Im folgenden werden die hydraulisch besonders interessanten Bohrlochmessungen im einzelnen anhand von Beispielen kurz erläutert und es wird mit aufgeführt, welche Gegebenheiten des Gesteins einen hydraulisch interessanten Bereich vortäuschen können (im folgenden nicht hydraulische Indikation genannt).

2.1 Elektrischer Spülungswiderstand

Der Spülungswiderstand wird mit 4 ringförmig an der Außenseite des Auxiliary Measurement Tool (AMS) angebrachten Elektroden in 4-Punktanordnung bestimmt. Diese Sonde wird bei praktisch allen Standardmessungen mitgeführt, so daß eine große Anzahl von Messungen vorliegt.

Ist nun der Formationsdruck (Druck der Fluide im Kluftsystem) höher als der Druck der Spülungssäule und die hydraulische

Leitfähigkeit des Kluftsystemes bzw. die Permeabilität eines homogenen hydraulischen Leiters so groß, daß ein nennenswerter Zufluß in die Spülung vorliegt, so kann dieser im allgemeinen durch die Bestimmung des Spülungswiderstandes bzw. der Spülungsleitfähigkeit beobachtet werden. Voraussetzung hierfür ist, daß die Formationsflüssigkeit und die Spülung einen unterschiedlichen Elektrolytgehalt und damit eine unterschiedliche Spülungsleitfähigkeit besitzen.

Um einen Zutritt der Formationsflüssigkeit während des Bohrbetriebes zu erzeugen, ist es nicht unbedingt notwendig, daß der Formationsdruck höher als der statische Druck der Spülungssäule ist, da beim Ziehen des Gestänges durch Kolbenwirkung ein Unterdruck erzeugt wird, der einen Zufluß aus der Formation verursachen kann. Die in der KTB-VB benutzte Spülung mit dem Zusatz Dehydrill-HT weist allerdings eine sehr komplizierte Rheologie auf. So ist eine genauere Berechnung der beim Ziehen des Gestänges auftretenden Surge-Swapp-Drucke in der Spülung sehr schwierig. Eine Berechnung der unteren Grenze des Reservoirdruckes an den Stellen der Vorbohrung, in denen Zutritte von Formationsflüssigkeiten festgestellt wurden, war also nicht möglich.

Während des Bohrens herrscht in der Bohrung durch die Spülungszirkulation ein erhöhter Spülungsdruck, der in der KTB-Vorbohrung bis zu 100 bar betrug. Hierdurch kann in ein Kluftsystem eine Spülungsinvasion erfolgen, wenn der Formationsdruck kleiner als der dynamische Spülungsdruck während der Bohrarbeiten ist, so daß beim Ziehen des Gestänges nur Formationsflüssigkeit in die Bohrung zurückgefördert wird. In diesem Fall ist keine deutliche Leitfähigkeitsanomalie im Kluftbereich zu erwarten. Hier hat sich allerdings die in der KTB-Vorbohrung eingesetzte Spülung als sehr positiv erwiesen, da sie in der Lage ist, durch ihre hohe Tixotropie Kluftbereiche hydraulisch zu isolieren. Bei der Injektion der Spülung in einen Kluftbereich sind so sehr viel größere hydraulische

Widerstände zu überwinden sind als bei der Entnahme von Formationsflüssigkeit. Ein Vergleich der hydraulischen Widerstände, die beim Absenkttest gewonnen wurden, mit denen des Injektionstestes zeigt dies deutlich.

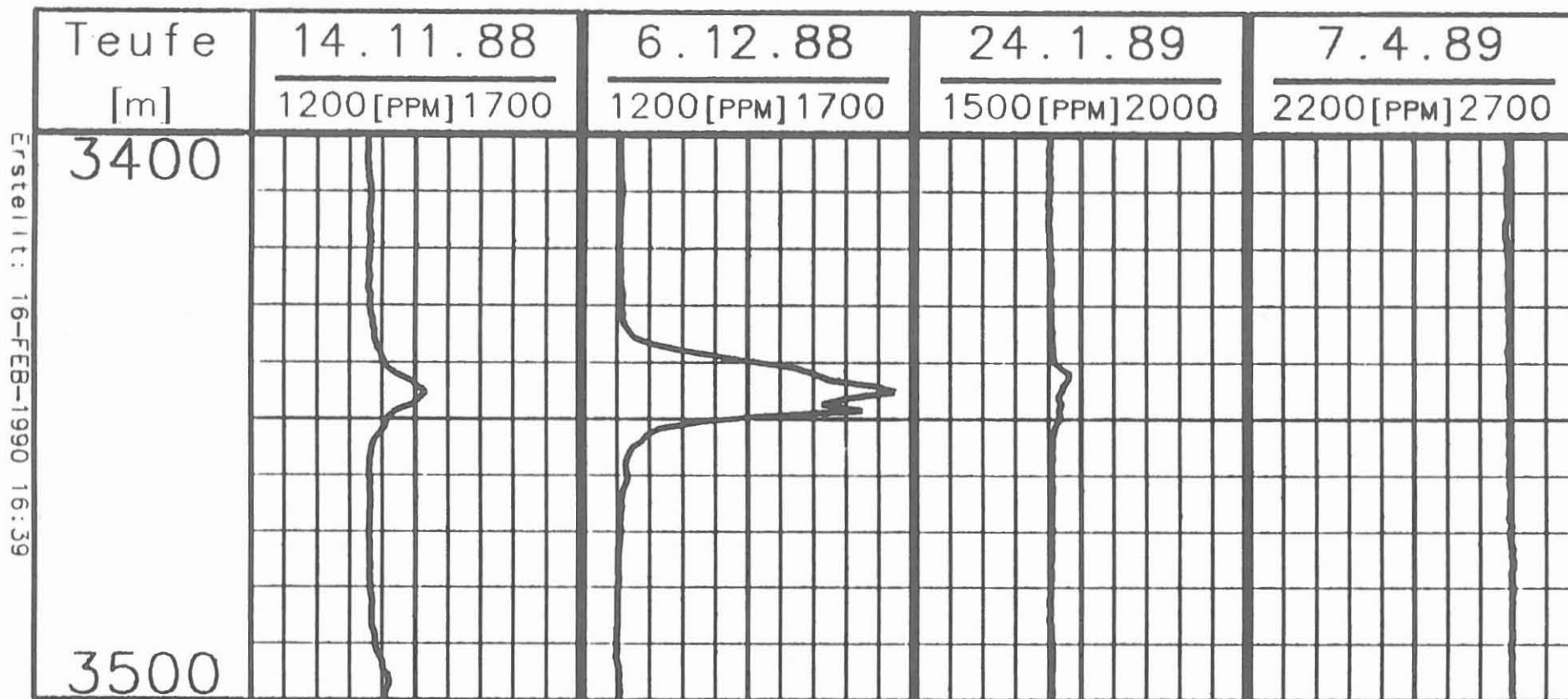
Um eine bessere Bewertung der Spülungswiderstandsmessungen vornehmen zu können, wurde der Spülungswiderstand in eine NaCl-Äquivalentkonzentration umgerechnet. Dies ist der NaCl-Gehalt, den eine wässrige Lösung haben muß, um den gemessenen spezifischen Widerstand nur mit NaCl als Elektrolyt zu produzieren. Durch diese Umrechnung wird der Temperaturabhängigkeit des Spülungswiderstandes weitgehend eliminiert und eine anschaulichere Bewertung ermöglicht.

In Abb. 1 sind mehrere solcher Logs für den Klufbereich bei 3447 m dargestellt. Man sieht hier, daß nach dem Durchteufen eine deutliche Zuflußanzeige auftrat, die nach ca. 2 Monaten Bohrtätigkeit zum Erliegen kam. Dies weist darauf hin, daß die Kluft bzw. der Klufbereich hydraulisch isoliert ist oder nur eine wenig produktive Verbindung zu weiter entfernten Reservoiren besitzt. Eine Untersuchung des Kernmaterials aus diesem Teufenbereich zeigte, daß chemische Umwandlungen oder stark lösliche Minerale in diesem Teufenbereich keine Ursache für die gefundenen Anomalien in der NaCl-Äquivalentkonzentration sein können.

Eine Durchsicht aller während der Bohrphase durchgeführten Spülungswiderstandslogs ergab die in Tab. 1 aufgeführten Indikationen für hydraulisch leitfähige Bereiche.

2.2. Temperaturmessungen

Da ein Flüssigkeits- und Gastransport im allgemeinen auch mit einem Wärmetransport verbunden ist, eignen sich Temperaturmessungen besonders gut zur Feststellung hydraulisch leitfähiger



Erstellt: 16-FEB-1990 16:39

Abb. 1
Spülungswiderstandsmessungen umgerechnet in NACL-Äquivalent-
konzentration

Tabelle 1

Zuflußanzeigen ermittelt durch Bestimmung des elektrischen Spülungswiderstandes

In Klammern ist eine subjektive Bewertung der Zuflußanzeige angegeben:

- (0) - kaum wahrnehmbare Anzeige u. U. technisch bedingt
- (1) - schwache Anzeige
- (2) - deutliche Anzeige
- (3) - starke Anzeige
- (-1) - negative Ziffern bedeuten Verringerung der Salzkonzentration

Teufe	Zeitpunkte der Beobachtung					
500 - 550	17.01.1988 (2)	07.02.1988 (-3)	08.03.1988 (+0)	22.04.1988 (+0)	08.05.1988 (+0)	
	21.01.1988 (-3)	15.02.1988 (+0)	18.03.1988 (+0)	29.04.1988 (+0)		
	23.01.1988 (-1)	27.02.1988 (+0)	26.03.1988 (+1)			
600 - 650	22.04.1988 (-1)					
750 - 800	29.04.1988 (+0)	01.06.1988 (+0)				
950 - 1 000	17.01.1988 (-1)/1					
1 050 - 1 100	21.01.1988 (-0)	15.02.1988 (-1)	08.03.1988 (-1)	01.06.1988 (0)		03.04.1989 (1)
	23.01.1988 (-0)	07.02.1988 (-0)	18.03.1988 (-0)			
		15.02.1988 (-1)	26.03.1988 (-1)			
		27.02.1988 (-1)				
1 350 - 1 400	07.04.1989 (1)					
1 601 - 1 650	07.04.1989 (1)					
1 500 - 1 550	29.04.1988 (-0)					
1 650 - 1 700	08.05.1988 (+1)	01.06.1988 (1)	04.06.1988 (1)			
2 000 - 2 050	30.05.1988 (0)					
2 150 - 2 200	01.06.1988 (1)	03.03.1989 (1)				
2 950 - 3 000	06.09.1988 (1)	11.10.1988 (1)	07.11.1988 (1)	24.01.1989 (0)		
	15.09.1988 (1)					
3 000 - 3 050	24.01.1989 (0)					
3 100 - 3 150	04.10.1988 (1)					
	11.10.1988 (1)					
3 150 - 3 200	24.01.1989 (0)					
3 200 - 3 250	04.10.1988 (1 + 1)	06.12.1988 (1)	23.01.1989 (1)			
	11.10.1988 (1)	07.12.1988 (1)				
3 300 - 3 350	11.10.1988 (1)	07.11.1988 (0)				
3 350 - 3 400	24.01.1989 (0)					
3 400 - 3 450	14.11.1988 (1)	06.12.1988 (2)	23.01.1989 (2)	24.01.1989 (0)		
		07.12.1988 (2)	23.01.1989 (2)			
3 450 - 3 500	14.11.1988 (1)					
3 550 - 3 600	06.12.1988 (1)	03.01.1989 (1)	24.01.1989 (0)			
	07.12.1988 (1)	23.01.1989 (1)				
3 600 - 3 650	24.01.1988 (0)					
3 700 - 3 750	02.01.1989 (2)					
	03.01.1989 (2)					
	24.01.1989 (3)					
3 800 - 3 850	24.01.1989 (1)					
3 950 - 4 000	07.04.1989 (2)					

Bereiche. Durch die Spülungszirkulation wird im unteren Teil der Bohrung eine Auskühlung des Gesteines und im oberen Teil eine Erwärmung erzeugt. Diese Störung des natürlichen Temperaturfeldes ist nun um so größer, je stärker der Wärmeaustausch mit dem Gebirge ist. Erfolgt durch den erhöhten Spülungsdruck während der Bohrtätigkeit eine Invasion der Spülung in die Klüfte, so wird hierbei auch Wärmeenergie in das Gestein transportiert und wesentlich großräumiger verteilt, als dies durch reine Wärmeleitung möglich ist. Hierdurch erfolgt dann in diesen Zonen der Wiederangleich der Temperatur an die ursprüngliche Gebirgstemperatur wesentlich langsamer, so daß sie durch negative Temperaturpeaks im Auskühlungsbereich charakterisiert werden können. Allerdings erfolgt auch in Auskesselungsbereichen ein verstärkter Wärmeeintrag in das Gebirge. So ist hier eine Bestimmung der hydraulisch verursachten Auskühlung besonders schwierig, da Bereiche mit Auskesselungen im Kristallin meist auch als Bereiche mit guter hydraulischer Leitfähigkeit angesehen werden können (siehe Abschnitt 2.6).

Neben den Temperaturanomalien, die durch eine erhöhte Auskühlung während der Spülungszirkulation verursacht werden, erzeugen selbstverständlich auch direkte Zuflüsse in die Spülung Temperaturstörungen. Besonders während des Absenk- und Injektionstestes konnten entsprechende Zuflüsse beobachtet werden. Mehrere Berichte in diesem KTB-Report liefern Beispiele von entsprechenden Temperatúrauswertungen (Stiefel u. Reifenstahl, 1990; Jobmann et. al, 1990; Kessels et. al, 1990).

2.3 Die Bestimmung der elektrischen Gesteinsleitfähigkeit

Zur Bestimmung der elektrischen Gesteinsleitfähigkeit wurde in der KTB-Vorbohrung sowohl das Laterolog als auch das Inductionlog gefahren.

Da die meisten Mineralien Nichtleiter sind, kann der elek-

trische Strom nur durch die mit Elektrolyt gefüllten Porenräume in das Gestein eindringen. Hieraus folgt, daß Leitfähigkeitsmessungen geeignet sind, hydraulische Wegsamkeiten zu detektieren. Für eine Kluftbestimmung sind besonders stark fokussierte Messungen von Bedeutung, da Leitfähigkeitsunterschiede räumlich gut aufgelöst werden. Laterolog und das MFSL-Log erfüllen diese Anforderung. Von Bedeutung ist ein Vergleich der Messungen, da sie mit verschiedenen Eindringtiefen durchgeführt werden. Die kleinste Eindringtiefe der genannten Messung besitzt das MSFL. Mit dem Laterolog wird eine Messung mit größerer Eindringtiefe (LLD) und eine mit kleinerer Eindringtiefe (LLS) durchgeführt.

Als nicht hydraulische Indikation zeigen metallische Mineralien, Graphit oder Klüfte mit Tonfüllungen eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit an, ohne daß eine hydraulische Wegsamkeit vorliegen muß.

In Abb. 2 sind für die Kluftbereiche bei einer Bohrmeister-
teufe von 3447 m die entsprechenden Logs aufgeführt. In der Kluftteufe liegt eine deutliche hydraulische Indikation vor. Die Messungen mit geringer Eindringtiefe zeigen höhere Leitfähigkeit an als die Messungen mit großer Eindringtiefe. Dies spricht für den Nachweis offener Klüfte, kann aber auch durch Auflockerung im Bohrlochnahbereich erklärt werden. Die Spülungsleitfähigkeit ist wesentlich größer als die Formationsleitfähigkeit. Wäre dies nicht der Fall, könnte auf Graphit oder metallische Einlagerungen geschlossen werden. Der umgekehrte Schluß ist allerdings nicht möglich.

Die in Abb. 2 dargestellten Logs verdeutlichen weiter, daß selbst in diesem Teufenabschnitt von 100 m sehr viele Zonen erhöhter Leitfähigkeit vorhanden sind, obwohl in dem vollständig gekernten Bereich nur eine offene Kluft bei 3447 m festgestellt wurde. Hier wird deutlich, daß nur durch die Bewertung einer Vielzahl von Logs eine einigermaßen sichere hydraulische Bewertung möglich war.

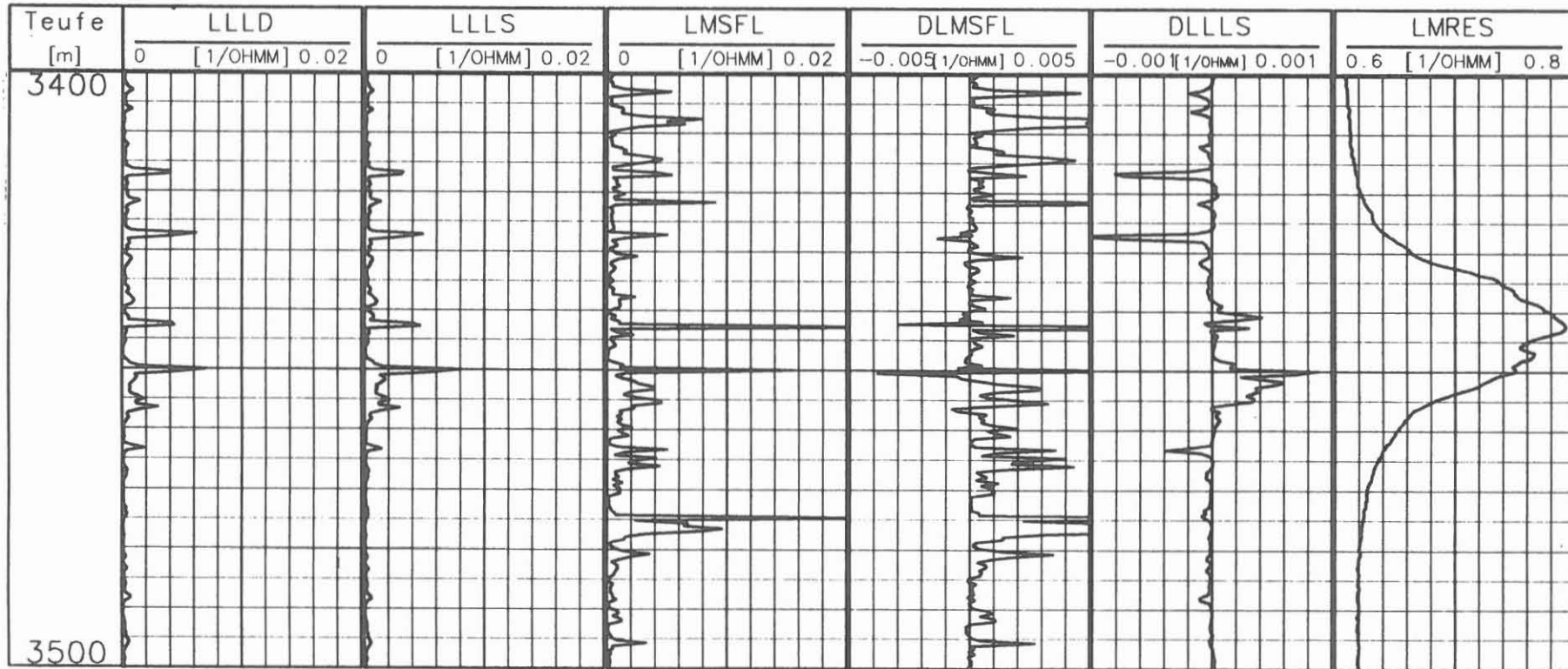


Abb. 2

Ergebnisse der Laterolog und MSFL-Messung im Kluftbereich um 3447 m (in 1/OHMM). In der Abb. ist neben den gemessenen Leitfähigkeiten die Differenz zwischen MSFL und LLS (DLMSFL) und die Differenz zwischen LLS und LLD dargestellt. In der sechsten Spalte ist die Spülungsleitfähigkeit aufgezeichnet.

2.4 Akustische Messungen

Eine Beschreibung der in der KTB-Vorbohrung eingesetzten akustischen Bohrlochmeßgeräte findet sich bei Draxler und Hänel (1987). Auf eine Beschreibung der Geräte wird daher hier verzichtet.

Offene Klüfte stellen wirksame akustische Diskontinuitäten dar. Die Kluft wirkt auf das akustische Signal durch

- Dämpfung und
- Mode Konversionen zwischen Kompressions- (P), Scher- (S) und Stoneleywellen (St).

Die Dämpfung der drei Wellentypen (P, S, St) ist sehr stark abhängig von der Neigung einer Kluft, der Kluftweite und der Anzahl der Kluftauflagepunkte. Eine horizontale, flüssigkeitsgefüllte Kluft ohne Auflagepunkte dämpft z. B. die S-Wellen wesentlich stärker als die P- und St-Wellen. Eine Beschreibung der Kluftbestimmung, insbesondere für Stoneleywellen, findet sich bei Hänel (1989).

Mode Konversionen zeigen sich besonders deutlich in der Variabel Density Darstellung (VDL) einer Sonicmessung durch linear geneigte Strukturen im Wellenfeld. Die Winkel der Neigungen lassen sich relativ einfach aus den V_p -, V_s - und V_{St} -Geschwindigkeiten berechnen. Die Energie der konvertierten Welle hängt stark von den Kluftgegebenheiten ab. In Abb. 3 sind alle möglichen Konversionen erster Ordnung aufgezeichnet. Die Neigung der gemessenen Reflexe ist für die gleiche Konversion davon abhängig, ob die Kluft sich zwischen Sender und Empfänger oder oberhalb bzw. unterhalb befindet.

Der mittlere Bereich verschwindet z. B. bei der Echologmessung, wo Sender und Empfänger in einer Tiefe installiert sind. Alle direkt vom Sender zum Empfänger laufenden akustischen Signale werden bei dieser Anordnung nicht mitregistriert son-

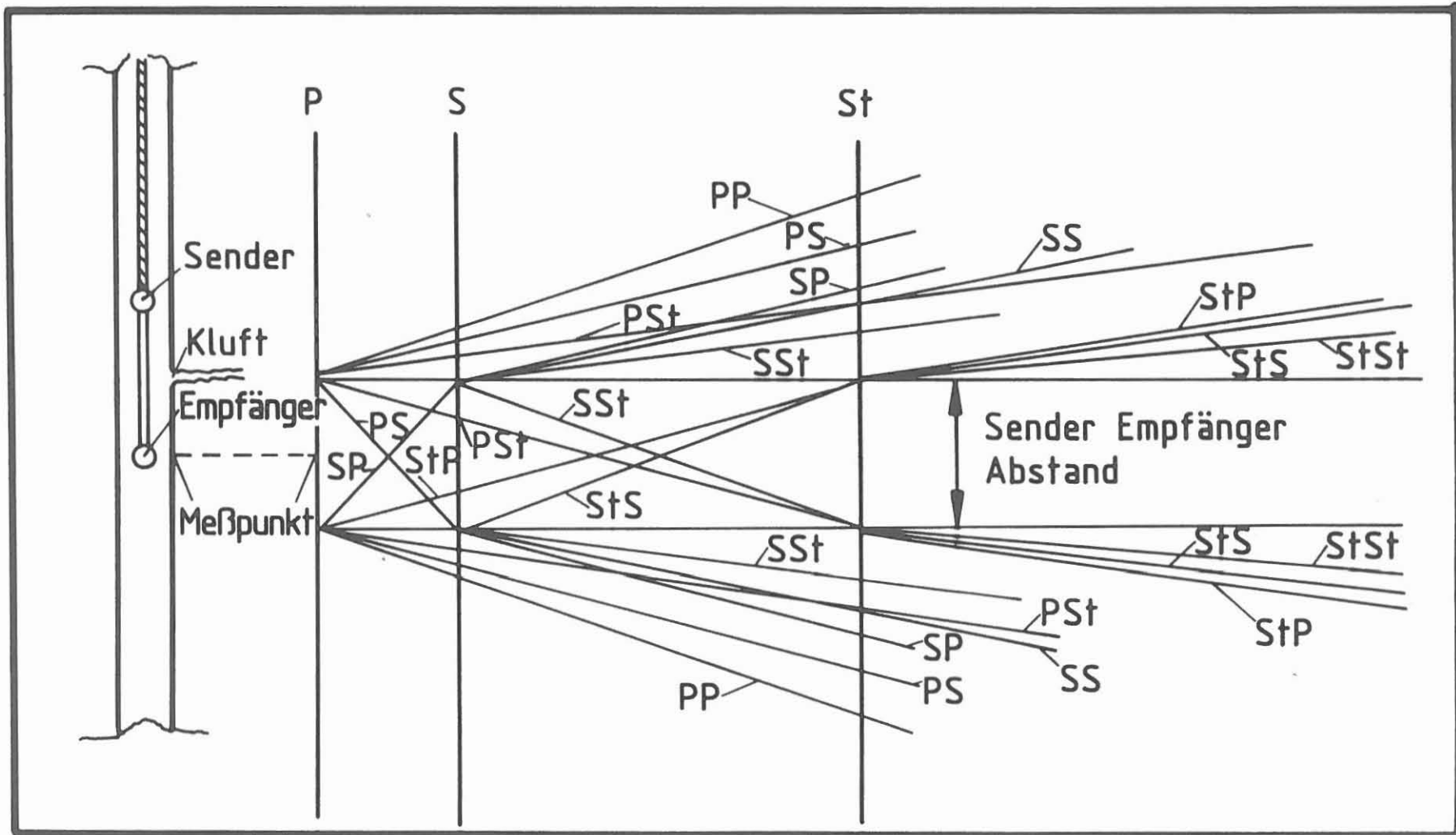


Abb. 3

Mögliche Mode Konversionen im Soniclog für die Geschwindigkeit
 $V_P = 5750 \text{ m /sek}$, $V_S = 3450 \text{ m/sek}$, und $V_{St} = 1570 \text{ m/sek}$.
 Die Geschwindigkeiten entsprechen den mittleren Geschwindig-
 keiten im Kluftbereich bei 3447 m.

dern das Ziel ist, die Stoneleywellenreflektionen aufzuzeichnen. In Abb. 4 ist als Beispiel eine Aufzeichnung für den Kluftbereich bei 3447 m Teufe aufgeführt. In Abb. 5 ist für den gleichen Bohrlochabschnitt eine SDT Sonicmessung aufgezeichnet.

Bei der Interpretation von Sonicmessungen hinsichtlich offener Kluftsysteme ist allerdings zu beachten, daß Wellenkonversion und Absorption auch an solchen Diskontinuitäten stattfinden, die nicht als hydraulisch wirksam anzusprechen sind. Kalibriererweiterungen wirken dabei insbesondere für die Stoneleywellen als Reflektoren.

Im Kluftbereich liegt hier ein StSt-Reflex und eine deutliche Absorption sowohl der P- als auch der S-Welle vor. PS- und SP-Konversionen sind ebenfalls erkennbar. Da in diesem Teufenbereich keine nennenswerten Auskesselungen vorliegen, kann auf einen hydraulisch leitfähigen Bereich bei 3450 m geschlossen werden.

2.5 Imagemessungen

FMS- und BHTV-Messungen ermöglichen die Wiedergabe eines hochaufgelösten Abbildes der Bohrlochwand. Die FMS-Messung spiegelt Leitfähigkeitskontraste des Gesteins wieder, die BHTV-Messung Unterschiede in der akustischen Reflektivität des Gesteins. Eine Erläuterung des BHTV-Meßprinzips findet sich bei Schepers und Menger (1988), eine Beschreibung der FMS-Messung bei Hänel und Draxler (1988). Für die Auswahl hydraulisch testwürdiger Zonen in der KTB-Vorbohrung konnten beide Messungen nur qualitativ hinsichtlich ihrer strukturellen Vielfalt bewertet werden. Ein besonders markantes Beispiel ist der unterste Bohrlochabschnitt, der durch die nachfolgenden hydraulischen Tests auch als der hydraulisch produktivste Bereich der KTB-Vorbohrung bestimmt wurde.

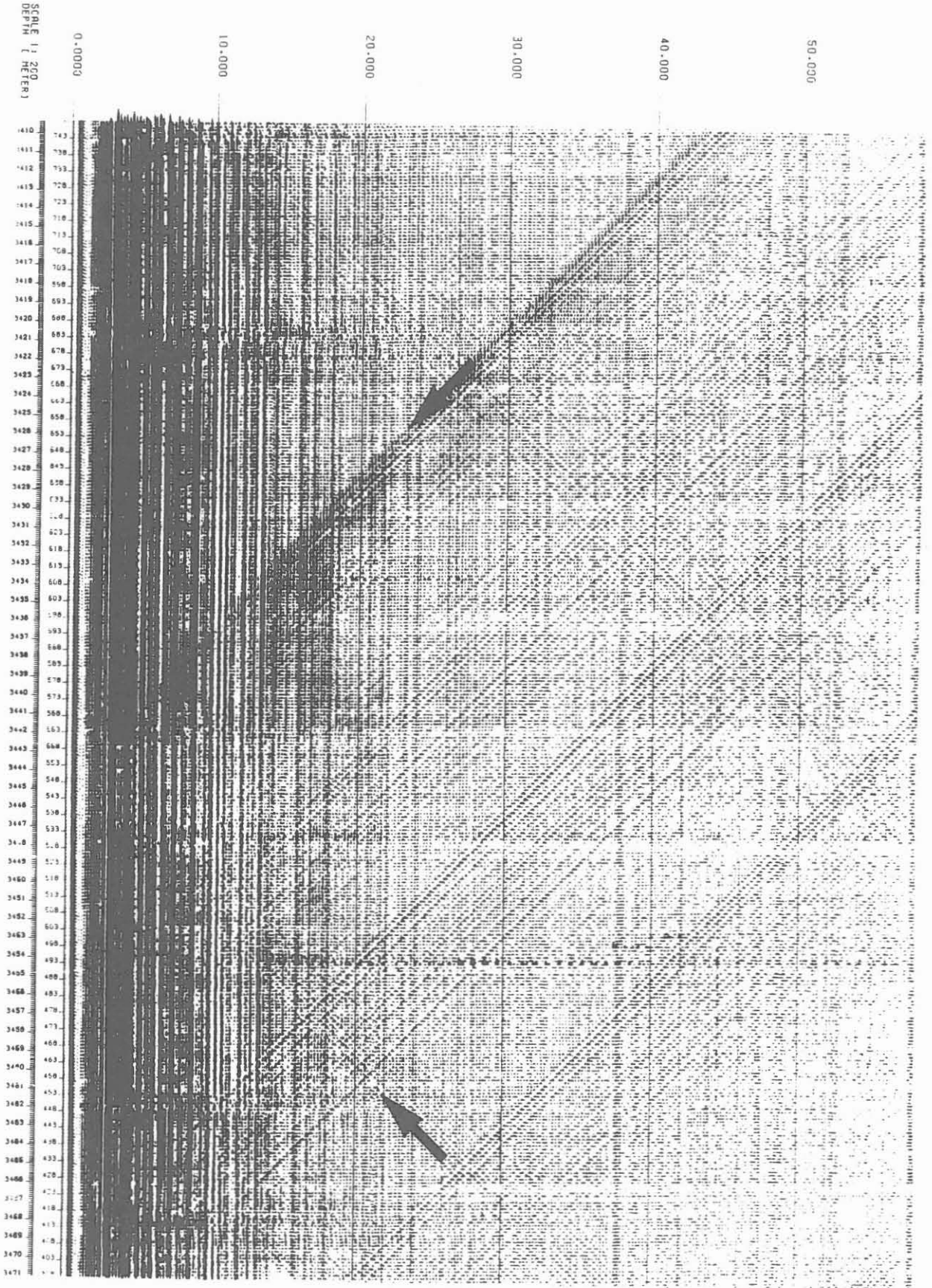


Abb. 4

Aufzeichnung einer Echologmessung im Tiefenbereich von 3447 m

KTB-VB 1a

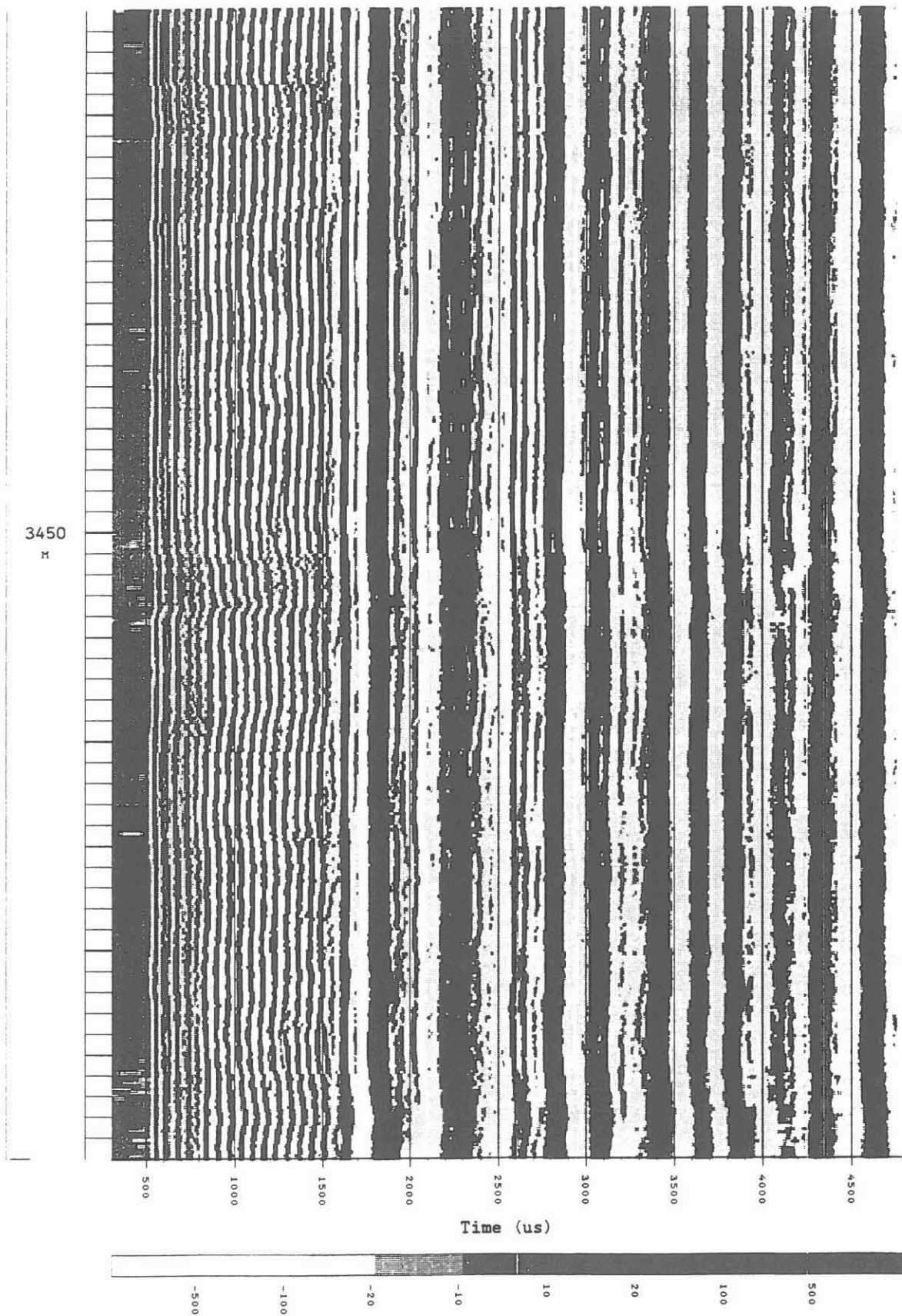


Abb. 5

VLD-Darstellung einer Sonicmessung im Kluftbereich um 3447 m (Spacing, 3 m)

In Abb. 6 ist die FMS-Messung des untersten Bohrlochabschnittes dargestellt. Gut erkennbar ist hier, daß unter 3993 m eine deutlich andere Struktur des Gesteins als im darüberliegenden bestimmt wurde. Solche drastischen Änderungen in der Struktur sind potentiell als Bereiche anzusprechen, in denen aufgrund eines mechanisch unterschiedlichen Verhaltens bei tektonischen Verschiebungen Kluftsysteme leicht entstehen können. Der große Informationsgehalt sowohl der FMS- als auch der BHTV-Messung harrt allerdings noch einer quantitativen hydraulischen Interpretation. Dies erfordert insbesondere eine gekoppelte Auswertung von FMS- und BHTV-Messungen, da beide Meßverfahren unterschiedliche physikalische Parameter des Gesteins ansprechen. Hierzu ist es aber erforderlich, Strukturen beider Messungen einzeln zuzuordnen und zu versuchen, auch eine entsprechende Zuordnung zu den gefundenen Strukturen am Kernmaterial vorzunehmen. Erste Ansätze einer solchen Strukturzuordnung sind z. B. mit dem Programm Creos im Rahmen des KTB-Projektes durchgeführt worden (Kück u. Kessels, 1990).

Für zukünftige Interpretationen hinsichtlich hydraulisch interessanter Bohrlochabschnitte kommt einer kombinierten Interpretation beider Messungen sicher sehr hohe Bedeutung zu.

2.6 Kalibermessung

Klüftige Bereiche des Gebirges weisen meist eine geringere mechanische Festigkeit auf als solche, in denen die Kluftdichte geringer ist. Abschnitte mit Bohrlochinstabilitäten sind daher grundsätzlich als Bereiche anzusprechen, in denen das Vorhandensein einer erhöhten hydraulischen Leitfähigkeit wahrscheinlicher ist als in solchen mit niedriger Klufthäufigkeit. Außerdem wird das Gestein beim Vorliegen hydraulischer Wegsamkeiten durch die Spülungsdruckschwankungen, die während der Bohrtätigkeit auftreten, hydraulisch belastet (Kessels, 1989). In der KTB-Vorbohrung wurde dies besonders

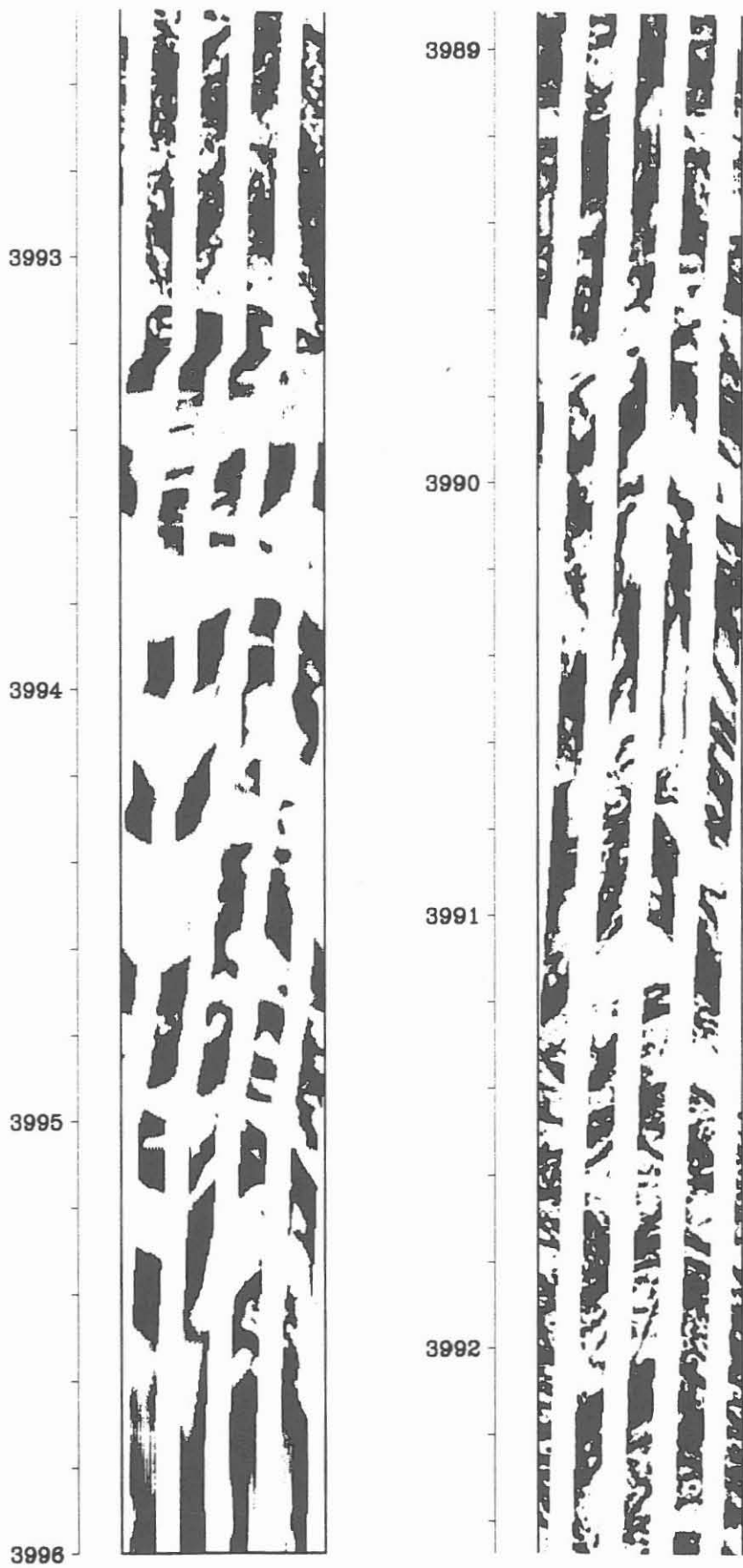


Abb. 6

Ergebnis der FMS-Messung im untersten Abschnitt der KTB-Vorbohrung

deutlich im Bohrlochabschnitt von 500 m bis 600 m Teufe. Hier lagen die größten Auskesselungen vor, und durch die nachfolgenden hydraulischen Messungen zeigte sich, daß dieser Abschnitt nach dem Zuflußbereich im Bohrlochtiefsten der zweitproduktivste Bohrlochabschnitt war. Wie für viele andere Messungen gilt allerdings auch hier, daß Bohrlochinstabilitäten selbstverständlich auch in Bohrlochbereichen auftreten können, in denen nur eine mechanische Schwächezone vorliegt, die z. B. durch eine große Häufigkeit verheilter Klüfte oder durch Klüfte mit einem hohen Tongehalt (im Kristallin allerdings unwahrscheinlich) hervorgerufen wird, aber trotzdem hydraulisch weitgehend dicht sind.

2.7 Kerntechnische Messungen

Bestimmte chemische Elemente, die sich während des Transportes in Kluft- oder permeablen Bereichen anreichern, können mit Hilfe kerntechnischer Messungen (natürliche und neutroneninduzierte Strahlung) nachgewiesen werden. Hier ist insbesondere die Bestimmung des Thoriums zu nennen, das sich an Grenzflächen von Klüften und Mikrorissen ablagert und so angereichert wird. Im untersten Bohrlochabschnitt wurde so mit Hilfe der NGS-Messung eine relativ starke Thorium- und Urananomalie festgestellt.

Bei der Bewertung dieses Meßergebnisses muß allerdings berücksichtigt werden, daß die Ausgangsisotope der Thorium- bzw. Uranzerfallsreihe, nämlich das Thorium 232 und das Uran 238, nicht direkt bestimmt werden, sondern die Tochterisotope Tl 208 aus der Thoriumzerfallsreihe und das Tochterisotop Bi 214 aus der Uranzerfallsreihe. Es ist daher nicht auszuschließen, daß die Isotope, die in der Zerfallsreihe zwischen den Mutterisotopen und den detektierten Isotopen liegen, gerade beim Vorliegen hydraulischer Wegsamkeiten von diesen getrennt werden, so daß so z. B. eine Diskrepanz zwischen

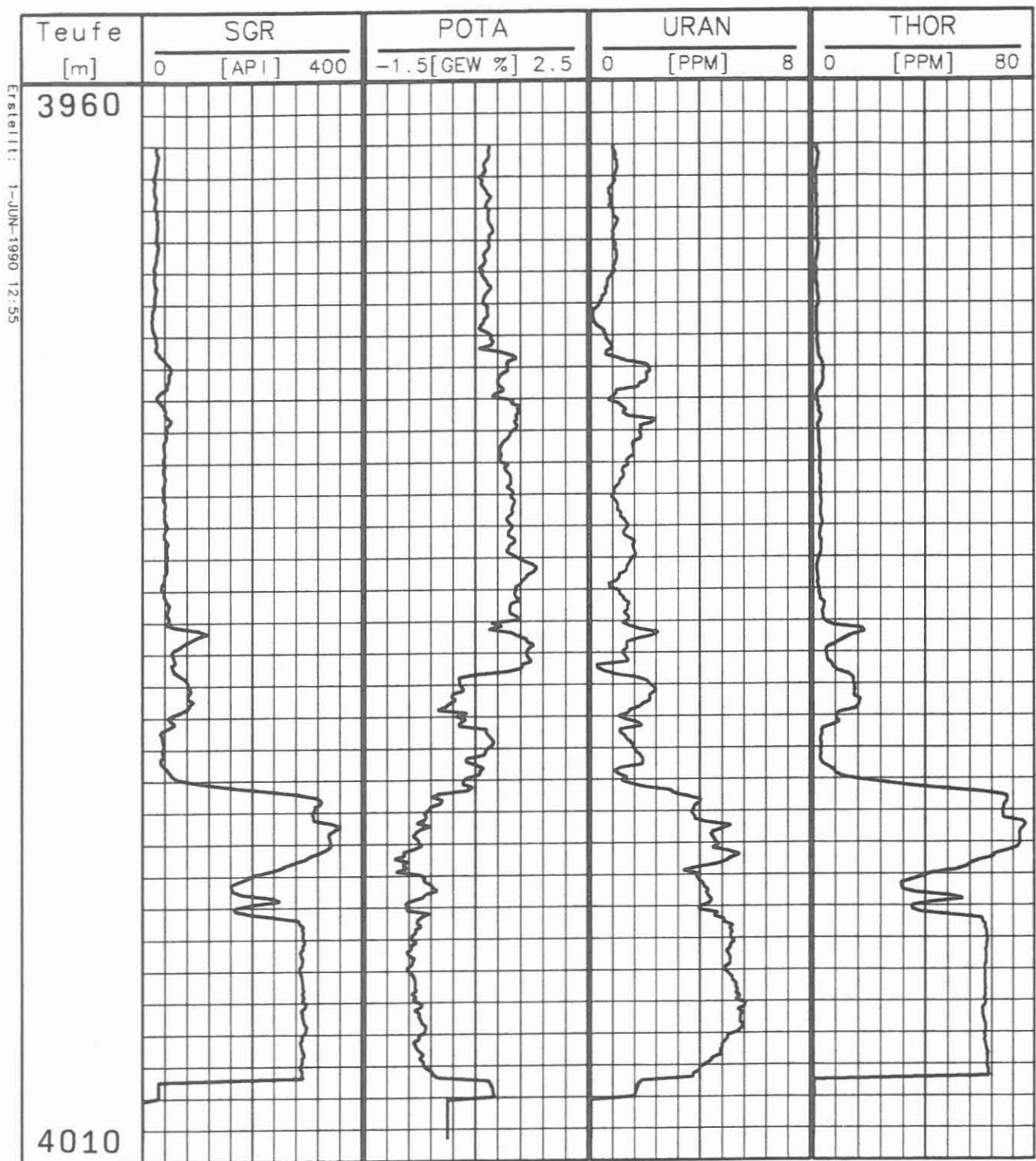


Abb. 7

Ergebnis der NGS-Messung im untersten Bohrlochabschnitt

Log- und Kernmessung im Labor, bei der das Mutterisotop direkt bestimmt wird, gegeben sein kann. Im Beitrag von Hurst et. al. (1990) wird dieser Effekt in diesem KTB-Report beschrieben. Werden solche Abweichungen festgestellt, kann dies als Nichtgleichgewicht in der Zerfallsreihe und ein weiteres Indiz für das Vorliegen einer hydraulischen Wegsamkeit interpretiert werden.

2.8 Andere Messungen

Viele andere Messungen, wie z. B. Eigenpotentialmessung, kernmagnetische Messung, usw. können selbstverständlich auch hinsichtlich ihrer Indikatorwirkung für hydraulisch leitfähige Bereiche ausgewertet werden. Ihr besonderer Anwendungsbereich liegt allerdings in geologischen Formationen mit höherer Porosität.

3.0 Auswahl der Testbereiche in der KTB-Vorbohrung für den Teufenabschnitt 480 m bis Endteufe

Für die in Tabelle 1 aufgelisteten Teufenbereiche, in denen während der Bohrarbeiten eine Anomalie in der Spülungsleitfähigkeit beobachtet werden konnte, wurde von Miehe u. Pusch (1989) sowie Kessels (1989) eine Zusammenstellung aller wesentlicher Logs über die entsprechenden Teufenbereiche von 50 m erstellt.

Eine Aufstellung über die Besonderheiten an den gewonnenen Kernen dieser Bohrlochabschnitte von Müller (1989) ist in Tabelle 3 dargestellt.

Unter Zuhilfenahme der Temperatúrauswertungen von Stiefel u. Reifenstahl (1989) und Jobmann u. Schulz (1989) wurden alle Testbereiche hinsichtlich ihrer hydraulischen Relevanz bewer-

tet und führten zu dem in Tabelle 2 aufgelisteten Vorschlag der Arbeitsgruppe Hydraulik für die Durchführung der hydraulischen Tests im Rahmen des Langzeitmeß- und Testprogramms.

Eine Kürzung der Mittel für die hydraulischen Tests, technische Probleme der Bohrlochstabilität und eine Anpassung des Zeitplanes für das Langzeitmeß- und Testprogramm führten zu einer Reduzierung der Anzahl der Tests von den ursprünglich geplanten 40 Packertests auf nunmehr 12 Packertests. So konnte z. B. für den oberen Bohrlochabschnitt nur ein relativ großer Packerabstand von mehr als 300 m gewählt werden, da, hervorgerufen durch die Auskesselungen, ein Packersetzen innerhalb des Intervalles nicht erfolgversprechend erschien. In der Arbeitsgruppe Fluide wurde dieser Testvorschlag noch einmal ausführlich in der 5. Arbeitssitzung dieser Gruppe am 14.06.1989 diskutiert und eine Testdurchführung in 10 dieser Horizonte empfohlen. Die Aufteilung wurde dabei in 6 Zonen erster Priorität und 4 Zonen zweiter Priorität vorgenommen.

Die weitere Durchführung des Langzeitmeß- und Testprogrammes ergab dann eine weitere Reduzierung der zur Verfügung stehenden Testzeit, da der Abbau der Bohranlage der KTB-Vorbohrung aufgrund von Verpflichtungen gegenüber dem Bohrkonzern DST Ende April durchgeführt werden sollte. Zur Durchführung kamen danach nur 3 Tests der Testzonen erster Priorität. Durch die im Absenkttest festgestellten hohen Zuflüsse im Bohrloch-tiefsten wurde dann nach Einbringen und Zementation der Verrohrung der in diesem KTB-Report beschriebene Pumpstest im untersten Abschnitt der Bohrung durchgeführt.

Teufenintervall	Lithologische Einheit	Markante Indikatoren	Bezugsteufe	Geowissenschaftl. Fragestellung	Technische Realisierbarkeit
450 - 800	Gneis	negative LF-Anomalie der Spüllung	518	-Ursache der Temperaturanomalie	Einzelpackertest mit mit Bridge Plug Instabile Bohrlochzone bei 506 m - 518 m
1375 - 1390	Meta-Gabbro	positive LF-Anomalie der Spüllung Sonic-Log FMST	1389 1385 1380 - 1385	-Ursache der Temperaturanomalie -Wegsamkeit für Meta-Ultramafititbildung	HTT-Doppelpackertest
1640 - 1660	Gneis	negative LF-Anomalie der Spüllung Sonic-Log	1640 1642	-Wegsamkeit für Materialtransport "Pyritentstehung" -Scherzone am Übergang Amphibolit/Gneis -Ursache der Temperaturanomalie	Bereich der Bohrungsablenkung
2140 - 2190	Gneis mit mächtiger Kataklastizone von 2160 m - 2170 m	negative LF-Anomalie der Spüllung Sonic-Log FMST	2177 2172 2163 - 2169 2175 - 2178	-Wegsamkeit für Gaszutritt, CH ₄ , He	HTT-Doppelpackertest
2975 - 2985	Gneis	positive LF-Anomalie der Spüllung Sonic-Log FMST	2980 2983 2970 - 2980	-Ursache der Temperaturanomalie	HTT-Doppelpackertest
3180 - 3220	Gneis	positive LF-Anomalie der Spüllung Sonic-Log FMST	3200 3205 3197 - 3205	-Wegsamkeit für Gaszutritt, CH ₄ , He	HTT-Doppelpackertest
3240 - 3250	Gneis	positive LF-Anomalie der Spüllung Spüllung FMST	3238 3241	-Ursache der Temperaturanomalie -Wegsamkeit für Materialtransport "Graphitbildung"	HTT-Doppelpackertest
3400 - 3460	Gneis	positive LF-Anomalie der Spüllung Sonic-Log FMST	3447 3452 3415 3425 3447	-Wegsamkeit für Gaszutritt, CH ₄ , He -Calciumchloridzutritt -Bereich des 4. DST -offene Kluft mit Calcit und Kaolinit, nach Kernbeschreibung	HTT-Doppelpackertest
3560 - 3590	Gneis/Amphibolit	positive LF-Anomalie der Spüllung FMST	3566 3568 - 3572	-Ursache der Temperaturanomalie -Wegsamkeit für Materialtransport "Pyritentstehung" -Wegsamkeit für Gaszutritt, CH ₄ , He -zum Teil offene Kluft mit Kristallrasen, nach Kernbeschreibung	HTT-Doppelpackertest
3710 - 3750	Amphibolit	positive LF-Anomalie der Spüllung Sonic-Log FMST Gamma-Ray zeigt Lithologiegrenze	3736 3719 3715 - 3725 3734 - 3745 3718	-offene Kluft -Wegsamkeit des Gaszutritt, Chloridlösung	HTT-Doppelpackertest
3805 - 3840	Amphibolit	positive LF-Anomalie der Spüllung FMST	3818 - 3830 3805 - 3812 3826 - 3834	-Wegsamkeit für Gaszutritt, CH ₄ , He -offene Kluftregionen im Kern	HTT-Doppelpackertest
3930 - Endteufe	Amphibolit	stärkste positive LF-Anomalie der Spüllung Sonic-Log FMST	3990 3943 3944 - 3948	-Wegsamkeit für Gas- und Salzwasserzutritt	Einzelpackertest

Tabelle 2

Empfehlung der Arbeitsgruppe Hydraulik zur Durchführung von hydraulischen Testen im Rahmen des Langzeitmeß- und Testprogrammes

Tabelle 3a

Geologische Besonderheiten in den für die KTB-VB vorgeschlagenen hydraulisch testwürdigen Bohrlochintervallen (Müller, 1989)

600 - 650 m:	638 - 640 erhöhte "Klüftigkeitsziffer"
	576 - 603 stark kataklastisch
750 - 800 m:	keine Besonderheiten
950 - 1000 m:	" "
	1020 - 1040: Pyrit, anhaltend 2 - 3 Gew.-%
1050 - 1100 m:	1081m: Quarzgang
1350 - 1400 m:	1364 - 1380: 4x je 2% Pyrit
	ca. 1373 m: keine Besonderheiten
	ca. 1384 m: Kernverlust (ca. 1m) im Meta-Ultramafitit (der gesamte Meta-Ultramafitit geht von 1380 - 1385 m)
1500 - 1550 m:	1512 - 1513: Quarz-Plagioklas-Mobilisat, darunter normaler GNT-Amphibolit
	1520 - 1530: vereinzelt 1 - 3% Pyrit
1600 - 1650 m:	1618 - 1620: Kataklastit, darunter bis 1628 m generell erhöhte "Klüftigkeitsziffer", Bohrlochausbrüche!
	1630: 2% Pyrit
1650 - 1700 m:	Bohrlochausbrüche
	1664 - 1688: durchgehend leicht erhöhte Alteration
	1680 - 1710: anhaltend Pyrit 1 - 4 Gew.-%
	1800 - 1840: erhöhte Heliumgehalte
	1820: erhöhte Methangehalte
	1920 - 1950: erhöhte Heliumgehalte
	1934: Fluid Sampler mit Erfolg
2000 - 2050 m:	2000 - 2030: erhöhte Methan- und Heliumwerte
	2009 - 2019: sehr stark alteriert, mehrfach einige dm Kernverlust
2150 - 2200 m:	2150 - 2270: erhöhte Methan- und Heliumgehalte
	2158 - 2178: kataklastisch, z. T. stark alteriert,
	2164: Fluid Sampler mit Erfolg
	2175 - 2178 Kernverlust
2950 - 3000 m:	2974-2979: stark alteriert
3100 - 3150 m:	3148 - 3050: stark kataklastisch, Graphit auf Scherbahnen
3200 - 3250 m:	3199 - 3202: kataklastisch, 2 m Kernverlust
	3204: Gas
	3230 (-3232): Kataklastose mit Graphit auf Scher- bahnen
	ca. 3240 : Graphit auf Scherbahnen, sonst frisch!

Tabelle 3b

Geologische Besonderheiten in den für die KTB-VB vorgeschlagenen hydraulisch testwürdigen Bohrlochintervallen (Müller, 1989)

3300 - 3350 m:	3320 - 3327:	? viele Scherflächen, leicht alteriert, aber kompakter Kern!
3400 - 3450 m:	3447:	offene Kluft mit Calcit und Kaolinit Gas und Cl ⁻ , stärkster "Zufluß"
3450 - 3500 m:	keine Besonderheiten aber z. B.: 3545 - 3548 m Kataklasit mit Graphit wird nicht registriert!	
3550 - 3600 m:	3561	Pyrit-imprägnierte Kataklasite
	3565 - 3566:	" " "
	3586:	zum Teil offene Kluft mit Kristallrasen
3700 - 3750 m:	3733:	offene Kluft Gas, Cl ⁻
	3810:	Gas
3850 - 3900 m:	3861:	offene Porenräume in Quarz-Feldspat- Mobilisaten
	3866 - 3884:	erhöhte Sulfid-Gehalte
	3872 - 3873:	Scherzone mit Pyrit
	3883 - 3884:	Scherbahn mit Magnetkies
	3868 - 3873:	sehr viel Epidot ==> Klüfte/Alteration
3950 - 4000 m:	3979 - 3981:	Gas anhand anhaltend erhöhter Cl ⁻ -Gehalte
	3990 - 4000:	stark alterierter Amphibolit
800 - 850 m:	840 - 850:	erhöhte Anzahl Störungen, verheilt
1100 - 1150 m:	1114.5:	Quarzgang Cuttingsstrecke, mäßig alteriert
1200 - 1250 m:	bis 1229 m Cuttingsstrecke, mäßig alteriert 1234 - 1236 m Störungen, verheilt	
1800 - 1850 m:	keine Besonderheiten	
2300 - 2350 m:	2303	Lamprophyr
	2315	Aplite
	2342	"
	2349	"
	2309	schwach kataklastisch
	2318	" "
	2322	" "
	2327	" "
	2339	" "
	2342 - 2349	kataklastisch, mit Graphit

LITERATURVERZEICHNIS

- Draxler, J. und Hänel, R. (1987): Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik (Bericht 3), KTB-Report 87-4, S. 52 - 55, NLFb, Hannover
- Draxler, J. (1988): Estimation of Permeability from Wireline Logs; in: Draxler, J. und Hänel, R. (Ed), KTB-Report 88-4, S. 180 - 154, NLFb, Hannover
- Hänel, R., Draxler, J. (1988): Bohrlochmessungen in der KTB-Oberpfalz VB (Intervall 478,5 - 1529,4 m), KTB-Report 88-4, NLFb, Hannover
- Hänel, R. (1989): Versuch zur Ermittlung von permeablen Klüften in der Pilotbohrung KTB-Oberpfalz VB mittels Stoneley Wellen, KTB-Report 89-1, S. 123 - 134, NLFb, Hannover
- Hurst, S., Eichinger, L., Buheitel, F. (1990): Radium-Isotopenuntersuchungen in Wässern aus 3000 - 4000 m Teufe der KTB-Vorbohrung, KTB-Report 90-5, NLFb, Hannover
- Jobmann, M., Schulz, R. (1989): Persönliche Mitteilung auf der Arbeitsgruppensitzung Geohydraulik am 05.05.1989, NLFb, Hannover
- Kessels, W. (1989): Observation and interpretation of time-dependent behaviour of borehole stability in the Continental Deep Drilling pilot borehole; Scientific Drilling 1:127-134, Springer Verlag
- Kessels, W. (1989): Bewertungskriterien zur Interpretation von Logdaten hinsichtlich hydraulisch testwürdiger Zonen, unveröffentlicher Bericht, NLFb/KTB, Hannover
- Kück, J., Kessels, W. (1990): EDV-Unterstützte Kernorientierung, KTB-Report 90-4, NLFb, Hannover
- Miehe, R., Pusch, G. (1989): Bewertung hydraulisch testwürdiger Horizonte aufgrund von BHIV-Kluftigkeitsziffern und Stoneley-Wellen, Energieverlusten, unveröffentlicher Bericht, Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl und Erdgasgewinnung, TU Clausthal
- Müller, H. (1989): Geologische Besonderheiten in den von Kessels, Miehe (1989) vorgeschlagenen hydraulisch testwürdigen Bohrlochintervallen, unveröffentliche Mitteilung, KTB-Feldlabor, Windischeschenbach
- Schepers, R. und Menger, St. (1988): Bilder aus der Tiefe durch hochauflösende Abtastung der Bohrlochwand mit Ultraschallwellen; in: Kehrer, P. und Kessels, W. (Ed.), KTB-Report 88-11, S. 347 - 369, NLFb, Hannover
- Stiefel, A., Reifenstahl, F.: Persönliche Mitteilung auf der Arbeitsgruppensitzung Geohydraulik am 05.05.1989, Inst. f. Geophys., TU Karlsruhe

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Projektgruppe KTB
Stilleweg 2
3000 Hannover 51
Universität Karlsruhe
Hertzstraße 16
7500 Karlsruhe

Vergleich der Ergebnisse von Absenk- und Injektionstest im Hinblick auf Klufiterkennung

M. Jobmann
F. Reifenstahl



VERGLEICH DER ERGEBNISSE VON ABSENK- UND INJEKTIONSTEST
IM HINBLICK AUF KLUFTERKENNUNG

M. Jobmann, F. Reifenstahl

Zusammenfassung

Die Ergebnisse des Absenktestes (10.05.89 - 20.05.89) und des Injektionstestes (22.05.89 - 25.05.89) wurden hinsichtlich ihrer Aussagen zur Lokalisierung von Kluftezonen verglichen. Es zeigten sich neben den erwarteten Übereinstimmungen auch überraschend viele Unterschiede.

Summary

Both hydraulic tests were compared concerning their results to detect fractures or fracture zones. Agreement as well as a lot of differences were found.

Anschrift der Autoren:

Michael Jobmann, Niedersächsisches Landesamt für Bodenfor-
schung, Stilleweg 2, 3000 Hannover 51
Frank Reifenstahl, Universität Karlsruhe, Hertzstraße 16,
7500 Karlsruhe

Vergleicht man die Ergebnisse der Temperaturmessungen während des Injektionstestes mit denen der Spülungsleitfähigkeitsmessungen, die während des in der Woche vorher durchgeführten Absenktestes gefahren wurden, so zeigen sich in den Indizien für Kluftzonen sowohl Übereinstimmungen als auch Unterschiede.

Tab. 1 zeigt eine Gegenüberstellung der jeweils gefundenen Indikationen für Kluftzonen. Die Ursachen für die Unterschiede in den Lokalisierungen sind noch nicht endgültig geklärt.

Teilweise sind aus den Widerstandsmessungen beim Absenktest Hinweise auf Klüfte erkennbar, während in den Temperaturmessungen beim Injektionstest keine Anzeichen dafür auftreten. Die Ursache könnte zum einen ein gering durchlässiges Kluftsystem sein, das bei einer Förderung wenig, jedoch hoch saline Flüssigkeit abgibt, bei einer Injektion aber aufgrund der geringen Durchlässigkeit so wenig Flüssigkeit aufnimmt, daß dieser Vorgang thermisch nicht meßbar ist. Eine andere Erklärung böten Lösungsvorgänge am Gestein, so daß die Widerstandsmessungen nicht Klüfte, sondern Mineralvorkommen anzeigen.

Wo Kluftanzeigen aufgrund von Temperaturmessungen bei der Injektion und keine Anzeichen bei Widerstandsmessungen (Absenktest) vorliegen, könnte die Ursache zum einen darin liegen, daß durch den erzeugten Unterdruck beim Absenken bzw. Überdruck bei der Injektion sich Klüfte schließen bzw. öffnen. Ein weiterer Grund könnte der fehlende Leitfähigkeitskontrast sein. Da während des Bohrvorganges sicherlich Spülflüssigkeit in das Gebirge eingedrungen ist, kommt diese bei Beginn der Förderung wieder heraus; d. h., die austretende Flüssigkeit und die Bohrlochspülung unterscheiden sich nicht oder kaum in der Leitfähigkeit.

Kluftzonen	
Temperatur	Spuelungsleitfaehigkeit
490 - 513	450 - 500
553	-
1104	-
-	1170
-	1202 - 1250
1370 - 1385	1325 - 1400
1445 - 1460	1420 - 1480
1538	1530
1600 - 1640	-
1692 - 1703	-
1738 - 1740	1710 - 1738
1780 - 1785	-
1924 - 1936	-
2146 - 2178	-
2232 - 2256	-
2433 - 2446	-
2595	2580 - 2610
2640 - 2680	-
2780	2785 - 2815
2980 - 3000	-
3030 - 3035	-
-	3157
-	3190
3200 - 3206	-
-	3340
-	3365
3396 - 3409	3375 - 3430
3438 - 3447	3445
3472 - 3476	-
3478 - 3484	-
3492 - 3512	-
3533 - 3541	-
3557 - 3573	-
-	3600 - 3700
3768 - 3780	-
-	3817
3840 - 3855	-
3890 - 3895	-
	3980 - 4000

Tab. 1 : Gegenueberstellung der lokalisierten Kluftzonen vom Injektionstest (Temperatur) und Absenktest (Spuelungsleitfaehigkeit)



* Institut für Tiefbohrtechnik
Erdöl- und Erdgasgewinnung
TU Clausthal
3392 Clausthal-Zellerfeld

** Ges. für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung
3300 Braunschweig

Auswertung geohydraulischer Tests in der Bohrphase der KTB-Vorbohrung

✓ C. Enacescu *
R. Mieke **
G. Pusch *



**AUSWERTUNG GEOHYDRAULISCHER TESTS IN DER BOHRPHASE
DER KTB-VORBOHRUNG**

C. Enacescu*

R. Mieke**

G. Pusch*

ZUSAMMENFASSUNG

In der KTB-Vorbohrung in Windischeschenbach wurden während der Bohrphase vier Drillstem Tests durchgeführt, von denen einer technisch mißlang. Zwei der Tests brachten einen nennenswerten Fluidgewinn, in drei Tests konnte die Druckentwicklung als Puls bzw. Slug Test analysiert und ausgewertet werden.

Drillstem Tests in einer Forschungsbohrung sind in erster Linie zur Gewinnung von Fluiden aus den durchteuften Schichten, speziell aus Kluftzonen, und in zweiter Linie zur Gewinnung hydraulischer Parameter geplant. Sicherheitsüberlegungen in instabilen Bohrlöchern und der Zeit-/Kostenfaktor für die Testdurchführung erfordern meist einen Kompromiß in der Realisierung des Tests hinsichtlich der Zeiten, die zur Manipulation im Bohrloch bei der Auslösung des Druckimpulses erforderlich sind (einschließlich Fluidgewinn) und der Zeiten, die für die Meßwerterfassung für hydraulische Daten erforderlich sind.

Ein weiteres Risiko bei der Durchführung von Drillstem Tests (DST) besteht in der Auswahl der testwürdigen Zonen. Die üblichen Indikatoren für das Ansetzen eines Tests bestehen in Spülungsverlusten als Hinweis auf klüftige Zonen, Anzeichen für Gas- oder Flüssigkeitszutritt, die als Widerstandsänderungen bei den geophysikalischen Logmessungen auftreten und schließlich aus den Bohrkernbeschreibungen.

Die beiden ersten Tests im Bereich um 200 m und 400 m, welche in der Zone der geothermischen Anomalie (höhere Wärmestromdichten) durchgeführt wurden, erbrachten keine Anzeichen für klüftige Zonen, sondern ergaben Matrixpermeabilitäten von 45 μD in einem wenig kontaminierten Bohrloch (Skinfaktor -0,5).

Der dritte DST im Teufenbereich um 800 m mußte aufgrund der starken Auskesselungen und den damit verbundenen Risiken in der Teufe von 813 - 839,04 m ohne jede Variationsmöglichkeit der Testbedingungen durchgeführt werden. Er brachte einen geringen Fluidgewinn und hydraulische Parameter, welche durch einen starken Skineffekt (Skinfaktor 45) beeinträchtigt waren.

Ob diese Anzeichen für eine starke Infiltration der Spülung in das Gebirge sprechen und damit als Auslöser für die Bohrlochsrandausbrüche gedeutet werden können, läßt sich nicht mit Sicherheit nachweisen.

Die deutlichen Anzeichen von Fluidzutritten und die Beobachtung von Klüften in den Bohrkernen veranlaßten die Durchführung eines Stützankertests mit Wasser- und Gasvorlage im Teufenbereich von 3442,93 - 3486,9 m. Das stufenweise Ablassen des Stickstoffdruckes als Maßnahme für ein "sanftes" Anfordern der Formation verkomplizierte die Randbedingungen für die analytische Auswertung dieses Tests, so daß mehrdeutige Aussagen über hydraulische Parameter möglich wurden.

Der Fluidgewinn aus dieser Zone deutete jedoch auf ein beachtenswertes Fluidreservoir hin, das im Zuge der hydraulischen Tests nach Beendigung der Bohrung weiter untersucht werden sollte.

SUMMARY

During the drilling phase of the preliminary well of the deep drilling project in Windischeschenbach 4 drill stem tests were performed. One was a technical failure, two tests recovered sufficient fluid to analyze its origin and in three tests the pressure response of the formation could be analyzed as pulse or slug tests.

Drill stem tests in a research well are mainly aimed to the recovery of fluids from the penetrated formations. The dominant paths of fluid migration are fractured zones. This consequently results in a derivation of hydraulic parameters of the higher permeable regions in this well. Precautions with respect to borehole instabilities and the relationship between extended test duration and increasing costs require a compromise for the realization of hydraulic tests. An additional factor of uncertainty comes from the decision and selection of test zones. Drilling fluid losses, the detection of gas and liquid influx into the well by geophysical logging methods are considered reliable indicators for the selection of a test zone. Other sources for information are core descriptions.

The first two drill stem tests at a depth of approximately 200 m and 400 m in a region of high heat flux density (geothermal anomaly) did not show any signs of fractured zones. The permeabilities determined in the uncontaminated wellbore range at a level of matrix permeabilities of crystalline formations with approximately 56 μD .

Because of high technical risks in a cavernous zone around 800 m the third test had to be performed without necessary accommodations to the test situation and without a noticeable fluid recovery. The interpretation of the pressure response shows a skin factor of 5 and a matrix permeability in the range of 6.6 μD . The reason for the relatively high skin factor cannot be clearly stated, but it can be concluded that infiltration of drilling fluid into the formation could have caused the caverns in the wall of the borehole.

In a depth of 4350 m a relatively strong influx of fluids from the formation could be observed by sampling and conductivity measurements during geophysical logging. A single packer test was performed below the depth of 3443 m with a water and gas counter pressure in the drill pipe. The gas pressure was released stepwise in order to initiate the fluid recovery smoothly. Unfortunately, these starting conditions complicated the analysis of the pressure response from the formation so that the hydraulic parameters derived become ambiguous. The relatively high amount of fluid recovered from this zone indicates a promising fluid reservoir so that a carefully designed hydraulic test should be performed after termination of the drilling phase.

* C. Enacescu, G. Pusch: Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung, TU Claustal

** R. Mieke: Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, Institut für Tieflagerung, 3300 Braunschweig

1 EINLEITUNG

Die Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit des Gesteins ist sowohl im Hinblick auf die Interpretation von Fluidbewegungen im Gebirge wie auch zur Klärung anomaler Temperaturgradienten in der Vorbohrung der KTB von großer Wichtigkeit. Diese Zielsetzungen wurden sowohl von den Arbeitsgruppen Geohydraulik als auch Geothermie gemeinsam postuliert und führten deshalb zur Planung eines Testprogramms während der Bohrphase. Darüber hinaus bestand bei der Arbeitsgemeinschaft "Fluide" (ARGE 7) ein besonderes Interesse, Fluidproben zu gewinnen, die möglichst wenig von der Bohrspülung kontaminiert und keiner Alterung unterzogen worden waren.

Zur Fluidgewinnung und Bestimmung der Durchlässigkeit wurden in der KTB-Vorbohrung vier Drillstem Tests (DST) in den Teufenintervallen 219,81 - 257,0 m, 347,81 - 385,0 m, 813,0 - 839,04 m und 3442,93 - 3486,9 m durchgeführt (vgl. Bohrlochprofil, Abb. 1). Der letzte Bereich war von besonderem Interesse, da hier eine offene Kluft angetroffen und deutliche Zuflüsse beobachtet wurden. Neben der Basisauswertung dieser Tests, wobei der Test im zweiten Teufenbereich technisch mißlang, enthält dieser Bericht eine interpretative Auswertung der Schließphase des 1. und 3. DST mit Hilfe analytischer Simulationsprogramme, basierend auf unterschiedlichen Modellansätzen.

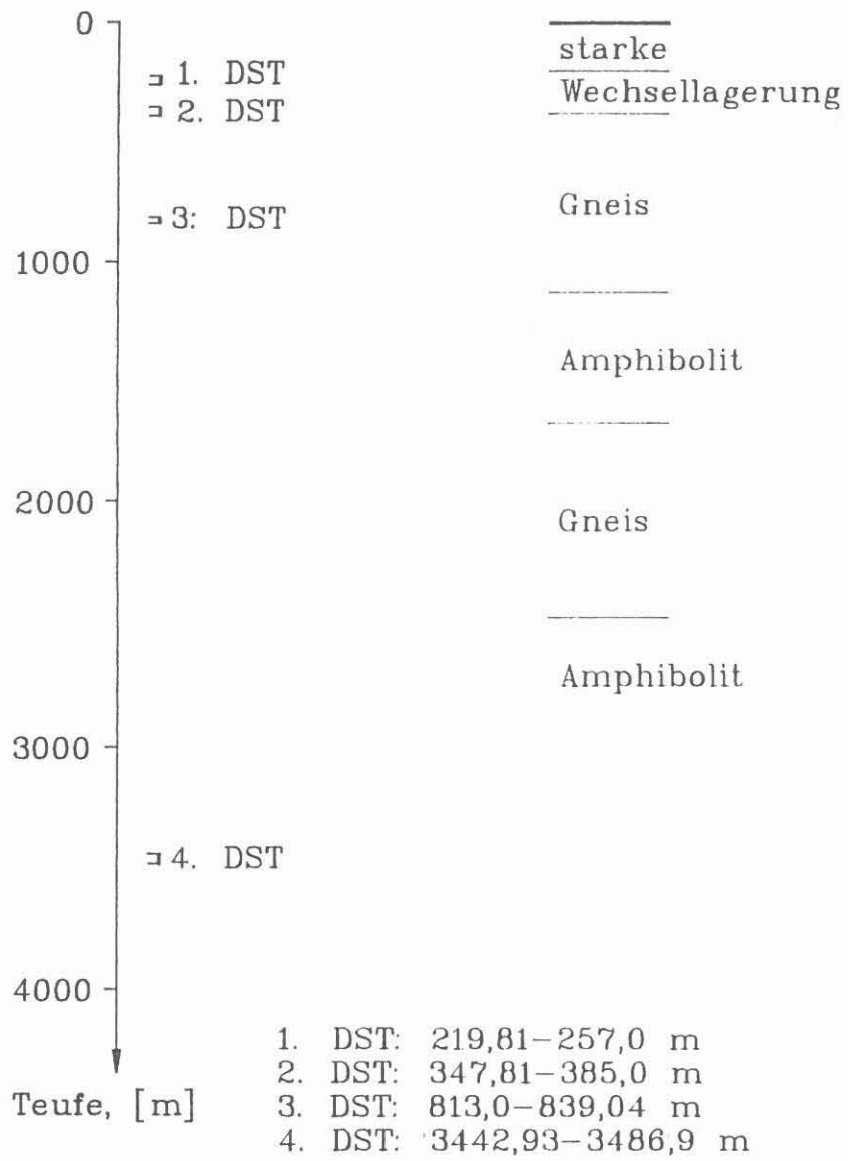


Abb. 1: Bohrlochprofil nach Hänel /31/

2 Theoretische Grundlagen der Testauswertung

Drucktestverfahren dienen zur Erfassung formationsspezifischer Parameter, wie initialer Porenraumdruck, Permeabilitätskapazität und damit der Permeabilität, Identifizierung von Fließbarrieren, Trägerschädigungen etc..

Es wird zwischen Einbohrlochmeßverfahren und Mehrbohrlochmeßverfahren unterschieden, wobei hier nur die Einbohrlochmeßverfahren (kurz) behandelt werden sollen.

Drillstem Test

Zielsetzung des Tests während der Bohrphase ist die Gewinnung von Fluidproben aus der Formation und die Bestimmung der hydraulischen Parameter. Darauf aufbauend soll analysiert werden können, ob eine Formation ausreichend "produktiv" ist, um als "Lagerstätte" in Förderung genommen zu werden. Zu diesem Zweck wird der Test in zwei unterschiedlichen Fließ- und Schließphasensequenzen durchgeführt. In der ersten Phase wird die Formation nur kurzzeitig zum Fließen gebracht, um einen anschließenden Druckanstieg verfolgen zu können, der eine zuverlässige Extrapolation auf den statischen Enddruck (initialen Formationsdruck) erlaubt.

In der zweiten Phase wird die Fließperiode verlängert, um eine ausreichende Fluidproduktion zu gewährleisten und die hydraulischen Parameter für die Formationsfluide bestimmen zu können. Der darauffolgende Schließdruckanstieg kann ebenfalls hinsichtlich der hydraulischen Parameter analysiert werden, braucht aber nicht mehr bis zum statischen Enddruck verfolgt zu werden.

Die Grundlage für solche Analysen von Druckmessungen bildet die Diffusivitätsgleichung, welche für ein kartesisches Koordinatensystem lautet:

$$\nabla^2 p = \frac{\phi \cdot \mu \cdot c_t}{k} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

Hieraus ergibt sich die radiale Druckfortleitungsgleichung für poröse Medien zu:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\phi \cdot \mu \cdot c_t}{k} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2)$$

2.1 Linienquelle in homogener Formation unendlicher Ausdehnung

Unter der Annahme, daß sich die Bohrung wie eine linienförmige Druckquelle in einem unendlichen Raum verhält, läßt sich für diese Differentialgleichung eine analytische Näherungslösung angeben:

$$p_{r,t} = p_i + \frac{q \cdot \mu}{4 \cdot \pi \cdot k \cdot h} \cdot E_i \cdot \left(- \frac{\phi \cdot \mu \cdot c_t \cdot r^2}{4 \cdot k \cdot t} \right) \quad (3)$$

Unter Annahme von

$$\frac{\phi \cdot \mu \cdot c_t \cdot r^2}{4 \cdot k \cdot t} < \frac{1}{100} \quad (4)$$

kann die Exponentialintegralgleichung (3), für die als Randbedingungen ein inkompressibles Fluid und eine homogene Formation mit unendlicher Ausdehnung vorausgesetzt werden, in eine logarithmische Form überführt werden.

$$p_{r,t} = p_i + \frac{q \cdot \mu}{4 \cdot \pi \cdot k \cdot h} \cdot \ln \frac{\gamma \cdot \phi \cdot \mu \cdot c_t \cdot r^2}{4 \cdot k \cdot t} \quad (5)$$

Für eine Druckaufbau- bzw. Druckabbauphase ergibt sich, wenn man das Einschließen der Bohrung durch Superponierung eines zeitabhängigen Druckinkrements aufgrund einer negativen Fließrate (-q) berechnet:

$$p_{r_w,t} = p_{ws} = p_i - \frac{q \cdot \mu}{4 \cdot \pi \cdot k \cdot h} \cdot \ln \frac{t + \Delta t}{\Delta t} \quad (6)$$

Die Auswertung einer Schließdruckmessung kann üblicherweise nach Horner /4/ oder Miller, Dyes und Hutchinson /2/ durchgeführt werden.

Die Ermittlung der Permeabilitätskapazität (k·h) und des Skinfaktors s kann aus dem Horner-Plot, bei dem der Schließdruck p_{ws} über das dimensionslose Zeitverhältnis $\log(t+\Delta t)/\Delta t$ aufgetragen wird, erfolgen.

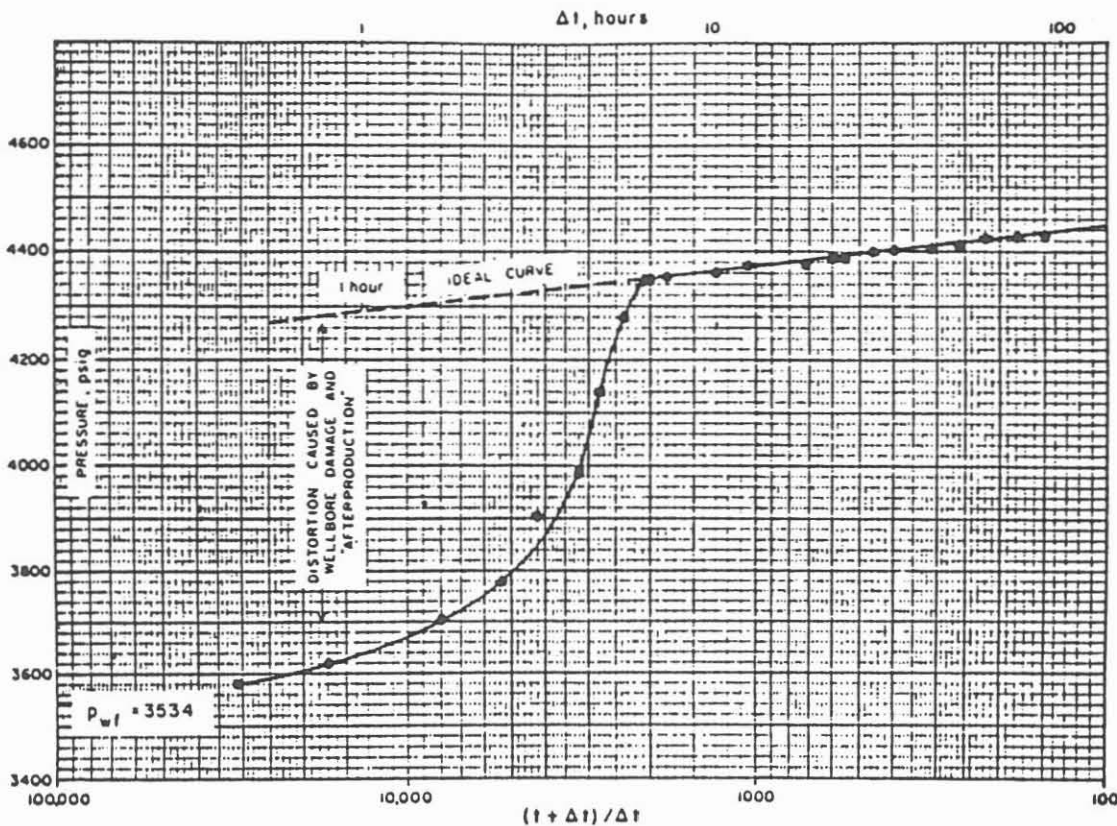


Abb. 2: Horner-Plot /5/

Aus der Steigung m des geraden Kurvenabschnitts ergibt sich:

$$k \cdot h = \frac{q \cdot B \cdot \mu}{4 \cdot \pi \cdot m} \quad (7)$$

$$s = 1,1513 \cdot \left[\frac{P_{ws1}(\Delta t=1h) - P_{wf}(\Delta t=0)}{m} - \log \left(\frac{k}{\phi \cdot \mu \cdot c_t \cdot r_w^2} \right) + 3,2275 \right] \quad (8)$$

Ist die Fließdauer der Bohrung nicht genau bekannt, so kann nach Miller, Dyes und Hutchinson der Schließdruckanstieg auch gegen den Logarithmus der Schließzeit aufgetragen werden. Die Steigung m bleibt dieselbe wie im Horner-Plot.

Die Auswertung nach Horner bzw. Miller, Dyes und Hutchinson kann allerdings nur über den geraden Abschnitt der Kurve im halblogarithmischen Druck-Zeit-Diagramm vorgenommen werden, der nicht von Anfangs- oder Endeffekten beeinflusst wird.

Derartige Anfangseffekte sind darauf zurückzuführen, daß zu Beginn der Meßphase im Bohrloch die Druckentwicklung stärker von der Entspannung bzw. Kompression der Bohrlochflüssigkeit beeinflusst wird, als von der Durchlässigkeit des Gebirges. Sobald die instationäre Strömungsdruckentwicklung übergeht in eine pseudostationäre (Druckänderung wird linear proportional der Zeit) oder stationäre, gelten die für die Horner-Methode geforderten Randbedingungen nicht mehr und Endeffekte dominieren.

2.2 Musterkurvenanpassungsverfahren (Type-Curve Matching) nach Gringarten

Dahingegen bietet die Auswertung mittels Type-Curve-Verfahren die Möglichkeit, auch die frühen bzw. späten Druckverläufe eines Tests auszuwerten. Hierbei wird mit Hilfe von Musterkurven in normierter doppeltlogarithmischer Auftragung das Druck-Zeit-Verhalten einer wohldefinierten Formation wiedergegeben.

Die im Test ermittelten Meßwerte werden im gleichen Maßstab wie die Musterkurven aufgetragen und durch achsenparalleles Verschieben der Meßwerte wird diejenige Musterkurve bestimmt, die mit den gemessenen Druck-Zeit-Werten am besten übereinstimmt. Damit sind die Achsen beider Darstellungen zueinander festgelegt und für jeden beliebigen "Match-Punkt" kann eine eindeutige Transformation der dimensionsbehafteten Meßwertepaare auf die normierte dimensionslose Darstellung der Type-Curve erfolgen /1/.

In Abb. 3 ist eine Musterkurvenschar nach Gringarten /6/ dargestellt.

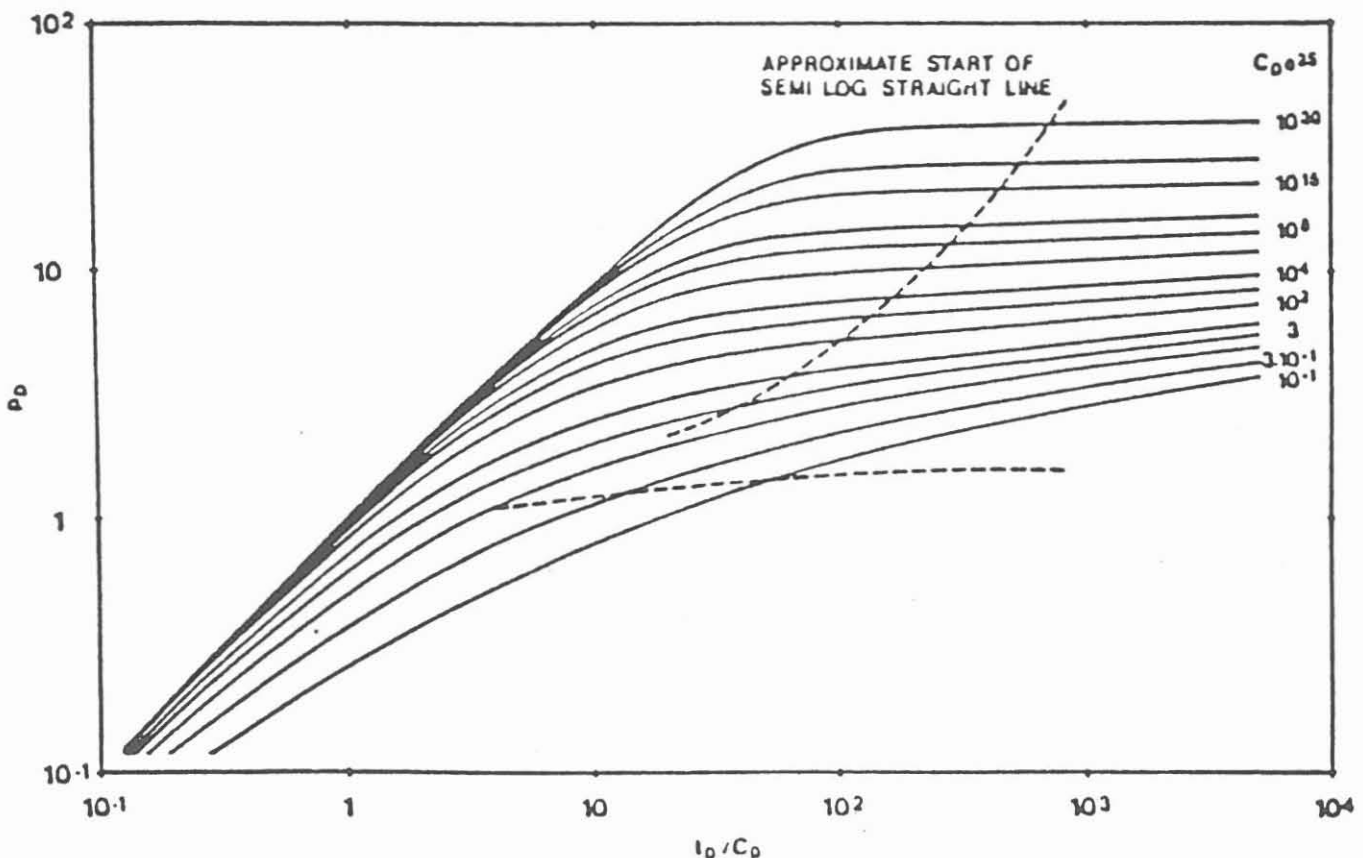


Abb. 3: Musterkurvenschar nach Gringarten; die Achsen tragen normierte, dimensionslose Größen /6/

Derartige Musterkurvendarstellungen gibt es für eine Vielzahl möglicher Formationstypen, wie z.B. für homogene oder heterogene Formationen, für einfache Porenraumsysteme oder für Kluft-Matrix-Porensysteme, für Anfangsdruckverläufe unter Berücksichtigung des Bohrlochspeichereffektes und der Skinzone (Bohrlochrandzone mit veränderter Permeabilität) und für die späte Druckverlaufphase. Die Permeabilitätskapazität $k \cdot h$, der Skinfaktor s sowie der Bohrlochspeicherkoeffizient C lassen sich dann durch folgende Transformationsgleichungen bestimmen:

$$k \cdot h = \frac{q \cdot B \cdot \mu}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{(p_D)_M}{(\Delta p)_M} \quad (9)$$

$$s = 0,5 \cdot \ln \frac{(C_D \cdot e^{2s})}{C_D} \quad (10)$$

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot h}{\mu} \cdot \frac{(\Delta t)_M}{\left(\frac{t_D}{C_D}\right)_M} \quad (11)$$

Slug Test und Puls Test

Testarten, die mit verhältnismäßig kurzen Meßzeiten die relevanten lagerstättenspezifischen Parameter liefern können, sind der Puls und der Slug Test. Beide Verfahren können sowohl als Injektions- wie auch als Zufluß- (Withdrawal-) Test ausgeführt werden.

Beim Slug Injection Test wird der Flüssigkeitsspiegel in der Bohrung um eine bestimmte Höhe aufgefüllt und dann das Abfallen der Säule, bedingt durch das Abfließen in den abgepackerten Formationsbereich, beobachtet, wobei der Druckabfall (Draw Down) von der Transmissivität des Gebirges abhängt. Im Gegensatz hierzu wird beim Slug Withdrawal Test ein bestimmtes Flüssigkeitsvolumen aus der Bohrung entfernt, z.B. mittels Swabbkolbens oder Ausliftens durch Preßluft.

Anschließend wird der spontane Anstieg der Fluidsäule, hervorgerufen durch Zufluß aus der Formation, registriert.
die Auswertung für beide Ausführungsformen des Slug Tests erfolgt über Type-Curve Verfahren nach Cooper oder Bredehoeft /7/ und Ramey, Agarwal und Martin /8/.

Im Vergleich zum Slug Injection Test erfolgt beim Pulse Injection Test ein Auffüllen des Bohrlochs bis zu Tage, auf welches dann plötzlich ein Druckpuls, z.B. hervorgerufen durch eine Pumpe, aufgebracht wird. Danach wird das Testintervall sofort eingeschlossen.

Registriert wird der Druckabbau im abgepackerten Bohrlochbereich. Der Puls Withdrawal Test unterscheidet sich vom Injektionsverfahren dadurch, daß der Flüssigkeitsspiegel im Bohrloch abgesenkt wird. Dies kann durch Pumpen oder Ausliften geschehen. Daran schließt sich eine kurze Fließphase an, bevor das Testintervall durch Schließen des Testventils eingeschlossen wird. Der sich im abgepackerten Bereich der Bohrung einstellende Druckanstieg wird registriert.

In den Abb. 4 a,b sind die einzelnen Formen des Slug und Puls Tests dargestellt.

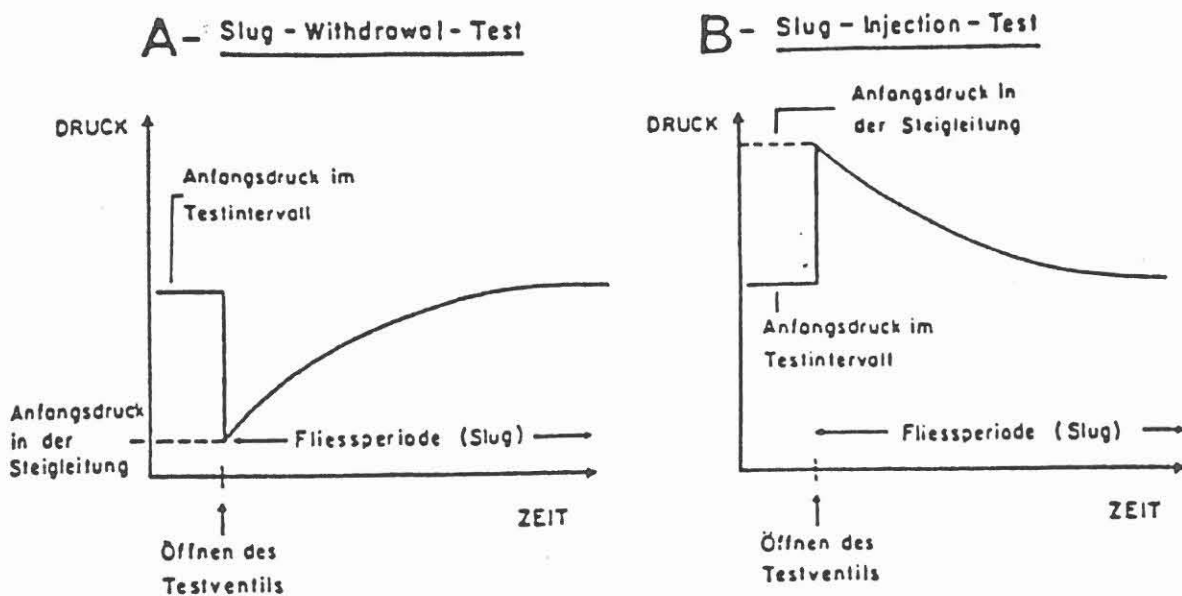


Abb. 4a: Formen des Slug Tests

C - Pulse-Withdrawal-Test

D - Pulse-Injection-Test

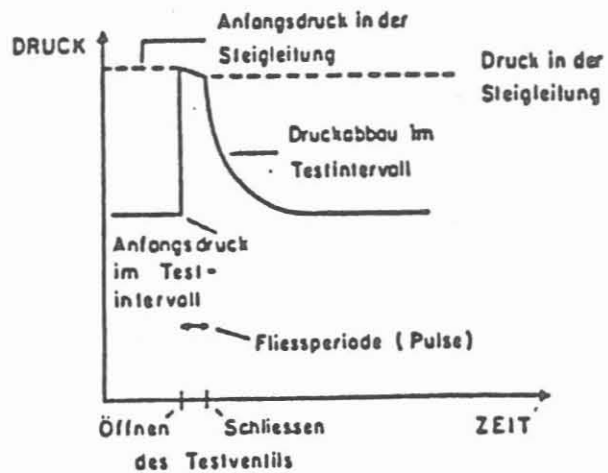
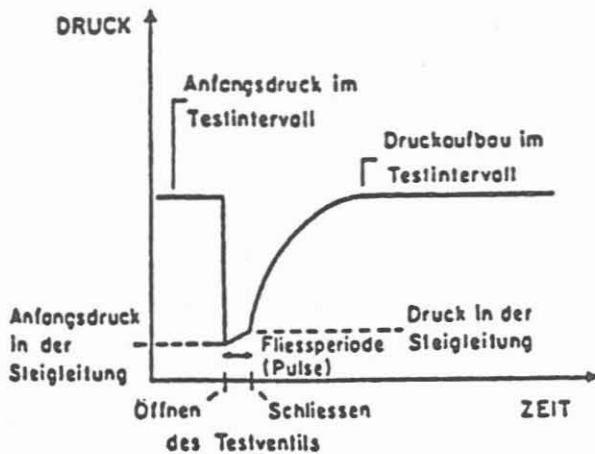


Abb. 4b: Formen des Puls Tests

2.3 Type-Curve Auswerteverfahren nach Ramey, Agarwal und Martin

Die Auswertung beider Formen des Puls Tests erfolgt ebenfalls über Type-Curve Verfahren nach Ramey, Agarwal und Martin /8/.

Gegenüber dem Slug Test tritt beim Puls Test ein viel steilerer Druckanstieg bzw. -abfall auf, was besonders bei geringpermeablen Formationen zu erheblich kürzeren Testzeiten führt.

In den Abb. 5 a-c sind die Musterkurven in normierter, einfach- bzw. doppeltlogarithmischer Auftragung dargestellt.

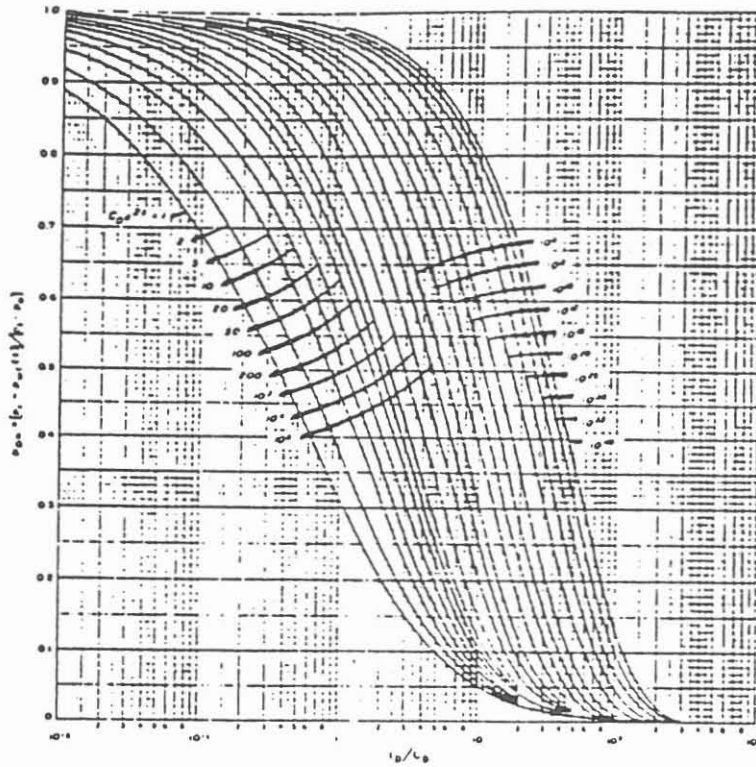


Abb. 5a: Musterkurven zur Auswertung von Slug und Puls Tests /8/ für Anfangs- und späte Druckwerte

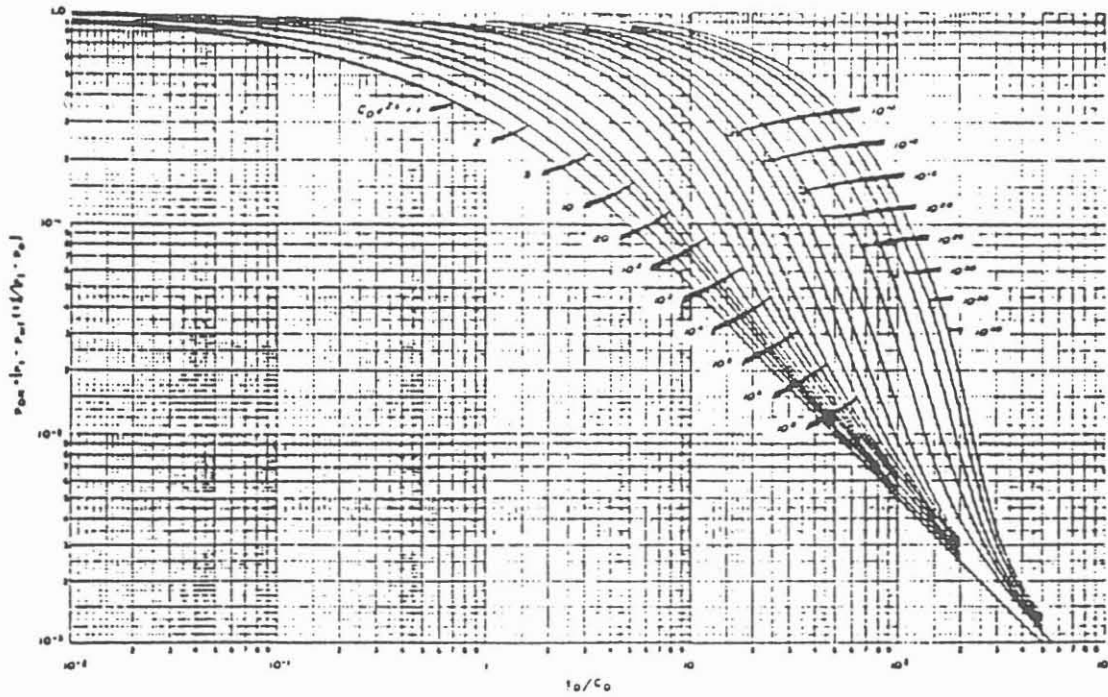


Abb. 5b: Musterkurven nach /8/ für späte Druckwerte

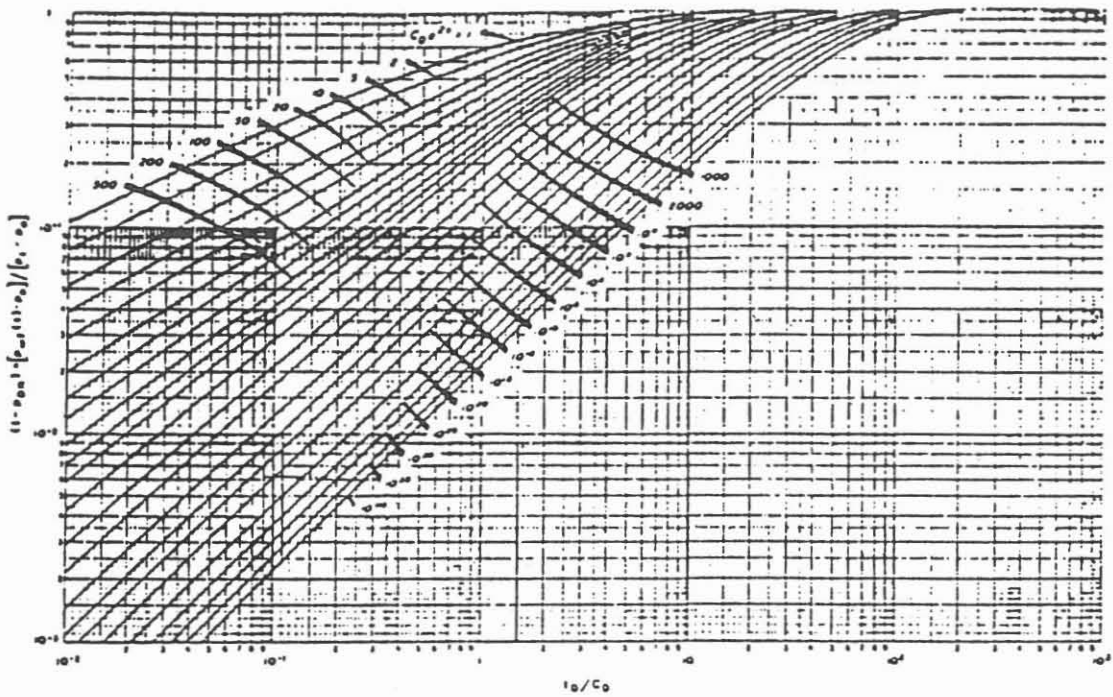


Abb. 5c: Musterkurven nach /8/ für Anfangsdruckwerte

Die Matching-Prozedur erfolgt, wie bereits beschrieben. Allerdings müssen die Druckwerte erst in eine dimensionslose Form überführt werden.

$$P_{DR} = \frac{p_i - p_{ws}(t)}{p_i - p_o} \quad (12)$$

Nachdem die zur Formation passende Musterkurve ausgewählt wurde, kann für jeden Match-Punkt eine eindeutige Transformation des dimensionsbehafteten Meßwertes auf die normierte dimensionslose Darstellung der Musterkurve angegeben werden. Die Permeabilität k und der Skinfaktor s lassen sich dann, wenn die Kompressibilität des Bohrlochinhalt bekannt ist, wie folgt berechnen:

$$C_D = \frac{C}{2 \cdot \pi \cdot \phi \cdot h \cdot c_t \cdot r_w^2} \quad \text{mit a) } C = c_w \cdot V = c_w \cdot \pi \cdot r_w^2 \cdot h \quad (\text{Puls})$$

$$\text{b) } C = \frac{\pi \cdot r_b^2}{\rho \cdot g} \quad (\text{Slug}) \quad (13)$$

$$t_D = \frac{k \cdot t}{\Phi \cdot \mu \cdot c_t \cdot r_w^2} \quad (14)$$

$$k = \frac{C \cdot \mu}{2 \cdot \pi \cdot h} \cdot TM \quad \text{wobei } TM = \frac{\left(\frac{t_D}{C_D}\right)_M}{t_M} \quad (15)$$

$$s = 0,5 \cdot \ln \frac{(C_D \cdot e^{2s})_M}{C_D} \quad (16)$$

Diese Zusammenhänge gelten zunächst für flüssige Fließmedien. Sollen diese Beziehungen auf Gas als Fluid angewendet werden, muß der Druckabhängigkeit der Viskosität, der Kompressibilität und des Z-Faktors Rechnung getragen werden. Dazu müssen die von Al-Hussainy und Agarwal /9/ entwickelten sogenannten Pseudofunktionen angewendet werden.

Für die Auswertung von Slug und Puls Tests sowohl für Gas als auch für Wasser nach dem Type-Curve Verfahren wurde am Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung das interaktiv arbeitende Type-Curve-Matching-Programm "TRIAS" (Transient Interactive Analysis System) entwickelt. Dieses Programm baut auf den Ramey Type-Curves auf und beinhaltet zusätzlich die jeweiligen Druckableitungen (Abb. 6), womit eine sichere Match-Prozedur gewährleistet ist.

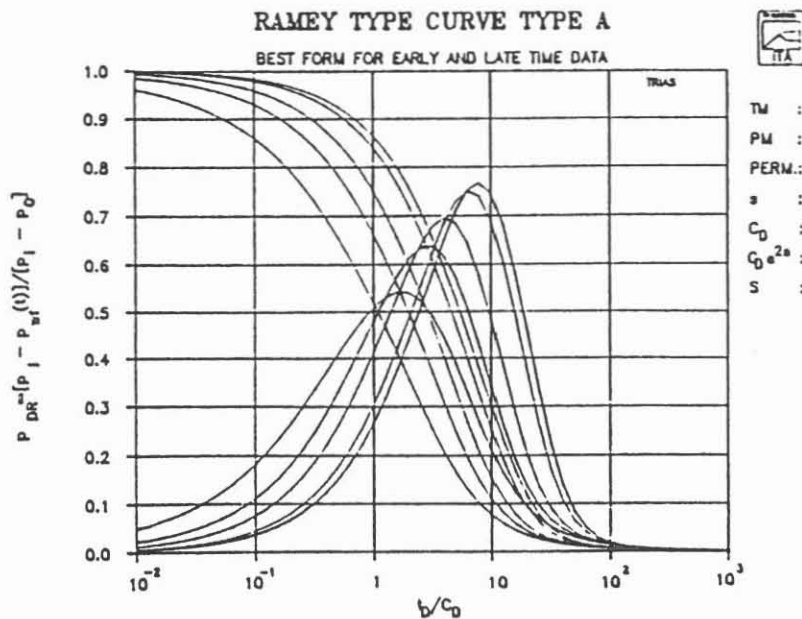


Abb. 6: Mit "TRIAS" erstellte Ramey Type-Curves, Typ A mit Druckableitung

2.4 Auswerteverfahren nach HVORSLEV

Mit der Analysenmethode nach Hvorslev /22/ lassen sich Slug und Puls Tests ebenfalls auswerten.

Die Annahme bei diesem Verfahren ist, daß die Darcy'sche Gleichung (stationärer Fluß) auf kleinste Zeitabschnitte anwendbar ist.

Dann ergibt sich folgende Auswertungsgleichung:

$$k_h = \frac{4 \cdot r_b^2 \cdot \ln \left[\frac{m \cdot h}{2 \cdot r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{m \cdot h}{2 \cdot r_w} \right)^2} \right]}{8 \cdot h \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \cdot F_m \quad (17)$$

$$\text{mit } F_m = \frac{\mu}{\rho \cdot g} \quad (\text{für Slug Tests})$$

$$F_m = \mu \cdot c_w \cdot h \cdot \left(\frac{r_w}{r_b} \right)^2 \quad (\text{für Puls Tests})$$

$$\text{und } m = \sqrt{\frac{k_h}{k_v}} = \text{Anisotropiefaktor}$$

(t_1, p_1) und (t_2, p_2) stellen 2 Punkte auf der Testkurve dar.

Der Anisotropiefaktor ist unbekannt, läßt sich jedoch bestimmen, wenn k_h bekannt ist (z.B. aus der Type-Curve Analyse). Ansonsten muß er geschätzt werden.

Mit Hilfe einer Kombination beider Auswertemethoden (Type-Curve Analyse nach Ramey /8/ und Auswertung nach Hvorslev /22/) läßt sich also der Wert (oder zumindest die Größenordnung) von m bestimmen.

Die Durchführung der Auswertung geschieht wie folgt:

In einem k_h vs t -Plot wird der k_h -Wert der Type-Curve Analyse aufgetragen. Durch Variation des m -Wertes wird sodann versucht, die $k_h(t, m)$ -Kurve der Hvorslev-Auswertung auf das gleiche Niveau, wie die horizontale k_h -Wert-Linie der Type-Curve Analyse zu bringen (siehe Abb. und Tabellen in Kap. 4).

Im Idealfall müßte die $k_h(t,m)$ -Kurve der Auswertung nach Hvorslev auch eine horizontale Linie sein (d.h. $k_h(t)=const.$), was real nicht der Fall ist, weil bei jeder Bestimmung des k_h -Wertes der Differenzenquotient gebildet wird:

$$\frac{\ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)}{t_2 - t_1} = \frac{\ln p_2 - \ln p_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \ln p}{\Delta t} \quad (18)$$

Das führt zu einer Verstärkung des Fehlers, mit dem die Meßwerte behaftet sind. Daher sollte dieser Methode nur ein halbquantitativer Charakter beigemessen werden.

2.5 Analytische Simulation des Testverlaufs

Im Gegensatz zu den bis jetzt benutzten Superpositionsmodellen wurde hier die Methode der zeitabhängigen Randbedingungen herangezogen (Correa & Ramey, 1987, /23/). Dabei wird der Drillstem Test mit Fließ- und Druckaufbauphase als ein einziger Slug Test betrachtet, bei dem sich die Bohrlochskapazitätskonstante C schlagartig mit dem Schließen des Ventils verändert.

Es gilt während der Fließzeit

$$C = C_F = \frac{\pi \cdot r_b^2}{\rho \cdot g} \quad (19)$$

und während der Schließzeit

$$C = C_S = c_w \cdot V = c_w \cdot \pi \cdot r_w^2 \cdot h \quad (20)$$

Diese Methode kann mit jedem Modell benutzt werden. In diesem Bericht wurde sie auf ein homogenes und ein "Dual-Porosity" /24/ Modell angewendet.

Die mit Hilfe der Musterkurvenanpassung bestimmten Modellparameter (p_o, p_i, k, s) können als Startwerte für eine Optimierung genutzt werden. Hierbei wird versucht, die Summe der Fehlerquadrate zu minimieren.

Das Problem lautet: Für welchen Satz von Modellparametern a_i hat folgende Funktion ihren kleinsten Wert:

$$f(\alpha_i) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \left(p(\alpha_i, t_j) - p_m(t_j) \right)^2 \quad (21)$$

wobei α_i ($i = 1, \dots, M$) den Parametersatz des theoretischen Modells darstellt,

$p(\alpha_i, t_j)$ das theoretische Modell,

$p_m(t_j)$ die Druckwerte der Meßpunkte zu den Zeitpunkten t_j .

N ist die Anzahl der Meßpunkte und

M die Anzahl der Parameter des theoretischen Modells.

Zur Lösung dieses Problems wurden zwei Suchstrategien eingesetzt:

- Das Simplex-Verfahren /25/

- Die Levenberg-Marquart Methode /26,27/

Die Anpassung erfolgte mit Hilfe eines "Dual-Porosity" Modells /24/, dessen Randbedingungen zeitabhängig sind (Correa & Ramey 1987, Bourdet). Dabei erhöht sich der Parametersatz des Modells um zwei Variablen:

$$\omega = \frac{(\Phi \cdot V \cdot c_t)_f}{(\Phi \cdot V \cdot c_t)_f + (\Phi \cdot V \cdot c_t)_m} = \frac{(C_D \cdot e^{2s})_{f+m}}{(C_D \cdot e^{2s})_f} \quad (22)$$

$$\lambda = \alpha \cdot r_w^2 \cdot \frac{k_m}{k_f} \quad (23)$$

α = "Blockshape Parameter" [m^{-2}]

ω = Storativitätsverhältnis zwischen Kluft und Matrix

λ = Interporositäts-Fließkoeffizient

Indizes: f = Kluft (fracture)

m = Matrix

Die Methode wurde auch bei Enachescu /28/ näher beschrieben.

3 Drillstem Tests in der KTB-Vorbohrung Ablauf und Quick Look Analyse

Zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit und zur Fluidgewinnung wurden in der KTB-Vorbohrung vier Drillstem Tests (DST) durchgeführt. Die ersten drei Tests (Abb. 7) wurden in den Teufen 219,8 - 257,0 m (06.11.1987), 347,8 - 385,0 m (06.11.1987) und 813,0 - 839,04 m (06.01.1988) von der Firma Baker Production Technology/Lynes als Doppelpackertests vorgenommen. Der vierte Test, ein Stützankertest, erfolgte in einer Teufe von 3442,93 - 3486,90 m (05.11.1988) durch die Firma Halliburton.

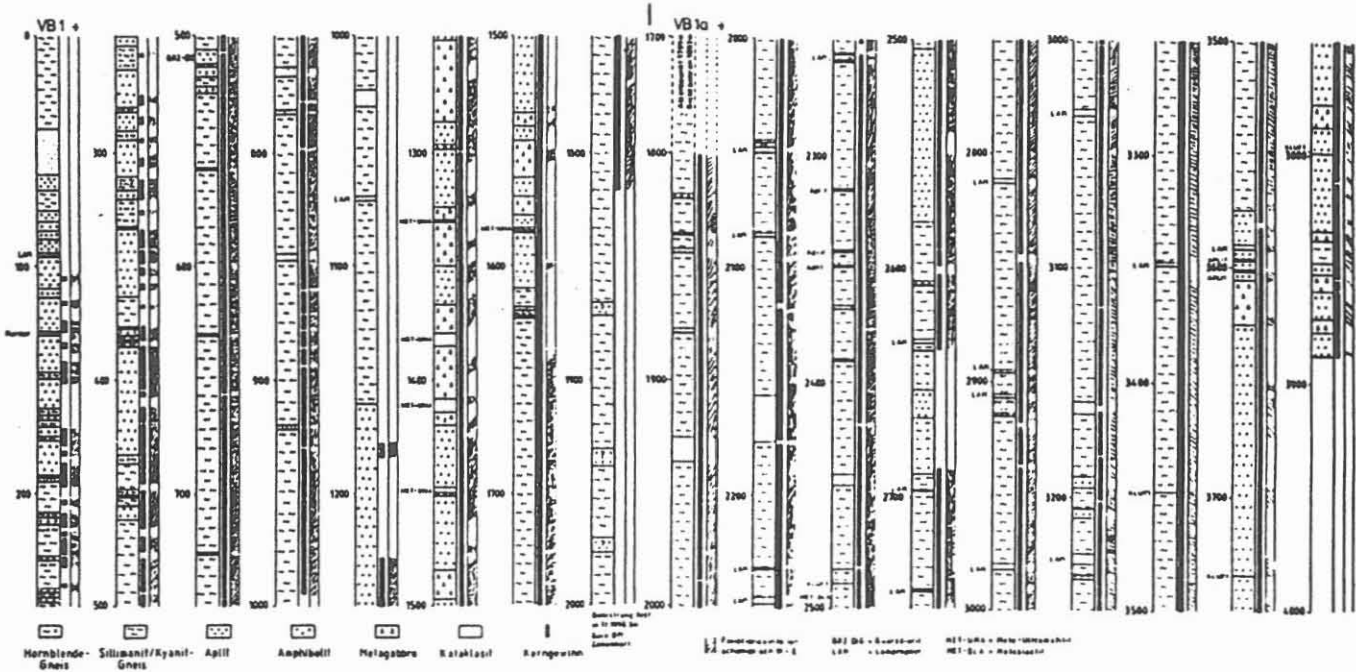


Abb. 7: Lithofaziesdiagramm der Vorbohrung /18/

1. und 2. Drillstem Test [218,8 - 257 m] und [347,8 - 385 m]

Für die ersten beiden Teufenbereiche in den Gneis und Amphibolit-zonen konnte aufgrund technischer Schwierigkeiten kein "normaler" Verlauf eines DST's aufgenommen werden. So kam es beim ersten DST u.a. zu einer Verstopfung des Ventils durch die gelierte Spülung kurz nach dem Öffnen, wodurch ein kurzzeitiger Druckimpuls ausgelöst wurde.

Die daran anschließende Druckaufbauphase (Teufe 219,81 - 257,0 m) wurde als Puls Withdrawal Test mittels Type-Curve Matching nach Ramey, Agarwal und Martin /8/ ausgewertet /10/ (Abb. 8,9).

Die Eingangsparameter waren:

abgepackerte Mächtigkeit, h_w	37,19 m
Porosität, Φ	0,04
Temperatur, T	13,8 °C
Spülungskompressibilität, c_w	$4,4 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$
Spülungsviskosität, μ_w	$9 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Spülungsdichte, ρ_w	1030 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Bohrlochradius, r_w	0,135 m
minimaler Druck im Intervall, p_0	1,48 MPa
initialer Druck, p_i	2,25 MPa

Die Auswertung ergab nach Ramey Type-Curve A:

Permeabilität, k	$45 \mu\text{D} = 4,5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$
Skinfaktor, s	-0,5
Speicherkapazität, S	$6,6 \cdot 10^{-6}$

Eine gewisse Unsicherheit liegt hier in den Angaben für die Porosität sowie den Spülungsdaten, wobei diese allerdings nur einen geringen Einfluß auf die Ergebnisse, besonders die Permeabilität und den Skinfaktor, haben. Da aber bereits der Test an sich sehr ungünstig verlaufen ist, kann zudem nur den Größenordnungen der Ergebnisse eine Aussagefähigkeit beigemessen werden.

Im zweiten Teufenbereich war aufgrund technischer Probleme des Tests keine Auswertung möglich.

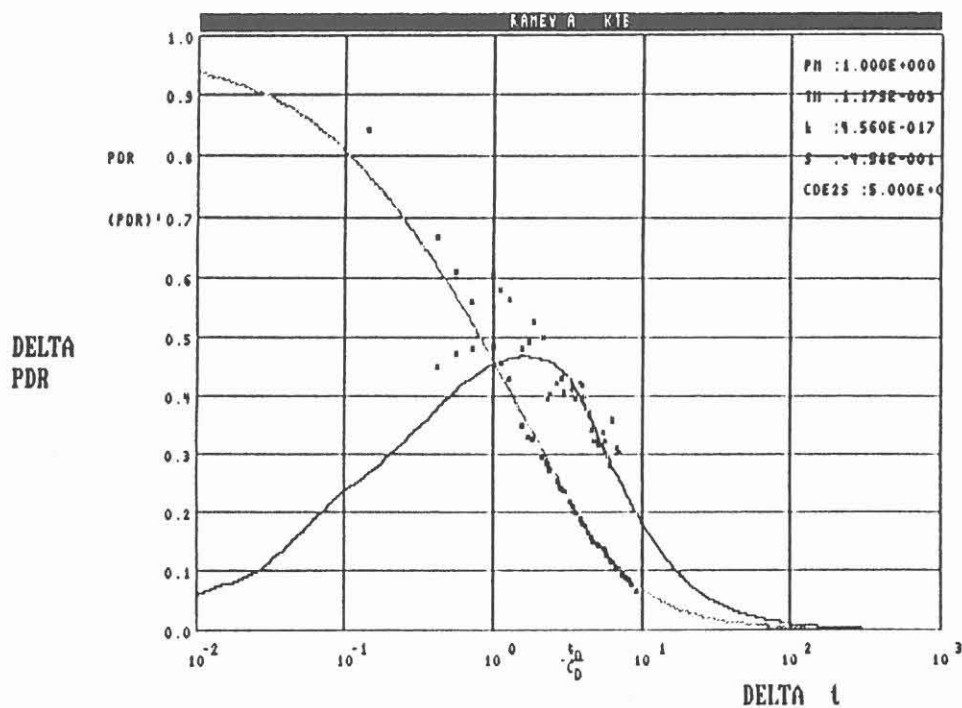


Abb. 8: Auswertung KTB-VB, 1. DST (Ramey A)

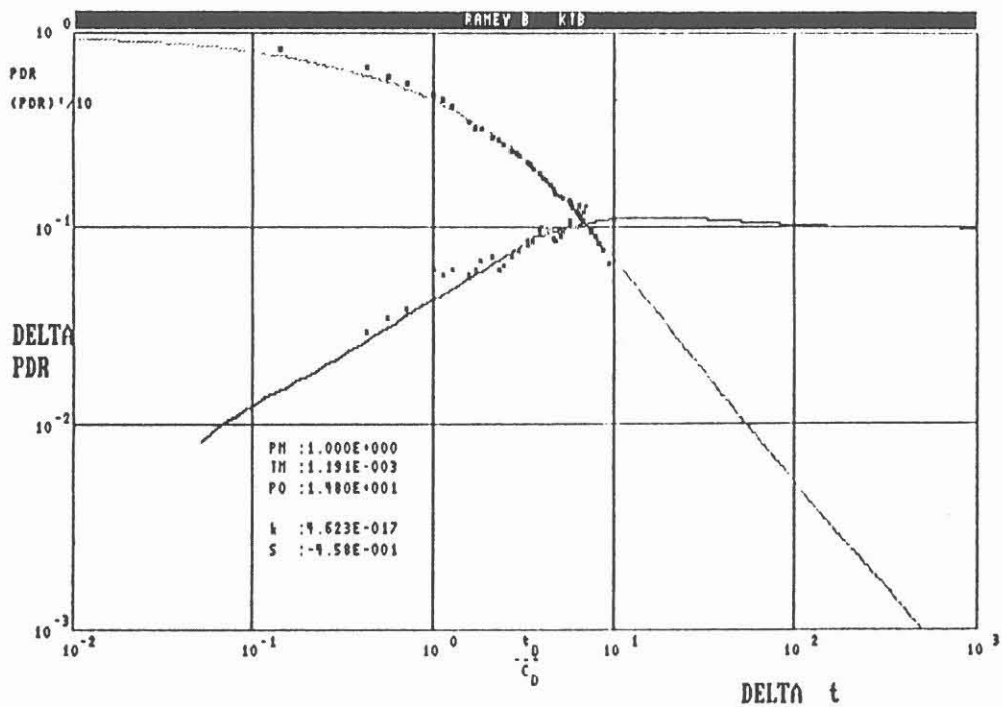


Abb. 9: Auswertung KTB-VB, 1. DST (Ramey B)

3. Drillstem Test [813 - 839 m]

Beim dritten DST im Teufenbereich von 813 - 839,04 m in der Gneis-Zone wurde nach Einbau der Testgarnitur die Bohrung mit Stickstoff beaufschlagt, der während der Fließphase stufenweise abgelassen wurde. Die darauf folgende Schließphase betrug 156,5 min. Die Auswertung der Schließphase erfolgte nach Gringarten /6/ (Abb. 10,11).

Als Eingangsparameter wurden verwendet:

abgepackerte Mächtigkeit, h_w	26,0 m
Porosität, Φ	0,05
Temperatur, T	25,9 °C
Spülungskompressibilität, c_w	$4,4 \cdot 10^{-10}$ Pa ⁻¹
Spülungsviskosität, μ_w	$3,5 \cdot 10^{-3}$ Pa·s
Spülungsdichte, ρ_w	1020 kg·m ⁻³
Bohrlochradius, r_w	0,075 m
Fließzeit, t_p	346,0 min
letzter Fließdruck, $p_{wf}(t=0)$	556,0 kPa
Fluidgewinn, Q	$6,3 \cdot 10^{-3}$ m ³
mittlere Fließrate, q	$3,03 \cdot 10^{-7}$ m ³ ·s ⁻¹

Die Auswertung ergab:

Permeabilität, k	42 μ D) = $4,2 \cdot 10^{-17}$ m ²
Skinfaktor, s	45
Speicherkapazität, S	$6,8 \cdot 10^{-6}$ - $9,5 \cdot 10^{-5}$

Aufgrund der kurzen Schließphase, der Störung der Fließphase durch die stufenweise Druckentlastung der Formation sowie einen zusätzlich durch das Schließen des Ventils hervorgerufenen Druckpuls können die erhaltenen Ergebnisse auch hier nur als Hinweis auf die Größenordnung der Durchlässigkeit der Formation in der Skinzone angesehen werden /16/.

Die Durchlässigkeit der dahinter anstehenden, nicht beeinflussten Formation könnte durchaus größer sein. Um diese zu bestimmen, hätte die Formation mittels einer spontanen, einstufigen Druckabsenkung freigefördert werden müssen.

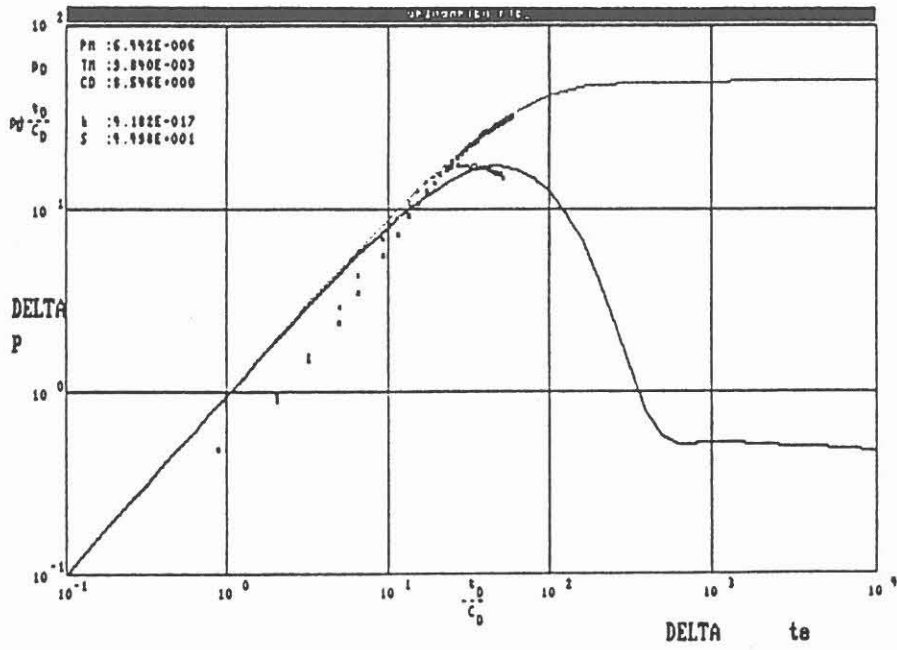


Abb. 10: Auswertung KTB-VB, 3. DST (Druck-Match)

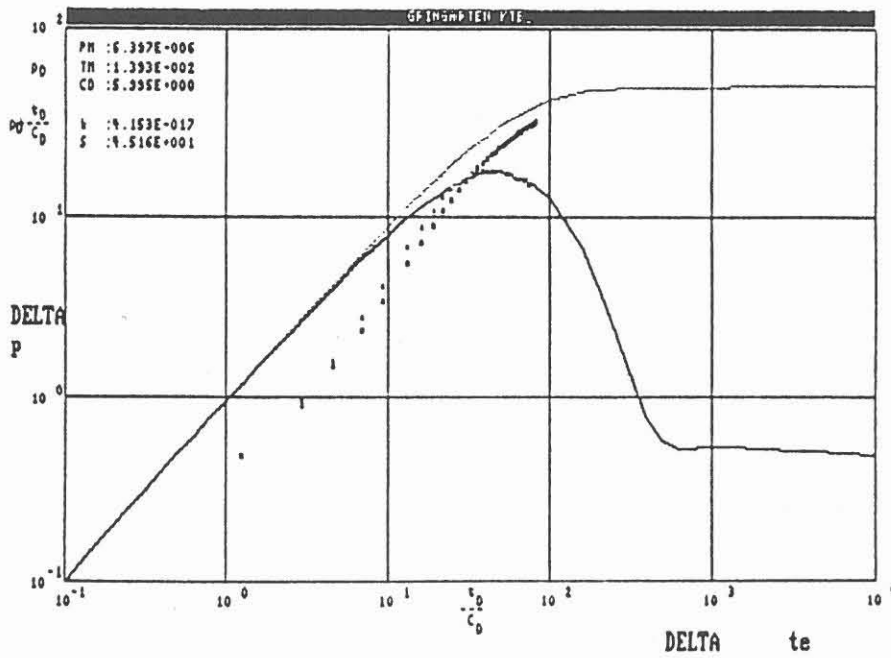


Abb. 11: Auswertung KTB-VB, 3. DZ (Druckableitungs-Match)

4. Drillstem Test [3442,9 - 3486,9 m]

Der vierte Test wurde im Gneis in einer Tiefe von 3442,93 - 3486,9 m als Stützankertest durchgeführt. In diesem Bereich wurde bei 3447 m eine ca. 1 cm weite offene Kluft angetroffen. Ein auf 3446,5 m gesetzter Fluidsampler ergab eine Probe mit 15 % CH₄, 4800 ppm He und 5300 ppm Chlorid (vgl. KTB-Tagesbericht, Berichtszeitraum 27.10.1988 6⁰⁰ - 28.10.1988 6⁰⁰).

Im Rahmen des durchgeführten Drillstem Tests konnten ebenfalls CH₄, He, N₂ etc. sowie Salzionen (Natrium, Kalzium, Strontium und Chlorid) nachgewiesen werden (vgl. KTB-Analysenbericht vom 07.11.1988).

Vor der Testdurchführung befand sich aus Sicherheitsgründen oberhalb des Full-Flow-Testers eine Wasservorlage von 1069,81 m Höhe (=12066 l). Zusätzlich wurde eine Stickstoffvorlage mit einem Kopfdruck von 15 MPa auf die Bohrung aufgegeben. Der genaue Testverlauf ist in Abb. 12 wiedergegeben.

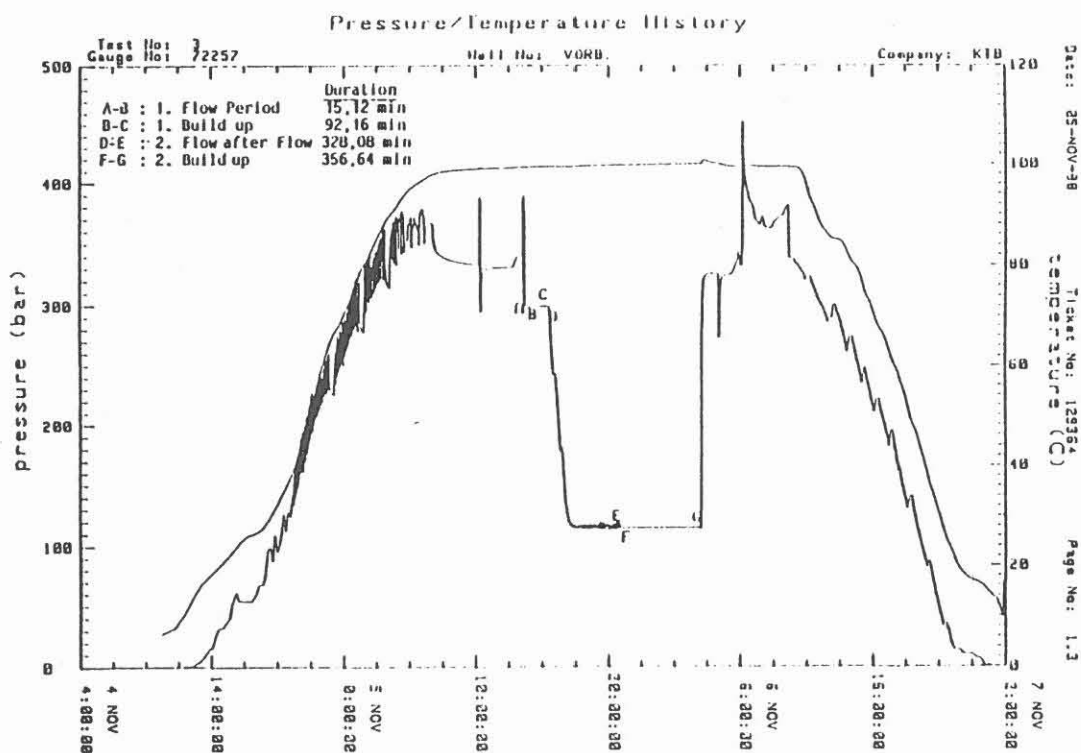


Abb. 12: Testverlauf des 4. DST in der KTB-VB (nach Halliburton)

Der Test bestand aus vier Abschnitten, der 1. und 2. Fließ- bzw. Schließphase.

Während der 1. Fließphase (Periode A-B, Abb. 12) war eine leichte Abnahme des Fließdruckes zu verzeichnen, womit ein Fluß vom Bohrloch in die Formation erklärt werden kann. Nach der ca. 15-minütigen Fließperiode folgte die 1. Schließphase (Periode 2, B-C, Abb. 12). Hier war zunächst ein Druckanstieg mit einem anschließenden Druckabfall zu beobachten, dem wiederum ein leichter Druckanstieg folgte. Dieses Verhalten läßt auf einen Zweiphasenfluß im Bohrloch (pressure hump /11/) und in der Formation schließen, bei dem sich in der Flüssigkeit gelöstes Gas entlöst und so den ersten Druckaufbau hervorruft. Diese Interpretation wird durch die Probennahme (Gas und Flüssigkeit) stark unterstützt.

Da sowohl ein Pressure-Hump als auch ein Zweiphasenfluß bei der Match-Prozedur nicht berücksichtigt werden konnten, wurde versucht, den Test mit neuem angenähertem Druckverlauf (Punkte in Abb. 13) als Puls Withdrawal Test mittels Type-Curve Matching auszuwerten.

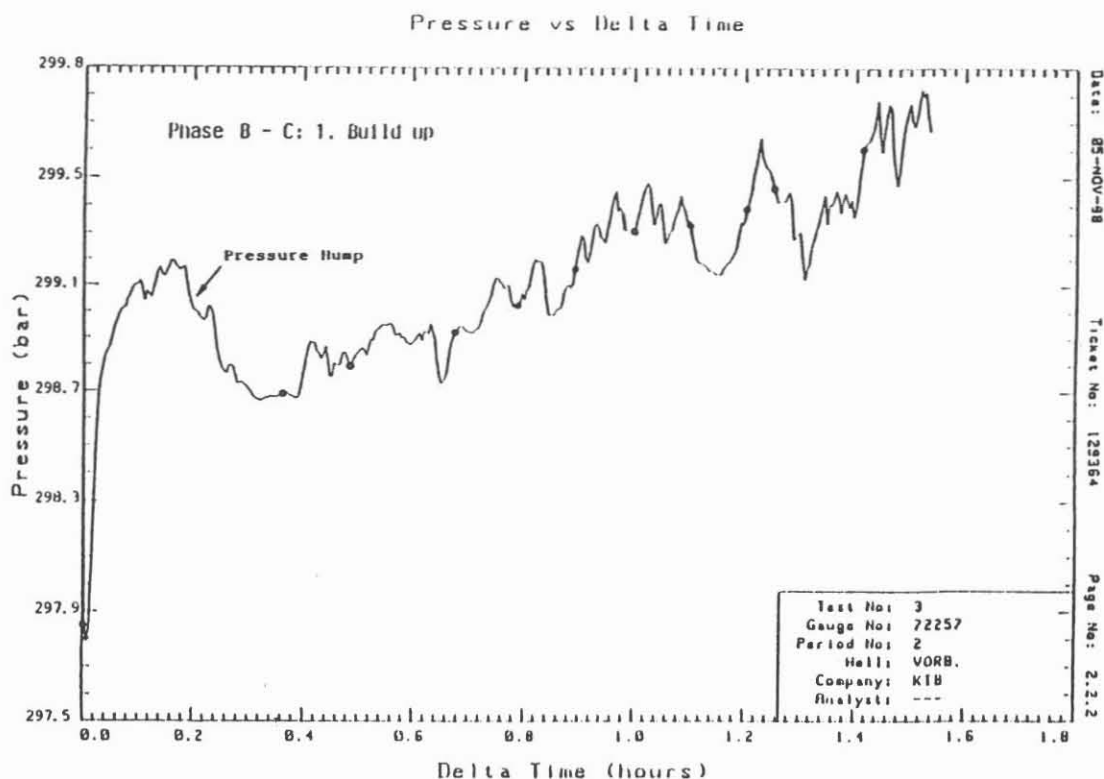


Abb. 13: 1. Schließphase des 4. DST (nach Halliburton)

Der initiale Druck wurde über eine Horner-Darstellung zu 30,02 MPa ermittelt. Für die Auswertung wurde angenommen, daß es sich bei dem Fluid überwiegend um in die Formation eingedrungene Spülung handelte.

Als Eingangsparameter wurden verwendet:

- $p_o = 29,785 \text{ MPa}$
- $p_i = 30,02 \text{ MPa}$
- $\mu = 9 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- $c_w = 4,4 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$
- $\rho = 1030 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- $\Phi = 0,01$
- $r_w = 0,0762 \text{ m}$
- $h = 43,97 \text{ m}$

Mit einem Matchparameter von $C_D \cdot e^{2s} = 10^{50}$ ergeben sich aus allen drei Ramey Type-Curves A, B und C (Abb. 14 a-c) eine Permeabilität von $k \approx 2 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2 = 200 \text{ } \mu\text{D}$ ($= 2 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), ein Skinfaktor von $s = 55,6$ und eine Speicherkapazität von $S = 1,95 \cdot 10^{-6}$.

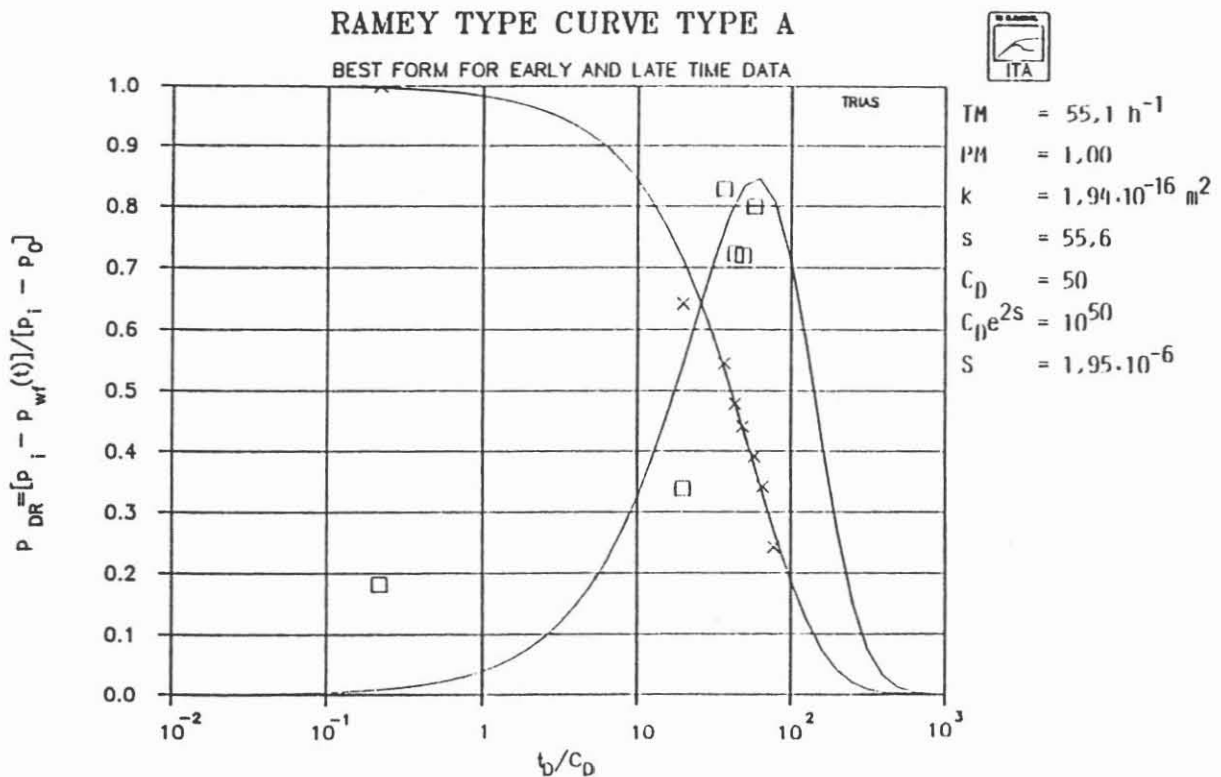


Abb. 14a: KTB-VB: 4. DST 1. Schließphase (Auswertung n. Ramey A)

RAMEY TYPE CURVE TYPE B
BEST FORM FOR LATE-TIME DATA

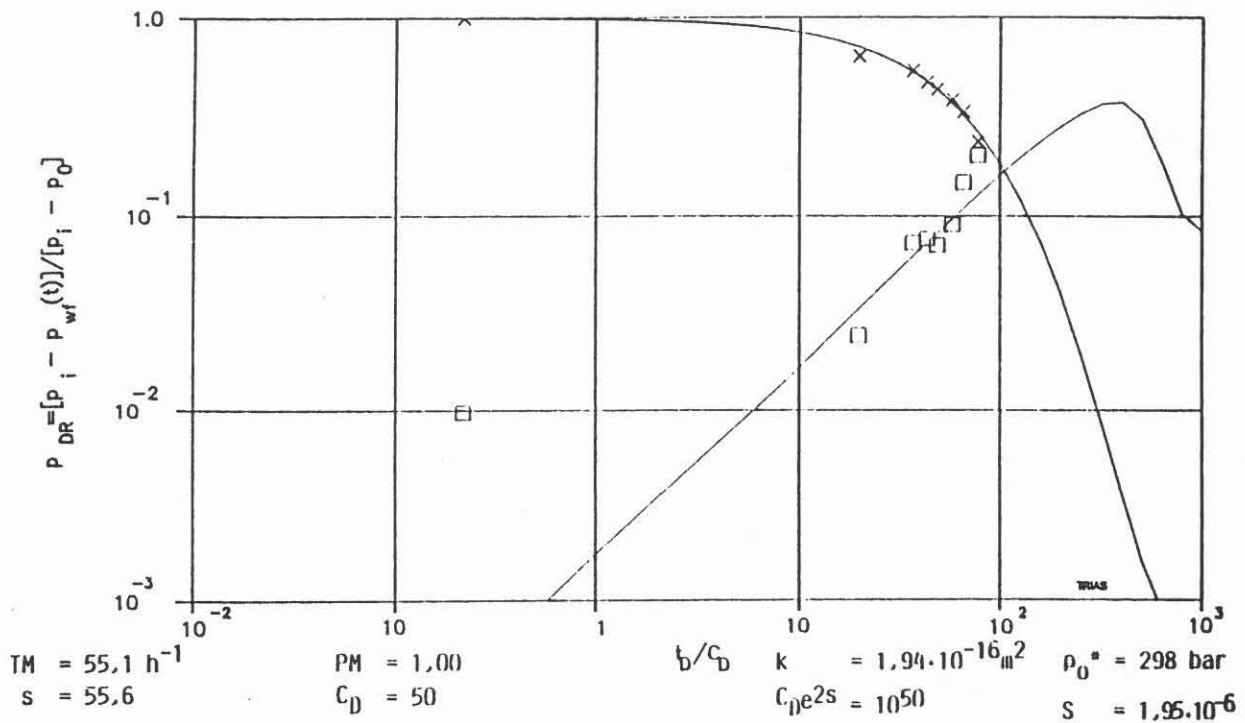


Abb. 14b: KTB-VB: 4. DST 1. Schließphase (Auswertung n. Ramey B)

RAMEY TYPE CURVE TYPE C
BEST FORM FOR EARLY-TIME DATA

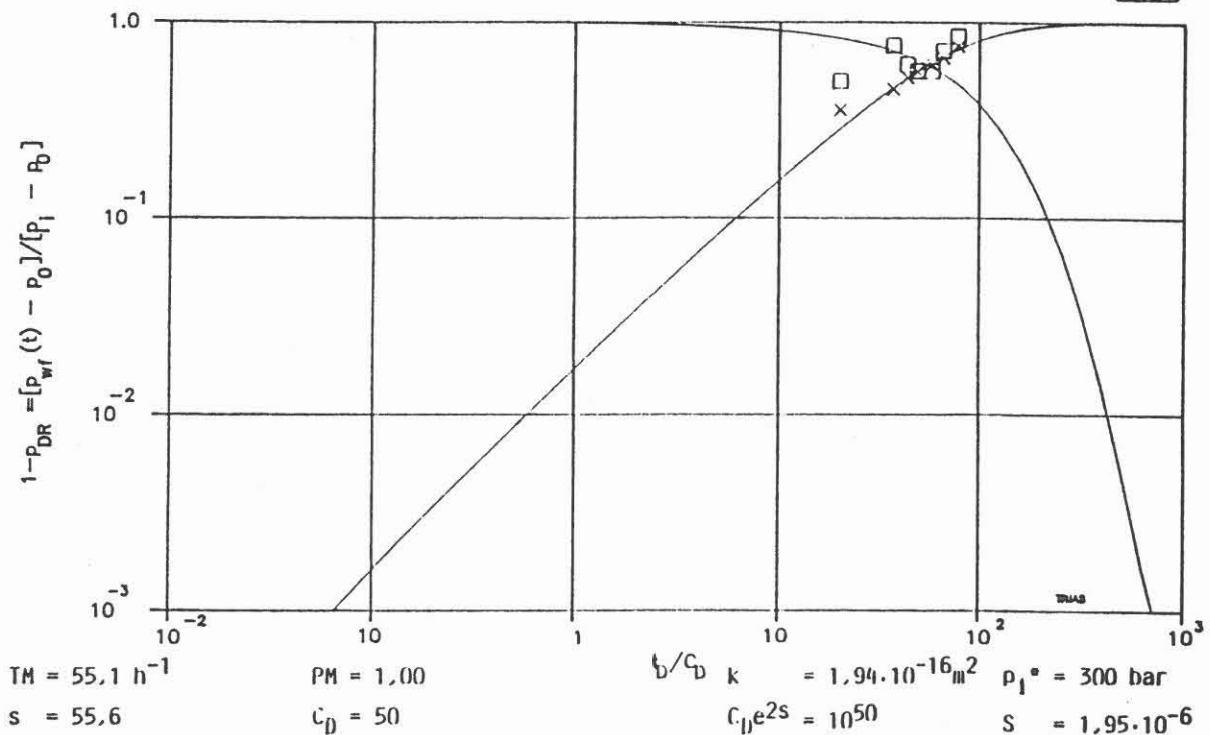


Abb. 14c: KTB-VB: 4. DST 1. Schließphase (Auswertung n. Ramey C)

Die ausgewählten Druck-/Zeitwerte lassen sich mit den Type-Curves in befriedigendem Maße matchen. Dagegen ist ein Match mit den Druck-/Zeitableitungen, was eine größere Sicherheit bei der Match-prozedur gewährleisten sollte, praktisch nicht möglich. Das mag u.a. auch am Testverlauf und der mangelnden Kenntnis verschiedener Eingangsdaten (z.B. ϕ , μ , c_w) liegen. Weiterhin wurde vorausgesetzt, daß es sich bei dem Fluid um Spülung handelte, die durch den Druckanstieg während der 1. Fließphase in die Formation eingedrungen ist. Genaue Kenntnisse über die Fluiddaten lagen nicht vor.

Während der 2. Fließphase wurde der N_2 -Druck in drei Stufen abgelaßen (siehe Abb. 15), so daß auf der Formation nur noch der Druck der Wasservorlage lastete.

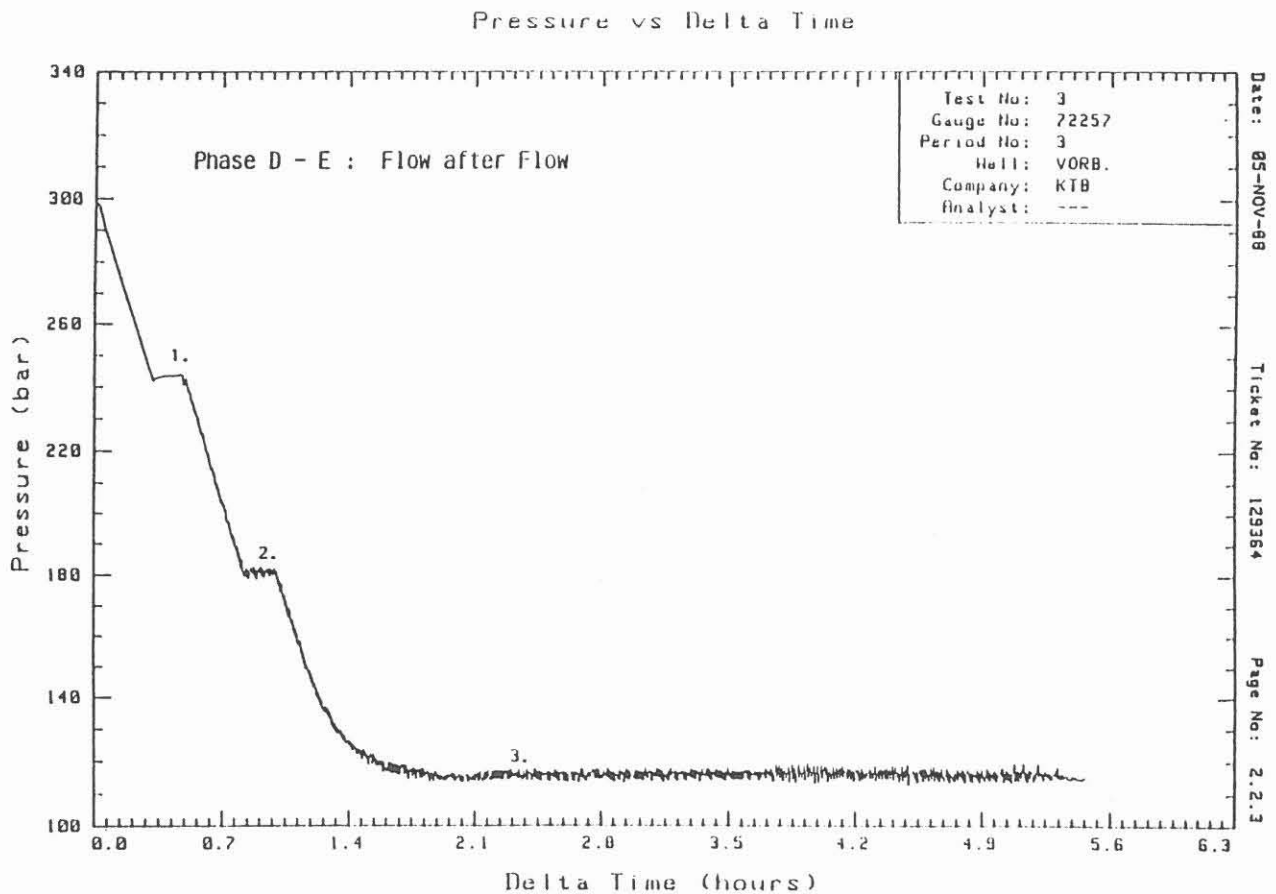


Abb. 15: 2. Fließphase des 4. DST (nach Halliburton)

Bei genauerer Betrachtung der Druckwerte während dieser Phase konnte festgestellt werden, daß der Druck über einen Zeitraum von ca. 127 min um ca. 107 kPa zunahm. Dies entspräche einem Anstieg der Wassersäule im Gestänge um 10,7 m. Bei einem Gestängeinnendurchmesser von 0,126 m ergibt sich ein Volumen von 0,133 m³, das in das Bohrloch zugeflossen sein müßte, was einer mittleren Fließrate von $q = 1,745 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 62,8 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ entspricht.

Unter Annahme stationärer Bedingungen läßt sich die Permeabilität nach Darcy für radialen Fluß berechnen gemäß:

$$k = \frac{q \cdot \mu_w \cdot \ln \frac{r_e}{r_w}}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot (p_i - p_{wf})} \quad (24)$$

Mit $p_i = 30,02 \text{ MPa}$
 $p_{wf} = 11,46 \text{ MPa}$
 $\mu_w = 9 \cdot 10^{-3} \text{ mPa} \cdot \text{s}$
 $h = 43,97 \text{ m}$
 $q = 1,745 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

ergibt sich für unterschiedliche Geometriebetrachtungen über die Ausdehnung der Einflußzone der Kluft:

$$r_e = 1 \text{ m} \quad k = 7,89 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2 = 78,9 \text{ } \mu\text{D}$$

$$r_e = 10 \text{ m} \quad k = 1,49 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2 = 149 \text{ } \mu\text{D}$$

Mit größer werdendem Einflußradius r_e steigt auch die Permeabilität. Um den Durchlässigkeitswert von 200 μD zu erreichen, der aus der 1. Schließphase mittels Type-Curve Matching ermittelt wurde, müßte der Einflußradius bei ca. 52,2 m liegen.

Es muß allerdings darauf hingewiesen werden, daß aufgrund der aus dem 4. DST erhaltenen unnormalen Druckverläufe (während der einzelnen Fließ- und Schließphasen) und den nicht bekannten weiteren Eingangsdaten eine Auswertung mit den zur Verfügung stehenden Verfahren als unsicher angesehen werden muß. Aus diesem Grund können die oben genannten Ergebnisse nur als Versuch einer Abschätzung betrachtet werden. Bei diesen schwierigen Testergebnissen ist auch bei Anwendung eines Zweiphasenflußsimulators keine bessere Interpretation der Formationsparameter erwarten.

Sowohl die Kluftindikation am Kern als auch die nachgewiesenen Fluidzutritte lassen aber erkennen, daß diese Zone einen guten Kandidaten für einen hydraulischen Test darstellt, wenn es gelingt, bei ausreichender Druckabsenkung (mehr als 4,5 MPa, wie beim DST) die Kluftzone zum Fließen zu bringen.

4 Interpretative Auswertung der DST's in der KTB-Vorbohrung

Einzelanalysen der unterschiedlichen Phasen der Drillstem Tests auf der Basis von Musterkurvenanpassungen stellen jeweils nur ein mögliches Formationsmodell für das Druck-Zeit-Verhalten der Bohrung dar.

Je nach Kenntnisstand über die Bohrung und ihr Umfeld, aus Druckaufzeichnungen in Nachbarbohrungen usw., können die gewählten Randbedingungen der Musterkurvenanpassung mehr oder weniger zutreffen. Sind nicht alle Anpassungsverfahren ausprobiert worden oder liegen unterschiedliche Lösungen vor, so ist es notwendig, die wahrscheinlichste bzw. glaubwürdigste Lösung für die gesuchten geohydraulischen Parameter zu bestimmen.

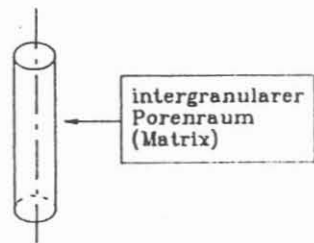
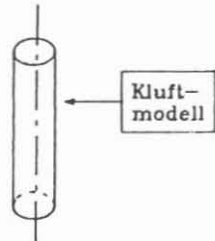
Zu diesem Zweck wird mit Hilfe sogenannter analytischer oder numerischer Bohrlochtestsimulatoren der Druckverlauf vor, während und nach dem Test unter Verwendung der o.g. Parameter simuliert. Die Güte der Simulation entscheidet dann über die Festlegung der gesuchten Größen.

Analytische wie auch numerische Bohrlochtestsimulatoren verwenden entweder homogene oder heterogene Formationsmodelle. Homogen bedeutet in diesem Zusammenhang nicht, daß Porosität und Permeabilität der Formation überall gleich sind. Es bedeutet vielmehr, daß der Fluß in oder aus dem Bohrloch über ein gleichartiges Porenraumsystem (Klüfte, intergranularer Porenraum) erfolgt /29/.

Bei heterogenen Modellen unterscheidet man zwei Fälle (Abb. 16):

- a) Die Klüfte speisen das Bohrloch und die intergranularen Poren dienen lediglich als Speicher der Klüfte (Dual Porosity)
- b) Klüfte und Matrix speisen das Bohrloch und kommunizieren miteinander (Dual Permeability)

Homogenes Modell



Heterogenes Modell

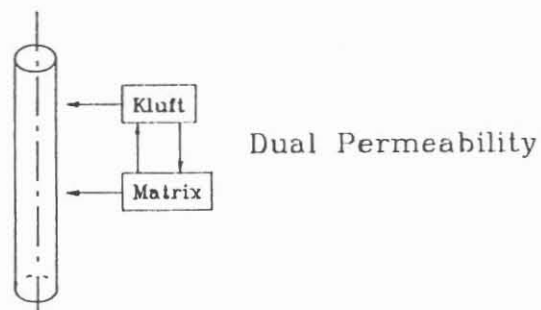
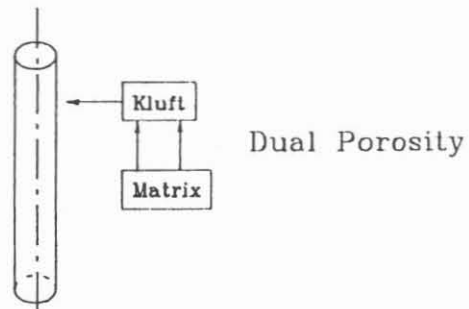


Abb. 16: Prinzipdarstellung zweier Formationsmodelle für die Bohrlochtestsimulation

Darüber hinaus gibt es auch sogenannte Mehrschichtmodelle, die bei stark gegliederten geologischen Einheiten Verwendung finden. Im Fall der Kristallinbohrung mit der wenig ausgeprägten Gliederung wurde davon kein Gebrauch gemacht.

Der Einsatz von Lagerstättensimulatoren wie z. B. des 3-D Mehrphasenflußsimulators ECLIPSE kann ebenfalls erwogen werden, erfordert jedoch einen erheblich größeren Zeit-, Daten- und Rechenaufwand, ohne damit eine bessere Feinauflösung im bohrlochnahen Bereich zu liefern /14/.

Die Differentialgleichungen, die das Strömen der Flüssig- und Gasphasen sowie das Speichern in Matrix und Klüften beschreiben (Abb. 17), werden nach einem Verfahren finiter Differenzen nacheinander oder simultan gelöst /12/.

$$\text{Flüssigkeit 1: } \nabla \left[\frac{kk_{r1}}{B_1 \mu_1} (\nabla p_1 - \gamma_1 \nabla D) \right] - q_1 - q_{mk1} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_1}{B_1} \right)$$

$$\text{Flüssigkeit 2: } \nabla \left[\frac{kk_{r2}}{B_2 \mu_2} (\nabla p_2 - \gamma_2 \nabla D) \right] - q_2 - q_{mk2} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_2}{B_2} \right)$$

$$\text{Gas : } \nabla \left[\frac{kk_{rg}}{B_g \mu_g} (\nabla p_g - \gamma_g \nabla D) + R_s \frac{kk_{r2}}{B_2 \mu_2} (\nabla p_2 - \gamma_2 \nabla D) \right] -$$

$$(q_g + R_s q_2) - (q_{mkg} + R_s q_{mk2}) = \frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\frac{S_g}{B_g} + \frac{R_s S_2}{B_2} \right) \right]$$

Abb. 17: Partielle Differentialgleichungen für 3-Phasen Simulator

Im vorliegenden Fall wurden der 1. und 3. DST diesem Bewertungsverfahren unterzogen /28/.

4.1 Simulation des 1. DST

Der erste Test in der KTB-VB (Teufenabschnitt 219,81 - 257,0 m) zeigte aufgrund technischer Schwierigkeiten bei der Durchführung einen vom "normalen" Drillstem Test abweichenden Verlauf. Kurz nach dem Öffnen des Ventils kam es zu einer Verstopfung dieser Einrichtung durch gelierte Spülung.

Die daran anschließende Druckaufbauphase konnte als Puls Withdrawal Test ausgewertet werden.

Die Eingangsparameter waren:

abgepackerte Mächtigkeit, h_w	37,19 m
Porosität, Φ	0,04
Temperatur, T	13,8 °C
Spülungskompressibilität, c_w	$4,4 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$
Spülungsviskosität, μ_w	$9 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Spüldichte, ρ_w	1030 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Bohrlochradius, r_w	0,135 m

Die Musterkurvenanpassung nach den Ramey Type-Curves /8/ für frühe (C), späte (B) und frühe bis späte (A) Testphasen hatte eine scheinbar gute Anpassung der gemessenen Druckverläufe erbracht. Dies zeigen die Abb. 18, 19 und 20 sowie die Tabelle 1.

Die hydraulischen Parameter, bestimmt unter Annahme eines homogenen, kontinuierlichen Porenraumsystems und unter Einschluß eines bohrlochnahen veränderten Randbereichs unterscheiden sich nicht wesentlich. Betrachtet man jedoch die Anpassungsgüte der Musterkurven (Abb. 21), so erkennt man, daß die Genauigkeit lediglich zwischen 20 und 40 % liegt. Es wurde daher versucht, die Anpassungsgüte des Puls Withdrawal Tests durch eine Analyse nach Hvorslev /22/ zu verbessern (s. Abschnitt 2.1.2, Seite 14/15). In den Abb. 22, 23 und 24 ist der Vergleich zwischen der Musterkurvenanalyse nach Ramey und der analytischen Auswertung nach Hvorslev gegenübergestellt. Der Permeabilitätskoeffizient k_h nach Hvorslev für ein isotropes Medium (Anisotropiefaktor = 1) stimmt recht gut mit den von Ostrowski /10/ ermittelten Daten überein (Abb. 25).

Eine 3-D Darstellung des Druckverlaufs über Ort und Zeit zeigt, daß der Einwirkungsbereich dieses Tests ca. 3,1 m betrug (Abb. 26).

Tabelle 1: Auswertung des 1. DST

Identifikation	
Bezeichnung der Bohrung	: KTB VB
Testbezeichnung	: DST 1
Testart	: Pulse- Withdrawal
Ausführungsdatum	: 06.11.87

Bohrparameter	
Bohrdurchmesser (dw)	[m] : 0.27
Länge der Teststrecke (h)	[m] : 37.19
Bohrteufe	[m] : 257.00
Lage der Teststrecke	[m] : 219.81 - 257.00

Testparameter	
p ₀	[bar] : 14.35
p _i	[bar] : 22.45
Viskosität (μw)	[Pa*s] : 9.000E-03
Dichte (rho)	[kg/m ³] : 1.030E+03
Kompressibilität (cw)	[1/Pa] : 4.400E-10
Bohrlochkapazitätst. (C)	[m ³ /Pa] : 9.364E-10
m = √(Kh/Kv) (nach HVORSLEV)	: 1.000E+00
Porosität (φ)	: 0.040

Ergebnisse der Testauswertung			
Auswertung nach RAMEY et al. (1975), OSTROWSKI et al. (1989)			
	RAMEY A	RAMEY B	RAMEY C
CD*e ^{2s}	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
(tD/CD)/t	1.59E-03	1.58E-03	1.58E-03
K *)	5.73E-17	5.72E-17	5.72E-17
T **)	2.13E-15	2.12E-15	2.13E-15
s	- 0.11	- 0.11	- 0.11
*) - K-Wert des verfilterten Schichtpaketes [m ²] **) - Transmissivität des verfilterten Schichtpaketes [m ³]			

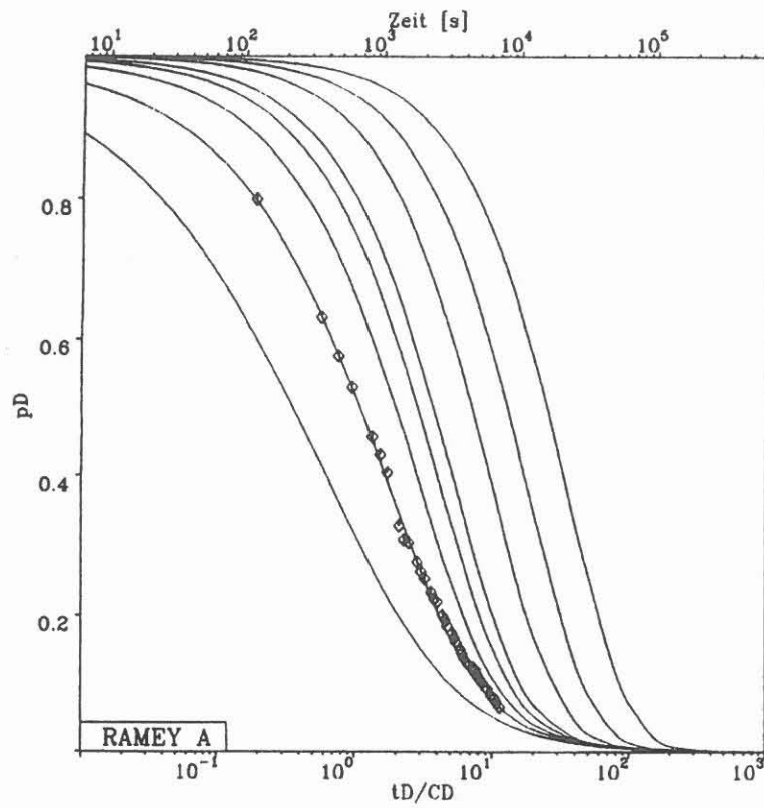


Abb. 18: Musterkurvenanalyse des 1. DST nach Ramey
(Puls Withdrawal Test)

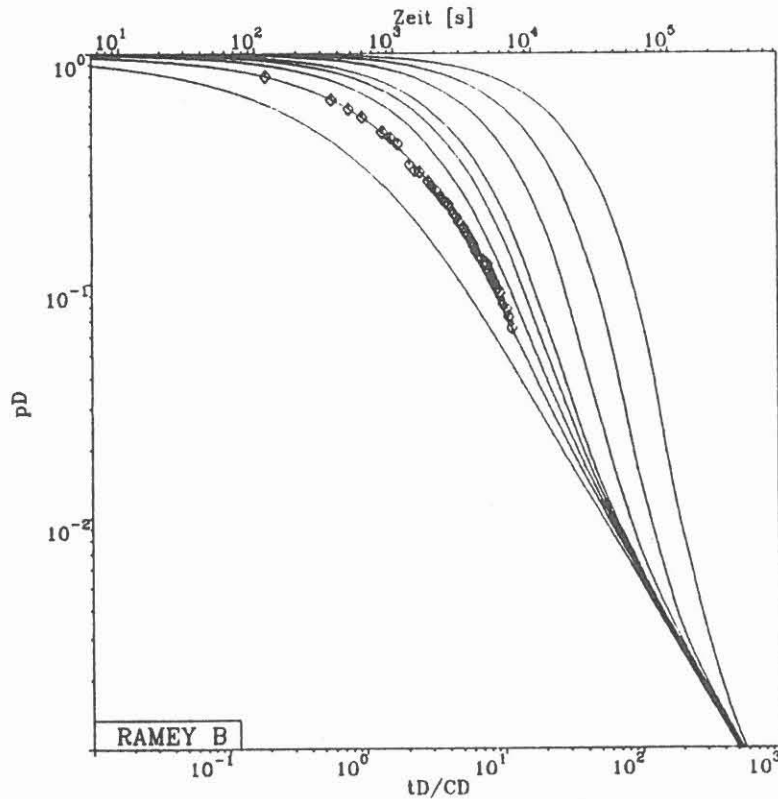


Abb. 19: Musterkurvenanalyse der späten Phase des 1. DST
(Puls Withdrawal Test)

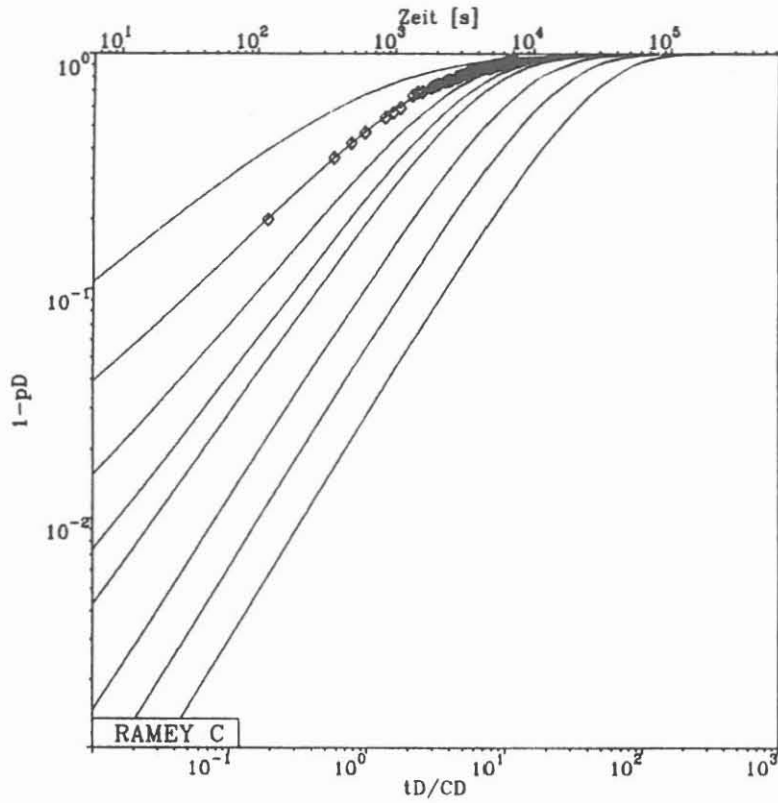


Abb. 20: Musterkurvenanalyse der frühen Phase des 1. DST (Puls Withdrawal Test)

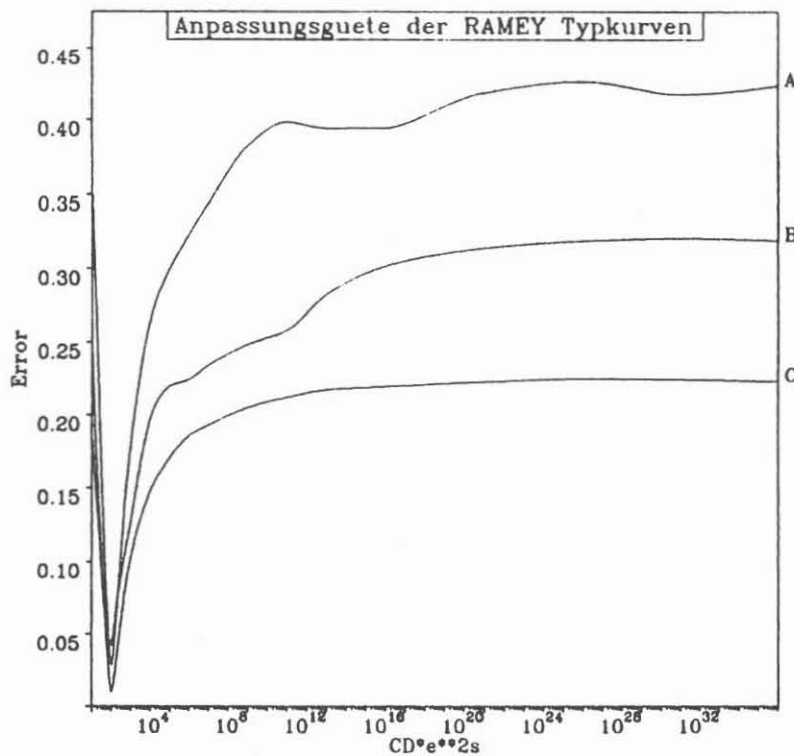
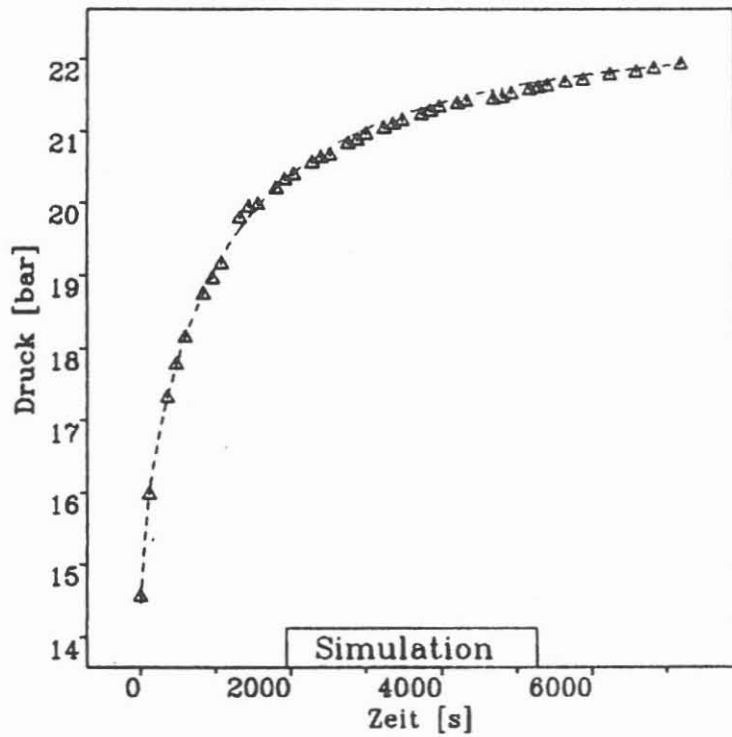
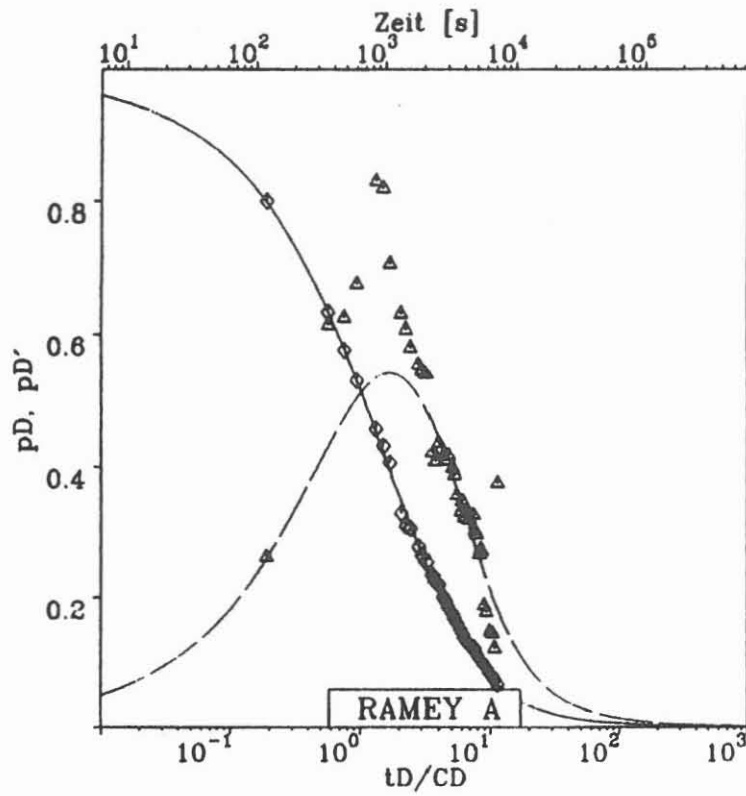
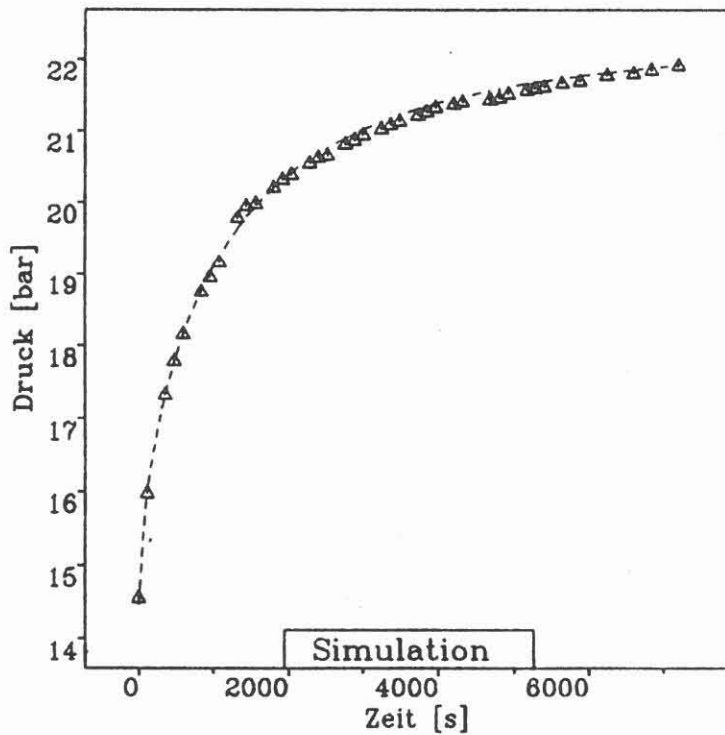
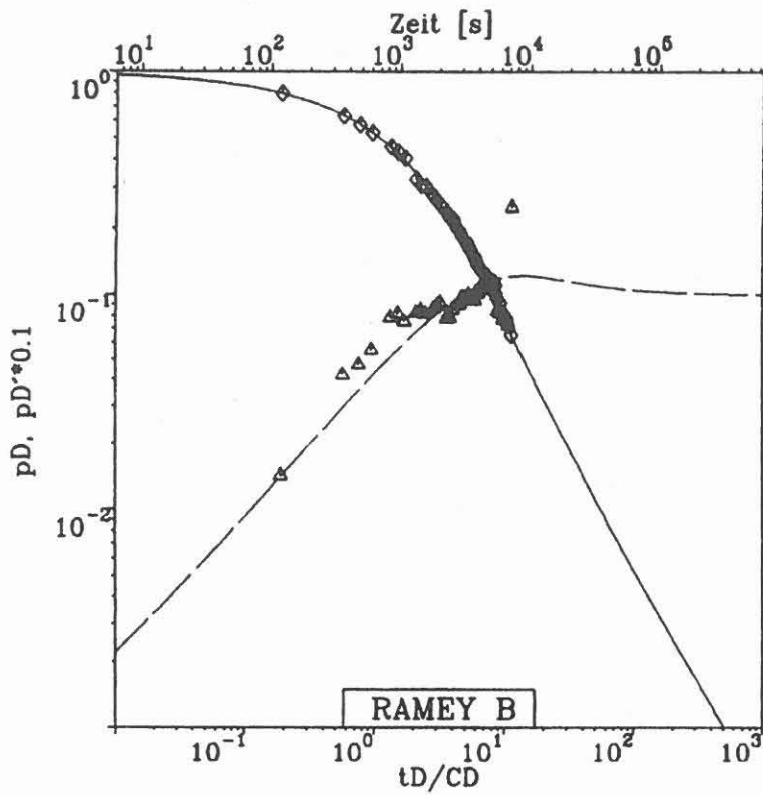


Abb. 21: Anpassungsgüte der Musterkurvenanalyse nach Ramey für die frühe bis späte Testphase



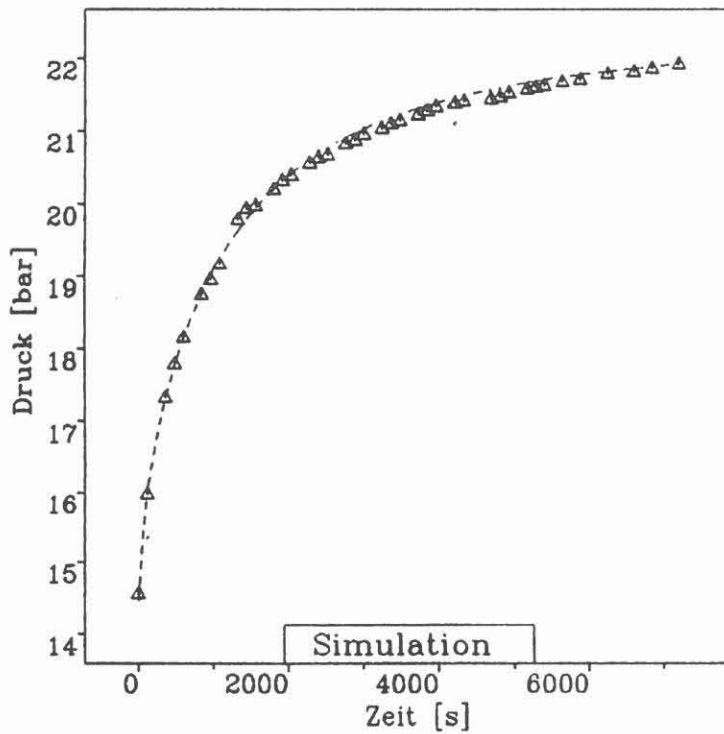
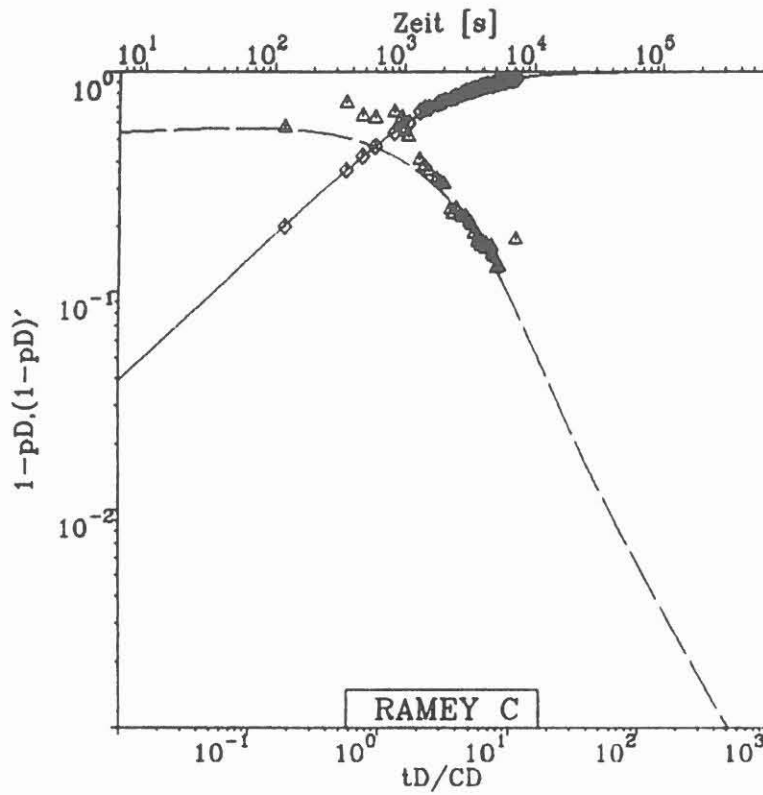
$CD^*e^{**2s} = 1.000E+01$	$s = -00.112$
$C = 9.384E-10$	$K = 5.737E-17$

Abb. 22: Vergleich zwischen Musterkurvenanalyse nach Ramey A einschließlich der Druckableitung und der Simulation nach Hvorslev



$CD^*e^{*2s} = 1.000E+01$ $s = -00.112$
 $C = 9.364E-10$ $K = 5.723E-17$

Abb. 23: Vergleich zwischen Musterkurvenanalyse nach Ramey B einschließlich der Druckableitung und der Umrechnung der Musterkurve in Druck-Zeitkoordinaten



$CD^*e^{**2s} = 1.000E+01$	$s = -00.112$
$C = 9.364E-10$	$K = 5.728E-17$

Abb. 24: Vergleich zwischen Musterkurvenanalyse nach Ramey C einschließlich der Druckableitung und der Umrechnung der Musterkurve in Druck-Zeitkoordinaten

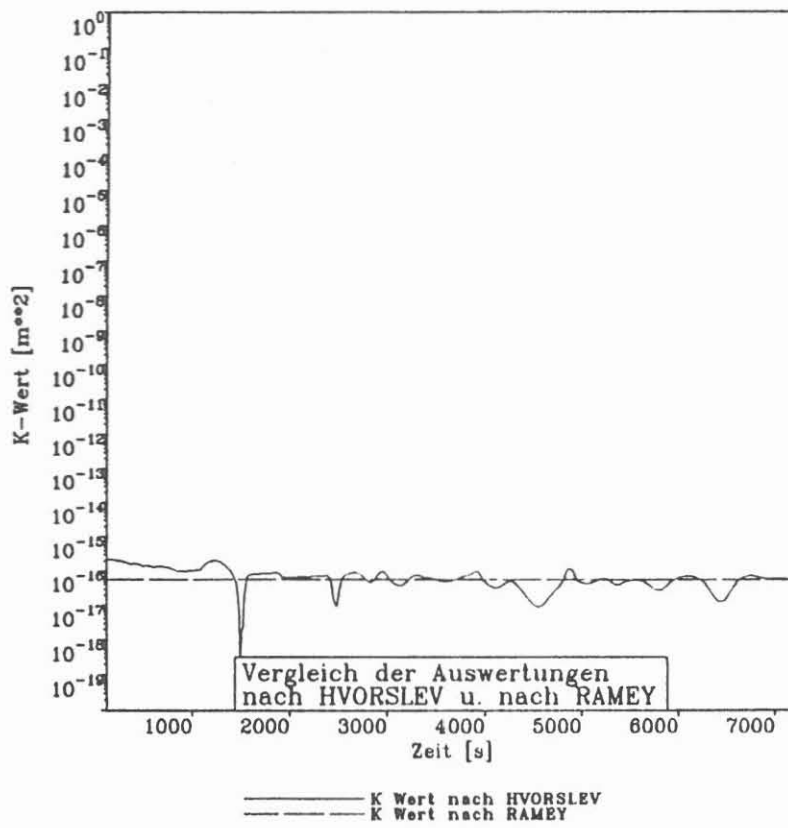


Abb. 25: Permeabilitätsbestimmung nach dem Formationsmodell von Ramey und Hvorslev

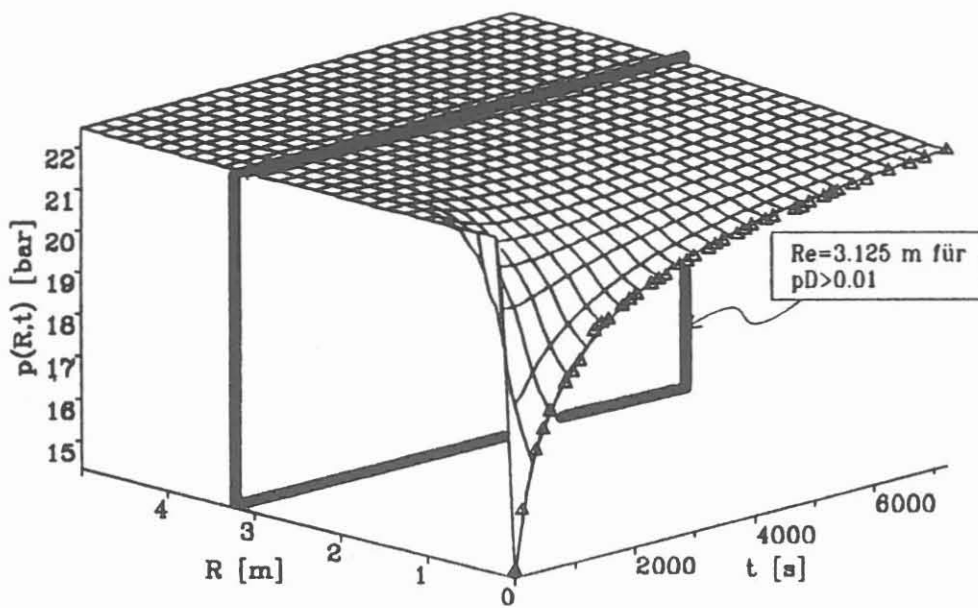


Abb. 26: 3-D Simulation, Ramey B

Weiterhin wurde versucht, die Matchgenauigkeit zu erhöhen, indem eine analytische Simulation mit einem homogenen Formationsmodell nach der Methode der zeitabhängigen Randparameter von Correa und Ramey /23/ durchgeführt wurde. Damit läßt sich die Anpassung der Anfangsdruckwerte erheblich verbessern, die Hauptphase des Puls Withdrawal Druckanstiegs wurde jedoch auch mit diesem Modell nicht perfekt wiedergegeben (Tabelle 2, Abb. 27).

Tabelle 2: Simulation nach der Methode der zeitabhängigen Randparameter nach Correa und Ramey /23/
Homogene Formation

Name der Bohrung	:	KTB VB
Name des Tests	:	DST 1
Testart	:	Pulse Withdrawal
Teststrecke	:	219.81 - 257.00
h _w	[m] :	37.19
r _w	[m] :	00.135
rho	[kg/m ³] :	1030.0
μ _w	[Pa*s] :	9.00E-03
c _w	[1/Pa] :	4.40E-10
Modell	:	Homogen
s	:	-0.11
K	[m ²] :	5.72E-17
ø	:	0.04
pi	[Pa] :	2.245E+06
p ₀	[Pa] :	1.435E+06

Die Modellparameter stammen aus der Typkurvenanpassung nach Ramey, Agarwal und Martin /8/, mit Ableitungen nach Ostrowski und Kloska /20/.

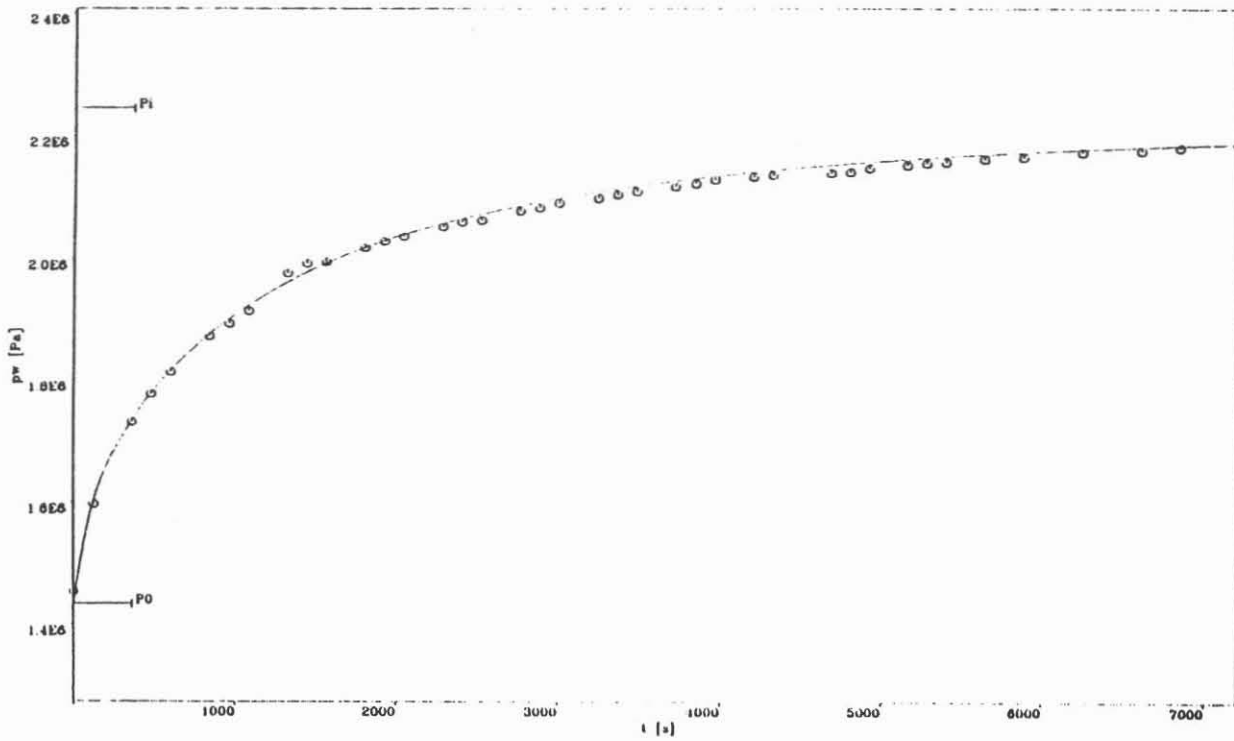


Abb. 27: Simulation der Druckaufbauphase des 1. DST nach der Methode der zeitabhängigen Randparameter von Correa und Ramey /23/, Homogene Formation

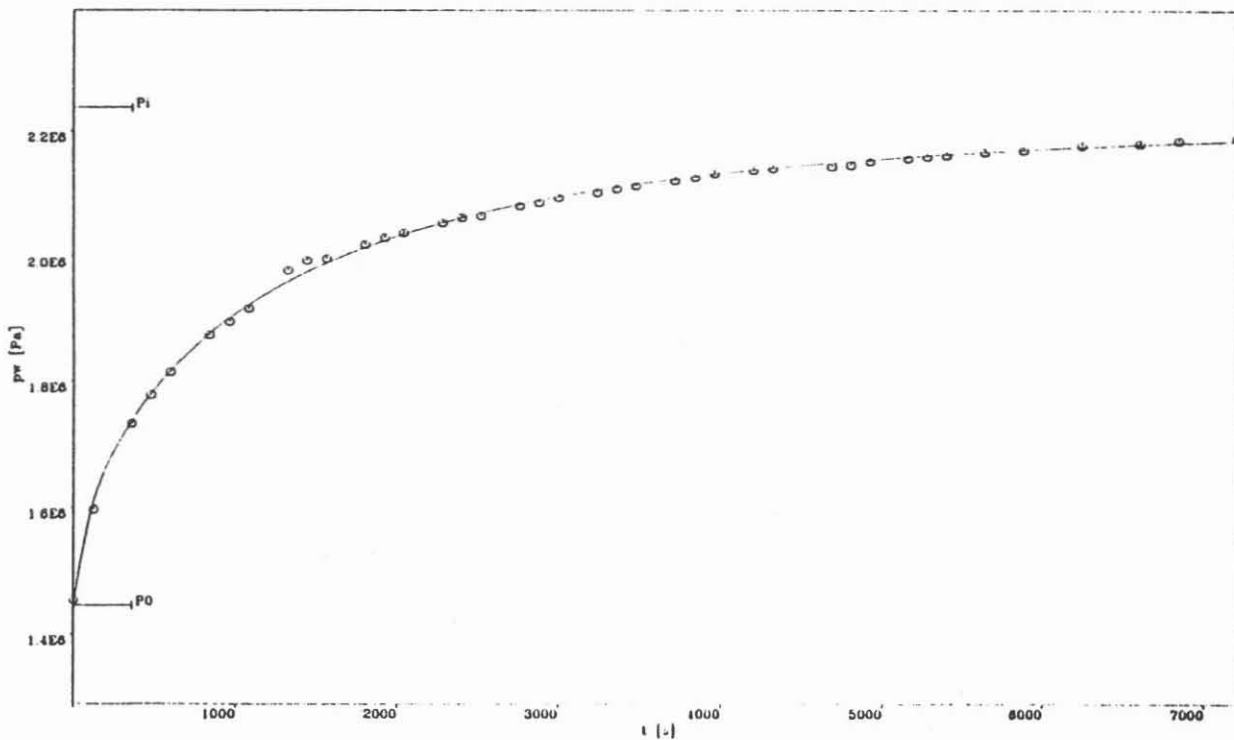


Abb. 28: Simulation des Druckaufbaus des 1. DST nach der Methode Correa und Ramey für eine heterogene Formation /24/, Optimierung der Kurvenform nach Nelder u. Mead /25/

Zur Optimierung des Druckverlaufs wurde eine analytische Simulation nach Correa und Ramey mit einem Dual-Porosity Formationsmodell /24/ versucht. Die Optimierung wurde mit einem Rechenprogramm nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate unter Benutzung eines polytropen Suchalgorithmus nach Nelder und Mead /25/ erzielt.

Das Ergebnis dieses Simulationsverlaufs ist in Abb. 28 und Tabelle 3 dokumentiert.

Tabelle 3: Simulation nach der Methode der zeitabhängigen Randparameter von Correa und Ramey /23/
Heterogene Formation

Name der Bohrung	:	KTB VB
Name des Tests	:	DST 1
Teststart	:	Pulse Withdrawal
Teststrecke	:	219.81 - 257.00
h	[m] :	37.19
rw	[m] :	0.135
rho	[kg/m ³] :	1030.0
μ_w	[Pa*s] :	9.00E-03
cw	[1/Pa] :	4.40E-10
Modell	:	Dual Porosity Transient Interporosity Flow
s	:	-0.108
K	[m ²] :	5.63E-17
LAMBDA	:	9.79E-03
Ω	:	9.96E-01
\emptyset	:	0.04
pi	[Pa] :	2.237E+06
p0	[Pa] :	1.446E+06

Obwohl in den Hauptparametern, der Permeabilität k , des Skinfaktors s und des statischen Druckniveaus p_i , keine wesentlichen Unterschiede zu vermerken sind, ergibt sich eine Verbesserung in der Kurvenanpassung.

Für eine zuverlässige Beurteilung des dualen Porositätsmodells ist jedoch die Testdauer zu kurz.

Damit ergeben sich die folgenden wahrscheinlichsten Auswertungsparameter für den ersten Drillstem Test:

Tabelle 4: Auswertung des 1. DST

Teufenintervall	: 219,81 - 257,0 m
Lithologie	: Sillimanit-Gneis mit Wechsellagerungen
Porosität	: 0,04 (aus Kernuntersuchungen)
Mittlere Durchlässigkeit	: 56,3 μD ($56,3 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$)
Skinfaktor	: -0,108
Initiales Druckniveau	: 2,237 MPa

Die Durchlässigkeit liegt hier etwas höher als die von Schopper und Mitarbeitern /32/ bestimmten Maximalwerte von 20 μD an Bohrkernen aus dem Teufenbereich zwischen 100 und 450 m und deutet somit auf geringes, aber merkbares Vorkommen von Klüften hin. Das Bohrloch weist einen fast ungestörten Zustand auf (Skinfaktor nahe Null) und das Druckniveau ist hydrostatisch.

4.2 Simulation des 3. DST

Beim dritten Drillstem-Test (Teufenabschnitt 813,0 - 839,04 m in der Gneis-Zone) wurde nach dem Einbau der Testgarnitur die Bohrung mit Stickstoff beaufschlagt, der während der Fließphase stufenweise abgelassen wurde. Anschließend wurde die Testgarnitur geschlossen und der Druckaufbau gemessen.

Als Eingangsparameter wurden verwendet:

abgepackerte Mächtigkeit, h_w	26,0 m
Porosität, Φ	0,05
Temperatur, T	25,9 °C
Spülungskompressibilität, c_w	$4,4 \cdot 10^{-10}$ Pa ⁻¹
Spülungsviskosität, μ_w	$3,5 \cdot 10^{-3}$ Pa·s
Spüldichte, ρ_w	1020 kg·m ⁻³
Bohrlochradius, r_w	0,075 m
Fließzeit, t_p	346,0 min
letzter Fließdruck, $p_{wf}(t=0)$	556,0 kPa
Fluidgewinn, Q	$6,3 \cdot 10^{-3}$ m ³
mittlere Fließrate, q	$3,03 \cdot 10^{-7}$ m ³ ·s ⁻¹

Die Auswertung der Schließphase erfolgte anhand der Mehrfachraten-Musterkurven (Superposition) nach Gringarten /6/ und Bourdet /21/, wie in Abschnitt 2.1.2, Abb. 3, S. 7 gezeigt. Es wurde ein homogenes Modell verwendet.

Mit demselben Parametersatz wurde eine analytische Simulation mit einem homogenen Formationsmodell nach der Methode der zeitabhängigen Randbedingungen von Correa und Ramey gerechnet (Tabelle 5, Abb. 29).

Anschließend wurden die Modellparameter der Simulation mit einem heterogenen Formationsmodell /24/ nach der Regressionsmethode von Levenberg-Marquart /26,27/ optimiert (Tabelle 6, Abb. 30).

Tabelle 5: Simulation nach der Methode der zeitabhängigen Randparameter nach Correa und Ramey
Homogene Formation

Name der Bohrung	:	KTB VB
Name des Tests	:	DST 3
Teststrecke	:	813.00 - 839.04
h	[m] :	26.00
rw	[m] :	00.075
rho	[kg/m ³] :	1020.0
μ_w	[Pa*s] :	3.50E-03
cw	[1/Pa] :	4.40E-10
Modell	:	Homogen
s	:	4.50E+01
K	[m ²] :	4.20E-17
ϕ	:	0.05
pi	[Pa] :	7.000E+06
p0	[Pa] :	5.390E+05

Tabelle 6: Simulation nach der Methode der zeitabhängigen Randparameter nach Correa und Ramey
heterogene Formation

Name der Bohrung	:	KTB VB
Name des Tests	:	DST 3
Teststrecke	:	813.00 - 839.04
h	[m] :	26.00
rw	[m] :	00.075
rho	[kg/m ³] :	1020.0
μ_w	[Pa*s] :	3.50E-03
cw	[1/Pa] :	4.40E-10
Modell	:	Dual Porosity Transient Interporosity Flow
s	:	5.00
K	[m ²] :	6.57E-18
LAMBDA	:	2.00E-04
Ω	:	7.10E-01
ϕ	:	0.05
pi	[Pa] :	7.700E+06
p0	[Pa] :	5.390E+05

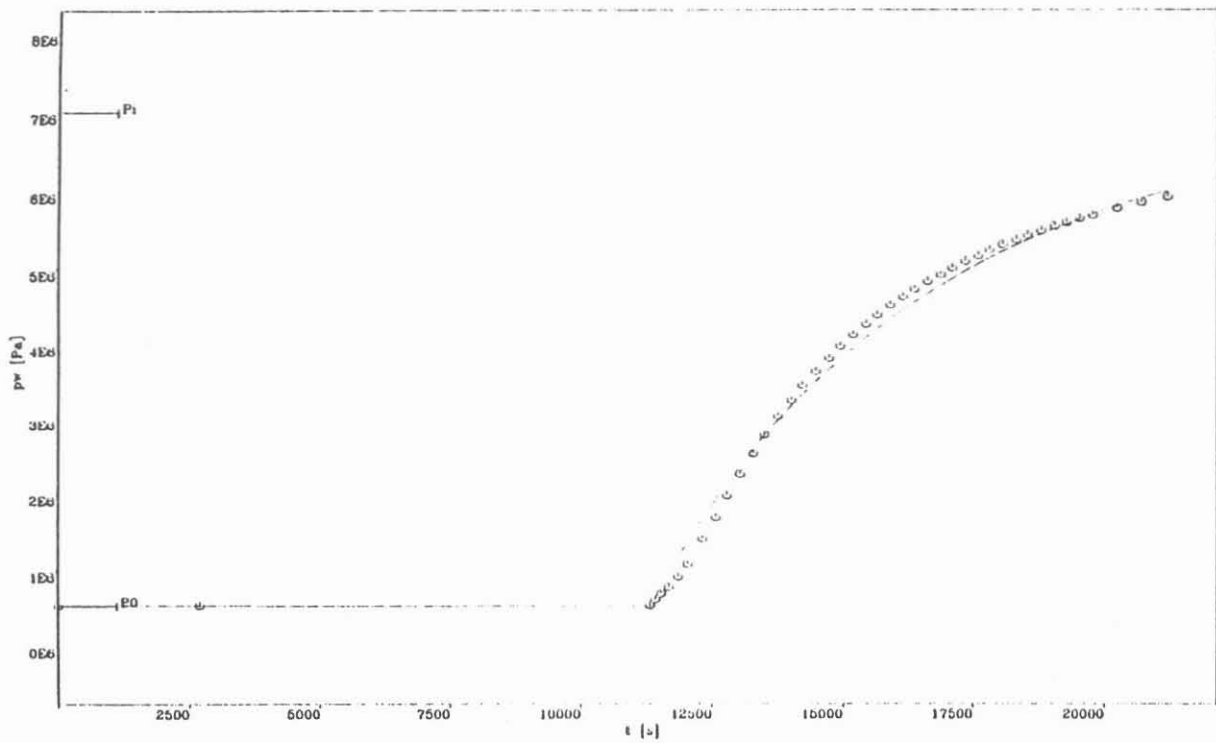


Abb. 29: Simulation der Druckaufbauphase des 3. DST nach der Methode der zeitabhängigen Randparameter von Correa und Ramey /23/, Homogene Formation

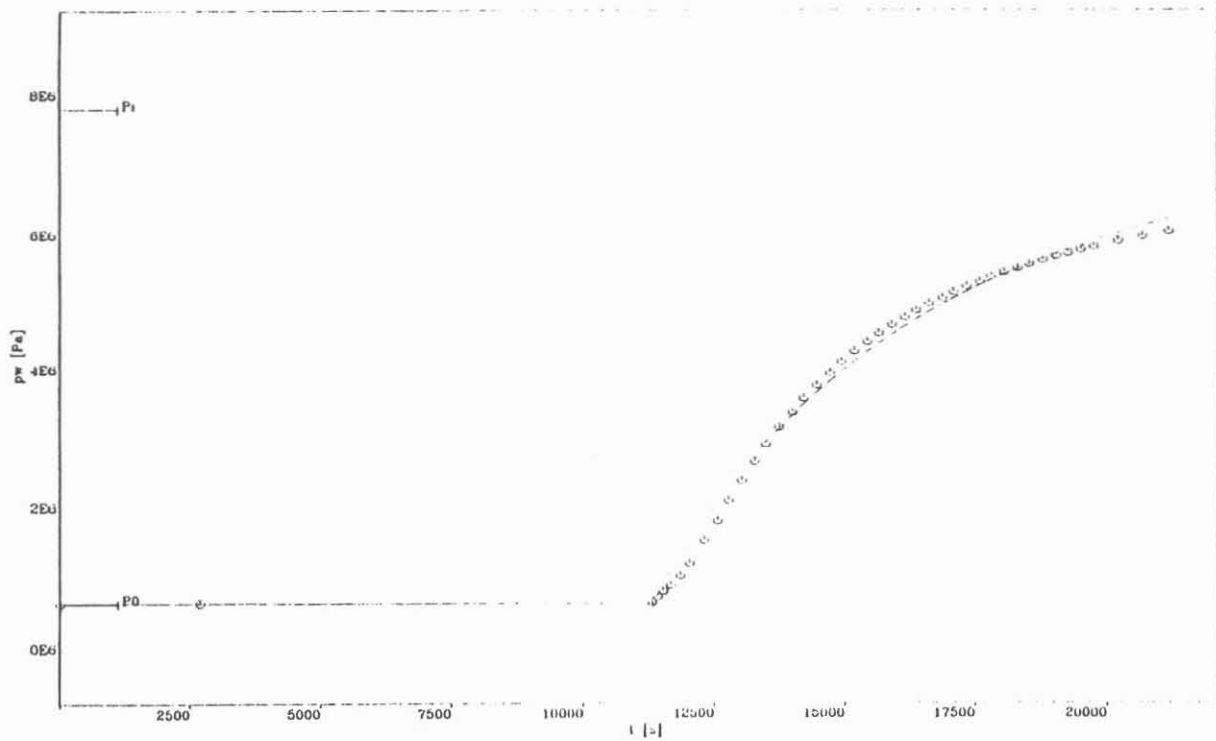


Abb. 30: Simulation des Druckaufbaus des 3. DST nach der Methode Correa und Ramey für eine heterogene Formation /24/, Optimierung der Kurvenform nach Nelder u. Mead /25/

abweichende Permeabilitäten und Skinfaktoren gegenüber der Musterkurven-Erstauswertung, ohne damit eine überzeugende Verbesserung in der Kurvenform zu erreichen, die durch "Afterflow-Effekte" gekennzeichnet ist.

Tabelle 7: Auswertung des 3. DST

Teufenintervall	: 813,0 - 839,04 m
Lithologie	: Sillimanit-Gneis
Porosität	: 0,05 (angenommen)
Mittlere Durchlässigkeit	: 6,6 μD ($6,6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$)
Skinfaktor	: 5
Initiales Druckniveau	: 7,7 MPa

$$\omega = \frac{(\Phi \cdot V \cdot c_t)_f}{(\Phi \cdot V \cdot c_t)_m + (\Phi \cdot V \cdot c_t)_f} = 0,71 \quad (25)$$

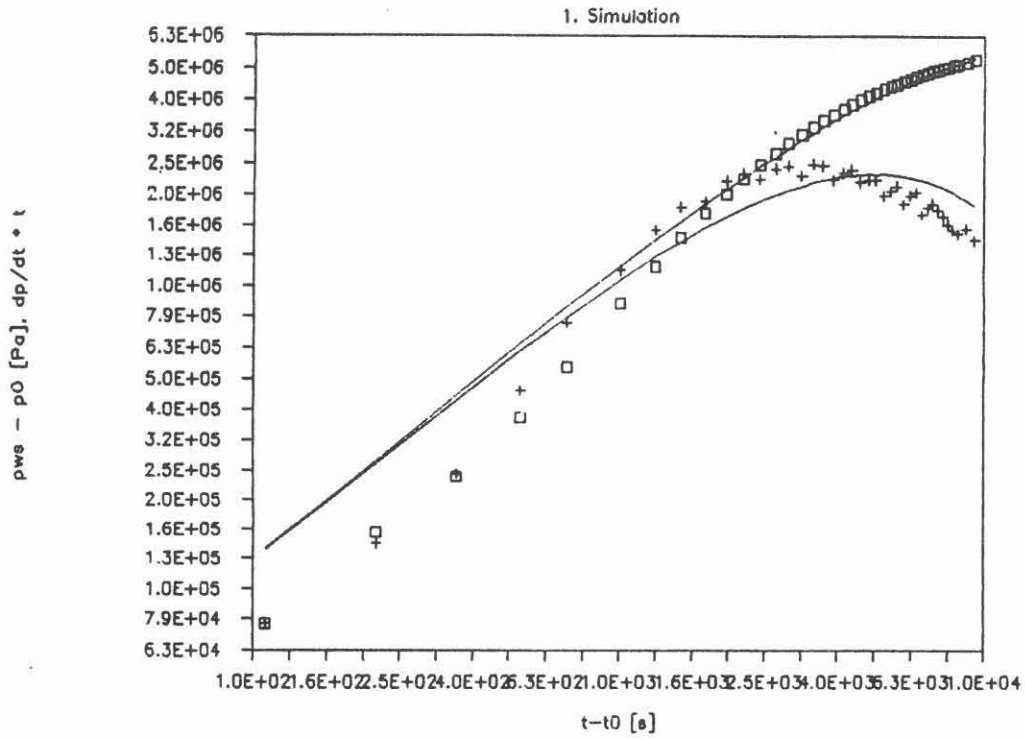
$$\lambda = 2 \cdot 10^{-4}$$

Das hier angewandte "Dual Porosity Modell" interpretiert den Druckverlauf als Stofftransport über Klüfte, die 71 % des Speichervolumens ausmachen. 29 % des Speichervolumens befinden sich in den interkristallinen Hohlräumen. Der Stoffaustausch geht nur sehr langsam vor sich (λ sehr klein).

Die Durchlässigkeit von 6,6 μD ($6,6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$) stimmt größenordnungsmäßig gut mit den von Siebert /30/ an Kernen des Teufenbereiches von 885 - 913 m gemessenen Werten überein, die zwischen 4,6 μD und 7,5 μD lagen.

Aufgrund der kurzen Schließphase des Tests (zu früher Abbruch), der Störung der Fließphase durch die stufenweise Druckentlastung der Formation, sowie eines zusätzlich durch das Schließen des Testventils hervorgerufenen Druckpulses konnte der Test nicht zufriedenstellend ausgewertet werden. Wie das Plot in Abb. 10 und 11 bzw. 31 zeigt, wirkte zum Zeitpunkt des Testabbruchs der Bohrlochspeichereffekt (Steigung 1) nachhaltig auf den Druckverlauf ein.

KTB VB - DST 3



KTB VB - DST 3

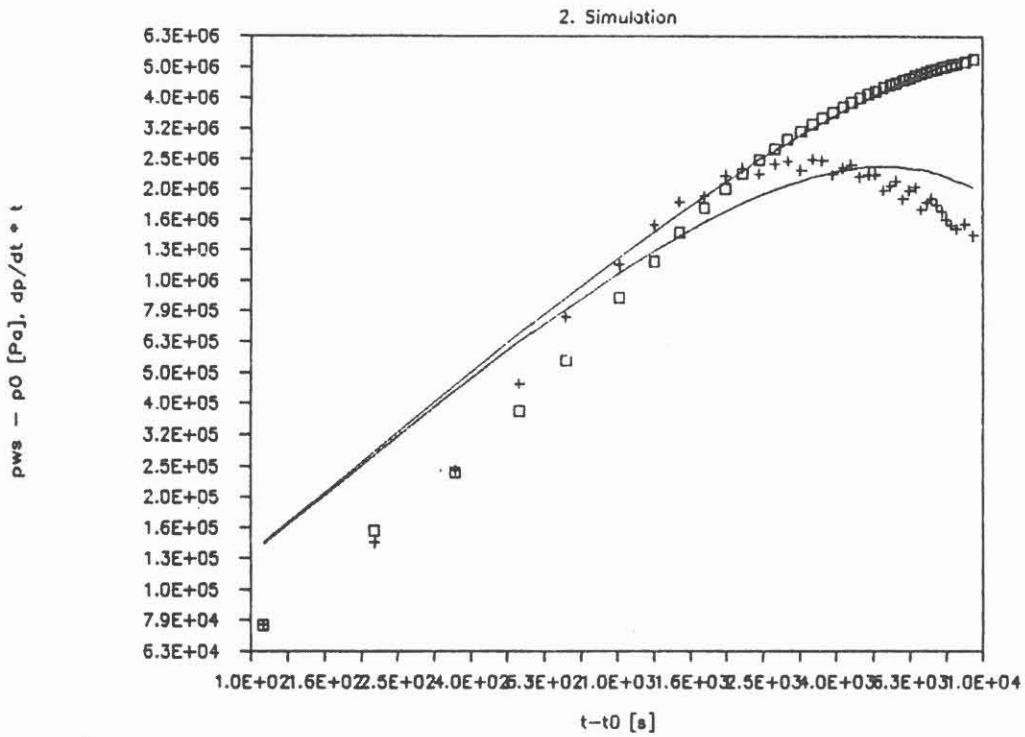


Abb. 31: Dimensionslose Musterkurvendarstellung für den 3. DST nach Ramey et al /8, 23/

5 SCHLUßFOLGERUNGEN

Aus dem technischen Ablauf der Tests, dem Fluidgewinn und dem Gewinn an hydraulischen Informationen können folgende allgemeine Schlußfolgerungen aus der Testkampagne während des Niederbringens der KTB-Vorbohrung gezogen werden:

1. Hydraulische Bohrlochtests während der Bohrphase sollten aus technischen Gründen, aber auch wegen des Risikos der unbekanntem Wechselwirkung zwischen Bohrlochsfluid und Gebirge nur als Zuflußtests geplant und ausgewertet werden.
2. Doppelpacker- und Stützankertests sollten nach einem bewährten Testmuster durchgeführt werden, um die Randbedingungen für die analytische Auswertung der Tests so einfach wie möglich zu halten.

Die erste Stufe besteht in einem Absenken des Flüssigkeitsspiegels im Bohrstrang auf ein Maß, welches die Kriterien für die Stabilität des Bohrlochs gerade noch zulassen. Eine Gasdruckvorlage kann benutzt werden. Sie sollte jedoch in einer Stufe und möglichst schnell entspannt werden. Eine Druckaufzeichnung übertrage während der Testdurchführung ist unbedingt notwendig. Nach dem Öffnen des Testventils muß sofort entschieden werden, ob eine auswertbare Fließdruckänderung vorliegt, die eine Auswertung des Zuflußtests als Slugtest ermöglicht.

Tritt diese Änderung innerhalb der ersten beiden Minuten des Tests nicht ein, so ist das Testventil sofort zu schließen, um einen auswertbaren Puls Test zu erhalten. Wenn der Zufluß im ersten Fall ausreichend ist, kann das bewährte Prinzip des Drillstem-Tests -erste kurze Fließphase mit darauf folgender ausreichender Schließphase, gefolgt von einer zweiten längeren Fließphase und abschließender Druckaufbauphase- zur Anwendung gelangen.

3. Fluidprobennahmen mittels Sampler sollten nach Möglichkeit auf die letzte Fließphase beschränkt bleiben, um eine Beeinträchtigung der Auswertbarkeit der Drucksignale der ersten Fließphase zu vermeiden.
4. Druckaufzeichnungen während des Bohrens über den Spülungsdruck auf der Bohrlochsohle könnten eine wichtige Zusatzinformation für eine bessere Auswertbarkeit von unvollständigen hydraulischen Tests während der Bohrphase bieten.
5. Geräteentwicklungen, die neben der übertägigen Aufzeichnung von Bohrlochdrücken unterhalb und oberhalb der abgepackerten Teststrecke auch Informationen über Temperaturgradienten und Leitfähigkeitsänderungen während des Tests ermöglichen, könnten für die Zukunft eine deutliche Verbesserung in der Interpretierbarkeit von hydraulischen Bohrlochtests liefern. Die Programmentwicklung zur Simulation der Druckentwicklung im Teststrang beim Vorliegen von Zweiphasenfluß (Plug-Flow, Bubble-Flow) im Bohrloch muß im Hinblick auf eine eindeutige Interpretation von Bohrlochtests weiter verfolgt werden.

6 Symbolverzeichnis

B	: Formationsvolumenfaktor	-
C	: Bohrlochspeicherkoeffizient	$m^3 \cdot Pa^{-1}$
C _D	: Dimensionsloser Bohrlochspeicherkoeffizient	-
C _D · e ^{2S}	: Typkurvenparameter	
c _t	: Gesamtkompressibilität	Pa ⁻¹
c _w	: Wasserkompressibilität	Pa ⁻¹
g	: Erdbeschleunigung	m · s ⁻²
h	: Formationsmächtigkeit	m
h _w	: Abgepackerte Mächtigkeit	m
k	: Permeabilität	m ²
k _h	: Horizontale Permeabilität	m ²
k _r	: Relative Permeabilität	m ²
k _v	: Vertikale Permeabilität	m ²
p	: Druck	Pa
p _i	: Initialer Porenraumdruck	Pa
p _o	: Referenzdruck	Pa
p _{w s}	: Bodenschließdruck	Pa
p _{w f}	: Bodenschließdruck	Pa
p _D	: Dimensionsloser Druck	-
Q	: Fließmenge	m ³
q	: Fließrate	m ³ · s ⁻¹
r	: Radius	m
r _b	: Tubingradius	m
r _w	: Bohrlochradius	m
R _s	: Gas-/Öl-Verhältnis	-
s	: Skinfaktor	-
t	: Zeit	s
t _D	: Dimensionslose Zeit	-
T	: Temperatur	K
TM	: "Time Match" (aus der Typkurvenanpassung)	-
V	: Volumen	m ³
Φ	: Porosität	-
μ	: Viskosität	Pa · s
ρ	: Dichte	kg · m ⁻³

Indizes:

g	: Gas
w	: Wasser
M	: Matchpunkt

7 Literatur

- /1/ Siebert, J.: : Bewertung der Zuflußtests in kristal-
linem Gestein (NAGRA) und abdeckenden
Schichten im Bereich des Salzberg-
werks Asse (GSF).
Studie im Auftrag der KTB, Abschluß-
bericht, Clausthal, 1989
- /2/ Earlougher, R.C.Jr. : Advances in Well Test Analysis.
American Institute of Mining, Metal-
lurgical and Petroleum Engineers, Inc.
Monograph Vol. 5, Henry L. Doherty
Series, 2. Auflage, New York/Dallas,
1977
- /3/ Lee, W.J.: : Well Testing.
SPE Textbook Series Vol. 1, New York/
Dallas, 1982
- /4/ Horner, D.R.: : Pressure Build-Up in Wells.
Proc., Third World Pet. Congress,
The Hague, Sept. 2nd, 1951
- /5/ Matthews, C.S.; : Pressure Build-Up and Flow Tests in
Russel, D.G.: Wells.
Monograph Vol. 1, SPE of AIME,
Dallas, 1977
- /6/ Gringarten, A.C.; : A Comparison Between Different Skin
Bourdet, D.P.; and Wellbore Storage Type Curves
Landel, P.A.; for Early Time Transient Analysis.
Kniazeff, V.J. SPE Paper 8205, (1979), 1-11

- /7/ Papadopulos, I.S.; : On the Analysis of Slug Test Data.
Bredehoeft, J.D.; Water Resources Research, Res. 9,
Cooper, H.H.Jr. (1973), 1087-1089
- /8/ Ramey, H.J.Jr.; : Analysis of Slug Test or DST Flow
Agarwal, R.G.; Period Date.
Martin, I. Journ. Can. Petr. Tech., 14 (1975),3
37-47
- /9/ Agarwal, R.G. : "Real Gas Pseudo-Time" - A New
Function for Pressure Build-Up
Analysis of MIF Gas Wells.
SPE Paper 8279, (1979), 1-9
- /10/ Pusch, G.; : Auswertung des Drillstem Tests Nr. 1
Ostrowski, L.; im Auftrag von Baker Production
Kloska, M. Technology für KTB, Clausthal, 1987
- /11/ Lee, W.J.: : Well Testing.
SPE Textbook Series Vol. 1, New York/
Dallas, 1982, S. 58
- /12/ N.N. : ECLIPSE Reference Manual, Vers. 87/1
Exploration Consultants Limited
Hamley on Thames, 1987
- /13/ Pusch, G.; : Simulation eines Ventilationstests
Leitenbauer, J.; im Felslabor Grimsel.
Siebert, J.; Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl-
Weber, R. & Erdgasgewinnung, TU Clausthal, 1987

- /14/ Friedrich, Th. : Modellierung eines Drucktests mit
einem numerischen Simulationsprogramm
Studienarbeit am Institut für Tief-
bohrtechnik, Erdöl- & Erdgasgewinnung
TU Clausthal, 1989
- /15/ Kazemi, H.; : Numerical Simulation of Water-Oil
et al. Flow in Naturally Fractured
Reservoirs, SPEJ (1976), Dec, 317-326
- /16/ Ostrowski, L.; : Auswertung des Drillstem Test Nr. 3
Kloska, M. im Auftrag von Baker Production
Technology für KTB, Clausthal, 1988
- /17/ N.N. : KTB-Vorbohrung Test Bericht DST 1-2
von Baker Production Technology/
Lynes, 1987
- /18/ Müller, H.; : Kontinentales Tiefbohrprogramm der
Keyssner, S.; Bundesrepublik Deutschland. Geowissen-
Röhr, C. schaften im KTB-Feldlabor-Geologie-
Geologisches Profil (0-3900m) und
Entwicklung der Gesteine.
Posterpräsentation anlässlich des
2. KTB-Kolloquiums,
Gießen, 15. -17.03 1989.
KTB Report 89-3, S. 466
- /19/ Bredehoeft, J.D.; : A Method for Determining the Hydraulic
Papadopulos, S.S. Properties of Tight Formations.
Water Resources Research,
16 (1980), 1, 233-238

- /20/ Ostrowski, L.; : Use of Pressure Derivatives in
Kloska, M. Analysis of "Slug Test" and DST
Flow Data.
SPE Paper 18595, 1989
- /21/ Bourdet, D.; : A New Set of Type Curves Simplifies
Whittle, T.M.; Well Test Analysis.
Douglas, A.A.; World Oil, (1983), May
- /22/ Hvorslev, M.J. : Time Lag and Soil Permeability in
Groundwater Observations.
U.S. Corps of Engineers, Waterways
Experimental Stn. Bull., No. 36, 1951
- /23/ Correa, A.C.F.; : A Method for Pressure Build-Up
Ramey, H.J.Jr.; Analysis of Drillstem Tests.
SPE Paper 16802, 1987
- /24/ Bourdet, D.; : Use of Pressure Derivative in
Ayoub, J.A.; Well Test Interpretation.
Pirard, Y.M. SPE Paper 12777, 1984
- /25/ Nelder, J.A.; : A Simpler Method for Function
Mead, R. Minimization.
Computer Journal, (1965), 7, 308-313
- /26/ Levenberg, K. : A Method for the Solution of Certain
Problems in Least Squares.
Quarterly of Applied Mathematics,
(1944), 2, 164-168
- /27/ Marquart, D. : An Algorithm for Least Squares Esti-
mation of Nonlinear Parameters. STAM
Journal on Applied Mathematics,
(1963), 11, 431-441

- /28/ Enachescu, C. : Einfluß geologischer Faktoren auf die Auswertbarkeit von hydraulischen Bohrlochtests.
Diplomarbeit, Institut für Geologie & Paläontologie, Universität Hannover / Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- & Erdgasgewinnung, TU Clausthal, 1990
- /29/ Gringarten, A.C. : Computer-Aided Well Test Analysis.
SPE Paper 14099, 1986
- /30/ Siebert, J. : 4. Zwischenbericht für KTB,
ARGE Gesteinsphysik, Bohrlochmessungen und Log-Interpretation,
Hannover, 1989
- /31/ Hänel, R. : Protokoll der 5. Arbeitssitzung der
ARGE Gesteinsphysik, Bohrlochmessungen und Log-Interpretation vom
14./15.07 1988 in Windisch Eschenbach
- /32/ Schopper, J.R. : Mitteilung im Rahmen der 6. Arbeitssitzung der ARGE Gesteinsphysik, Bohrlochmessungen und Log-Interpretation,
Hannover, 1989

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Projektgruppe KTB
Stilleweg 2
3000 Hannover 51

Erste Ergebnisse eines Absenkungs- und Injektionstestes in der KTB-Oberpfalz VB

W. Kessels
G. Zoth
J. Kück



**ERSTE ERGEBNISSE EINES ABSENKUNGS- UND
INJEKTIONSTESTES IN DER KTB-OBERPFALZ VB**

W. Kessels; G. Zoth; J. Kück

ZUSAMMENFASSUNG

Vom 10.05. bis zum 25.05.1989 wurde in der KTB-Vorbohrung als erste hydraulische Untersuchung nach Beendigung der Bohrarbeiten ein Absenk- und Injektionstest durchgeführt. Für diese hydraulische Untersuchung der gesamten Bohrung stand die Identifikation hydraulisch leitfähiger Bereiche im Vordergrund. Zur Lokalisierung dieser Bereiche halfen Temperaturmessungen, Bestimmungen des Spülungswiderstandes und ergänzend dazu Eigenpotential-Messungen.

Zur hydraulischen Trennung von unterem und oberem Bohrlochsbe-
reich wurde in einer Teufe von 2800 m eine Spülungsspihle mit hö-
herem spezifischen Widerstand gesetzt.

Die Absenkung des Spülungsspiegels beim Absenkttest erfolgte durch
Ziehen des Gestänges ohne Nachfüllen von Spülung. Unerwarteter-
weise trat ein relativ starker Zufluß von ca. 7,5 m³ auf, von dem
ca. drei Viertel aus dem Bohrlochbereich unterhalb 2800 m zuge-
flossen ist. Es zeigt sich aus den Spülungswiderstandsmessungen,
daß im unteren Bohrlochbereich ein Zufluß stark salzhaltiger
Flüssigkeit erfolgt ist (ca. 50.000 ppm NaCl Äquivalent), während
im oberen Bereich von 450 bis 550 m ein solcher mit relativ ge-
ringer Salinität verzeichnet wurde.

Der Injektionstest, der mit einer Konstantüberdruck von ca. 5 MPa
zur Spülungssäule im Gleichgewicht durchgeführt wurde, ergab eine
Abflußrate von 120 bis 200 l/h, wobei durch die Temperaturmessun-
gen, neben den beiden geschilderten Zuflußstellen, mehrere andere
Zuflußstellen detektiert werden konnten.

Eine erste hydraulische Auswertung verzichtet auf eine Bestim-
mung der konventionellen hydraulischen Parameter (z.B. Permea-
bilität usw.). Bestimmt wurden hydraulische Leitwerte, die den
Produktivitäten der Bohrung entsprechen.

Anschrift der Autoren: Niedersächsisches Landesamt für Boden-
forschung, Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik
Deutschland, Projektleitung, Stilleweg 2, 3000 Hannover 51.

SUMMARY

From the 10th till 25th of May 1989 a slug and injection test was carried out as the first hydraulic investigation after drilling of the KTB-pilot-borehole was finished. The main aspect of this hydraulic investigation was the identification of hydraulic conductive zones. To localize these zones temperature measurements, determination of mud resistivity, and SP measurements have been used.

To obtain a separation between the upper and lower section of the borehole, a pill had been pumped to a depth of 2800 m, which consisted of mud with a higher resistivity.

To lower the mud level for the slug test the drillpipes were tripped out without refilling mud into the well. Unexpectedly a relatively strong influx of about 8 m³ of fluids occurred, of which 86 % flowed in from the section below 2800 m.

The recordings of the mud resistivity measurements show an influx of a high saline fluid in the lower section (about 50 000 ppm NaCl-equivalent), whereas in the upper section, from 450 to 550 m, an influx of a relatively low salinity could be seen.

During the injection test a constant overpressure of about 5 MPa, corresponding to the equilibrated mud column, was applied. The test yielded flow off rates ranging from 120 up to 200 l/h. By means of temperature measurements several influx zones could be detected besides the two described earlier.

This first hydraulic interpretation knowingly renounces an estimation of conventional hydraulic parameters (e.g. permeability etc.). Previously, the hydraulic conductivities, which corresponded to productivity of the borehole, had only been estimated.

1 EINLEITUNG

Als erste hydraulische Untersuchung nach dem Abteufen der KTB-Vorbohrung wurde ein hydraulischer Absenk- (vom 10.05.89 bis zum 22.05.89) und ein Injektionstest (24.05.89 - 25.05.89) durchgeführt.

Beim Absenkttest ist ein wesentliches Ziel, den Druck der Spülungssäule so weit herabzusetzen, daß der Formationsdruck der Porenflüssigkeit unterschritten wird und es zu Zuflüssen in die Spülung kommt. Detektiert werden sollten diese Zuflüsse dann durch Messung des Spülungswiderstandes, des Eigenpotentials (SP-Messung) und der Temperatur. Ein Hauptanliegen war dabei, mit Hilfe des sogenannten Fluid-Loggings (Stober, 1989) aus dem Spülungswiderstandslog anhand von Widerstands-anomalien auf Zuflußbereiche zu schließen und anhand der Form dieser Widerstands-anomalie Aussagen über Zuflußmenge und möglicherweise auch "Permeabilität" vorzunehmen.

Schon mehrfach waren während der Bohrphase in der KTB-Vorbohrung Zonen durchteuft wurden, in denen Leitfähigkeitsanomalien dokumentierten, daß hier ein Austausch mit dem Gebirge über klüftige Bereiche stattgefunden hat (Kessels, 1989 a). Diese Bereiche zeichneten sich allerdings dadurch aus, daß die Kontamination der Spülung durch eine Flüssigkeit mit zur Spülung unterschiedlicher Salinität im allgemeinen spätestens einige Wochen nach dem ersten Auftreten zum Erliegen kam. In Abb.1 ist dies am Beispiel einer relativ starken Kontamination in einer Teufe von 3445 bis 3450 m dargestellt. Dies läßt den Schluß zu, daß hier Kluftsysteme angebohrt wurden, die abgeschlossene hydraulische Systeme sind, und deren Formationsdruck etwas größer als der hydrostatische Druck der Spülungssäule ist.

Das NaCl-Äquivalent, das hier aufgezeichnet wurde, wurde dabei direkt aus dem Spülungswiderstand unter Berücksichtigung der Spülungstemperatur berechnet. Eine besonders starke Kontamination

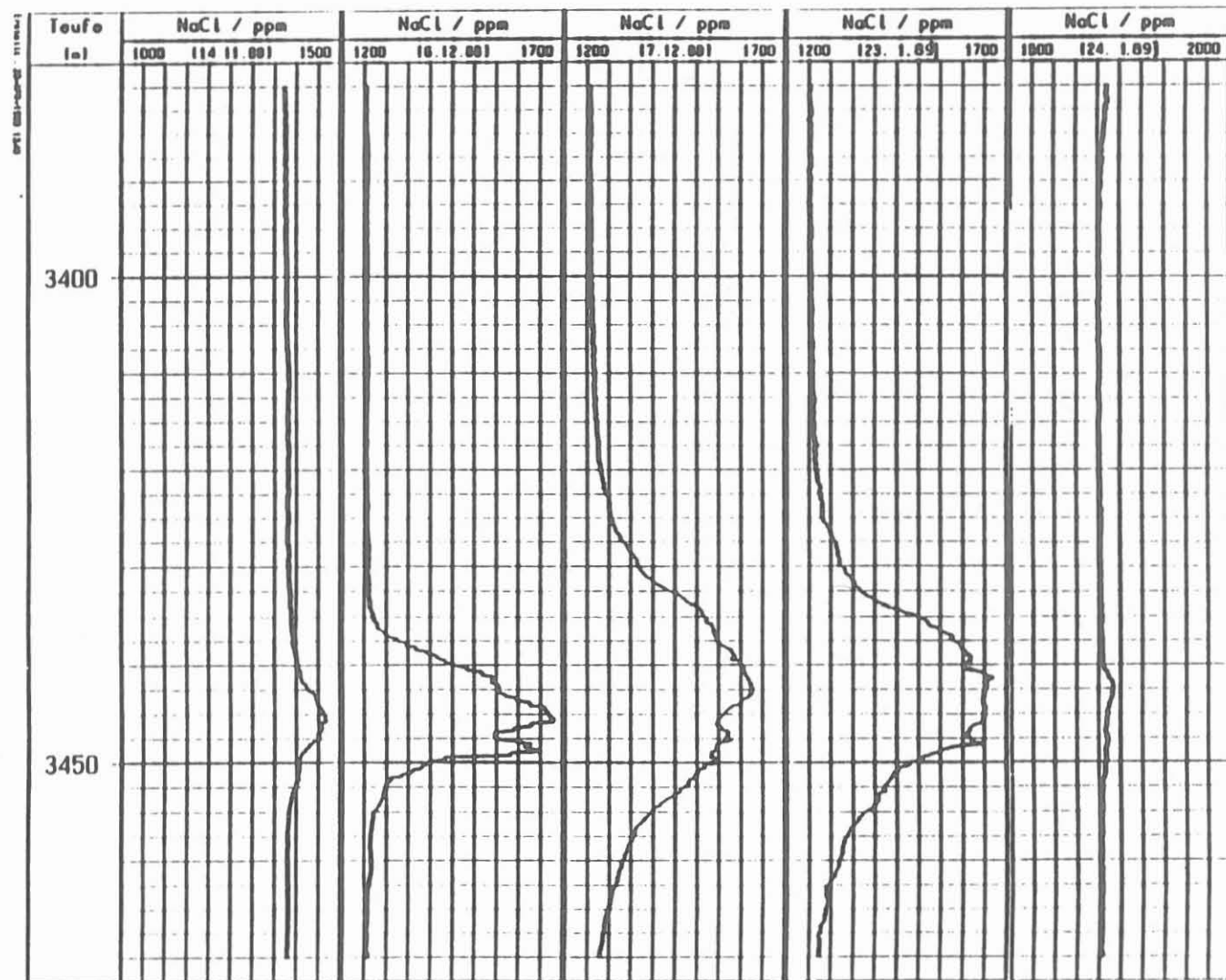


Abb. 1: NaCl Äquivalentkonzentration, berechnet aus Leitfähigkeitsmessungen im Bohrloch zu verschiedenen Zeiten. An den Kernen wurde bei 3.447 m eine Kluft festgestellt, die für einen begrenzten Zeitraum die Salinität der Spülung in diesem Bereich erhöhte.

mit einem sehr hohen NaCl-Äquivalent von ca. 22.500 ppm trat im Bohrlochtiefsten nach Beendigung der Bohrarbeiten auf. Auch ein Drilling-Break (plötzlich eintretender sehr schneller Bohrfortschritt) hatte an dieser Stelle gezeigt, daß auf den letzten 50 m der KTB-Vorbohrung eine hydraulisch besonders interessante Zone angetroffen wurde, was sich dann während des im Folgenden beschriebenen Absenktestes noch deutlicher zeigen sollte.

Abb.2 zeigt die NaCl-Äquivalent-Konzentration, die am 07.04.1989 mit Hilfe des Auxiliary-Measurement-Systems (AMS) bei einer BGT- (Borehole Geometry Tool)-Messung im Bohrlochtiefsten bestimmt worden war.

Ein besonderes Problem stellt sich für alle integral über eine ganze Bohrung durchgeführten hydraulischen Tests in der quantitativen Abschätzung der Zuflußmengen.

Aus der Änderung des Spülungsspiegels in der Bohrung, die hier mit Hilfe der Temperatur- und Leitfähigkeitsmessung bestimmt wurde, kann man nur eine Gesamtbilanz für den Spülungszu- bzw. -abfluß in und aus der Bohrung aufstellen. Eine Zuordnung der Gesamtzuflußmenge ist schwierig, da nicht davon ausgegangen werden kann, daß alle zufließenden Fluide den gleichen spezifischen Widerstand besitzen.

Hydraulisch ist für jede Bohrung von besonderem Interesse, die Zuflußvolumina in den tieferen Bereichen der Bohrung von denen im oberen Bohrungsteil abzugrenzen. In den höheren Schichten ist dabei im allgemeinen damit zu rechnen, daß hier relativ junge Wässer mit niedriger Salinität angetroffen werden und das Gebirge dort relativ gut hydraulisch leitfähig ist. Zur Abgrenzung des besonders interessanten Bohrlochbereiches unterhalb 3000 m von der oberen Bohrung wurde in einer Teufe von 2800 m eine Spülungspille mit einem Spülungswiderstand von ca. 4 Ohm · m gesetzt, der höher als der normale elektrische Widerstand der Spülung ist. Das Setzen der Pille wird in Abschnitt 2.1 beschrieben.

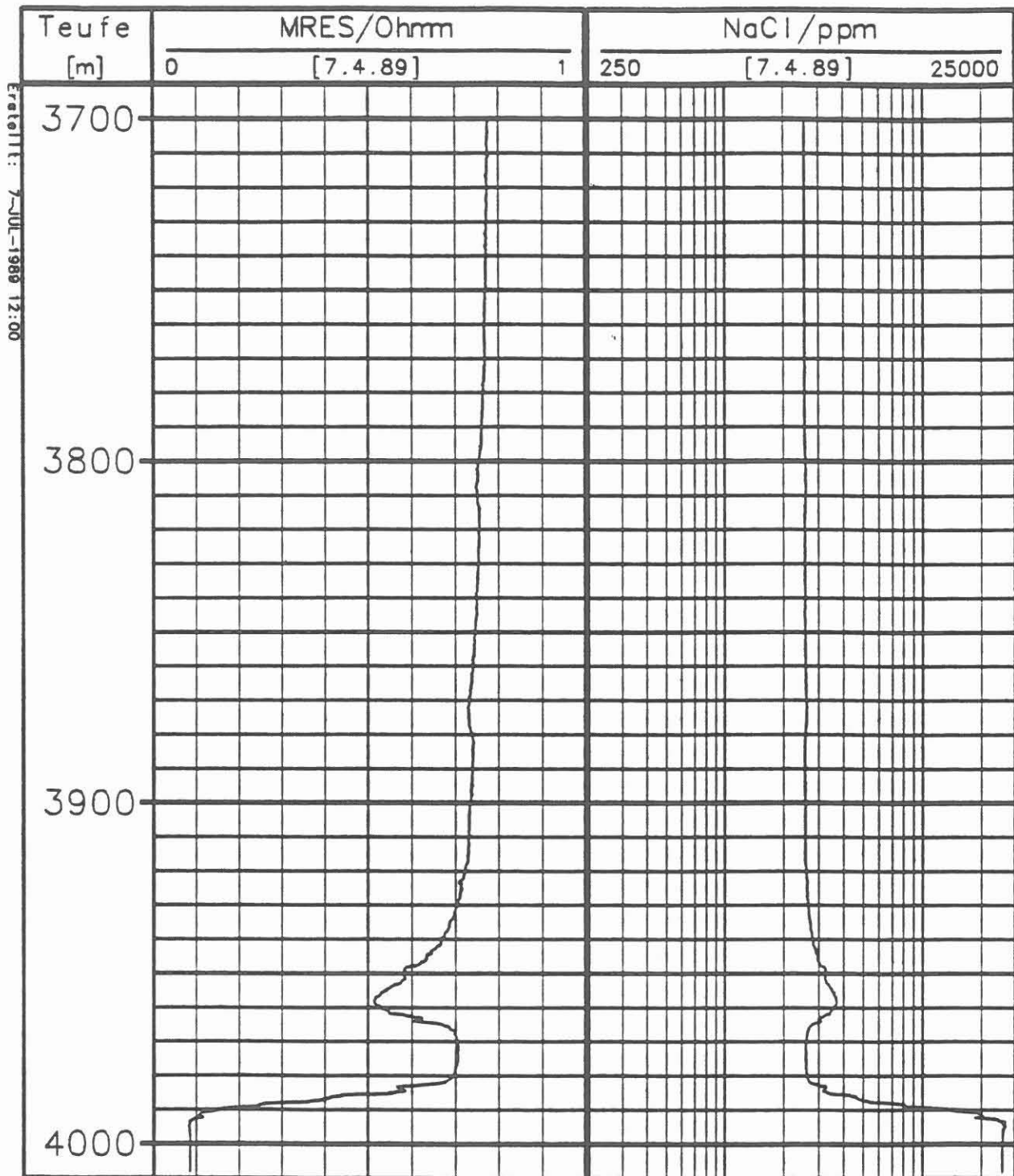


Abb. 2: NaCl Äquivalentkonzentration, gemessen am 07.04.89, berechnet aus einer Spülungsleitfähigkeitsmessung mit dem AMS-System.

Beim anschließenden Ziehen des Gestänges bleibt dann die einzirkulierte Spülung nach leichtem Absinken um das Gestängevolumen in diesem Teufenbereich erhalten.

Erwartet wurde, daß die Vermischung der Pillenspülung mit der Normalspülung so langsam erfolgt, daß bei einem Zufluß aus größerer Tiefe die Spülungspille kolbenförmig nach oben gedrückt wird und so anhand der Leitfähigkeitsunterschiede zwischen Pille und normaler Spülung die Zuflußmenge festgestellt werden kann.

In den ersten Vorschlägen für den Einsatz einer solchen Pille war vorgesehen, eine hochleitfähige Pille einzusetzen (Anreicherung mit NaCl), da diese von der normalen Spülung leichter abgrenzbar ist und einen schärferen Leitfähigkeitskontrast haben kann. Dieser Vorschlag wurde dann zugunsten einer niedriger leitfähigen Pille abgeändert, um die geochemische Analyse nicht zu sehr zu stören. Angesetzt wurde eine Dehydril-Spülung gleicher Konsistenz, wie sie in der Bohrung vorlag. Der Unterschied im Spülungswiderstand bestand nur darin, daß die frisch angesetzte Spülung nur den Salzgehalt des normalen Frischwassers besaß und nicht schon über eine längere Bohrzeit Salze aus dem Gebirge aufgenommen hatte.

Im Verlauf des Absenktestes zeigte sich dann, daß auch diese etwas weniger kontrastreiche hochohmige Pille zur hydraulischen Abgrenzung von oberem und unterem Bereich ausreichend war, was auch durch den unerwartet starken Zufluß während des Absenktestes gefördert wurde.

Um das Hauptuntersuchungsziel, die Detektion schwacher Zuflüsse, anhand der Spülungsleitfähigkeitsmessungen durch die künstlich eingebrachten Leitfähigkeitsinhomogenitäten nicht zu stören, wurde die Pille in einem Teufenbereich gesetzt, in dem es aufgrund einer intensiven Logauswertung wenig Indizien für hydraulisch leitfähige Bereiche gab (Kessels, 1989 a).

Zur meßtechnischen Beobachtung des Absenktestes wurden im wesentlichen die KTB-eigenen Meßgeräte für Temperatur, Eigenpotential (SP) und Spülungsleitfähigkeit benutzt.

Beim anschließend durchgeführten Injektionstest wurde ein Konstantdrucktest im abgeschlossenen Bohrloch durchgeführt. Ziel war dabei, anhand der auftretenden Temperaturstörungen, die eine sich im Bohrloch bewegende Spülung erzeugt, Zuflußhorizonte zu detektieren und die Abflüßmengen in den einzelnen Kluftzonen zu bestimmen. Diese als thermische Flowmeter bekannten Messungen wurden vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung durchgeführt und erbrachten einige höchst interessante Indikationen auf mehrere schwächere Zuflußhorizonte, die deutlich mit den Zonen übereinstimmten, in denen in anderen Logs (Sonic, FMST) Kluftanzeigen zu verzeichnen waren (Jobmann, Schultz, 1989).

Im Anschluß an die Thermo-Flowmeter-Messungen wurde ein Einschlußtest vorgenommen. Das heißt, der Druck der Bohrung wurde um 5 MPa erhöht und dann die Bohrung unter Druck hydraulisch abgedichtet. Der sich dann in der Bohrung einstellende Druckverlauf in Abhängigkeit von der Zeit hatte eine Abschätzung des hydraulischen Leitwertes (spezifische Ergiebigkeit) zum Ziel. Der Einschlußtest wird in Abschnitt 5.3 näher erläutert.

Ein Hauptziel der Durchführung dieser Teste war das Aufspüren neuer und die Bestätigung bereits bekannter hydraulisch leitfähiger Horizonte. Diese sollen zur Entscheidungshilfe bei der Festlegung der Teufenabschnitte für Packerteste beitragen (Pusch et al., 1989). Packerteste können wesentlich bessere Aussagen über das Verhalten hydraulischer Kluftsysteme machen, sind allerdings zeitlich und kostenmäßig sehr aufwendig.

An der Planung und Durchführung der Teste wirkten die Arbeitsgruppen Frau Stober, Geolog. Landesamt, Freiburg, und Schulz, NLFb, Hannover, mit. Spezielle Auswertungen dieser Arbeitsgruppen sind Teil dieses Berichtes.

2 TESTABLAUF

2.1 Bohrtechnische Vorbereitungen

Am 09.05.1989 wurde zum Auszirkulieren der Bohrung ein 3 1/2"-Bohrstrang in die Bohrung KTB eingebaut. Die Teufe von 3999,6 m (Bohrmeisterteufe) konnte am 10.05.89 um 11:00 Uhr ohne besondere Vorkommen erreicht werden.

Um eine thermische Beeinflussung des Bohrlochtiefsten durch den Spülvorgang möglichst klein zu halten, wurde der Bohrstrang um 5 m von der Sohle abgehoben. Die ersten Zirkulationsarbeiten begannen um 13:00 Uhr. Zunächst betrug die Zirkulationsrate ca. 500 l/min, wurde dann aber reduziert auf ca. 100 l/min, um die austretende Spülung aus dem Teufenbereich von 3000 m bis 4000 m dicht zu beproben. Um 20:00 Uhr war der erste Spülungsumlauf und die Beprobung der Spülung beendet. Danach erfolgte eine weitere ca. 3 1/2-stündige Spülungszirkulation, die im wesentlichen der Konditionierung der Spülung diente. Dabei wurde NaOH zur Erhöhung des pH-Wertes zugesetzt.

Nach diesen Vorarbeiten konnte das Gestänge bis zur Teufe 2800 m ausgebaut und die vorbereitete Spülmengemenge von ca. 2,7 m³ mit dem Spülungswiderstand > 3,5 Ohm·m eingepumpt werden. Die Berechnungen ergaben, daß diese Spülmengemenge zum Auffüllen des Teufenbereiches von 2800 m bis 2660 m reicht, dies entspricht einer sog. "Leitfähigkeitsschicht" von 140 m Bohrlochsäule. Am 11.05.89 ab 1:00 Uhr begann der Ausbau des Gestänges von 2800 m bis über Tage ohne Nachfüllen der durch den Bohrstrang verdrängten Spülung. Dieser Vorgang sollte eine rechnerische Absenkung des Spülungsspiegels bis zur Teufe von ca. 350 m bewirken. Der Gestängeausbau war um 7:00 Uhr beendet.

2.2 Durchführung des Absenktestes

2.2.1 Bohrlochmessungen

Unmittelbar nach Freigabe der Bohrung erfolgte die erste Bohrlochmessung. Der Zeitraum zwischen Beginn des Ausbaus ab 2800 m (Beginn der Absenkung) und der ersten Wasserspiegelmessung betrug 440 min. Überraschenderweise war in dieser Zeit die Spülung bereits bis zur Teufe 238 m angestiegen. Alle Wasserspiegelmessungen wurden durch Abwärtsfahrten bestimmt. Nach Aufwärtsmessungen erfolgte stets eine zusätzliche Einfahrt bis zum Spülungsspiegel, um die freie Spiegelhöhe zu messen, dabei wurde jeweils die Verdrängung des Meßgerätes berücksichtigt. Lediglich bei den Messungen mit der Temperatursonde (TMP1) war keine Korrektur erforderlich.

In der folgenden Aufstellung (Tabelle 1) sind alle Bohrlochmessung aufgeführt, die mit dem Absenktest in Beziehung standen. Dabei bedeuten:

AMS	(Auxiliary-Measurement-Sonde) mit - Spülungswiderstand - Temperatur - Zugspannung am Kabelkopf
TEMP	(Temperatursonde)
SP	(Eigenpotential)
FS	(Fluid-Probennehmer)
GR	(Gamma Ray)
TEMP/NLFB	(Temperaturmeßausrüstung des NLfB).

Tabelle 1

Datum	Messung	Uhrzeit	Teufe des Spiegels (korr.) in m	Uhrzeit	Teufe der Pille in m	Meßrichtung	Bemerkung
11.05.		01:00	0	01:00	2800		
"	TEMP-AMS-GR	8:20	238	11:00	2595	abwärts	
"	"	19:10	107	17:30	2530	aufwärts	
12.05.	SP-AMS-GR	8:10	58,5	9:30	2445	ab	
"	"	15:05	59,8	13:00	2435	auf	
"	FS-AMS-GR	15:35	60,7	16:20	2435	ab	Teufe 3985 m
"	"	19:02	60,2	18:10	2430	auf	
13.05	FS-AMS-GR	6:40	56,7	8:40	2430	ab	Teufe 3930 m
"	"	12:05	60,4	11:24	2425	auf	
16.05.	TEMP-AMS-GR	9:18	55,3	13:20	2428	ab	
"	"	17:38	56,0	-	-	auf	
17.05.	FS-AMS-GR	8:56	53,7	10:00	2430	ab	1. Einfahrt 3995 m
"	"	13:45	55,2	14:30	2430	ab	2. Einfahrt 3930 m
18.05	SP-AMS-GR	8:53	52,4	10:00	2430	ab	
"	"	13:20	54,7	12:20	2415	auf	
22.05	TEMP/NLFB	8:00	52,2	-	-	ab	

2.2.2 Volumenberechnungen zum Absenktest

In der ersten Berichterstattung über den Absenk- und Injektionstest vom 19.07.1989, Archiv-Nr. 105 585, befand sich in der Volumenberechnung ein Rechenfehler, der in diesem Abschnitt korrigiert ist.

Die Bohrung KTB-VB ist von Geländeoberkante bis in 480 m Teufe verrohrt. Unterhalb 480 m bis zur Endteufe von 4002 m (Logger-teufe) steht das Bohrloch als "open hole" für Meßzwecke zur Verfügung (Abb.3; Verrohrungsschema). Bedingt durch den zusätzlichen Raumbedarf für die Verrohrung ist der erbohrte Querschnitt bis 480 m Teufe größer als das übrige Bohrloch. Wenn bei einem Absenktest wie diesem Spülungsspiegel zu vergleichen oder Zuflußmengen zu berechnen sind, ist die Kenntnis der spezifischen Volumina (l/m) für die unterschiedlichen Bohrlochabschnitte erforderlich. Im folgenden ist dies aufgeführt:

Teufe 0 - 480 m:

- Ringraum zwischen 8 5/8" Ankerrohrtour
und 7" Schutzrohrtour
= 6,9 l/m
- Innenraum der 7" Schutzrohrtour
= 19,3 l/m
- offener Gesamtquerschnitt:
= 2,62 dm² = 26,2 l/m

Teufe 480 - ET: (ohne Berücksichtigung der
Bohrlochrandausbrüche)
erbohrter Durchmesser der Bohrung 6" (152,4 mm)
= 1,824 dm² = 18,24 l/m.

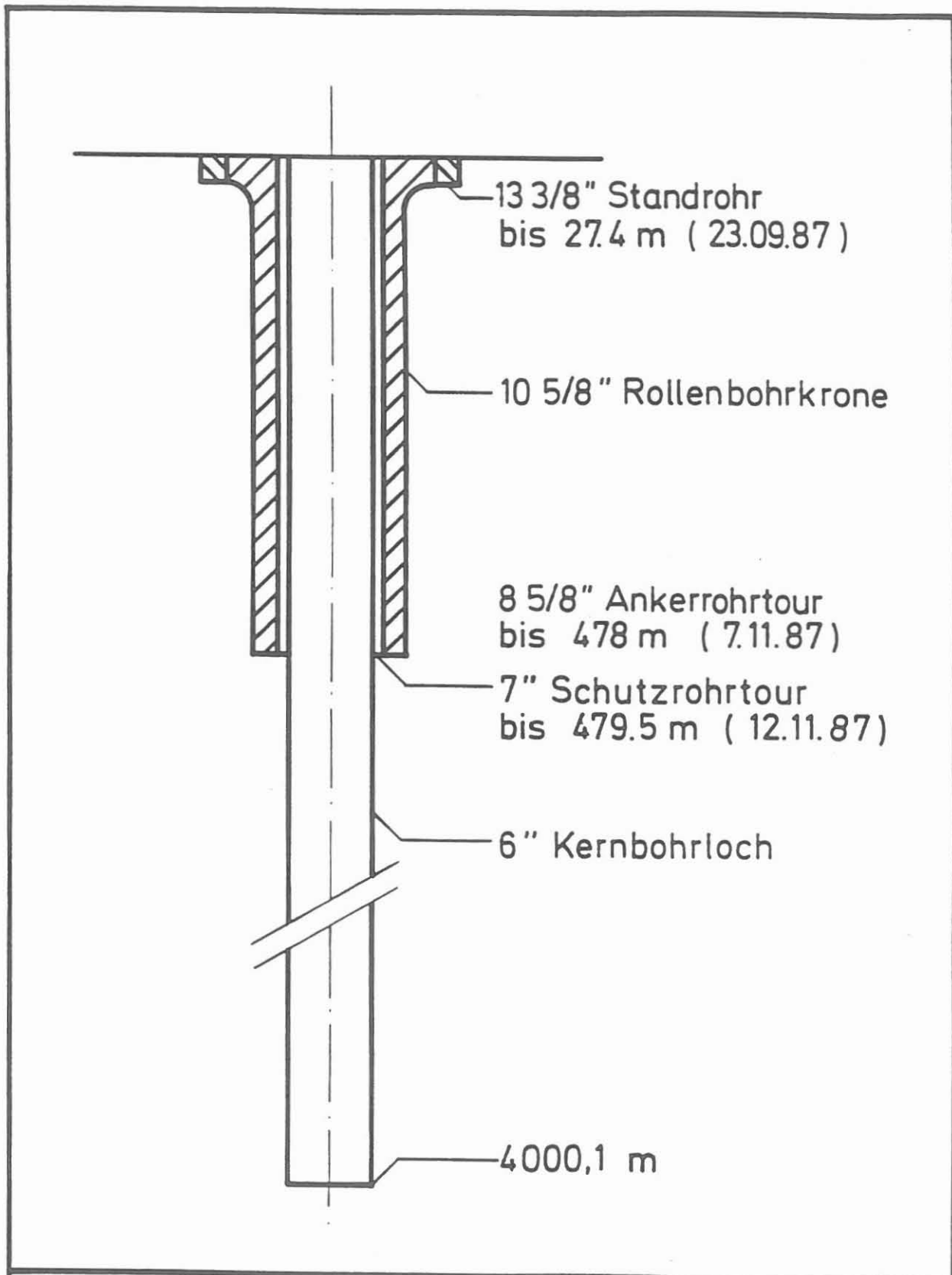


Abb. 3: KTB-Oberpfalz VB
Bohr - und Verrohrungsschema

KTB

Das Absenken des Spülungsspiegels sollte mit Hilfe der Wasserverdrängung des auszubauenden Gestänges erfolgen (Abschnitt 2.1). Die Berechnung der hierzu erforderlichen Volumina erfolgt unter Beachtung des Gestängeeinbauplanes. Das Bohrgestänge, das zur Zeit des Testes benutzt wurde, bestand aus unterschiedlichen "drill pipe"-Typen. In der folgenden Tabelle sind diese vom Bohrlochtiefsten her aufgelistet. Für die entsprechenden Einbaulängen wurden die Volumina berechnet.

Gestängetyp	Stahlvolumen in l/m	Einbaulänge in m	Verdrängung in l
4 3/4"DC	8,86	114,18	1011,6
3 1/2"HWDP	5,07	27,56	138,8
3 1/2"DP/H	2,79	988,17	2757,-
3 1/2"DP/G	3,20	962,50	3080,-
3 1/2"DP/S	3,20	707,59	2264,3
		2800,--	9251,7

Die rechnerische Absenkung ermittelt sich somit zu:

$$\frac{9251,7 \text{ l}}{26,2 \text{ l/m}} = \underline{\underline{353 \text{ m}}}$$

2.3 Ablauf des Injektionstestes

In der folgenden Aufstellung ist der chronologische Ablauf des Injektionstestes incl. der BGT-Messung vom 29.05.89 wiedergegeben. Weitere Einzelheiten sind in Abschnitt 4 zu finden.

- 22.05. Temperatur (NLfB) 8:00 - 16:00 (Referenzmessung)
17:00, Bohrloch mit 1260 l Spülung aufgefüllt
- 23.05. 6:30, Bohrloch wieder aufgefüllt und mit 45 MPa beaufschlagt.

Druck bis 22:30 gehalten (43 - 45 MPa), dabei wurden 2350 l verpreßt.

Rücklauf nach der Entlastung ca. 150 l.

23:00, Temperaturmessung (NLfB) bis

24.05. 4:30, Bohrloch aufgefüllt und mit 45 MPa beaufschlagt, hydraulischer Einschluß,

Druckbeobachtungen: (pro 15 Minuten),

12:30, 10 MPa Kopfdruck, dann Druckentlastung mit 120 l Rücklauf,

13:00, Temperaturmessung (NLfB) bis

19:00, erreichte Endteufe 3946 m, Bohrloch wieder aufgefüllt.

29.05. 14:00, Bohrlochmessung BGT - AMS - GR.

3 MESSERGEBNISSE DES ABSENKTESTES

Als erstes unerwartetes Ergebnis nach dem Ziehen des Gestänges wurde mit Hilfe der Leitfähigkeitselektroden und der Temperaturmeßstelle des AMS eine Spülungsspiegelabsenkung von nur 238 m anstatt der erwarteten 353 m festgestellt. Daß mit Hilfe der beiden beschriebenen Messungen der Spülungsspiegel relativ präzise bestimmt werden kann, geht aus Abb.4 hervor, wo in den Meßergebnissen das Eintauchen der beiden Sensoren (Temperatur und Leitfähigkeit) deutlich sichtbar wird. Schon aus der Registrierung der Auffahrt zeigte sich dann an dem weiteren Spülungsspiegelanstieg um mehr als 100 m, daß hier ein Zufluß vorlag, der dafür gesorgt hat, daß schon während des Ziehens des Gestänges der Spülungsspiegel von dem in Kapitel 2 berechneten Absenkungswert von 353 m unter Geländeoberkante auf die gemessenen 238 m angestiegen war.

Die darauffolgende Messung am 12.05.89 zeigte dann noch einmal ein Ansteigen des Spülungsspiegels auf ca. 60 m unter Geländeoberkante. Wie in Abb.5 dargestellt ist, blieb dieser Wert dann für die Dauer des Testes relativ konstant.

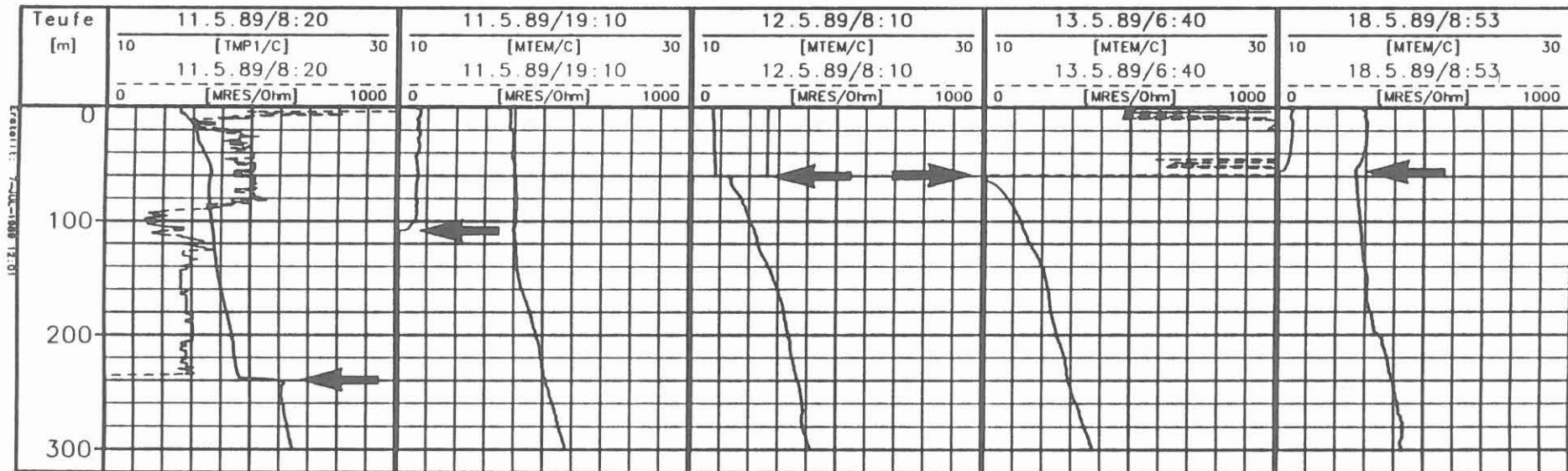


Abb. 4: Beispiel der Spülungsspiegelbeobachtung unter Verwendung des AMS-Tools für die ersten Messungen nach dem Ziehen des Gestänges.

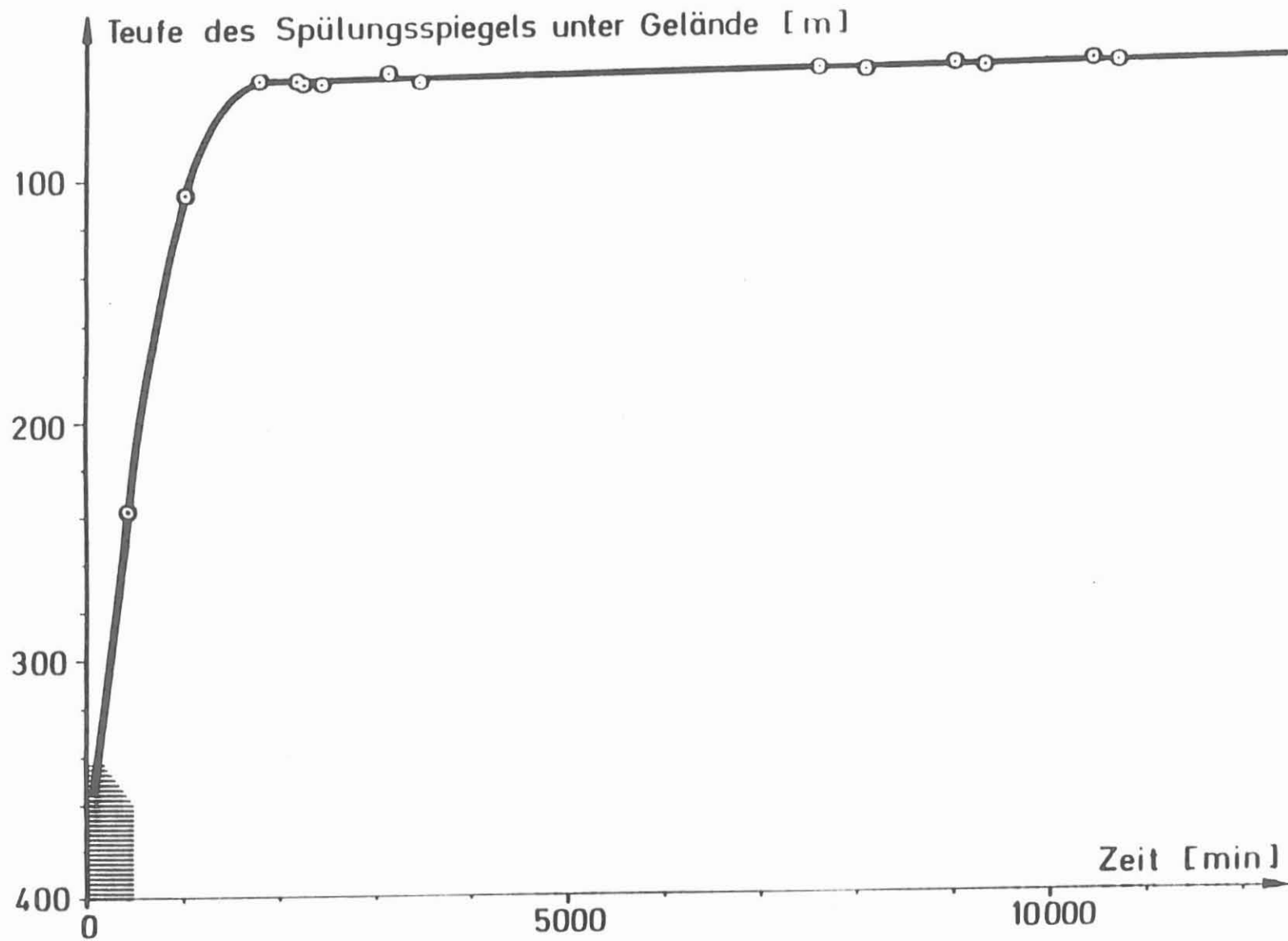


Abb. 5: Teufe des Spülungsspiegels nach dem Absenkttest in Abhängigkeit von der Zeit.

Von besonderer Bedeutung war die quantitative Aufteilung des Zuflusses in einen oberen und unteren Bereich der Bohrung. Hierzu diente die bei den verschiedenen Messungen festgestellte mittlere Lage der Spülungspille. In Abb.6 ist anhand von 5 Logs nach der Absenkung die Leitfähigkeitsverteilung im Bereich der wandernden Spülungspille aufgezeichnet. Die Messung vom 12.05.89 (Abb.6) zeigt eine plötzliche Aufspaltung der Spülungspille, obwohl der Druckausgleich nahezu schon erfolgt war. Am 13.05.89 war der untere Teil der Aufspaltung noch sichtbar, am 18.05.89 aber nicht mehr meßbar. Diese zeitlich begrenzte Anomalie ist vermutlich ein Verschleppungseffekt beim Einfahren der Sonde. Er tritt nur beim Ausfahren der Sonde auf (Kessels et al. 1990, Reifenstahl et al., 1990). Ein Zufluß dieser Größe hätte sicher die Lage der Pille beeinflußt. Genaue Untersuchungen dieses Erscheinungsbildes wären wünschenswert, sollen aber nicht innerhalb dieses Berichtes erfolgen. Setzt man nun die gemessenen Spiegel- bzw. Pillenanhebungen entsprechend den Bohrlochdurchmessern in Volumenzuflüsse um, so erkennt man, wie in Abb.7 dargestellt, daß ca. 86 % des Gesamtzuflusses aus dem Bereich unterhalb der Spülungspille kam. Die berechneten Zuflußraten sind ebenfalls in Abb.7 mit aufgetragen.

Nach der Bestimmung der Zuflußmengen oberhalb und unterhalb des Pillenniveaus kann versucht werden, die wesentlichen Zuflußstellen anhand der Logs hinsichtlich der genaueren Festlegung der Zuflußorte, der Salinität des Zuflusses und einer Abschätzung der jeweiligen Zuflußmengen zu untersuchen. Von besonderer Bedeutung ist hierbei wieder die Untersuchung der Spülungsleitfähigkeit. Ein grundsätzliches Problem ist allerdings, daß allein aus der Leitfähigkeitsmessung eine Trennung von Zuflußmenge und Salinität des Zuflusses nicht möglich ist. Es ist sogar denkbar, daß ein Zufluß gar nicht als Leitfähigkeitsanomalie auftritt, wenn der Zufluß die gleiche Salinität (als NaCl-Äquivalent) besitzt wie die Spülung. Dies kann z.B. dadurch auftreten, daß im Zeitraum eines Absenktestes nur ehemals in das Gebirge verpreßte Spülung in die Bohrung zurückgeführt wird.

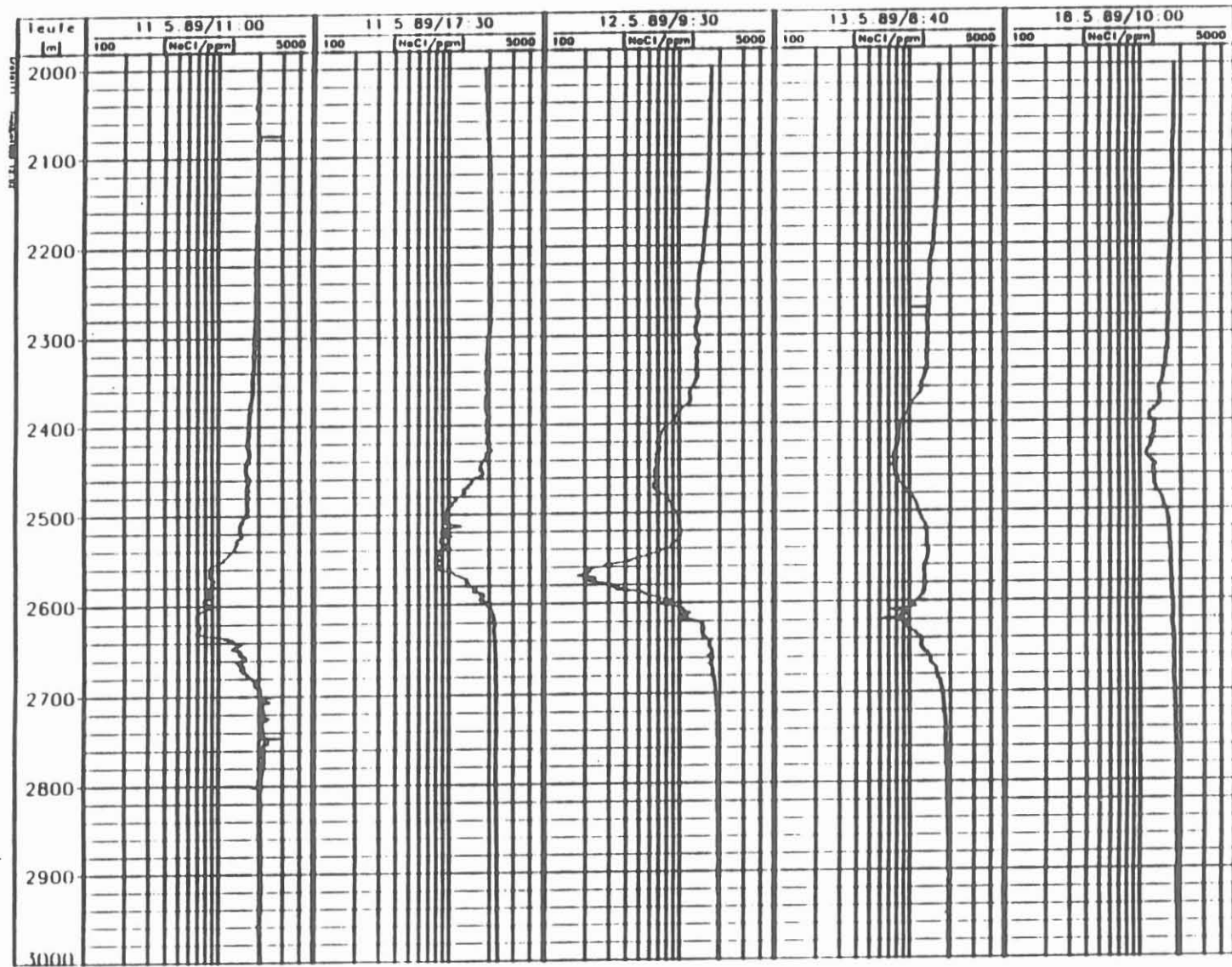


Abb. 6: Lage der Spülschleife, ermittelt durch die AMS-Spülsleitfähigkeitsmessung für die ersten Logs nach Spülsabsenkung.

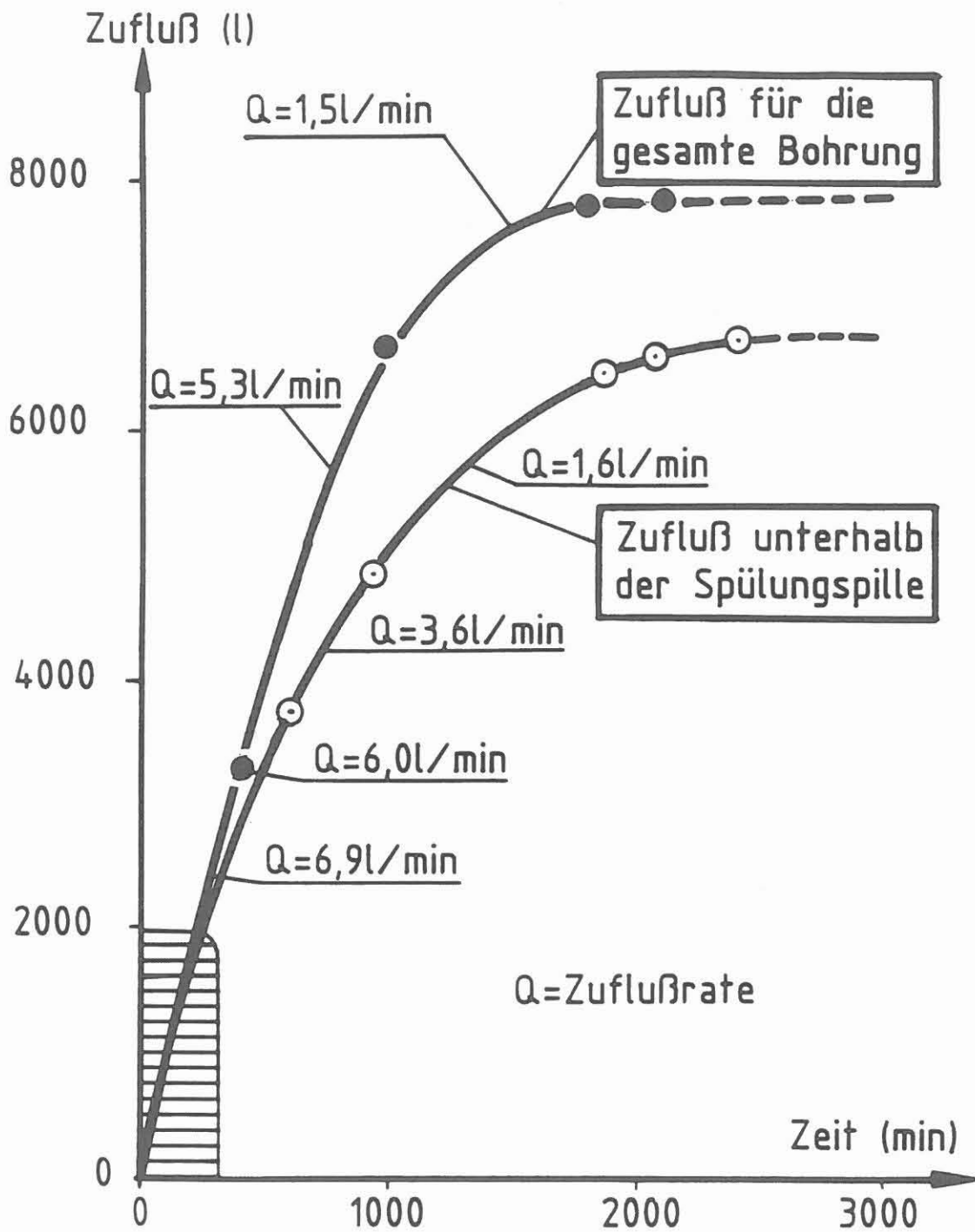


Abb. 7: Volumenzuflüsse während des Absenktestes in der KTB-Vorbohrung für die Gesamtbohrung, bestimmt durch Änderung des Spülungsspiegels für den Bereich unterhalb 2.800 m, bestimmt durch die Spülungspille.

Da immer mit einer Vermischung zwischen Spülung und Zufluß zu rechnen ist, ist zu beachten, daß die aus dem Spülungswiderstand berechnete NaCl-Äquivalentkonzentration im Falle eines höhersalinaren Zuflusses am Punkt der maximalen Konzentration einen immer noch zu niedrigen Wert für die wirklich zufließende Flüssigkeit angibt. Umgekehrt zeigt bei einem entsprechenden niedrigsalinaren Zufluß das Minimum des Spülungswiderstandes einen zu hohen Wert.

Die ersten Logergegebnisse zeigten schon deutlich, daß für die Zuflußmengen während des Absenktestes in der KTB-Vorbohrung im wesentlichen zwei Zonen verantwortlich waren. Der Hauptzufluß unterhalb der Spülungspille stellte sich dabei als ein relativ hochsalinärer Zufluß mit einer NaCl-Äquivalentkonzentration von ca. 50.000 ppm dar. In Abb.8 wird anhand der Leitfähigkeitsmessungen zu verschiedenen Zeiten deutlich, wie sich die hochsalinäre Flüssigkeit in der Bohrung fast kolbenförmig nach oben schiebt.

An der Temperaturmessung, durchgeführt direkt nach dem Ziehen des Gestänges (Abb.9), wird anhand eines zunehmenden Temperaturanstiegs deutlich, daß die Zuflußstelle in ca. 4000 m Tiefe anzusetzen ist. Der positive Peak markiert hier, daß der Zufluß auf jeden Fall wärmer als die nähere Bohrlochumgebung ist. Ob der Zufluß eine kleinere oder größere Temperatur als die ungestörte Gebirgstemperatur hat, bedarf noch weiteren intensiven Untersuchungen.

Anhand von Abb.9 sieht man ebenfalls, daß schon bei der zweiten Temperaturmessung nach der Absenkung die Temperatur oberhalb der Eintrittsstelle praktisch einen linearen Verlauf nimmt.

Die Hauptzutrittsstelle oberhalb der Spülungspille kann relativ einfach mit der Spülungsleitfähigkeitsmessung detektiert werden. In Abb.10 sieht man allerdings, daß hier ein Zufluß mit geringerem Salzgehalt, als durch die Spülung gegeben ist, vorliegt. Anhand der Temperaturmessung (Abb.11) läßt sich insbesondere aus

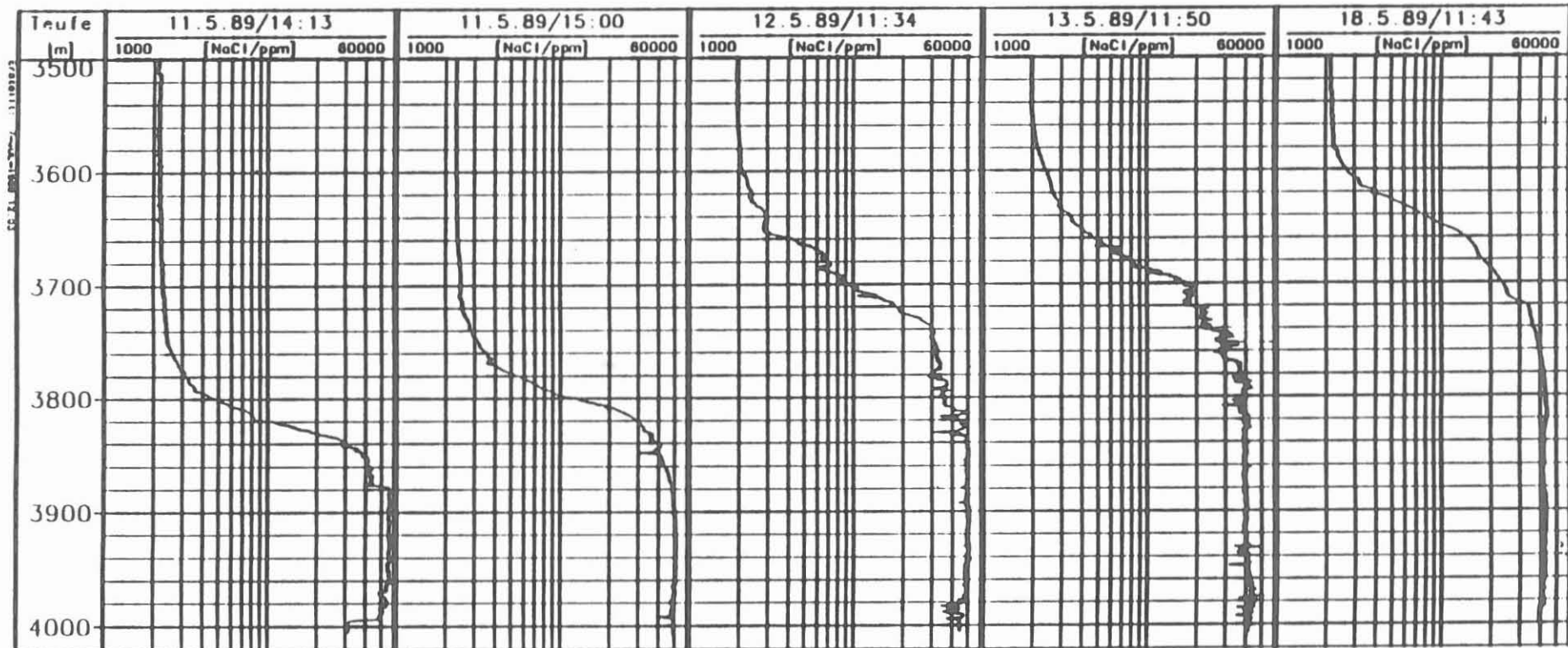


Abb. 8: Beobachtung des hochsalinen Zuflusses im Bohrlochstiefsten der KTB-Vorbohrung nach Beendigung der Spülungsabsenkung. Die NaCl-Äquivalentkonzentrationen wurden aus der AMS-Leitfähigkeitsmessung berechnet.

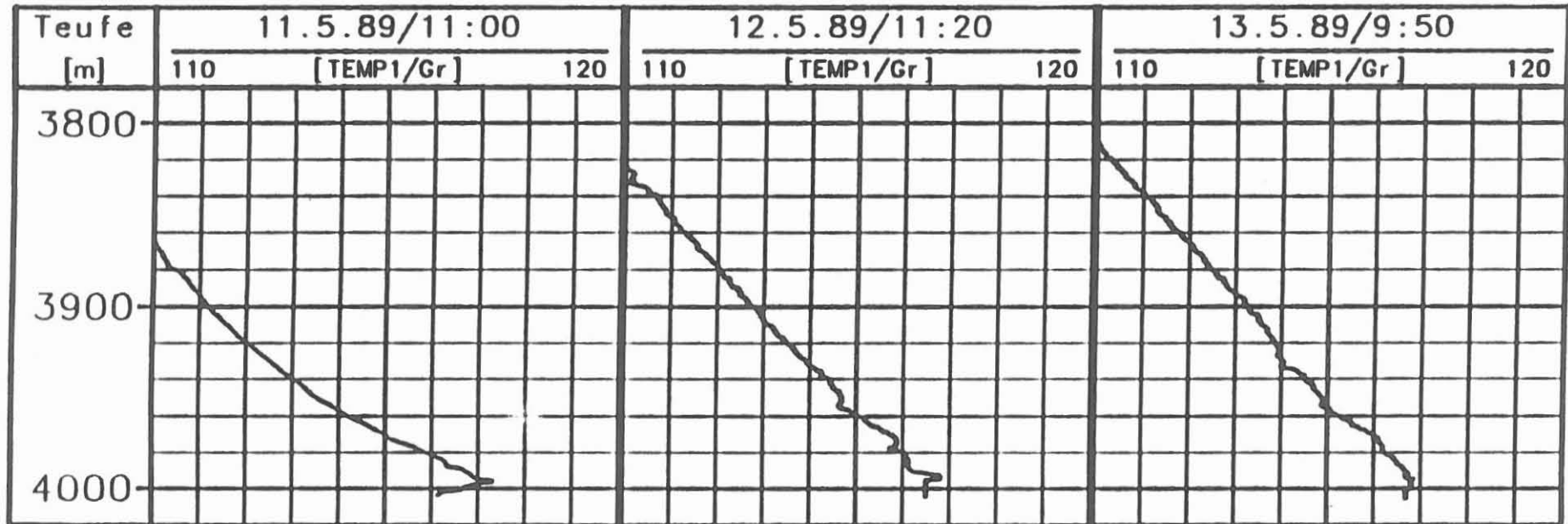


Abb. 9: Temperaturmessungen im Bohrlochtiefsten nach erfolgter Absenkung.

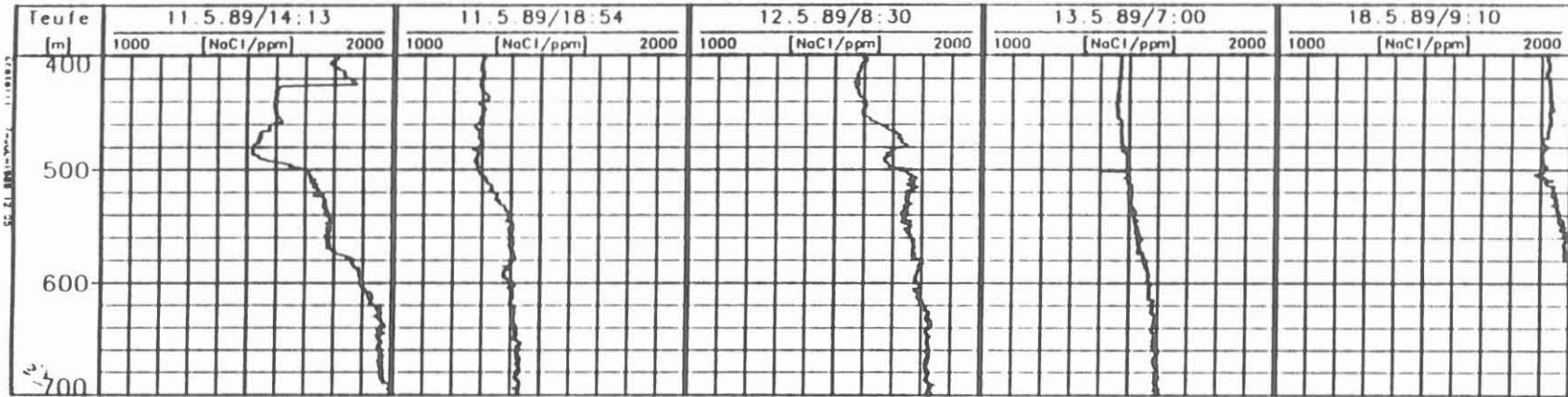


Abb.10: NaCl-Äquivalentbestimmung aus den AMS-Leitfähigkeitmessungen im oberen Zuflußbereich der KTB-Vorbohrung.

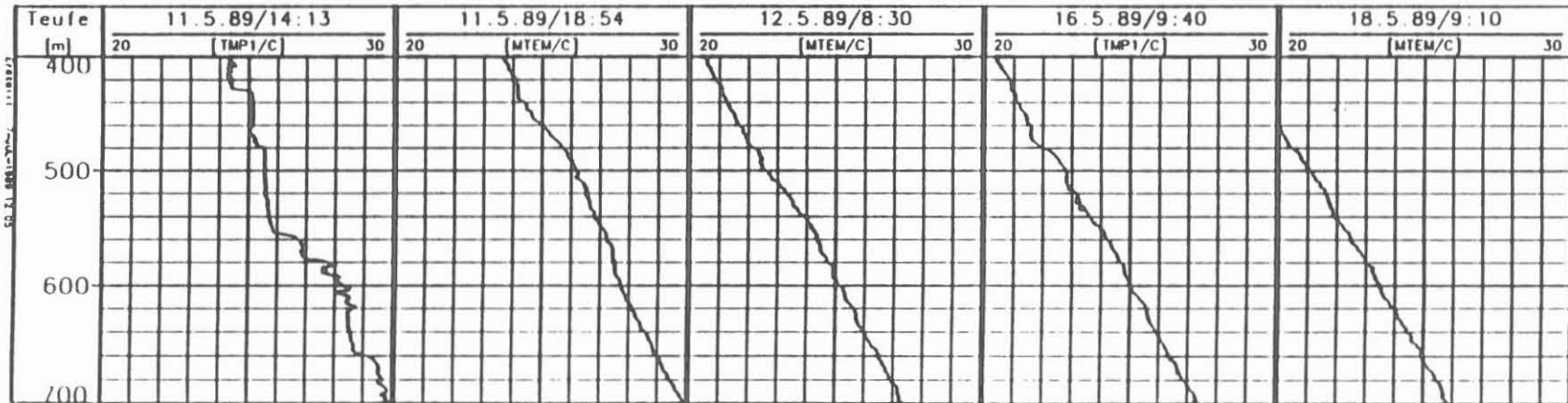


Abb.11: Temperaturmessungen im Zuflußbereich des oberen Teils der KTB-Vorbohrung nach der Spülungsspiegelabsenkung.

dem Log der ersten Messung nach dem Absenken ein stufenförmiger Temperaturverlauf erkennen, der ebenfalls deutlich macht, daß die wesentlichen Zuflußstellen zwischen 575 und 425 m liegen. Zusammenfassend kann also festgestellt werden, daß ein hochsalinärer Zufluß im unteren Bohrlochbereich und ein niedersalinärer, knapp unterhalb des Rohrschuhs, den wesentlichen Anteil an der Gesamtzuflußrate haben, aber auch an anderen Stellen interessante Indikatoren für Zuflüsse vorhanden sind.

4 MESSERGEBNISSE DES INJEKTIONSTESTES

Im Anschluß an den Absenktest wurde dann ein Injektionstest über einen Zeitraum von 16 Stunden mit einem Kopfdruck von 4,4 MPa durchgeführt. Dies ergibt bei einem angenommenen Grundwasserspiegel von 60 m unter Geländeoberkante einen Überdruck von 5 MPa gegenüber dem Formationsdruck. Bei diesem Experiment wurde in einer manuellen Zweipunktregelung der Druck durch Zupumpen zwischen 4,3 und 4,5 MPa konstant gehalten und registriert. In Abb.12 ist die Injektionsrate während des Injektionstestes aufgezeichnet. Diese macht deutlich, daß, obwohl der Injektionsdruck mit ca. 5 MPa (4,4 MPa + 0,6 MPa für 60 m Spülungssäule) wesentlich höher als der Anfangabsenkdruck von ca. 3,4 MPa war und der Absenkdruck nach ca. 8 Stunden schon auf 1,7 MPa gefallen war, der Gesamtzufluß während des Absenktestes mit 8 m³ mehr als viermal so groß wie die gesamte Injektionsmenge war. Betrachtet man des weiteren die Bestimmung der Spülungsleitfähigkeit, die nach Beendigung des Injektionstestes zusammen mit einer Kalibermessung durchgeführt worden ist, so sieht man, daß der Bereich sehr stark erhöhter Leitfähigkeit während des Injektionstestes kaum abgesenkt worden ist. Die Spülungspille, die als weiterer Indikator für den Abfluß im unteren Bohrlochsbereich hätte dienen können, war unglücklicherweise durch den verstrichenen Zeitraum durch Verwirbelungen und Diffusionsvorgänge in ihrer Kontur schon so undeutlich, daß sie nicht für eine Bestimmung des Abflusses herangezogen werden

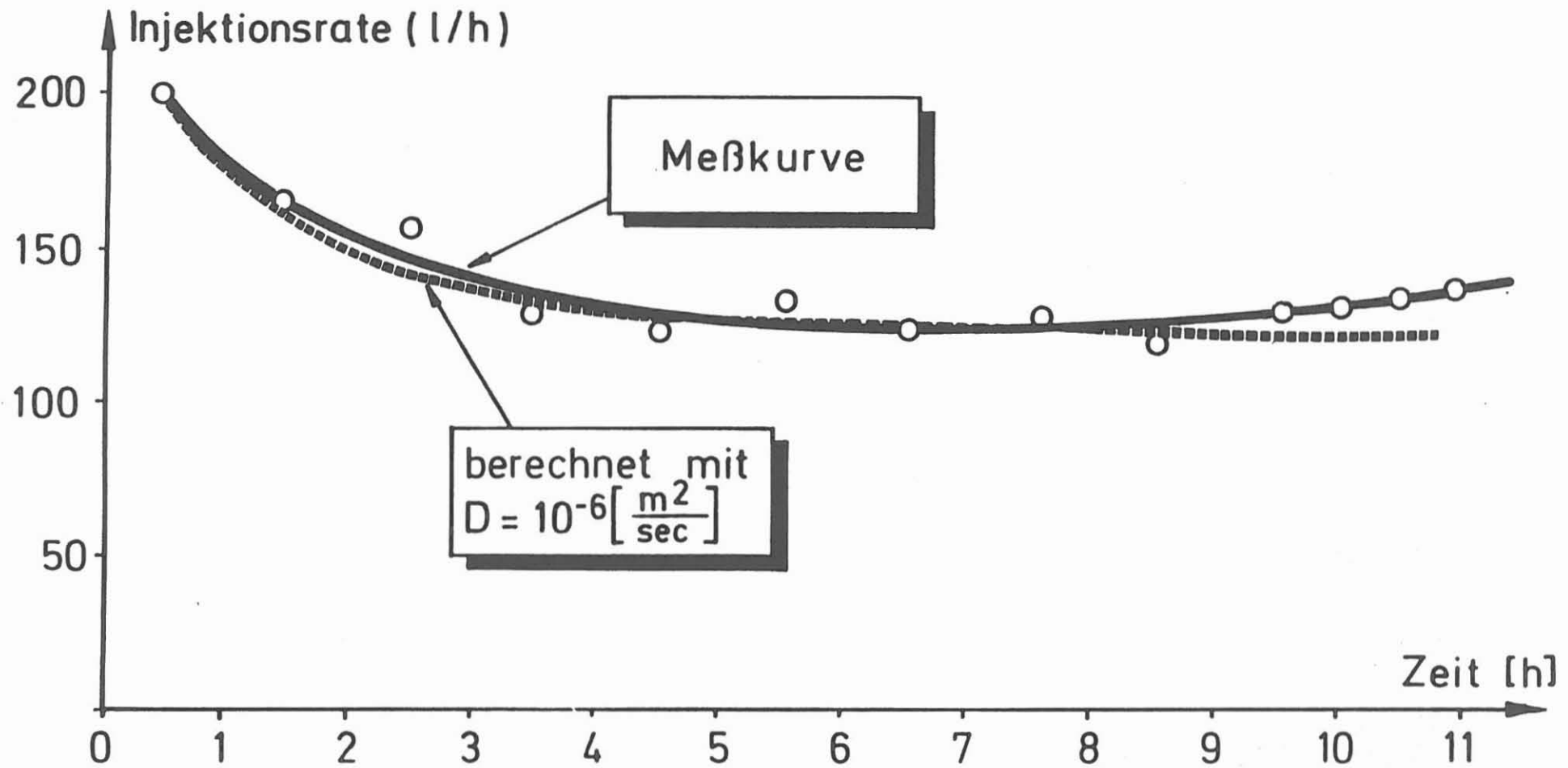


Abb.12: Injektionsrate in die Bohrung während des Konstant-Drucktestes.

konnte. Trotzdem ist aufgrund der geschilderten Ergebnisse festzustellen, daß die Abflußrate beim Injektionstest, bezogen auf den angewandten Druck und die Zeit der Injektion, wesentlich kleiner als der Zufluß beim Absenkttest war.

Die detaillierteren Auswertungen in Abschnitt 5 bestätigen dies noch einmal.

Zur Erklärung dieses Phänomens, daß es hydraulisch in der Bohrung eine Art Diodencharakteristik gibt (Zufluß ist möglich, Abfluß nicht), ist nur mit der in der KTB-Vorbohrung verwandten Spülung (Dehydril-HT als Viskosifizier) zu erklären.

Schon frühere Zuflüsse salinärer Formationswässer hatten deutlich gezeigt, daß mit steigendem Chloridgehalt und fallendem pH-Wert die Spülung zerfällt und ausflockt. Gleiches wird mit Sicherheit auch an der Oberkante der Grenze zwischen dem hochsalinaren Zufluß und der Spülung, die beim Absenkttest auftrat, geschehen sein. Dies dürfte dazu geführt haben, daß durch die absinkende Ausfällung der untere Bohrlochsbereich versiegelt wurde.

Auch die bedeutsame Erhöhung der Bohrlochstabilität nach Erhöhung des Dehydril-Anteils (Kessels, 1989) spricht dafür, daß die Spülung die Bohrung hydraulisch abisoliert.

Während des Injektionstestes wurden unglücklicherweise keine Leitfähigkeitsmessungen durchgeführt, da der AMS-Sondenteil nicht zusammen mit der hier zum Einsatz gekommenen Temperaturmeßsonde gefahren werden kann.

Die Druckabfallkurve, die während eines Einschlußtestes nach dem Konstantdrucktest ermittelt wurde, ist in Abb.13 aufgezeichnet. Auch hier zeigt sich, daß der Abfluß trotz eines Startdruckes von 5 MPa wesentlich geringer als der Zufluß beim Absenkttest war.

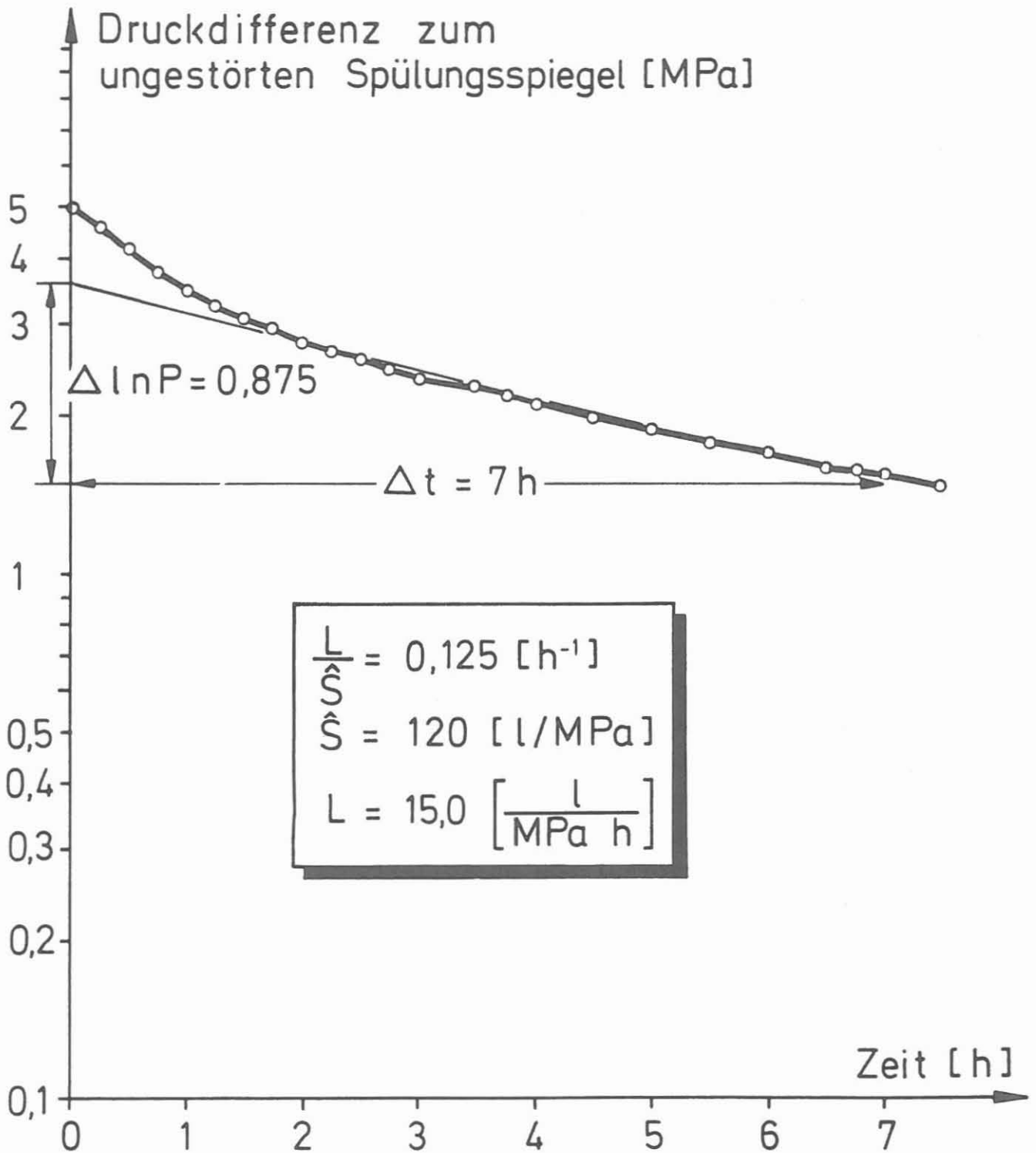


Abb.13: Druckabfallkurve während des Einschlußtestes (Erläuterung siehe Abschnitt 5).

5 ERSTE HYDRAULISCHE AUSWERTUNGEN

Jede Auswertung eines hydraulischen Tests steht vor dem Problem, ein räumliches Modell für die vorhandenen Fließwege zugrunde legen zu müssen. In Abb.14 wird die Problematik anhand verschiedener Beispiele aufgezeigt.

In konventionellen hydraulischen Betrachtungen, die vornehmlich der Beschreibung von Fließwegen in homogenen Leitern dienen, wird dabei meistens, wie im linken Bild von Abb.14 dargestellt, der horizontal geschichtete Fall eines homogenen hydraulischen Leiters zur Auswertung von Testen herangezogen.

Für die Betrachtung des einfachsten instationären Falles der hydraulischen Leitung werden dabei die Kontinuitätsgleichung

$$\Delta P = \frac{1}{D} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

und das Darcy-Gesetz

$$\underline{V} = - \frac{K}{\eta} \nabla P \quad (2)$$

benutzt.

Hierbei sind:

Δ = Laplace Operator

∇ = Nabla Operator

P = Druck Potential

t = Zeit

$D = \frac{K}{\eta \cdot s} =$ hydraulische Diffusionskonstante

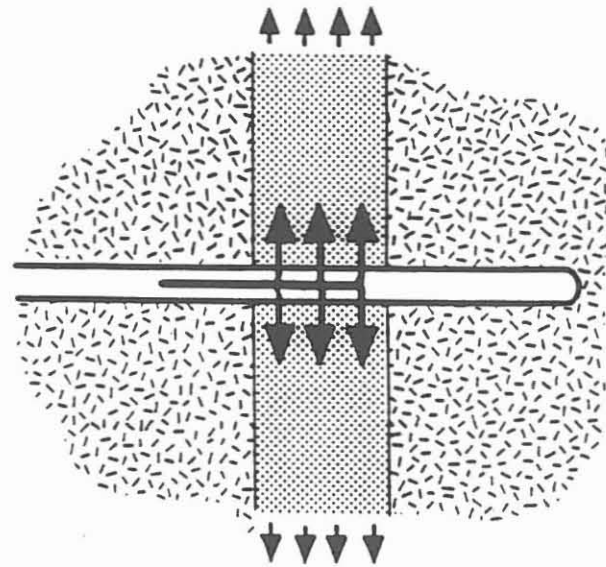
K = Permeabilität

η = Viskosität

\underline{V} = Darcygeschwindigkeit

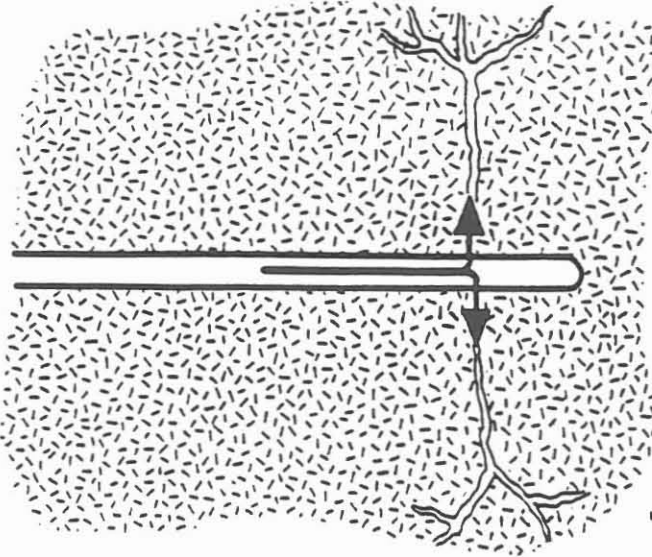
(Volumenstromdichte der Flüssigkeit)

S = Speicherkoeffizient



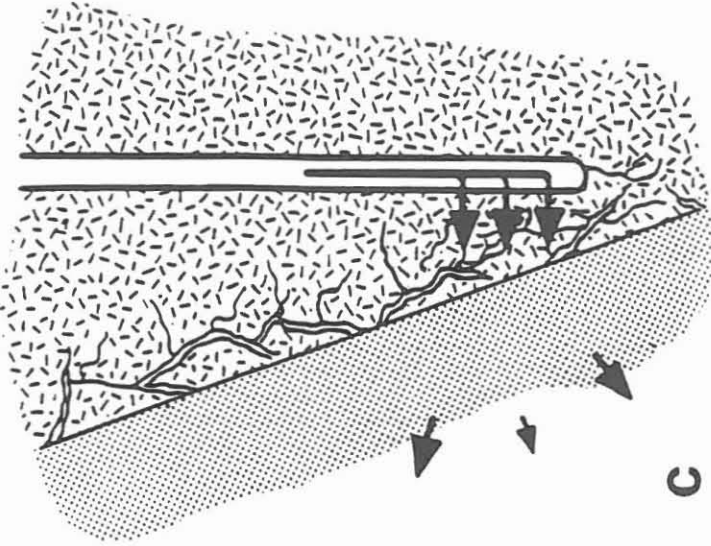
a

horizontaler homogener
hydraulischer Leiter
(Sedimentäres Modell)



b

horizontale Einzelkluft
mit anschließender
hydraulischer Ver-
zweigung



c

inhomogene Kluftleiter
zwischen Bohrung und
einem homogenen
hydraulischen Leiter

Abb.14: Mögliche Modelle eines hydraulischen Abflusses aus einer Bohrung vom homogenen hydraulischen Leiter zur diskontinuierlichen Kluftleitung.

KTB

Für die hier diskutierten Teste wurde als Abschätzung nur eine einfachste instationäre Modellrechnung für den Konstantdrucktest (siehe Abschnitt 5.2) durchgeführt. Weitere instationäre Auswertungen wurden von Stober und Reifenstahl (1989) ausgeführt.

Aus den Meßergebnissen dieses Testes (siehe Abb.12) ergab sich, daß nach einigen Stunden der Druckkonstanthaltung auch der Abfluß konstant blieb und sogar in den Meßwerten etwas anstieg.

Hiernach lag es nahe, für die ersten Auswertungen erst einmal von quasistationären Druckverhältnissen zwischen der Spülungssäule und einem Speicher in einiger Entfernung von der Bohrung auszugehen.

Durch das Modell eines Gesteinsbereiches um die Bohrung mit niedriger hydraulischer Leitfähigkeit, an das sich dann ein speicherfähiges Gestein mit einem zu vernachlässigenden hydraulischen Widerstand anschließt, läßt sich der beobachtete stationäre Abfluß erklären. Ein schematisches Abbild des zugrunde gelegten hydraulischen Systems für den stationären Abfluß ist in Abb.15 dargestellt. Verschiedene Abflußbereiche aus der Bohrung werden dabei jeweils durch einen hydraulischen Widerstand mit dem Leitwert L_i bezeichnet. Im Anschluß an diesen hydraulischen Widerstand ist dann ein Speicher mit dem Innendruck ΔP_i eingezeichnet. Dies ist der Differenzdruck zwischen der Bohrung und dem Speicher. Für Gruppen dieser Abflußzonen kann ein hydraulischer Ersatzwiderstand angesetzt werden, der, wie für eine Parallelschaltung hydraulischer Widerstände bekannt, aus der Summe der Einzelleitwerte gebildet wird. Voraussetzung ist dabei nur, daß alle Einzelwiderstände an Speicher gekoppelt sind, die ein gleiches ΔP_i besitzen. Nimmt man nun in erster Näherung an, daß auch in den Bereichen, wo keine homogenen hydraulischen Leiter vorliegen (z.B. Klüfte), ein linearer Zusammenhang zwischen Potentialgradienten und der Volumenstromdichte besteht (für homogene hydraulische Leiter das Darcy-Gesetz), so erhält man für den Abfluß Q aus der gesamten Bohrung die Beziehung nach Gleichung 3,

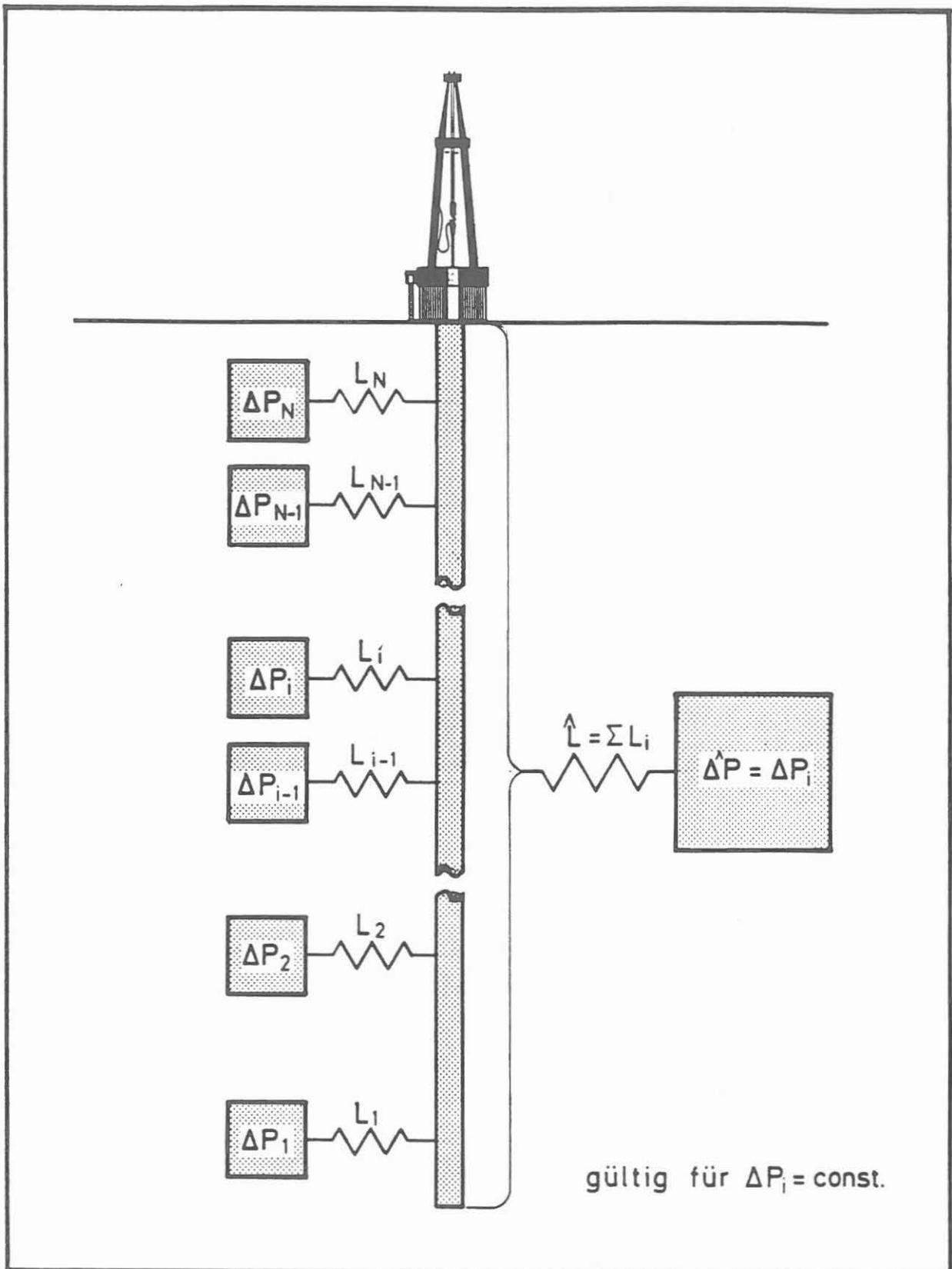


Abb.15: Schematisches Modell des stationären hydraulischen Ab- bzw. Zuflusses aus einer Bohrung mit verschiedenen hydraulisch leitfähigen Horizonten.



wobei L der hydraulische Ersatzwiderstand für den Gesamtabfluß ist.

$$Q = \dot{V} = -L \cdot \Delta P \quad (3)$$

V = Abflußvolumen aus der Bohrung pro Zeiteinheit

L = hydraulischer Leitwert der Bohrung

(hydrogeologisch spezifische Ergiebigkeit)

ΔP = Druckdifferenz zwischen Spülung und Speicher

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt}$$

Die Voraussetzung für die Gültigkeit dieses Ansatzes ist, wie schon erwähnt, eine gleiche Potentialdifferenz für alle hydraulischen Leiter und ein stationärer Fluß durch das hydraulische Leitungssystem. Für den iten Teil des Gesamtabflusses gilt entsprechend die Beziehung nach Gleichung 4, wobei für den Fluß selbstverständlich die Druckdifferenz maßgebend ist, die durch den Spülungsspiegel vorgegeben ist.

$$Q_i = -L_i \Delta P \quad (4)$$

Für einen homogenen hydraulischen Leiter der Mächtigkeit h , einem zylindersymmetrischen Speicher in einem Abstand r_s von der Bohrung, erhält man die bekannte logarithmische Abhängigkeit nach Gleichung 5,

$$Q = -\frac{K}{\eta} \cdot (h \cdot 2\pi \cdot \ln^{-1} \left(\frac{r_s}{r_B} \right)) \cdot \Delta P \quad (5)$$

aus der deutlich wird, daß der Leitwert durch drei voneinander unabhängige Gegebenheiten charakterisiert wird:

1. Der räumlichen Anordnung der hydraulischen Leitungsbahnen (des Porenraumes beim Sediment bzw. der Matrixleitung oder des betrachteten Kluftsystems), charakterisiert durch die Permeabilität K des homogenen hydraulischen Leiters.
2. Die Eigenschaft des in diesem Leitungssystem transportierten Fluids, die hier durch die Viskosität des Fluids, das als linear viskos angenommen wurde, charakterisiert wird.
3. Einem Wert für die geometrische Anordnung der Randbedingungen des hydraulischen Leiters (in diesem Fall die Bohrlochwand und die Anordnung der Punkte des Speicherrandes, in die das hydraulische Leitungssystem mündet), charakterisiert durch den eingeklammerten Ausdruck mit den beiden Radien.

Die drei geschilderten Einflußgrößen bleiben physikalisch auch für den in Abb.14 dargestellten, nicht zylindersymmetrischen Kluftleiter erhalten, nur daß die physikalische Bedeutung der Parameter nicht mit der Bedeutung eines homogenen hydraulischen Leiters gleichgesetzt werden kann.

Da für die KTB-Vorbohrung keinerlei Informationen über die räumliche Anordnung des hydraulischen Leitungssystemes vorhanden sind, hat jede Aufteilung eines durch eine Messung bestimmten hydraulischen Widerstandes in die drei beschriebenen Grundgrößen einen mehr oder weniger stark spekulativen Charakter, so daß im Folgenden auf diese Aufteilung verzichtet werden soll.

Es bleibt allerdings zu hoffen, daß unter Zuhilfenahme der in der KTB-Vorbohrung geplanten hydraulischen Tests bessere Aussagen über den hydraulischen Leiter selbst gewonnen werden können, was allerdings nur durch eine intensive Beobachtung der Instationaritäten der hydraulischen Fließvorgänge möglich ist, wobei selbstverständlich auch für diese Interpretation eine Analyse der Richtungsorientierung und der genauen Anordnung des im Gestein nicht zugänglichen Rißsystemes nicht möglich ist.

Im weiteren wird nun davon ausgegangen, daß Zu- bzw. Abflußbeobachtungen durch eine Teufenbeobachtung des Spülungsspiegels (ΔZ = Abweichung vom Ruhespülungsspiegel) bzw. einer Spülungsmarkierung (z.B. der vorstehend beschriebenen Spülungspille mit B_2 = Teufenabstand zum Ruhespiegel) möglich ist. Die KTB-Vorbohrung konnte so in zwei hydraulisch leitfähige Bereiche unterteilt werden. Setzt man nun, wie bekannt, vorausgesetzt konstanter Dichte ρ der gesamten Spülungssäule, die Beziehung nach Gleichung 6 ein

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta Z \quad (6)$$

und berücksichtigt, daß die Querschnittsfläche F der Bohrung, multipliziert mit der Höhenänderung ΔZ , den Gesamtzufluß ergibt, so erhält man durch Differentiation nach der Zeit die Differentialgleichung 7:

$$\Delta \dot{Z} + \frac{L \cdot \rho \cdot g}{F} \Delta Z = 0 \quad (7)$$

$$\hat{S} = \frac{F}{\rho \cdot g} = \text{Wellbore-Storage-Koeffizient}$$

und hieraus die in Gleichung 8 dargestellte exponentielle Abhängigkeit:

$$\Delta Z(t) = \Delta Z_{0i} \exp \left(- L \frac{\rho \cdot g}{F} t \right) \quad (8)$$

Für einen hydraulischen Teilbereich der Bohrung ergibt sich ebenfalls in ähnlicher Form die Gleichung 9:

$$\Delta Z_i = \Delta Z_{0i} \exp \left(- L \frac{\rho \cdot g}{F} t \right) \quad (9)$$

Wir sehen hier, daß die Zeitabhängigkeit des hydraulischen Abflusses eines Teilbereiches der Bohrung unter den hier angesetzten Voraussetzungen die gleiche wie für die Gesamtbohrung ist.

Verständlich wird dies, wenn man berücksichtigt, daß die Anregung für einen Zu- bzw. Abfluß, d.h. die Druckdifferenz zwischen Bohrung und Speicher, durch den Spülungsspiegel gegeben wird. Für die Auswertung eines hydraulischen Testes über den gesamten Bohrlochbereich ergibt sich hierdurch der glückliche Umstand, daß die Verhältnisse der Zuflußraten der einzelnen Bohrlochabschnitte untereinander den hydraulischen Leitwerten dieser Abschnitte direkt proportional sind. Des weiteren kann die Betrachtung der zeitlichen Abhängigkeit dieser Verhältnisse einen Hinweis darauf geben, inwieweit die Annahmen der Instationarität und des gleichen Differenzdruckpotentials für alle Speicher gerechtfertigt sind. In Abschnitt 5.2 wird hierauf für die KTB-Vorbohrung noch näher eingegangen.

Im Falle des Injektionstestes kann die Speicherfähigkeit der Bohrung, d.h. die Änderung des Volumenabflusses bei Druckänderung, nicht aus der Höhenänderung des Spülungsspiegels berechnet werden, sondern hier müssen Kompressibilität der Spülung und die elastischen Parameter des Gesteins mit herangezogen werden. Eine besondere Auswirkung auf eine Erhöhung des vorstehend beschriebenen Wellbore-Storage-Koeffizienten \hat{S} haben selbstverständlich Gasblasen in der Spülung und die mechanische Steifheit des gesamten übertägigen Systemes eines Bohrlochabschlusses, die nur sehr schwer berechenbar sind, so daß für diesen Speicherkoeffizienten auf die experimentellen Daten selbst zurückgegriffen wurde. \hat{S} wurde demgemäß über die Beziehung Gleichung 10

$$\hat{S} = \frac{d V}{d P} \quad (10)$$

aus den Druck- und Zuflußänderungen beim Injektionstest direkt ermittelt, wie in Abschnitt 5.3 noch weiter dargestellt wird. Nimmt man anstatt der Differenzdruckspülungsspiegelbeziehung S in eine Rechnung gemäß Gleichung 10 auf, so erhält man ebenfalls eine exponentielle Abhängigkeit für den Druckabfall in der Bohrung, wie sie in Gleichung 11 dargestellt ist.

$$\Delta P = P_0 \exp. \left(- \frac{L}{S} t \right) \quad (11)$$

Hier bietet sich an, daß aus dem im Einschlußtest ermittelten Druckabfall über der Zeit noch einmal nachgeprüft werden kann, ob die für stationären Fluß anzusetzende logarithmische Abhängigkeit gegeben ist und ob der dann aus dieser Abhängigkeit ermittelte hydraulische Widerstand für das Gesamtsystem den gleichen Wert besitzt, wie dies aus dem Konstantdrucktest erhalten wurde. Weiter konnte aus Gleichung 3 mit der stationären Fließrate und dem angesetzten Differenzdruck der hydraulische Widerstand direkt bestimmt werden.

5.1 Erste Auswertungsergebnisse des Absenktestes

Die Zielsetzung einer ersten hydraulischen Auswertung des Absenktestes war es, die folgenden zwei Fragestellungen zu beantworten:

1. Stimmen die Modellannahmen der Stationarität und des konstanten Differenzdruckes zwischen Bohrung und den verschiedenen hydraulisch angekoppelten Reservoirs?
2. Welche hydraulischen Leitwerte ergeben sich für die beiden Bohrlochsbereiche oberhalb und unterhalb der Spülungsschleife, eingesetzt in eine Teufe von 2800 m unter Geländeoberkante?

Eine Einschränkung für die Auswertung des Absenktestes ist, daß aufgrund der unerwartet hohen Zuflußrate der Gesamtzufluß nach ca. 40 Stunden praktisch vollständig erfolgt war und in dieser Zeit nur relativ wenige Logs gefahren werden konnten, mit denen die Pillenlage und die Lage des Spülungsspiegels bestimmt werden konnten. Trotzdem zeigte sich anhand der in Abb.7 dargestellten Zuflußraten, daß das Verhältnis dieser Zuflußraten im Rahmen der Meßgenauigkeit nur eine schwache zeitliche Abhängigkeit zeigt. Dies kann, wie im vorstehenden Abschnitt schon ausgeführt wurde, als erster Beleg dafür gelten, daß für den Zuflußtest die Bedingungen für eine erste stationäre Auswertung gegeben sind.

Die, wenn auch nur schwachen, Abweichungen von dem mittleren Zuflußratenverhältnis von 86 % zwischen dem Zufluß unterhalb der Pillenteufe und dem Gesamtzufluß, insbesondere am Ende der Zuflußperiode, zeigen allerdings, daß bei zukünftigen selektiven Testen bei genauer Betrachtung auch mit etwas unterschiedlichem Porenwasserdruck in verschiedenen Speichersystemen zu rechnen ist.

Allerdings kann diese Druckdifferenz nicht bedeutend sein, da sich sonst ein permanenter merkbarer Fluß durch die Bohrung vom oberen zum unteren Bohrlochsbereich bzw. umgekehrt ergeben müßte, der bisher noch nicht beobachtet werden konnte. Wenn allerdings durch die Art der verwandten Spülung ein "Diodeneffekt" existiert, der den Zufluß in die Bohrung ermöglicht und einen Abfluß aus der Bohrung sehr stark verhindert, würde trotz unterschiedlicher Speicherdruckdifferenz sich nach einiger Wartezeit in der Bohrung nur der Druck des Speichers als Höhe der Spülungssäule einstellen, der den höchsten Druckgradienten, bezogen auf den sich einstellenden Spülungsspiegel, besitzt. Eine Strömung in der Spülungssäule könnte dann weitgehend unterbunden sein.

Die scheinbare Änderung der Zuflußverhältnisse zum Ende der Zuflußperiode kann aber auch durch meßtechnische Unsicherheiten und

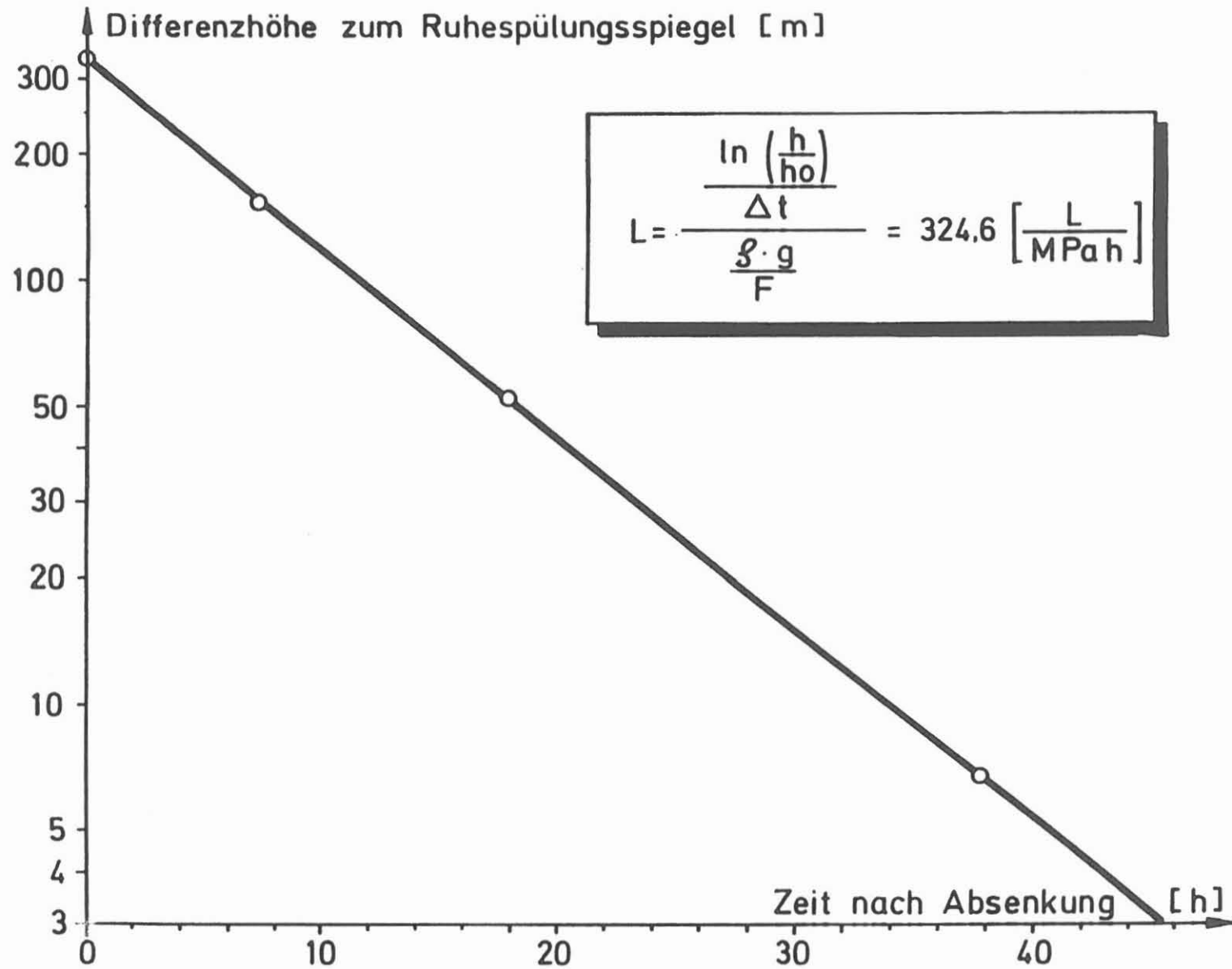


Abb. 16: Halblogarithmische Darstellung des Spülungsspiegels nach der Absenkung in Abhängigkeit von der Zeit.

einen u.U. doch nicht in allen Teufenbereichen vorhandenen stationären Fluß erklärt werden.

Eine zweite Überprüfung der Gültigkeit des stationären Modells kann nun durch eine Überprüfung der zu erwartenden exponentiellen Abhängigkeit erfolgen, die vorhanden sein muß, wenn eine Abhängigkeit nach Gleichung 9 vorhanden ist.

In Abb.16 ist diese Überprüfung durch eine halblogarithmische Darstellung der Spiegelhöhen in Abhängigkeit von der Zeit erfolgt. Auch hier wird deutlich, daß die Linearität in der Darstellung so gut ist, daß ein zweiter Beleg dafür gefunden wurde, daß das stationäre Modell für eine erste Auswertung als ausreichend anzusehen ist. Nun kann im nächsten Schritt dazu übergegangen werden, aus der Steigung der in Abb.16 dargestellten Geraden den hydraulischen Leitwert (auch spezifische Ergiebigkeit genannt) für die ganze Bohrung zu bestimmen. In Abb.16 ist die Berechnung dieses Leitwertes für eine Spüldichte von 1 g/cm^3 aufgeführt. Der Leitwert für die gesamte Bohrung (auch spezifische Ergiebigkeit genannt), ergibt einen Wert von $L = 324,6 \text{ (l/MPa/h)}$. Entsprechend ergibt sich aus den Gesamtzuflüssen für den Bereich unterhalb 2800 m ein Leitwert von 234 (l/MPa/h) , der nach den in Abschnitt 2 dargestellten Ergebnissen im wesentlichen durch den Zufluß im Bohrlochtiefsten bei ca. 4000 m bestimmt wird. Für den Bereich oberhalb 4000 m ist danach ein Leitwert von 91 (l/MPa/h) anzusetzen. Dieser Leitwert wird ebenfalls im wesentlichen durch eine Zuflußzone bestimmt. Dies ist die Zone zwischen 500 und 550 m. Schon jetzt sei darauf hingewiesen, daß beide Leitwerte bei diesem Absenkttest wesentlich größer waren, als der Gesamtleitwert des Injektionstestes, wie noch im nächsten Abschnitt dargestellt wird.

5.2 Erste hydraulische Auswertungsergebnisse des Injektionstestes

Wie schon vorstehend ausgeführt, gliedert sich der Injektionstest in zwei Testphasen. Beim Konstantdrucktest wurde dabei über einen Zeitraum von ca. 16 Stunden der Spülungsdruck gegenüber dem Spülungsspiegelstand im Gleichgewicht um 5 MPa erhöht und dabei das Injektionsvolumen gemessen.

Beim darauffolgenden Einschlußtest wurde der Druck in der Spülungssäule auf den gleichen Anfangsdruck gebracht und dann aber über einen Zeitraum von ca. 10 Stunden der Druckabfall ohne Nachpumpen bestimmt.

Als Ergebnis der ersten Phase des Injektionstestes wurde in Abb. 12 schon die Zuflußrate über der Zeit dargestellt. Es zeigte sich hier ein deutlich instationärer Zufluß über die ersten 4 Stunden. Zur ersten instationären Abschätzung der hydraulischen Konstanten wurde, unter Verwendung des FD-Programmes EDITE, eine einfachste Modellrechnung bei Annahme nur eines hydraulisch leitfähigen Horizontes, der als homogener hydraulischer Leiter angesetzt wurde, durchgeführt. Hierbei muß man selbstverständlich wissen, daß dieses einfache Modell der Wirklichkeit, wie sie in der KTB-Vorbohrung angetroffen wird, nicht gerecht wird, wie im folgenden gezeigt wird.

Ziel dieser instationären Auswertung war also nicht, die bekannten Gegebenheiten des hydraulischen Transportes zu modellieren, sondern zu prüfen, ob sich die Abflußkurve überhaupt durch die Diffusionsgleichung (Gleichung 1) beschreiben läßt und ob die ermittelte Diffusionskonstante physikalisch vernünftige Größenordnungen annimmt. Die ebenfalls in Abb.12 eingezeichnete Kurve, die mit einer Diffusionskonstante von $D = 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ berechnet wurde, zeigt, daß eine grobe Approximation der Meßdaten durch das Diffusionsgesetz möglich ist.

Dies gilt selbstverständlich nur für den ersten Teil der mit der Zeit abklingenden Zuflußrate. Die praktisch konstant bleibende Zuflußrate zu einem späteren Zeitpunkt und das sogar wieder leichte Ansteigen sind damit nicht zu erklären.

Physikalisch auch nicht zu erklären ist die extrem kleine Diffusionskonstante, die man für eine Kurvenanpassung benötigt. Für das gewählte homogene Modell läßt sich die Diffusionskonstante gemäß Gleichung 1 berechnen.

Allein durch die Diffusionskonstante als Parameter wird der zeitliche Verlauf des Porendruckes im hier als homogen porös angenommenen Gestein bestimmt, wenn als Randbedingung an der Bohrlochwand eine plötzlich erfolgte konstante Druckerhöhung vorgegeben wird. Die Menge der aus der Bohrung abfließenden Flüssigkeit ist dann entsprechend dem Darcy-Gesetz (Gleichung 2) vorgegeben. Während der Druckgradient im Porenraum an der Bohrlochwand allein durch die Diffusionskonstante bestimmt wird, ist der gesamte Abfluß von der Größe der Bohrlochoberfläche und dem Quotienten aus Permeabilität und Viskosität der Flüssigkeit abhängig. In der Praxis gehen in eine modellmäßige Berechnung des Abflusses also 3 unbekannte Größen ein (vgl. mit Abschnitt 5 der stationären Betrachtungen):

1. Die Mächtigkeit h des Abflußbereiches, die insbesondere beim Vorhandensein mehrerer Einzelklüfte sehr schwer zu definieren ist, die aber entsprechend dem Experiment in vernünftigen Größenordnungen angesetzt werden muß.
2. Der Quotient von Permeabilität und Viskosität und
3. den Speicherkoeffizienten des Gesteins, der in seinem Wertebereich durch die beschränkte Kompressibilität von Flüssigkeit und Gesteinsmatrix ebenfalls nur einen beschränkten Wertebereich annehmen kann.

Die sehr kleine Diffusionskonstante erfordert nun entweder eine sehr kleine Permeabilität bzw. sehr große Viskosität der Flüssigkeit oder eine sehr hohe Speicherfähigkeit des Gesteins. Das Problem in der Interpretation der berechneten Diffusionskonstante besteht nun darin, daß, geht man von einem realistischen Speicherkoeffizienten aus, die Permeabilität des Gesteins so klein wird, daß zur Erzielung der gemessenen Abflußmengen ein unrealistisch langer Bohrlochabschnitt diese relativ schlechte hydraulische Leitfähigkeit haben muß. Dies läßt den Schluß zu, daß dieses einfachste Modell für den beim Injektionstest beobachteten Abfluß aus der Bohrung nicht ausreichend ist.

Am folgenden Beispiel soll dies noch einmal verdeutlicht werden.

Geht man bei einer Viskosität von $10^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$ von einer Permeabilität von 10 mD aus, so erreicht man die in Abb.12 dargestellte Abflußmenge mit einem 3,9 m mächtigen horizontalen homogenen hydraulischen Leiter. Um allerdings eine Diffusionskonstante von $D = 10^9 \text{ m}^2/\text{s}$ zu erhalten, müßte ein Speicherkoeffizient von $S = 1 \cdot \text{MPa}^{-1}$ vorhanden sein. Die Kompressibilität von Wasser liegt aber nur in der Größenordnung von $4,5 \times 10^{-4} \text{ 1/MPa}$, also drei bis vier Größenordnungen niedriger als der geforderte Speicherkoeffizient. Ein $S = 1 \cdot \text{MPa}^{-1}$ ist für einen flüssigkeitsgefüllten Porenraum nicht möglich. Nimmt man für das Gestein einen realistischen, aber immer noch sehr hohen Speicherkoeffizienten von 10^{-4} 1/MPa an, so benötigt man, um die geforderte Diffusionskonstante zu erreichen, eine Permeabilität von $0,1 \mu\text{D}$. Um allerdings bei dieser geringen Permeabilität den geforderten Abfluß von 200 - 125 l/h zu erreichen, würde man dann ein 39 km langes Bohrloch benötigen, das mit dem Druck von 5 MPa beaufschlagt worden ist.

Diese Abschätzung zeigt also noch einmal deutlich, daß sich der hydraulische Abfluß aus der Bohrung mit diesem einfachen Modell nicht beschreiben läßt. Die durchgeführte "Einfachstrecknung" weist allerdings darauf hin, daß ein realistischeres Modell so

angesetzt werden muß, daß der Abfluß zeitlich verzögert wird. Dies kann z.B. durch ein Rißsystem, daß sich von einer Kluft, die die Bohrung schneidet, großräumig im Gestein vernetzend ausbreitet, geschehen. Es ist allerdings auch denkbar, daß ein sehr starker Skineffekt, d.h. eine hydraulische Isolation der Abfluswegsamkeiten, durch Schwebteile in der Spülung oder die Spülung selbst zu einer solchen Verzögerung führen. Insbesondere für den letzten Effekt sprechen auch noch verschiedene andere Fakten, wie in der Zusammenschau noch dargestellt wird.

Daß im kristallinen Gestein ein verzweigtes Netzwerk von Rißsystemen der Realität wahrscheinlich am nächsten kommt, braucht sicher auch nicht weiter diskutiert zu werden.

Eine Bestimmung des hydraulischen Leitwertes für den Abfluß aus der Bohrung kann nun auch direkt aus Gleichung 3 vorgenommen werden. Wenn man von einer stationären Abflußrate von $Q = 125 \text{ l/h}$ bei einer Druckerhöhung $\Delta P = 5 \text{ MPa}$ ausgeht, so ergibt sich ein hydraulischer Leitwert von $L = 25 \text{ l/h/MPa}$. Schon hier sieht man, daß dieser Leitwert (spezifische Ergiebigkeit) nur ca. $1/15$ des Leitwertes beträgt, der beim Absenkttest ermittelt wurde.

5.3 Der hydraulische Einschlußtest

Als letzter hydraulischer Test wurde dann die gesamte Bohrung noch einmal mit einem Druck von 5 MPa beaufschlagt und dann der Druckabfall über 7,5 Stunden beobachtet. Vorausgesetzt, daß sich nach einiger Zeit um die Bohrung ein quasistationäres Druckfeld aufbaut, müßte sich für den Druckverlauf eine exponentielle zeitliche Abhängigkeit gemäß Gleichung 11 ergeben. In Abb.13 zeigt die halblogarithmische Auftragung des gemessenen Druckverlaufes, daß ähnlich wie beim Konstantdrucktest sich nach ca. 2 - 3 Stunden eine im wesentlichen exponentielle Abhängigkeit des Druckverlaufes ergibt. Es bietet sich hier also an, für Zeiten > 3 Stunden eine Auswertung wie für den stationären Abfluß vorzunehmen.

Als Wellbore-Storage-Koeffizient wurde $S = 120 \text{ l/MPa}$ eingesetzt. Dieser Wert ergab sich direkt aus dem zugepumpten Spülvolumen, das zum Druckaufbau von 5 MPa benötigt wurde bzw. ebenfalls aus dem aufgefangenen Volumen, das nach dem Ablassen des Druckes aus der Verrohrung abfloß.

Dieser Wert ist fast doppelt so hoch wie der Speicherkoeffizient, der sich beim Konstantdrucktest aus den stufenweise zugepumpten Voluminas zur Konstantdruckhaltung ergeben hatte. Dieser Wert betrug im Mittel $\hat{S} = 55 \text{ l/MPa}$.

Erklärt werden kann dies dadurch, daß sich aller Wahrscheinlichkeit nach beim Einschlußtest noch Gas im Leitungssystem bzw. in der Bohrung befunden haben muß, das zu ihrer hohen Speicherfähigkeit geführt haben muß. Wertet man, wie in Abb.13 dargestellt, die Steigung des Druckverlaufes aus, so erhält man hier einen hydraulischen Leitwert, der mit $L = 15 \text{ l/MPa}$ in der gleichen Größenordnung, aber etwas kleiner als der aus dem Konstantdrucktest bestimmten Wert, ist. Auf eine erste Interpretation der in den verschiedenen Testen ermittelten Leitwerte (spezifische Ergiebigkeiten) wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

6 ZUSAMMENFASSENDER INTERPRETATION

Neben der Lokalisation der zwei Hauptzuflußgebiete zwischen 500 und 550 m als Süßwasserzufluß und im Bohrlochtiefsten bei ca. 4000 m als hochsalinärer Zufluß ist als wesentlichstes Ergebnis der hydraulischen Tests der unterschiedliche hydraulische Leitwert zwischen Absenk- und Injektionstest anzusehen. Zusammengefaßt haben sich dabei die folgenden hydraulischen Leitwerte ergeben:

Gesamtleitwert aus dem Absenkttest	325 l/MPa/h
Leitwert für den Abschnitt unterhalb der Pillenhöhe (2800 m) aus dem Absenkttest	234 l/MPa/h
Leitwert oberhalb der Pillenhöhe (2800 m) aus dem Absenkttest	91 l/MP/h
Leitwert aus dem Konstantdrucktest für die gesamte Bohrung	25 l/MPa/h
Leitwert aus dem Einschlußtest für die ganze Bohrung	15 l/MPa/h

Anhand der ermittelten hydraulischen Leitwerte zeigt sich das Phänomen, daß in der KTB-Vorbohrung ein "hydraulischer Diodeneffekt" aufgetreten ist, der sich dadurch äußert, daß ein Zufluß aus dem Gebirge in die Bohrung leicht und ein Abfluß aus der Bohrung nur schwer möglich ist. Die hydraulische Sperrrichtung eines Diodenmodells wäre also für eine Strömung aus der Bohrung in das Gestein anzusetzen.

Die plausibelste Erklärung für diese Beobachtung läßt sich nun bei genauerer Betrachtung des Spülungssystems mit dem Viskosifier-Dehydril-HT finden.

Dieser Viskosifier bildet sehr große silikatische Klastermoleküle, die der Spülung stark tixotrope Eigenschaften verleihen. Es ist sehr wahrscheinlich, daß bei der Injektion diese großen Molekülklaster mit ihren relativ starken molekularen elektrischen Feldern nicht sehr tief in insbesondere kleinere Poren eindringen können und damit die Bohrung hydraulisch isolieren.

Auch das Bohrlochstabilitätsverhalten der KTB-Vorbohrung (Kessels, 1989), bei dem sich nach Erhöhung des Dehydril-Anteils eine deutliche Stabilisierung der Bohrung ergab, spricht dafür,

daß hydraulische Druckstöße, die während des Bohrens und beim Ziehen des Gestänges auftraten, sich nur schwach in den Porenraum des Gebirges fortpflanzen, was nur durch eine gute hydraulische Isolation zu erklären ist.

Des weiteren ist die Tixotropie und der Yield-Point der Spülung so hoch, daß selbst gröbere Cuttings oder Nachfall aus der Bohrlochwand sehr lange in der Schwebe gehalten werden und ebenfalls zu Verstopfungen der hydraulischen Wegsamkeiten führen können.

Für den hochsalinaren Zufluß im Bohrlochtiefsten ist auch noch mit in Betracht zu ziehen, daß es aus der Spülung zu Ausfällungen kommt, wenn die Zuflüsse sehr chloridreich sind und einen niedrigen pH-Wert haben. Analysen der Fluidproben, die vom untersten Zufluß genommen worden sind, zeigten neben einer Chloridkonzentration von ca. 30.000 ppm einen pH-Wert, der im Zuflußbereich Werte von 6 erreichte (unveröffentlichte Messungen des KTB-Feldlabors, 1989). Da spätestens bei einem pH-Wert unter 7 Ausfällungen des Viskosifiers-Dehydril-HT aus der Spülung stattfinden, ist damit zu rechnen, daß insbesondere im unteren Bereich an der Grenze zwischen hochsalinarem Zufluß und Spülung chemische Reaktionen stattgefunden haben, deren ausgefällte Reaktionsprodukte im hochsalinaren Zuflußbereich abgesunken sind und dann als Pfropfen im unteren Teil der Bohrung für eine hydraulische Isolation der Bohrung beim Injektionstest gesorgt haben. Auch der unruhige Verlauf der Spülungsleitfähigkeitsmessung, insbesondere am 12.05. und am 13.05.89, dargestellt in Abb.8, spricht für diese Annahme. Daß der hydraulische Verschluß der Wegsamkeiten im Gestein durch das Spülungssystem und die zu erwartenden chemischen Ausfällungen mit der Zeit zunehmen, steht damit im Einklang, daß sich der im Einschlußtest gemessene hydraulische Leitwert noch einmal etwas kleiner als der hydraulische Leitwert des vorher ausgeführten Konstantdrucktests ergeben hat.

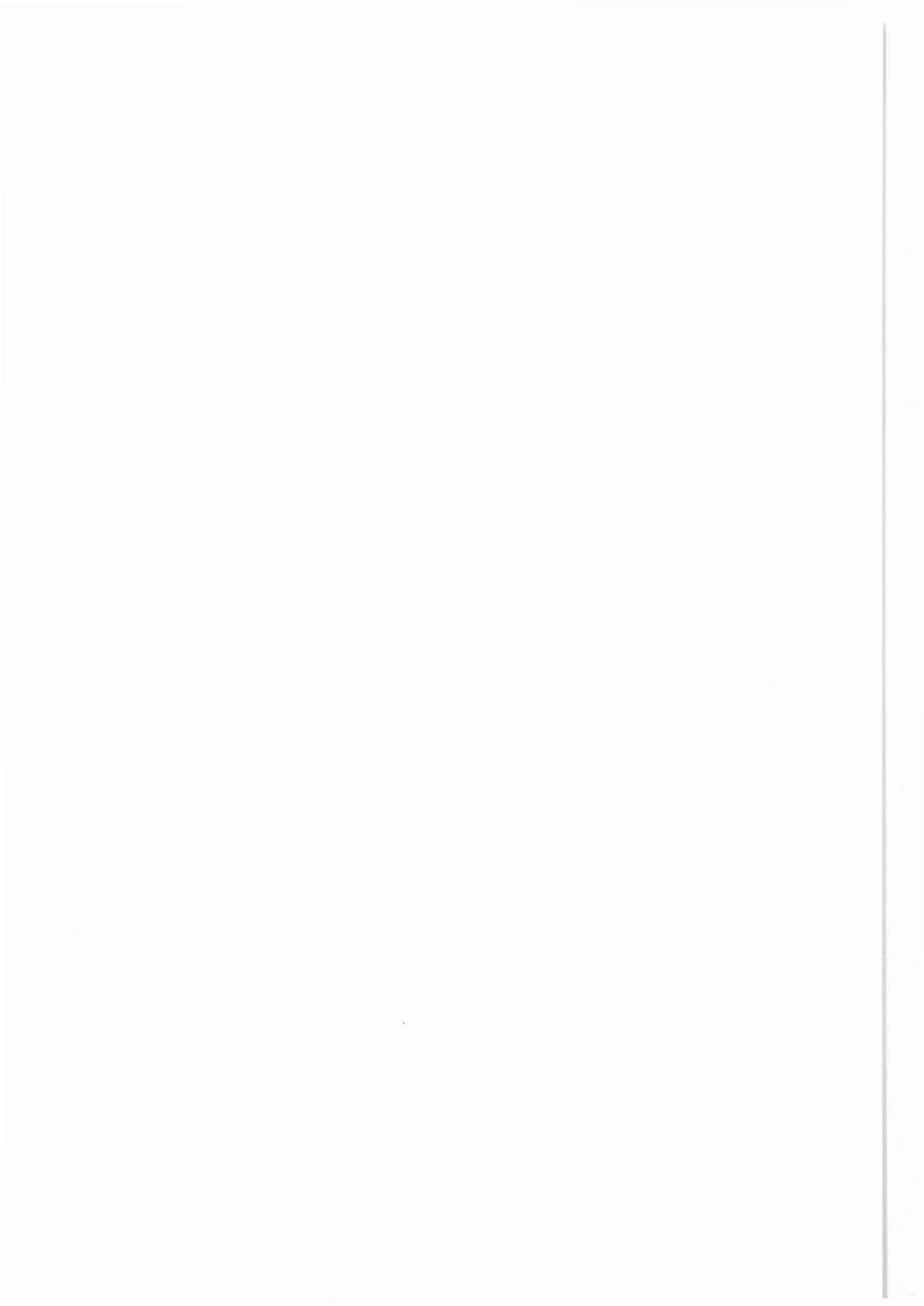
Die Konsequenz aus diesen Testergebnissen für alle weiteren hydraulischen Tests ist, daß eine Bestimmung hydraulischer Ge-

steinsparameter aus einem Injektionstest bei diesem Spülungssystem nur sehr schwer bzw. nur mit sehr großen Fehlern möglich ist.

Für die Packerteste, die einer Fluidentnahme dienen sollen, können durchaus positive Schlüsse aus diesen ersten Ergebnissen gezogen werden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, daß die hydraulische Isolation bei der Injektion im Gesteinsbereich sehr nahe der Bohrlochwand erfolgt. Bewahrheitet sich also durch weitere Tests, daß die Spülung auch bei hohem Druck während des Bohrens (in der KTB-Vorbohrung wurde bis 15 MPa-Zirkulationsdruck gearbeitet) nicht in der Lage ist, tief in das Gestein einzudringen, so bestehen gute Chancen bei einem Packertest, relativ kontaminationsfreie Fluide auch aus Zonen zu bekommen, in denen längere Zeit eine Beeinflussung durch die Bohrtätigkeit vorgelegen hat.

LITERATUR

- JOBMANN, M., SCHULZ, R. (1989): Vorstellung erster Ergebnisse des Absenktestes, 5. Arbeitssitzung des KTB Arge 7 in Gießen, NLFb, Hannover.
- KESSELS, W. (1989 a): Auswahlkriterien für hydraulisch testwürdige Bohrlochintervalle, Interner Bericht des NLFb an KTB-PL, Hannover.
- KESSELS, W. (1989): Observation and interpretation of time-dependent behaviour of borehole stability in the Continental Deep Drilling pilot borehole. Rock at great Death, Pan, France.
- PUSCH, G., JUNG, R., JOBMANN, M., SCHELLSCHMIDT, R., REIFENSTAHL, F., ZOTH, G., MIEHE, R., KESSELS, W. (1989): Besprechung der Auswahl hydraulischer Testhorizonte, KTB Arbeitsgruppe Geohydraulik.
- STOBER, D. (1988): DFG Forschungsvorhaben des Geologischen Landesamtes Baden Württemberg, Wasserführung im Kristallin, Freiburg.
- STOBER, D., REIFENSTAHL, F. (1989): Unveröffentlichte Auswertungsergebnisse des Absenktestes, Freiburg.

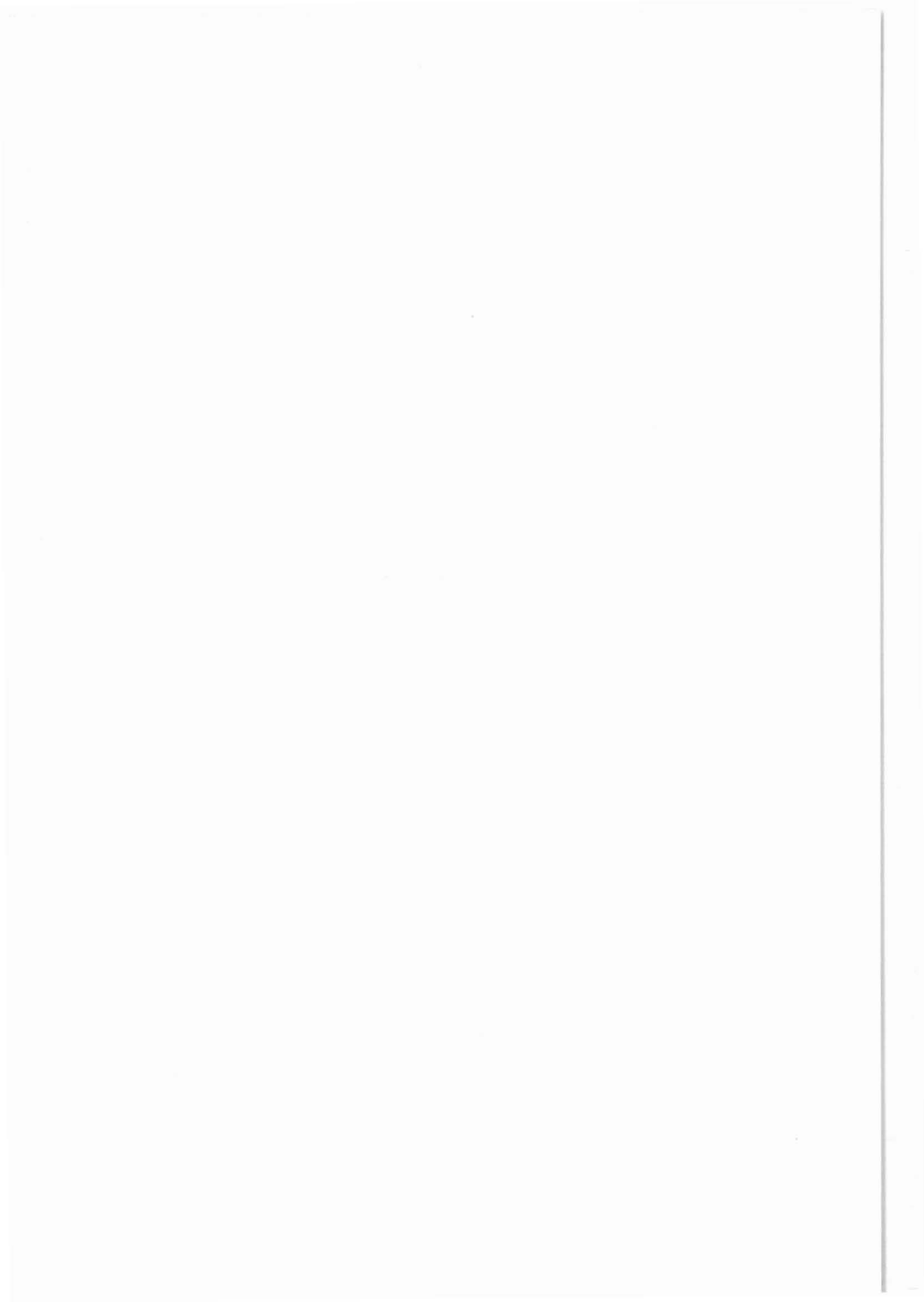


Geologisches Landesamt Baden-Württemberg

Alberstr. 5
7800 Freiburg i. Br.

Hydraulische Auswertung des Absenk-/Injektionstestes und des Leitfähigkeits-Fluid-Loggings

F. Reifenstahl
I. Stober



Hydraulische Auswertung des Absenk-/Injektionstestes und des Leitfähigkeits-Fluid-Loggings

F.Reifenstahl, I.Stober

Zusammenfassung

In der *KTB-VB1* wurden im Mai 1989 hydraulische Versuche vorgenommen, aus denen jedoch in den meisten Fällen nur Abschätzungen für die hydraulischen Gebirgsparameter gewonnen werden konnten. Die berechneten Transmissivitäten liegen in der für Gneis typischen Größenordnung. Überraschend hingegen war, daß der Spülungsspiegel nach dem Absenkttest ca. 30 m tiefer lag als vorher. Weitere Auswertungen konzentrieren sich auf mögliche Anwendungen der Leitfähigkeits-Fluid-Logging-Auswerteverfahren.

Summary

In May 1989 hydraulic tests were made in the *KTB-VB1*, but most of the hydraulic parameters we present in this report are of estimative character. The values of transmissivity lie within the expected ranges for gneisses. A surprising effect was the mud-level in balance lowered by about 30 m after the first slug-test. Further evaluations will concentrate on possible applications of procedures used in the conductivity-fluid-logging-method.

Anschrift der Autoren: Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Albertstraße 5, 7800 Freiburg i. Br.

1 Hydraulische Versuche in der KTB-VB1

Als erste hydraulische Versuche nach dem Erreichen der Endteufe von 4000 m in der *KTB-VB1* wurden im Zeitraum vom 10.05.1989 bis 25.05.1989 ein Absenkttest und ein Injektionstest durchgeführt. Schon während des Abteufens der Bohrung wurden Leitfähigkeitsanomalien festgestellt. Diese Anomalien deuten auf einen Fluidaustausch mit dem Gebirge über klüftige Bereiche. Von dem *Leitfähigkeits-Fluid-Logging*-Verfahren erhoffte man sich daher eine genauere Lokalisierung derartiger Bereiche sowie eine Abschätzung hydraulischer Gebirgsparameter. Die vorliegenden Ergebnisse wurden zur Planung der Hydraulik-Testreihe in der *KTB-VB1* — die nach dem aktuellen Zeitplan im Frühjahr 1990 durchgeführt werden soll — hinzugezogen.

1.1 Absenkttest

Bei einem Absenkttest wird in der Regel eine bestimmte Entnahmerate gefördert; die Entnahmemenge und der Wasser- bzw. Spülungsspiegel in der Bohrung werden gemessen. Aus diesen Daten kann die Transmissivität des Gebirges bestimmt werden. In der *KTB-VB1* wurde die Absenkung durch Ziehen des Gestänges erreicht.

Aufgrund der durch die Absenkung erzwungenen Druckdifferenz zwischen den Formationsfluiden und der Spülungssäule können Fluide aus der Formation über Klüfte und poröse Bereiche in die Bohrung eindringen. Da die Formationsfluide in der Regel einen anderen Salzgehalt und damit eine andere elektrische Leitfähigkeit besitzen, können die Zutrittsbereiche als Peaks in den Leitfähigkeits- bzw. Widerstandslogs detektiert werden. Die Auswertung derartiger Leitfähigkeitslogs erlaubt nicht nur die genaue Lokalisierung klüftiger Zonen, sondern auch die Bestimmung der lokalen Werte für Transmissivität, Zuflußrate und Salinität [Tsang, 1987; Tsang u. Hufschmied, 1988]. Die Grundlagen dieses Verfahrens werden in Kapitel 2 dargestellt.

Die Ursache für Peaks in Leitfähigkeitslogs könnten außer in zutretenden Fluiden auch in der chemischen Reaktion stärker mineralisierter Gesteinsschichten mit der Spülung zu suchen sein. Um dies auszuschließen, müssen geologische Profile und Leitfähigkeitslogs miteinander verglichen werden.

1.1.1 Durchführung

Die Begutachtung erster im April 1989 durchgeführter Messungen (Spülungswiderstand, Temperatur, Formation-Micro-Scanner-Tool, Latero-Log) [Pusch et al., 1989] ergab, daß in der *KTB-VB1* bezüglich der hydraulischen Verhältnisse eine Dreiteilung vorliegt:

- relativ durchlässiger Bereich von Oberkante bis ca. 1600 m
- keine nennenswerten Indizien für wegsame Bereiche bis ca. 2800 m
- Häufung sehr ausgeprägter Anzeichen für Wasserwegsamkeiten bis zur Sohle bei 4000 m.

Um zusätzliche Informationen zu erhalten, wurde der Absenkttest dahingehend modifiziert, daß man in den als hydraulisch wenig aktiv angenommenen Bereich (1600 m - 2800 m) als zusätzlichen Horizont eine *Leitfähigkeitsspile* einbrachte. Bei dieser *Leitfähigkeitsspile* handelt es sich um eine Flüssigkeit mit deutlich meßbarem Leitfähigkeitskontrast zur Spülung. Aus der Vertikalbewegung der Leitfähigkeitsspile, die sich über Spülungswiderstandsmessungen verfolgen läßt, wollte man die Zuflußraten ober- und unterhalb der "Pille" ermitteln.

Tabelle 1: Geophysikalische Bohrlochmessungen während des Absenkttests

L O G	Beginn der Messung		Richtung und Geschwindigkeit [$\frac{m}{min}$]
	Datum	Zeit	
A	11.05.89	7 ⁵⁵	↓ 10
B	11.05.89	15 ⁰⁰	↑ 20
C	12.05.89	8 ⁰¹	↓ 20
D	12.05.89	11 ³⁴	↑ 25
E	12.05.89	15 ²⁸	↓ 36
F	12.05.89	17 ³¹	↑ 50
G	13.05.89	6 ³³	↓ 20
H	13.05.89	10 ⁰¹	↑ 50
I	16.05.89	9 ¹²	↓ 10
K	17.05.89	8 ⁴⁹	↓ 25
L	17.05.89	13 ³⁹	↓ 45
M	18.05.89	8 ⁴⁸	↓ 25
N	18.05.89	11 ⁴¹	↑ 45

Am 10.05.1989 wurde die Bohrung auszirkuliert, um einen definierten, gleichmäßigen Hintergrund für verschiedene Messungen (Spülungswiderstand, Temperatur etc.) zu erhalten, um die auszirkulierte Spülung zu beproben und um durch Einbringen und späteres Ziehen des Spülgestänges eine Absenkung zu erreichen, die mit einer Pumpe nur unter sehr großem technischen und finanziellen Einsatz möglich gewesen wäre. Nach dem Auszirkulieren der Spülung wurde das Gestänge bis auf 2800 m ausgebaut. Die vorbereitete *Leitfähigkeitsspile* (ca. 2,7 m³ einer Dehydril HT-Spülung mit niedrigerer Leitfähigkeit als der in der Bohrung stehenden Spülungssäule) wurde in dieser Teufe eingebracht und sollte nach Berechnungen [Kessels, Zoth und Kück, 1989] zu diesem Zeitpunkt den Bereich von 2800 - 2660 m

einnehmen. Mit dem Beginn des Ausbaus der letzten 2800 m Spülgestänge, was eine rechnerische Absenkung des Spülungsspiegels auf eine Teufe von 400 m u. Gel. bewirken sollte, begann der Absenktest. Während des Absenktests wurden 14 Bohrlochmessungen (Spülungswiderstand, Temperatur (3 versch. Sonden), Zugspannung am Kabelkopf, Eigenpotential, Gamma Ray und Fluid-Probennehmer in variierenden Zusammensetzungen) durchgeführt, von denen zur Auswertung 13 Messungen auf Papier vorlagen (Tab. 1). Weitere Details zur Vorbereitung und Durchführung der hydraulischen Tests sind von Kessels, Zoth und Kück [1989] zusammengestellt worden.

Tabelle 2: Anzeichen klüftiger Bereiche in den Widerstandslogs

LOG	Peaks/Bemerkungen
A	400-500 (sehr stark), 1170, 1202-1250 (Widerstands-Log unruhig), 1325-1400, 1440-1460, 1530 (stark), 3032 (starker Widerstandsabfall), 3817
B	3768
C	430-510, 2590 (stark), 3375-3425 (schwach), 3625, 3650, 3685
D	1420-1480, 1710-1738 (schwach), 3170 (sehr schwach), 3620 (sehr schwach), 3640, 3705 (sehr schwach)
E	480 (starker Widerstandsabfall), 2615 (sehr stark), 3660, 3692
F	schnelle Aufwärtsfahrt mit sehr geringer Auflösung
G	2610 (stark), 3157, 3190, 3635
H	600, 3340, 3675
I	435-510, 1100 (sehr schwach), 2585 (Peak mit mehrfacher Amplitude der <i>Leitfähigkeitsspitze</i>), 3365
K	480 (stark), 2580 (schwach), 2895-3015 (Widerstands-Log unruhig), 3445, 3700
L	480, 2785-2815 (schwach)
M	1380 (sehr schwach), 3430 (stark), kurz vor LFS im Bereich 3395-3435 geringer Anstieg des Widerstandes, bei 3850 Sprung von 0.09 Ωm auf 0.04 Ωm
N	3430

1.1.2 Beobachtungen

7 h 20 min nach Ausbaubeginn fand die erste Spülungsspiegelmessung mit einer AMS-Sonde statt. Der Spülungsspiegel befand sich weit oberhalb der berechneten Anfangsteufe von 400 m u. Gel., und zwar bei 245 m. Erste Vermutungen, die Absenkung wäre falsch berechnet worden, wurden von weiteren rasch ansteigenden

Spülungsspiegel widerlegt. Mit dem Lichtlot konnte der Spülungsspiegel nicht gemessen werden, da bereits 40 m u. Gel. vergelte Rückstände des in der *KTB-VB1* eingesetzten Spülungszusatzes Dehydril HT ein weiteres Eindringen des Lichtlots verhinderten. Aus diesem Grund liegen aus den ersten vierzig Stunden des Versuchs nur sieben Spülungsspiegelmessungen für Auswertungen vor (Dauer einer Meßfahrt bei 10 m/min Fahrgeschwindigkeit ca. 7 h). Nach ca. vierzig Stunden erreichte der Spülungsspiegel – abgesehen von einigen Schwankungen im Meter-Bereich – ein konstantes Niveau bei ca. 60 m u. Gel. Er liegt damit ca. 30 m unter dem Ruhespülungsspiegel, der vor dem Absenkttest über einen längeren Zeitraum registriert worden war.

In den Widerstandslogs C, E, G, I und K (vgl. Tab. 2) war im Teufenbereich 2600-2650 m (unterer Bereich der *Leitfähigkeitsspile*) ein Peak zu beobachten, der teilweise ein mehrfaches der Amplitude der *Leitfähigkeitsspile* aufwies (Ausnahme Log K). Auffallend ist, daß dieses Phänomen immer nur bei Abfahrten mit der Sonde auftrat (vgl. Tab. 1).

Gleich zu Beginn der Messungen (Log A) war in ca. 3800 m Teufe ein markanter Abfall des Spülungswiderstandes zu erkennen. Dieser wanderte mit der Zeit bis auf etwa 3630 m u. Gel. nach oben.

Mit den während des Absenkttest durchgeführten Spülungswiderstandsmessungen konnten nur einige der 12 ausgewählten kluftverdächtigen Zonen [Pusch et al., 1989] verifiziert werden. In den Widerstandslogs konnten einige dieser Bereiche nicht identifiziert werden (Tab. 2). Die kluftverdächtigen Zonen sind in Abb. 1 an der Ordinate markiert. Zum Vergleich sind die in Tab. 2 aufgeführten Indikationen des Absenkttestes eingetragen (sehr stark [++], stark [+], mittel [o], schwach [-]). Die Pfeile am oberen und unteren Bildrand zeigen den Beginn und die Fahrtrichtung der Messungen A-N an. Ein Vergleich der Spülungswiderstandsmessungen des Absenkttestes mit den Temperaturmessungen, die während des in Abschnitt 1.2 beschriebenen Injektionstests von der Geothermik-Gruppe des NLFb Hannover durchgeführt wurden [Jobmann, 1989], ist in Tab. 3 zusammengestellt. Die Interpretation der unterschiedlichen Indikationen soll in einem gemeinsamen Artikel der Gruppen Schulz (NLFb Hannover), Wilhelm (Universität Karlsruhe) und Stober (Geol. LA Freiburg) erfolgen.

1.1.3 Auswertung

Prinzipiell läßt sich der Absenkttest, wie er in der *KTB-VB1* durchgeführt wurde, als Slug-Test auswerten; die relativ schnelle Absenkung durch das Ziehen des Spülgestänges rechtfertigt dies. Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt beschrieben ist die Meßpunktdichte der Spülungsspiegelmessungen allerdings so klein, daß über diese Art der Auswertung nur eine grobe Abschätzung der Transmissivität möglich ist.

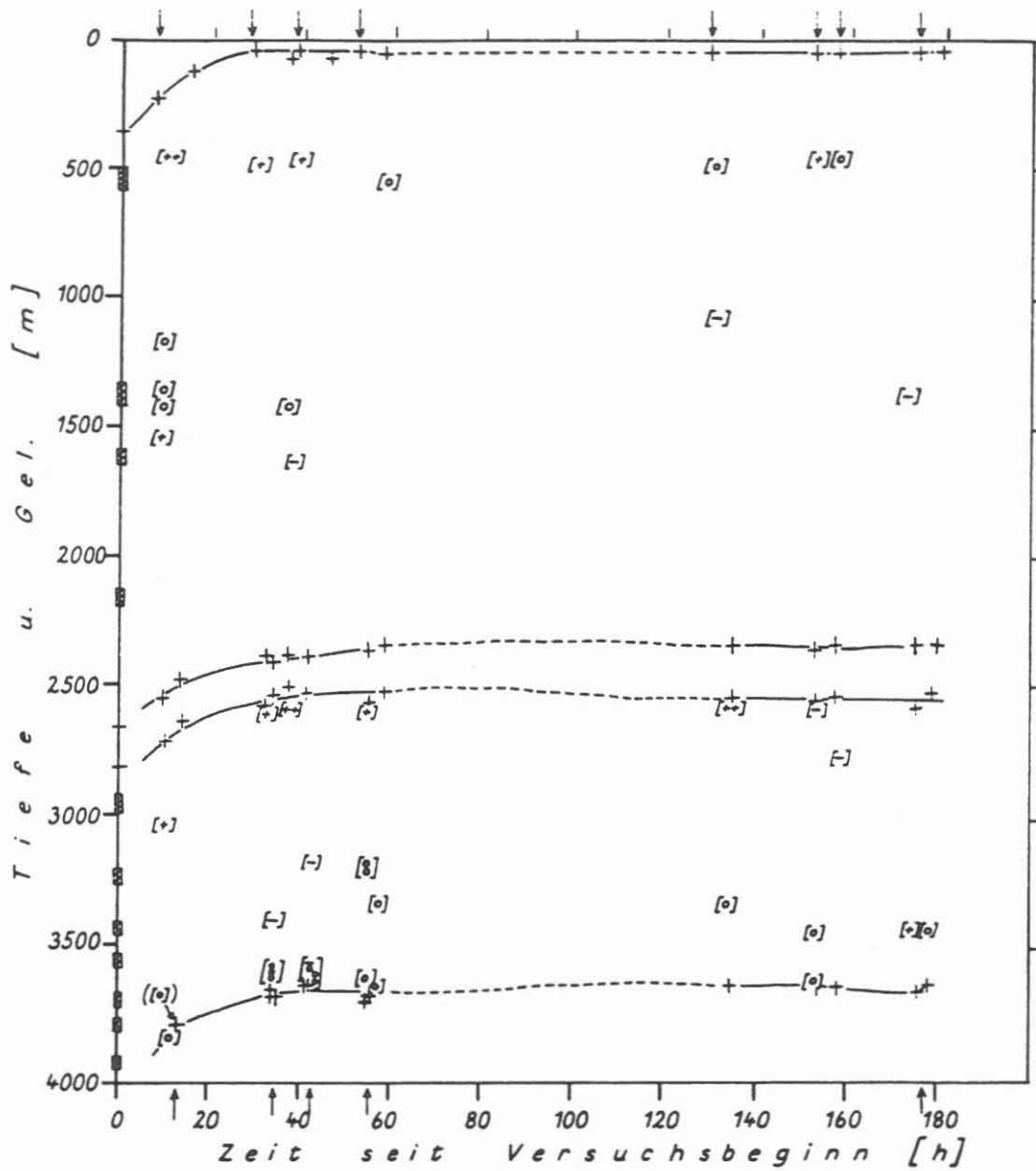


Abb. 1: Zeitliche Wanderung der vier Spülungsleitfähigkeitshorizonte Wasserspiegel (WSP), Oberkante (POK) und Unterkante (PUK) der Leitfähigkeitsschicht und der Leitfähigkeitssprung an der Basis der Bohrung (LFS) sowie Indikationen für Zustrombereiche aus den Spülungswiderstandslogs.

Zur Bestimmung der Transmissivität T wird, ausgehend von

$$\frac{h}{H_0} = F(\alpha, \beta)$$

mit

$$\beta = \frac{Tt}{r_c^2}$$

$$\alpha = \frac{r_s^2 S}{r_c^2}$$

Tabelle 3: Vergleich der in den Spülungswiderstandsmessungen gefundenen Anzeichen für klüftige Bereiche mit solchen aus Temperaturmessungen der Gruppe Schulz (Geothermik, NLFB Hannover). In der Spalte "Teufe" sind die Bohrlochbereiche angegeben, in denen in den Spülungswiderstandslogs Anzeichen für hydraulisch aktive Bereiche zu entdecken waren, in der rechten Spalte, ob dies in den Temperaturlogs ebenso der Fall war.

Teufe	Anzeichen in T-Messungen
1100	ja
1170	nein
1202-1250	nur leicht unruhig
1325-1400	ja
1440-1480	nein
1530	ja
1710-1738	ja
2590-2610	starke Anzeichen bei um ca. 50 m größerer Teufe
2785-2815	Teufe 2780
3157	nein
3190	Teufe 3200
3340	nein
3365	nein
3375-3425	ja
3445	Teufe 3430
3600-3700	nein
3817	sehr schwach

die dimensionslose Anhebung des Wasserspiegels $\frac{h}{H_0}$ über die Zeit seit Versuchsbeginn t halblogarithmisch aufgetragen [Papadopulos, Bredehoeft u. Cooper, 1973; Schädel u. Stober, 1984] (Abb. 2). Dabei bedeutet:

- h - Differenz zwischen Ruhewasserspiegel und Wasserspiegel zum Zeitpunkt t
- H_0 - Differenz zwischen Ruhewasserspiegel und Wasserspiegel zum Zeitpunkt $t = 0$
- r_c - Radius des Casing
- r_s - Radius des Open-Hole

Die Transmissivität läßt sich über eine Typkurvenanpassung aus dem Typkurvendeckungspunkt am Ordinatenpaßpunkt

$$\left(\frac{Tt}{r_c^2}\right)_{TD} = 1$$

ermitteln. Da auch Datensätze, die unter günstigsten Bedingungen gewonnen wurden, an unterschiedliche α -Kurven angepaßt werden können, muß bei dieser Methode mit Fehlern für T von bis zu 30% gerechnet werden.

Zur Berechnung der dimensionslosen Absenkung muß die Teufenlage des Horizonts im statischen Zustand bekannt sein. Hier ergibt sich für den Spülungsspiegel in der *KTB-VB1* das bereits angesprochene Problem unterschiedlicher Ruhespülungsspiegel vor und nach dem Absenkttest. Es kann angenommen werden, daß sich die neuen statischen hydraulischen Bedingungen entweder zu Beginn des Absenkvorgangs oder während der vorhergehenden Auszirkulation der Spülung eingestellt haben und somit während des größten Teils der Spiegelanhebung gegeben waren. Als Ruhespiegel wird daher der Ruhespiegel nach dem Absenkttest von 60 m angesetzt. Vergleicht man die Meßdaten mit den theoretischen Datenkurven, so erhält man $\alpha = 10^{-14}$. Aus dem Typkurvendeckpunkt läßt sich die Transmissivität zu

$$T = 1,59 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$$

ermitteln.

Für Vergleiche mit anderen Gebirgen wird die Transmissivität auf die *offene Länge* der Bohrung (H) bezogen: $\frac{T}{H}$ entspricht quasi einer mittleren Gebirgsdurchlässigkeit.

1.1 Absenkttest

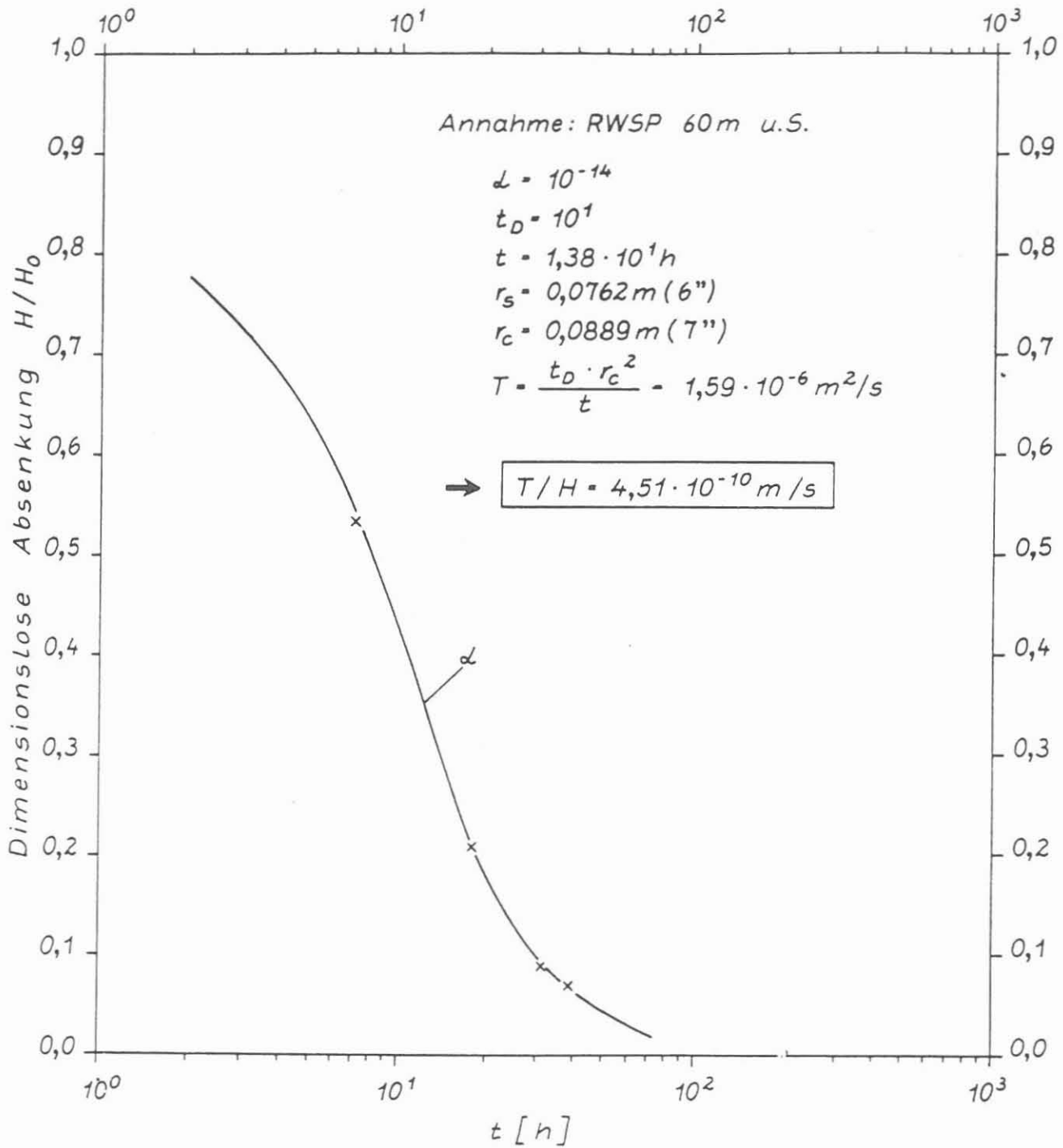


Abbildung 2: Auswertung der Spülungsspiegelmessungen des Absenkttests als Slugtest

Man erhält

$$\frac{T}{H} = 4,5 \cdot 10^{-10} \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

Wie bereits angemerkt wurde, lagen beim Absenkttest mehrere Horizonte vor, die auf Zu- und Abflüsse in unterschiedlichen Teufenbereichen reagierten: der Spülungsspiegel (wegen der üblichen Bezeichnung Wasserspiegel im weiteren mit WSP abgekürzt), die Oberkante (POK) und die Unterkante (PUK) der *Leitfähigkeitspille* und der während des Absenkttests auftretende Leitfähigkeitssprung an

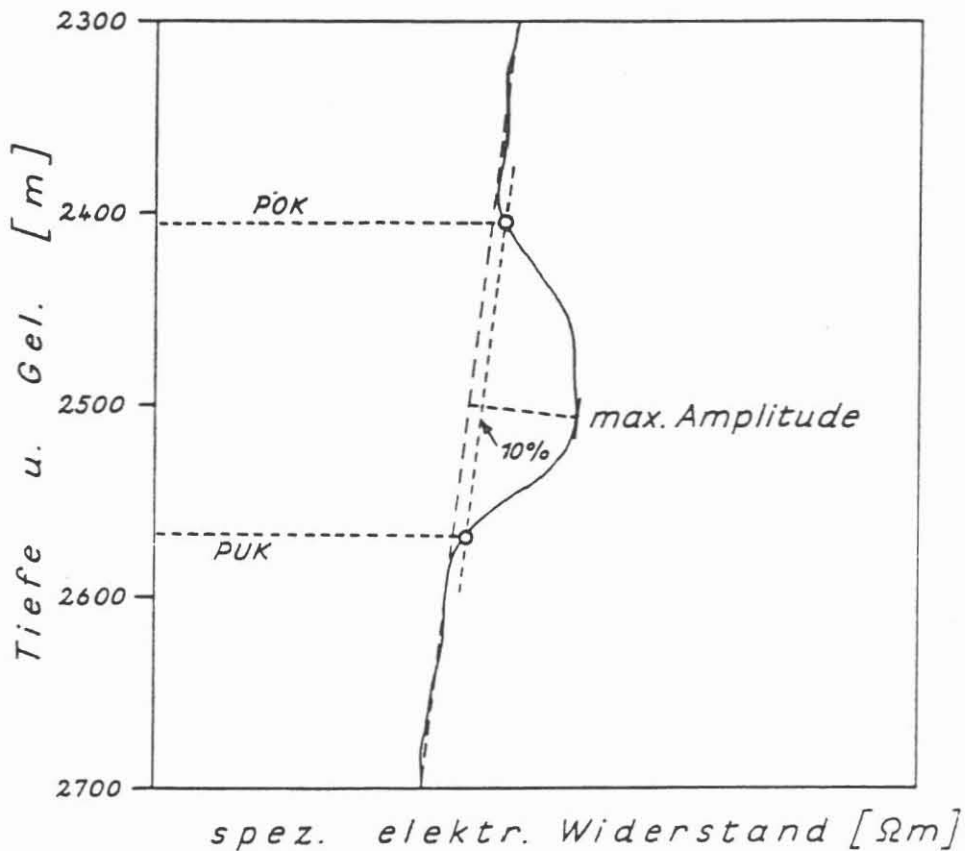


Abbildung 3: Methode zur Festlegung zweier Bezugspunkte für die Bestimmung der Grenzen der *Leitfähigkeitspille*. Diese Methode wurde für die ersten 60 Stunden des Versuchs konsequent, danach wegen des anwachsenden Diffusionsanteils unter Berücksichtigung markanter Strukturen in den Widerstandslogs angewandt.

der Basis der Bohrung (LFS). Die genaue Lokalisierung der einzelnen Horizonte anhand der vorliegenden Papier-Logs war nur in unterschiedlicher Qualität möglich. Der WSP konnte direkt aus dem Kurvenverlauf der verschiedenen Instrumente bis auf einen Meter genau bestimmt werden. Bei der Definition von POK und PUK stellte sich die Frage nach einem auch über längere Zeiten klar erkennbarem Bezugspunkt, da die Kanten der *Leitfähigkeitsspille* mit der Zeit durch Diffusion und Verwirbelung "verwischen". Die Pillenunterkante war ca. 11 h nach Absenkbeginn im Gegensatz zur Pillenoberkante noch deutlich erkennbar. Die Pillenoberkante mußte daher einem Punkt zugeordnet werden, an dem der Spülungswiderstand auf 10% über den Trend, der durch die ganze Bohrung zu verfolgen war, angestiegen war (Abb. 3). Von dieser 10% -Festsetzung, die im späteren Versuchsablauf auch bei der Pillenunterkante durchgeführt werden mußte, wurde nur im Falle der bereits erwähnten starken zeitweiligen Störung (2600–2650 m) und bei den letzten Widerstandslogs (großer Diffusionsanteil) abgewichen. In diesen Fällen wurde die Festlegung aufgrund markanter Strukturen im Widerstandspeak getroffen. Die so ermittelten Werte für die Kanten der *Leitfähigkeitsspille* sind mit einem maximalen Fehler von ± 20 m behaftet.

Bei der Festlegung eines Bezugspunktes für den LFS wurde wie in Abb. 4 dargestellt vorgegangen: der Abstand der Geraden, die durch die großräumigen Trends des Spülungswiderstandes ober- und unterhalb des LFS gegeben waren, wurde ober- und unterhalb des LFS halbiert und der Schnittpunkt der durch diese beiden Punkte definierten Geraden mit der Widerstandskurve als LFS markiert. Der Fehler wird hier mit ± 10 m angesetzt.

Im Idealfall muß die Anhebung eines Horizonts während der ersten Phase einen logarithmischen Verlauf und in der Endphase einen Übergang zur Konstanz der Meßwerte zeigen. Auf Abb. 5 sind die nach der oben beschriebenen Art ermittelten Werte (Tab. 4) für alle vier Horizonte während der ersten 60 Stunden des Versuchs aufgetragen und durch logarithmische Funktionen approximiert. Man erkennt in allen Horizonten teilweise starke Abweichungen vom stationären Trend. Es fällt auf, daß in den meisten Fällen ein Zusammenhang zwischen den Abweichungen und der Fahrtrichtung bei den Messungen zu bestehen scheint.

Von der Annahme ausgehend, daß keiner der Horizonte während des Versuchs eine sprunghafte Ortsänderung durchmachte, wird der Verlauf der Anhebung während dieses Zeitraumes durch kubische Splines approximiert.

Die Anhebung des LFS ist nicht direkt vergleichbar mit den Anhebungen der anderen Horizonte, da zum Zeitpunkt $t = 0$ für den LFS keine Teufe vorliegt. Versuchsweise wurde diese Teufe mit Bohrlochsohle (4000 m) angesetzt. Das Maximum der resultierenden Funktion lag allerdings 50 m höher als die größte beobachtete Anhebung bei der darüberliegenden POK ($(\Delta H_{POK})_{t=39,5h} = 320m$). Dies läßt darauf schließen, daß die Oberkante des den LFS verursachenden Zuflusses nicht direkt auf Sohle, sondern mindestens 50 m darüber zu suchen ist, zumal in genau diesem Bereich während des Bohrens ein Drilling-Break auftrat. Bestätigt wird dies

auch durch die während des Injektionstests durchgeführten Temperaturmessungen [Jobmann, 1989].

Eine mögliche Erklärung für die starken Abweichungen der gemessenen Werte vom stationären Verlauf wäre, daß das gesamte hydraulische System Bohrspülung/Formationsfluide durch das Ziehen des Spülgestänges und die dabei auftretende Druckentlastung in Schwingung versetzt wurde. Der Versuch, die Meßdaten in diesem Sinne auszuwerten scheiterte allerdings an der viel zu geringen Meßpunktdichte.

Um einen durch die Fahrrichtung bedingten systematischen Fehler zu untersuchen, wurden die Ab- und Auffahrten der Sonde getrennt untersucht. Slug-Test-Auswertungen sind bei der sowieso schon geringen Datenmenge nach deren Halbierung nicht sinnvoll; die Interpolation mit Splines mit nachfolgender Differenzierung sollte aber wenigstens Anhaltspunkte für die Zuflußraten in verschiedenen Berei-

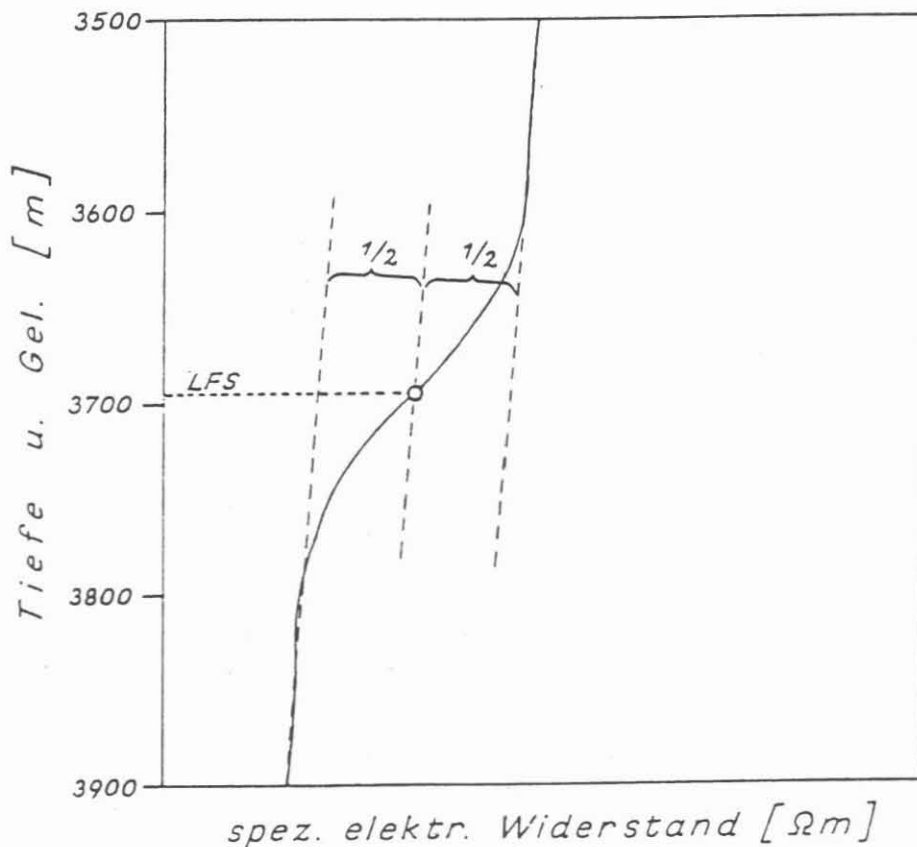


Abbildung 4: Methode zur Festlegung eines festen Bezugspunktes innerhalb des Leitfähigkeitssprungs LFS.

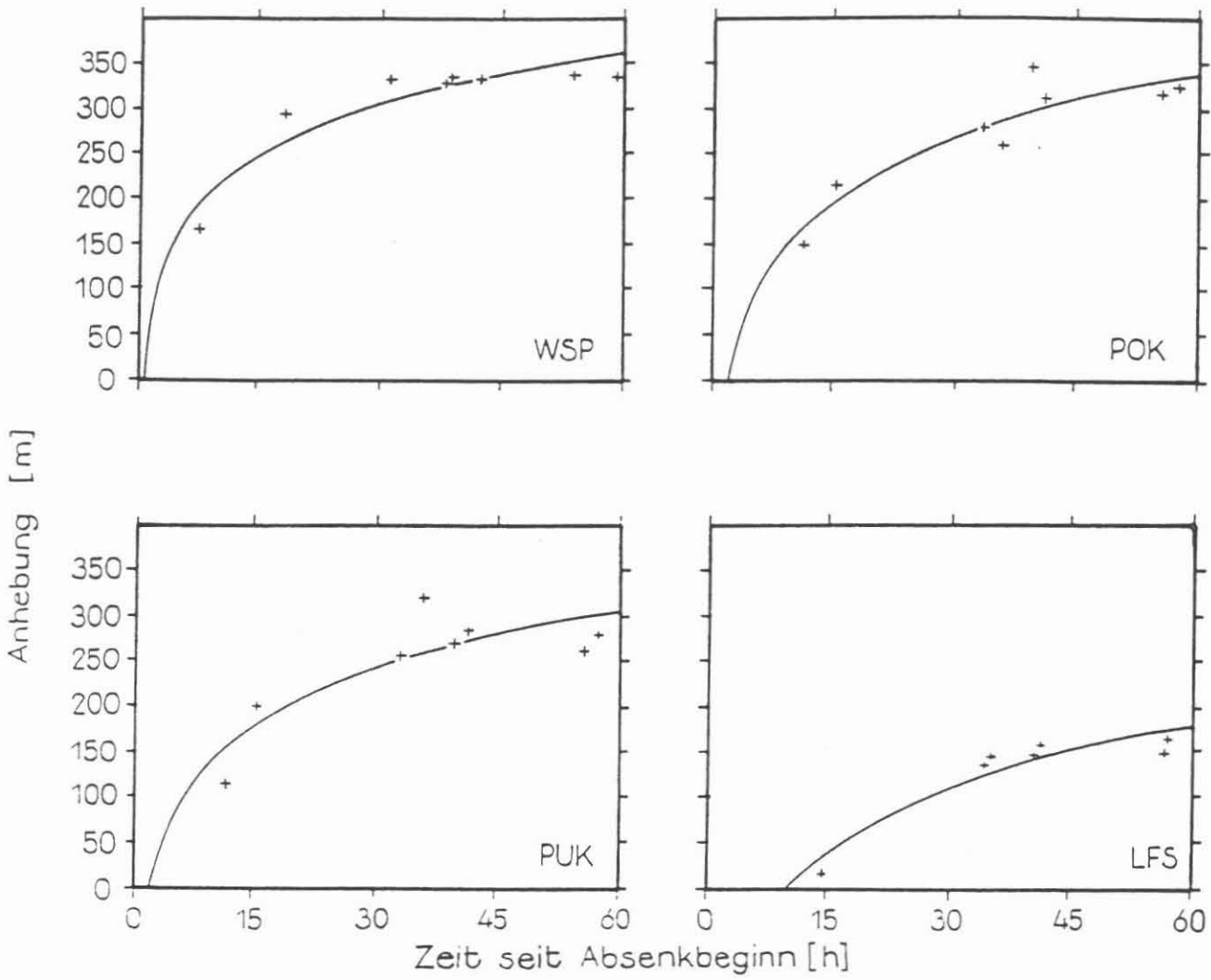


Abbildung 5: Verlauf der Horizonte in der Spülung während der ersten 60 Stunden. Die Meßwerte wurden durch logarithmische Funktionen approximiert, um die Abweichung der Horizontwanderungen vom stationären Fall zu verdeutlichen.

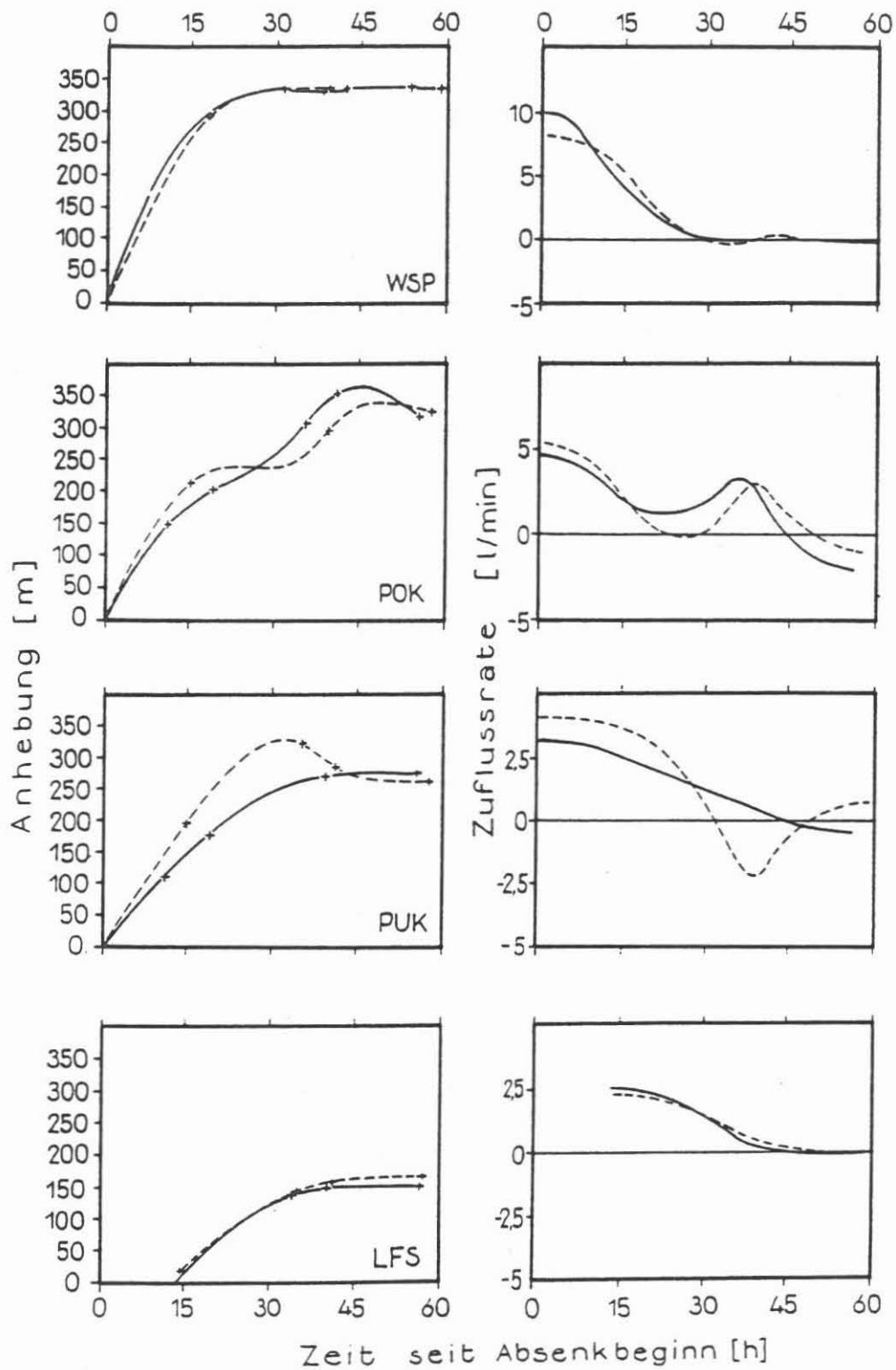


Abbildung 6: Horizontverläufe, getrennt nach Ab- und Auffahrten. Durchgezogene Linien sind Spline-Interpolationen durch Abfahrtsmeßdaten, unterbrochene Linien ebensolche durch Meßdaten von Auffahrten. Aus diesen Splines wurden die Zuflußraten (rechts) berechnet.

chen der Bohrung liefern. In den Abb. 6 sind links die Anhebungen der Horizonte während der ersten 60 Stunden und rechts die über die Splines ermittelten Zuflußraten zu sehen. Die Werte auf durchgezogenen Linien sind die bei Abfahrten, die auf unterbrochenen Linien die bei Auffahrten ermittelten Meßwerte. Aus den Zuflußraten während der ersten Stunden des Versuchs erhält man für die Verteilung der zuströmenden Fluidmengen nach Tiefenbereichen Tab. 5. In der *KTB-VB1* liegen zwei Bereiche mit unterschiedlichen Durchmessern vor. Dort gelten die folgenden Umrechnungen für das Volumen [l] pro Meter Bohrlochlänge:

Casing (bis 479,5 m)	26,2 $\frac{l}{m}$
Open hole (479,5 - 4000 m)	18,24 $\frac{l}{m}$

Während bei den im Vorfeld der hydraulischen Versuche durchgeführten Messungen

Tabelle 4: Anhebung (H_{xxx}) des Spülungsspiegels (WSP), der Kanten der *Leitfähigkeitspille* (POK u. PUK) und des Leitfähigkeitssprungs an der Basis der Bohrung (LFS) t Stunden nach Versuchsbeginn. Für WSP, POK und PUK enthält die erste Zeile die berechneten Werte für den Absenkbeginn (siehe Text). Da der Ort des LFS zum Zeitpunkt $t=0$ nicht bekannt war, wurde der erste gemessene Wert für LFS als Nullpunkt angesetzt.

LOG	H_{WSP}		H_{POK}		H_{PUK}		H_{LFS}	
	t [h]	[m]	t [h]	[m]	t [h]	[m]	t [h]	[m]
	0	0	0	0	0	0	-	-
A	7.3	166	11.2	150	11.3	115	13.2	0
B	18.1	293	15.3	216	15.2	200	14.2	18
C	31.1	333	33.0	280	33.1	255	34.1	137
D	37.9	329	35.6	260	35.6	320	34.8	144
E	38.6	334	39.5	345	39.6	270	40.2	147
F	42.1	333	41.1	310	41.0	285	41.0	157
G	53.6	338	55.5	318	55.7	262	56.6	149
H	59.1	334	57.6	323	57.5	280	57.1	164
I	128.3	341	132.1	330	132.4	270	134.3	160
K	151.9	340	153.4	318	153.5	256	154.2	168
L	156.7	337	157.5	328	157.6	267	158.0	159
M	175.8	338	177.4	329	177.5	260	178.2	169
N	180.4	335	179.3	321	179.2	292	178.8	174

Tabelle 5: Ungefähre Verteilung der zufließenden Fluidmengen aus den verschiedenen Tiefenbereichen beim Absenkttest, ermittelt nach den in den Abb. 6(rechts) dargestellten Zuflußraten. Die prozentualen Anteile sind nur qualitativ interpretierbar.

Teufenbereich	Anteil am zufließenden Volumen [%]
0-2600	45
2600-2800	5
2800-3900	17
3900-4000	33

keine Indizien auf einen hydraulisch aktiven Bereich in einer Teufe von ca. 2600 m hindeuteten, war in diesem Bereich bei fünf Meßfahrten während des Absenkttests eine Zunahme des Spülungswiderstandes zu verzeichnen, die meist um ein mehrfaches über der der *Leitfähigkeitspille* lag. Zu beobachten war dieser Peak nur bei den Abfahrten, unabhängig davon, ob die Geschwindigkeit einer dazwischenliegenden Auffahrt kleiner oder größer war als die der Abfahrten. Das "Überfahren" des Peaks aufgrund zu hoher Geschwindigkeiten bei den Auffahrten scheidet demnach aus.

Solch starke Leitfähigkeitsänderungen wie die beobachtete treten in der DHT-Spülung durch chemische Prozesse auf. Möglicherweise läßt sich dieser Peak folgendermaßen erklären. Ausgegangen wird von der Annahme, daß in diesem Bereich eine hydraulisch isolierte Kluft (oder Kluftsystem) angebohrt wurde. Bei geringer Kluftweite kann die Spülung darin zu einem Pfropfen vergelen. Druckänderungen können dazu führen, daß der Pfropfen mehr oder weniger schnell entfernt wird und saline Wässer zutreten (Änderung der Spülungsleitfähigkeit bei Unterdruck). Wenn es sich bei den zutretenden Fluiden um gesättigte Wässer handelt, was bei einem isolierten Kluftsystem zu vermuten ist, reichen zur Destabilisierung der Spülung schon kleine Fluidmengen aus. Strömungsvorgänge müßten somit nicht beobachtet werden.

Die während einer am 13.06.1989 durchgeführten Bohrlochzirkulation ausgeführten chemischen Analysen der Spülung zeigen für diesen Bereich signifikante Erhöhungen von Leitfähigkeit und pH-Wert. Die festgestellten Gas- und Ionenkonzentrationen lagen allerdings nicht über dem Durchschnitt [Heinschild, Zimmer, 1989]. Beim Einsatz des Multi-Fluid-Samplers am 01./02.06.1989 wurde die Spülung in der interessierenden Teufe nicht beprobt [Heinschild, 1989]. Eine Erklärung für das alleinige Auftreten des Peaks bei Abfahrten liefert wahrscheinlich die Tatsache, daß der betrachtete Bereich bei 2600 m während der Abfahrt bis zur folgenden Auffahrt durch das Sondenkabel permanent durchmischt wird und die Viskositätsänderung, die hauptsächlich für eine Leitfähigkeitsänderung verantwortlich ist, verzögert oder

verhindert.

Um die Abweichungen der Meßdaten vom stationären Trend auswerten zu können, wurde angenommen, daß die Meßdaten mit keinem systematischem oder technisch bedingtem Fehler behaftet sind. Bildete man die Differenz zwischen der logarithmischen Approximation und den Meßwerten (Abb. 5), so konnte die Differenz durch eine nahezu sinusförmige Funktion interpoliert werden konnten. Eine Fourier-Transformation der Interpolationsfunktion ergab Maxima bei Perioden von 6, 12 und 20 Stunden. Die geringe Datenmenge mindert aber auch in diesem Fall die Qualität dieser Ergebnisse und verhinderte eine weitergehende Auswertung und Interpretation.

Generell bieten sich für die Auswertung solcher Schwingungen zwei Verfahren an. Eines steht erprobt im Geologischen Landesamt Baden-Württemberg (Freiburg) zur Auswertung von Gezeitengängen zur Verfügung. Unter der Voraussetzung einer 1-2 monatigen kontinuierlichen Wasserspiegelmessung können mit computer-gestützten Auswerteverfahren hydraulische und felsmechanische Parameter gewonnen werden. Beim anderen, dem sog. Einschwing-Verfahren [Krauss, 1977], wird die Wassersäule zumeist mit Pressluft in Schwingungen versetzt. Über die Auswertung dieser Schwingungen können hydraulische Parameter bestimmt werden.

1.2 Injektionstest

1.2.1 Durchführung

Im Anschluß an den Absenkttest wurde vom 22.-24.05.1989 ein Injektionstest durchgeführt. Dieser Test bestand aus zwei Teilen:

1. Einer Injektion von 16 Stunden Dauer mit einem konstanten Überdruck von ca. $p_0 = 44$ bar (Constant pressure test). Die dazu notwendige Injektionsrate betrug zu Beginn $Q = 4,4 \frac{l}{min}$ und fiel auf ca. $Q = 2 \frac{l}{min}$ ab. Nach einer Injektionsdauer von ca. $8 \frac{1}{2}$ Stunden wurde der Versuch unterbrochen, d.h. die Injektion gestoppt. Während einer halben Stunde wurde der Druckabfall registriert, dann der Druck auf $p = 40$ bar erhöht und nochmals eine halbe Stunde lang registriert. Für die restlichen $6 \frac{1}{2}$ Stunden wurde der Druck wieder bei 44 bar gehalten.
2. Einer kurzzeitigen Druckänderung, bei der das Bohrloch mit 45 bar beaufschlagt wurde (Slug-Test). In den folgenden 6 Stunden wurde der Druckabbau registriert.

1.2.2 Beobachtungen und Auswertung

Der Injektionsversuch lieferte mehrere verwertbare Datenreihen:

1. Die Injektionsrate während der 16-stündigen Injektion
2. Der Druckabfall während der Injektionsunterbrechung
3. Der Druckabfall während des Slug-Tests (Abb. 7).

Die Auswertung dieser Versuchsabschnitte liefert folgende Transmissivitätswerte:

1. $\frac{T}{H} = 2,9 \cdot 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{sec}}$
2. $\frac{T}{H} < 9,9 \cdot 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{sec}}$
3. $\frac{T}{H} = 1,2 \cdot 10^{-10} \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

In Abb. 8 wurde die Injektionsrate gegen den Logarithmus der Zeit seit Versuchsbeginn aufgetragen. Bis zur Versuchsunterbrechung folgen die Meßdaten einer abfallenden Geraden, d.h. um den Überdruck konstant zu halten sind immer kleinere Injektionsraten nötig. Bei dem aus der Injektionsunterbrechung (2) ermitteltem Wert handelt es sich wegen der geringen Anzahl an Meßpunkten um eine Abschätzung (Abb. 9).

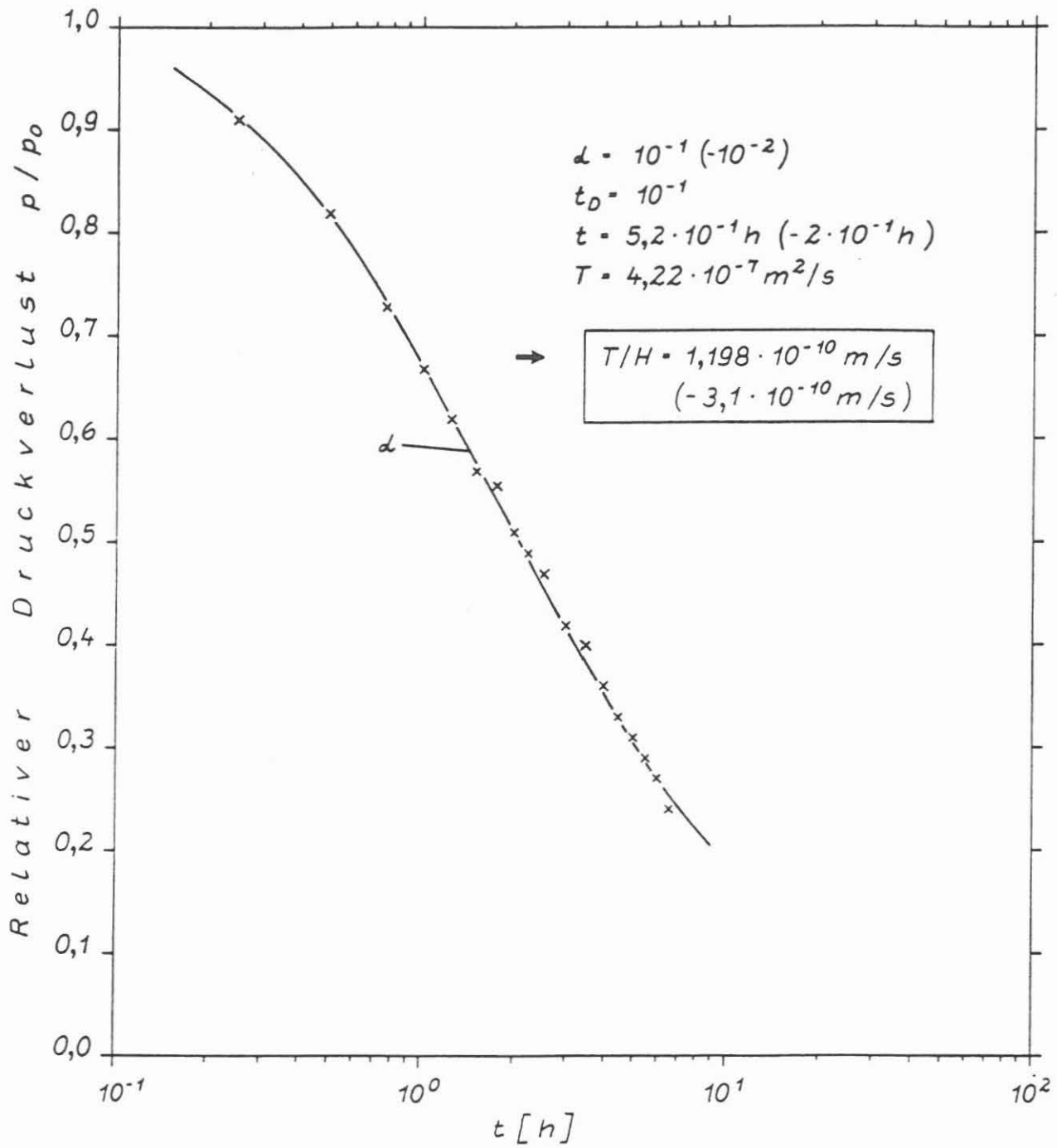


Abbildung 7: Auswertung des Druckverlaufs beim Injektionstest als Slug-Test

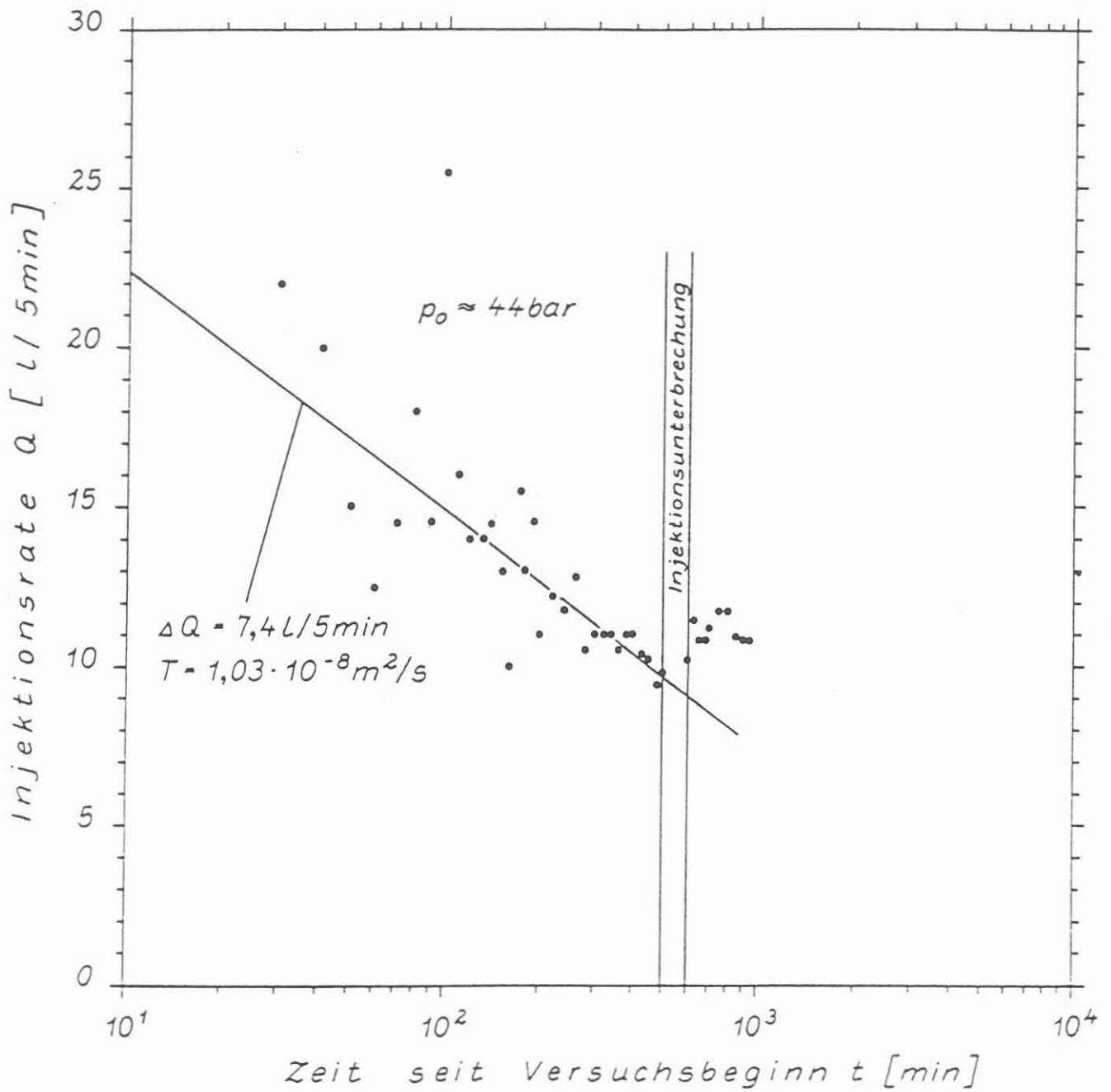


Abbildung 8: Auswertung der Injektionsraten

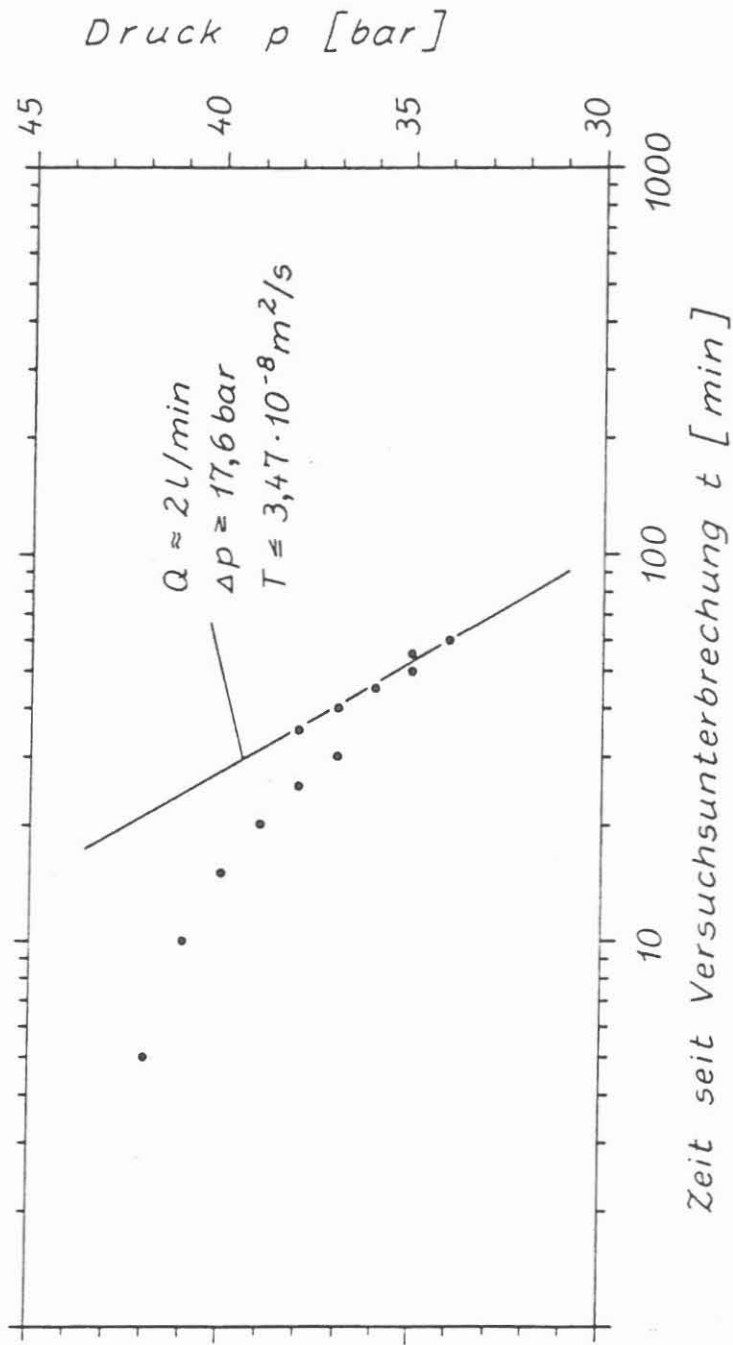


Abbildung 9: Auswertung des Druckabfalls während der Injektionsunterbrechung

1.3 Zusammenfassung

Bei der Interpretation der verschiedenen Durchlässigkeits($\frac{T}{H}$)-Werte ist es sinnvoll, zwischen Tests mit kurzer (Slug-Tests) und langer Impulsdauer zu unterscheiden. Slug-Tests sprechen nur das Gebirge in nächster Nähe zum Bohrloch an, während mit Langzeittests größere Gebirgsräume erfaßt werden. Für die vorliegenden Ergebnisse ergibt sich daraus folgende Gegenüberstellung:

Tabelle 6: Vergleich der Ergebnisse unter Berücksichtigung der Impulsdauer. Die Unterscheidung zeigt, daß die $\frac{T}{H}$ -Werte aus den den Nahbereich der Bohrung ansprechenden Slug-Tests um ca. 2 Größenordnungen über denen der Langzeittests liegen. Dies ist auf die Auflockerung des Gebirges in Bohrlochnähe durch den Bohrvorgang und die nachfolgende Entlastung des Gebirges zurückzuführen.

(I) Kurzzeittests		
a	Absenkttest	$(\frac{T}{H} = 4,5 \cdot 10^{-10} \frac{m}{s})$
b	Injektionstest Teil 2	$(\frac{T}{H} = 1,2 \cdot 10^{-10} \frac{m}{s})$
(II) Langzeittests		
a	Injektionstest Teil 1	$(\frac{T}{H} = 2,9 \cdot 10^{-12} \frac{m}{s})$
b	Injektionstest Teil 1 (Unterbrechung)	$(\frac{T}{H} = 9,9 \cdot 10^{-12} \frac{m}{s})$

Die Interpretation der einzelnen Tests bzw. Testphasen als Kurz-/Langzeittests ist folgendermaßen zu verstehen: Beim Absenkttest wurde die maximale Absenkung nur für einen kurzen Zeitraum erreicht und nicht über Pumpen konstant gehalten (Konstantratentest). Beim Injektionstest Teil 1 (constant-pressure-test) wurde der Druck über einen längeren Zeitraum konstant gehalten. Der Injektionstest Teil 2 ist wegen seines kurzzeitigen Druckaufbaus wiederum eindeutig bei den Slug-Tests einzuordnen.

Zu erkennen ist, daß die Transmissivität in Bohrlochnähe, die sich wie gesagt über die Slug-Test-Auswertung ermitteln läßt, zwei Größenordnungen über der für größere Gebirgsräume aus den Langzeittests ermittelten Transmissivitäten liegt. Dies ist hauptsächlich auf die Auflockerung des Gesteins in Bohrlochnähe durch den Bohrvorgang und die nachfolgende Entlastung des Gebirges zurückzuführen.

Ein Vergleich der aus den Slug-Tests ermittelten $\frac{T}{H}$ -Werte mit denen aus anderen Bohrungen im Kristallin [Schädel u. Stober, 1987] zeigt, daß diese nur um etwa den Faktor 5 kleiner sind als der der geologisch am ehesten vergleichbaren Bohrung Urach 3 (vgl. Tab. 7). Allerdings ist bei diesem Vergleich sowie bei weitergehenden

Interpretationen zu berücksichtigen, daß

- die $\frac{T}{H}$ -Werte der *KTB-VB1* noch nicht von Spülungseinflüssen bereinigt sind (Viskosität, (p,T)-Abhängigkeit) und
- der Transmissivitätswert aus dem Absenkttest nur ein schwaches Datenfundament besitzt.

Tabelle 7: Transmissivitäten in Bohrungen des moldanubischen Kristallins Südwestdeutschlands (entnommen [Schädel u. Stober, 1987]). Zum Vergleich ist der aus den beiden Slug-Test-Auswertungen gebildete Mittelwert für die *KTB-VB1* eingetragen.

Bohrung	Testabschnitt [m]	Gestein	$\frac{T}{H}$ [$\frac{m}{sec}$]
Bad Säckingen:			
- Neue Badquelle	200 - 300	Granit	$1,6 \cdot 10^{-5}$
- Neue Badquelle	55 - 600	Granit	$4,9 \cdot 10^{-6}$
- Neue Badquelle	380 - 505	Granit	$3,0 \cdot 10^{-6}$
- Neue Badquelle	300 - 600	Granit	$1,6 \cdot 10^{-6}$
- Alte Badquelle	83 - 201	Granit	$2,6 \cdot 10^{-6}$
Böblingen 2	655 - 775	Granit	$6,1 \cdot 10^{-7}$
Moosengrund	0 - 265	Granit	$3,8 \cdot 10^{-7}$
Falkenberg	0 - 500	Granit	$2,9 \cdot 10^{-7}$
Schön matt	0 - 272	Gneis	$8,5 \cdot 10^{-8}$
Hechtsberg	0 - 300	Gneis	$6,7 \cdot 10^{-9}$
Urach 3	3320 - 3488	Gneis	$1,4 \cdot 10^{-9}$
<i>KTB-VB1</i>	480 - 4000	Gneis	$2,9 \cdot 10^{-10}$

Die bisherigen Erkenntnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die Auswertungen der hydraulischen Tests ergeben für Gneis typische kleine Durchlässigkeitswerte.
- Die stärksten Zuflüsse liegen am Ende des Schutzrohres (480 m) und im Bohrlochtiefsten (> 3800 m, < 3950 m). Klüftige Bereiche mit nur geringen Fließraten zeigten sich in den Spülungswiderstandslogs vor allem zwischen 3000 und 3500 m.
- Der nach dem Absenkttest um ca. 30 m tiefer liegende Spülungsspiegel deutet auf eine Änderung der hydraulischen Potentialverteilung hin, die wahrscheinlich durch das Öffnen oder Schließen von Klüften hervorgerufen wurde.

Aufgrund der Erfahrungen, die bei der Durchführung und Auswertung der hydraulischen Tests gemacht wurden, sollten bei künftigen Versuchen folgende Punkte beachtet werden:

- Soll ein Absenk- oder Drucktest als Slug-Test ausgewertet werden, so sind zu Beginn Wasserspiegelmessungen in Minutenabständen notwendig.
- Die Erfordernisse einer *Leitfähigkeits-Fluid-Logging* - Auswertung an einen Versuch werden im nächsten Kapitel beschrieben. Wichtigste Bedingung ist die Konstanz der Unterdruckbedingungen während des gesamten Zeitraums der Messungen.
- Eine der vom technischen Aufwand her gesehen kostengünstigsten Methoden besteht in der Auswertung von Gezeitenschwankungen des Wasserspiegels. Dazu muß der Wasserspiegel über einen Zeitraum von 1-2 Monaten registriert werden. Zur Auswertung dieser Daten sind am Geologischen Landesamt Baden-Württemberg Programme vorhanden.
- Der Absenktest zeigte, daß mittels eines Verdrängungskörpers (Spülgestänge) das hydraulische System in Schwingungen versetzt werden kann. Zur Auswertung solcher Schwingungen könnte bei genügend großer Meßpunktdichte das Einschwingverfahren genutzt werden.

Zukünftige Tätigkeiten an der Bohrung, sowohl technische Arbeiten als auch bohrlochgeophysikalische Untersuchungen, sollten daraufhin untersucht werden, ob sie nicht unter Berücksichtigung der oben genannten Bedingungen mit eventuell geringem zusätzlichem Aufwand für eine hydraulische Auswertung nutzbar gemacht werden können.

Momentan wird versucht, die Auswerteverfahren des Leitfähigkeit-Fluid-Logging-Verfahrens den Versuchsbedingungen des stark modifizierten Absenktests anzupassen und dadurch die Spülungswiderstandsmessungen auf andere Art auszuwerten (siehe auch nächstes Kapitel).

2 Das Leitfähigkeits-Fluid-Logging-Verfahren

Verfahren zur Ermittlung von Künftigkeitsverteilungen und der Größe von Wegsamkeiten spielen eine wichtige Rolle bei der Bestimmung des Einflusses von Fluiden auf die geothermischen und chemischen Bedingungen im Untergrund. Für die Untersuchung der Wechselwirkung Gestein/Fluide und dem Verhalten von Fluiden in Porenräumen unter in-situ-Bedingungen sind hydraulische Verfahren genauso unentbehrlich wie chemische und geophysikalische Untersuchungen. Die konventionellen hydraulischen Verfahren besitzen Schwierigkeiten bei Messungen in Gebirgen mit sehr kleinen Transmissivitäten. Außerdem ist mit langen Durchführungszeiten zu rechnen.

Mit dem sogenannten *Leitfähigkeits-Fluid-Logging* [Tsang und Hufschmied, 1988], welches seit 1987 von der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Schweiz, erprobt und seither bereits erfolgreich in den Bohrungen Leuggern [Verstraete, 1988] und Siblingen [NAGRA, 1989] angewendet wurde, sind nun auch Transmissivitätsermittlungen in Geringstleitern bei niedrigen Kosten und relativ geringem technischen Aufwand – vernünftige Planung vorausgesetzt – möglich. Vor allem dort, wo Packertests aus Zeit- und/oder Kostengründen nur eingeschränkt möglich sind, kann das *Leitfähigkeits-Fluid-Logging* ergänzend oder auch alternativ eingesetzt werden. An dieser Stelle muß jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß das *Leitfähigkeits-Fluid-Logging* keinesfalls hydraulische Versuche ersetzen kann; vielmehr ergänzen sich ihre Einsatzmöglichkeiten in hervorragender Weise.

2.1 Prinzip des Verfahrens

Fluide, die über Klüfte in eine Bohrung eindringen, sind in der Regel anhand von Logs durch Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit erkennbar. Diesen Effekt nutzt man beim *Leitfähigkeits-Fluid-Logging* – vereinfacht dargestellt – folgendermaßen aus:

- Teile oder die komplette Bohrspülung werden gegen ein Fluid mit deutlich niedrigerer oder höherer elektrischer Leitfähigkeit als diejenige der Formationsfluide ausgetauscht. Ein großer Kontrast in den Leitfähigkeiten ermöglicht auch die Lokalisierung schwacher Zuflüsse. Vorzugsweise wird hierzu deionisiertes Wasser verwendet.
- Nach dem Austausch der Flüssigkeit in der Bohrung werden durch Einstellen konstanter Unterdruckbedingungen (Pumpe) die fließfähigen Bereiche aktiviert.
- Bei mehreren Meßfahrten wird die zeitliche Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit durch eindringende Formationsfluide registriert. Zustrombereiche sind als Peaks in den Leitfähigkeitslogs erkennbar.

- Aus den Leitfähigkeitslogs erhält man mit Hilfe analytischer und numerischer Verfahren die Transmissivitäten und Fließraten der Zustrombereiche.

Bei dem numerischen Auswerteverfahren löst man die eindimensionale Advektions-Dispersions-Gleichung

$$K \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} + S = \frac{\partial C}{\partial t}$$

mit

- C Konzentration in NaCl-Äquivalent
- v vert. Fließgeschw. im Bohrloch
- K Dispersionskoeffizient ($= \frac{d^2 v^2}{192D}$)
- d : Bohrlochdurchmesser
- D : molekulare Diffusionskonstante
- S Quellterm

über ein Differenzenverfahren. Zwischen der Konzentration C (NaCl-Äquivalent) und der elektrischen Leitfähigkeit σ besteht die Beziehung

$$\sigma \left[\frac{\mu S}{cm} \right] = 1870C \left[\frac{kg}{m^3} \right] - 40C^2$$

In einem Anpassungsvorgang werden die Ausgangsparameter solange variiert, bis eine genügend gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten Widerstands- bzw. Leitfähigkeitskurven erreicht ist. Nachdem auf diese Weise die Leitfähigkeiten, Konzentrationen und Zuflußraten der einzelnen Zustrombereiche bestimmt sind, werden mit der *Momentenmethode* [Loew et al., 1988] aus den einzelnen Peaks die Zuflußmenge und Transmissivität der Klüfte bestimmt.

2.2 Vorschlag für einen Leitfähigkeits-Fluid-Logging-Versuch im Rahmen des KTB

Um bei der meist angespannten terminlichen und finanziellen Situation des KTB einen sinnvollen Einsatz des *Leitfähigkeits-Fluid-Logging* - Verfahrens ermöglichen zu können, wurde folgender Plan für seine Durchführung in einem ca. 1000 m langen Teufenbereich erarbeitet. In diesem Bereich müssen als Voraussetzung die benötigten hydrochemischen Analysen vorliegen.

1. Durchzirkulieren der Spülung, um einen gleichmäßigen definierten Leitfähigkeitshintergrund zu erhalten. Der Versuch kann dann erfolgen, wenn dies durchgeführt wird. Wenn möglich sollte die auszirkulierte Spülung erneut beprobt werden.

2. Absenkung über eine Pumpe. Die notwendige Absenkung und die entsprechende Förderrate können z.B. über einen Absenktest ermittelt werden.
3. Einfahren der Sonde bis zur Oberkante des interessierenden Teufenbereichs. Dann direkter Beginn der Meßreihe. Die Sonde wird während der zu erwartenden 8-10 stündigen Meßdauer nicht ganz nach oben gezogen, sondern pendelt bei ihren Fahrten zwischen Ober- und Unterkante des Teufenbereichs hin und her. Bei einer für eine gute Auflösung notwendigen maximalen Fahrgeschwindigkeit von $10 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ sind so in acht Stunden sechs Loggings möglich. Dies ist ausreichend für eine *Leitfähigkeits-Fluid-Logging* - Auswertung.
4. Ausfahren der Sonde.

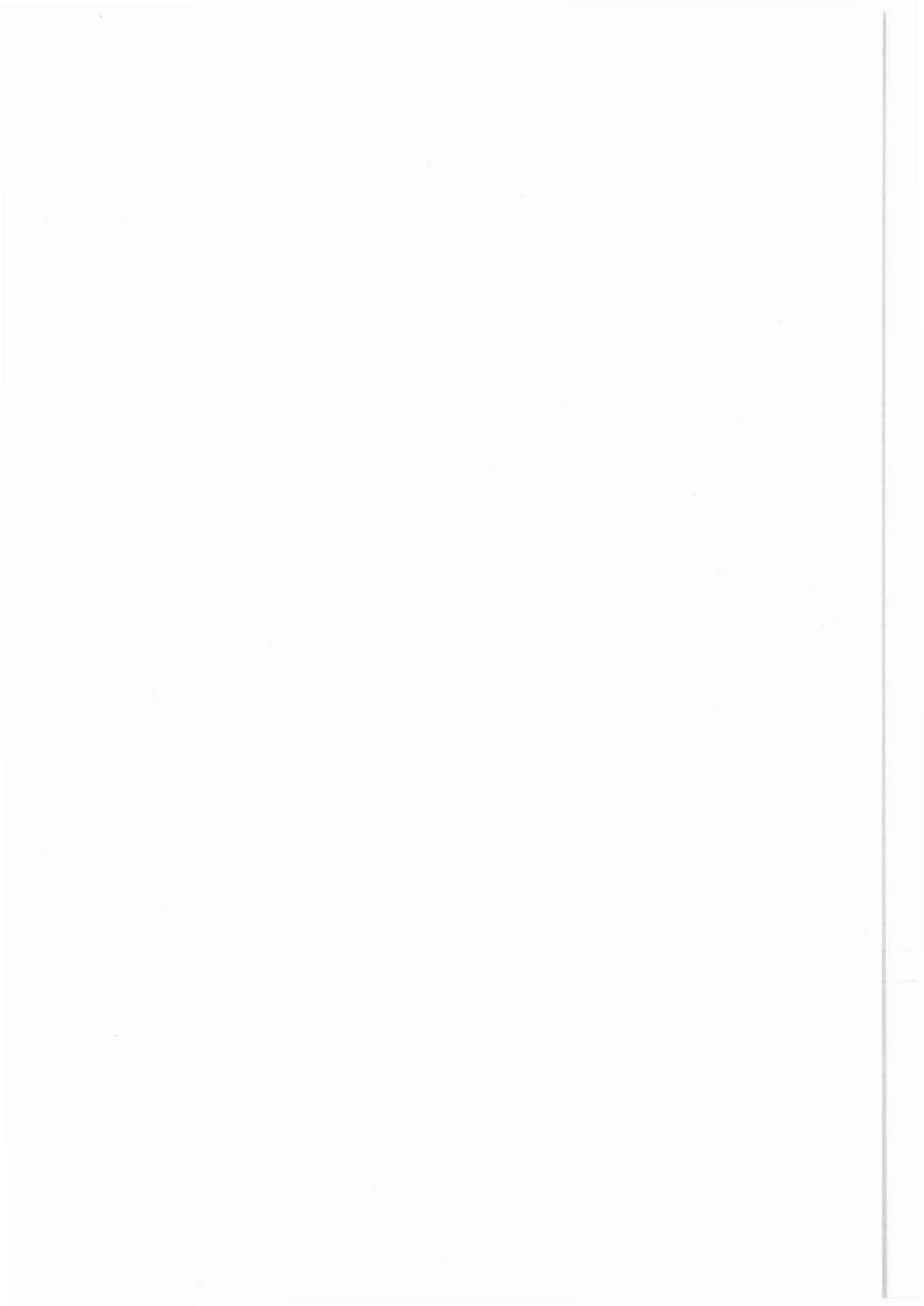
Der gesamte Versuch nimmt vom Beginn des Auszirkulierens bis zur Ausfahrt der Sonde je nach Unterdruckbedingungen 10-14 Stunden in Anspruch. Mit diesem Versuch können bei erfolgreicher Durchführung sämtliche Zuflüsse eines bis zu 1000 m langen Teufenbereichs bezüglich ihrer hydraulischen Parameter quantifiziert werden.

Unabhängig davon wird am Geologischen Landesamt Baden-Württemberg daran gearbeitet, die Auswerteprogramme so zu modifizieren, daß Versuche mit zwar nicht konstanten, aber doch kontrollierten Unterdruckbedingungen, bei denen Spülungsleitfähigkeits- oder Widerstandsmessungen durchgeführt wurden, ebenfalls ausgewertet werden können. Vor allem Absenktests böten dann die sehr kostengünstige Möglichkeit einer Doppelauswertung nach konventionellen und dem *Leitfähigkeits-Fluid-Logging* -Verfahren.

Literaturverzeichnis

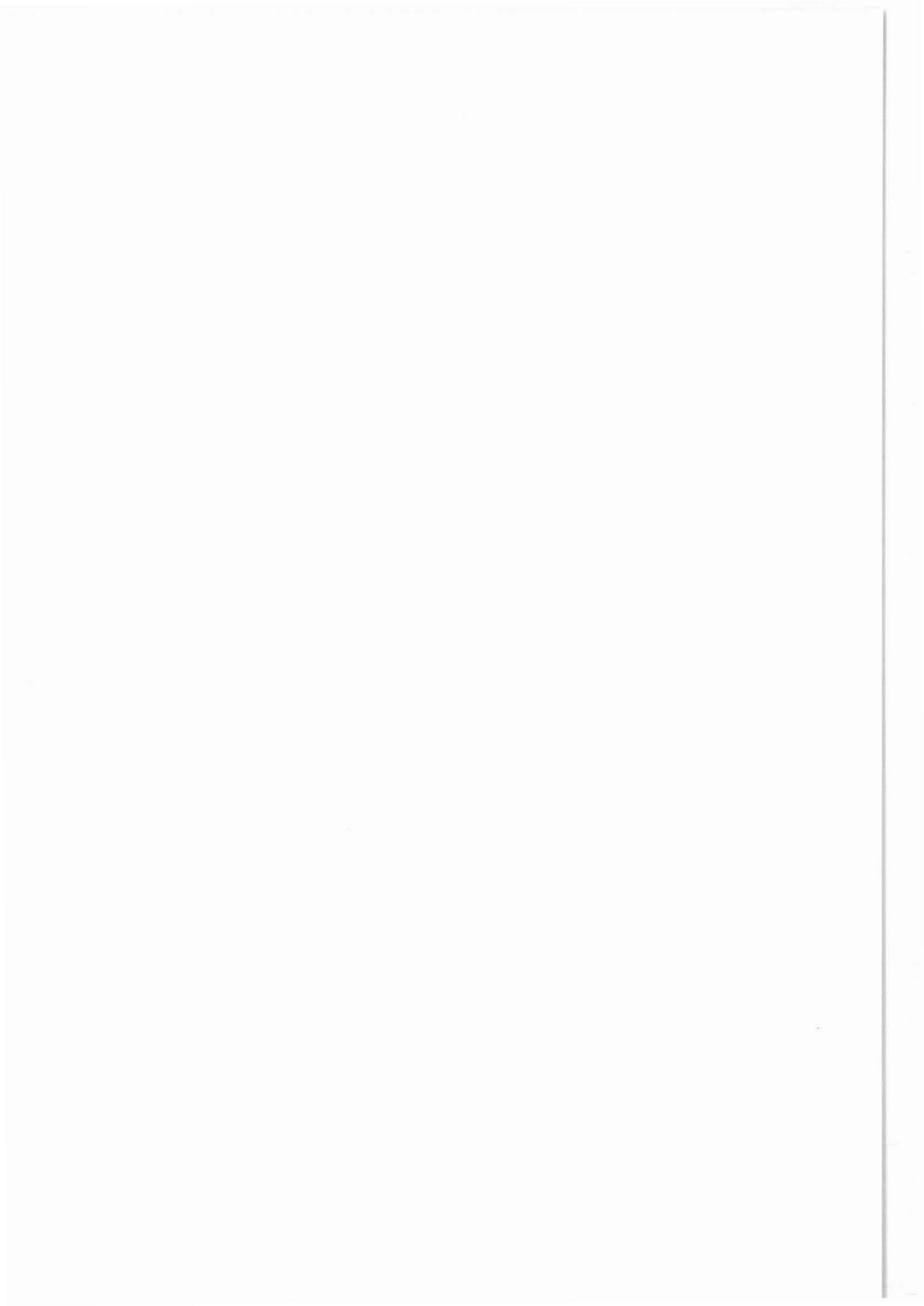
- Heinschild, H.J. : Vorabinformation des KTB-Labors FL-Geochemie zum Einsatz des Multi Fluid Samplers am 01.06 und 02.06.1989, 1989. [Unveröff.]
- u. Zimmer, M.: Vorabinformation des KTB-Labors FL-Geochemie zur Bohrlochzirkulation am 13.06.1989, 1989. [Unveröff.]
- Jobmann, M. : private Mitteilung, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, Arbeitsgruppe Geothermik, 1989.
- Kessels, W. , Zoth, G., Kück, J.: Erste Ergebnisse eines Absenk- und Injektionstestes in der KTB-Oberpfalz VB, Bericht, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Arch.-Nr. 105 585, Hannover, 1989.
- Krauss, I. : Das Einschwingverfahren - Transmissivitätsbestimmung ohne Pumpversuch, Gas Wasser Fach - Wasser/Abwasser, 118, Heft 9, 1977.
- Loew, S. , Ehlers, F., Andrews, R., McNeish, J., Vomvoris, S., Hufschmied, P.: Quantitative Analysis of Electrical Conductivity Logs in the Leuggern Borehole, Switzerland, Presentation at the AGU Fall Meeting, Special session on: Field Scale Characterization of the Hydraulic and Transport Properties of Fractured Rock, San Francisco, Dezember 1988. [Unveröff.]
- NAGRA : NAGRA aktuell, Juni 1989.
- Papadopoulos, S.S. , Bredehoeft, J.D., Cooper, H.H.: On the Analysis of Slug Test Data, Water Resources Res., 9, Nr. 4, S.1087-1089 , August 1973.
- Pusch, G. , Jung, R., Jobmann, M., Schellschmidt, R., Reifenstahl, F., Zoth, G., Miehe, R., Kessels, W.: Besprechung zur Auswahl hydraulischer Testhorizonte, KTB, Arbeitsgruppe Geohydraulik, 1989.
- Schädel, K. u. Stober, I.: Auswertung der Auffüllversuche in der Forschungsbohrung Urach 3, Jh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg, 26, S.27-34, November 1984.
- : Zur Wasserführung des kristallinen Grundgebirges in Südwestdeutschland, Geol. Jb., C 50, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, 1987.
- Stiefel, A. : private Mitteilung, Universität Karlsruhe, Inst. f. Geophysik, Arbeitsgruppe Geothermik, Karlsruhe, 1989.
- Tsang, C.F. : A Borehole Fluid Conductivity Logging Method for the Determination of Fracture Inflow Parameters, NDC-1, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, October 1987.
- u. Hufschmied, P.: A Borehole Fluid Conductivity Method for the Determination of Fracture Inflow Parameters, NTB-88-13, NAGRA, Baden Switzerland, January 1988.

Verstraete, P. : Borehole Leuggern Report on Fluid Logging Program 1987,
NIB-88-22, NAGRA, Baden Switzerland, July 1988.



Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Stilleweg 2
3000 Hannover 51

Thermischer Injektionstest



THERMISCHER INJEKTIONSTEST

M. Jobmann

Zusammenfassung

In der KTB-Oberpfalz VB wurde vom 22. - 24.05.1989 ein thermischer Injektionstest durchgeführt. Injiziert wurde über einen Zeitraum von 16 Stunden mit einer durchschnittlichen Injektionsrate von $2,7 \text{ l min}^{-1}$. Anhand der vor und nach der Injektion gefahrenen Temperaturlogs konnten insgesamt 30 wasseraufnehmende Klüfte bzw. Kluftzonen identifiziert werden.

Summary

During an injection-test in the borehole KTB-Oberpfalz VB from May 22 - 24 1989 fluid was injected for a period of 16 hours with an average flow rate of $2,7 \text{ l min}^{-1}$. A total of 30 fractures or fracture zones could be detected by comparison of pre- and post injection temperature logs.

Anschrift des Autors:

Dipl.-Geophys. Michael Jobmann, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Stilleweg 2, 3000 Hannover 51

Einleitung

Vom 22. - 24.05.1989 wurde ein Injektionstest in der KTB-Oberpfalz VB durchgeführt. Dieser Test stellt zusammen mit dem in der Woche davor durchgeführten Absenkttest die erste hydraulische Untersuchung der gesamten Bohrung nach Beendigung der Bohrarbeiten dar. Der Injektionstest hatte zum Ziel, mit Hilfe von Temperaturmessungen spülungsaufnehmende Klüfte bzw. Kluftzonen zu lokalisieren und unter Anwendung der Theorie des Thermischen Flowmeters die Abflußmengen an den einzelnen Kluftzonen zu bestimmen. Die gewonnenen Daten sollten wertvolle Hinweise zur Klärung der Frage liefern, inwieweit das Temperaturfeld durch konvektiven Wärmetransport beeinflusst ist. Des weiteren sollte der Test als Entscheidungshilfe bei der Festlegung der Teufenabschnitte für das hydraulische Testprogramm dienen.

Versuchsvoraussetzungen

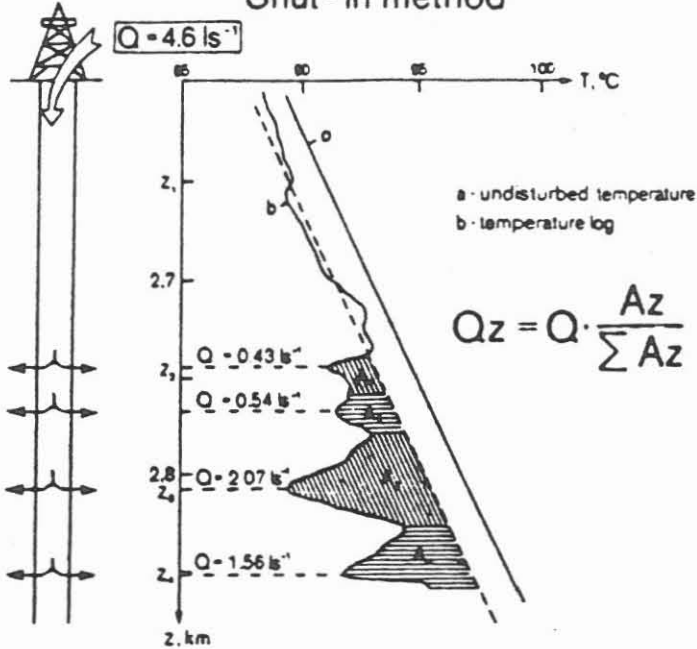
Die Theorie des Thermischen Flowmeters (MURPHY 1977, 1982), Abbildung 1, erlaubt prinzipiell eine Auswertung nach zwei Methoden basierend auf unterschiedlichen Versuchsdurchführungen (MICHEL & HAENEL 1984). Das Thermische Flowmeter wurde mit sehr gutem Erfolg in Bohrungen der Hot-Dry-Rock Projekte Urach, Falkenberg und Soultz eingesetzt (SCHELLSCHMIDT & HAENEL 1987; SCHELLSCHMIDT & SCHULZ 1989).

Bei der sogenannten "Flow"-Methode wird eine Temperaturmessung direkt vor der Injektion, möglichst als Gleichgewichtstemperatur, benötigt, die als Referenz für alle weiteren Messungen dient. Die Injektion sollte mit konstanter Rate erfolgen, wobei mindestens 2 bis 3 Temperaturmessungen während der Injektion unter Druck durchzuführen sind, um die zeitlichen Änderungen im Temperaturprofil im Vergleich zur Referenzmessung zu bestimmen.

Thermal flowmeter for measuring smallest flow rates at high temperatures

possibilities :

(1) Water loss in permeable zones;
Shut-in method



(2) Water loss or influx from the temperature gradients; Flow method

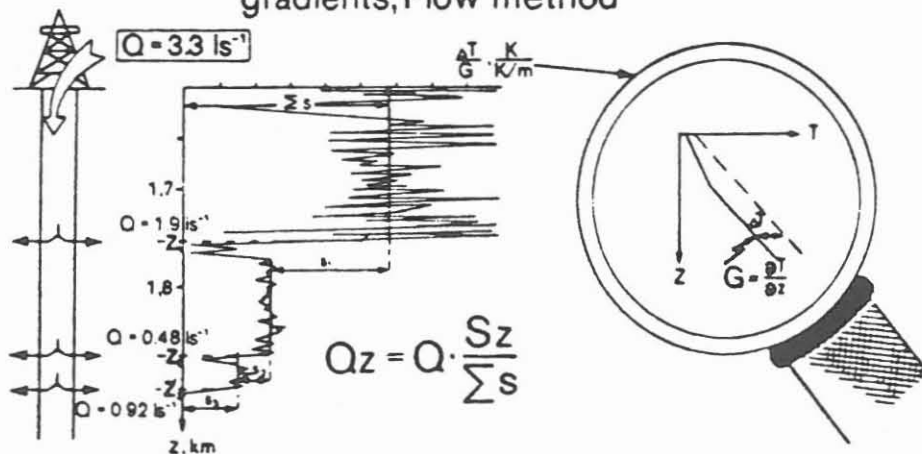


Abb. 1 : Prinzip des Thermischen Flowmeters

Für die zweite Methode, auch als "Shut-in"-Methode bezeichnet, benötigt man an Stelle der Messungen während der Injektion mindestens eine Messung im unmittelbaren Anschluß an die Injektion nach Druckeinschluß. Die Registrierung sehr kleiner Zuflußmengen und eine gesicherte Auswertung stellten extrem hohe Anforderungen an die Meßapparatur. Daher ist der Einsatz einer hochauflösenden ($T \leq 0,005 \text{ K}$) Temperatursonde mit sehr kleiner Zeitkonstante unbedingt erforderlich.

Versuchsdurchführung

Auf Grund finanzieller und technischer Schwierigkeiten konnten keine Meßfahrten während der Druckbeaufschlagung erfolgen. Die Temperaturmessungen beschränkten sich deshalb auf eine Referenzmessung vor der Injektion nach knapp viertägiger Stillstandszeit und eine weitere Messung unmittelbar nach Injektionsende bei rückströmender Spülung. Injiziert wurde über einen Zeitraum von 16 Stunden mit einem Kopfdruck von 4,4 MPa. Da der Wasserspiegel vorher bei etwa 60 m angetroffen wurde, ergab sich nach Auffüllen ein Überdruck von etwa 5 MPa gegenüber dem Formationsdruck. Die Injektionsrate lag bei $2,7 \text{ l min}^{-1}$.

Die Temperaturmessungen wurden mit der NLfB-Temperatursonde durchgeführt, die eine absolute Genauigkeit von $\pm 0,01 \text{ K}$ und eine Auflösung von $\pm 0,002 \text{ K}$ besitzt. Weitere technische Einzelheiten dieser Sonde können einer Arbeit von ZOTH & FESCHE (1985) entnommen werden. Gefahren wurde mit einer Geschwindigkeit von 12 m min^{-1} , womit ein Meßpunktabstand von 5 cm erreicht wurde.

Auswertung

Mit Hilfe der Temperaturmessungen konnten die Zonen, aus denen die verpreßte Spülung in das Bohrloch zurückströmte, lokalisiert werden. Eine Quantifizierung der Abflußraten konnte nicht erfolgen, da die von der Theorie geforderten Versuchsbedingungen - Messungen unter Druck - nicht erfüllt waren. Die sehr kleine Injektionsrate von $2,7 \text{ l min}^{-1}$ ließ nur geringfügige Temperaturstörungen, maximal im Bereich von einigen Zehntel Kelvin, erwarten, da die Spülungssäule nur äußerst langsam in der Bohrung nach unten wandert.

Die Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der beiden Temperaturmessungen für das gesamte Bohrloch; dargestellt ist die Temperatur in reduzierter Form, das heißt nach Abzug eines Temperaturgradienten von 26 mK m^{-1} . Diese Darstellung hat den Vorteil, daß nur noch Temperaturwerte dargestellt werden, die von dem abgezogenen Trend abweichen. Man hat damit die Möglichkeit, sehr kleine Temperaturstörungen auch über große Tiefenbereiche besonders deutlich zu erkennen. Die Kurve a entspricht der Messung vor, Kurve b der Messung nach der Injektion. Zur optisch besseren Trennung wurde Kurve b parallel in positiver Richtung um $0,2 \text{ K}$ verschoben, da sich beide Kurven ansonsten stark überlagern. Bereits in diesem Maßstab lassen sich deutliche Veränderungen im Temperaturprofil nach der Injektion gegenüber der Referenzmessung in Form scharfer Spitzen erkennen. Die eingezeichneten Pfeile kennzeichnen die markantesten Veränderungen. Die Form dieser Anomalien deutet eindeutig darauf hin, daß an diesen Stellen die durch Injektion verpreßte Spülung wieder in das Bohrloch eintritt; das heißt, diese Stellen lassen sich als spülungsaufnehmende Zonen mit hydraulischem Kontakt zur Bohrung identifizieren.

Um die Zutrittsstellen genau zu lokalisieren und ihre Ausdehnung zu bestimmen, muß ein wesentlich kleinerer Maßstab gewählt werden. An zwei Beispielen in Abbildung 3 und 4 wird das Vorgehen verdeutlicht.

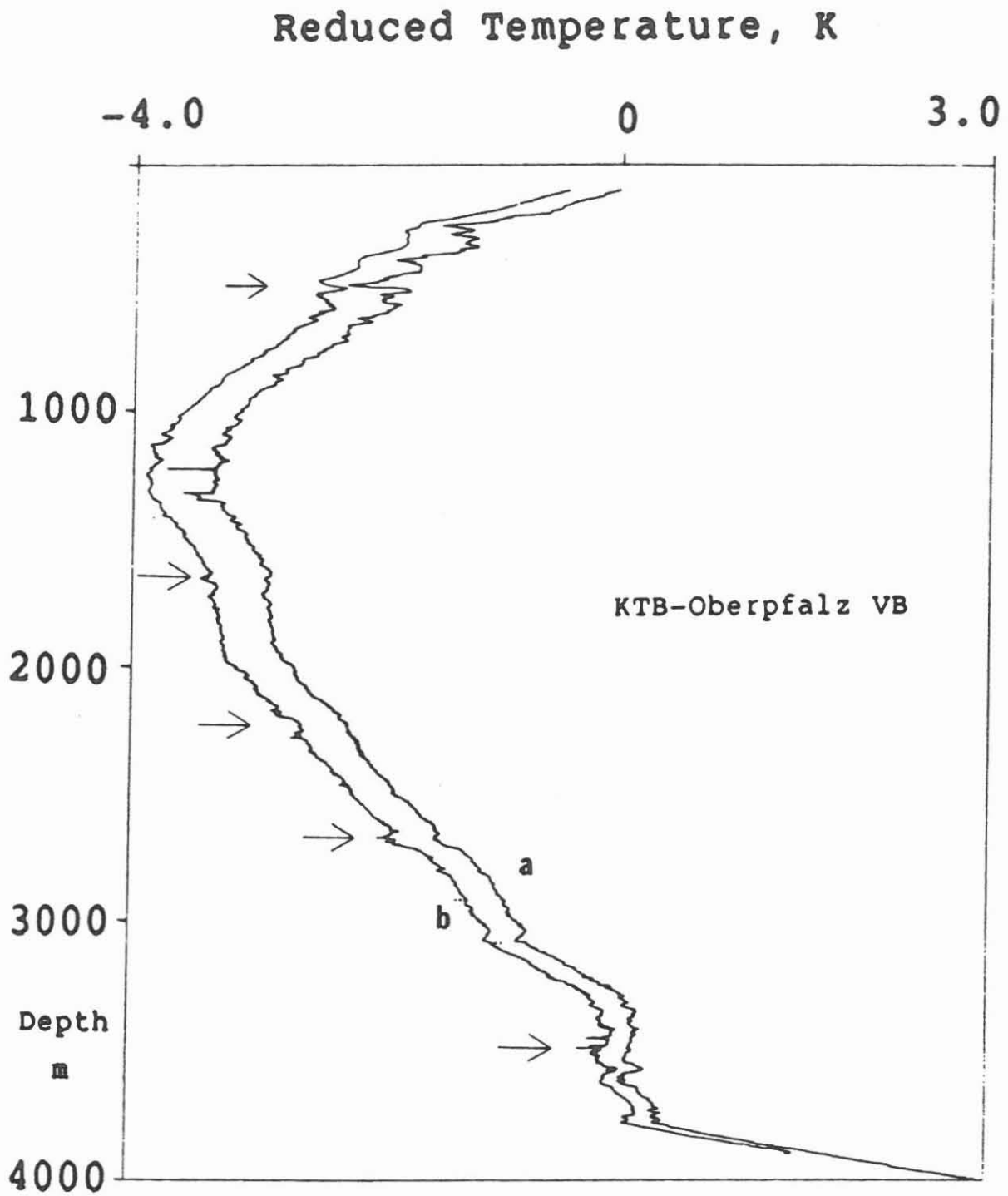


Abb. 2 : Temperaturmessungen zum Injektionsversuch reduziert um einen Temperaturgradienten von 26 mK m^{-1} . Die Pfeile kennzeichnen die markantesten Klüftzonen. a) vor der Injektion b) nach der Injektion

Reduzierte Temperatur, K

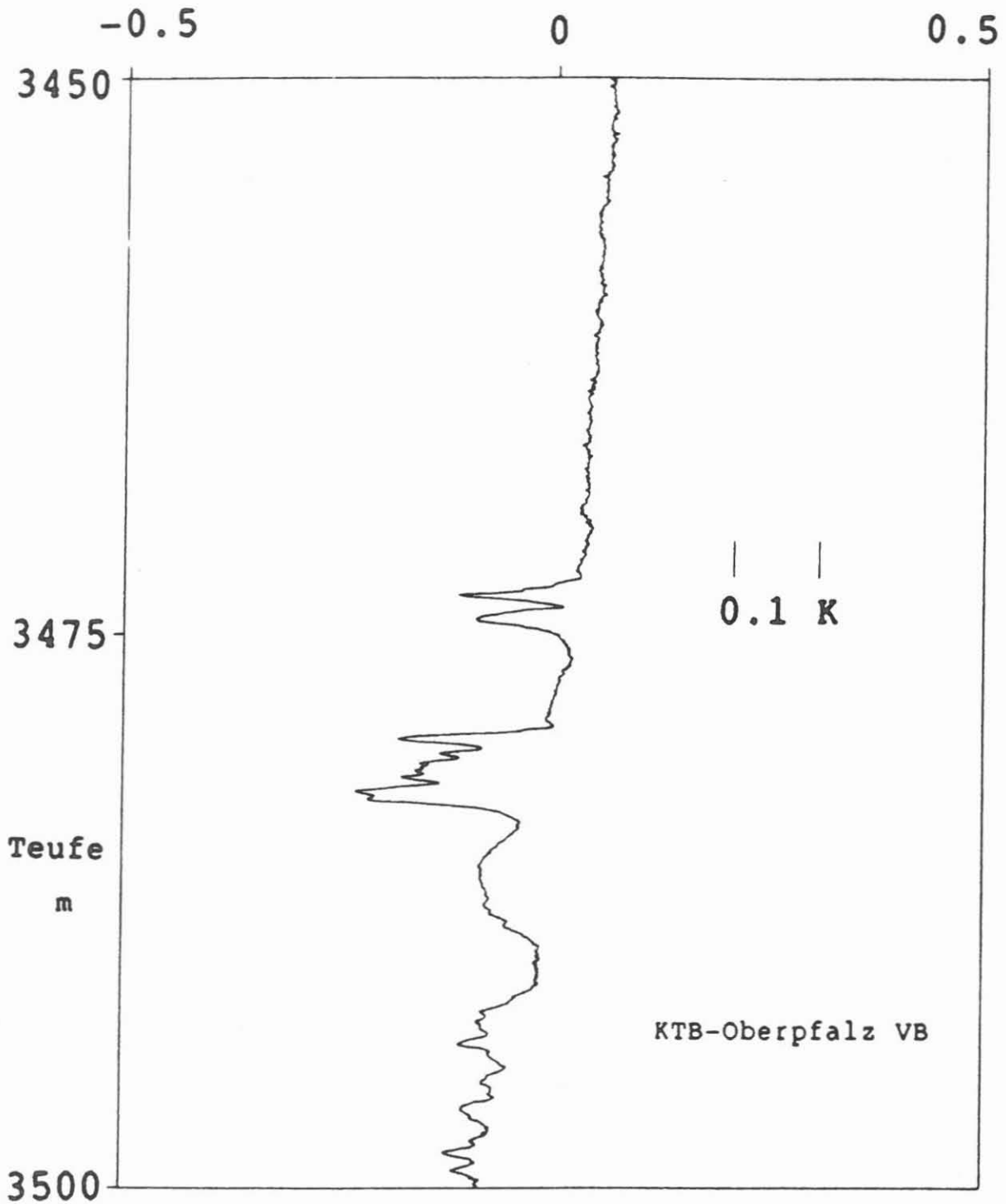


Abb. 3 : Ausschnitt aus der Temperaturmessung nach Injektion für den Teufenbereich von 3450 - 3500 m.

Reduzierte Temperatur, K

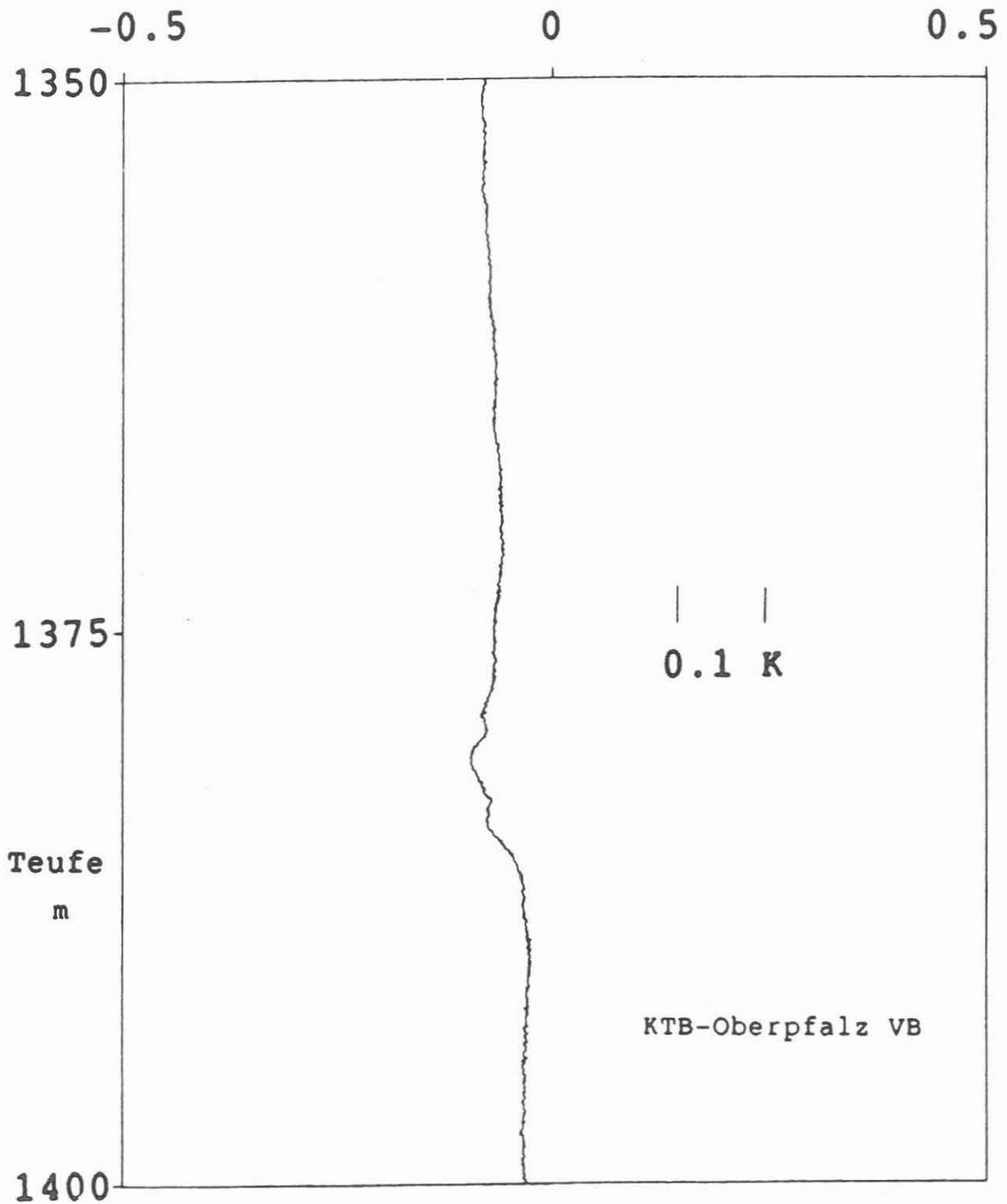


Abb. 4 : Ausschnitt aus der Temperaturmessung nach Injektion für den Teufenbereich von 1350 - 1400 m.

In Abbildung 3 ist der Teufenbereich von 3450 - 3500 m hochauflösend dargestellt, ebenfalls reduziert um einen Temperaturgradienten von 26 mK m^{-1} . Es lassen sich hier deutlich drei scharf abgegrenzte Bereiche erkennen, in denen das Temperaturprofil durch die in das Gebirge eingedrungene Spülung gestört ist. Man hat somit die Möglichkeit, Aussagen über die Lage der Zutrittsstellen mit einer Genauigkeit von etwa 1 m zu machen. Die maximale Temperaturstörung beträgt in diesem Fall etwa 0,2 K. Aber auch sehr viel kleinere Anomalien können auf diese Weise erkannt werden. Die Abbildung 4 zeigt eine deutliche Störung im Temperaturprofil im Bereich um 1380 m, wobei die Amplitude maximal bei 0,05 K liegt.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die auf diese Weise identifizierten Kluftzonen in Form einer Tabelle. Es konnten insgesamt 30 Kluftzonen aufgrund mehr oder weniger starker Temperaturanzeigen erkannt werden. Vergleiche mit anderen Messungen ließen zwar teilweise Korrelationen erkennen, aber vielfach lieferten andere Meßverfahren keine Hinweise auf Klüfte, obwohl in den Temperaturmessungen Anzeigen für spülungsaufnehmende Klüfte erkennbar sind.

Bereiche [m]	Staerke	Korrelationen					
		LL	WF	VDL	FMS	SAL	KAL
490- 513	* *	-	ja	-	-	ja	ja
553	*	-	-	-	-	-	-
1104	*	-	-	-	-	-	-
1370-1385	*	ja	ja	-	ja	-	ja
1445-1460	*	-	-	-	-	-	-
1538	*	-	-	-	-	-	-
1600-1640	* *	-	-	ja	-	-	ja
1692-1703	*	-	-	-	-	-	ja
1738-1746	*	-	-	-	-	-	-
1780-1785	*	-	-	-	-	-	-
1924-1936	*	ja	-	-	-	-	ja
2146-2178	* *	ja	-	ja	ja	-	ja
2232-2256	* *	ja	-	-	-	-	ja
2433-2446	* *	ja	-	-	-	-	ja
2595	*	-	-	-	-	-	-
2640-2680	* *	ja	-	-	-	-	ja
2780	*	-	-	-	-	-	-
2980-3000	*	-	-	ja	-	-	-
3030-3035	*	-	-	-	-	-	-
3200-3206	*	ja	-	ja	ja	ja	-
3396-3409	* *	-	-	-	-	-	-
3438-3447	* * *	-	-	-	-	ja	-
3472-3476	* * *	-	-	-	-	-	-
3478-3484	* * *	-	-	-	-	-	-
3492-3512	* *	-	-	-	-	-	-
3533-3541	*	ja	-	-	-	-	-
3557-3573	* *	ja	-	-	ja	ja	-
3768-3780	*	-	-	-	-	-	-
3840-3855	*	-	-	-	-	-	-
3890-3895	* *	-	-	-	-	-	-

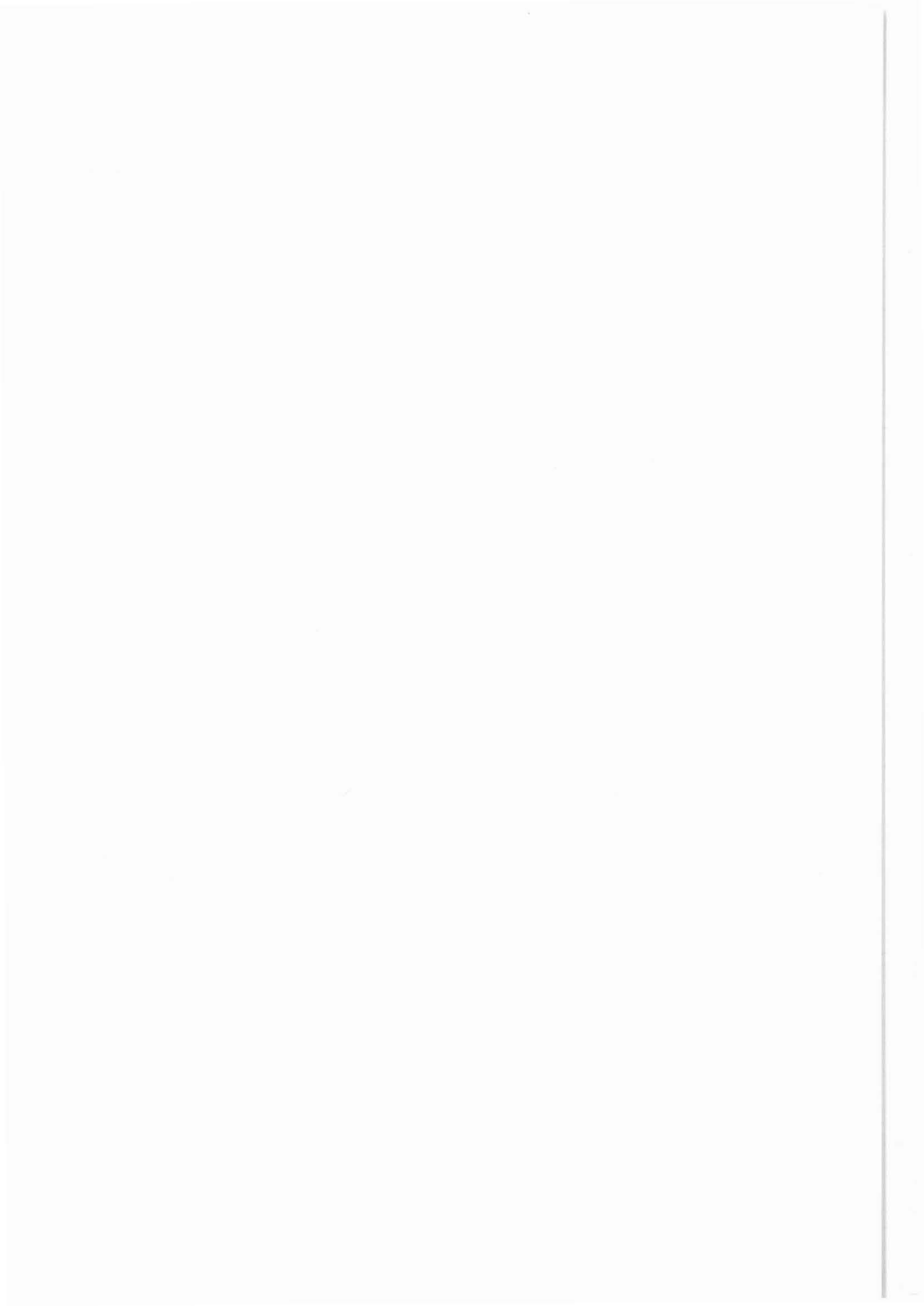
* schwach
 * * mittel
 * * * stark

Tab. 1 : Teufenbereiche mit Temperaturanzeigen fuer Kluffzonen sowie Korrelationen (- keine Korrelation) mit anderen Messungen.

LL = Laterolog
 WF = Wave Form (Sonic-Log)
 VDL = Variable Density Log
 FMS = Formation MicroScanner
 SAL = Salinitaet
 KAL = Kaliber

Schriftenverzeichnis

- MICHEL, W. & HAENEL, R. (1984): Quantitative Bestimmung von Wasserinjektionen und Extraktionen in Bohrungen mit Hilfe von Temperaturmessungen im Hot Dry Rock-Projekt Urach, Teilprojekt Geothermik. - NLfB Archiv-Nr. 95 824; Hannover.
- MURPHY, H.D. (1977): Fluid Injection Profiles - A Modern Analysis of Wellbore Temperature Surveys. - Soc. Petrol. Eng. AIME, SPE 6783: 1-8.
- MURPHY, H.D. (1982): Enhanced Interpretation of Temperature Surveys Taken During Injection or Production. - Journal of Petroleum Technology, 1313-1326.
- SCHELLSCHMIDT, R. & HAENEL, R. (1987): Influx and Water Loss in Open-hole Sections of Boreholes Determined by Temperature Measurements. - Geol. Jb., E 39: 101-108; Hannover.
- SCHELLSCHMIDT, R. & SCHULZ, R. (1989): Hydrogeothermic Studies on Hot Dry Rock Technology. - European Geothermal Update (Proceedings of the 4th International Seminar on Results of EC Geothermal Energy Research and Demonstration, Florence, 27 - 30 April 1989. Edited by Louwrier, K., Staroste, E., Garnish, J.D. and Karkoulas, V.): 351-360; Dordrecht (Kluwer Academic Publishers).
- ZOTH, G. & FESCHE, H.-W. (1985): Entwicklung und Bau einer Temperatur-Tiefbohrlochsonde. - Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht T 85-091; Eggenstein - Leopoldshafen (Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik).

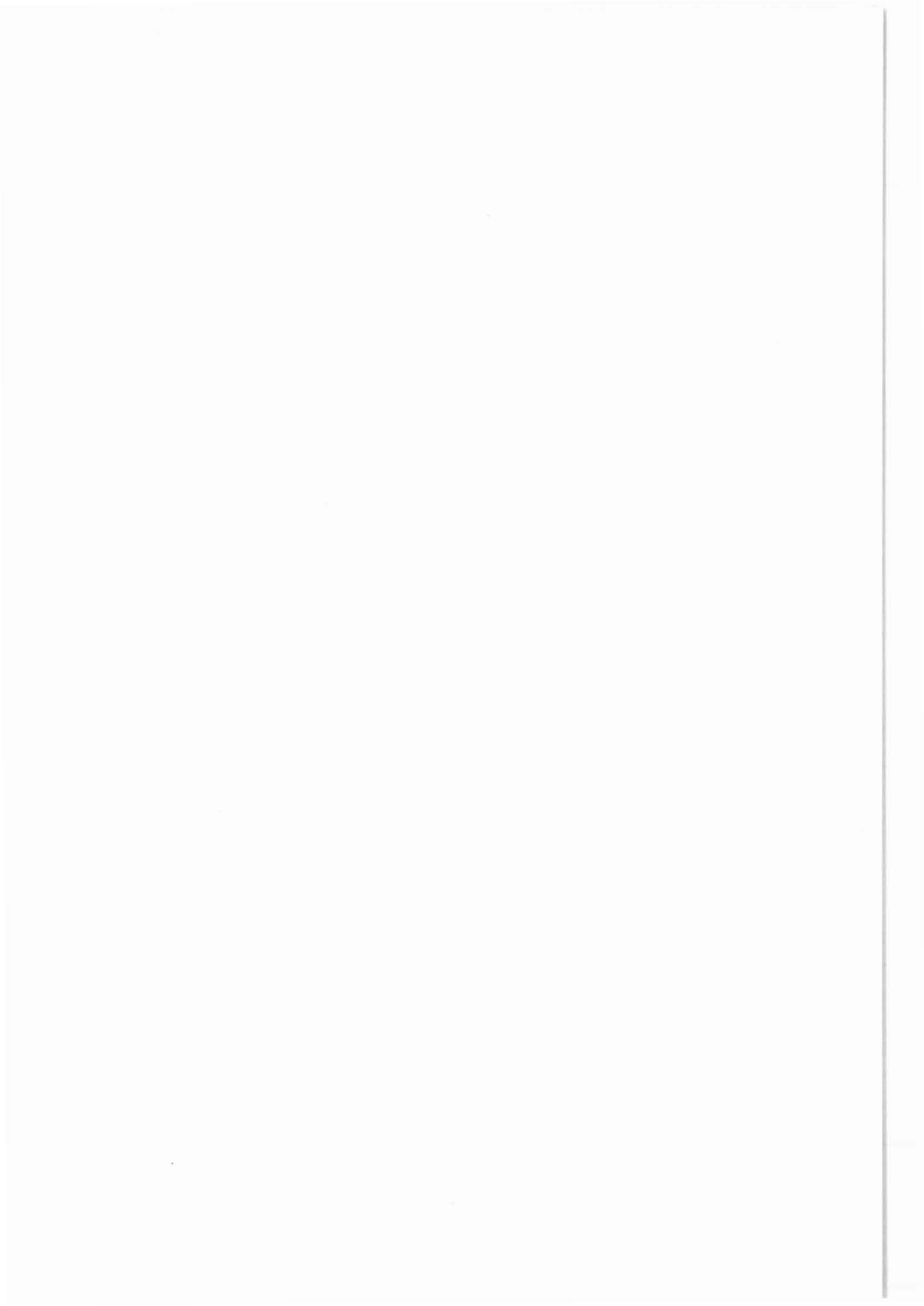


* Ruhr-Universität Bochum, Inst. f. Geophysik
4630 Bochum

** Ruhr-Universität Bochum, Inst. f. Geophysik
MeSy GmbH
Meesmannstr. 49
4630 Bochum

In Situ Permeability Measurements in the KTB Pilot Hole VB
Using a Wireline-Operated
Hydraulic Fracturing Straddle Packer Assembly

J. Baumgärtner *
F. Rummel**



**In Situ Permeability Measurements in the KTB Pilot Hole VB
Using a Wireline-Operated
Hydraulic Fracturing Straddle Packer Assembly**

J. Baumgärtner *) and F. Rummel **)

Abstract

A series of hydraulic fracturing stress measurements within the KTB project was conducted in the pilot hole VB during February 1990. At two test zones (2010 m, 1270 m) pressure pulse test (test period 5 - 6 minutes) were performed to obtain an estimate of the in situ wall-rock permeability. These experiments were conducted using a wireline operated hydrofrac straddle packer assembly (pack-off length about 1 m). The wireline hydrofrac system is well suited for such tests because it can be considered a stiff hydraulic system due to the very small pressurized fluid volume. Permeability values can be estimated from pressure pulse tests by comparing the measured pressure decay with theoretically derived pressure decay curves. A careful data analysis shows that permeabilities values as derived from these 'short-time' experiments are very low ranging from 2 - 4 μ Darcy at 2010 m to 4 - 6 μ Darcy at a depth of about 1270 m.

Zusammenfassung

Im Februar 1990 wurden in der KTB Vorbohrung VB eine Reihe von Hydraulic Fracturing Spannungsmessungen durchgeführt. Dabei erfolgte in zwei Testzonen (2010 m, 1270 m) eine Abschätzung der Permeabilität des Gesteins an der Bohrlochwandung über so genannte 'Druckstoßversuche'. Bei diesen Experimenten kam eine Hydrofrac-Sonde zum Einsatz, die an einem Bohrlochmeßkabel in die Bohrung abgelassen wird. Dieses Verfahren zeichnet sich durch sein geringes Systemvolumen und die damit verbundene hohe Systemsteifigkeit aus und ist daher auch für Permeabilitätsmessungen gut geeignet. Die Länge der Testabschnitte betrug etwa 1 m. Die Versuche erstreckten sich jeweils über einen Zeitraum von etwa 5 - 6 Minuten. Die Permeabilitätswerte können über einen Vergleich der in situ beobachteten mit theoretisch ermittelten Druckabfallskurven bestimmt werden. Hierbei ergeben sich Permeabilitätswerte, die zwischen 2 - 4 μ Darcy bei 2010 m und 4 - 6 μ Darcy bei ca. 1270 m streuen.

*) Ruhr-Universität Bochum, Inst. für Geophysik, D-4630 Bochum

**) Ruhr-Universität Bochum, Inst. für Geophysik / MeSy GmbH, Meesmannstr. 49, D-4630 Bochum

1. Introduction

Fluid transport properties of the Earth's crust are critical for the understanding of a wide range of phenomena such as the migration of crustal fluids, de-gassing of the mantle or deep hydrothermal circulation related to ore genesis. In situ measurements of rock mass permeability in deep boreholes are an indispensable tool gathering the data base necessary for the development of appropriate models of fluid transport in the lower crust. The hydraulic fracturing technique for stress measurements offers a unique possibility to collect permeability data from definite, carefully packed-off test zones at no additional costs. However, permeability measurements require a testing apparatus capable of recording even very small fluid exchanges between the hydraulic test system and the rock mass. This goal can be achieved through a very stiff hydraulic test system. At the KTB site permeability measurements were performed using a wireline operated hydraulic fracturing system. Thin flexible steel tubing injection lines (I.D. 6mm) plus the fairly short test section of about 1 m guarantee in this construction a very stiff hydraulic system, even at great depths. Unfortunately, wireline hydrofrac testing had to be given up after the wireline tool got stuck in the hole due to a damaged packer element. The test program was then continued using a conventional string operated straddle packer assembly. Permeability tests remained limited to the wireline test period because a suitable downhole shut-in valve was not available. Such a valve is required in a conventional tubing operated hydrofrac system to achieve the system stiffness necessary for permeability measurements.

2. Apparatus and Testing Procedure

To conduct permeability and stress measurements in boreholes the Institute of Geophysics at the Ruhr-University in Bochum began in 1973 the development of a wireline hydrofracturing packer assembly which should render fast and relatively inexpensive borehole measurements without the need for standby of a drill rig [1]. Since 1985, the further development and implementation of this concept for deep boreholes was carried out by MeSy GmbH in Bochum. For the hot dry rock research at Soultz sous Forets a wireline-based system for measurements down to 5000 m was developed.

The main components of this system are shown in Fig. 1. It can be seen that the straddle packer unit is tripped into the borehole on a seven conductor logging cable. The packer elements and the test chamber are pressurized via a flexible steel tubing (I.D. 6 mm) which is clamped to the logging cable at 30 m intervals. The straddle packer assembly consists mainly of two about 1 m long inflatable packer elements with an injection adaptor piece in between. A precision push-pull valve mounted on top of the straddle packer assembly allows to switch from packer pressurization to injection into the test interval, and the reverse, by simply releasing or pulling the logging cable. For the tests at the KTB site a test section of about 1 m length was prepared. The fluid volume incorporated in the hydraulic system described here is less than 30 liters per 1000 m depth. The injection fluid used during wireline testing was water mixed with antifreeze to prevent freezing in the pressure lines on surface. A remote controlled hydraulic driven URACA plunger pump system was installed on surface which could yield injection pressures of up to 50 MPa at a maximum injection rate of 9 l/min. Integrated amplifier pressure gages are mounted downhole on top of the straddle packer assembly inside a transducer housing with a dewar bottle and two heat sinks. Surface and downhole pressures, pumping rate and back flow from the test zone are recorded on a strip chart recorder and are digitally stored (2 Hz per channel) on a hard disk.

The testing procedure for permeability measurements begins immediately after packers are set by rapidly pressurizing the test interval to about 3 - 6 MPa above hydrostatic. After the pump has been shut-off, the following pressure drop in the closed system is recorded over a period of about 5 - 6 minutes. Then, before hydrofracturing starts, the hydraulic systems is completely vented.

3. Permeability Data Analysis

The analysis of the observed pressure decay curves follows the theoretical treatment suggested by Cooper et al. [2] for slug tests. The procedure is described in detail by Heuser [3]. For easier analysis Rummel et al. [4] have presented a collection of theoretical pressure decay curves adapted for the typical wireline hydrofrac set up and computed for a variety of parameter sets which for instance include system stiffness, storage

coefficient, pressure level and rock permeability. Permeability values can now be determined by simply comparing the observed pressure decay curve with different model curves.

It should be noted here, that due to the fact that the analysis described above is based on the equation of diffusion for an isotropic and homogeneous material,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{1}{\kappa} * \frac{\partial p}{\partial t} = 0$$

p: fluid pressure within the pore volume (function of distance r and time t)

κ : diffusivity

the rock present in the selected test interval is simplified as a uniformly permeable rock mass - although in reality the fluid leak-off in crystalline rocks occurs along distinct cracks in the rock mass.

4. Results

As already mentioned above, only two permeability measurements could be performed in the VB borehole because wireline hydrofrac testing had to be given up after the wireline tool got stuck in the hole due to a damaged packer element. The recorded pressure decay curves are shown in Fig. 2 a,b. The test depths as measured during wireline hydrofrac testing are 1270 m and 2010 m (center of test interval). A post-hydrofrac FMS log showed that the test called 1270 m was probably performed a bit deeper, around 1277 m (the FMS log also showed some depth uncertainty !). A depth measuring error in our system may have encountered while the already damaged packer was dragged up-hole from 2010 m. Therefore, the test at 1270 m / 1277 m was performed in amphibolite while the test at 2010m was conducted in gneiss. The results of the permeability analyses are summarized below in Tab. 1. It can be seen that the test at about 1270 m shows a somewhat lower system stiffness compared to the test at 2010 m. This is probably caused by a small amount of air trapped in the hydraulic

system. The permeability values derived are extremely low and demonstrate that basically no difference exists between amphibolite and gneiss in our test zones.

Tab. 1: Results of permeability measurements in the KTB-VB borehole using a wireline hydrofrac straddle packer assembly

Depth	$\Delta V/\Delta P$	α	T_m	κ	comment
m	cm ³ /MPa	-	sec.	μDarcy	
~ 1270	60	90	3000 - ~ 5000	4 - 6	hydr. tensile strength about 3.4 MPa
2010	40	90	3000	2 - 4	hydr. tensile strength in the order of 20 MPa

symbols:

- K: permeability
- $\Delta V/\Delta P$: inverse system stiffness
- α : storage coefficient
- T_m : time factor, necessary for the comparison of standardized pressure decay curves

5 Acknowledgement

The proposal of hydrofrac permeability and stress measurements was always strongly supported by the KTB working group "Stress and Borehole Stability". Great interest in the proposal was shown by the project coordinators, particularly by R. Emmermann and P. Giese. Encouragement for the conduction of our work came also from the KTB tproject management in Hannover, particularly from J.K. Draxler, B. Engesser, W. Kessels, and from H. Rischmüller.

K. Bram from the KTB management in Hannover provided essential support throughout the field test stage of our experiments.

During the test period at the KTB site C. Chur and L. Wohlgemut from the KTB management at the Feldlabor, as well as the responsible on-site personnel of the drilling and logging companies showed great understanding for problems occuring and enthusiastically helped to overcome them.

Major technical support came from TAM International in Houston and Aberdeen and also from Christensen in Celle. We particularly would like to thank Stephen Scott from TAM in Aberdeen for his engagement.

The preparation of the hydrofrac tools, the conduction of the in situ tests and the data monitoring was carried out by MeSy geophysicists and engineers (O. Befeld, P. Hegemann, H. Konietzky, K. Moltke, R. Weckheuer [test preparation] and H. Vogt). The conduction of the in situ experiments required a 24 hours engagement of the whole team over a period of about 3 weeks, in addition to the engagement during the preparation phase and field trials at the Urach borehole.

The project was funded both by the German Science Foundation (DFG) under project number Ru - 225/10/1-3 and by KTB under contract no. 2-911635. The preconditions for the development of the 5000 m wireline hydrofrac system were established by the BMFT/EC contracts No. EN3G-0055-D(B) - Suppl. No. 2, BMFT No. 032-E-6425 C - 032-E-6425 C9 for the geothermal HDR project at Soultz sous Forets.

The Ruhr-University in Bochum provided all the infrastructure for the preparation, conduction and data evaluation of the permeability and stress measurements.

6 Literature

- [1] Baumgärtner J., Rummel F. and Chu Zhaotan (1987): Wireline Hydraulic Fracturing Stress Measurements in the Falkenberg Granite Massif, in: Geol. Jb., E39, p. 83 - 99
- [2] Cooper H.H. Jr., Bredehoeft J.D. and Papadopolous I.S. (1967): Response of a Finite Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water, Water Resources Research, vol. 3, p. 263 - 269
- [3] Heuser U. (1982): Das Druckstoßtestverfahren zur Bestimmung der Gebirgspermeabilität in Bohrungen, dargestellt am Beispiel von Permeabilitätsmessungen im Eisenerzbergwerk Konrad/Salzgitter und in der IRDP-Forschungsbohrung in Ostisland, Diplomarbeit, Institut für Geophysik, Ruhr-Universität Bochum
- [4] Rummel F., Alheid H.J. und Heuser U. (1980): Modellkurvenatlas für die Auswertung von Druckabfallkurven zur Permeabilitätsbestimmung in Bohrungen, Bericht 7084404 zu Ru 80/2, BMFT Vorhaben ET 4150A, Inst. für Geophysik, RU Bochum

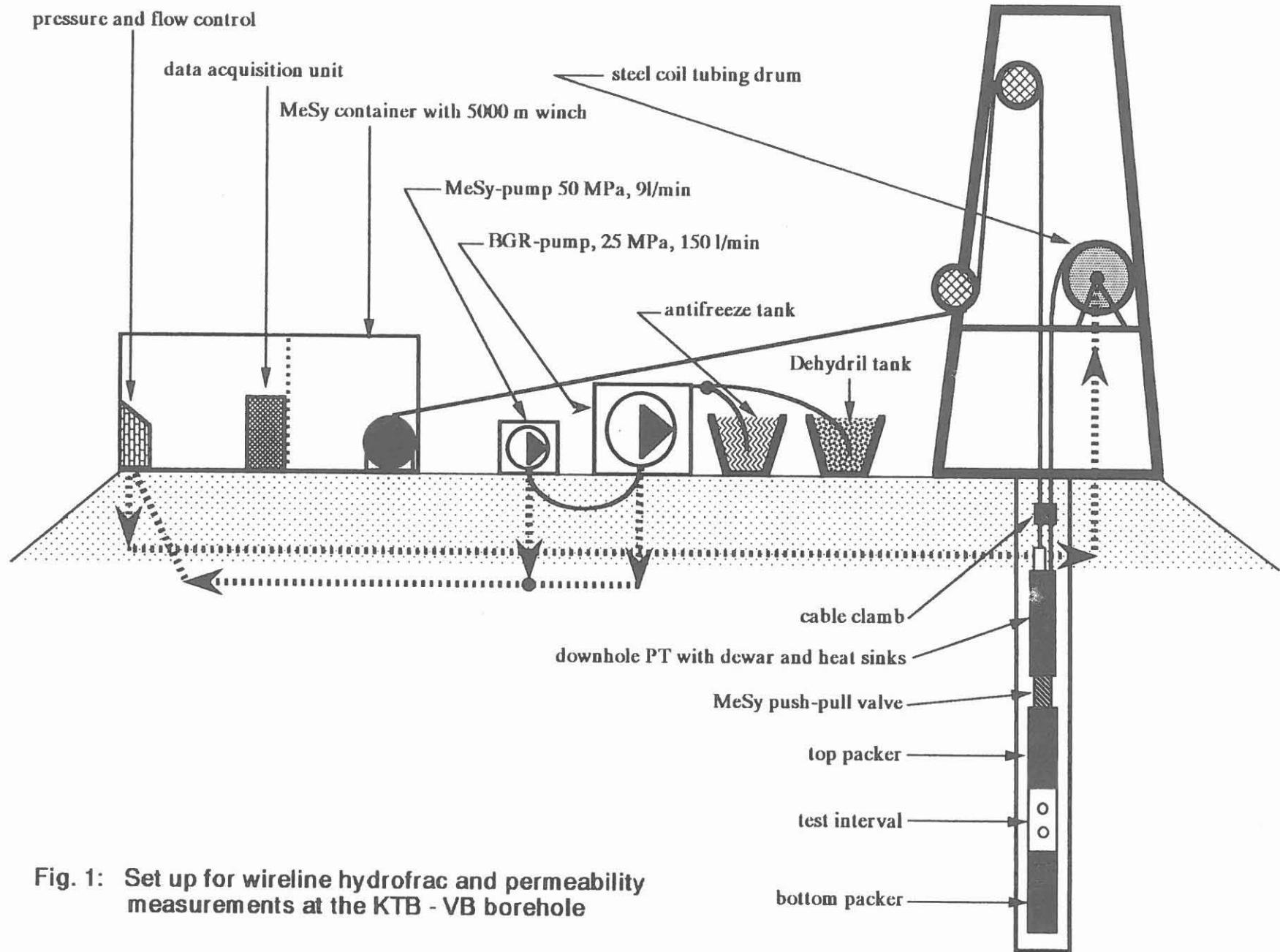


Fig. 1: Set up for wireline hydrofrac and permeability measurements at the KTB - VB borehole

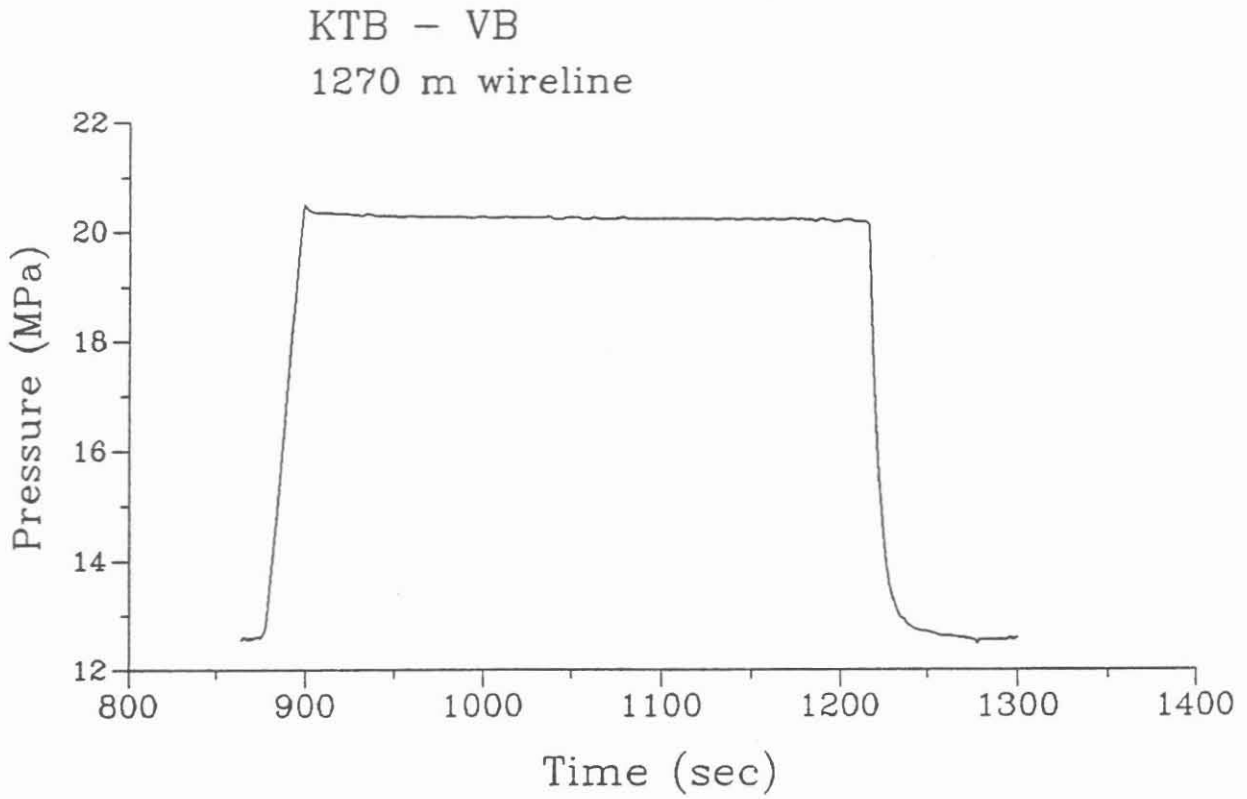


Fig 2a:

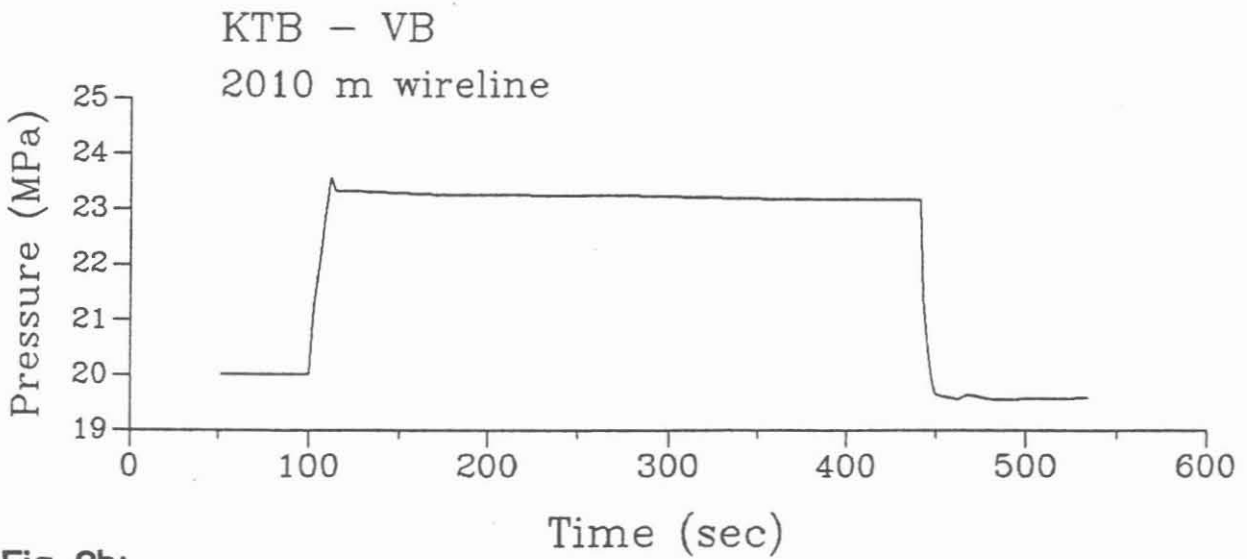


Fig. 2b:

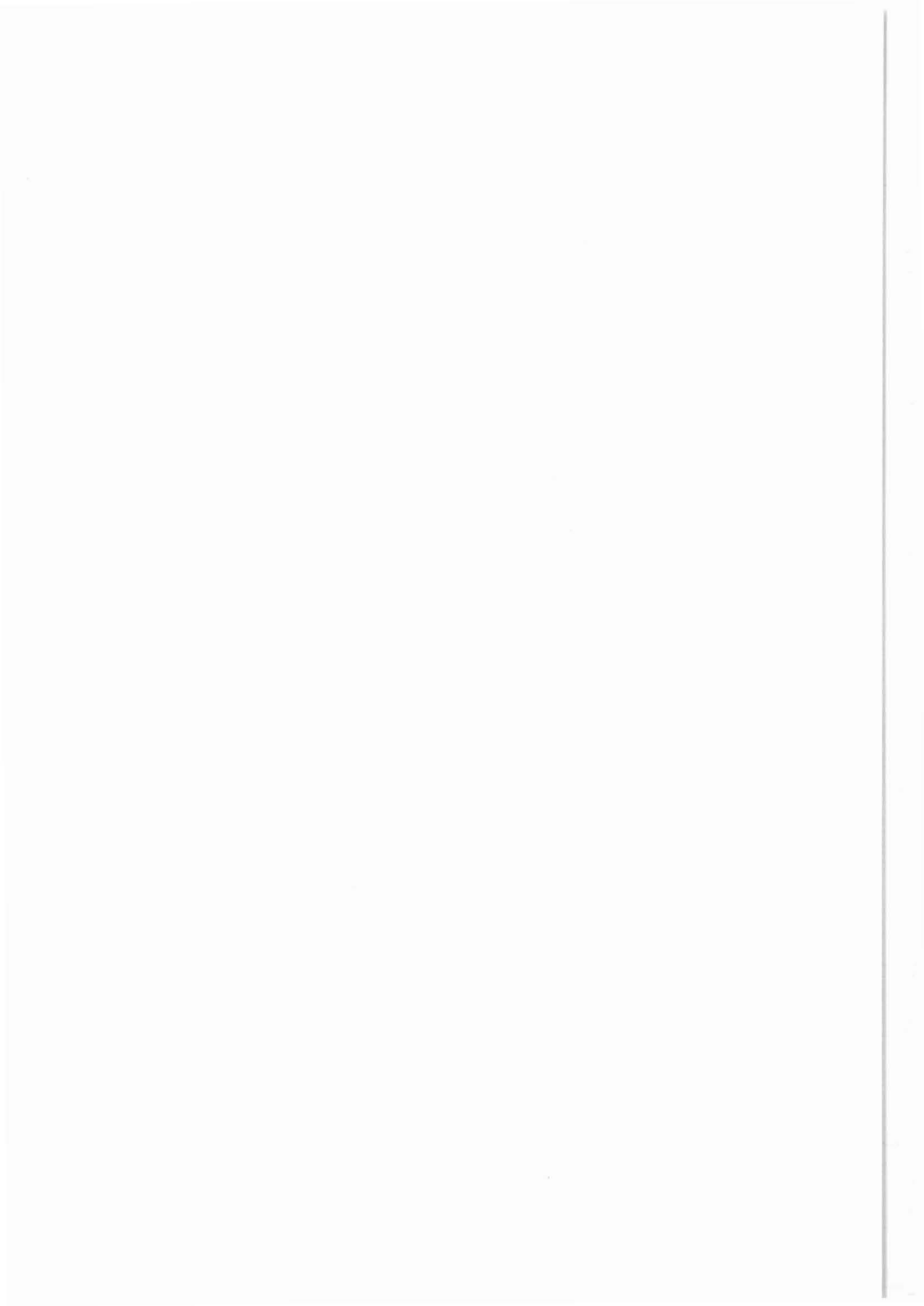
Fig. 2: Pressure decay curves recorded at 2010 m and at 1270 m depth in the KTB - VB borehole

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Projektgruppe KTB

Stilleweg 2
3000 Hannover 51

Abschätzung der beim Pumpptest in der KTB-Obepfalz VB
zu erwartenden Zuflußmengen anhand der Ergebnisse des
Absenktestes

W. Kessels
G. Zinner



ABSCHÄTZUNG DER BEIM PUMPTEST IN DER KTB-OBERPFALZ VB ZU ERWARTENDEN ZUFLUSSMENGEN ANHAND DER ERGEBNISSE DES ABSENKTESTES

Kessels, W., Zinner, G.

ZUSAMMENFASSUNG

Beim Pumptest zur Untersuchung des untersten Bohrlochabschnittes 7. - 11. April 1990 sollte eine Downhole-Moineau-Pumpe zum Einsatz kommen. Für den Einsatz dieser Pumpe war dabei von besonderer Bedeutung, daß die Förderrate so gewählt wurde, daß ein Trockenlaufen der Pumpe durch eine zu starke Druckabsenkung im Bohrloch ausgeschlossen werden konnte. Nach Durchführung des Hydrauliktestes HT 1 wurde anhand dieser Ergebnisse eine erneute Auswertung des Absenktestes vorgenommen. Diese hatte eine bessere Bestimmung der hydraulischen Parameter für den Bohrlochabschnitt von 3850 m bis Endteufe 4000,1 m zum Ziel.

Die so ermittelten Parameter dienten als Grundlage für eine Modellrechnung des zeitabhängigen Druckverlaufes in der Bohrung für verschiedene Förderraten. So konnte die Förderrate optimal an die Installationstiefe der Pumpe angepaßt werden. Die Berechnungen wurden mit einem Finiten-Differenzen-Programm durchgeführt.

SUMMARY

The pump test for the investigation of the borehole interval 3850 m - 4000 m, which ran from April 7th to April 11th 1990, should be carried out with a downhole moineau pump. It was important for the application of this pump to choose the flow rate in such a way that the pump couldn't run dry due to a reduction of pressure in the borehole. Considering the results of the hydraulic test HT 1 in spring 1990, a new interpretation of the drawdown test was possible. This interpretation was useful for a better determination of the hydraulic parameters in the borehole interval 3850 m - 4000,1 m.

The calculated parameters served as a basis for a modelling of the time dependent pressure curves in the well for different production rates. By that, the flow rate could be optimized to the depth of the pump. The calculations were carried out with a FD programme.

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

1.0 Einleitung

Nach dem Einbringen und der Zementation der Verrohrung in der KTB-VB bis in eine Teufe von 3850 m wurde ein Pumptest durchgeführt. Er hatte die folgenden Zielsetzungen:

- Ermittlung der hydraulischen Reservoirparameter für das im Bohrlochtiefsten angetroffene Kluftsystem.
- Gewinnung eines möglichst großen Volumens wenig kontaminierter Formationsfluide.

Zur Realisierung letztgenannter Zielsetzung war es nötig, die Pumpenleistung so groß als technisch möglich zu wählen. Verhindert werden mußte allerdings ein Trockenlaufen des Pumpensystems, das auftritt, wenn die Förderleistung der Pumpe größer als der Zufluß aus dem Gebirge ist.

Eine stufenweise Heraufsetzung der Pumpenleistung zur Abschätzung der maximalen möglichen Förderrate beim Pumpversuch sollte möglichst ausgeschlossen werden, um hydraulisch gut auswertbare Druckdaten zu erhalten. Die Pumpenleistung mußte also gleich zu Beginn des Pumptestes möglichst optimal eingestellt werden.

Zur Vorausabschätzung der hydraulischen Produktivität des untersten Bohrlochabschnittes standen nur die beim Absenkttest gewonnenen Meßdaten zur Verfügung. In diesem Test wurde festgestellt, daß wesentliche Zuflüsse nur in den Bohrlochabschnitten oberhalb 800 m und im Bohrlochtiefsten erfolgten. Da nach Durchführung des hydraulischen Testes im obersten Bohrlochabschnitt die hydraulischen Parameter dieses Abschnittes bekannt waren (Ostrowski, 1990), konnte eine Auswertung des Absenkttestes erfolgen, in die beide Reservoirs rechnerisch mit einbezogen wurden. Die Berechnungen erfolgten

durch ein modifiziertes Finiten-Differenzen-Programm von Muth und Kessels (1984), mit dem eine instationäre Berechnung der Druckdiffusionsgleichung möglich ist.

In der Auswertung wurden alle Zuflußbereiche im Bohrlochabschnitt von 800 m - 3850 m vernachlässigt. Die Zuflüsse aus den Horizonten 410 m - 800 m und 3850 m - 4000 m wurden dann von Zeitschritt zu Zeitschritt gekoppelt berechnet. Da die hydraulischen Parameter des oberen Zuflußhorizontes bekannt waren, konnten die hydraulischen Parameter des unteren Horizontes bestmöglich an den Spülungsspiegelanstieg beim Absenkttest angepaßt werden (Matching). Angepaßt wurden dabei sowohl die rechnerische Permeabilität als auch der Skinfaktor. Das Matching selbst erfolgte automatisch durch einen iterativen Prozeß.

2.0 Kontrollauswertung des Testes HT 1

Im ersten Bearbeitungsschritt wurde mit dem FD-Auswertungsprogramm der Test HT 1 im Teufenabschnitt 480 m - 800 m ausgewertet und die Ergebnisse mit den Auswerteergebnissen von Ostrowski (1990) verglichen. Mit dieser Vergleichsrechnung sollte das modifizierte FD-Programm anhand des erprobten analytischen Programmes überprüft werden. Hierbei konnte selbstverständlich nicht davon ausgegangen werden, daß das numerische Programm bei dem z. B. der Skin räumlich simuliert wird, exakt die gleichen Ergebnisse liefern würde wie das analytische Auswertungsprogramm, bei dem mit einem infinitesimalen Skin gerechnet wird.

Es zeigte sich, daß sich im Vergleich zu den Ergebnissen von Ostrowski (1990) eine kleine Differenz ergab, die nach mündlicher Rücksprache durch den in diesem Test auftretenden

negativen Skin zu erklären ist, der mit den Besselfunktionen des Auswerteprogrammes von ITA/Lines nur sehr schwer erfaßt werden kann.

Die Modellparameter und das Ergebnis des Matchings sind für die beiden Rechnungen in Tabelle 1 gegenübergestellt. Hierbei sind

- k = Permeabilität in größerer Entfernung von der Bohrung
- ks = Permeabilität des Skin-Bereiches
- rs = Radius des Skin-Bereiches
- s = Infinitesimaler Skin-Faktor berechnet aus den vorstehenden Größen
- po = Anfangsdruckdifferenz zum Reservoirdruck
- rw = Bohrlochradius
- S = Speicherkoeffizient des Gesteins
- η = Viskosität
- ρ = Dichte

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Auswerteergebnisse des Tests von 480 - 800 m mit analytischer Rechnung (ITA/Lines)

	<u>numerisch</u>	<u>analytisch</u>
k [m ²]	2.05e-17	1.4e-17
ks [m ²]	7.00e-11	-
rs [m]	0.17	-
s [-]	-0.805	-0.8
PO [MPa]	4.56	4.2
rw [m]	0.076	0.076
S [1/Pa]	4.4e-12	4.4e-12
η [Pas]	0.8e-3	0.8e-3
ρ [kg/m ³]	1010	1010

Für die nachfolgende Simulation des Absenktestes mit dem FD-Programm wurden die Ergebnisse des numerischen Matchings weiterbenutzt.

3. Auswertung des Absenktestes mit Hilfe des FD-Programms

Basis für die im folgenden beschriebenen Rechnungen war der bei Kessels et al. (1990) beschriebene Ablauf des Absenktestes.

Für die Auswertung mit dem FD-Programm wurde in der Rechnung von den beschriebenen 2 Reservoiren ausgegangen. Im obersten Reservoir wurden die vorstehend aufgeführten Parameter angesetzt. In der Simulation ist das Ziehen des Gestänges, mit dem die Absenkung erzeugt wurde, als Konstantratentest nachvollzogen. Die nachfolgende Anstiegsphase wurde als Slug-Test simuliert. Das Matching erfolgte durch Anpassung der berechneten Druckwerte an den mit Hilfe des Loggings beobachteten Spülungsspiegelanstieges. Variiert wurden die Parameter k , k_s , r_s und s .

Als Ergebnis ergab sich, daß eine gute Anpassung nur mit einem sehr starken positiven Skin zu erklären ist, wie dies schon bei Kessels, Zoth, Kück (1989) dargestellt war. Folgende Parameter resultieren für die beste Anpassung.

Tabelle 2: Beste Anpassung für den unteren Zuflußbereich berechnet aus den Ergebnissen des Absenktestes

Parameter für beste Anpassung (unterer Zuflußbereich).

k [m^2]	5e-16	S [l/Pa]	4.4e-12
k_s [m^2]	5.55e-17	η [Pas]	0.23e-3
r_s [m]	1.07	P_0 [MPa]	0
s [-]	21.1	r_w [m]	0.076

Das Ziehen des Gestänges wurde mit einer Geschwindigkeit von 7,77 m/min (2800 m in 6h) in die Rechnung einbezogen. Die Parameter im oberen Bereich blieben entsprechend Tabelle 1

unverändert. Um die Wirkung der Variation der einzelnen Parameter aufzuzeigen, sind in den folgenden Abbildungen entsprechende Vergleichsrechnungen dargestellt.

In Abbildung 1 ist der Differenzdruck zum Spülungssäulendruck in Abhängigkeit von der Zeit für die beste Anpassung aufgezeichnet. Mit eingezeichnet sind die Druckverläufe, die man erhält, wenn man die Permeabilität außerhalb des Skin-Bereiches variiert wird.

In Abbildung 2 ist eine Anpassung ohne Einbeziehung eines Skin's dargestellt. Die zwei Kurven kennzeichnen die beste Anpassung für die ersten beiden bzw. den letzten Meßpunkt. Man sieht hier, daß ohne Skin eine Anpassung nicht gelungen ist.

In Abbildung 3 ist neben der besten Anpassung aufgezeichnet, welche Druckverläufe sich ergeben, wenn die Skin-Permeabilität verändert wird. Dabei wurde die Permeabilität außerhalb des Skinbereiches konstant gelassen.

Eine Überprüfung des Berechnungsergebnisses ergibt sich, wenn das während der Simulation im unteren Bohrlochabschnitt zugeflossene Fluid-Volumen berechnet und dieses Volumen dem an der Leitfähigkeitsanomalie gemessenen Zuflußvolumen gegenübergestellt wird. In Abb. 4 sieht man, daß das berechnete Volumen ca. 10 - 20% über dem gemessenen liegt. Hieraus ist zu schließen, daß außer dem unteren Bereich über die Bohrung verteilt (von 800 m - 3850 m) noch andere Zuflußbereiche vorhanden sein müssen, die in der Größenordnung von 10 - 20% des unteren Zuflusses liegen. Für eine Simulation des beim Pumpstest zu erwartenden Druckverlaufes kann daher die Permeabilität des unteren Bereiches entsprechend um 10 - 20% niedriger angesetzt werden, als es durch das Matching für die 2 Reservoirs gefunden wurde. Dies ist allerdings nur eine

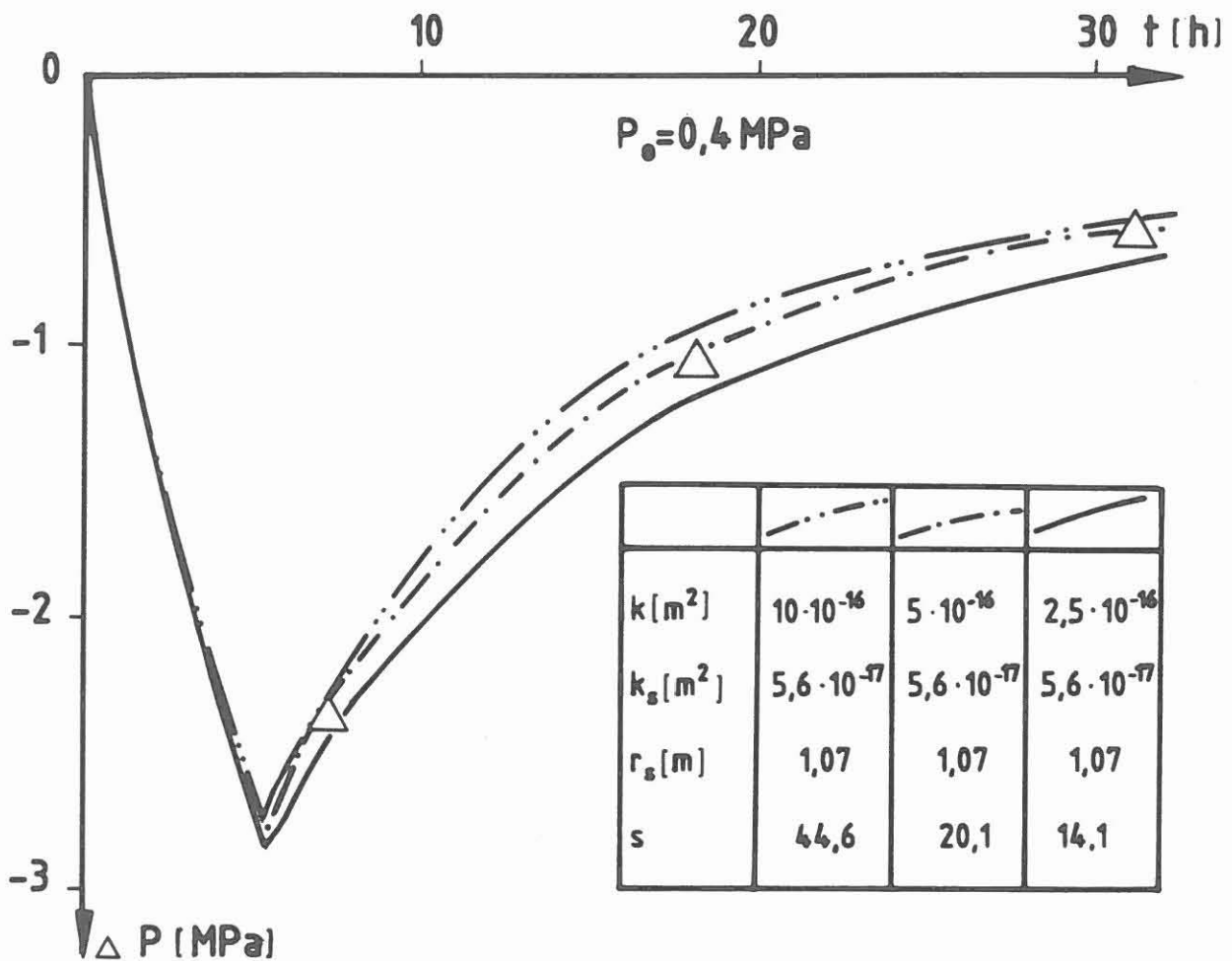


Abbildung 1: Die beste Anpassung für das unterste Reservoir aus den Spülungsspiegelhöhen des Absenktestes. Zwei weitere Druckkurven zeigen, wie empfindlich eine Änderung in der permeabilität im Außenbereich sich im Druckverlauf widerspiegelt.

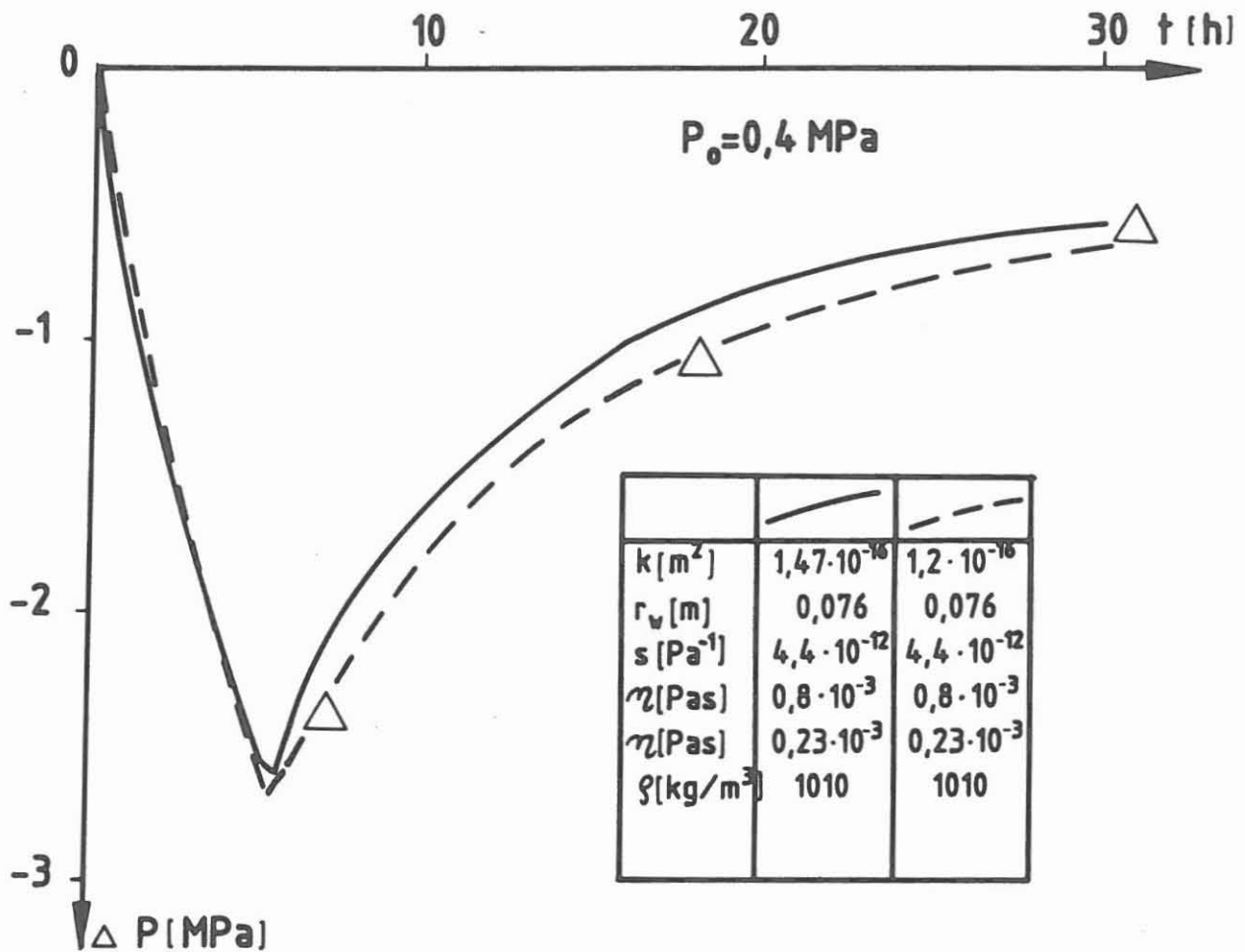


Abbildung 2: Die beste Anpassung bei Vernachlässigung des Skin-Effektes.

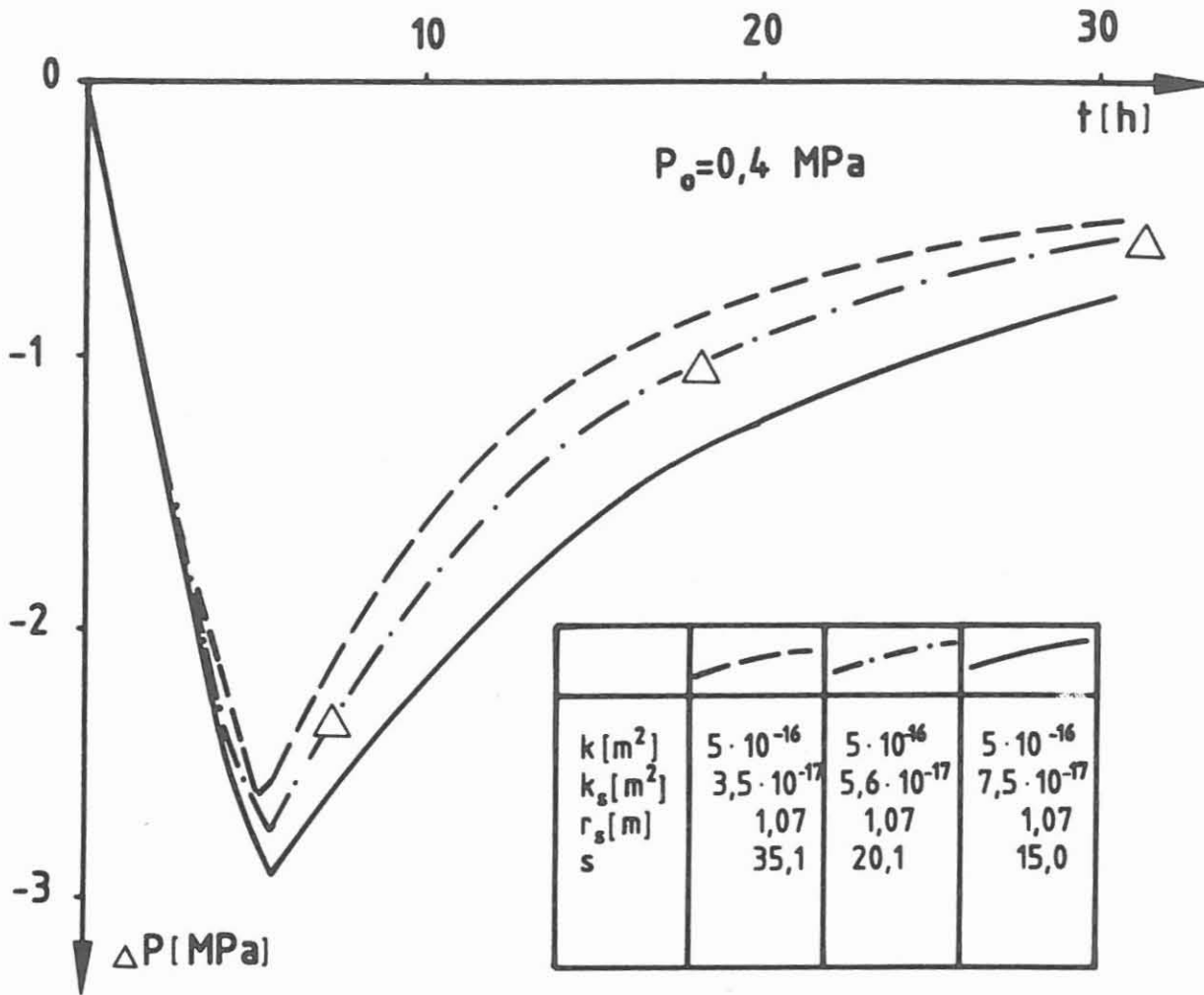


Abbildung 3: Änderung der Druckkurven bei Änderung der Skin-Permeabilität.

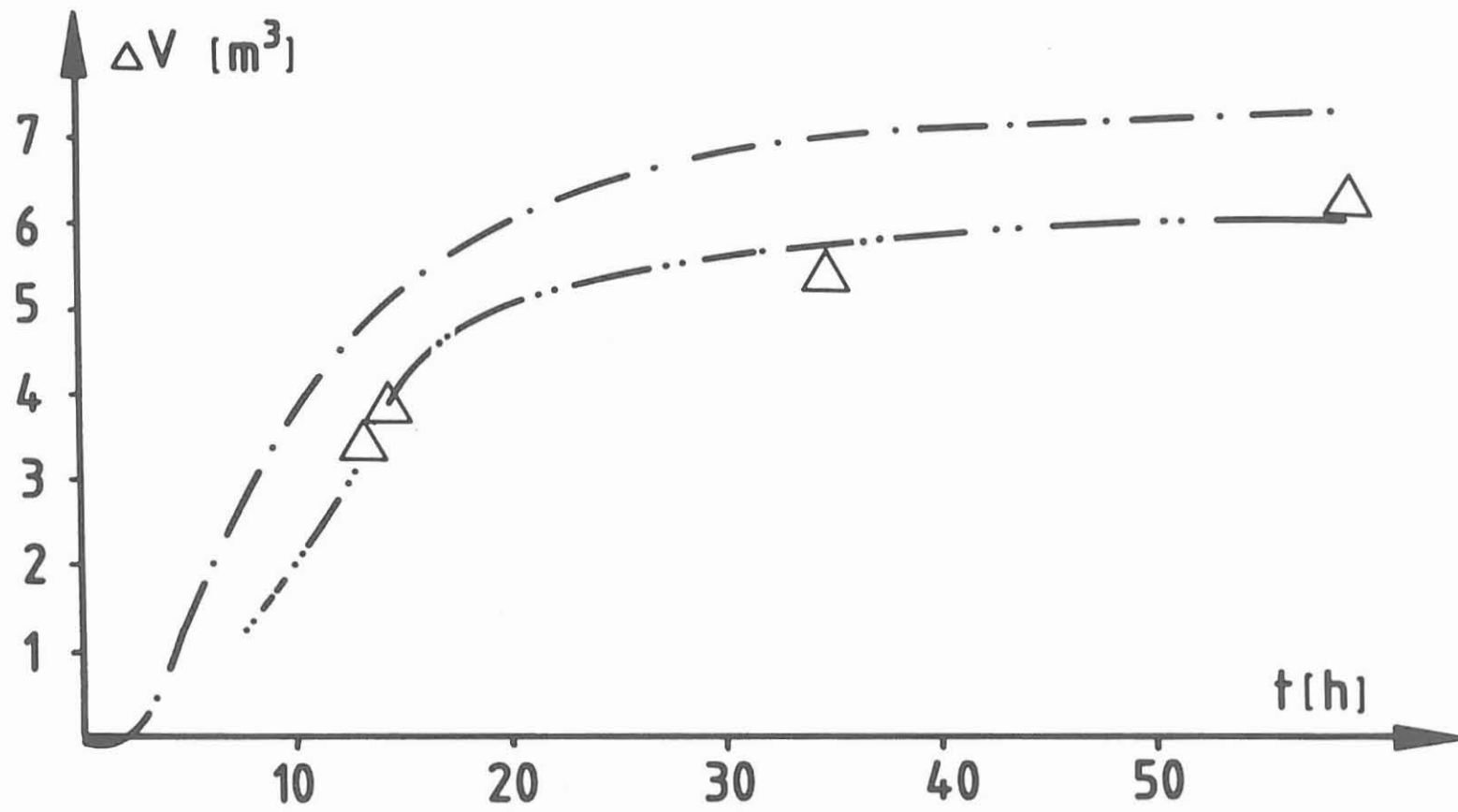


Abbildung 4: Vergleich der berechtigten Zuflußvoluminar zu den gemessenen Zuflußvoluminar im Absenkttest, bestimmt durch die Spülungsleitfähigkeitsanomalie im unteren Bereich der Bohrung.

grobe Annäherung, die von einer Additivität der Transmissibilitäten ausgeht.

Der vor dem Pumpversuch durchgeführte Slug-Test ergab eine gute Übereinstimmung mit den hier vorgestellten Ergebnissen des Absenktestes für den Bereich von 3850 m bis 4000m (Ostrowski, 1990).

2. Berechnung des Pumptestes

Mit der um 20% reduzierten Permeabilität als beste Anpassung wurde dann die Vorausberechnung des Druckverlaufes beim Pumptest durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 5 dargestellt. Selbst bei einer Pumprate von 18 l/min war nicht zu erwarten, daß die maximale Absenkung von 1000 m erreicht wurde. Entsprechend zu diesem Ergebnis konnte also die Empfehlung ausgesprochen werden, daß der Fördertest von vornherein mit maximaler Pumprate gefahren werden kann. Eine Überprüfung des hier berechneten Druckverlaufes bei dem dann durchgeführten Pumptest konnte nicht erfolgen, da der Drucksensor kurz nach Beginn des Pumpens ausfiel. Außerdem wurde der Packer aus technischen Gründen, nicht wie bei dieser Rechnung vorausgesetzt, in einer Teufe von ca. 3850 m gesetzt, sondern in 1100 m Bohrlochteufe. Hierdurch wurde das Flüssigkeitsvolumen im Testintervall vergrößert, so daß bei dem daraus folgenden größeren Wellbore-Storage-Koeffizienten mit einem etwas langsameren Druckaufbau zu rechnen war. Es ist weiter davon auszugehen, daß durch den hohen Gasgehalt der geförderten Formationsflüssigkeit beim Pumpversuch schon unterhalb des Packers eine Entgasung eingesetzt hat, so daß hier das mittlere Flüssigkeitsgewicht kleiner als die Dichte des eingesetzten Frischwassers war. Hierdurch wurde dann der Druck im Testintervall aller Wahrscheinlichkeit nach stärker abgesenkt als in der Rechnung unter Annahme hydrostatischer Verhältnisse vorausgesetzt war.

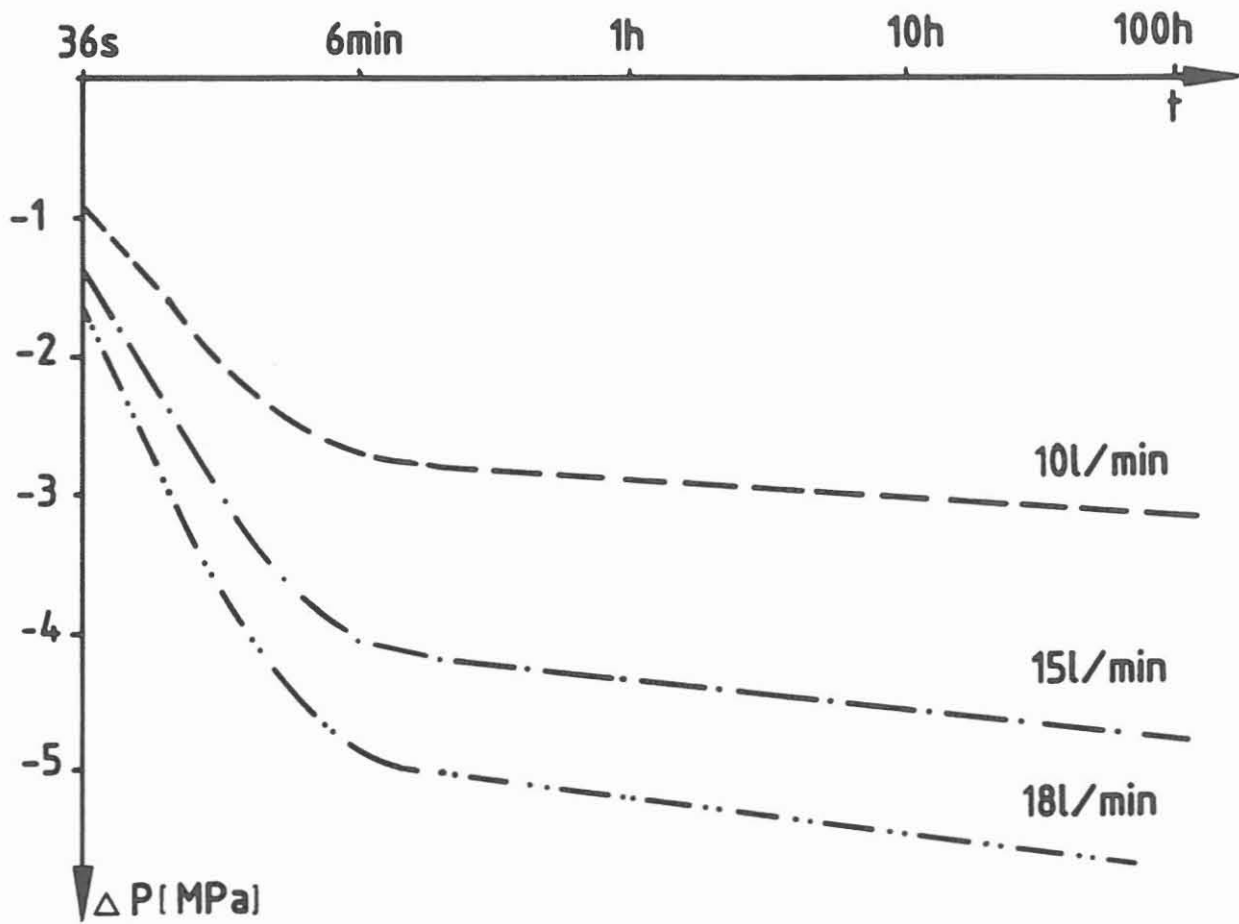


Abbildung 5: Berechneter Druckverlauf für den durchzuführenden Pumptest für 3 verschiedene Pumpraten.

Für eine Abschätzung der Reservoirausdehnung ist der in Abb. 6 dargestellte Druckverlauf im Porenraum des Gebirges instruktiv. Die Reichweite der beim Pumpstest erzeugten Druckstörung liegt nach dieser Rechnung in einer Größenordnung von mehr als 100 m. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Reservoiremächtigkeit mit ca. 150 m festgelegt wurde. Ist die wirkliche Reservoiremächtigkeit wesentlich kleiner, ergibt sich eine entsprechend erhöhte Reichweite. Außerdem kann nicht unbedingt vorausgesetzt werden, daß in der Realität ein radialsymmetrischer hydraulischer Leiter vorliegt.

Abschließend soll hier noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß alle hier genannten hydraulischen Parameter als Rechenparameter anzusehen sind, die dazu dienen sollen, Druckverläufe möglichst gut rechnerisch erfassen zu können. Die hier berechneten Permeabilitäten sind dabei nicht als gesteinsphysikalische Parameter eines homogenen, isotropen, hydraulischen Leiters zu interpretieren, auch wenn die Berechnungen mit diesem Modell durchgeführt wurden. In einem weitgeklüfteten Kristallinbereich ist weder die Mächtigkeit des hydraulischen Horizontes definiert, noch liegt ein homogener hydraulischer Leiter vor.

Eine besondere Aufgabe im Rahmen des KTB-Projektes wird darin bestehen, die ermittelten hydraulischen Permeabilitäten auf hydraulische Parameter eines diskontinuierlichen Kluftleiters zu übertragen.

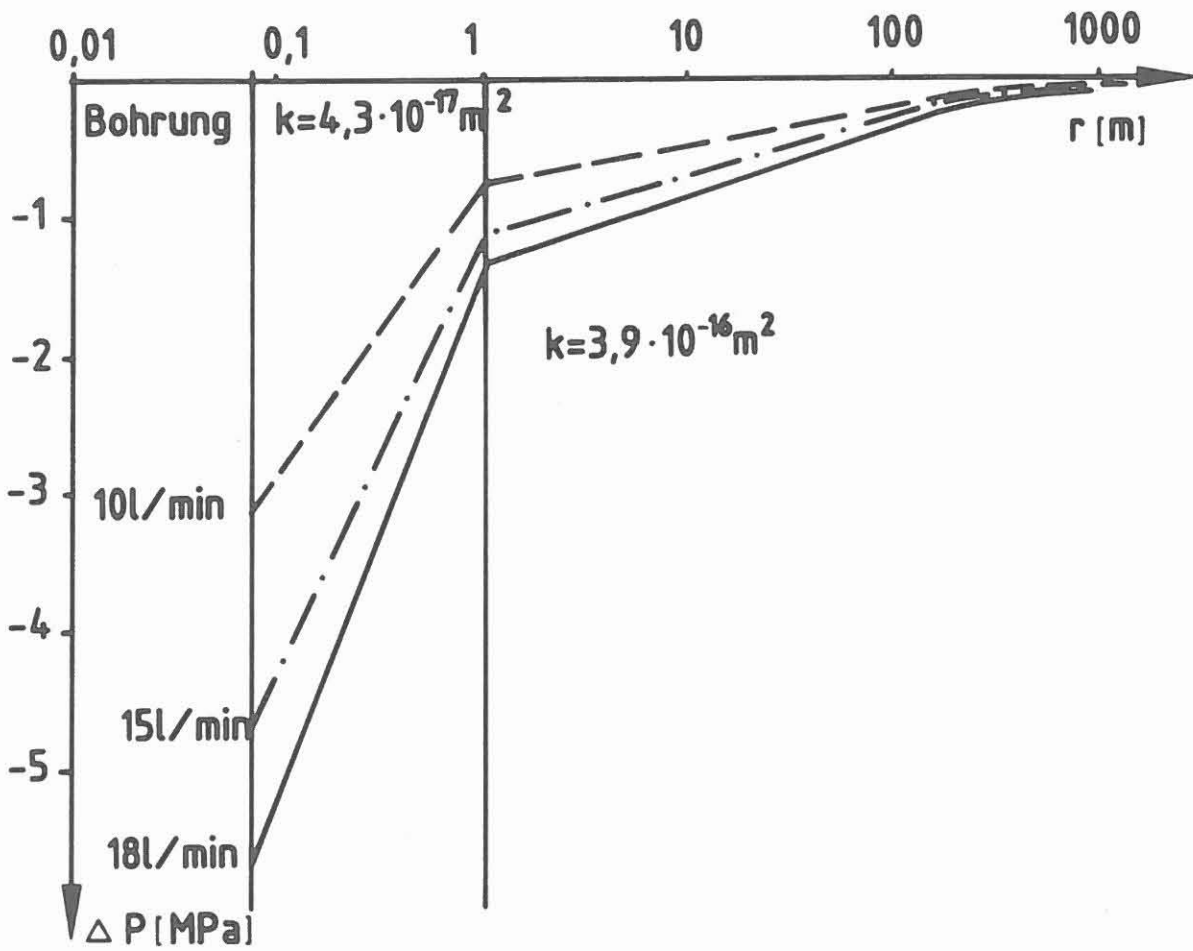
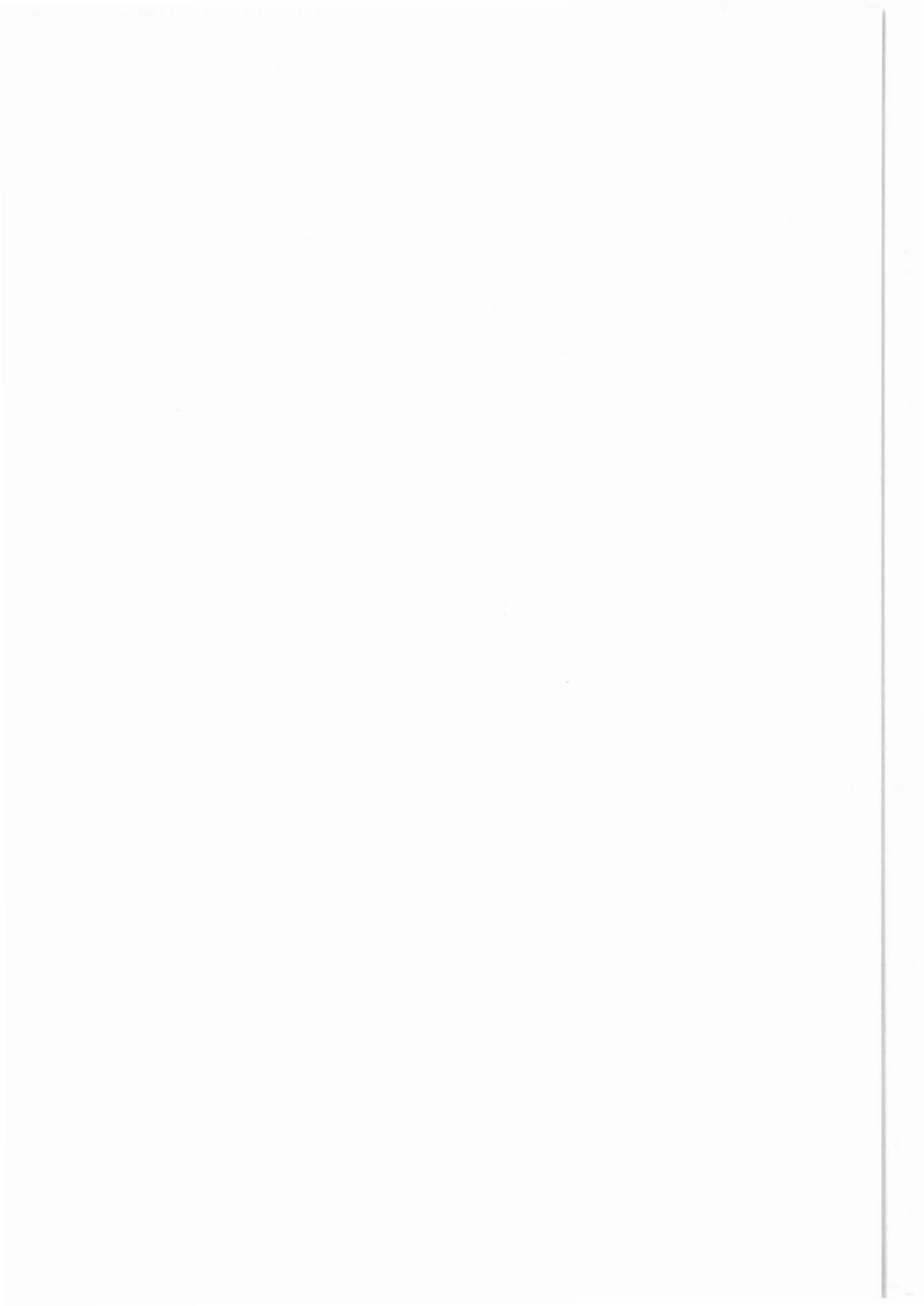


Abbildung 6: Druckverlauf im Gebirge am Ende des Pumptestes.

Institut für Tiefbohrtechnik Erdöl- und Erdgasgewinnung
Abt. Lagerstättentechnik
Technische Universität Clausthal

ITA
Maschweg 9
3100 Celle

Hydraulisches Testprogramm KTB-VB Ergebnisse der Feldauswertungen



HYDRAULISCHES TESTPROGRAMM KTB-VB: ERGEBNISSE DER FELDAUSWERTUNGEN

L. Ostrowski

ZUSAMMENFASSUNG

Das hydraulische Langzeit-Testprogramm in der KTB-Vorbohrung wurde in zwei Phasen vom 27 Februar bis 8 März und vom 2 April bis 12 April 1990 durchgeführt. Während der ersten Phase wurden 3 Zonen (HT1: 478.0-799.6 m, HT2: 2135.0-2190.0 m, HT3: 1373.73-1388.79 m) mittels BAKER/LYNES hydraulischen Test Tool getestet. In der zweiten Phase wurde in dem Bohrlochstiefsten (HT4: 3850.0-4000.1 m) ein Pumpstest durchgeführt. Hierzu wurden ein im Casing gesetzter Packer und eine Moineau-Pumpe eingesetzt. Die Testabläufe wurden in der Zusammenarbeit mit der KTB-Projektleitung geplant und gegebenenfalls vor Ort modifiziert. Die Auswertung der Testergebnisse wurde vor Ort durchgeführt und in Form eines Feldberichtes innerhalb von 24 Stunden nach Beendigung der Tests der KTB-Projektleitung übergeben. Die Feldanalysen ergaben einen Permeabilitätsbereich von $2.3E-17m^2$ bis $5.0E-22m^2$ bei einem negativen Skin zwischen -2.7 und -0.8 für die Kristallinabschnitte in der ersten Testphase (HT1-HT3). Die in dem Bohrlochstiefsten ermittelte Permeabilität lag bei $2.0E-16m^2$ mit einem hohen positiven Skin von 18.4. Da keine zuverlässige Abschätzung der in situ Speicherkapazität möglich war, wurde diese aus den Eingangsparametern errechnet.

Im Folgenden sind die Feldberichte ("Quick-Look Reports") in der Originalfassung zusammengestellt, so wie sie dem Auftraggeber übberreicht wurden. Die "Quick-Look"-Analysen der hydraulischen Verläufe erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr müßten in den weitergehenden Analysen die "Borehole Pressure History"-Effekte berücksichtigt werden, um den Einfluß der Über-, bzw. Unterdrücke, die auf die niedrigstpermeablen Zonen (HT2 und HT3) ausgeübt wurden, in die Analyse einbeziehen zu können.

SUMMARY

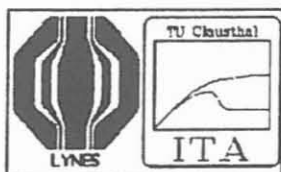
The long term hydraulic test programme in the KTB pilot borehole was performed in two stages from February 27 to March 8, and from April 2 to April 12, 1990. Three intervals (HT1: 478.0-799.6 m, HT2: 2135.0-2190.0 m, HT3: 1373.73-1388.79 m) were tested using BAKER/LYNES Hydraulic Test Tool during the first phase. In the second phase a pump test was conducted in the lowest part of the borehole (HT4: 3850.0-4000.1 m) with a single packer set in casing using a Moineau pump system. The test sequences were designed in cooperation with the KTB management and were modified on site to account for changing test conditions. The preliminary on site analysis were performed during each test sequence and the results compiled in Quick Look Reports were delivered to KTB within 24 hours after completion of the test. Interpreted hydraulic conductivities for the first test phase (HT1-HT3) range from $2.3E-17m^2$ to $5.0E-22m^2$ with negative skin factors between -2.7 and -0.8. The testing of the lowest borehole interval yielded a permeability of $2.0E-16m^2$ with a high positive skin factor of 18.4. Since no reliable in-situ estimation of the specific storage value was possible it was calculated directly from the input parameters.

This report contains the Quick Look Reports issued for the KTB long term hydraulic testing in their original version. The preliminary analyses performed on site should be completed by taking into account the borehole pressure history effects. The test zones were influenced by overpressure and underpressure exerted during borehole operations. These effects are of special importance in the low permeability HT2 and HT3 test intervals.

Anschrift des Autors: Institut für Tiefbohrtechnik Erdöl- und Erdgasgewinnung, Abt. Lagerstättentechnik, Technische Universität Clausthal, ITA, Maschweg 9, 3100 Celle.

Bezeichnung der Abkürzungen

EQB	PRESSURE EQUILIBRATION
INF	PACKER INFLATION
DEF	PACKER DEFLATION
PSR	STATIC PRESSURE RECOVERY
PI	PULSE INJECTION
PW	PULSE WITHDRAWAL
SI	SLUG INJECTION
SIR	PRESSURE RECOVERY AFTER SLUG INJECTION (SHUT IN)
SW	SLUG WITHDRAWAL
SWR	PRESSURE RECOVERY AFTER SLUG WITHDRAWAL (SHUT IN)
RW	CONSTANT RATE WITHDRAWAL
RWS	PRESSURE RECOVERY AFTER CONSTANT RATE WITHDR. (SHUT IN)
RWR	PRESSURE RECOVERY AFTER CONSTANT RATE WITHDR.
RI	CONSTANT RATE INJECTION
RIS	PRESSURE RECOVERY AFTER CONSTANT RATE INJ. (SHUT IN)
RIR	PRESSURE RECOVERY AFTER CONSTANT RATE INJ.
HW	CONSTANT HEAD WITHDRAWAL
HWS	PRESSURE RECOVERY AFTER CONSTANT HEAD WITHDR. (SHUT IN)
HWR	PRESSURE RECOVERY AFTER CONSTANT HEAD WITHDR.
HI	CONSTANT HEAD INJECTION
HIS	PRESSURE RECOVERY AFTER CONSTANT HEAD INJ. (SHUT IN)
HIR	PRESSURE RECOVERY AFTER CONSTANT HEAD INJ.



QUICK LOOK REPORT

BOHRUNG	: KTB VB-1a	ENDTEUFE	: 4000.1 ¹ m
DATUM	: 27.02-1.03.1990	INTERVALL	: HT-1
TOP	: 468.81 m	BTTM	: 799.6 m
ROHRSCUHL	: 478.00 m	SPÜLUNGSDICHTE	: 1010.0 kgm ⁻³
INTERVALLLÄNGE	: 321.60 m	INTERVALLMITTE	: 638.8 m
r _w	: 0.076m	r _a (3.5")	: 0.035m
p ₁ -TEUFE	: 463.88 m	RINGRAUM STAND	: 1.60*m

DOPPEL-PACKER-TEST (BRIDGE PLUG UND SINGLE)

¹) Alle Teufen unter Referenzpunkt (R.P - Tisch), 520.9 m ü. N.N.

²) Ringraum mit Spülung aufgefüllt

VORABINFORMATIONEN

STATISCHER DRUCK (P ₁)	:	4200 kPa, (geschätzt, hydrostatisch)
POROSITÄT	:	0.01 (angenommen)
KOMPRESSIBILITÄT (WASSER)	:	4.40 10 ⁻¹⁰ Pa ⁻¹
TOTALE KOMPRESSIBILITÄT	:	4.40 10 ⁻¹⁰ Pa ⁻¹ (angenommen c _t =c _w)
BOREHOLE HISTORY	:	Der statische Wasserspiegel befindet sich ca. 50-60m unter R.P. Durch den mit Spülung zu Tage aufgefüllten Ringraum wurde das Intervall einem langfristigen Überdruck ausgesetzt
GEOLOGIE	:	feinkörniger, flaseriger Gneis
GEOPHYSIK	:	Das Kaliber Log weist ein um ca. 50% größeres Intervallvolumen auf (9.2m ³) als nach nominalem (6" Durchmesser)

TESTINGENIEUR:

Dr.-Ing. L. Ostrowski

Notice: All interpretations of reports and plots contained herein are opinions based on analytical techniques described in the literature and ITE TU Clausthal cannot and do not guarantee the accuracy or correctness of any interpretations, and ITE TU Clausthal shall not be liable or responsible for any loss, costs, damages, or expenses, incurred or sustained by the customer and or any third party resulting from any interpretations, recommendations and or results made by ITE TU Clausthal or its officers, agents, or employees.

ZUSAMMENFASSUNG DER TESTEREIGNISSE/ERGEBNISSE

EVENT	INF	PSR ²	PW	SW
EL.TIME, [min]	30.6	167.5	354.0	580.8
T ₁ /T _f , [°C]	30.8/30.8	30.8/30.7	30.7/30.6	30.5/30.9
P ₁₁ /P _{1f} [bar]	47.7/48.6	48.6/46.9	4.9/45.0	7.2/31.2
P ₂₁ /P _{2f} [bar]	47.7/48.5	48.5/46.9	7.8/44.9	9.0/31.1
P ₃₁ /P _{3f} [bar]	42.3/42.4	42.4/42.5	42.3/42.5	42.5/41.8
q [m ³ s ⁻¹]	-	-	-	2.7E-05 ⁴
Q [m ³]	-	-	-	0.93
K [ms ⁻¹]	-	-	2.4-6.4E-11	1.7E-10
k [m ²]	-	-	2.0-5.2E-18	1.4E-17
T [m ² m]	-	-	0.6-1.7E-15	4.5E-15
P _s at P ₁ [bar]	-	46.90	-	-
Head(P ₂) [m asl]	-	516.9 ¹	-	-
S [-]	-	-	1.4E-5	1.4E-5
C _D [-]	-	-	5.0E03	5.0E03
s [-]	-	-	-1.2	-0.8
FIGURE(S)	4	4	1a,b,c,d	2a,b,c,
TEMPERATURE EFF.	NO	NO	NO	NO
BH. HIST. EFF.	NO	YES ³	YES ³	NO
BOUNDARY EFF.	NO	NO	NO	NO
ANOMALY	NO	NO	YES ³	YES ³

¹) Freshwater equivalent for (rho)=1000 kgm⁻³, g=9.81 ms⁻², not stabilized

²) Includes EQB

³) See comments

⁴) Average rate over SW period

ZUSAMMENFASSUNG DER TESTEREIGNISSE/ERGEBNISSE

EVENT	SWR	SW (Swabben)		
EL.TIME, [min]	777.1	1680		
T ₁ / T _f , [° C]	30.9/47.0	-		
P _{1 i} / P _{1 f} [bar]	31.2/41.8	-		
P _{2 i} / P _{2 f} [bar]	31.1/41.8	-		
P _{3 i} / P _{3 f} [bar]	41.8/42.0	-		
q [m ³ s ⁻¹]	0.0	-		
Q [m ³]	0.0	³⁾		
K [ms ⁻¹]	2.9E-10	-		
k [m ²]	2.3E-17	-		
T [m ² m]	7.4E-15	-		
(LAMBDA) [-]	4.7E-05	-		
(OMEGA) [-]	4.2E-01	-		
P _s at P ₁ [bar]	41.81	-		
Head(P ₁) [m asl]	473.0 ¹	-		
S [-]	1.4E-05	-		
C _D [-]	3.7E+02	-		
s [-]	-2.7	-		
FIGURE(S)	3a, b, c	6a, b		

TEMPERATURE EFF.	NO	-		
BH. HIST. EFF.	YES ²	-		
BOUNDARY EFF.	NO	-		
ANOMALY	NO	-		

¹⁾ Freshwater equivalent for (rho)=1000 kgm⁻³, g=9.81 ms⁻², not stabilized

²⁾ See comments

³⁾ to be calculated in final report

KOMMENTAR:

Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse der "Quick-Look" Analyse des ersten hydraulischen Tests. Die Auswertung der Rohdaten wurde unter Anwendung der Programme TRIAS (ITA) und INTERPRET (Scientific Software-Intercomp) durchgeführt.

Die PSR-Phase deutet auf den Einfluß von "Borehole Pressure History" hin. Das Testintervall wurde einem länger andauernden Überdruck der Spülungssäule ausgesetzt. Daher ist es nicht möglich aus diesem Testereignis die äquivalente Süßwasser-Druckspiegelhöhe abzuleiten. Auch die Buildup-Phase nach dem Slugtest war zu kurz, um eine zuverlässige Extrapolation des statischen Druckes zu ermöglichen. Es ist ratsam eine weitergehende Auswertung basierend auf einer dimensionslosen Extrapolation (Simulation) durchzuführen. Die ermittelte äquivalente Süßwasser-Druckspiegelhöhe von 473 m ü.N.N. ist mit großer Wahrscheinlichkeit um 5 bis 10 m zu niedrig.

Die ermittelten Permeabilitätswerte spiegeln den "Clean up"-Effekt des Testintervalls während des Zuflußttests wieder. Beim Type Curve Matching ist sowohl bei dem Pulse Withdrawal (PW, Fig.1d) wie auch bei dem Slug Withdrawal (SW, Fig.2a,b,c) der Übergang von einem niedrigeren zu einem höheren C_{De}^{2s} zu sehen. Die Transmissivität des Testintervalls hat sich während dieser beiden Testphasen von ca. 0.6 auf 4.5 mDm erhöht. Der Buildup Response weist eine Transmissivität von 7.4 mDm auf.

Sowohl aufgrund der oben erwähnten Effekte, wie auch durch "wellbore storage dominated"-Flow ist der heterogene Charakter des Testintervalls während des PW und des SW nicht zu erkennen. Erst die Druckaufbauphase läßt genauere Erkenntnisse über die Inhomogenität gewinnen. Der Verlauf der Druckableitung deutet auf ein heterogenes System hin. Das Speicherkapazitätsverhältnis (OMEGA) liegt im typischen Bereich für ein Dual-Permeability System. Es ist zu vermuten, daß man es hier mit zwei Zonen mit einem deutlichen Permeabilitätskontrast zu tun hat. Selbstverständlich ist das klassische Modell des Dual-Permeabilitätssystems (layered Interval) nicht anwendbar. Die Analyse wurde durch das Fehlen einer Stabilisation der Druckableitung erschwert. Um eine vollständige Stabilisation zu erhalten, wäre eine Verlängerung des Buildups um mindestens 10 Stunden notwendig gewesen, was ohne Gefährdung der Nachfolgetests nicht möglich war.

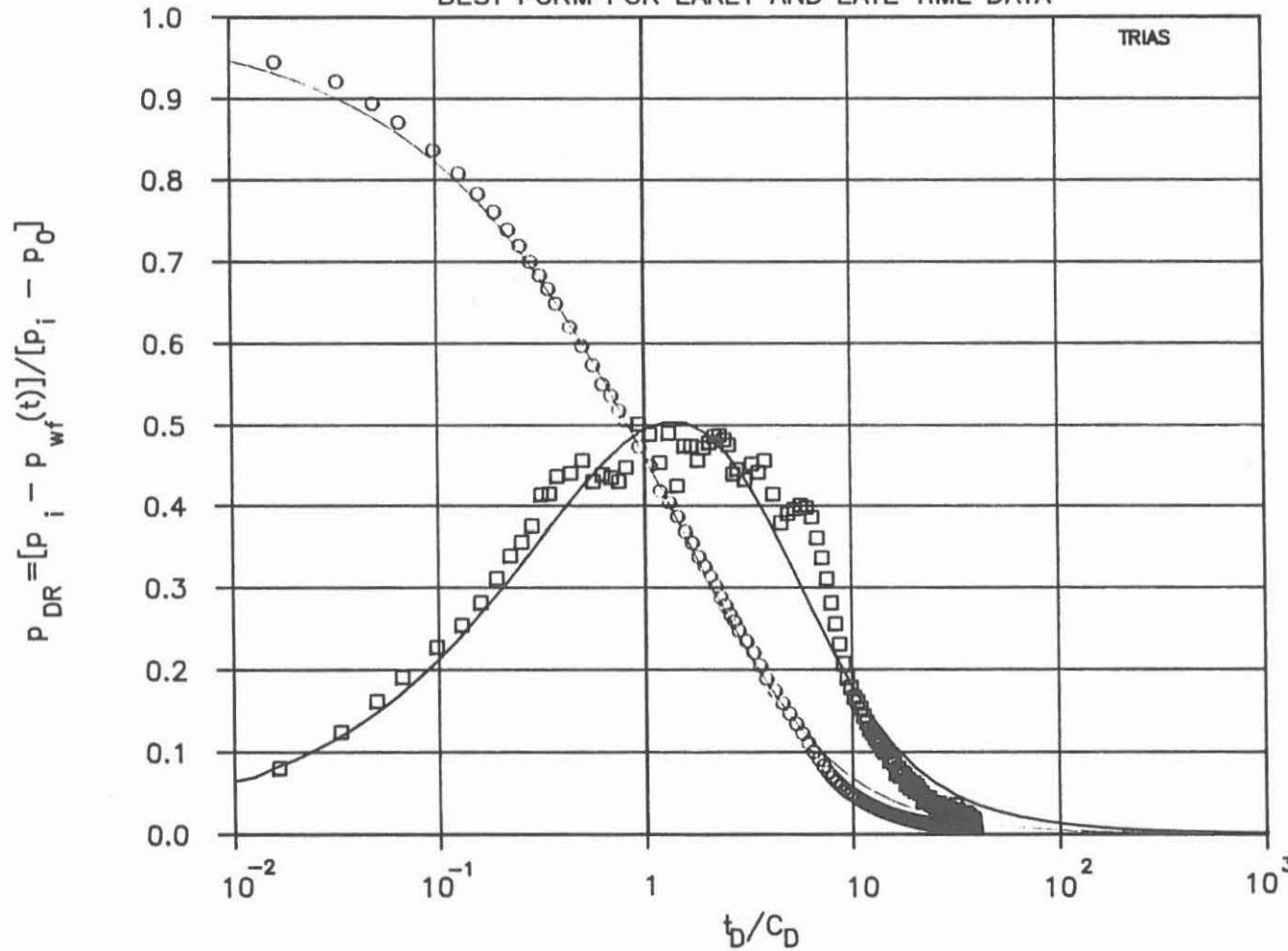
Der P₂ Port des Druckaufnehmers war wahrscheinlich mit Feststoffen aus der Spülung verstopft. Daher wurden die P₁ Werte zur Analyse genommen.

LISTE DER ABBILDUNGEN:

- 1a. Pulse withdrawal, semi-log match
- 1b. Pulse withdrawal, log-log match
- 1c. Pulse withdrawal, log-log match
- 1d. Pulse withdrawal, log-log match trial of heterogeneous response
- 2a. Slug withdrawal, semi-log match
- 2b. Slug withdrawal, log-log match
- 2c. Slug withdrawal, log-log match
- 3a. Pressure recovery after slug withdrawal, log-log match, double porosity flow model
- 3b. Pressure recovery after slug withdrawal, dimensionless superposition type curve, double porosity flow model
- 3c. Pressure recovery after slug withdrawal, measured and simulated pressure response, standard approach
- 4. Interval pressure sequence - testing
- 5. Interval temperature sequence - testing
- 6a. Swabbing - draft figure
- 6b. Swabbing - draft figure

RAMEY TYPE CURVE TYPE A

BEST FORM FOR EARLY AND LATE TIME DATA



TM : 7.50E+000 H⁻¹
 PM : 1.00E+000
 PERM.: 2.35E-018 m²
 a : -1.2E+000
 C_D : 5.00E+001
 C_De^{2a} : 5.00E+000
 S : 1.39E-005

DIMLES PRESSURE vs TIME

Fig.1a Pulse Withdrawal, semi-log match

RAMEY TYPE CURVE TYPE B
BEST FORM FOR LATE-TIME DATA

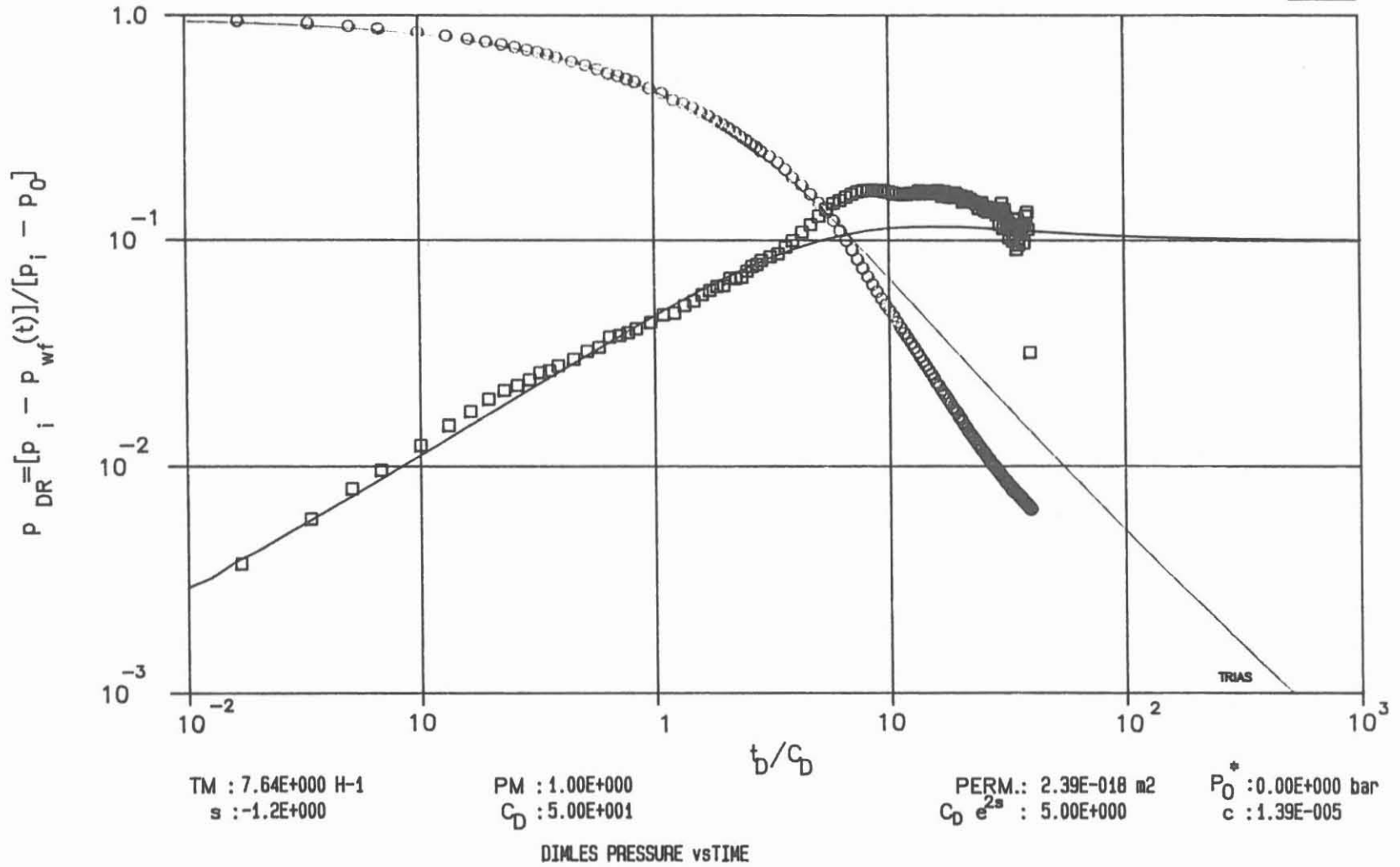


Fig.1b Pulse Withdrawal, log-log match

RAMEY TYPE CURVE TYPE C
BEST FORM FOR EARLY-TIME DATA

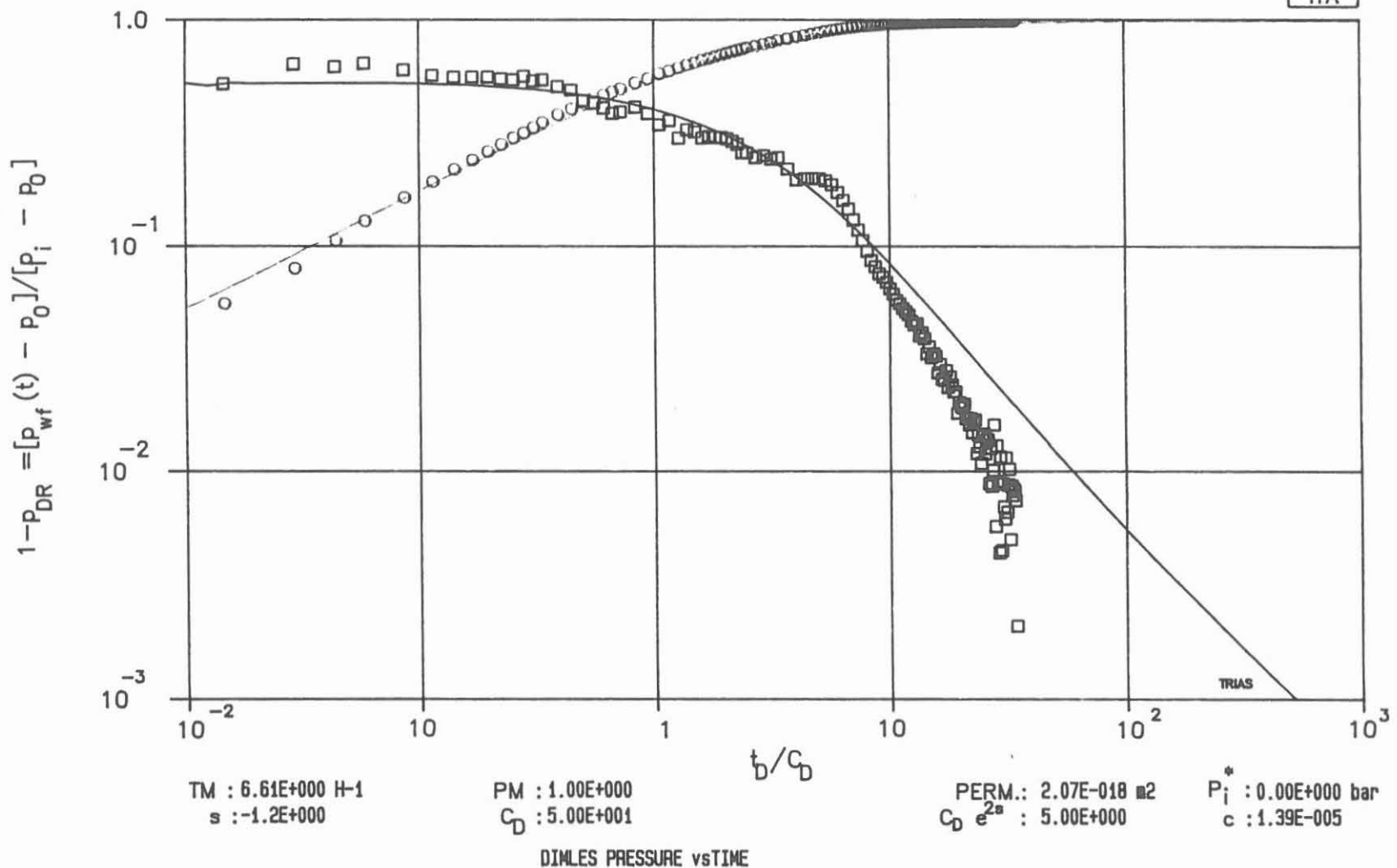


Fig.1c Pulse Withdrawal, log-log match

RAMEY TYPE CURVE TYPE B

BEST FORM FOR LATE-TIME DATA

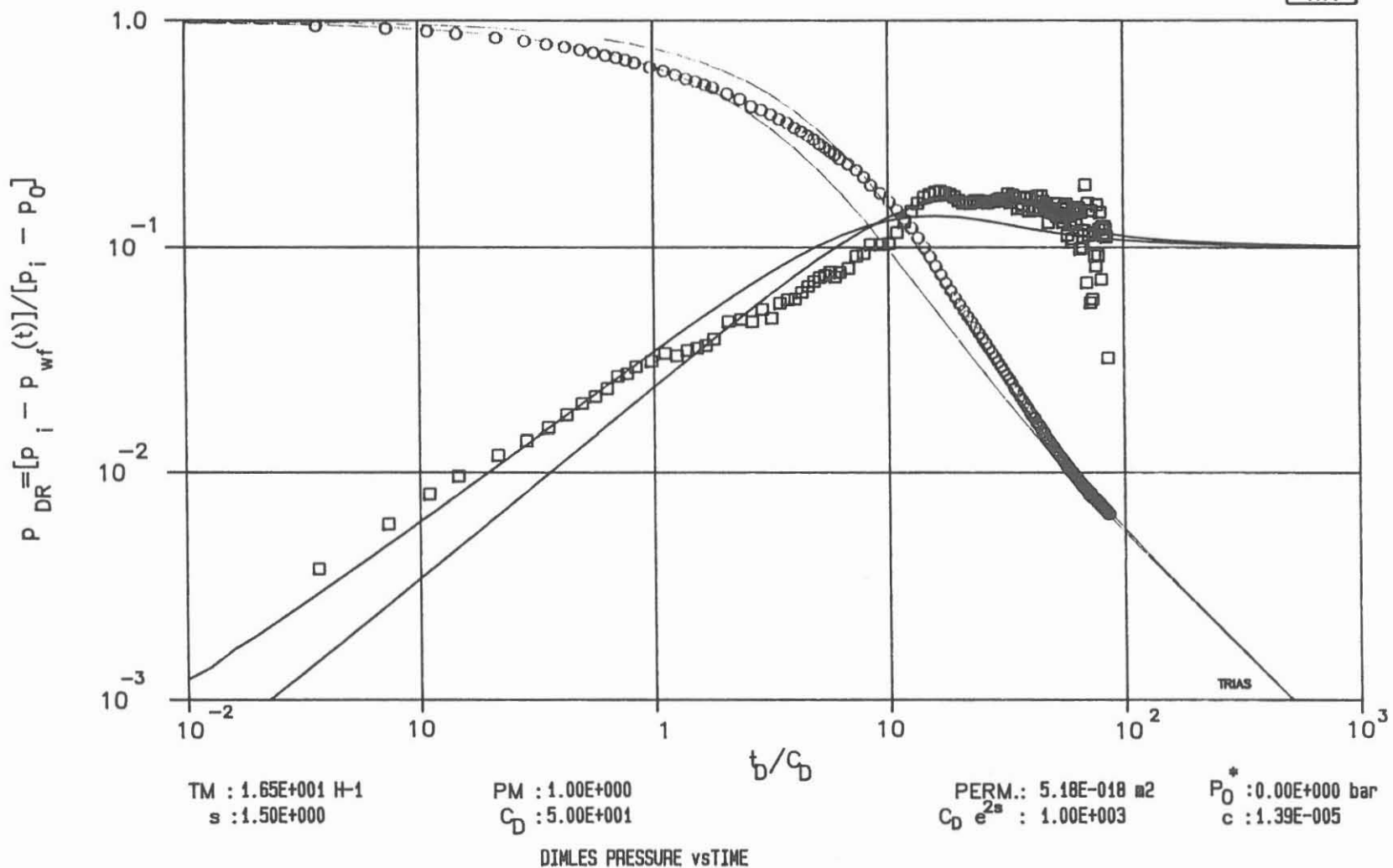
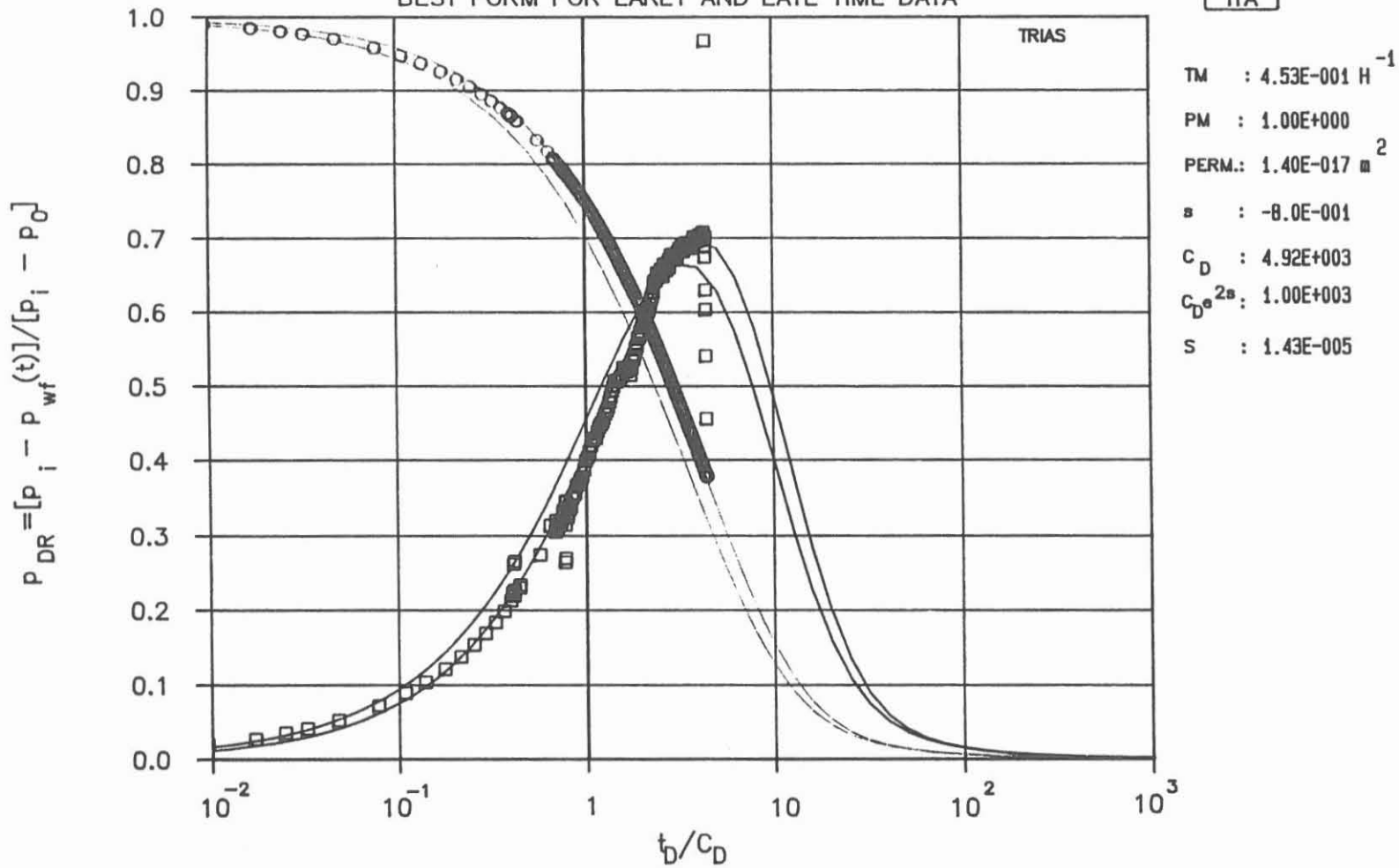


Fig.1d Pulse Withdrawal, log-log match trial of heterogeneous response

RAMEY TYPE CURVE TYPE A

BEST FORM FOR EARLY AND LATE TIME DATA



DIMLES PRESSURE vs TIME

Fig.2a Slug Withdrawal, semi-log match

RAMEY TYPE CURVE TYPE B

BEST FORM FOR LATE-TIME DATA

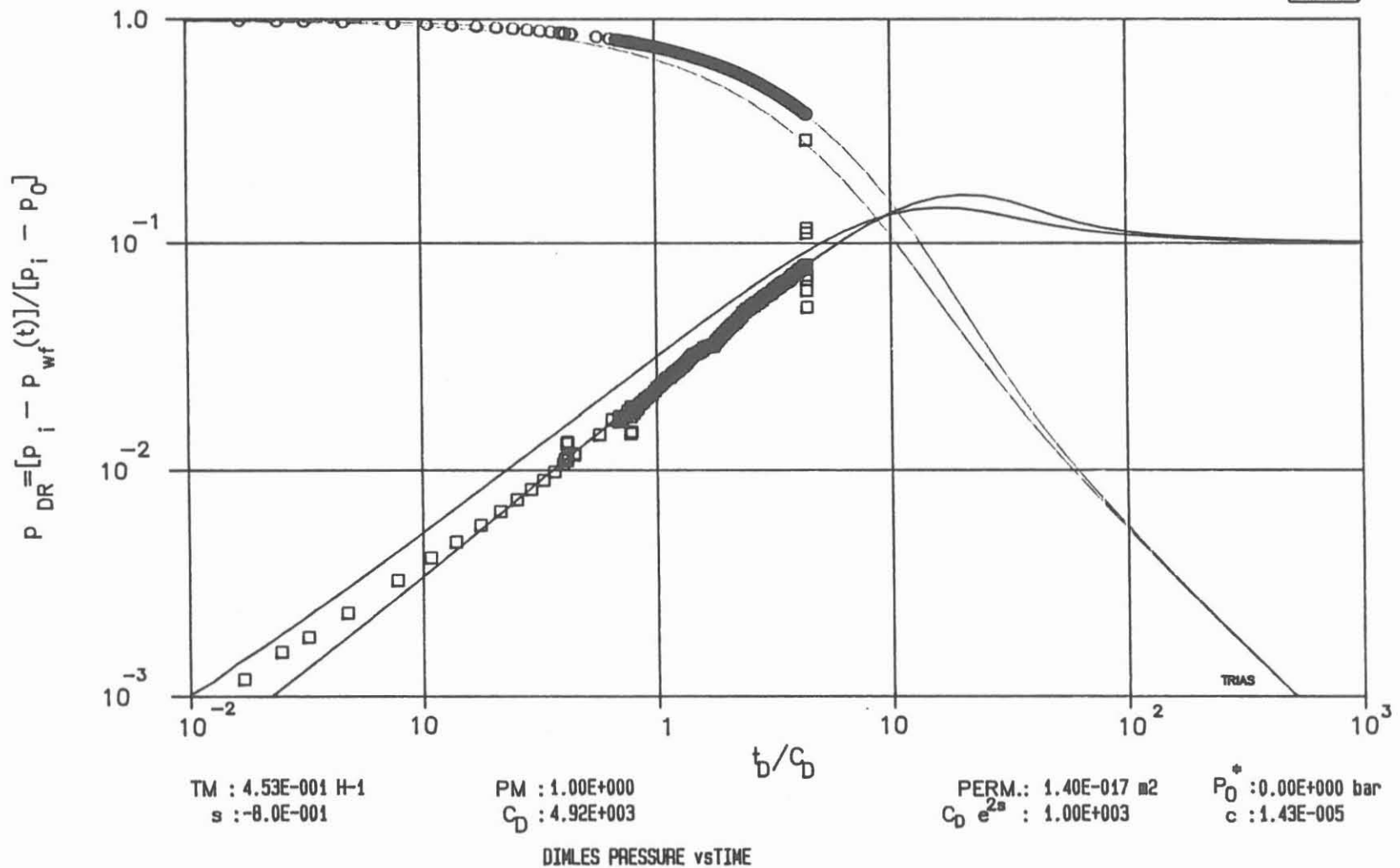
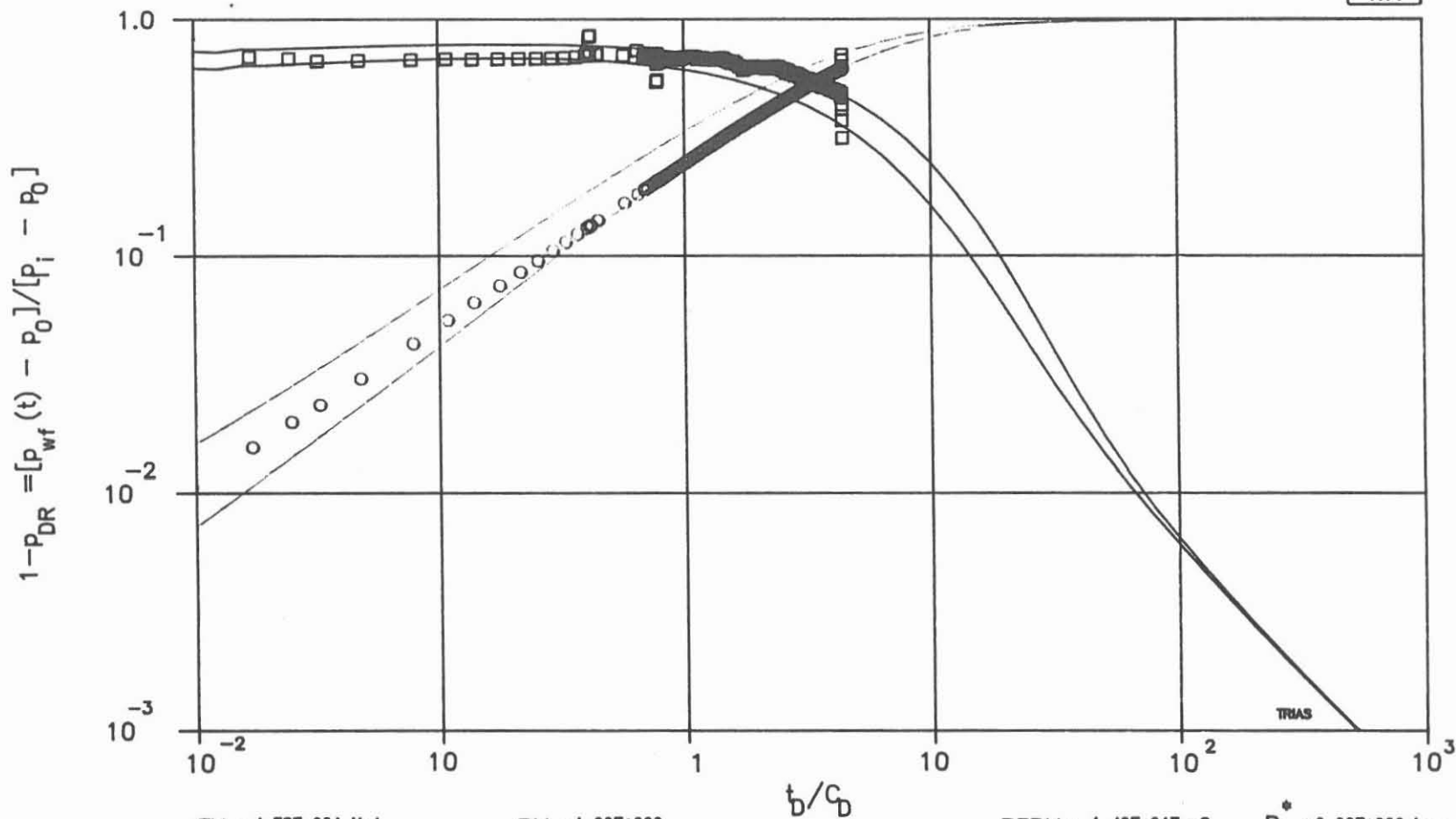


Fig.2b Slug Withdrawal, log-log match

RAMEY TYPE CURVE TYPE C

BEST FORM FOR EARLY-TIME DATA



TM : 4.53E-001 H-1
s : -8.0E-001

PM : 1.00E+000
C_D : 4.92E+003

PERM.: 1.40E-017 m2
C_D e^{2s} : 1.00E+003

P_i^* : 0.00E+000 bar
c : 1.43E-005

DIMLES PRESSURE vs TIME

TRIAS

Fig.2c Slug Withdrawal. log-log match

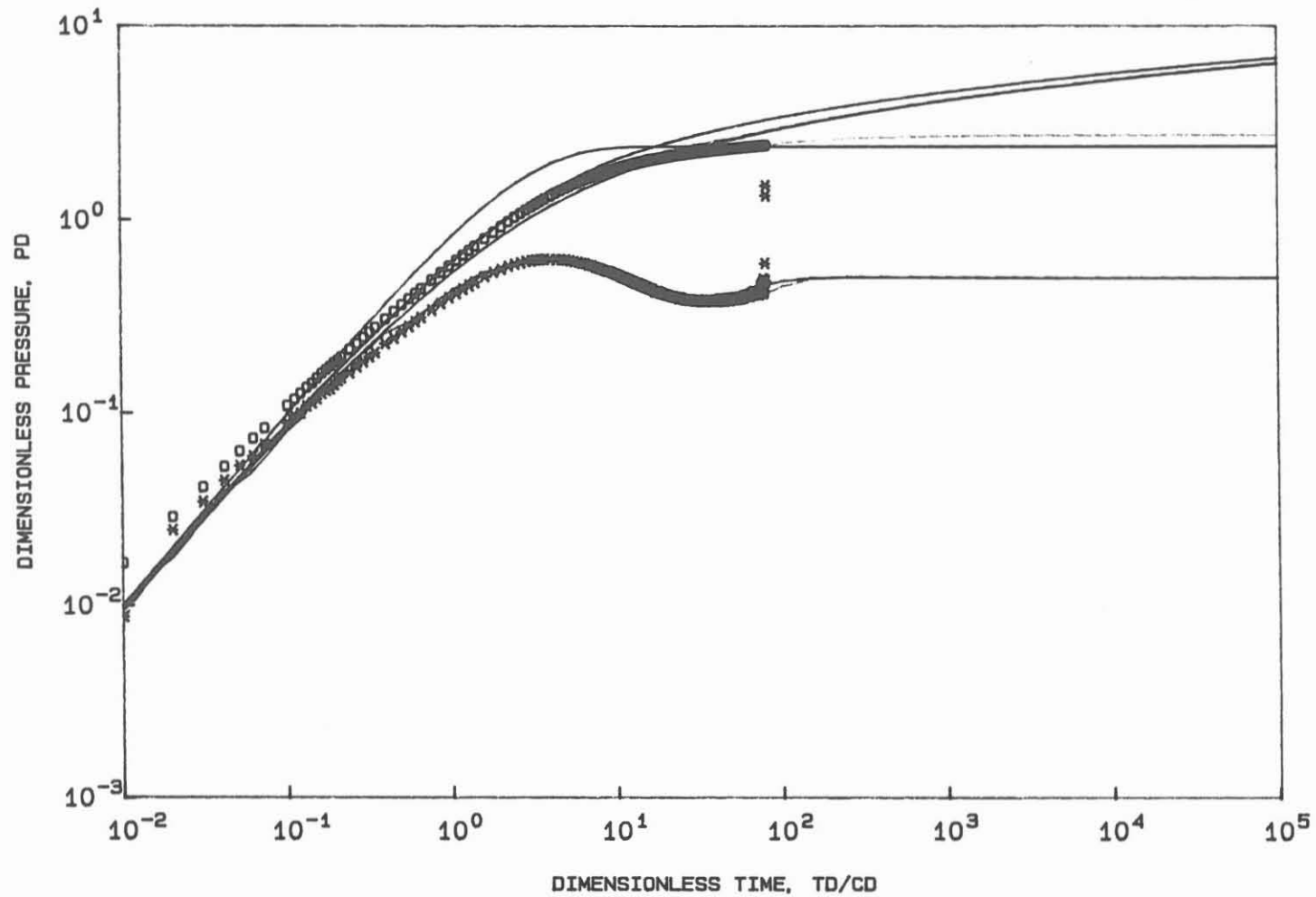


FIG.3A PRESSURE RECOVERY AFTER SLUG WITHDRAWAL (SWF)
WELL WITH WELLBORE STORAGE AND SKIN IN A RESERVOIR WITH 2-POROSITY BEHAVIOR;
DRAWDOWN TYPE CURVE, $[CDE(2S)]_{f+m} = 1.60$, $[CDE(2S)]_f = 3.80$, $LE(-2S) = 1.100E-02$

[PI - P (DELTAT)] D

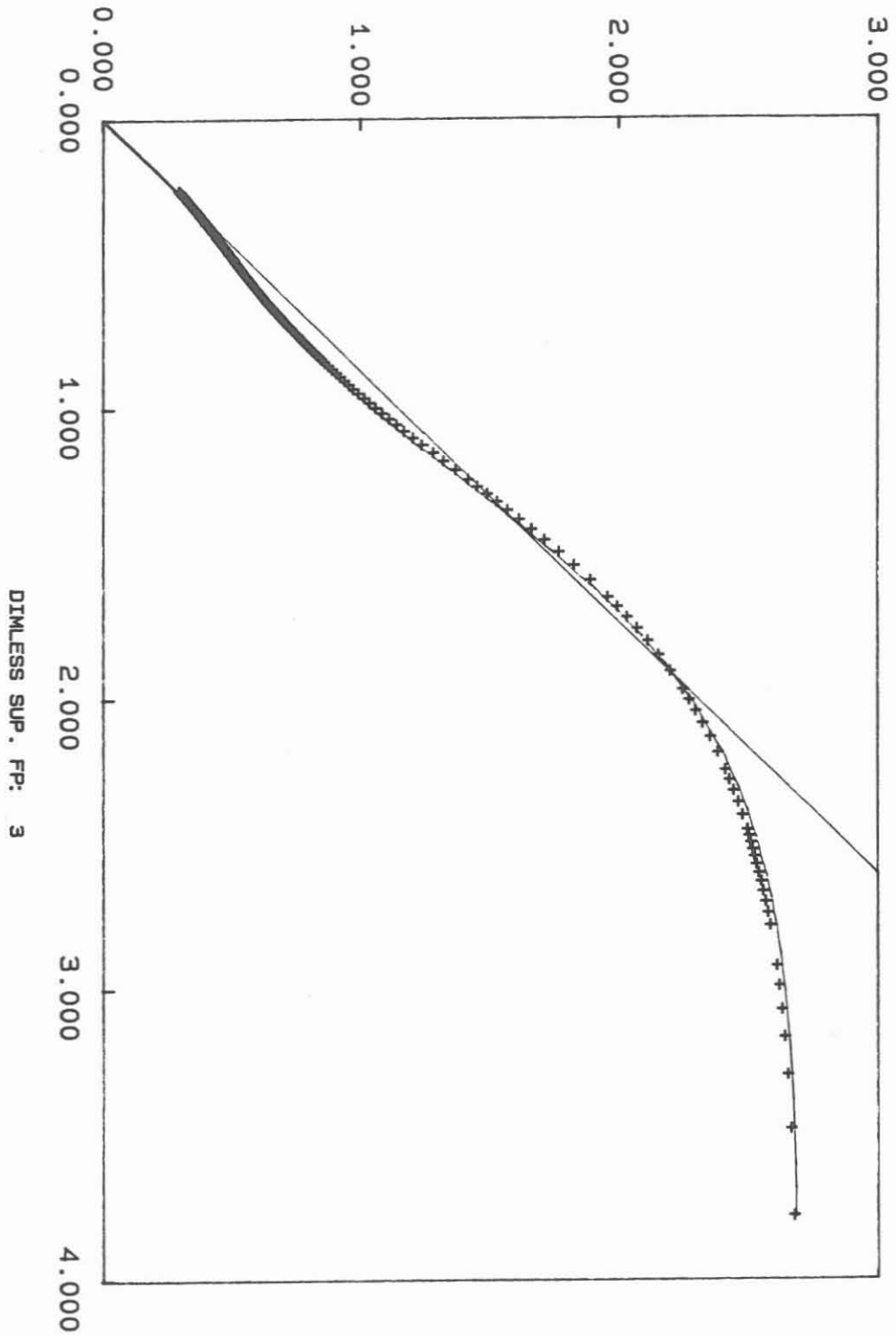


FIG. 3B PRESSURE RECOVERY AFTER SLUG WITHDRAWAL (SWR)
DIMENSIONLESS SUPERPOSITION PLOT
GENERALIZED HORNER TYPE CURVE. NO. FLOW PERIOD 3

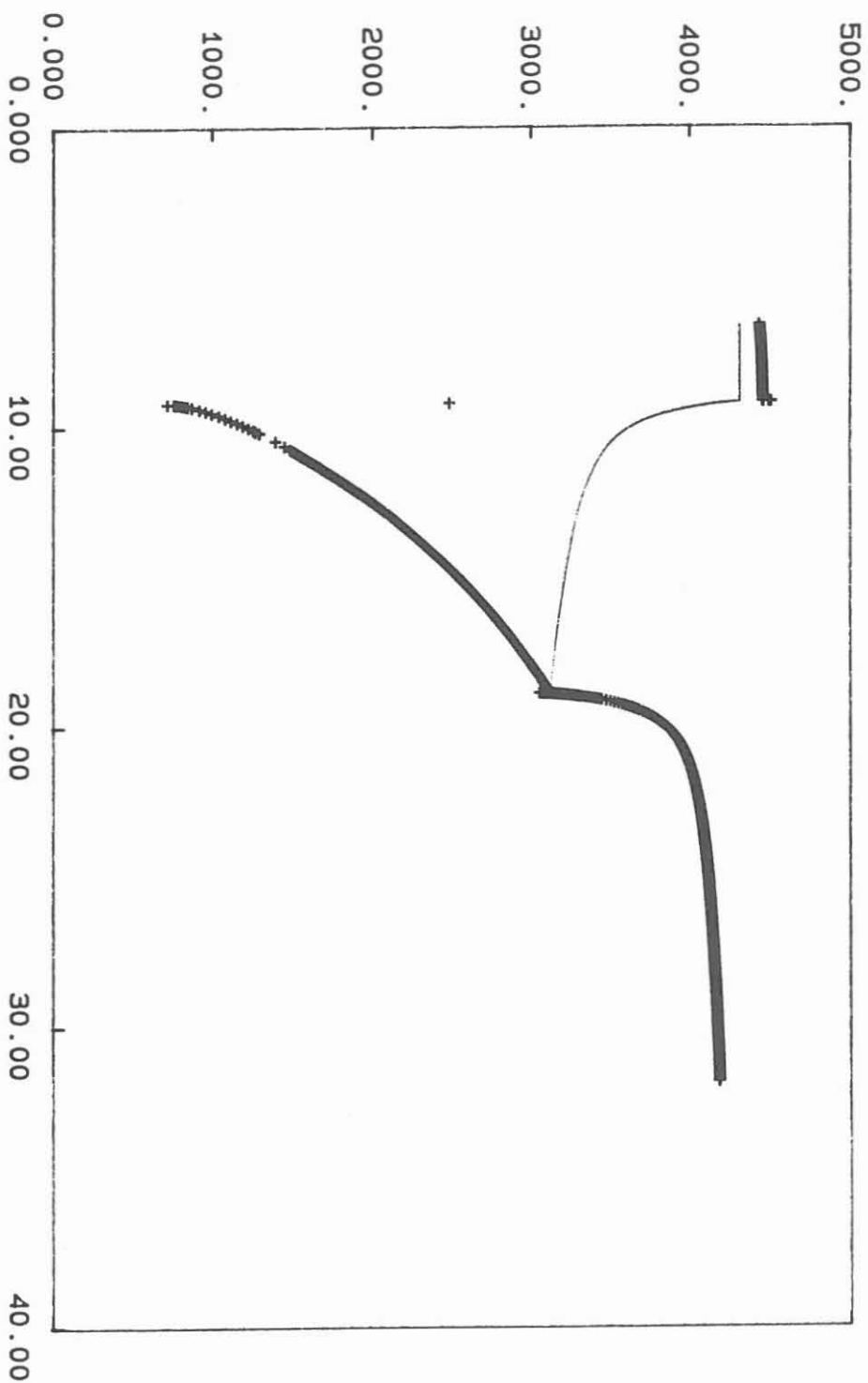


FIG.3C MEASURED AND SIMULATED PRESSURE RESPONSE FOR SWR-PERIOD
STANDARD SIMULATION APPROACH
PRESSURE IN KPA, ELAPSED TIME IN HOURS

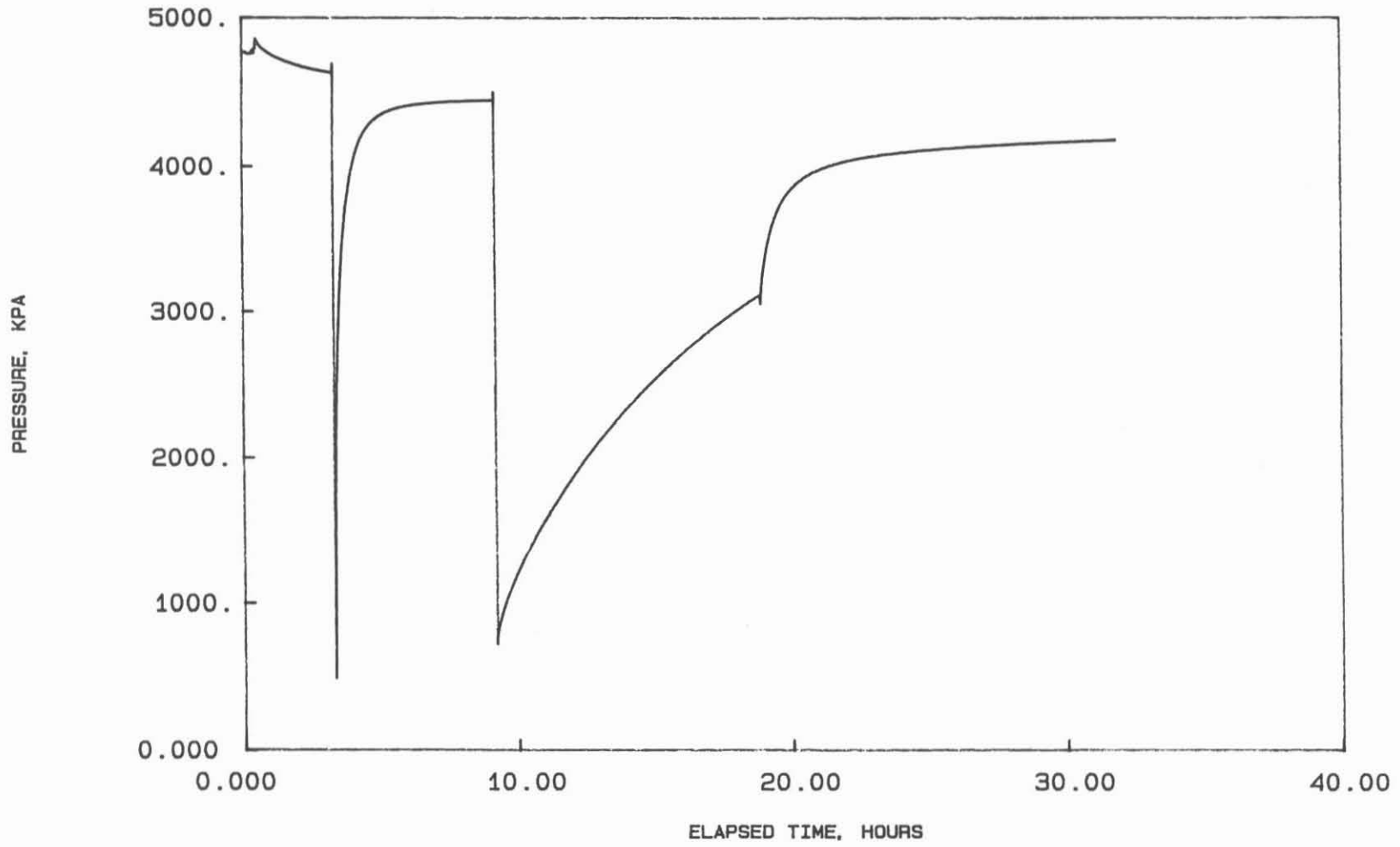


FIG.4 PRESSURE RESPONSE (P1) DURING TESTING
KTB VB-1A, INTERVAL 799.6 - 478.0

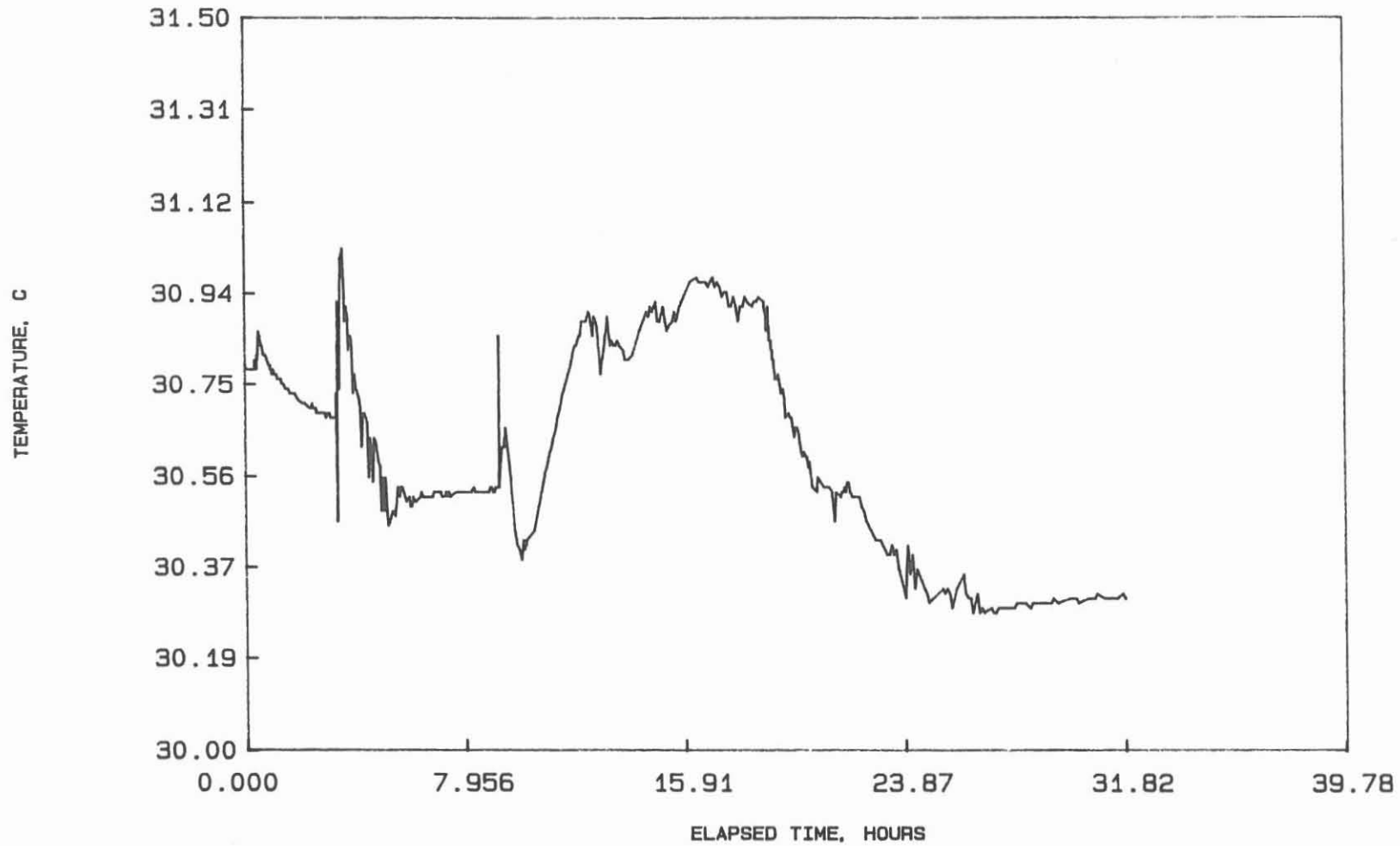


FIG.5 TEMPERATURE RESPONSE (T1) DURING TESTING
KTB VB-1A. INTERVAL 799.6 - 478

Company Name: KTB-PROJEKTLEITUNG
Well Name: KTB VB1-A
Depth of Gauge: 463.62
Date: 28/02/90
TIME: 09:20:00

Lease or Field: INTERVAL: 478.0-799.6
Location: WINDISCHESCHENBACH
Gauge #204 Test #2



BAKER / LYNES
MASCHWEG 9
3100 CELLE
WEST GERMANY
TEL.: 05141/83081

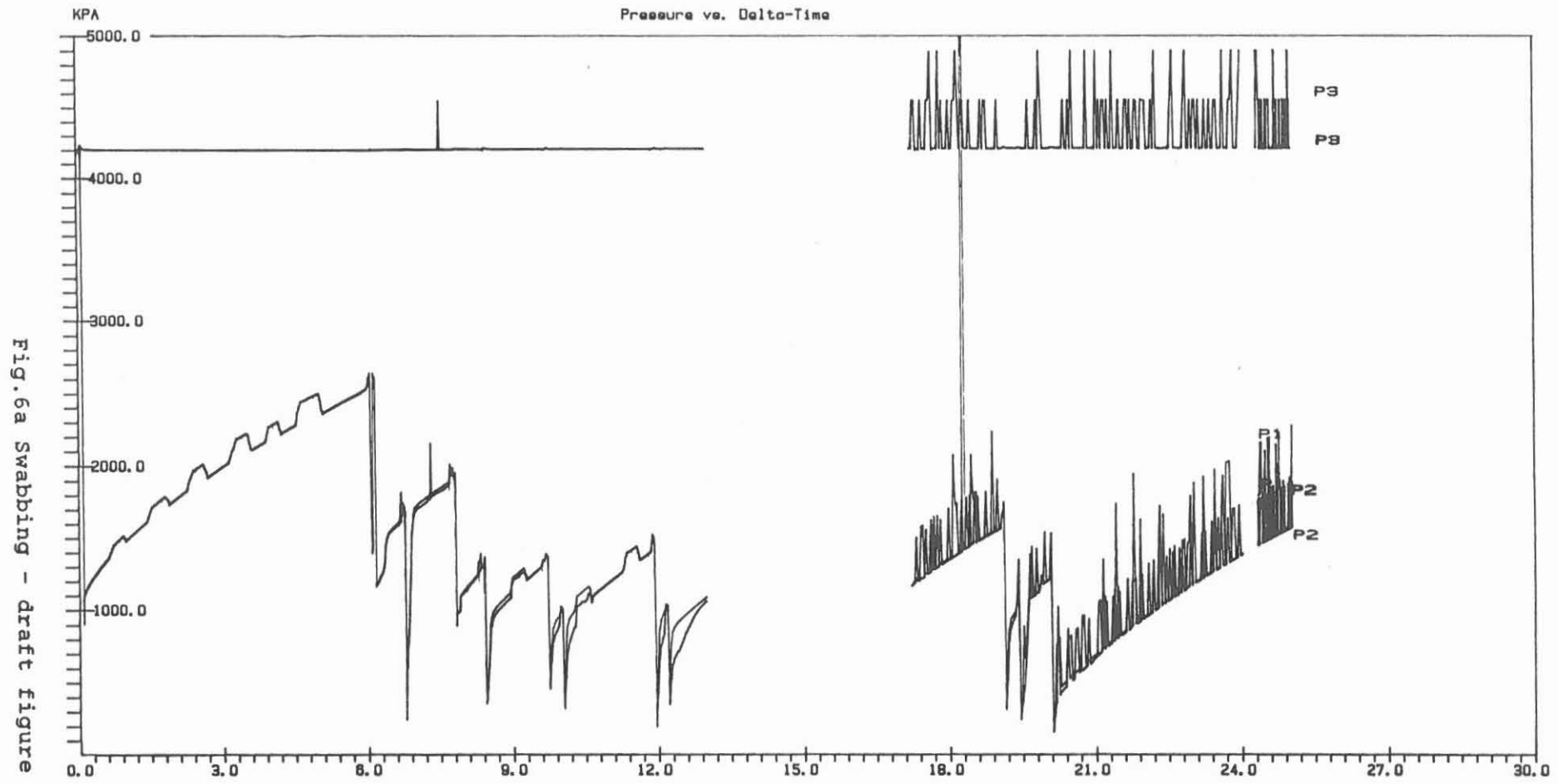


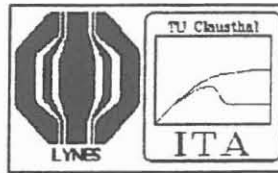
Fig.6a Swabbing - draft figure

- 379 -

Plot started: 09:19:45 on 28/02/90

Elapsed Time in HOURS

This Plot matches K&S graph paper #48 0782



QUICK LOOK REPORT

BOHRUNG	: KTB VB-1a	ENDTEUFE	: 4000.1 ¹ m
DATUM	: 03.03-05.03.1990	INTERVALL	: HT-2
TOP	: 2135.00 m	BTTM	: 2190.00 m
ROHRSCHUH	: 478.00 m	SPÜLUNGSDICHTE	: 1010.0 kgm ⁻³
INTERVALLLÄNGE	: 55.00 m	INTERVALLMITTE	: 2162.50 m
r_v	: 0.076m	r_a (3.5")	: 0.035m
p₂-TEUFE	: 2129.89 m	RINGRAUM STAND	: 1.60*m

DOPPEL-PACKER-TEST (BRIDGE PLUG UND SINGLE)

- 1) Alle Teufen unter Referenzpunkt (R.P. - Tisch), 520.9 m ü. N.N.
2) Ringraum mit Spülung aufgefüllt

VORABINFORMATIONEN

STATISCHER DRUCK (P₁)	: 20600kPa, (extrapoliert aus HT-1 Test)
POROSITÄT	: 0.01 (angenommen)
KOMPRESSIBILITÄT (WASSER)	: 4.23 10 ⁻¹⁰ Pa ⁻¹
TOTALE KOMPRESSIBILITÄT	: 4.23 10 ⁻¹⁰ Pa ⁻¹ (angenommen c _t =c _w)
BOREHOLE HISTORY	: Der statische Wasserspiegel befindet deutlich unter dem R.P. Durch den mit Spülung zu Tage aufgefüllten Ringraum wurde das Intervall einem langfristigen Überdruck ausgesetzt
GEOLOGIE	: Gneis mit Kataklasitzone (2160-2170m)
GEOPHYSIK	: Das Kaliber Log weist ein um ca. 60% größeres Intervallvolumen auf (1.6m ³) als nach nominalem Durchmesser (6")

TESTINGENIEUR:

Dr.-Ing. L. Ostrowski

Notice: All interpretations of reports and plots contained herein are opinions based on analytical techniques described in the literature and ITE TU Clausthal cannot and do not guarantee the accuracy or correctness of any interpretations, and ITE TU Clausthal shall not be liable or responsible for any loss, costs, damages, or expenses, incurred or sustained by the customer and or any third party resulting from any interpretations, recommendations and or results made by ITE TU Clausthal or its officers, agents, or employees.

ZUSAMMENFASSUNG DER TESTEREIGNISSE/ERGEBNISSE

EVENT	INF	PSR ²	PW	SW
EL.TIME, [min]	38.2	273.4	465.1	473.7
T ₁ /T _f , [°C]	60.5/61.4	61.4/61.9	62.0/62.1	62.1/62.2
P _{1i} /P _{1f} [bar]	210.1/322.5	322.5/196.4	161.5/192.8	130.0/130.5
P _{2i} /P _{2f} [bar]	210.7/323.1	323.1/197.0	161.6/193.3	130.5/131.0
P _{3i} /P _{3f} [bar]	214.0/214.9	214.9/214.0	213.2/213.1	213.3/214.4
q [m ³ s ⁻¹]	-	-	-	7.9E-07 ⁴
Q [m ³]	-	-	-	0.022
K [ms ⁻¹]	-	-	1.1E-12	0.2-1.1E-12
k [m ²]	-	-	5.3E-20	1.0-5.0E-20
T [m ² m]	-	-	2.9E-18	0.6-2.8E-20
P _s at P ₁ [bar]	-	197.04	193.28	-
Head(P ₂) [m asl]	-	389.4 ¹	351.1 ¹	-
S [-]	-	-	2.3E-6	2.3E-6
C _D [-]	-	-	5.0E03	4.1E04
s [-]	-	-	-2.3	-4.5
FIGURE(S)	4,5	4,5	1a,b,c,	2a,b

TEMPERATURE EFF.	NO	POSSIBLE	NO	NO
BH. HIST. EFF.	NO	YES ³	YES ³	YES ³
BOUNDARY EFF.	NO	NO	NO	NO
ANOMALY	NO	NO	NO	NO

¹) Freshwater equivalent for (rho)=1000 kgm⁻³, g=9.81 ms⁻², not stabilized, to be corrected for borehole inclination and tubing stretch (max. est.= 5m)

²) Includes EQB

³) See comments

⁴) Average rate over SW period

ZUSAMMENFASSUNG DER TESTEREIGNISSE/ERGEBNISSE

EVENT	SWR			
EL.TIME, [min]	885.9			
T ₁ /T _f , [°C]	62.2/62.2			
P ₁₁ /P _{1f} [bar]	130.5/163.0			
P ₂₁ /P _{2f} [bar]	131.0/163.7			
P ₃₁ /P _{3f} [bar]	214.4/212.3			
q [m ³ s ⁻¹]	0.0			
Q [m ³]	0.0			
K [ms ⁻¹]	1.7E-12			
k [m ²]	8.0E-20			
T [m ² m]	4.4E-18			
(LAMBDA) [-]	-			
(OMEGA) [-]	-			
P _s at P ₁ [bar]	-			
Head(P ₁) [m asl]	-			
S [-]	2.3E-06			
C _D [-]	2.8E+02			
s [-]	-2.0			
FIGURE(S)	3a, b, c			
TEMPERATURE EFF.	NO			
BH. HIST. EFF.	YES ²			
BOUNDARY EFF.	NO			
ANOMALY	NO			

²) See comments

KOMMENTAR:

Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse der "Quick-Look" Analyse des zweiten hydraulischen Tests. Die Auswertung der Rohdaten wurde unter Anwendung der Programme TRIAS (ITA) und INTERPRET (Scientific Software-Intercomp) durchgeführt.

Wie während des ersten Tests (799.6-478m) ist die PSR-Phase von der "Borehole Pressure History" stark beeinflusst. Das Testintervall wurde einem länger andauernden Überdruck durch die Spülungssäule ausgesetzt. Zusätzlich wurde beim Ausgleich des Setzdruckes ein Überdruck von 20 bar auf das Testintervall ausgeübt. Durch kurzes Öffnen des Testventiles konnte jedoch dieser Störeffekt weitgehend gemindert werden. In dem zur Verfügung stehenden Zeitrahmen war es daher nicht möglich, aus diesem Testereignis die äquivalente Süßwasser-Druckspiegelhöhe abzuleiten. Die Buildup-Phase war nach dem Pulstest aufgrund der extrem niedrigen Permeabilität der Testzone zu kurz, um eine zuverlässige Extrapolation des statischen Druckes zu ermöglichen. Das gleiche gilt für die SWR Phase. Die genaue Ermittlung der äquivalenten Süßwasser-Druckspiegelhöhe ist unter Einbeziehung der genauen "Borehole Pressure History" möglich (z.B. durch Superpositionsanalyse des PW-Druckaufbaus, der als letzte Phase der "History"-Sequenz analysiert werden kann). Es ist davon auszugehen, daß die äquivalente Süßwasser-Druckspiegelhöhe zwischen den ermittelten Werten von 351 und 389 m ü.N.N. liegt.

Die extern niedrigen Permeabilitätswerte deuten auf ein relativ ungestörtes Kristallgebirge hin. Der Pulse-Response ist deutlich von der "Borehole Pressure History" beeinflusst. Der doppellogarithmische Match (Fig.1b) weist ein Double-Porosity Verhalten auf. Dies ist auch bei der Sensitivitätsanalyse zu erkennen (Fig.1d). Obwohl mit der homogenen Type Curve kein idealer Match zu erzielen ist, kann der ermittelte Permeabilitätsbereich als sicher gelten. Es empfiehlt sich eine Double-Porosity Analyse durchzuführen.

Der geringe Zufluß während des Slugtests (und die daraus resultierenden kleinen relativen Druckänderungen) machen die konventionelle Type Curve Matching Analyse schwierig. Nur im log-log Plot für "Early Time Data" ($1-p_D$) ist eine matchbare relative Druckänderung zu sehen. Der erforderliche Time Match sprengt jedoch das üblichen TCM-Raster. Daher wurden die Punkte ohne den Match dargestellt und mit der Neigung der Type Curve ($C_{De}^{2s}=5$) verglichen. Bei der Verschiebung um 4 logarithmische Dekaden würde eine Permeabilität von ca. $3.0-8.0E-20m^2$ resultieren. Für die SW-Phase wurde zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt (Fig.2b), die den ermittelten Permeabilitätsbereich bestätigt.

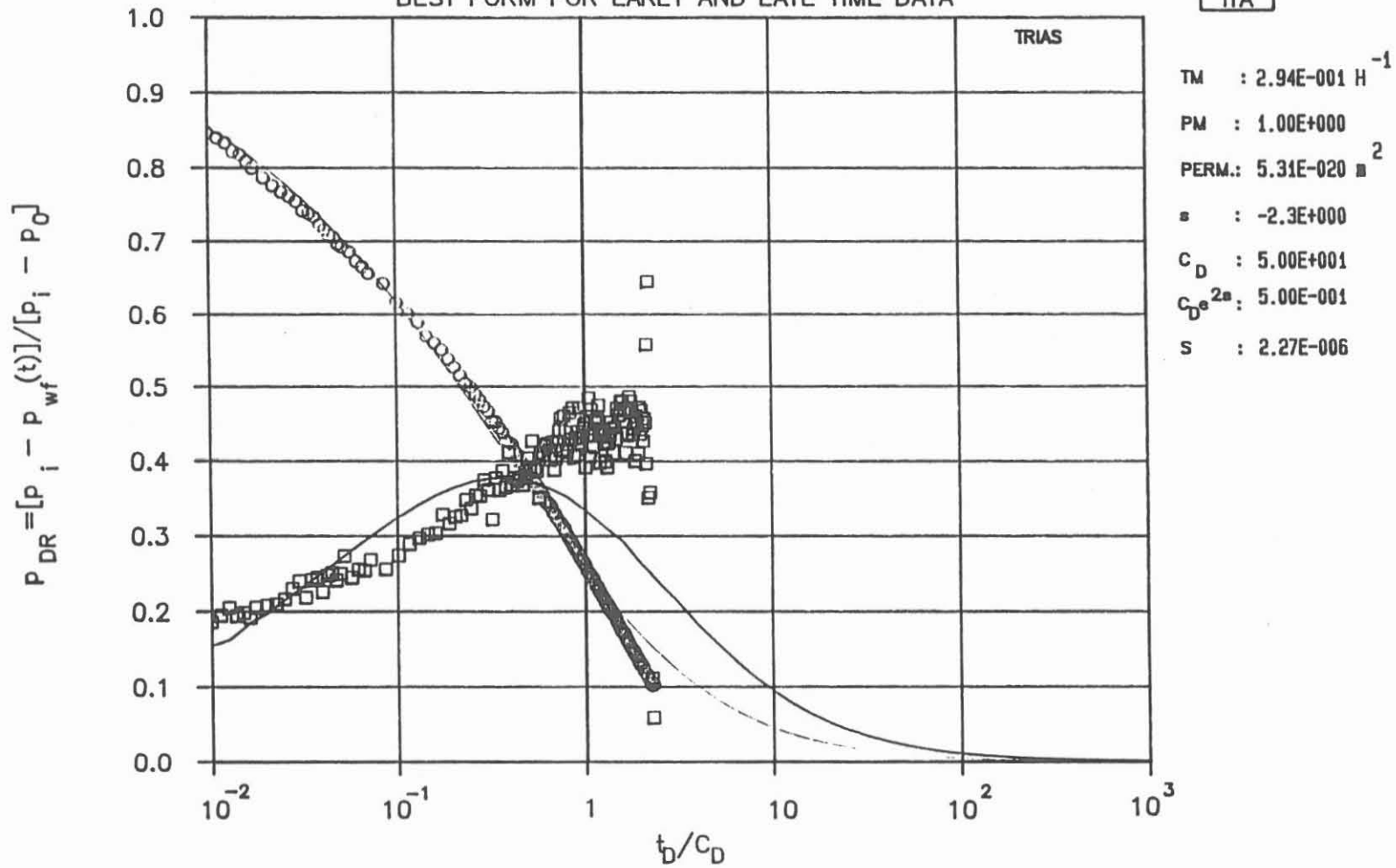
Der Buildup Response (SWR) ist aufgrund der extrem niedrigen Permeabilität während der fast 15 Stunden dauernden Schließphase in dem vom "Wellbore Storage" dominierten Bereich geblieben. Die Analyse wurde nicht nur durch das Fehlen einer Stabilisation sondern auch durch das Fehlen des Maximums der Druckableitung entscheidend erschwert. Es ist jedoch gelungen, unter Anwendung der dimensionslosen Superpositionsanalyse und der Simulation, einen guten Match zu finden (n.b. verläuft die "storage"-dominierte Superpositionsdruckableitung oberhalb des Log-log-Druckresponses). Die ermittelte Permeabilität stimmt mit den PW- und SW-Werten gut überein.

LISTE DER ABBILDUNGEN:

- 1a. Pulse withdrawal, semi-log match
- 1b. Pulse withdrawal, log-log match
- 1c. Pulse withdrawal, log-log match
- 1c. Pulse withdrawal, measured and simulated pressure response
- 2a. Slug withdrawal, log-log plot indicating the slope of P_D data
- 2b. Slug withdrawal, rough estimate of permeability range from SW data
- 3a. Pressure recovery after slug withdrawal, log-log match,
- 3b. Pressure recovery after slug withdrawal, dimensionless superposition type curve
- 3c. Pressure recovery after slug withdrawal, measured and simulated pressure response, standard approach
4. Interval pressure sequence - testing
5. Interval temperature sequence - testing

RAMEY TYPE CURVE TYPE A

BEST FORM FOR EARLY AND LATE TIME DATA

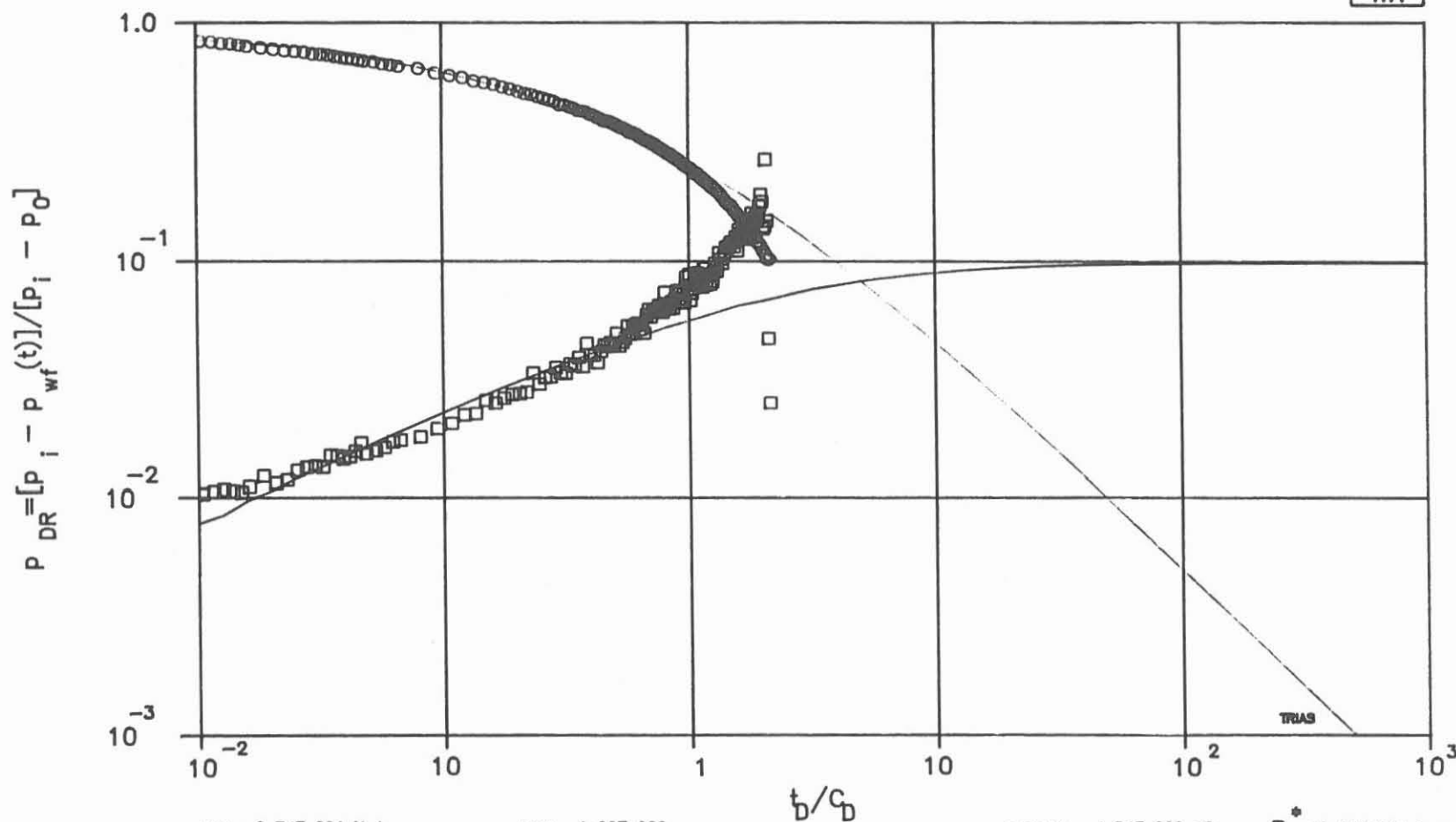


DIMLES PRESSURE vs TIME

Fig.1a HT-2 Pulse Withdrawal, Semi-log Match

RAMEY TYPE CURVE TYPE B

BEST FORM FOR LATE-TIME DATA



TM : 2.74E-001 H-1
s : -2.3E+000

PM : 1.00E+000
C_D : 5.00E+001

PERM.: 4.94E-020 m²
C_D e^{2a} : 5.00E-001

P₀* : 0.00E+000 bar
c : 2.27E-006

DIMLES PRESSURE vs TIME

Fig.1b HT-2 Pulse Withdrawal, Log-Log Match

RAMEY TYPE CURVE TYPE C

BEST FORM FOR EARLY-TIME DATA

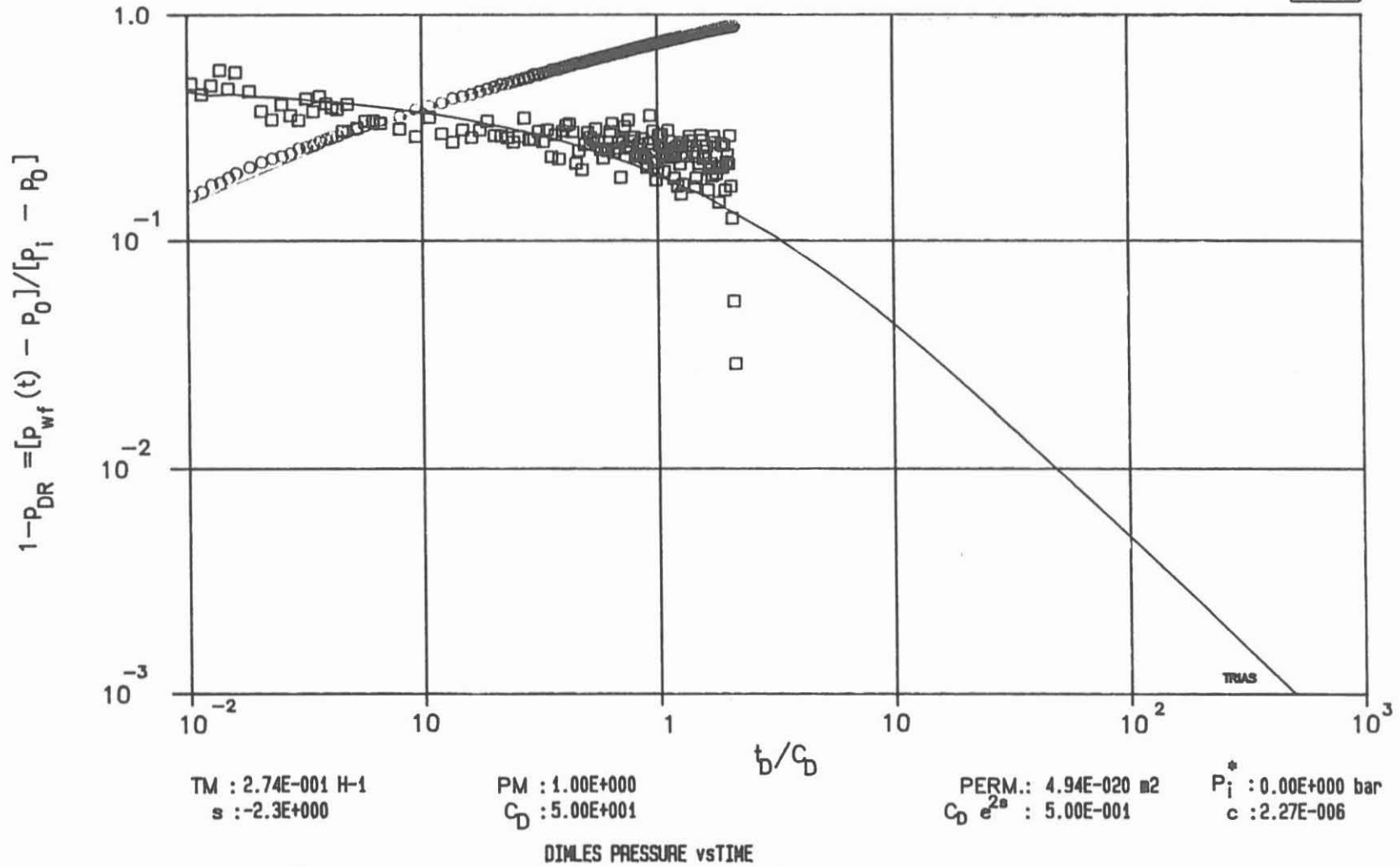
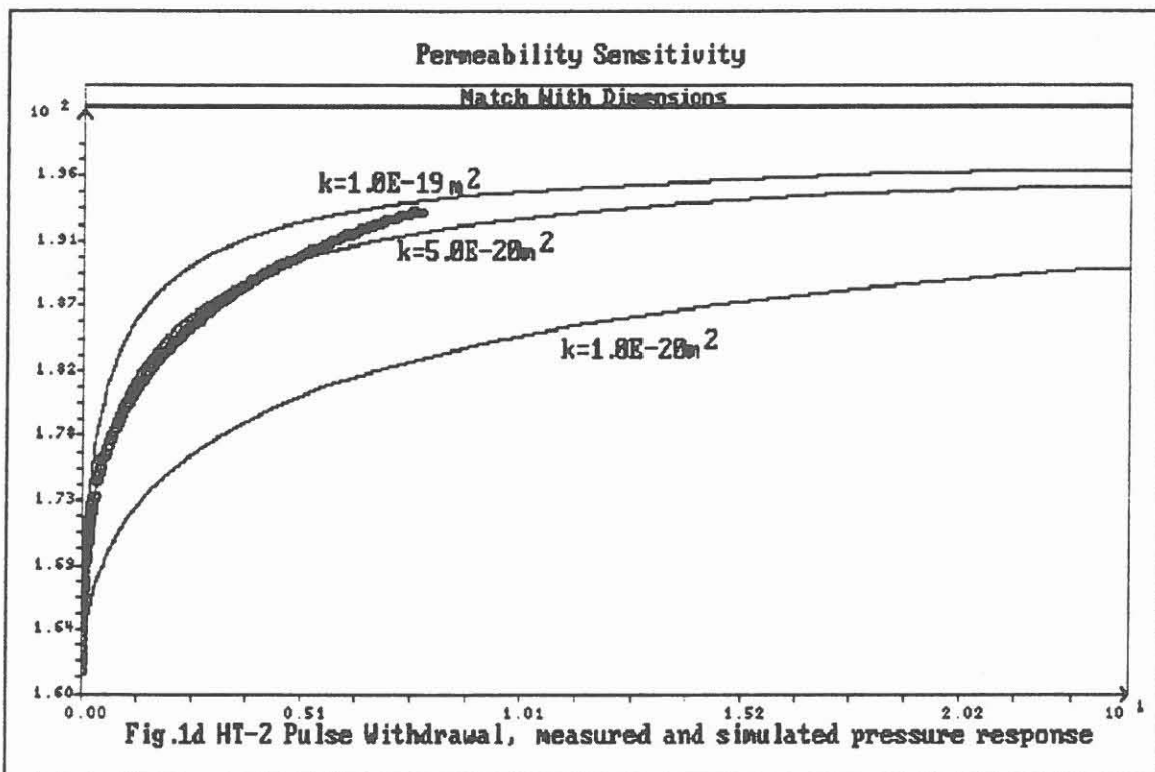


Fig.1c HT-2 Pulse Withdrawal, Log-Log Match



RAMEY TYPE CURVE TYPE C
 BEST FORM FOR EARLY-TIME DATA

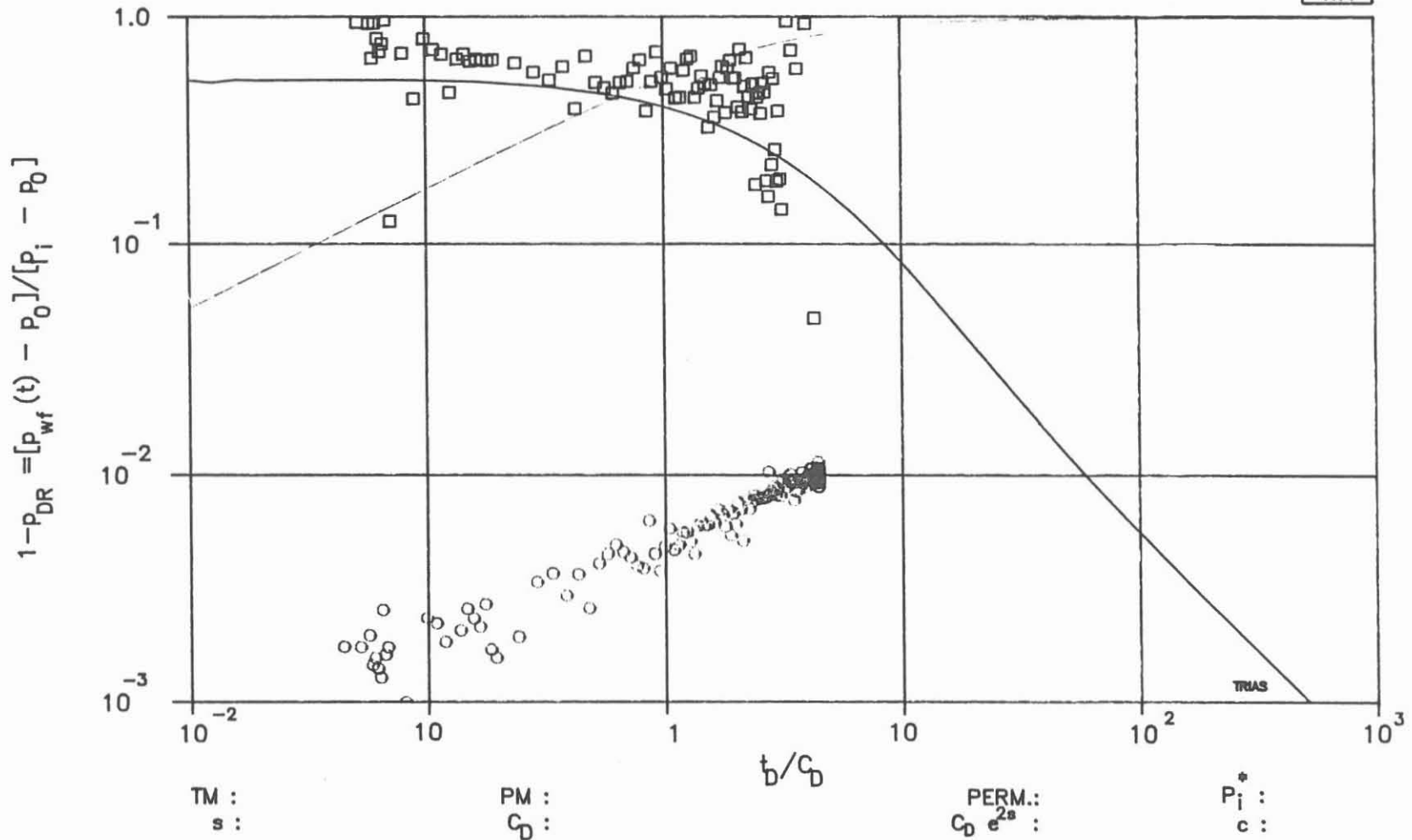


Fig.2a HT-2 SW. Log-log plot indicating the slope of PD data

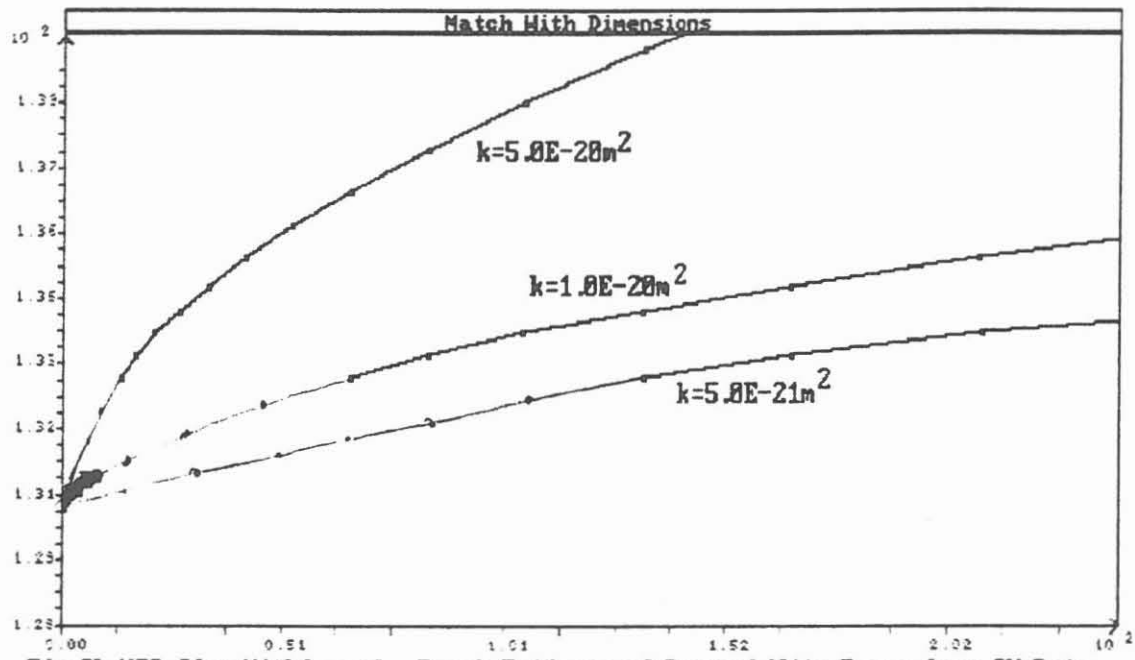


Fig.2b HT2-Slug Withdrawal, Rough Estimate of Permeability Range from SW Data

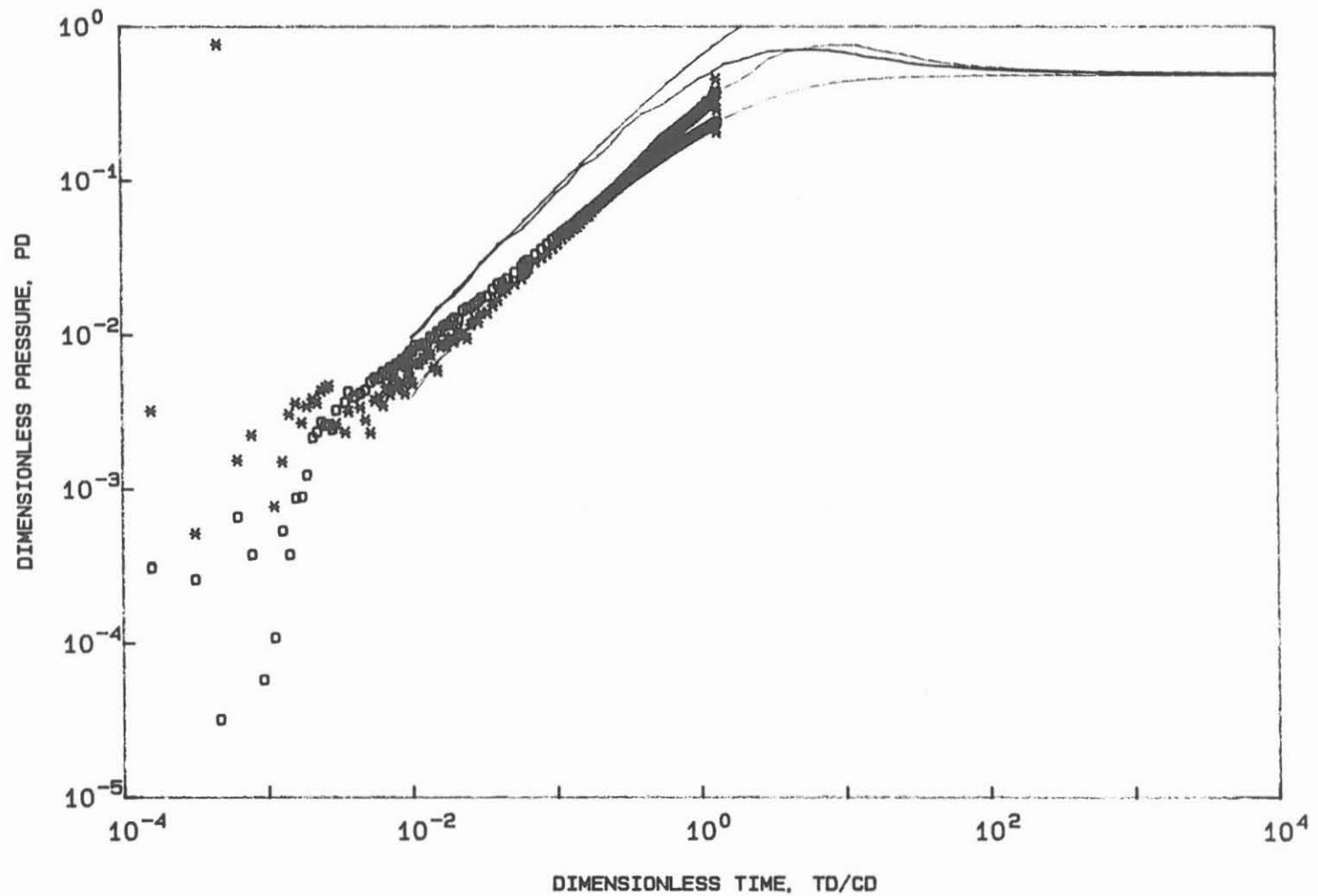


FIG.3A PRESSURE RECOVERY AFTER SLUG WITHDRAWAL (SWR)
 WELL WITH WELLBORE STORAGE AND SKIN IN A RESERVOIR WITH HOMOGENEOUS BEHAVIOR
 DRAWDOWN TYPE CURVE, $CDe(2S) = 5.00$

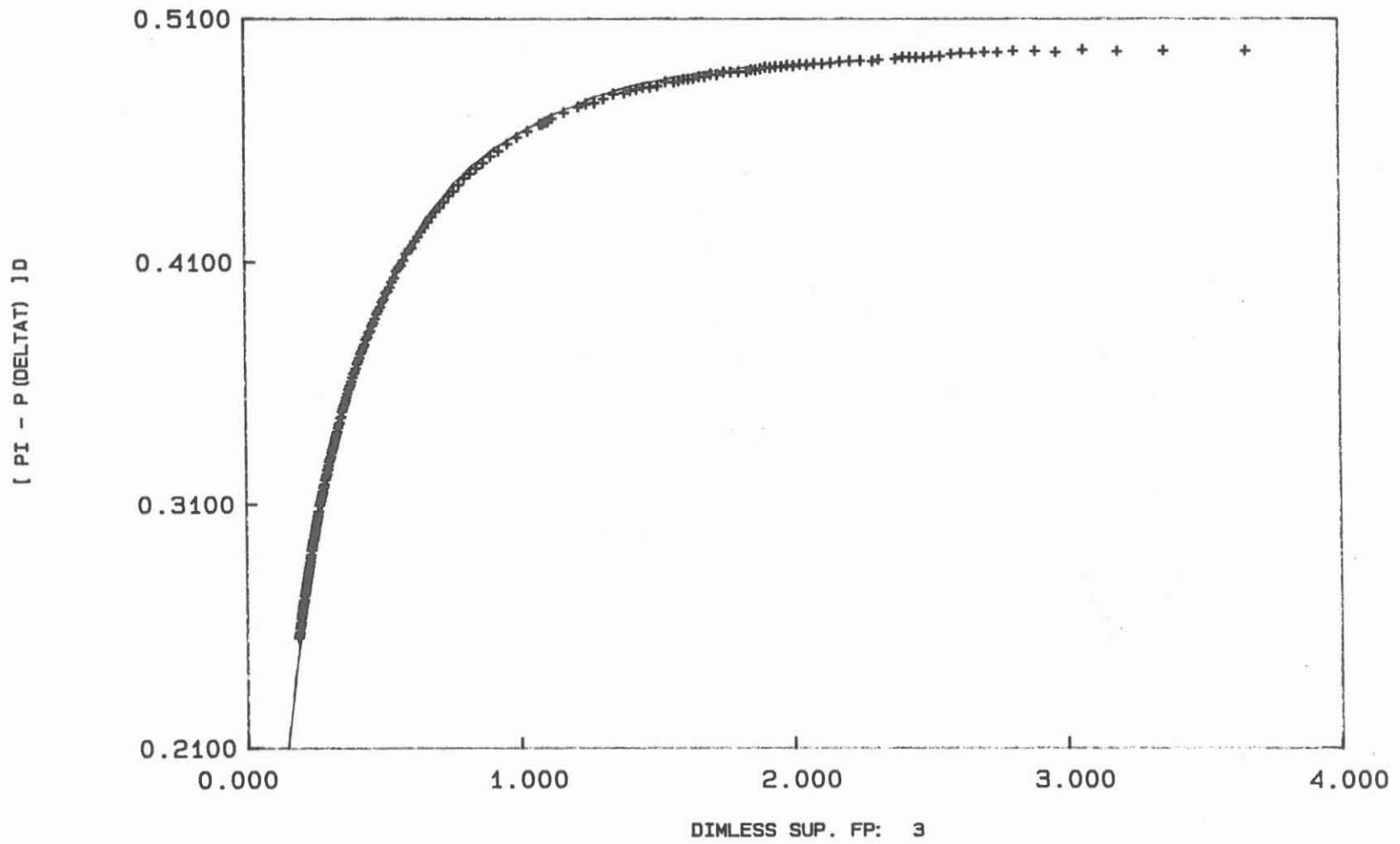


FIG.3B PRESSURE RECOVERY AFTER SLUG WITHDRAWAL (SWR)
 DIMENSIONLESS SUPERPOSITION MATCH
 GENERALIZED HORNER TYPE CURVE. NO. FLOW PERIOD 3

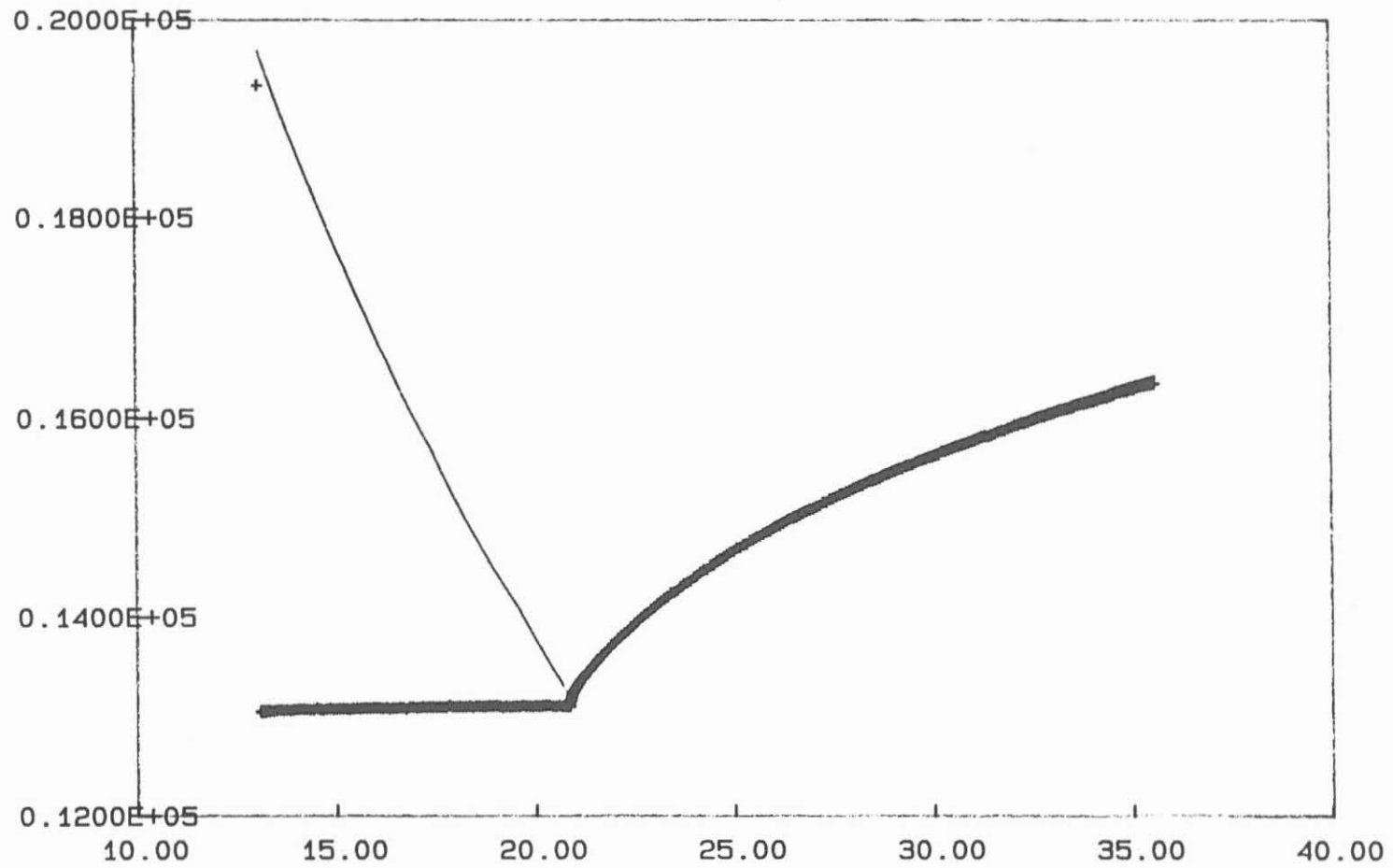


FIG.3C MEASURED AND SIMULATED PRESSURE RESPONSE FOR SWR/PERIOD
 STANDARD SIMULATION APPROACH
 PRESSURE IN KPA, ELAPSED TIME IN HOURS

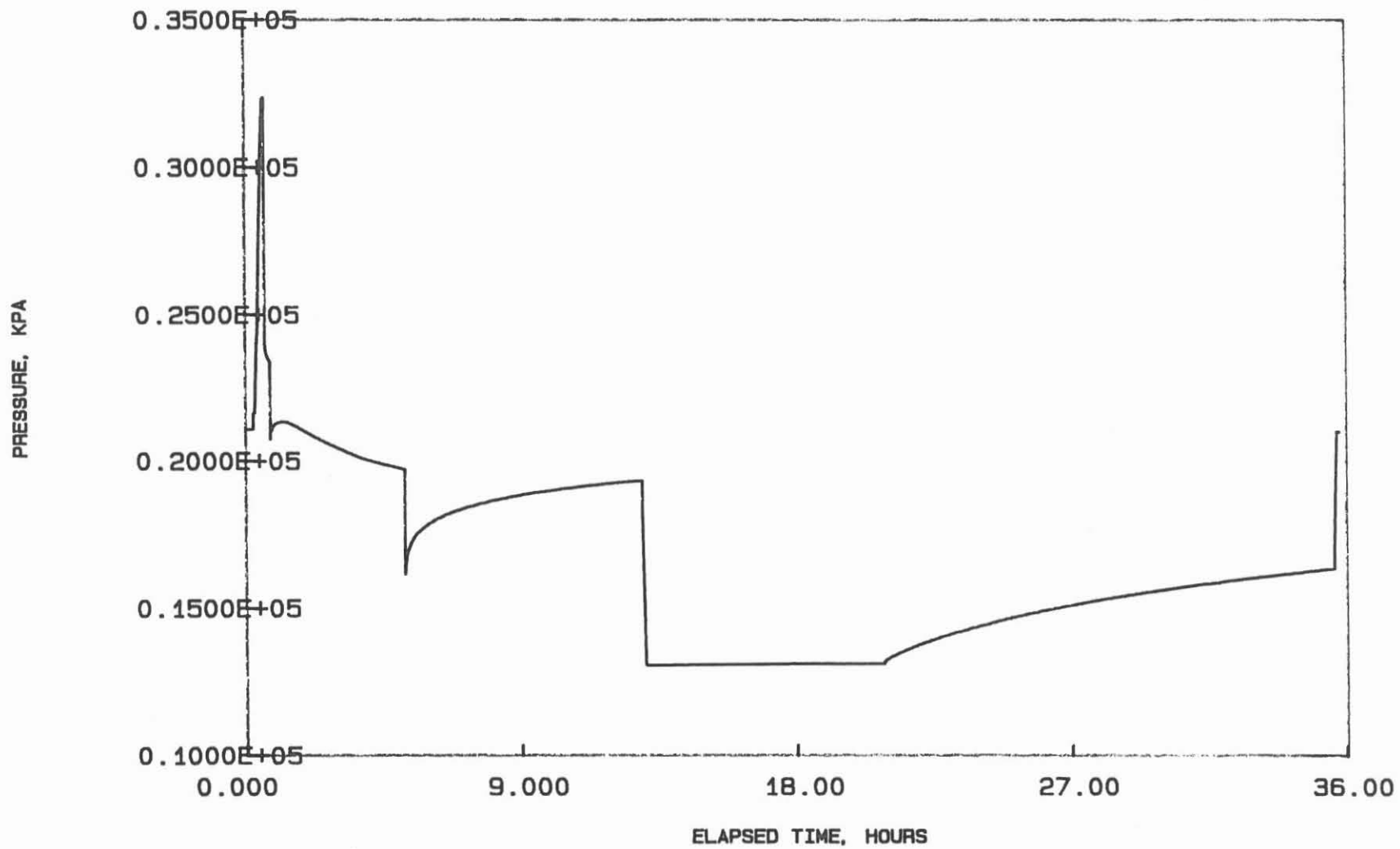


FIG.4 PRESSURE RESPONSE (P2) DURING TESTING
KTB VB-1A, INTERVAL 2190 - 2135

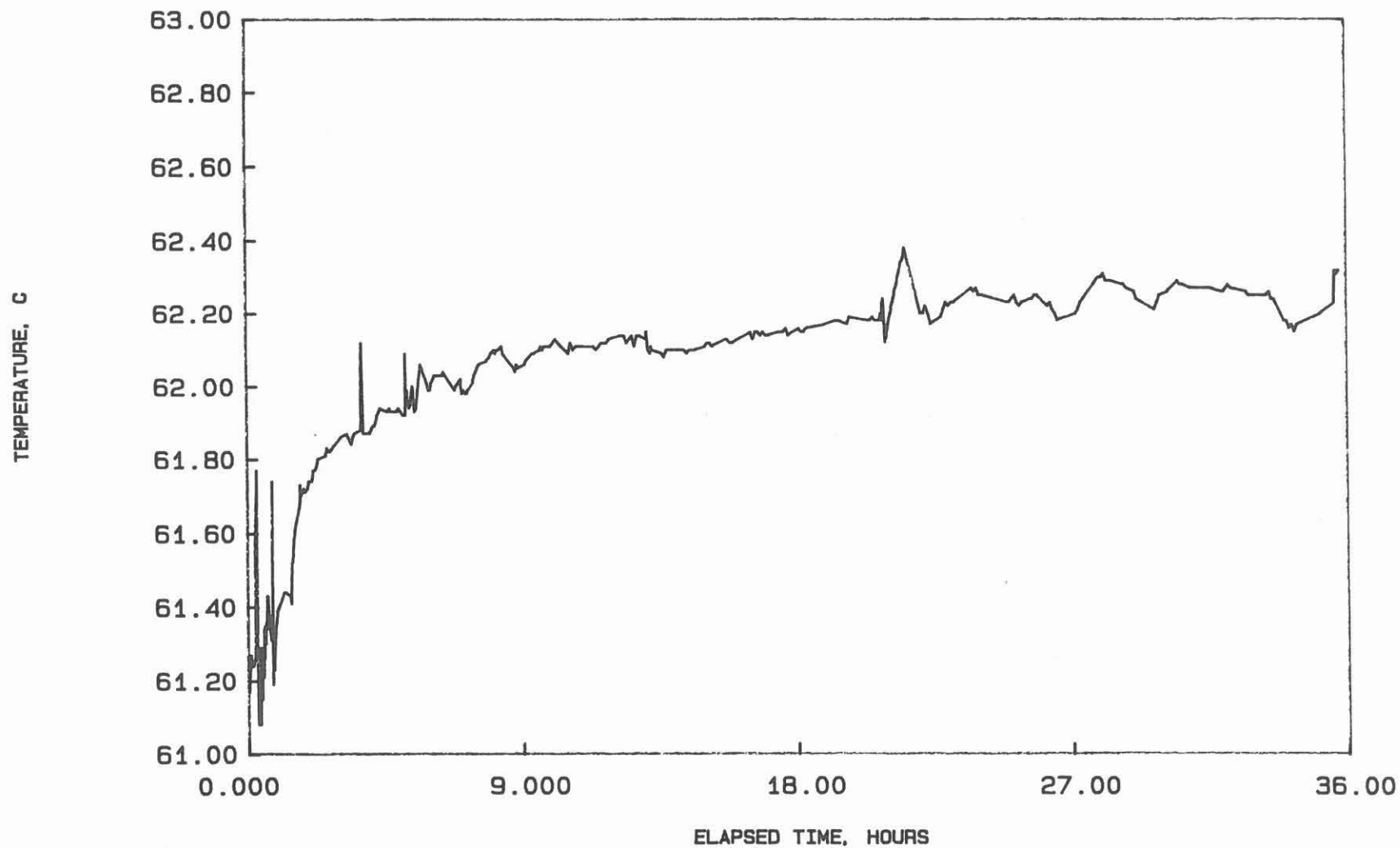
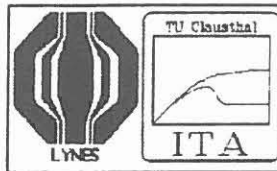


FIG.5 TEMPERATURE RESPONSE (T2) DURING TESTING
KTB VB-1A, INTERVAL 2190 - 2135



QUICK LOOK REPORT

BOHRUNG	: KTB VB-1a	ENDTEUFE	: 4000.1 ¹ m
DATUM	: 06.03-08.03.1990	INTERVALL	: HT-3
TOP	: 1373.73 m	BTTM	: 1388.79 m
ROHRSCUH	: 478.00 m	SPÜLUNGSDICHTE	: 1010.0 kgm ⁻³
INTERVALLLÄNGE	: 15.06 m	INTERVALLMITTE	: 1381.26 m
r _w	: 0.076m	r _u (3.5")	: 0.035m
p ₂ -TEUFE	: 1368.65 m	RINGRAUM STAND	: 1.60*m

DOPPEL-PACKER-TEST

- 1) Alle Teufen unter Referenzpunkt (R.P. - Tisch), 520.9 m ü. N.N.
- 2) Ringraum mit Spülung aufgefüllt

VORABINFORMATIONEN

STATISCHER DRUCK (P ₁)	:	13030kPa, (extrapoliert aus HT-1 Test)
POROSITÄT	:	0.01 (angenommen)
KOMPRESSIBILITÄT (WASSER)	:	4.28 10 ⁻¹⁰ Pa ⁻¹
TOTALE KOMPRESSIBILITÄT	:	4.28 10 ⁻¹⁰ Pa ⁻¹ (angenommen c _t =c _w)
BOREHOLE HISTORY	:	Der statische Wasserspiegel steht deutlich unter dem R.P. (50-70m). Durch den mit Spülung zu Tage aufgefüllten Ringraum wurde das Intervall einem langfristigen Überdruck ausgesetzt
GEOLOGIE	:	Meta-Gabbro (2160-2170m)
GEOPHYSIK	:	Das Kaliber Log weist ein um ca. 40% größeres Intervallvolumen auf (0.4m ³) als nach nominalem Durchmesser (6")

TESTINGENIEUR:

Dr.-Ing. L. Ostrowski

Notice: All interpretations of reports and plots contained herein are opinions based on analytical techniques described in the literature and ITE TU Clausthal cannot and do not, guarantee the accuracy or correctness of any interpretations, and ITE TU Clausthal shall not be liable or responsible for any loss, costs, damages, or expenses, incurred or sustained by the customer and or any third party resulting from any interpretations, recommendations and or results made by ITE TU Clausthal or its officers, agents, or employees.

ZUSAMMENFASSUNG DER TESTEREIGNISSE/ERGEBNISSE

EVENT	INF	PSR ²	PW1	SW
EL.TIME, [min]	25.3	124.6	1545.8	63.8
T ₁ /T _f , [°C]	39.9/40.9	40.9/41.7	41.6/41.8	41.8/41.9
P _{1i} /P _{1f} [bar]	137.6/138.0	138.0/138.6	138.7/137.2	137.2/137.1
P _{2i} /P _{2f} [bar]	136.9/255.0	255.0/136.3	67.2/84.0	67.1/67.1
P _{3i} /P _{3f} [bar]	138.1/138.4	138.4/137.8	138.1/137.5	137.6/137.9
q [m ³ s ⁻¹]	-	-	-	1.8E-10 ⁴
Q [m ³]	-	-	-	6.8E-07 ⁴
K [ms ⁻¹]	-	-	7.5E-15	-
k [m ²]	-	-	5.0E-22	-
T [m ² m]	-	-	7.5E-21	-
P _s at P ₁ [bar]	-	n.d. ¹	-	-
Head(P ₂) [m asl]	-	n.d. ¹	-	-
S [-]	-	-	6.3E-7	-
C _D [-]	-	-	5.0E01	-
s [-]	-	-	-0.8	-
FIGURE(S)	4,4a,5	4,4a,5	1a,b,c,	4,4a,5
TEMPERATURE EFF.	NO	NO	NO	NO
BH. HIST. EFF.	NO	YES ³	YES ³	YES ³
BOUNDARY EFF.	NO	NO	NO	NO
ANOMALY	NO	NO	NO	NO

1) Not determined - see comments

2) Includes EQB

3) See comments

4) Steady State calculated rate over SW period - see comments

ZUSAMMENFASSUNG DER TESTEREIGNISSE/ERGEBNISSE

EVENT	SWR ²	PW2		
EL.TIME, [min]	949.2	-		
T ₁ / T _f , [° C]	42.2/41.9	-		
P _{1 i} / P _{1 f} [bar]	137.1/136.6	-		
P _{2 i} / P _{2 f} [bar]	67.1/72.1	-		
P _{3 i} / P _{3 f} [bar]	138.0/137.4	-		
q [m ³ s ⁻¹]	0.0	0.0		
Q [m ³]	0.0	0.0		
K [ms ⁻¹]	8.7E-15	4.7E-15		
k [m ²]	5.8E-22	3.1E-22		
T [m ² m]	8.7E-21	4.7E-21		
(LAMBDA) [-]	-	-		
(OMEGA) [-]	-	-		
P _s at P ₁ [bar]	-	-		
Head(P ₁) [m asl]	-	-		
S [-]	6.3E-07	6.3E-07		
C _D [-]	5.0E+01	3.1		
s [-]	-0.8	2.2		
FIGURE(S)	2a-d,	3		
TEMPERATURE EFF.	NO	NO		
BH. HIST. EFF.	YES ¹	YES ¹		
BOUNDARY EFF.	NO	NO		
ANOMALY	NO	NO		

¹) See comments

²) Analyzed also as PW

KOMMENTAR:

Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse der "Quick-Look" Analyse des dritten hydraulischen Tests. Die Auswertung der Rohdaten wurde unter Anwendung der Programme TRIAS (ITA) und INTERPRET (Scientific Software-Intercomp) durchgeführt.

Die extrem niedrige Permeabilität des Testintervalls und der daraus resultierende starke Einfluß der "Borehole Pressure History" ließen die Bestimmung der äquivalenten Süßwasser-Druckspiegelhöhe nicht zu. Das Testintervall wurde einem länger andauernden Überdruck durch die Spülungssäule ausgesetzt. Erst nach Setzen des Packersystems und Trennung der Zone vom Steigrohrenstrang durch das Schließen des Shut-in Tools, wurde das Intervall dem Einfluß der Spülung entzogen. Es hätte jedoch mehrere Wochen gedauert (wie die Auswertung zeigt) bis die Zone ihren statischen Druck erreichen würde. Aus keinem der Testereignisse konnte daher in dem zur Verfügung stehenden Zeitrahmen die äquivalente Süßwasser-Druckspiegelhöhe abgeleitet werden.

Der erste Pulse Withdrawal (PW) wurde durch die Test Tool Manipulation stark beeinflusst. Schon sehr geringe Last, die beim Schließen des Shut-in Tools auf das Packersystem ausgeübt wurde, verursachte eine deutliche Druckstörung (Komprimierung des Wassers in dem praktisch dichten Testintervall). Es war daher nicht möglich PW1-Daten direkt zu matchen (Fig.1a). Der Vergleich der Steigung des von Tool Operation ungestörten Druck-Responses mit den simulierten Druckaufbaukurven (Fig.2b) läßt eine annähernde Abschätzung der Permeabilität zu. Die Prediction der Pressure-Recovery zeigt (Fig.1c), daß man mehrere Monate benötigen würde um einen vollständigen Druckaufbau zu erzielen.

Die kurze Slugphase brachte erwartungsgemäß keinen Zufluß. Die darauf folgende Schließphase wurde mit großer Sorgfalt eingeleitet. Das Shut-in Tool wurde millimeterweise zugefahren ohne Last auf das Test Tool auszuüben. Dadurch wurde erreicht, daß die "Early Time"-Daten sich für die Type Curve Matching Analyse als gut verwertbar herausstellten. Diese Daten wurden als Pulse Withdrawal (unter der Annahme, daß eine Stunde Fließzeit im Vergleich zur theoretisch notwendigen, wochenlangen Schließzeit als Puls zu betrachten ist) und als SWR nach einer Fließphase mit einer konstanten Rate analysiert. Für die SWR Analyse wurde die aus dem stationären Fluß resultierende Rate (für $k=5.0E-22$ m², $\mu=0.65$ mPas, $R_D=2$, und aus dem PW1-Ereignis resultierenden effektiven Drawdown von 17 bar) angenommen. Die Ergebnisse beider Analysen zeigen eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

Für eine genaue Analyse der Testereignisse von HT-3 ist die Berücksichtigung der "Borehole Pressure History" notwendig. Erst dann ist die genaue Aufstellung aller Initial- und Randbedingungen möglich. Andererseits, würde die Einbeziehung der "Pressure History" wahrscheinlich die Größenordnung der ermittelten Permeabilitäts-
werte nicht ändern.

LISTE DER ABBILDUNGEN:

- 1a. Pulse withdrawal, log-log plot, not matchable
- 1b. HT-3 PW1, Measured and Simulated Pressure Response, Early Time Data
- 1c. HT-3 PW1, Prediction of Shut-in Pressure Recovery Response for Various k-Values
- 2a. HT-3 PW2, Semi-log Match
- 2b. HT-3 PW2, Log-log Match
- 2c. HT-3 PW2, Log-log Match
- 2d. HT-3 PW2, Measured and Simulated Pressure Response
- 2e. HT-3 PW2, Log-log Match for Early Time Data ($1-P_D$) in an Extended Array
3. Match Trial of Pressure Recovery Data After 1-hour Flow Phase
4. Interval Pressure Sequence - Testing
- 4a. Interval Pressure Sequence - Testing without Packer Inflation
5. Interval Temperature Sequence - Testing

RAMEY TYPE CURVE TYPE B

BEST FORM FOR LATE-TIME DATA

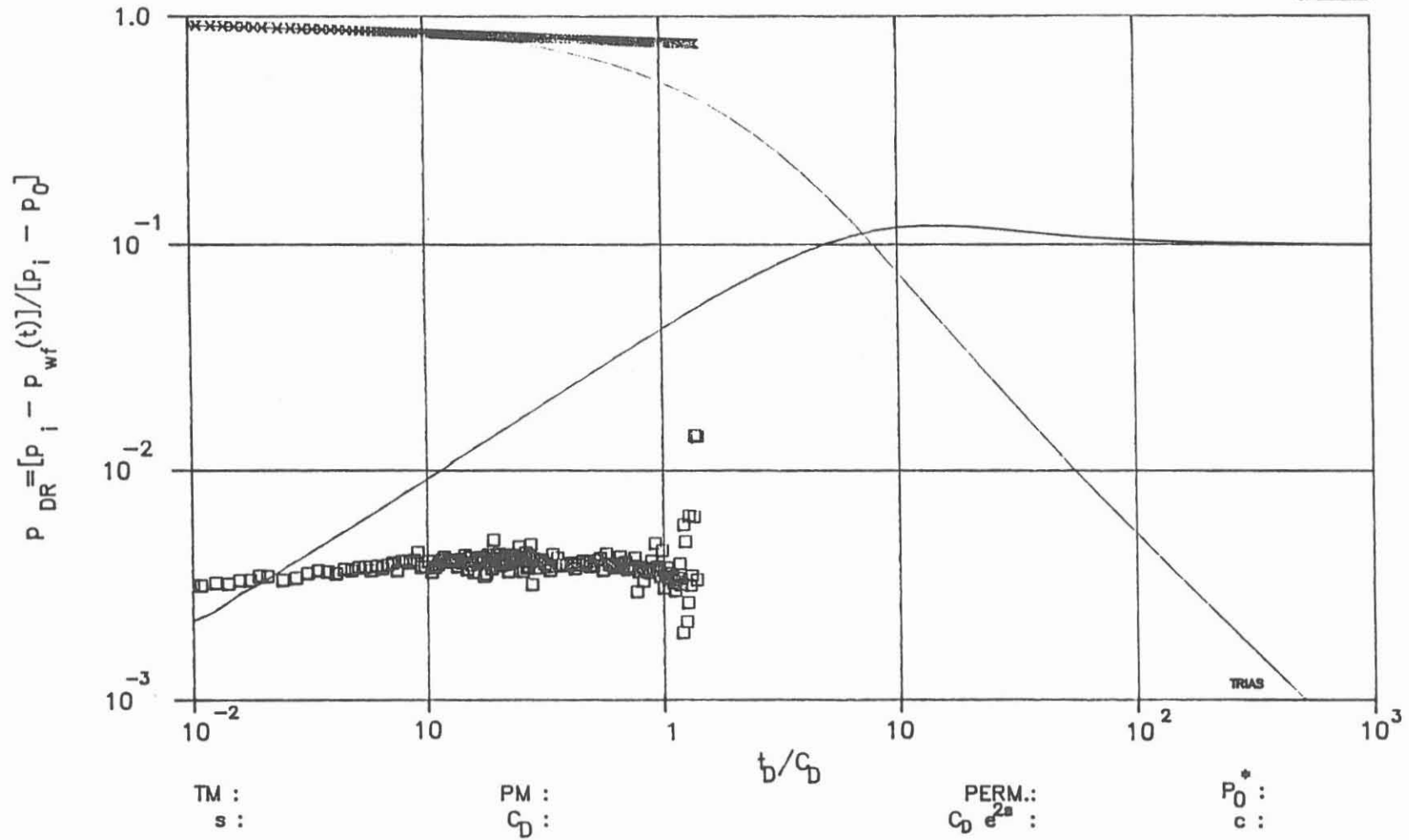


Fig.1a HT-3 Pulse With. 1, log-log plot, not matchable

RAMEY TYPE CURVE TYPE B
 BEST FORM FOR LATE-TIME DATA

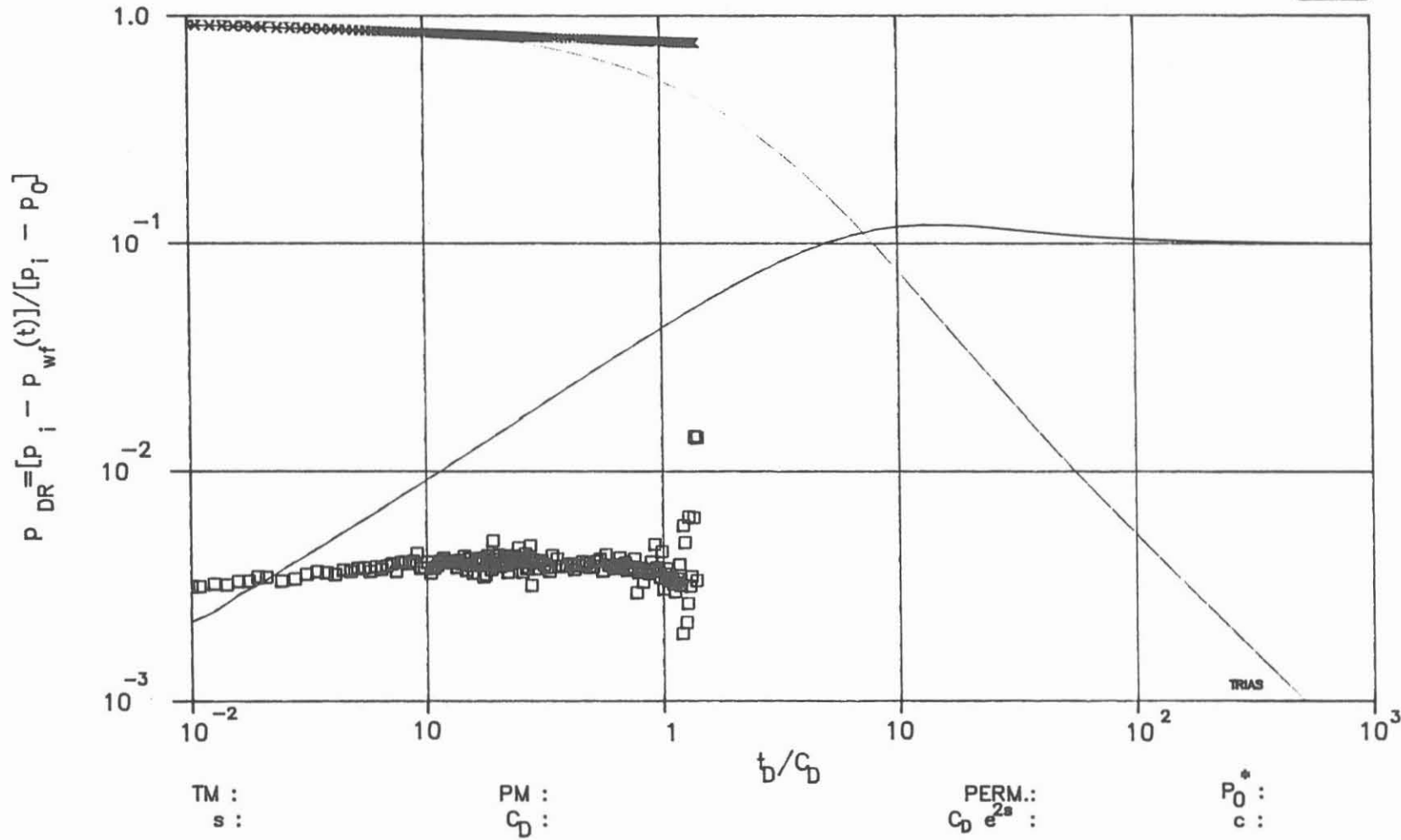
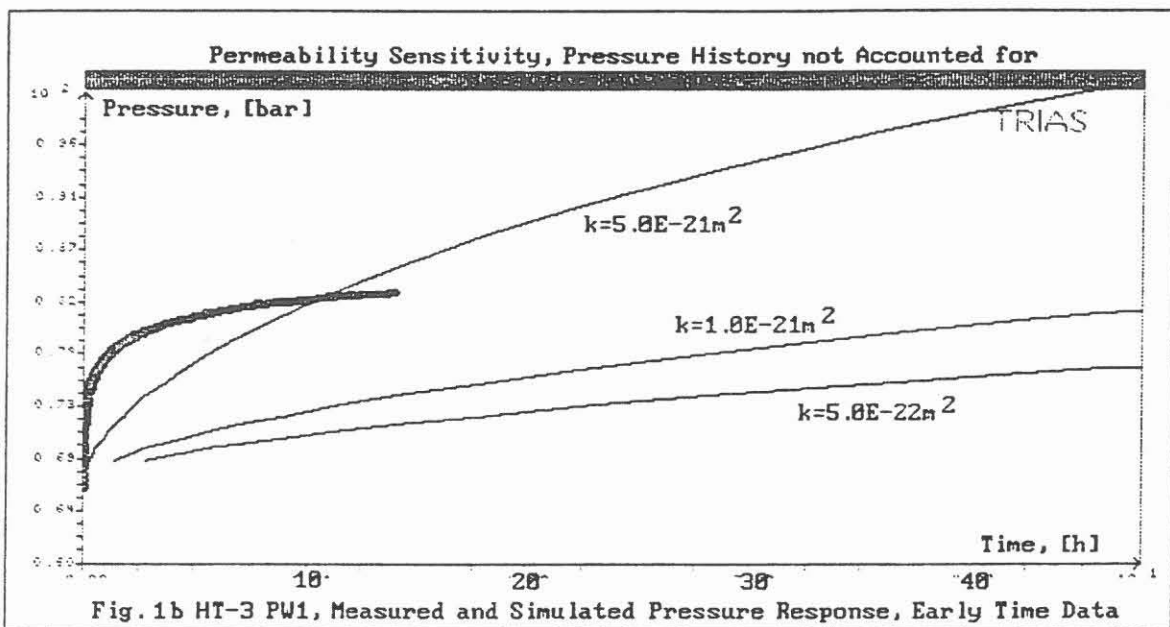
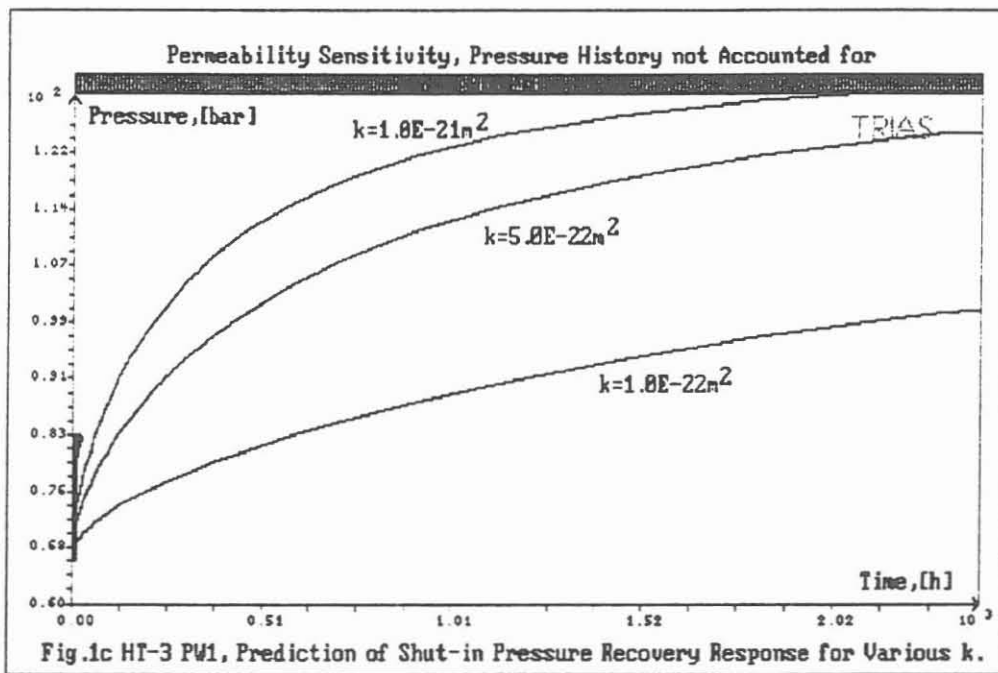


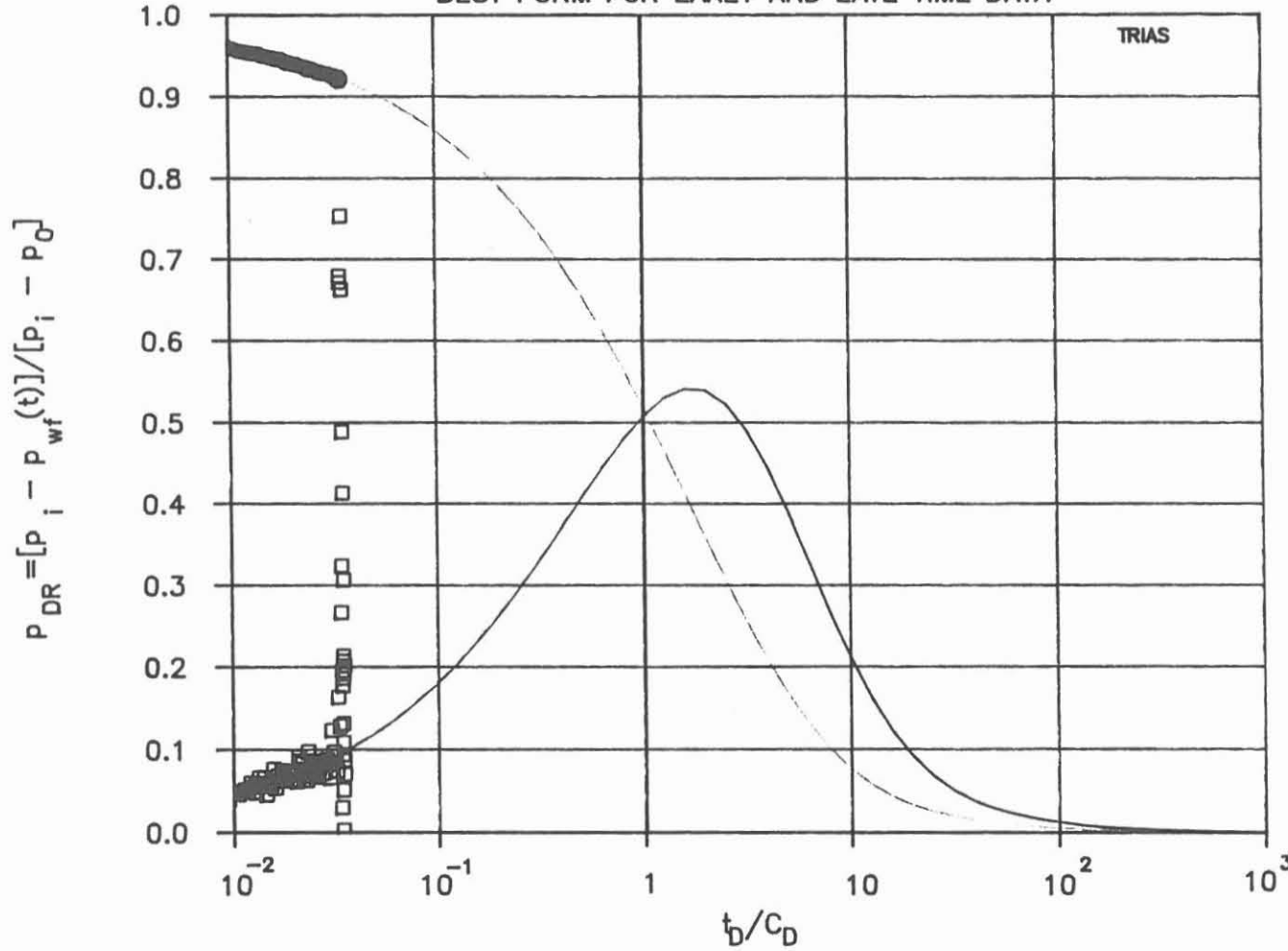
Fig.1a HT-3 Pulse With. 1, log-log plot, not matchable





RAMEY TYPE CURVE TYPE A

BEST FORM FOR EARLY AND LATE TIME DATA



TRIAS

- TM : 2.36E-003 H⁻¹
- PM : 1.00E+000
- PERM.: 5.82E-022 m²
- s : -8.0E-001
- C_D : 5.00E+001
- C_De^{2s} : 1.00E+001
- S : 6.30E-007

DIMLES PRESSURE vs TIME

Fig.2a HT-3 Pulse Withdrawal 2, Semi-log Match

RAMEY TYPE CURVE TYPE B BEST FORM FOR LATE-TIME DATA

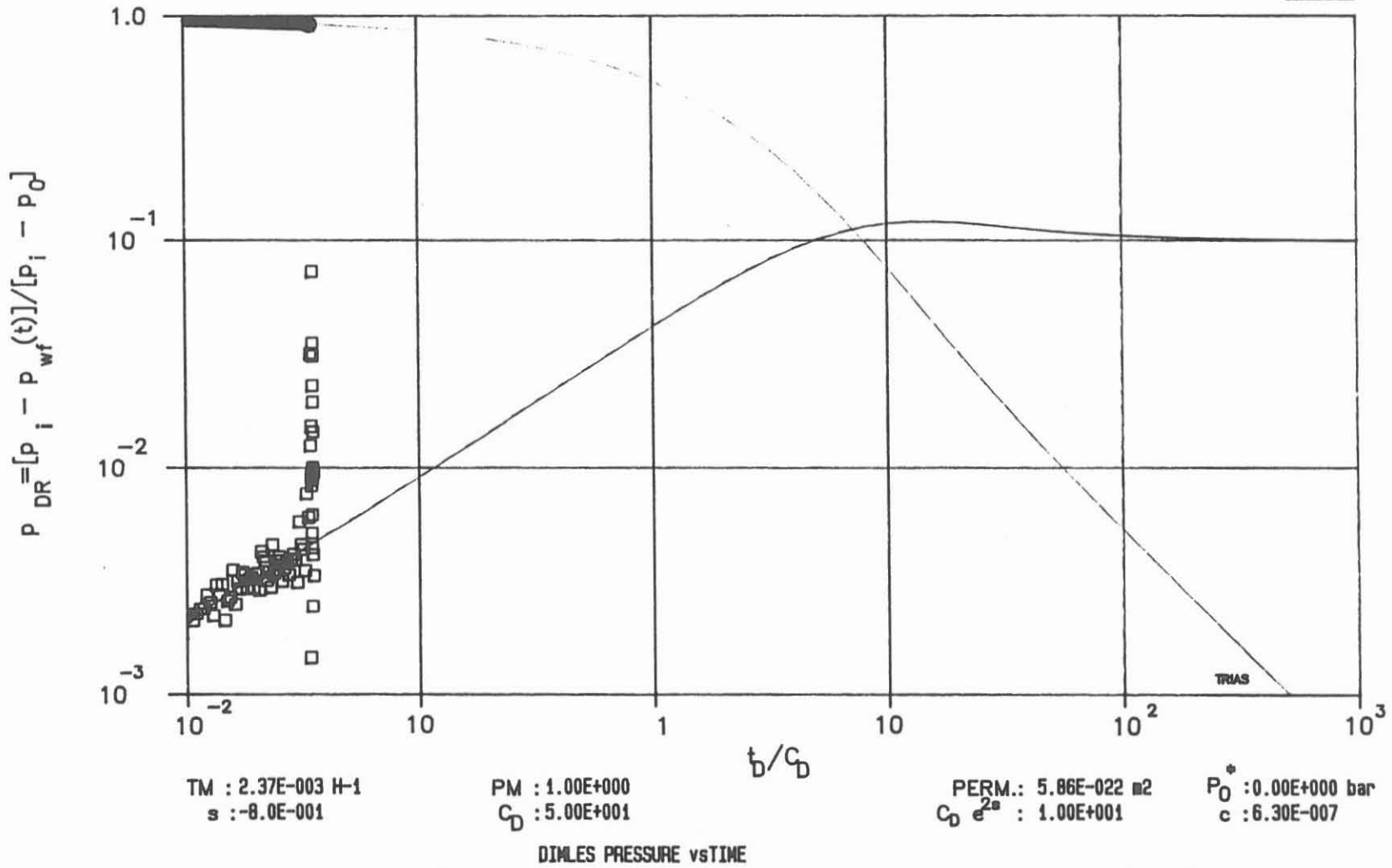


Fig.2b HT-3 Pulse Withdrawal 2, Log-log Match

RAMEY TYPE CURVE TYPE C
 BEST FORM FOR EARLY-TIME DATA

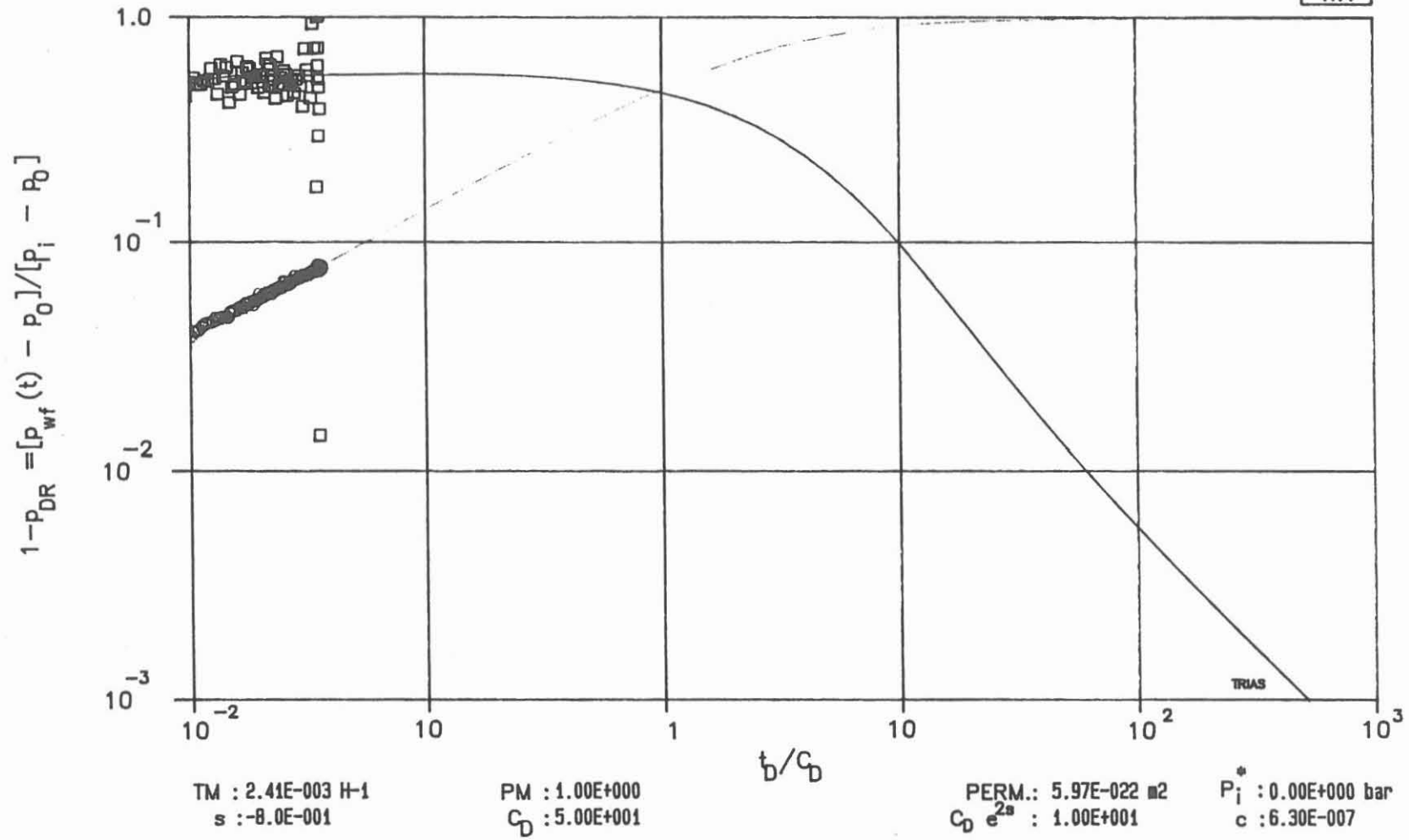
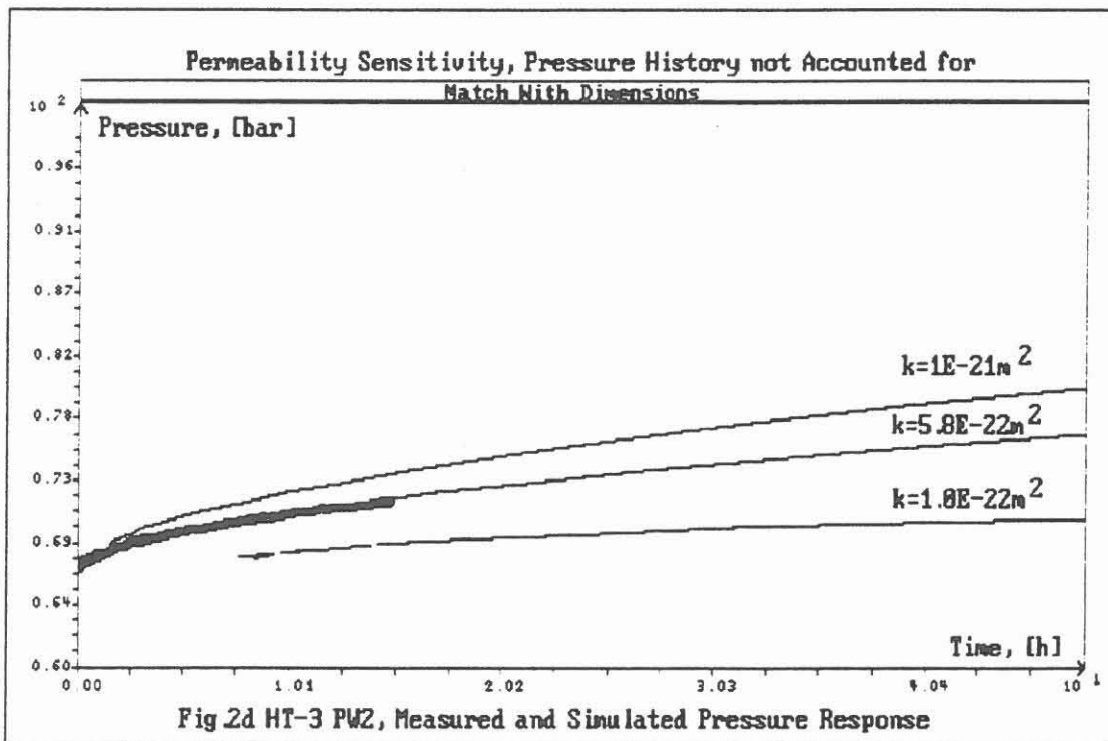


Fig.2c HT-3 Pulse Withdrawal 2, Log-log Match



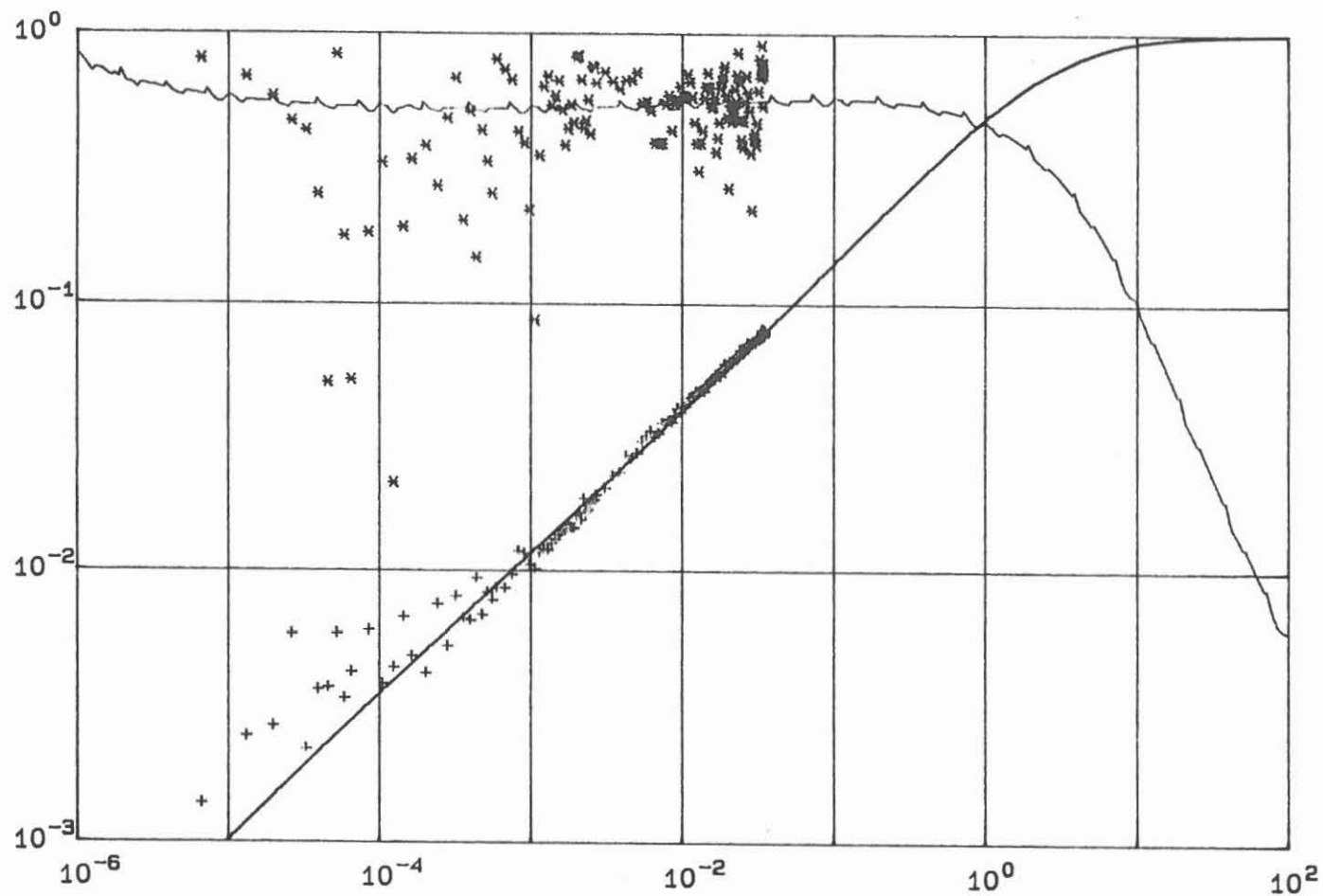


FIG.2E HT-3, PW2, LOG-LOG MATCH FOR EARLY TIME DATA (1-PD) IN AN EXTENDED ARRAY
 CDE2S=10
 Y-AXIS = DIMENSIONLESS PRESSURE AND DIMENSIONLESS PRESSURE FORM
 X-AXIS = DIMENSIONLESS TIME AND TIME, H

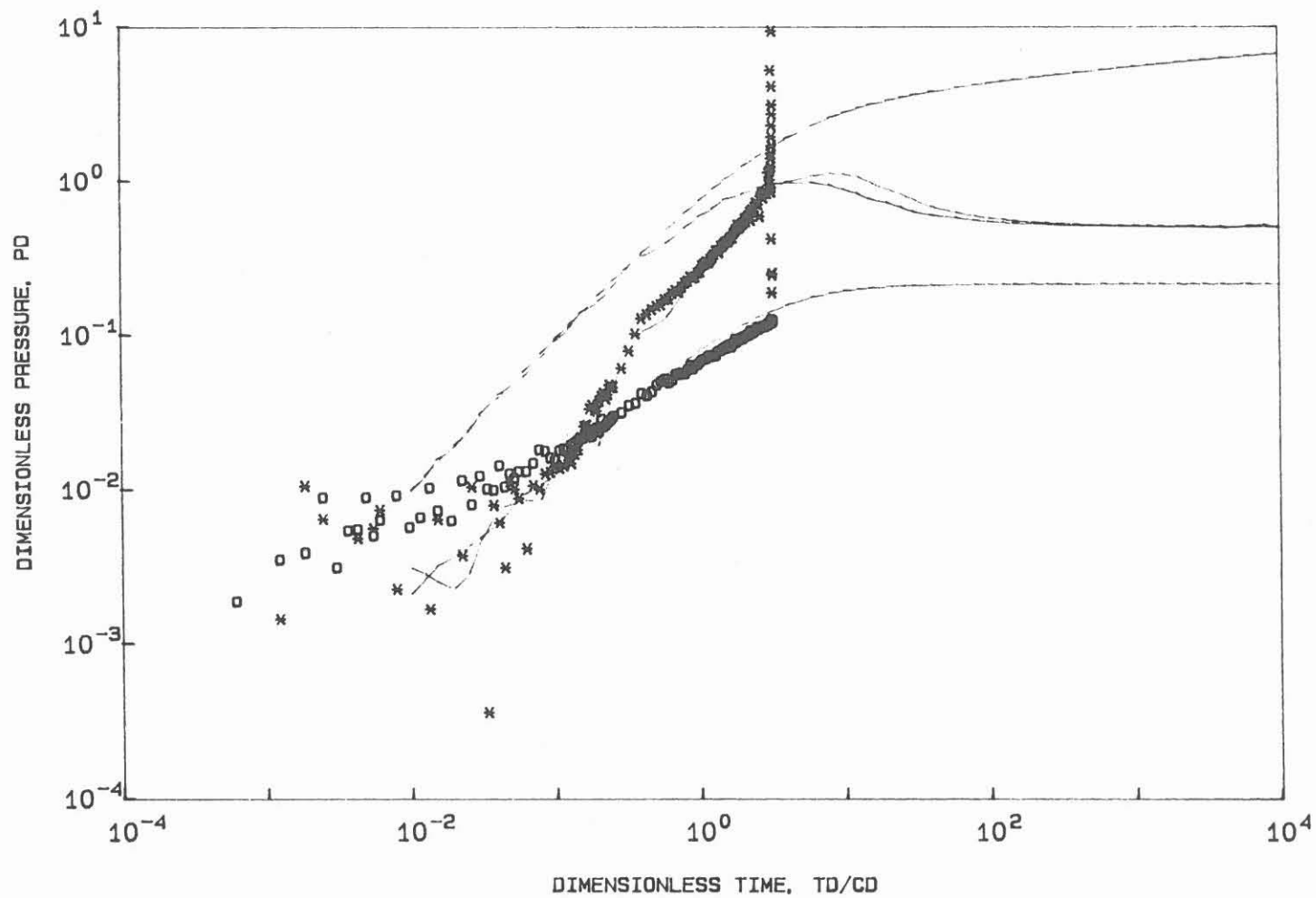


FIG.3 MATCH TRIAL OF PRESSURE RECOVERY DATA AFTER 1-HOUR FLOW PHASE WELL WITH WELLBORE STORAGE AND SKIN IN A RESERVOIR WITH HOMOGENEOUS BEHAVIOR DRAWDOWN TYPE CURVE, $CDe(2S) = 25.0$

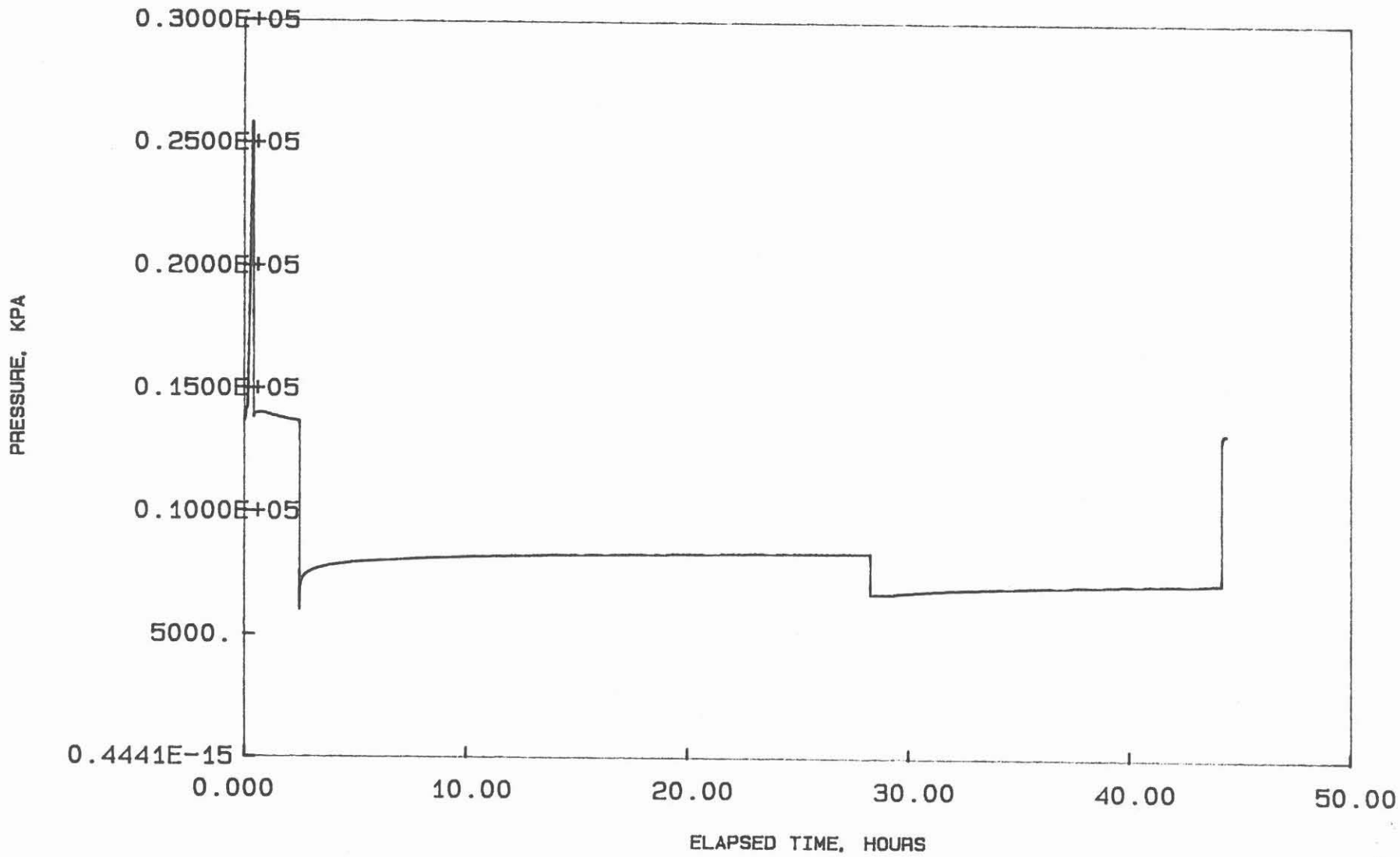


FIG.4 PRESSURE RESPONSE (P2) DURING TESTING
KTB VB-1A, INTERVAL 1373.73 - 1388.79

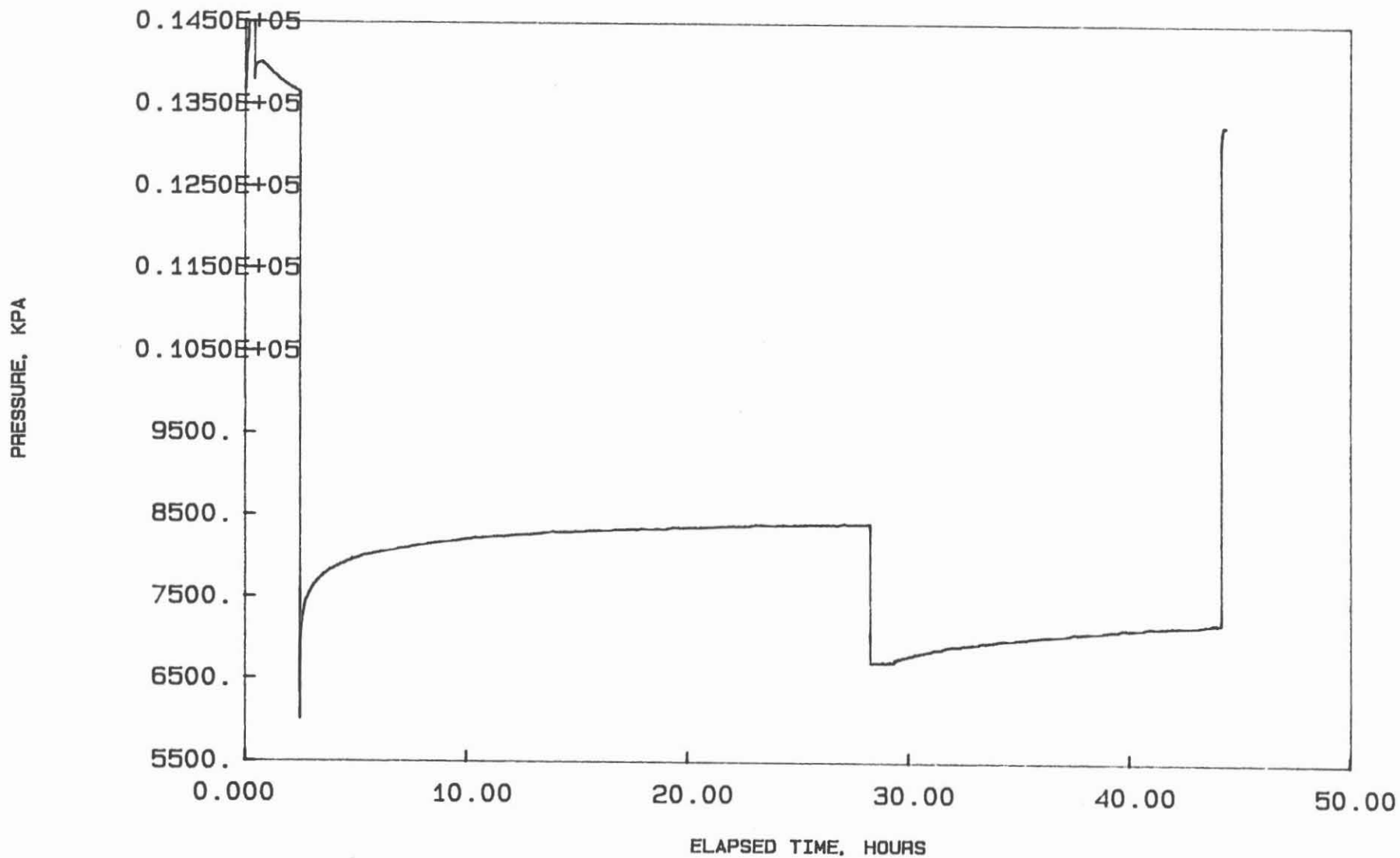


FIG.4B PRESSURE RESPONSE (P2) DURING TESTING WITHOUT PACKER INFLATION
KTB VB-1A, INTERVAL 1373.73 - 1388.79

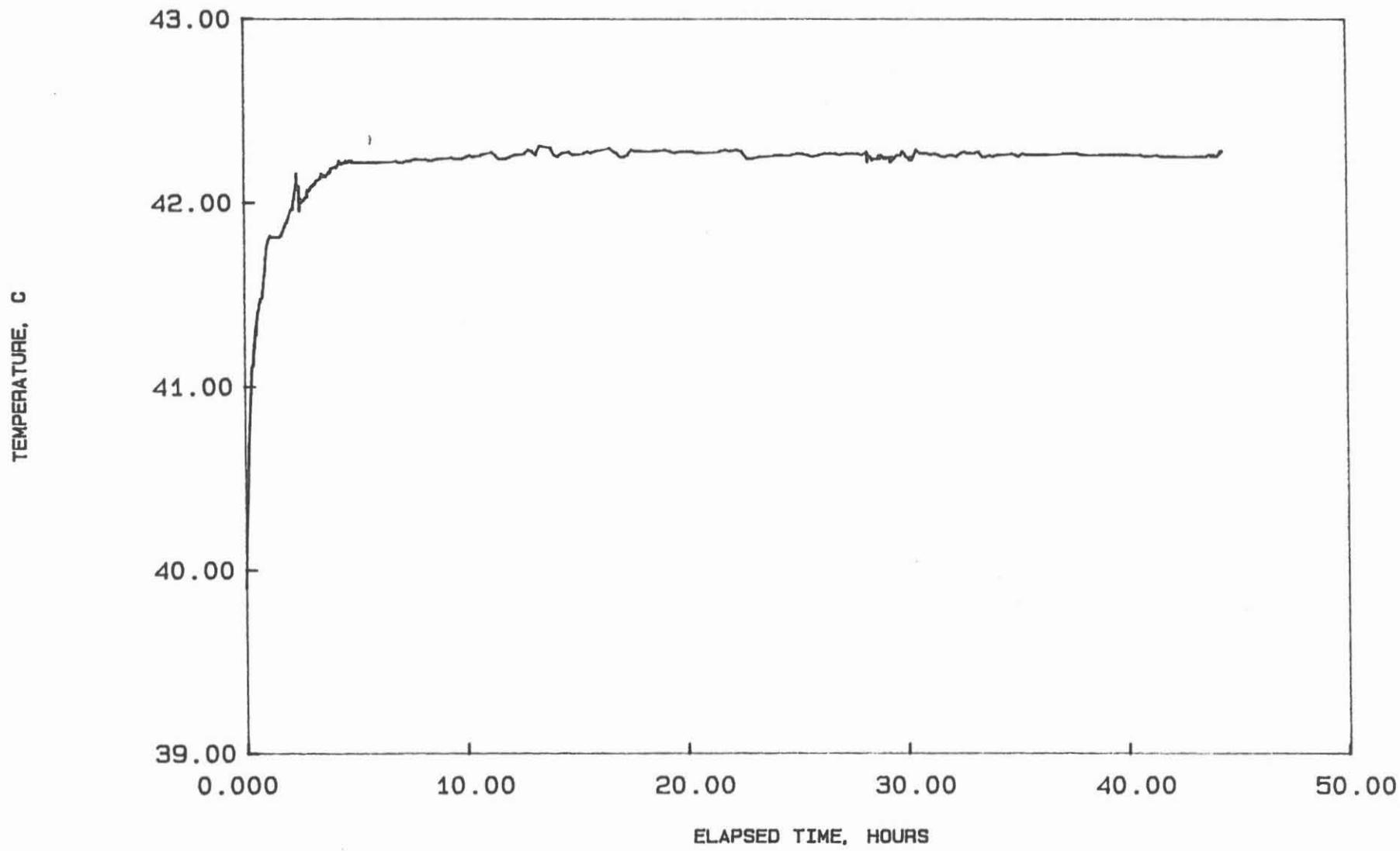
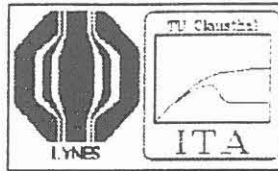


FIG.5 TEMPERATURE RESPONSE (T2) DURING TESTING
KTB VB-1A, INTERVAL 1373.73 - 1388.79



QUICK LOOK REPORT

BOHRUNG	: KTB VB-1a	ENDTEUFE	: 4000.10 ¹ m
DATUM	: 05.04-12.04.1990	INTERVALL	: HT-4
TOP (Paker)	: 1099.29 m	BTTM	: 4000.10 m
ROHRSCHUH	: 3850.05 m	SPÜLUNGSDICHTE	: 1000.0 kgm ⁻³
INTERVALLLÄNGE	: 150.05 m	INTERVALLMITTE	: 3925.08 m
r _w	: 0.076m	r _a (2 ⁷ /8")	: 0.029m
p ₂ -TEUFE	: 1094.69 m	RINGRAUM STAND	: 1.50 ⁺ m

SINGLE-PACKER-TEST

- ¹) Alle Teufen unter Referenzpunkt (R.P. - Tisch), 520.9 m ü. N.N.
²) Ringraum mit Frischwasser aufgefüllt

VORABINFORMATIONEN

STATISCHER DRUCK (P ₁)	: 10780 kPa (geschätzt, rho _w =995 kg/m ³)
POROSITÄT	: 0.01 (angenommen)
VISKOSITÄT	: 2.6 10 ⁻⁴ Pas (für 110° C)
KOMPRESSIBILITÄT (WASSER):	4.4 10 ⁻¹⁰ Pa ⁻¹
TOTALE KOMPRESSIBILITÄT	: 4.4 10 ⁻¹⁰ Pa ⁻¹ (angenommen c _t =c _w)
BOREHOLE HISTORY	: Die Testzone wurde kurz vor dem Test einem durch den Ausbau des Gestänges bedingten Unterdruck ausgesetzt
GEOLOGIE	: chloritisierter Biotit-Sillimanit Gneis mit Amphibolit Einschaltungen
GEOPHYSIK	: Kaliber Log von 25.2 weist ein um ca. 6% größeres Intervallvolumen auf als nach nominalem Durchmesser (6")

TESTINGENIEUR:

Dr.-Ing. L. Ostrowski

Notice: All interpretations of reports and plots contained herein are opinions based on analytical techniques described in the literature and ITE TU Clausthal cannot and do not guarantee the accuracy or correctness of any interpretations, and ITE TU Clausthal shall not be liable or responsible for any loss, costs, damages, or expenses, incurred or sustained by the customer and or any third party resulting from any interpretations, recommendations and or results made by ITE TU Clausthal or its officers, agents, or employees.

ZUSAMMENFASSUNG DER TESTEREIGNISSE/ERGEBNISSE

EVENT	INF	PSR ²	SW	SWR
EL.TIME, [min]	20.5	137.3	95.1	424.4
T ₁ /T _f , [°C]	34.9/35.2	35.2/35.4	35.4/35.8	35.8/35.3
P _{2i} /P _{2f} [bar]	108.9/225.2	225.2/107.2	48.3/74.7	74.7/108.0
q [m ³ s ⁻¹]	-	-	1.25E-04 ⁵	0.0
Q [m ³]	-	-	0.713	0.0
K [ms ⁻¹]	-	-	7.5E-09	³)
k [m ²]	-	-	2.0E-16	³)
T [m ² m]	-	-	3.0E-14	³)
P _s at P ₁ [bar]	-	n.d. ¹	-	107.96
Head(P ₂) [m asl]	-	n.d. ¹	-	522.0 ⁴
S [-]	-	-	6.4E-06	-
C _D [-]	-	-	1.1E+04	-
s [-]	-	-	18.4	-
FIGURE(S)	3a, 4	3a, b, 4	1a-d, 3b, 4	2, 3b, 4
TEMPERATURE EFF.	NO	NO	NO	NO
BH. HIST. EFF.	NO	POSSIBLE	NO	NO
BOUNDARY EFF.	NO	NO	NO	NO
ANOMALY	NO	NO	NO	YES ³

¹) Pressure not fully stabilized

²) Includes EQB, shut-in tool was leaking at the beginning of this period and was opened and closed again to get the full isolation

³) Running in the sucker rods resulted in pressure distortion making the data not analyzable

⁴) To be corrected for borehole deviation

⁵) Average rate during the SW period

ZUSAMMENFASSUNG DER TESTEREIGNISSE/ERGEBNISSE

EVENT	RW		ANNULUS #1	ANNULUS #2
EL.TIME, [h]	76.0		32.0	50.3
T ₁ / T _f [° C]	35.3 / ---.---		10.2 / 5.6	25.7 ² / 14.3
P ₂₁ / P _{2f} [bar]	108.0 / ---.---		4.75 / 3.47	2.39 / 2.05
q ₁ / q _f [m ³ s ⁻¹]	2.3 / 1.6E-04		-	-
Q [m ³]	71.0 ³		-	-
K [ms ⁻¹]	*		-	-
k [m ²]	*		-	-
T [m ² m]	*		-	-
(LAMBDA) [-]	*		-	-
(OMEGA) [-]	*		-	-
P _s at P ₁ [bar]	*		-	-
Head(P ₁) [m asl]	*		-	-
S [-]	*		-	-
C _D [-]	*		-	-
s [-]	*		-	-
FIGURE(S)	3, 4 & APP.A		APPENDIX B	APPENDIX B

TEMPERATURE EFF.	*		POSSIBLE	POSSIBLE
BH. HIST. EFF.	*		NO	NO
BOUNDARY EFF.	*		NO	NO
ANOMALY	*		NO	NO

- ¹) Malfunction of downhole pressure monitoring system - see comments and APPENDIX A
- ²) Temperature at pressure transducer due to storing in heated container
- ³) Estimated - from the elapsed time of 41 hours on significant gas volume was produced making the exact rate measurement impossible - see comments

KOMMENTAR:

Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse der "Quick-Look" Analyse des vierten hydraulischen Tests. Die Auswertung der Rohdaten wurde unter Anwendung der Programme TRIAS (ITA) und INTERPRET (Scientific Software-Intercomp) durchgeführt.

Die PSR Phase wurde durch das nicht vollständig geschlossene Schließventil gestört. Die Leckage wurde nach wiederholter Betätigung des Shut-in Tools behoben. Nach dem vollständigem Druckausgleich wurde ein Slug Withdrawal Test durchgeführt. Die Auswertung ergab eine Permeabilität von 0.2 mD bei einem relativ hohen Skinfaktor von 18.4. Während der darauf folgenden Schließphase wurde das Pumpgestänge eingebaut. Die Druckdaten wurden dadurch nachhaltig beeinflusst. Es war daher nicht möglich eine Analyse der Daten durchzuführen. Fig. 2 zeigt (nur zur Illustrationszwecken) das Match für die frühen (ungestörten) Daten des Shut-ins mit der Type Curve $C_{De}^{2s}=10^{20}$.

Aufgrund der Ergebnisse des Slug Tests wurde eine Pumprate von ca. 13 bis 14 l/min für die Pumpphase festgelegt. Vor dem Anpumpen wurde das Schließventil geöffnet, da nach dem Aufsetzen des Antriebsmotors keine Bewegung des Teststranges möglich war. Zeitgleich mit dem Pumpenbeginn zeigten sich erste "Misreadings" der Druckmeßsonde. Nach ca. 3 Stunden war praktisch keine Druckmessung mehr möglich. Die durchgeführte Simulation (Appendix A) ergab, daß bei einer Pumpleistung von 14 l/min keine Gefahr für das Trockenlaufen der Pumpe besteht. Daher wurde die Pumpe auf maximale Förderleistung von ca. 14.5 l/min eingestellt, um eine bestmögliche Beprobung in kurzer Zeit zu ermöglichen. Nach 41 Stunden Pumpzeit wurden relativ große Mengen von freiem Gas (geschätzt $0.8 \text{ m}^3(V_n)/\text{m}^3$) in der "Flow Line" festgestellt. Dieses hatte eine erhebliche Messungenauigkeit des Durchflußmessers zu Folge. Es ist aber davon auszugehen, daß die mittlere Wasserförderrate in dem Bereich um 14 l/min einzuordnen ist (siehe Fig.5). Die Gesamtfördermenge kann daher nur annähernd mit 71 m^3 geschätzt werden.

LISTE DER ABBILDUNGEN und APPENDICES:

- 1a. Slug withdrawal, semi-log match
- 1b. Slug withdrawal, log-log match
- 1c. Slug withdrawal, log-log match (1-P_D)
- 1d. Slug withdrawal, Measured and Simulated Pressure Response
2. Illustration of Pressure Recovery data distortion due to the running in the pump, log-log match of early time data
- 3a Interval Pressure Sequence - Testing
- 3b. Interval Pressure Sequence - Testing without Packer Inflation
4. Interval Temperature Sequence - Testing
5. Pumping Rate Sequence - Testing

APPENDIX A

Prediction of Drawdown and Shut-in Response during Pump Test

- A1. Simulation of Pressure Response during Pumping for q=141/min .

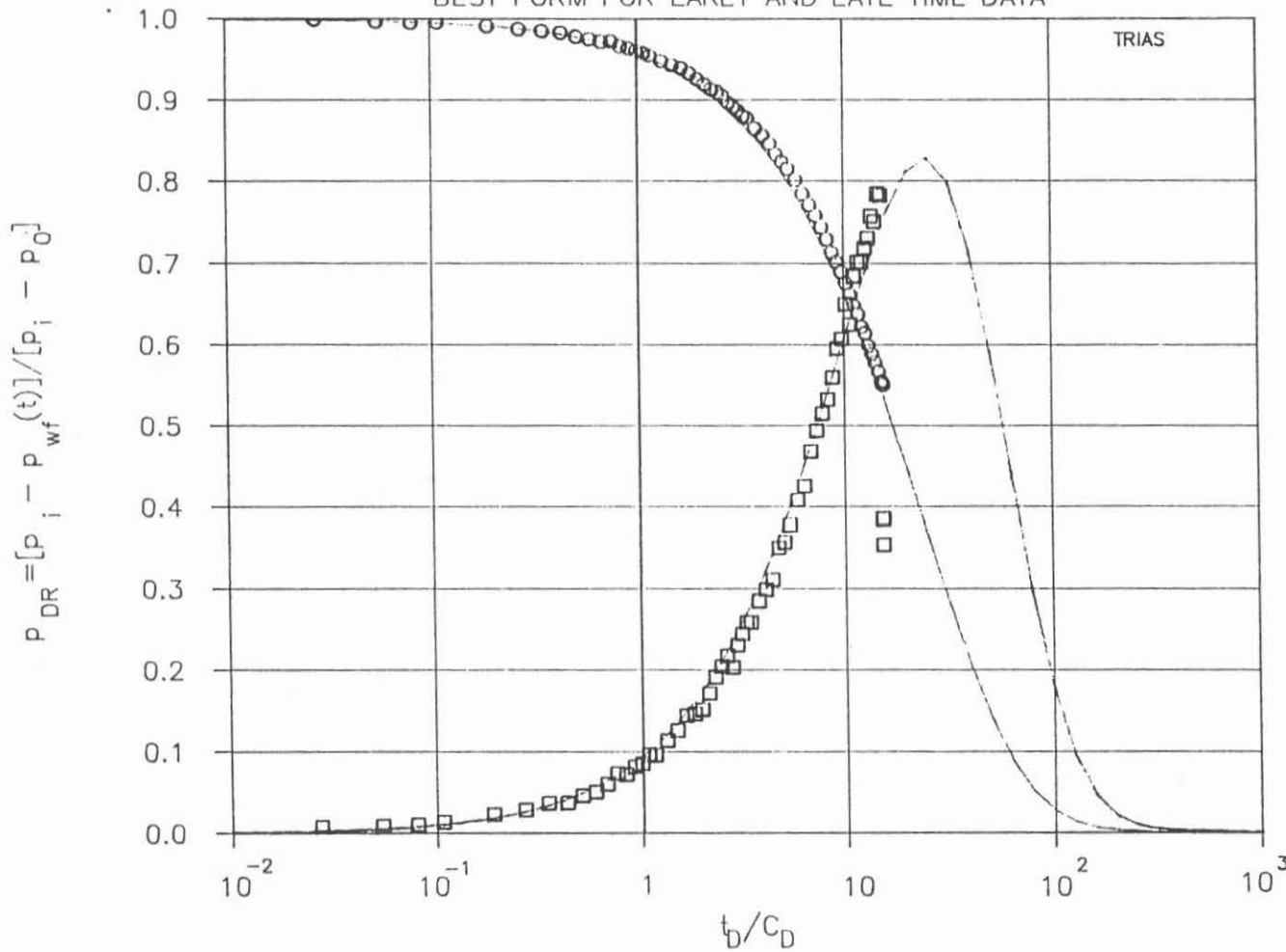
APPENDIX B

Testing of annulus space between 5.5" and 8.625" casing

- B1. Annulus Pressure Response - Test #1
- B2. Annulus Pressure Response - Test #2

RAMEY TYPE CURVE TYPE A

BEST FORM FOR EARLY AND LATE TIME DATA



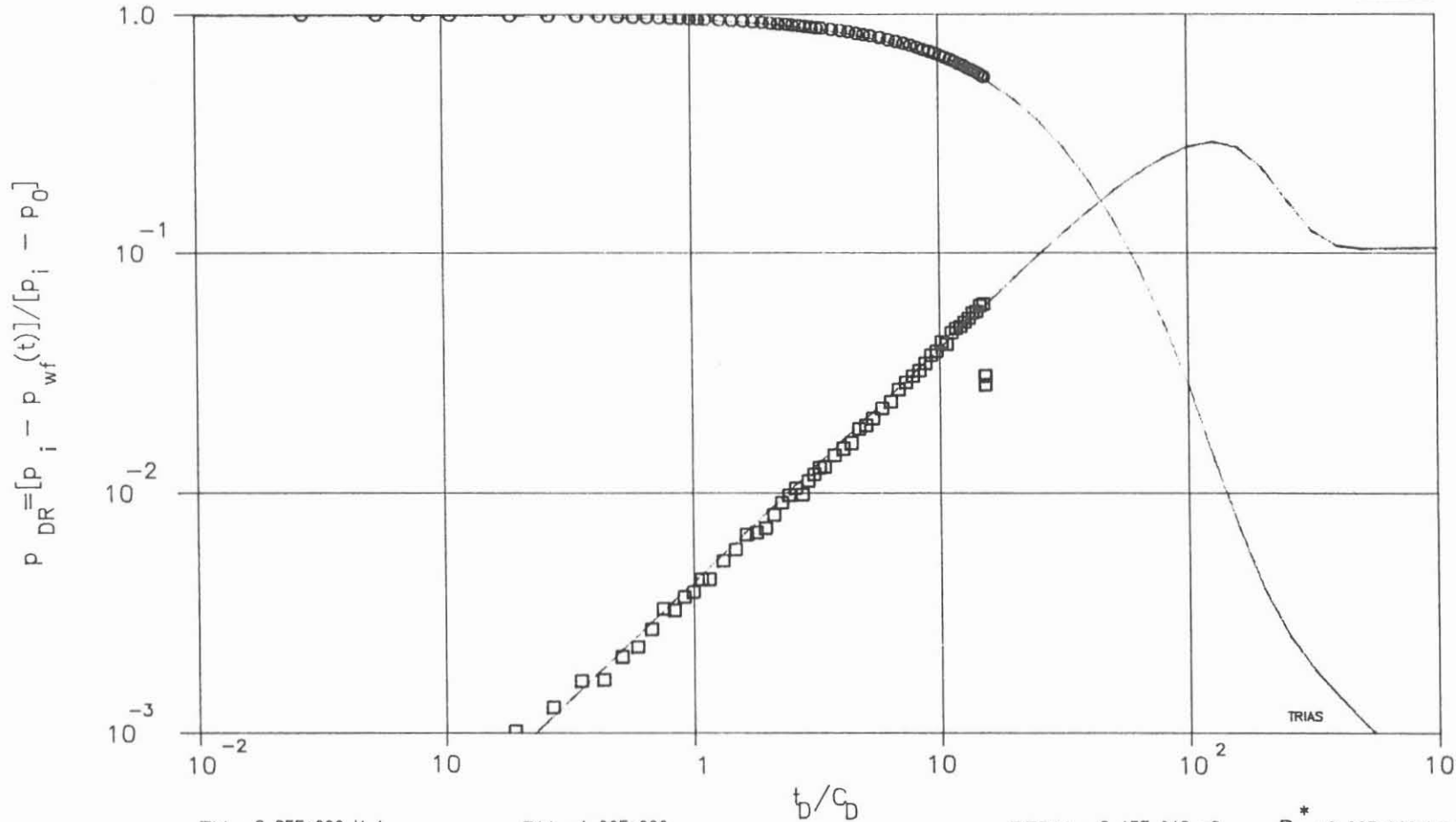
TM : 9.65E+000 H⁻¹
 PM : 1.00E+000
 PERM.: 2.15E-016 m²
 s : 1.84E+001
 C_D : 1.10E+004
 C_De^{2s} : 1.00E+020
 S : 6.41E-006

DIMLES PRESSURE vs TIME

Fig.1a HT-4 Slug Withdrawal, Semi-Log Match

RAMEY TYPE CURVE TYPE B

BEST FORM FOR LATE-TIME DATA



TM : 9.65E+000 H-1
s : 1.84E+001

PM : 1.00E+000
C_D : 1.10E+004

PERM.: 2.15E-016 m²
C_D e^{2s} : 1.00E+020

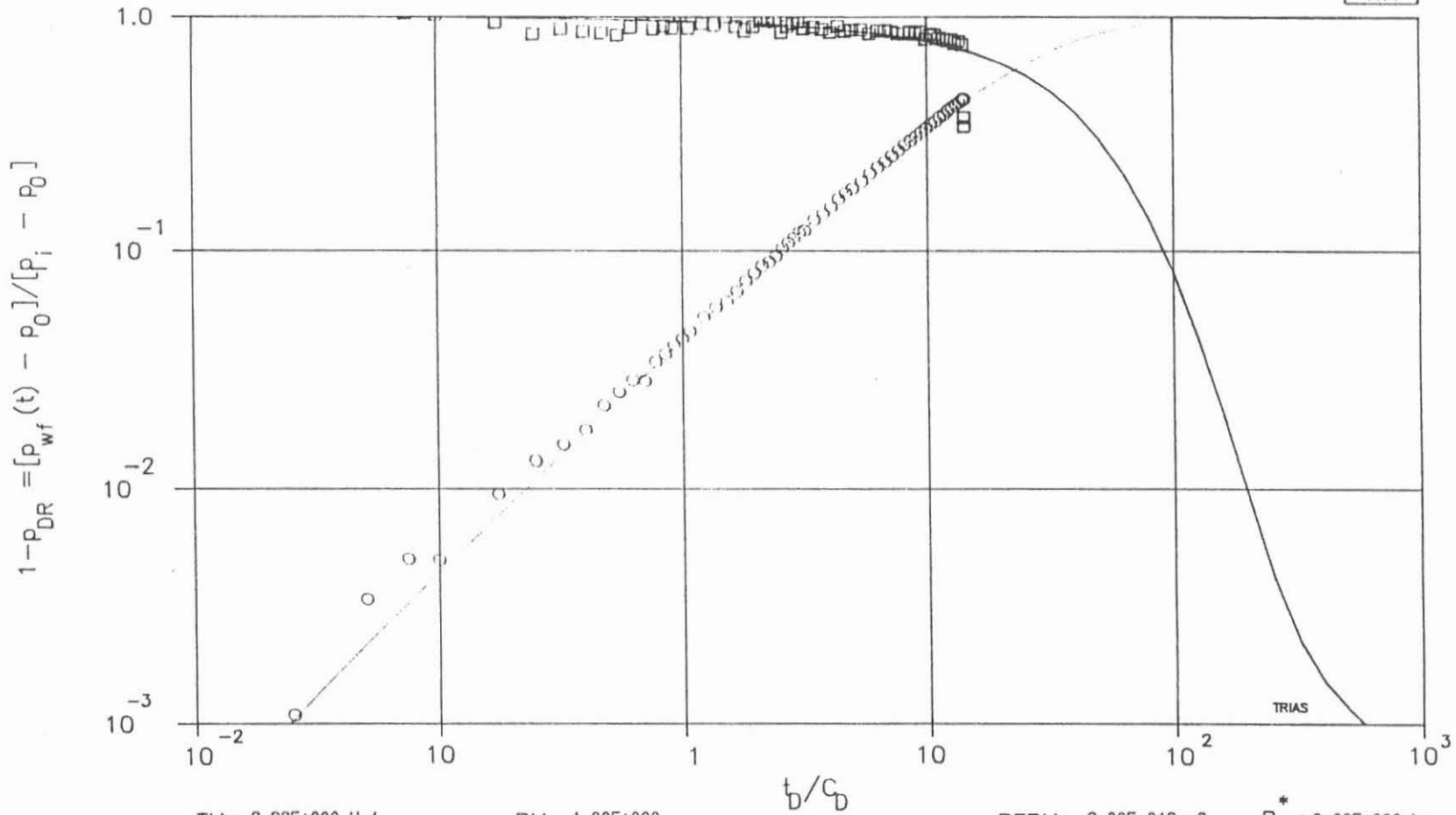
P₀* : 0.00E+000 bar
c : 6.41E-006

DIMLES PRESSURE vs TIME

Fig.1b HT-4 Slug Withdrawal, Log-Log Match

RAMEY TYPE CURVE TYPE C

BEST FORM FOR EARLY-TIME DATA



TM : 8.98E+000 H-1
s : 1.84E+001

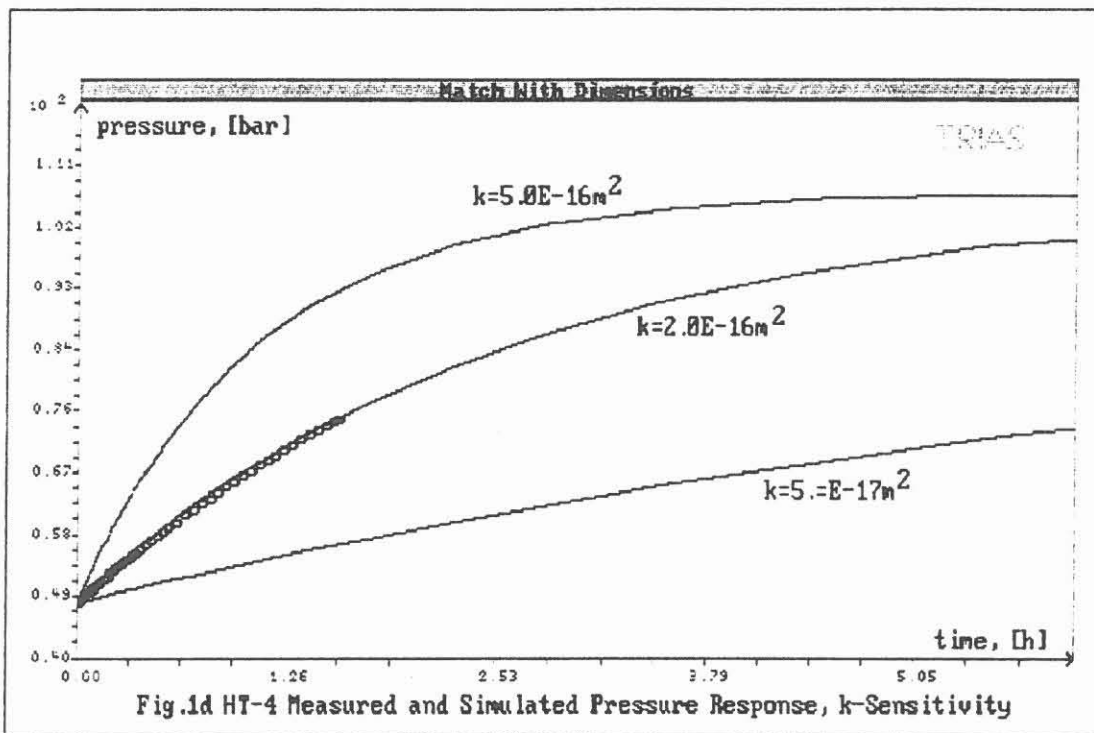
PM : 1.00E+000
C_D : 1.10E+004

PERM.: 2.00E-016 m²
C_D e^{2s} : 1.00E+020

P_i* : 0.00E+000 bar
c : 6.41E-006

DIMLES PRESSURE vs TIME

Fig.1c HT-4 Slug Withdrawal, Log-Log Match



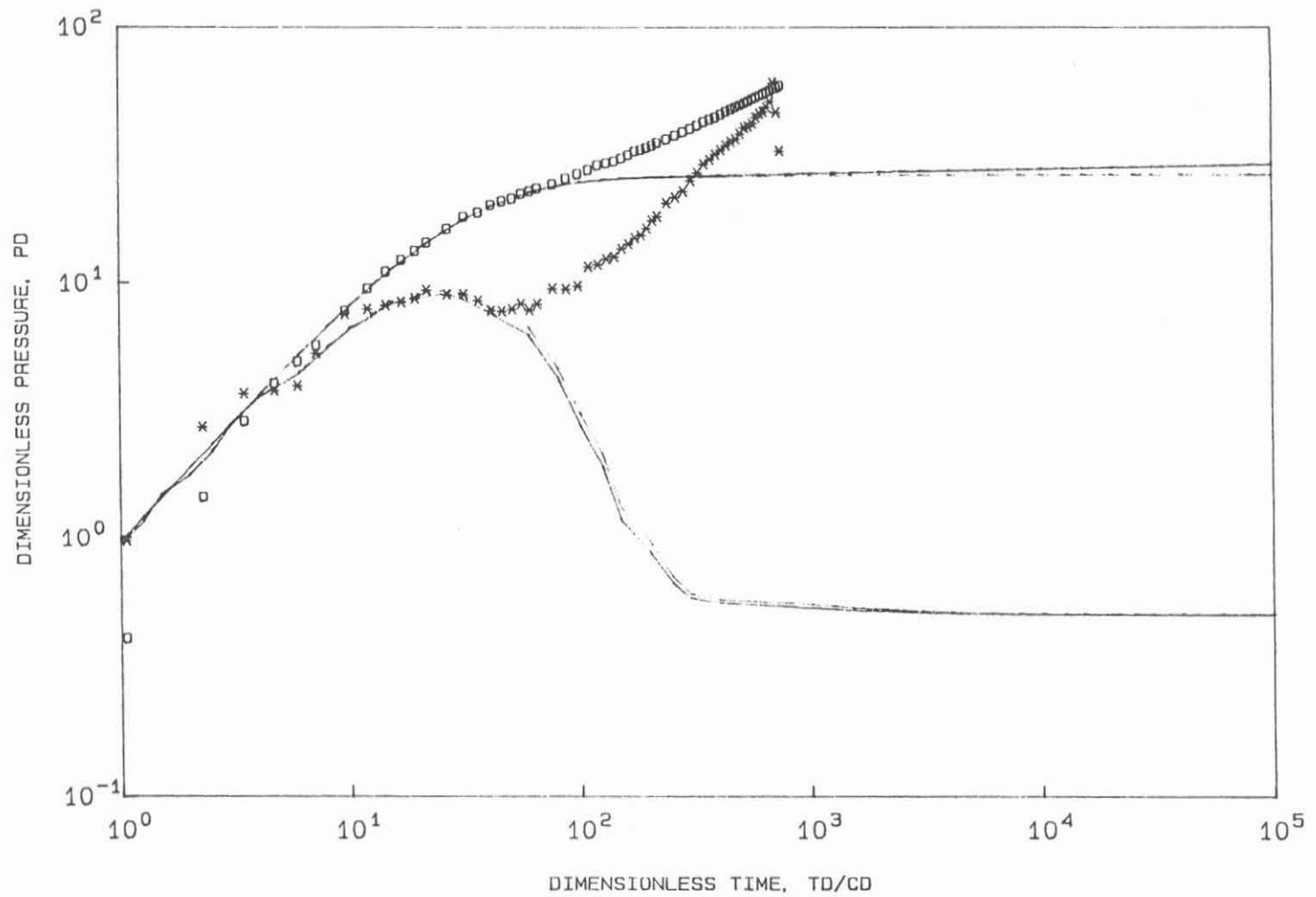


FIG.2 HT-4 SWR, PRESSURE RECOVERY DATA DISTORTED BY RUNNING IN THE PUMP WELL WITH WELLBORE STORAGE AND SKIN IN A RESERVOIR WITH HOMOGENEOUS BEHAVIOR
 DRAWDOWN TYPE CURVE, $CDe(2S) = 1.000E+20$
 MATCH TRIAL FOR EARLY TIME DATA

PRESSURE RESPONSE (P2) DURING TESTING

KTB VB-1A, INTERVAL 3850,05 - 4000,1 m

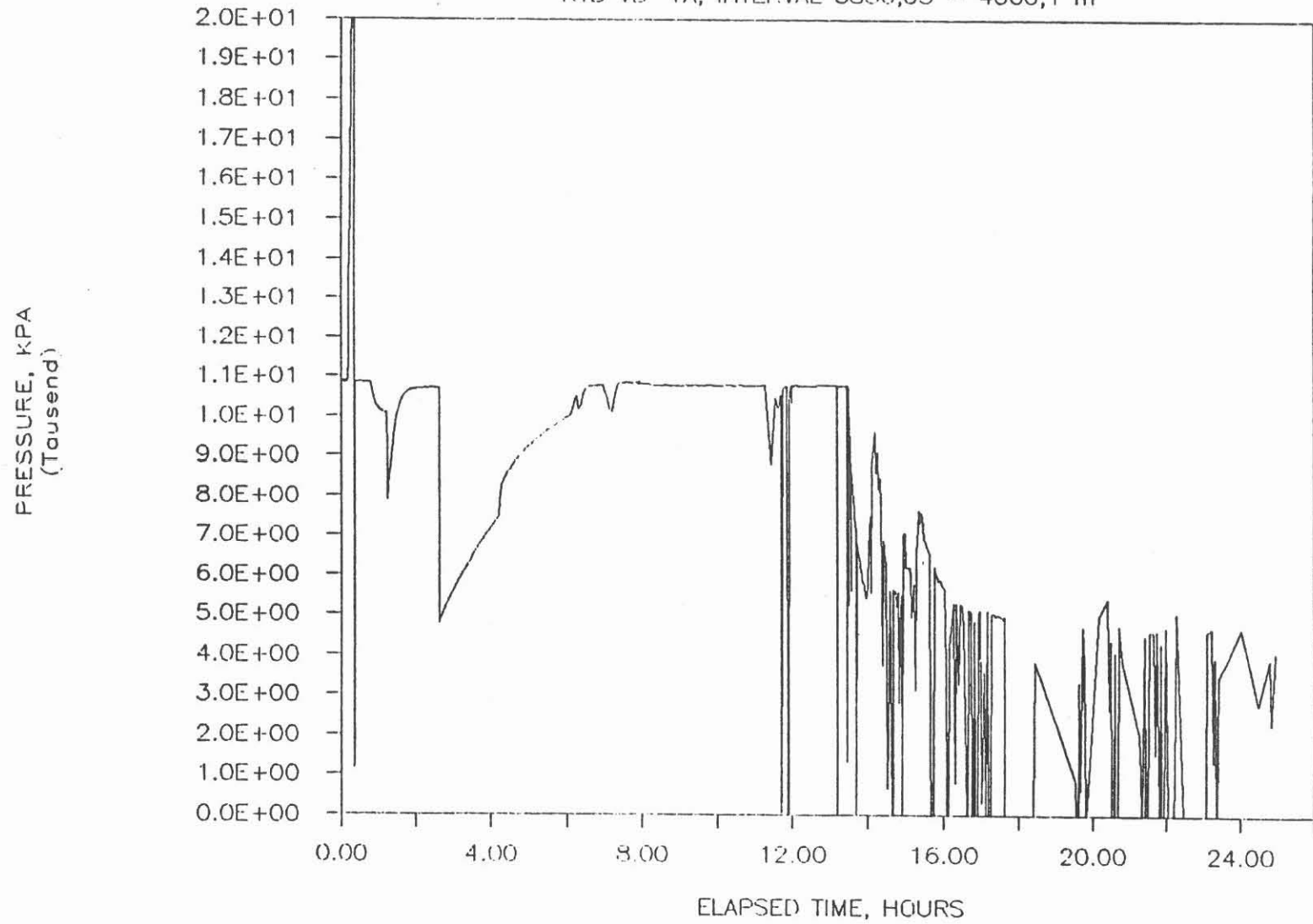


Fig. 3a Pressure Response (P2) During Testing

PRESSURE RESPONSE (P2) DURING TESTING

KTB VB-1A, INTERVAL 3850,05 - 4000,1 m

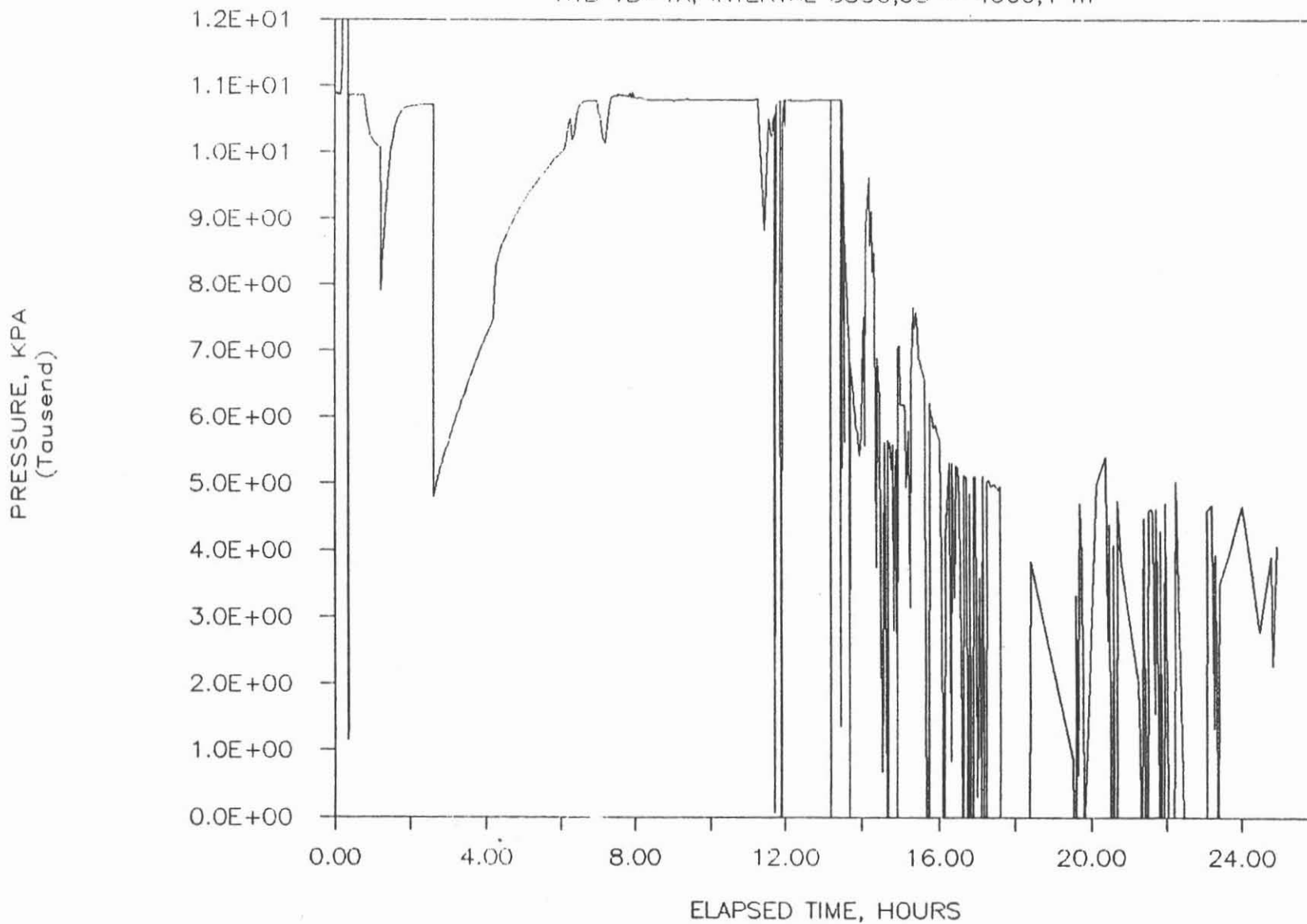


Fig. 3b Pressure Response (P2) during Testing (without inflation pressure).

TEMPERATURE RESPONSE(T2) DURING TESTING

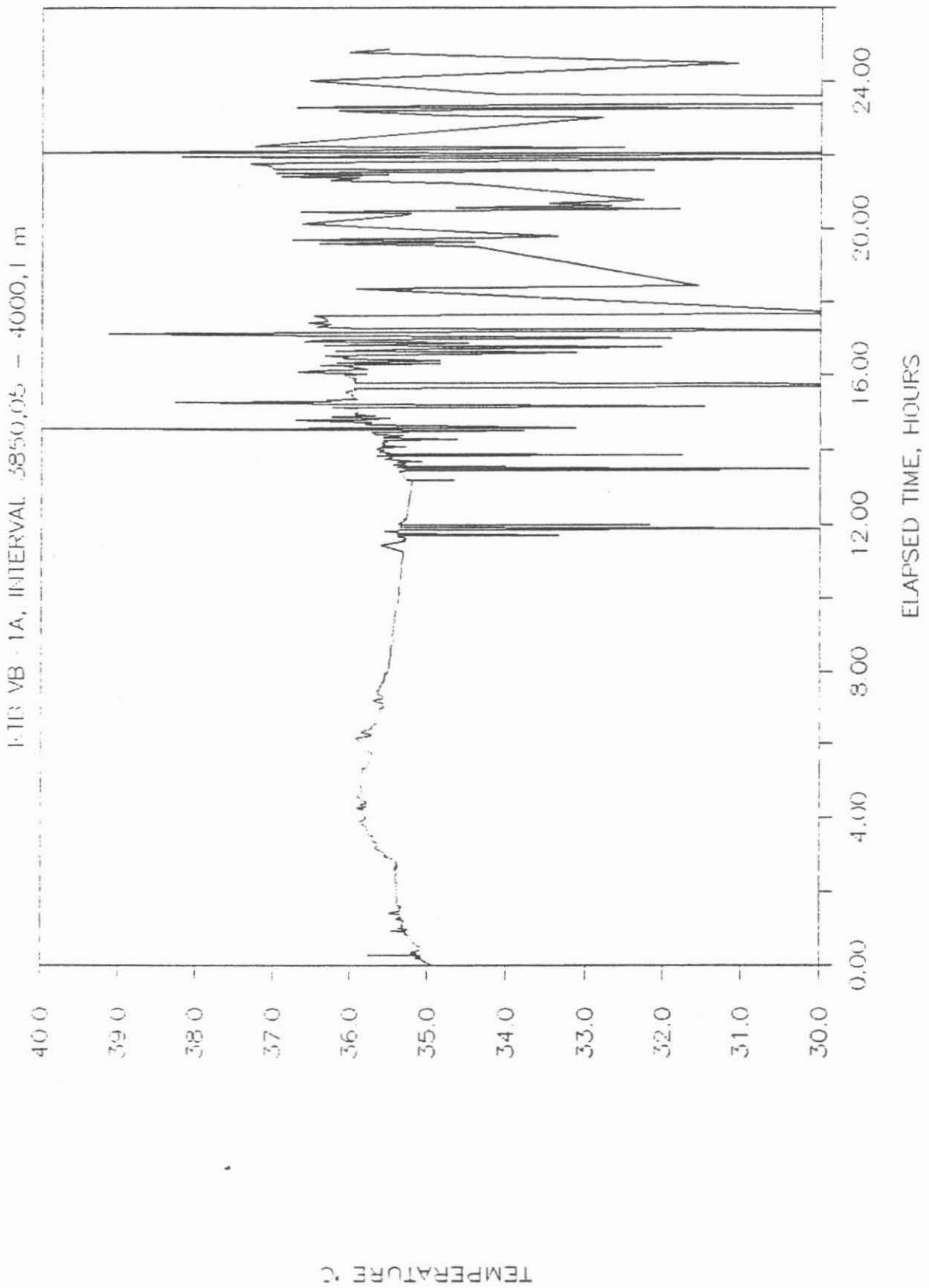


Fig.4 Temperature Response During Testing

RATE RESPONSE DURING TESTING

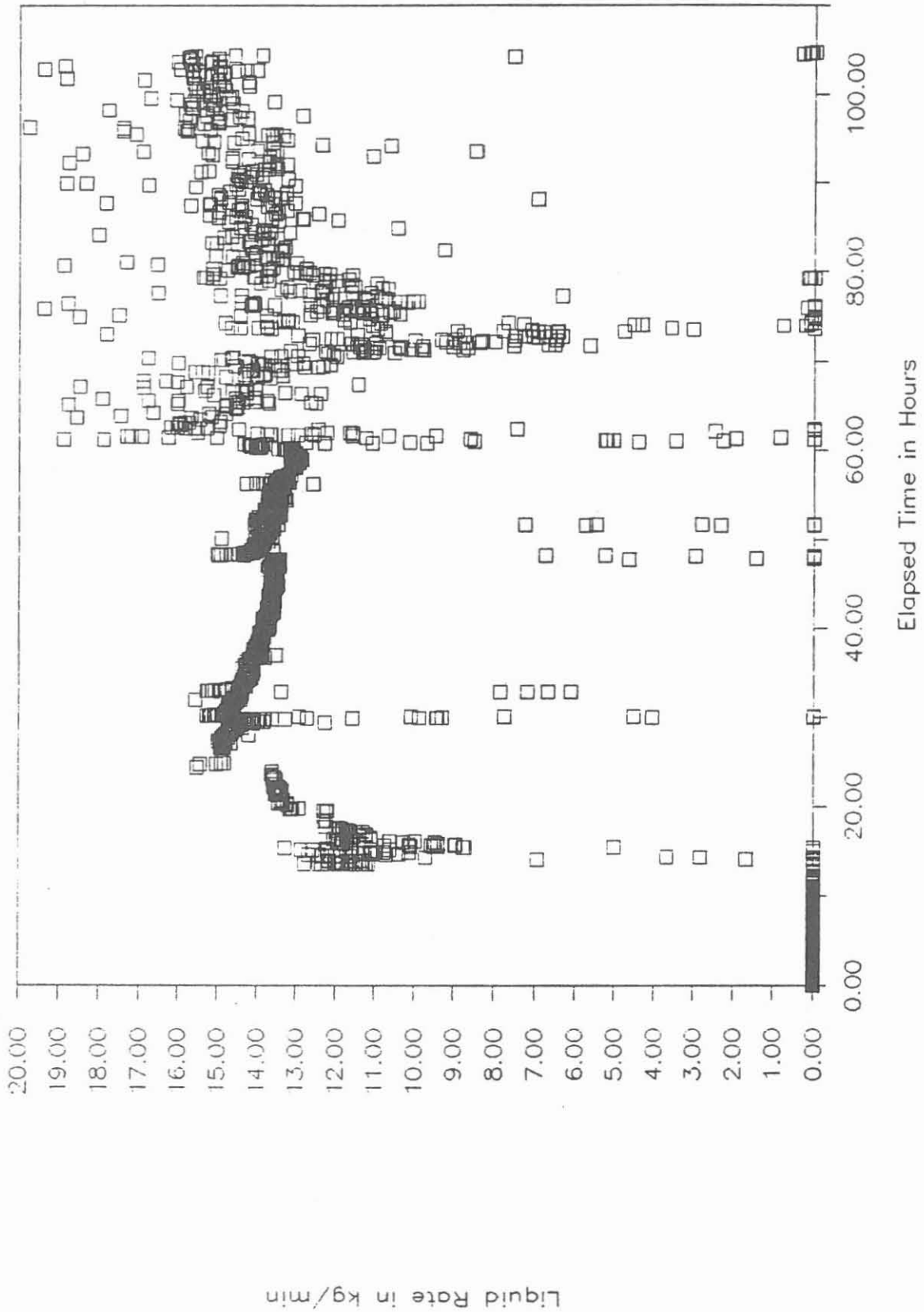
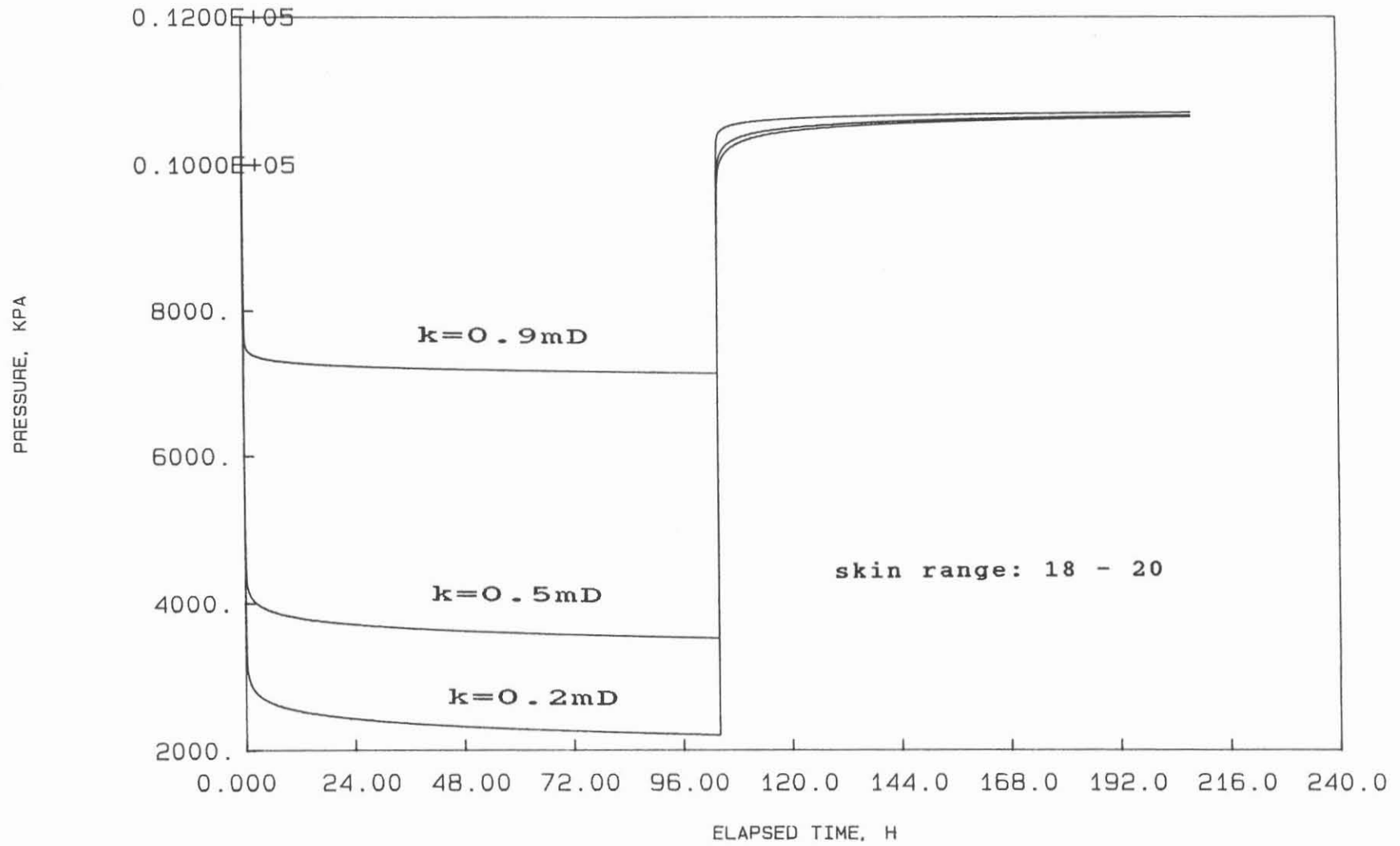


Fig.5 Pumping Rate Sequence - Testing

APPENDIX A

Prediction of Drawdown and Shut-in Response during Pump Test



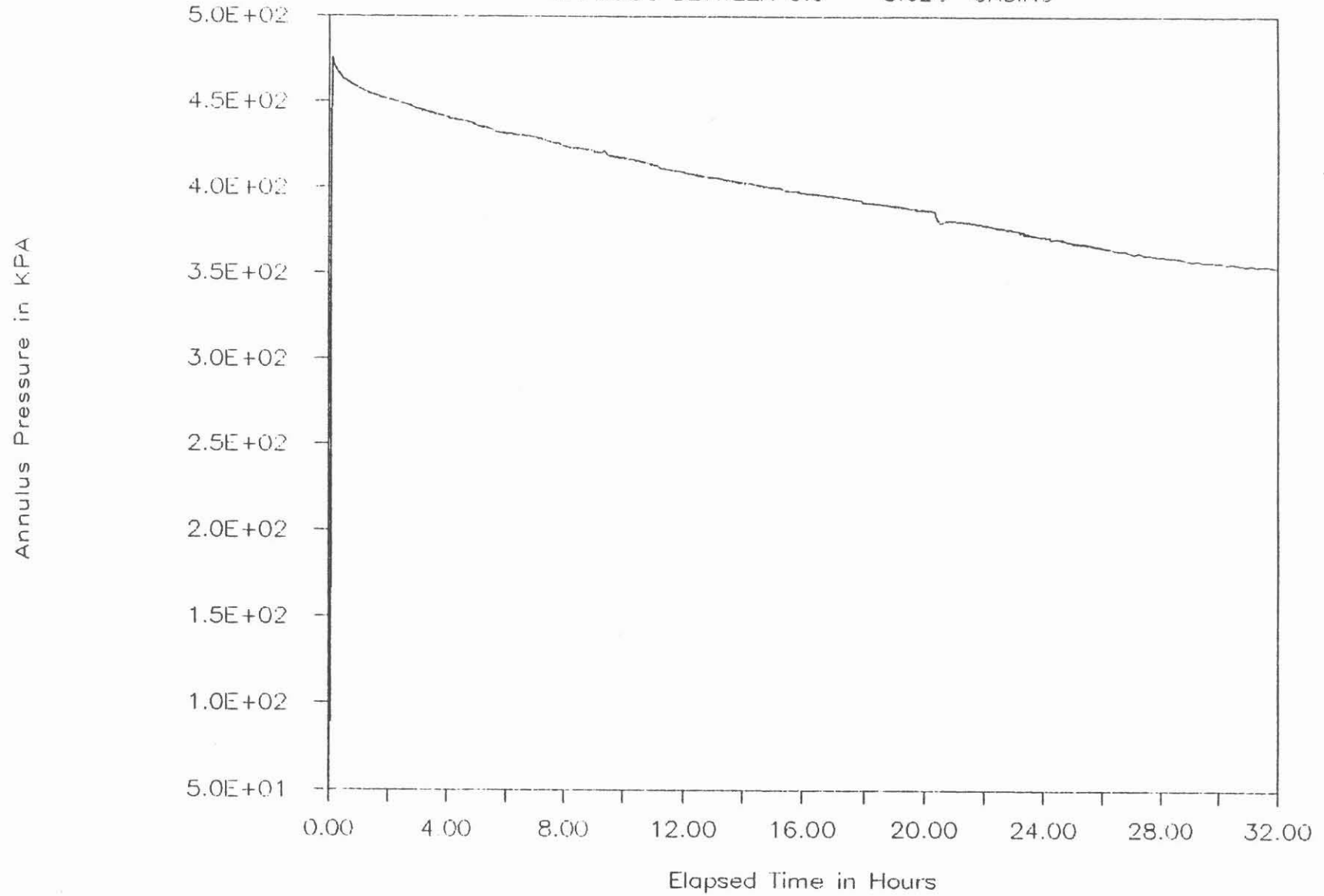
SIMULATION OF PRESSURE DRAWDOWN DURING PUMPING PHASE FOR $Q=14\text{L}/\text{MIN}$ WELL WITH WELLBORE STORAGE AND SKIN IN A RESERVOIR WITH HOMOGENEOUS BEHAVIOR
 DRAWDOWN TYPE CURVE, $CDe(2S) = 1.000E+20$

APPENDIX B

Testing of annulus space between 5.5" and 8.625" casing

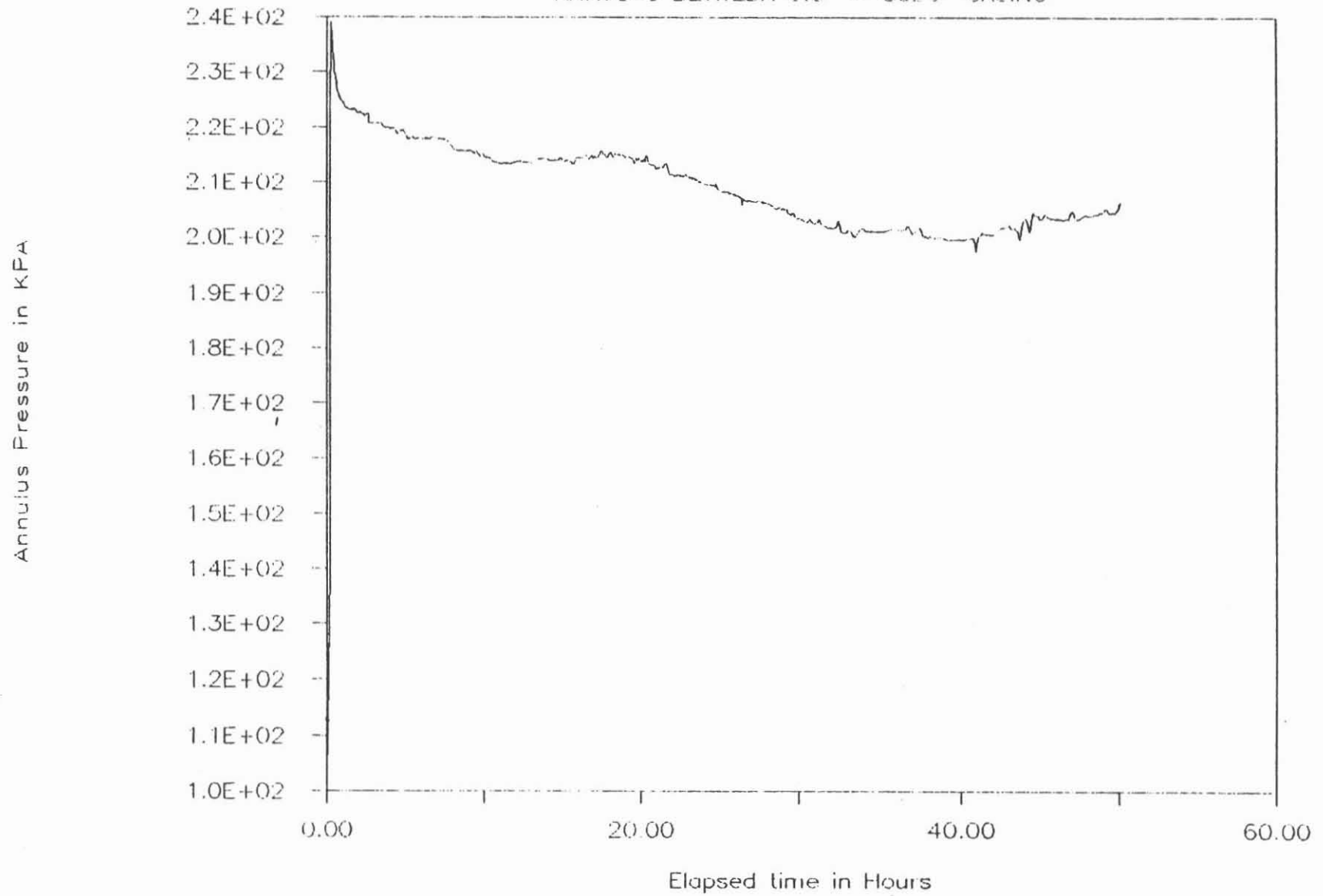
KTB VB-1A, ANNULUS PRESSURE RESPONSE #1

ANNULUS BETWEEN 5.5" - 8.625" CASING



KTB VB--1A, ANNULUS PRESSURE RESPONSE #2

ANNULUS BETWEEN 5.5" - 8625" CASING



DEFINITIONS

Since (from Darcy law):

$$v = \frac{k}{\mu} \frac{dp}{dL} \quad \text{or} \quad v = K \frac{dh}{dL}$$

and

$$dp = (\rho)gdh$$

then

$$\frac{k}{\mu} (\rho)g = K \quad \text{or} \quad k = \frac{K\mu}{(\rho)g}$$

$$p_D = \frac{2\pi kh\delta p}{q\mu B_w} = \frac{2\pi T\delta p}{q(\rho)gB_w} = \frac{2\pi T\delta h}{qB_w}$$

$$t_D = \frac{kt}{\phi\mu c_t r_w^2} = \frac{Kt}{S_s r_w^2} = \frac{Tt}{S r_w^2}$$

$$C_D = \frac{C}{2\pi\phi c_t r_w^2 h} = \frac{(\rho)gC}{2\pi r_w^2 S} \quad \text{or} \quad S = \frac{(\rho)gC}{2\pi r_w^2 C_D}$$

$$t_D / C_D = \frac{2\pi kht}{\mu C} = \frac{2\pi Tt}{(\rho)gC}$$

$$C = \frac{\pi r_w^2}{(\rho)g}$$

$$C = V_w c_w$$

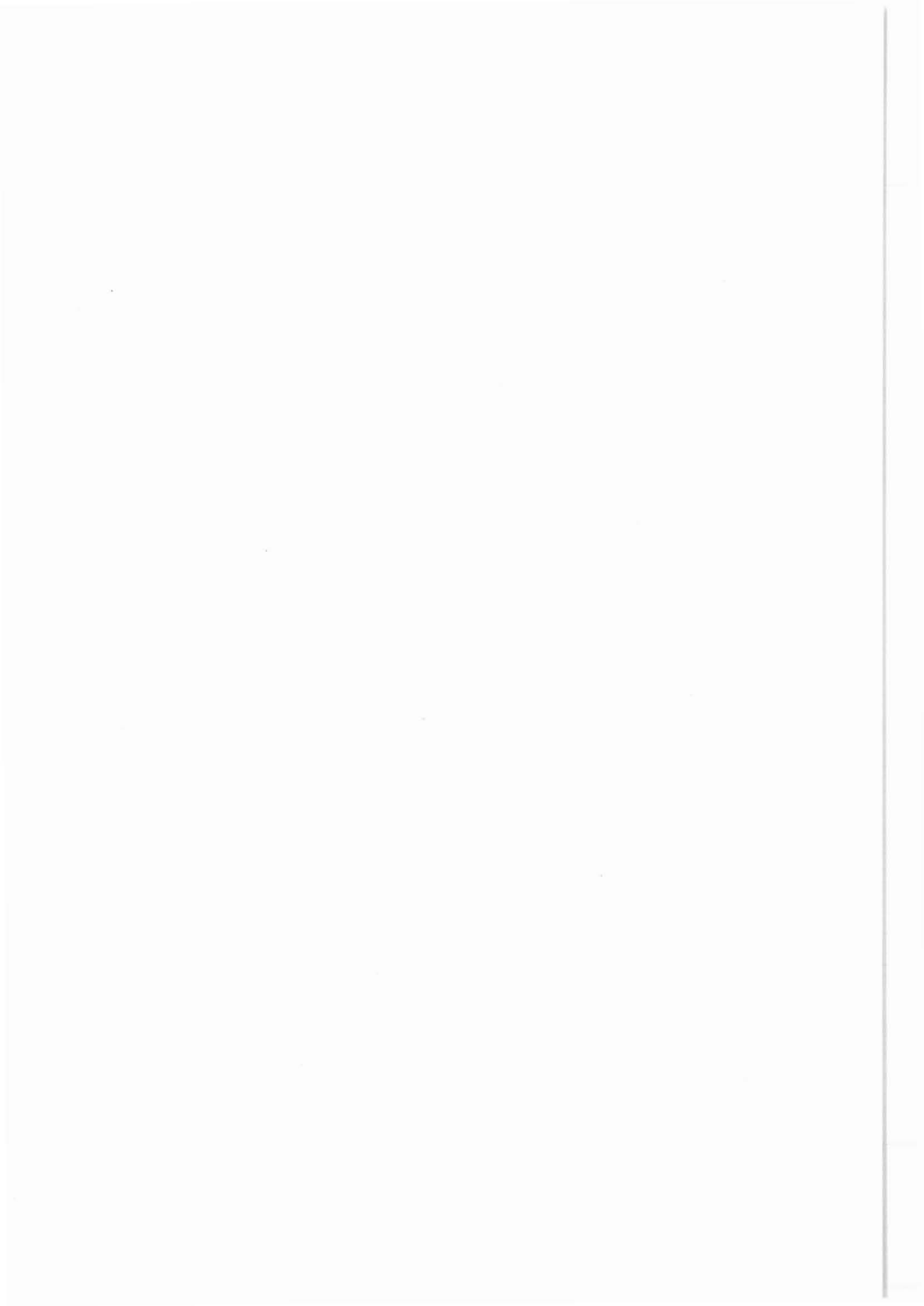
$$S = \phi c_t (\rho)gh$$

$$S_s = \phi c_t (\rho)g$$

$$T = Kh$$

$$s = \frac{2\pi kh}{q\mu B_w} \delta p_{skin} \quad \text{v. Everdigen - Hurst infinitesimal skin}$$

$$s = \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \frac{r_s}{r_w} \quad \text{and} \quad r_{wa} = r_w e^{-s}$$



Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland
Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Außenstelle Windischeschenbach
Postfach 67
8486 Windischeschenbach

Ergebnisse der geochemischen Bearbeitung gewonnener Fluidproben



**ERGEBNISSE DER GEOCHEMISCHEN BEARBEITUNG GEWONNENER
FLUIDPROBEN**

H.- J. Heinschild

Zusammenfassung

Während dem Abteufen der KTB Vorbohrung erfolgten verschiedene Bohrlochteste zur Auffindung von Zuflußhorizonten, Bestimmung von Permeabilitäten und Gewinnung unkontaminierter Fluidproben.

In Teufe 505 m und 648 m wurden zwei fluidführende Horizonte entdeckt, die nach den bisher durchgeführten Untersuchungen nur geringe Salinitäten aufweisen.

Andere Zuflüsse kommen erst unterhalb einer Teufe von 3400 m vor. Sie zeichnen sich durch erhöhte Natrium-, Kalzium- und Chlorid-Konzentrationen aus (bis 6300 ppm Na, 15400 ppm Ca, 37000 ppm Cl⁻). Diese Fluide zeigen z.T. auch sehr starke Gasanreicherungen an Methan, Helium, Radon sowie an Stickstoff (insgesamt ca. 800 l Gas/m³ Fluid).

Die unterschiedliche Zusammensetzung der salinaren Fluide aus 3447 m und "4000 m" belegt, daß diese beiden fluidhöffigen Bereiche zwei voneinander getrennte Systeme darstellen müssen.

Summary:

During drilling of the KTB pilot hole different borehole tests were carried out in order to detect influx of formation waters, determine the permeability of intersected rocks, and sample pure formation waters.

Two influx horizons with a low chloride content were evident at 505 m and 648 m. Saline formation waters first became evident below a depth of 3400 m, and were composed mainly of sodium, calcium, and chloride (up to 6300 ppm sodium, 15400 ppm calcium, and 37000 ppm chloride). These saline formation waters were partly strongly enriched in methane, helium, and nitrogen (approx. 800 l gas/m³ fluid).

It can therefore be concluded from this composition difference at 3447 m and "4000 m" that these two horizons represent two separated systems.

Anschrift des Autors: KTB-Feldlabor, Postfach 67, 8486 Windischeschenbach

1. Einleitung

Seit Beginn der KTB Vorbohrung im September 1987 erfolgten im Bohrloch verschiedene Tests, wie z.B. Drillstem-, Pump- und Injektionsteste. Die innerhalb dieser Testphasen gewonnenen Proben wurden analysiert; die Ergebnisse sind in diesem Bericht zusammengefaßt und werden diskutiert.

Für die im KTB Feldlabor durchgeführten Untersuchungen wurden folgende Analysengeräte eingesetzt: Atomemissionsspektrometer, Ionenchromatograph, Prozeßgas-Massenspektrometer sowie pH- und Leitfähigkeitsmeßgeräte. Die Meßmethoden sowie die durchgeführten Probenpräparationen sind in STROH et al., 1988 und HEINSCHILD et al., 1988 beschrieben.

Im Anhang dieses Berichtes sind zur Übersicht sämtliche während der KTB Vorbohrung erfolgreich durchgeführten Fluid Sampler-Einsätze mit den Zielteufen in chronologischer Abfolge aufgeführt.

2. Zuflußteste während des Abteufens der Vorbohrung

Während des Abteufens der Vorbohrung wurden vier Zuflußteste durchgeführt. In der Tabelle 1 sind die Testintervalle sowie die vor dem jeweiligen Test erzielte Teufe aufgeführt.

Tab. 1: Zusammenfassung der während des Abteufens der Vorbohrung durchgeführten Zuflußteste

Lfd. Nr.	Testintervall (m)	Datum	Bohrloch- sohle (m)
DST-Test 1	218.8 - 257.0	06.11. - 07.11.87	478.5
DST-Test 2	347.8 - 385.0	06.11. - 07.11.87	478.5
DST-Test 3	813.0 - 839.0	06.01. - 08.01.88	992.0
DST-Test 4	3442.9 - 3486.9	05.11. - 07.11.88	3486.9

2.1. DST-Test 1 (218.8 - 257.0 m)

Während dieser Testphase wurde kein Zufluß in dem Testintervall nachgewiesen.

2.2. DST-Test 2 (347.8 - 385.0 m)

Der Packer der Testgarnitur konnte nicht im Bohrloch gesetzt werden.

2.3. DST-Test 3 (813 - 839 m)

Während dieser Testphase wurde kein Fluid Sampler eingesetzt und daher keine Fluidprobe gewonnen.

2.4. DST-Test 4 (3442.9 - 3486.9 m)

Im Gegensatz zu den zuerst durchgeführten Tests konnten während des DST-Test 4 erstmals Fluidproben gewonnen werden.

2.4.1. Ergebnisse

Schon während der kontinuierlich durchgeführten Analyse der Bohrspülung sowie der aus der Bohrspülung freigesetzten Gasphase erfolgte eine deutliche Indikation (leichte Zunahme der Chloridkonzentrationen in der Bohrspülung sowie starke Methan- und Heliumanreicherungen) für einen Zufluß aus dem Bereich einer offenen Kluft in 3447 m Teufe (vgl. WITTENBECHER et al., 1989).

Der nachfolgende Drillstemtest verlief erfolgreich, da erstmals Fluidproben gewonnen wurden. Beim Ausbau der Testgarnitur wurde die in den Schwerstangen befindliche Flüssigkeit (Spülung + Fluid) durch Anlegen eines Unterdrucks entgast und die Flüssigkeit zur Analyse aufgefangen. Die gleiche Prozedur erfolgte mit der 2 l-Probenkammer die über dem Packer in dem Teststrang eingesetzt worden war. Die Analyseergebnisse der freigesetzten Gasphasen sowie der gewonnenen Flüssigkeiten sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tab. 2: Ergebnisse der Packer-Test-Proben vom 07.11.88

		Schwerstangen	2 l - Kammer		
Chlorid	(ppm)	8900	9700		
Sulfat	(ppm)	n.n.	n.n.		
Natrium	(ppm)	2500	2500		
Kalzium	(ppm)	4200	3600		
Strontium	(ppm)	97	90		
Stickstoff	(Vol.%)	81.11	71.59	71.66	72.50
Argon	(Vol.%)	0.41	0.15	0.19	0.16
Kohlendioxid	(Vol.%)	0.28	0.70	0.68	1.22
Methan	(Vol.%)	9.75	21.11	21.10	19.37
Wasserstoff	(Vol.%)	7.73	5.67	5.61	5.99
Helium	(Vol.%)	0.72	0.79	0.76	0.76

2.4.2. Diskussion und Interpretation

Die Analyse der unmittelbar vor dem Drillstemtest beim Bohren eingesetzten Bohrspülung ergab eine 2%ige Dehydril-HT-Konzentration. Durch nachträgliche Untersuchungen (Modifikation der Probenpräparation) der Schwerstangen-Probe konnte die Dehydril-HT-Konzentration als 1.5%ig in dieser Probe bestimmt werden. Wenn mögliche Fraktionierungsprozesse im Bohrloch durch Wechselwirkungen zwischen Bohrspülung und Formationswässern unberücksichtigt bleiben, kann die chemische Zusammensetzung des Formationswassers aus dem Bereich der offenen Kluft anhand der Analyse der Schwerstangen Probe berechnet werden:

Na: 7600 ppm
Ca: 16200 ppm
Sr: 390 ppm
Cl⁻: 36000 ppm

3. Zuflußteste nach Erreichen der Endteufe

Nach Ende der Bohrarbeiten, zu Beginn und zum Abschluß der geophysikalischen Langzeittestphase wurden mehrere Tests durchgeführt, die in der Tabelle 3 zusammengefaßt sind.

Tab. 3: Zusammenfassung der Teste nach Beendigung der Bohrarbeiten

	Testintervall (m)	Datum	Bohrloch- sohle (m)
Absenktest	478.0 - 4000.1	10.05. - 25.05.89	4000.1
HT-Test 1	478.0 - 799.6	27.02. - 08.03.90	4000.1
HT-Test 2	1373.3 - 1388.8	27.02. - 08.03.90	4000.1
HT-Test 3	2135.0 - 2190.0	27.02. - 08.03.90	4000.1
Pumptest	3850.5 - 4000.1	06.04. - 14.04.90	4000.1

3.1. Absenktest im unverrohrten Bohrloch

3.1.1. Darstellung der Ergebnisse

Nach KESSELS et al. (1989) erfolgte durch eine Absenkung des Bohrspülungspiegels im Bohrloch ein Zufluß von ca. 9 m³. Davon verteilten sich etwa drei Viertel auf den unteren

Bohrlochbereich (> 2800 m).

Nach Testende wurde der Teufenbereich, der sich anhand eines Spülungswiderstandslogs durch eine Widerstandsabnahme auszeichnetet, mit mehreren unterschiedlichen Probennehmern beprobt (Geocom und Multi Fluid Sampler). Die Probennehmer wurden durch Anlegen eines Vakuums entgast. Die Meßergebnisse der freigesetzten Gasphase sind in Tab. 4 zusammengefaßt.

Tab. 4: Meßergebnisse der Geocom-Proben des Absenkttestes

Datum		12.05.89	13.05.89	17.05.89	17.05.89
Teufe (m)		3985	3930	3930	3995
Sampler		Geocom	Geocom	Geocom	Geocom
Stickstoff	(Vol.%)	61.84	54.48	56.31	33.61
Argon	(Vol.%)	0.18	< 0.10	0.02	0.07
Kohlendioxid	(Vol.%)	1.78	2.11	2.58	7.48
Methan	(Vol.%)	35.59	42.57	40.01	57.46
Wasserstoff	(Vol.%)	0.11	0.32	0.48	0.94
Helium	(Vol.%)	0.44	0.53	0.61	0.45
Natrium	(ppm)	6100	6000	5800	6100
Kalzium	(ppm)	14700	13900	14100	14400
Kalium	(ppm)	210	210	200	210
Strontium	(ppm)	240	220	230	240
Chlorid	(ppm)	31000	30000	33000	29000
Bezugs- probe (Bohr- spülung)	Natrium Kalzium Kalium Strontium Chlorid	(ppm) (ppm) (ppm) (ppm) (ppm)	1400 150 70 1.3 200		

Die Fluidsamplerproben zeigten erstmals sehr starke Gasanreicherungen. So ließen sich durch die Entgasung der 3 l Fluid Sampler Probe aus 3985 m ca. 1800 cm³ Gas freisetzen. Das entspricht einem Methangehalt von 150 cm³ und 1 cm³ Helium pro 1 Fluid.

Die Fluid Sampler Proben belegen, daß die ins Bohrloch zuge-tretene Fluide aus Natrium, Kalzium und Chlorid bestehen.

Der Teufenbereich des Übergangs salinarer Zufluß - Bohr-spülung konnte anhand der durchgeführten Spülungswiderstands-messung aufgezeichnet werden. Diese Messung diente als Ein-satzkriterium für den Multi Fluid Sampler, mit dem dieser Bereich beprobt wurde. Die Meßergebnisse dieser Probennahme sind in der Tabelle 5 und Abbildung 1 zusammengefaßt.

Tab. 5: Meßergebnisse der Proben des Multi Fluid Samplers

Teufe (m)	Na (ppm)	Ca (ppm)	K (ppm)	Sr (ppm)	Cl- (ppm)
528	1060	60	50	0.8	230
3500	970	30	40	0.3	330
3600	1220	30	40	0.2	850
3625	1470	40	60	0.4	1400
3650	1620	40	50	0.5	2000
3675	1850	70	60	2.5	2600
3700	2040	400	80	12	3400
3730	2400	1490	100	34	6400
3730	2400	1600	100	36	6100
3800	4200	7600	160	137	21000

Teufe (m)	CO ₂ (Vol.%)	CH ₄ (Vol.%)	H ₂ (Vol.%)	He (Vol.%)
528	0.57	0.68	0	0
3500	*	*	*	*
3600	*	*	*	*
3625	4.85	0.19	1.65	0.008
3650	*	*	*	*
3675	14.57	0.16	1.08	0.01
3700	15.41	0.21	1.56	0.02
3730	*	*	*	*
3730	*	*	*	*
3800	5.96	2.92	1.70	0.29

* = Luftzusammensetzung der Probe

Die Fluidanalyse ergibt einen deutlichen Anstieg der Natrium-, Kalzium-, Kalium-, Strontium- und Chloridgehalte sowie der Methan- und Heliumkonzentrationen mit zunehmender Tiefe.

Am 13.06.89 erfolgte eine Bohrlochzirkulation, wobei jedoch die Bohrspülung durch den Ringraum in das Bohrloch gepumpt wurde und durch das Gestänge zutage trat. Während der Zirkulation wurde die Bohrspülung kontinuierlich beprobt und die in der Bohrspülung gelösten Gase permanent analysiert. Die in Abbildung 2 dargestellten Meßergebnisse sind gegen die Uhrzeit aufgetragen, da eine exakte Teufenzuordnung nicht möglich war.

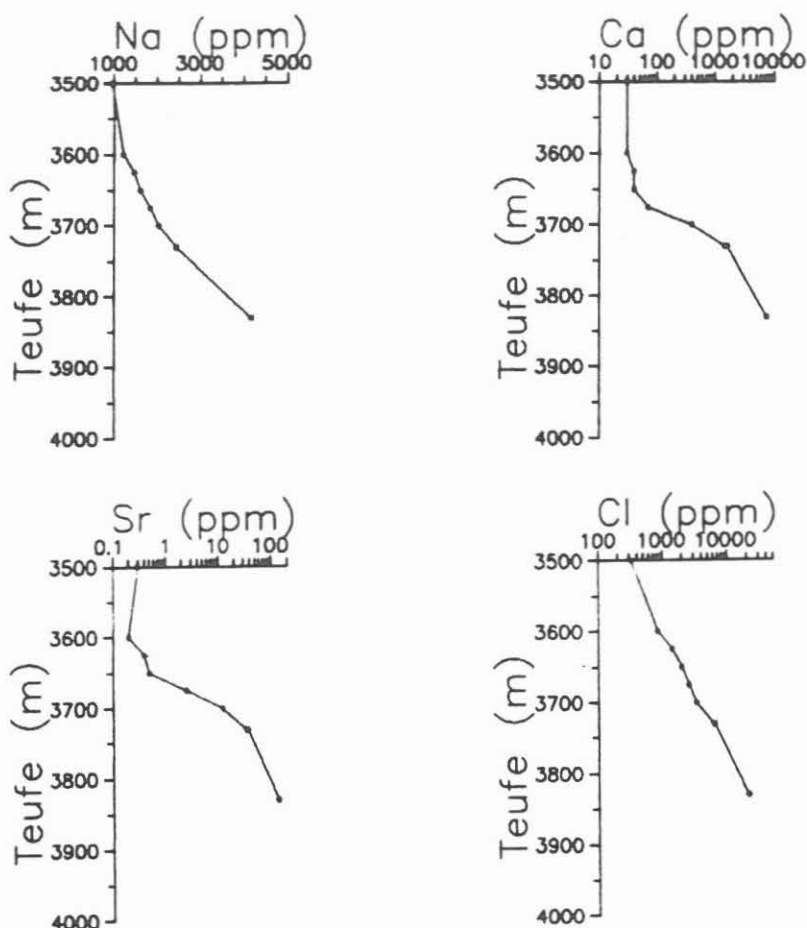


Abb. 1: Darstellung des Übergangs Bohrspülung - Fluid

Der Beginn der Zirkulation war um ca. 14³⁰ Uhr. Um 16³⁰ Uhr wurden die Proben am Schüttelsieb genommen, die aus dem Bohrlochtiefsten stammen.

3.1.2. Diskussion und Interpretation der Ergebnisse

Der Vergleich der Meßergebnisse zwischen den Fluid Sampler Proben vom 12.05. - 17.05.90 (vgl. Tab. 9) und den Proben, die während der Bohrlochzirkulation gewonnen wurden, zeigt, daß die Fluid Sampler-Proben höhere Gehalte an Natrium, Kalzium und Chlorid aufwiesen und somit die "reineren" Proben darstellen. Die Anreicherungen für Natrium, Kalzium und Chlorid beschränken sich auf die untersten 200 m des Bohrlochs, das heißt, daß der saline Zufluß in dem Teufenbereich 3800 - 4000 m auftritt.

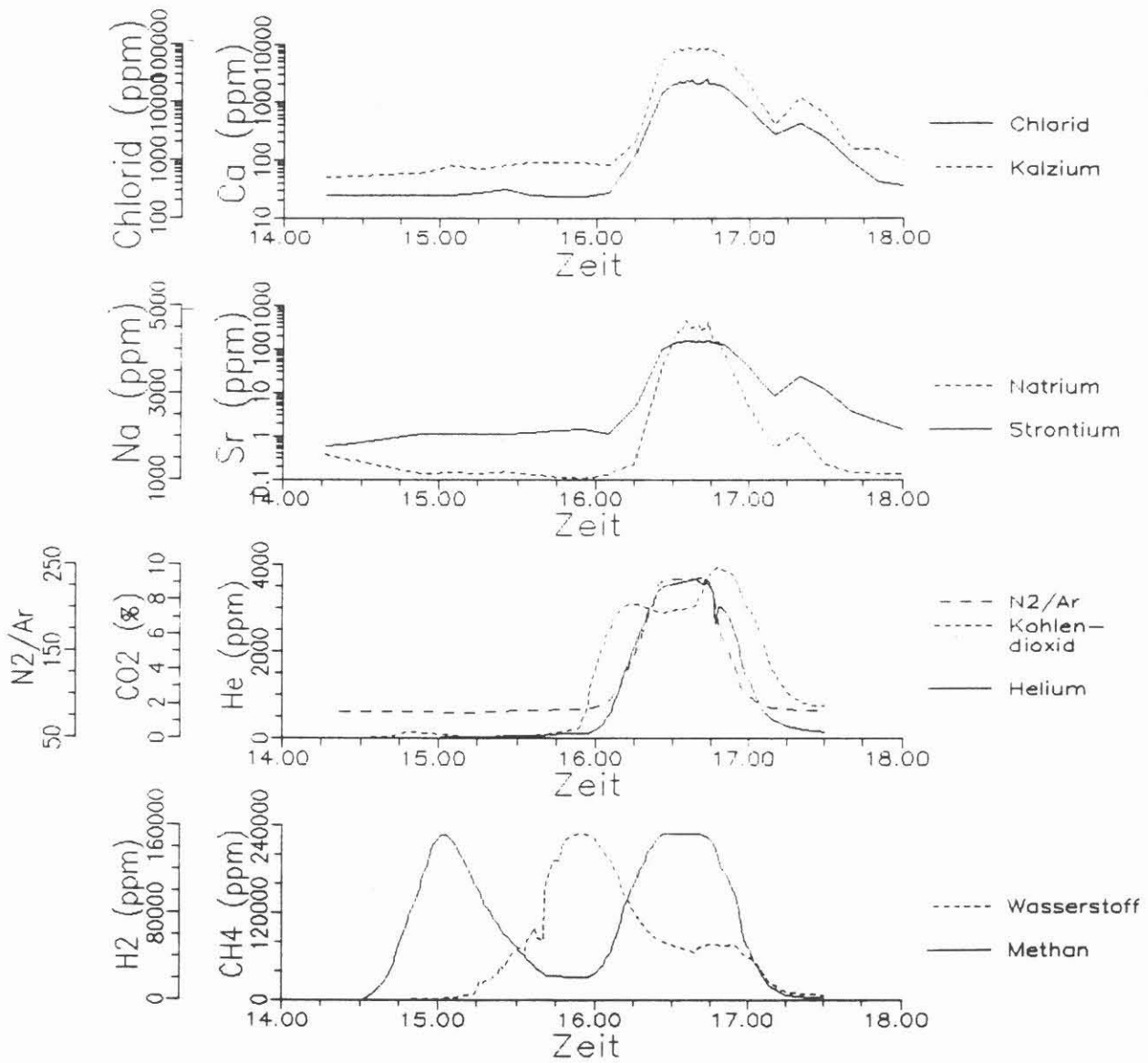


Abb. 2: Analysenergebnisse der Bohrlochzirkulationsproben vom 13.06.89

Analog zu den Kationen- und Anionenreicherungen wird in den Proben aus dem Bohrlochsohlenbereich eine sehr starke Methan- und Heliumanreicherung (Maximalgehalte 23 Vol.% bzw. 0.38 Vol.%) festgestellt. Zusätzlich deutet die Änderung des Stickstoff/Argon-Verhältnisses auf einen Zutritt von Stickstoff hin. In der aus der Spülung freigesetzten Gasphase konnte bis zu 10 Vol.% Kohlendioxid nachgewiesen werden. Gleichzeitig fiel der pH-Wert der Bohrspülung von 10 auf 5.

Abbildung 2 zeigt deutlich, daß mit Beginn der Bohrlochzirkulation um 14³⁰ Uhr eine leichte Kohlendioxid- (bis 0.3 Vol.%) und eine sehr starke Methananreicherung (bis 22 Vol.%) festgestellt wurde. Die Proben, die diese Anreicherungen aufweisen, stammen noch aus dem verrohrten Teil des Bohrlochs und können somit nicht durch einen Fluidzutritt verursacht werden. Vielmehr ist die Bohrspülung als Verursacher anzusehen. Zu Beginn der KTB VB1b wurde der Bohrspülung wegen technischer Probleme ein Ester (Terradril 453), der biologisch abbaubar ist, zugesetzt. Der Ester zersetzt sich mit der Zeit zu Kohlendioxid und Methan. Somit ist wahrscheinlich die Kohlendioxid- und Methananreicherung in den Proben aus dem Bohrlochtiefsten artifiziellen Ursprungs.

Die in der Abbildung 2 aufgezeigte Wasserstoffanreicherung korreliert nicht mit den von dem salinaren Zufluß verursachten Elementanreicherungen. Dies könnte möglicherweise durch eine Gasfraktionierung im Bohrloch entstehen. Aber dies konnte bisher nicht direkt beobachtet werden. Eventuell wird die Wasserstoffanreicherung durch eine Zersetzung des Wassers im Bohrloch durch bohrtechnische Maßnahmen hervorgerufen.

3.2. HT-Test 1 (478.0 - 799.6 m)

Im abgepackerten Bereich des Testintervalls (478.0 - 799.6 m) befand sich Bohrspülung sowie im unteren Teil zusätzlich noch mit KCl versetztes Hydropack-Gel.

Die bei diesem Test gewonnenen Proben lassen sich wie folgt unterteilen:

1. Fluid Sampler-Proben (oberhalb Testintervall)
2. Swabb-Proben
3. Fluid Sampler-Proben (innerhalb des Testintervalls)
4. alternierend Swabb- und Fluid Sampler-Proben (innerhalb des Testintervalls)
5. Proben aus dem Gestänge
6. Fluid Sampler-Proben nach Testgestängeausbau (innerhalb des Testintervalls)

3.2.1. Ergebnisse

Die Analysenergebnisse mit der oben aufgeführten Einteilung sind in chronologischer Reihenfolge in der Tabelle 6 zusammengefaßt. Die Bezeichnung von 1. bis 6. wurde zur besseren Übersicht beibehalten.

Die durch Entgasung der Fluid Sampler gewonnenen Gasproben zeigten nur Luftzusammensetzung und sind deshalb nicht aufgeführt.

Tab. 6: Ergebnisse der Fluid Sampler-Proben und der Swabb-Proben des Testintervalls 478.0 - 799.6 (FS = Fluid Sampler)

lfd. Nr.	Datum/ Uhrzeit	Teufe (m)	Proben Art	Proben Menge (ml)	FS gas- dicht	pH	Leitf. (mS/cm)	Chlorid (ppm)	Natrium (ppm)
1)	27.02.90 21 ⁵⁵	451.8	Pr	1300	ja	8.2	2.68	320	
2)	28.02.90 01 ⁰⁰	-	Sw			8.3	2.83	360	
	28.02.90 02 ⁰⁰	-	Sw			8.3	2.59	350	
3)	28.02.90 09 ⁵¹	480	Pr	1300	ja	8.1	2.70	300	
	28.02.90 10 ⁴⁰	540	Pr*	0	-	-	-	-	
	28.02.90 11 ³²	650	Pr	1300	ja	8.0	4.97	1000	
	28.02.90 12 ²⁵	720	Pr*	0	-	-	-	-	
	28.02.90 13 ⁰⁶	540	Pr*	100	ja	8.6	3.75	470	
	28.02.90 13 ⁴⁴	720	Pr*	100	ja	8.8	5.13	990	
4a)	28.02.90 15 ³⁰	-	Sw			8.3	2.42	320	
	28.02.90 17 ¹⁰	-	Sw			8.2	2.19	330	
	28.02.90 17 ³⁶	-	Sw			8.2	2.12	290	
4b)	28.02.90 18 ⁰⁸	650	Pr*	100	ja	8.8	5.16	1000	
4c)	28.02.90 18 ⁵⁰	-	Sw			8.2	1.91	280	
4d)	28.02.90 19 ²⁸	650	Pr*	100	ja	8.6	4.43	1000	
	28.02.90 20 ²⁸	700	Pr*	0	-	-	-	-	
4e)	28.02.90 21 ⁰⁵	-	Sw			8.4	1.81	230	
	28.02.90 21 ²⁰	-	Sw			8.5	1.71	220	
4f)	28.02.90 23 ⁴³	650	Pr*	0	-	-	-	-	
4g)	01.03.90 00 ²⁵	-	Sw			8.3	1.64	200	
	01.03.90 00 ⁴⁰	-	Sw			8.3	1.63	170	
	01.03.90 04 ¹⁵	-	Sw			8.2	1.65	150	
	01.03.90 05 ¹⁵	-	Sw			8.3	1.43	180	

Tab. 6: Fortsetzung

lfd. Nr.	Datum/ Uhrzeit	Teufe (m)	Proben Art	Proben Menge (ml)	FS gas- dicht	pH	Leitf. (mS/cm)	Chlorid (ppm)	Natrium (ppm)
5)			Gest			8.4	1.56	165	480
			Gest			8.4	1.53	160	510
			Gest			8.4	1.51	160	490
			Gest			8.4	1.48	160	480
			Gest			8.4	1.50	160	500
			Gest			8.3	1.50	160	500
			Gest			8.3	1.54	155	500
			Gest			8.3	1.75	160	510
			Gest			8.4	1.53	170	480
			Gest			8.4	1.49	155	480
			Gest			8.4	1.45	160	470
			Gest			8.4	1.42	145	450
			Gest			8.4	1.40	145	470
			Gest			8.4	1.40	155	430
			Gest			8.3	1.30	120	370
6)	01.03.90	19 ³⁰	505	G*	500	ja	8.4	1.73	180
	01.03.90	20 ²⁵	505	G	3500	nein	8.4	1.86	200
	01.03.90	21 ¹⁵	635	G*	1500	nein	8.1	3.61	760
	01.03.90	22 ¹⁵	648	G*	0	-	-	-	-
	01.03.90	22 ⁴²	768	G	3500	f.E.	8.1	4.90	1220
	02.03.90	00 ⁵²	648	G*	250	ja	7.8	3.66	710

Pr = Preussag Fluid Sampler

G = Geocom

Sw = Swabb-Proben; Gest = Gestängeproben

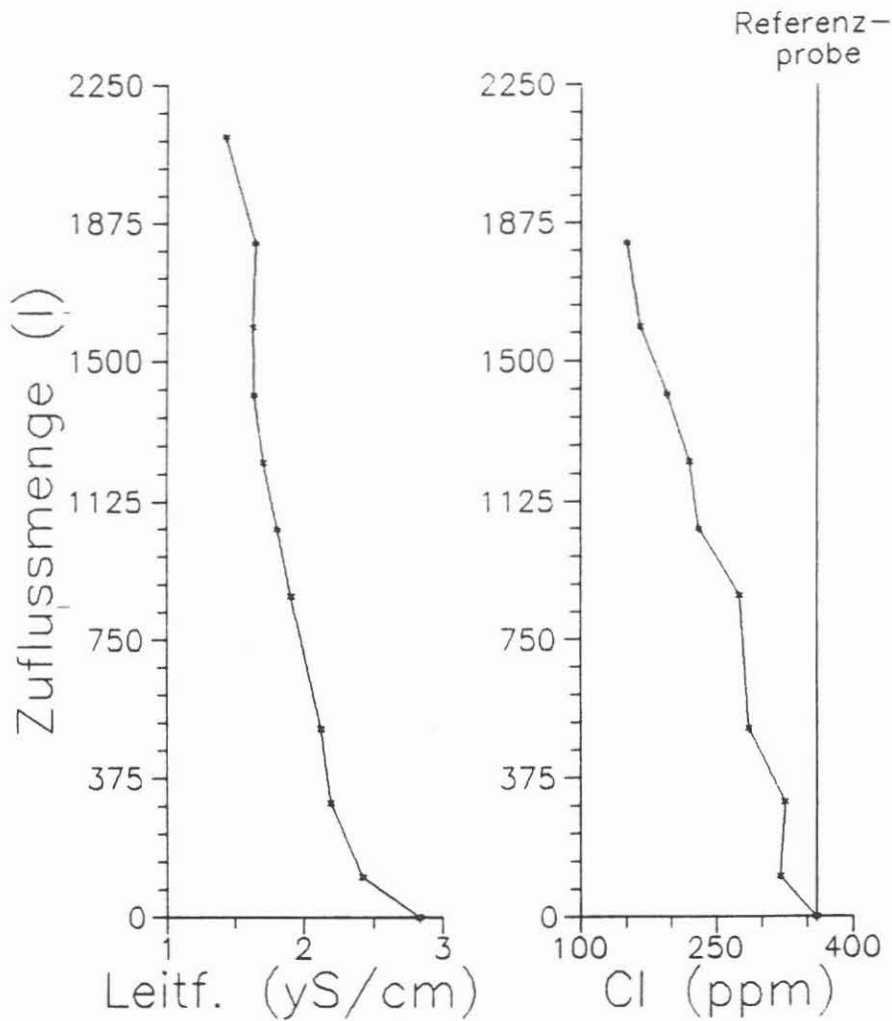
* = fehlende bzw. geringe Probenaussbeute

f.E. = fehlerhafte Evakuierung des Fluid Samplers

3.2.2. Diskussion und Interpretation

Die Preussag Sampler-Probe vom 27.02.90, 21⁰⁰Uhr, die direkt oberhalb des Testventils in Teufe 451.8 m genommen wurde, belegt eine Chloridabnahme auf 320 ppm im Vergleich zur Referenzprobe mit 360 ppm. Zu diesem Zeitpunkt ist die Bohrspülung bereits durch zugetretenes Wasser, dessen Chloridgehalte < 360 ppm sein müssen, verdünnt worden.

Im Testzeitraum des 1. Intervalls waren 2.1 m³ Wasser durch Swabben aus dem Bohrloch gefördert worden. In Abb. 3 sind die Leitfähigkeitsdaten sowie die Chloridgehalte der Swabb-Proben gegen die ausgewabbe Wassermenge, die in der Abbildung als Zuflußmenge definiert ist, dargestellt. Zum Vergleich ist die Referenzprobe ebenfalls aufgeführt. Diese Abbildung verdeutlicht, daß die Bohrspülung durch den Zufluß weiter verdünnt wurde.



KTB-FL: Geochemie
Stand: 05.03.1990

Abb. 3: Chlorid-Gehalte und Leitfähigkeitsdaten der Swabb-Proben; Referenzprobe - Swabb-Probe vom 28.02.90, 1⁰⁰ Uhr (vgl. Tab. 6)

Abb. 4 zeigt das Leitfähigkeits- bzw. Chlorid-Profil der Wassersäule im Gestänge während des Packerausbaus (Wasserspiegel = 154.7 m oberhalb des Packers). Die unterste Probe (0 m Wassersäule) stammt aus dem Bereich direkt oberhalb des Packers und stellt somit die "reinste" Probe dar. Die Chlorid- und Natrium-Gehalte dieser Probe betragen 120 bzw. 370 ppm. Das zulaufende Wasser konnte demnach höchstens 120 ppm Chlorid und 370 ppm Natrium besitzen.

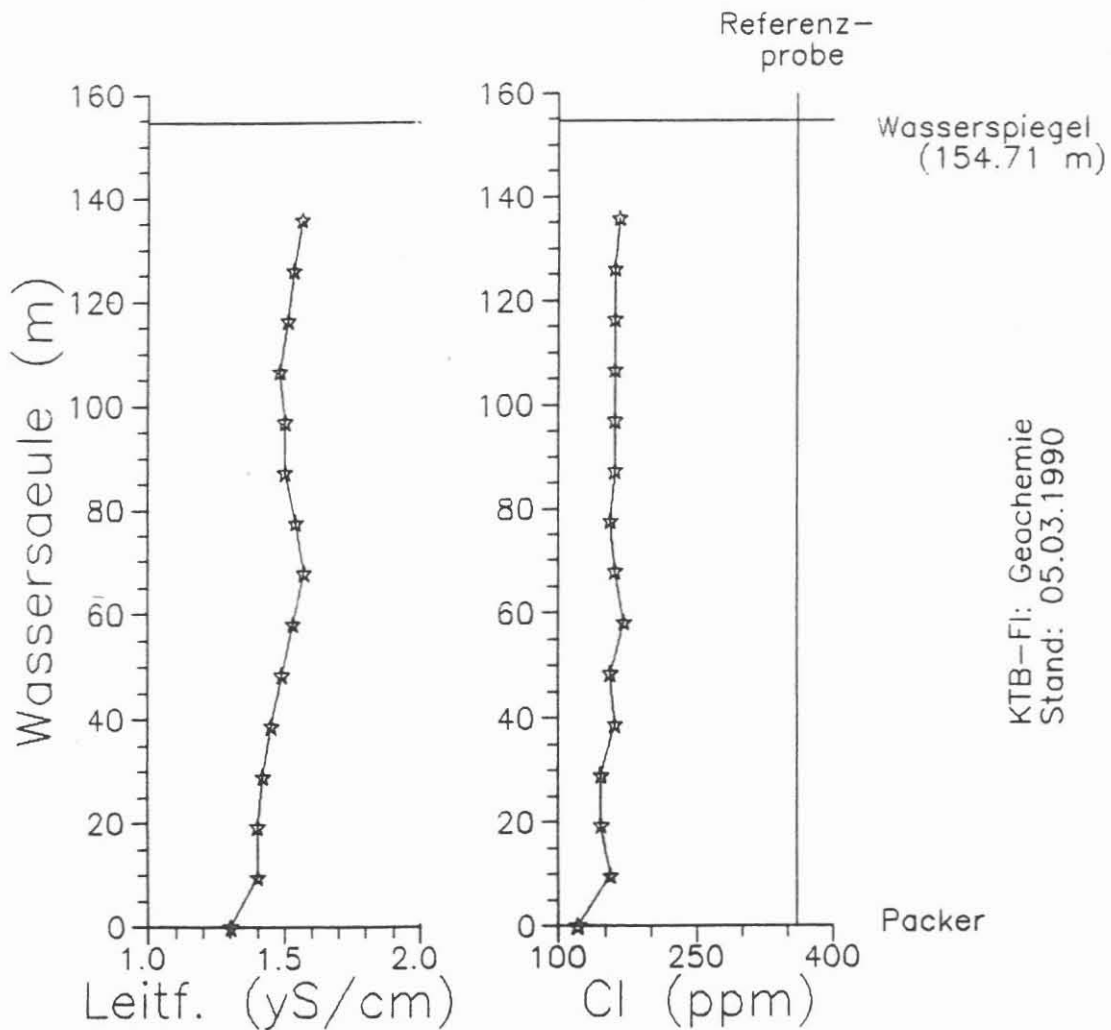


Abb. 4: Untersuchungsergebnisse des Gesteinseinhalts (154.71 m Wassersäule im Gestein oberhalb des Testventils = 592.54 l); Referenzprobe = 1. Swabb-Probe vom 28.02.90; 1⁰⁰ Uhr

Durch die Bestimmung des Spülungswiderstandes mit Hilfe einer AMS-Meßsonde konnten in dem Testintervall zwei Zuflußhorizonte nachgewiesen werden: 505 m und 648 m. Beide Bereiche zeichneten sich durch Widerstandszunahme im Vergleich zum gesamten Widerstandsprofil aus. Die Fluid Sampler-Proben aus 505 m (nach Ausbau des Packers) wies im Vergleich zu der oben aufgeführten Gesteinprobe (Nr. 15) leicht höhere Chlorid- (180 bzw. 200 ppm) sowie Natrium-Gehalte von 750 und 640 ppm auf. Wahrscheinlich kam es, bedingt durch den Packerausbau, im Bohrloch zu Vermischungen zwischen dem Wasserzutritt aus 505 m und der Bohrspülung aus dem Ringraum zwischen dem Testgestänge und der Verrohrung.

Fluid Sampler-Proben, die aus dem Testintervall unterhalb 540 m stammen, zeigen z.T. jedoch deutlich höhere Chloridgehalte und zwar bis zu 1000 ppm. Infolge der mehrmaligen Beprobung der Zone 650 m konnte eine zeitliche Änderung der Spülungs- bzw. Wasserzusammensetzung aufgezeigt werden (Abb. 5). Die Chlorid-Gehalte der Proben aus 650 m sind gegen die ausgewabte Wassermenge dargestellt. Auffällig waren die hohen und konstanten Chlorid-Gehalte in diesen Proben. Die Chlorid-Anreicherung in Bezug zur Referenzprobe vom 28.02.90 1⁰⁰ Uhr (360 ppm) wurde durch das zum Hydropack-Gel zugesetzte Kaliumchlorid verursacht.

Nach dem Swabben von ca. 3000 l konnte eine Chlorid-Abnahme von 1000 ppm auf 760 ppm beobachtet werden. Wird eine gleichmäßige Durchmischung zwischen dem Hydropack-Gel, der Bohrspülung und dem Wasserzutritt angenommen, dann war bei Testbeginn der Zufluß noch nicht aktiv.

Die 505 m Zone scheint unter den Testbedingungen produktiver als die aus 648 m gewesen zu sein.

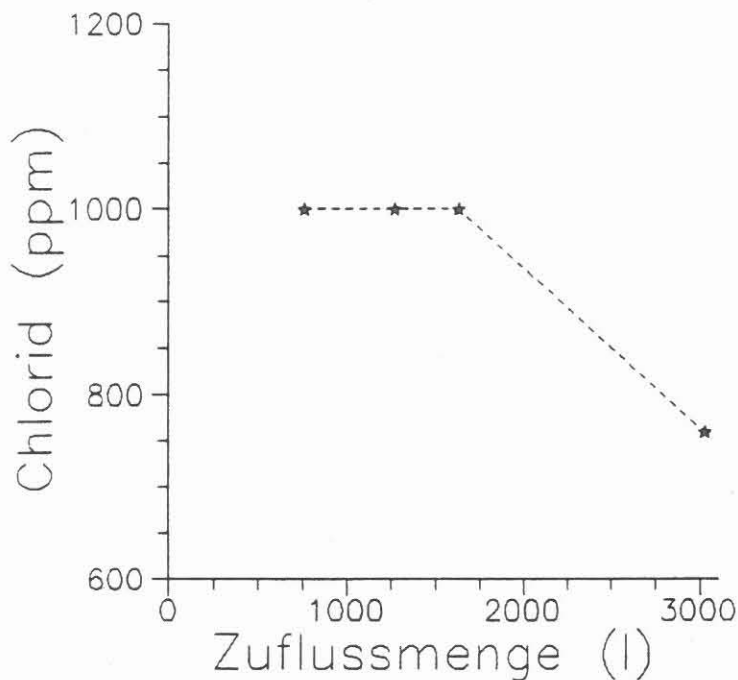


Abb. 5: Chlorid-Gehalte der Fluid Sampler-Proben aus 650 - 648 m vom 28.02. - 02.03.90 (vgl. Tab. 1) in Abhängigkeit zur ausgewabten Wassermenge

3.3. HT-Test 2 (1373.3 - 1388.8 m)

Infolge der geringen Permeabilität der Formation wurden in diesem Test-Intervall keine Fluid-Proben gewonnen.

3.4. HT-Test 3 (2135.0 - 2190.0 m)

3.4.1. Ergebnisse

Im abgepackerten Intervall befand sich Hydropack-Gel (ohne KCl!) und innerhalb des Gestänges reines Leitungswasser (Tab.7).

Die Chlorid-Gehalte der Hydropack-Gel-Proben waren < 10 ppm; die für den 2. Test aktuellen Chlorid-Gehalte der Bohrspülung betragen 480 ppm.

Unter den angelegten Druckbedingungen betrug die Zuflußmenge während der achtstündigen Testzeit 22 l. Da aber der abgepackerte Bereich nicht mit einem Fluid Sampler befahren werden konnte, wurde auf eine Beprobung des Wassers im Gestänge sowie während des vorgesehenen Swabbens verzichtet, da in den gewinnbaren Swabb-Proben noch kein Formationswasser auftreten konnte (zu geringe Zuflußmenge im Testintervall).

Nach Testende und Ausbau des oberen Packers wurde mit der AMS-Sonde das Bohrloch befahren, um den Wasserzutritt zu lokalisieren. Diese Meßsonde wurde mit dem Geocom Fluid Sampler gekoppelt eingefahren und eine Probe aus 2176.5 m (hoher Spülungswiderstand) genommen. Die Ergebnisse der Geocom-Fluid Sampler-Probe sowie die des Hydropack-Gels und der Bohrspülung sind in Tab. 7 zusammengefaßt.

Tab. 7: Ergebnisse der Hydropack-Gel-Analyse der zu diesem Zeitpunkt aktuellen Bohrspülung sowie der Fluid Sampler-Probe (G) im Testintervall 2135 - 2190 m

Datum	Probenart	Teufe (m)	pH	Leifähigkeit (mS/cm)	Chlorid (ppm)
02.03.90	Bohrspülung	-	7.9	3.09	530
02.03.90	HG mit Breaker	-	8.3	0.82	< 10
02.03.90	HG mit Sand	-	8.7	0.80	< 10
06.03.90	Geocom	2176.5	8.1	1.94	220

HG = Hydropack-Gel

Geocom = Geocom Fluid Sampler

3.4.2. Diskussion und Interpretation

Die Spülungswiderstandszunahme im AMS-Log kann als eine Zone erklärt werden, in der es noch nicht zur vollständigen Vermischung zwischen dem Hydropack-Gel (sehr niedrige Leitfähigkeit) und der Bohrspülung (höhere Leitfähigkeit) kam. In der Hydropack-Gel-Probe ließ sich bei der chromatographischen Anionenanalyse eine Komponente nachweisen, die wahrscheinlich als Nitrit anzusprechen ist. In der Geocom-Probe aus 2176.5 m konnte diese Komponente ebenfalls detektiert werden. Somit kann die Vermutung, daß die Spülungswiderstandszunahme in 2176.5 m durch eine Vermischung zwischen Hydropack-Gel und Bohrspülung zustande kommt, bestätigt werden.

3.5. Pumptest (3850.5 - 4000.1 m)

3.5.1. Einleitung

Am 02.04.90 wurde für den Pumptest die im Bohrloch befindliche Bohrspülung durch Leitungswasser ersetzt. Während dieser Operation wurden vier Proben genommen und analysiert.

3.5.2. Ergebnisse

In Tab. 8 sind die Analysenergebnisse der Proben während des Bohrspülungsaustausches zusammengefaßt.

Tab. 8: Analysenergebnisse der Proben des Bohrspülungsaustauschs

Datum	Uhrzeit	Leitfähigkeit	pH	Chlorid	Sulfat
02.04.90	16 ⁰⁰	4.76	12.3	290	360
02.04.90	21 ⁰⁰	3.91	12.2	300	360
02.04.90	21 ⁵⁰	0.70	11.7	15	20
02.04.90	22 ⁵⁵	0.16	10.9	10	15
02.04.90	LW*	0.16	8.5	10	10

*LW = Leitungswasser

Die Ergebnisse zeigen, daß ein kompletter Austausch der Bohrspülung durch Wasser erfolgt war.

Mit Beginn des Pumptestes erfolgte eine kontinuierliche Entgasung der im geförderten Fluid bzw. Wasser gelösten Gase sowie eine Wasserprobennahme in einem zweistündigen Intervall (vgl. Tab. 9 - 12 sowie Abb. 6 - 13).

Die Mittelwerte der Analysen des geförderten Fluids sind in Tabelle 9 zusammengefaßt.

Die durch einen Quirlentgaser freigesetzte Gasphase des Fluids ist nicht durch Luft kontaminiert, da Sauerstoff in dieser Gasphase nicht nachweisbar war. Infolge der unterschiedlichsten Probennahmestellen für die beteiligten Institute kam es während des gesamten Testes jedoch zu kurzzeitigen Störungen des Fluidzuflusses zur Gasfalle. Dies machte sich durch das Auftreten von Sauerstoff in der Gasphase bemerkbar. Die Meßwerte, die auf eine Luftkontamination hinweisen, sind in der Abb. 12 (Stickstoff/Argon) nicht berücksichtigt.

Tab. 9: Mittelwerte des geförderten Fluids aus dem Testintervall 3850.5 - 4000.1 m

Chlorid:	37000	ppm
Natrium:	6300	ppm
Kalzium:	15400	ppm
Strontium:	245	ppm
pH:	8.1	
Leitfähigkeit:	62.7	mS/cm
Gasgehalt:	800	l Gas/m ³ Fluid
Stickstoff:	70	Vol.%
Sauerstoff:	0	Vol.%
Argon:	0.1	Vol.%
Methan:	28	Vol.%
Helium:	0.55	Vol.%
Kohlendioxid:	0.04	Vol.%
Radon:	3000 bzw. 2000	Bq/m ³

Tab. 10: Analysenergebnisse der beim Fördertest gewonnenen Proben

Datum	Uhrzeit	Cl ⁻ (ppm)	Na (ppm)	Ca (ppm)	Sr (ppm)	pH	Leitf. mS/cm
08.04.90	1 ⁰⁵	9	4	14	0.1	8.3	0.17
08.04.90	3 ⁰⁰	13	12	9	0.1	9.8	0.15
08.04.90	5 ⁰⁰	13	12	12	0.1	10.6	0.16
08.04.90	7 ⁰⁰	13	12	13	0.2	10.9	0.17
08.04.90	9 ⁰⁵	12	12	13	0.2	11.0	0.18
08.04.90	11 ⁰⁰	13	11	17	0.2	11.1	0.20
08.04.90	13 ⁰⁰	13	11	14	0.2	11.0	0.19
08.04.90	15 ⁰⁰	12	10	14	0.2	10.9	0.18
08.04.90	17 ⁰⁰	12	11	15	0.2	10.9	0.18
08.04.90	19 ⁰⁰	13	10	14	0.2	10.8	0.18
08.04.90	21 ⁰⁰	13	9	15	0.2	10.9	0.17
08.04.90	23 ⁰⁰	14	10	15	0.2	10.8	0.17
09.04.90	1 ⁰⁰	13	10	14	0.2	10.9	0.17
09.04.90	3 ⁰⁰	13	10	14	0.2	10.8	0.17
09.04.90	5 ⁰⁰	12	9	13	0.2	10.8	0.16
09.04.90	8 ⁰⁰	11	9	14	0.2	10.8	0.17
09.04.90	11 ⁰⁰	11	32	12	0.2	10.7	0.29
09.04.90	13 ⁰⁰	23	26	7	0.1	10.8	0.26
09.04.90	16 ¹⁵	11	13	13	0.2	10.8	0.22
09.04.90	18 ⁰⁸	27	120	19	0.3	11.4	0.85
09.04.90	21 ⁰⁰	760	300	240	4.2	11.1	2.68
09.04.90	22 ⁰⁰	3700	1100	1400	23.5	10.8	10.6
10.04.90	0 ¹⁵	25000	4500	9800	155	10.1	50.5
10.04.90	2 ⁰⁰	27000	5300	12100	188	9.6	56.5
10.04.90	4 ¹⁰	31000	5300	12500	200	8.8	65.0
10.04.90	7 ⁰⁰	32000	5400	12800	206	8.5	62.9
10.04.90	7 ⁰⁰	32000	5500	13100	207	8.0	64.0
10.04.90	9 ⁰⁰	36000	5900	14000	220	8.0	66.8
10.04.90	10 ⁴⁵	34000	6100	14500	229	8.3	65.7
10.04.90	13 ⁰⁰	36000	5900	14100	226	8.2	64.6
10.04.90	17 ⁰⁰	35000	6100	14700	233	7.9	64.2
10.04.90	19 ¹⁰	35000	6100	14700	233	8.2	65.0
10.04.90	21 ¹⁵	36000	6500	15600	247	8.1	65.4
10.04.90	23 ⁰⁰	36000	6300	15000	236	7.9	65.3
11.04.90	1 ⁰⁰	36000	6200	15000	241	8.2	64.1
11.04.90	3 ⁰⁰	38000	6100	15100	241	8.1	63.0
11.04.90	6 ⁰⁰	38000	6300	15300	240	8.2	63.0
11.04.90	9 ⁰⁰	38000	6600	16300	258	8.1	65.4
11.04.90	11 ⁰⁰	38000	6000	14700	233	8.1	61.5
11.04.90	13 ³⁰	37000	6200	15200	250	8.1	58.3
11.04.90	14 ¹⁵	37000	6500	15800	247	8.1	58.0
11.04.90	15 ⁰⁰	37000	6400	15700	246	8.0	62.1
11.04.90	16 ⁰⁰	37000	6300	15700	250	8.0	62.6
11.04.90	17 ⁰⁰	37000	6300	15200	245	8.0	64.1
11.04.90	18 ⁰⁰	38000	6300	15400	248	7.9	62.7

Während des Ausbaus von Pumpgestänge und Testgarnitur erfolgte eine gleichzeitige Probennahme auf der Bohrplattform. Diese Proben sind einer Wassertiefe zwischen 200 und 1000 m zuzuordnen (vgl. Tab. 11).

Tab. 11: Analysenergebnisse der Fluidproben aus dem Testgestänge, die durch den Ausbau des Packers gewonnen wurden (Packersitz bei 1095.25 m)

Teufe (m)	Chlorid (ppm)	Natrium (ppm)	Kalzium (ppm)	Strontium (ppm)	pH	Leitf. mS/cm
200	36000	6600	16000	248	7.3	73.6
400	37000	6300	15400	249	7.3	74.4
600	37000	6500	15800	248	7.4	75.3
800	37000	6500	15900	250	7.4	75.6
1000	36000	6400	15500	249	7.1	74.0
1100	37000	6400	15500	248	7.6	74.6

Nach Abschluß des Teststrangausbaus kamen vier Fluid Sampler (Geocom) zum Einsatz um auch Zuflüsse aus dem Bereich unterhalb des eingebauten Packers beproben zu können. Dreimal wurde die gewonnene Fluidprobe in Sekundärprobenbehälter mit Hilfe eines Neonpolsters überführt (GSF München). Die Analysenergebnisse sind in Tabelle 12 zusammengefaßt.

Tab. 12: Analysenergebnisse der mit dem Geocom-Probennehmer gewonnenen Fluidproben (auf H₂O und Ne korrigiert)

Probennehmer	G	G	G	G
Teufe (m)	1100	1950	2000	2050
Stickstoff (Vol.%)	76.6	68.31	70.55	67.39
Sauerstoff (Vol.%)	18.8	0	0	0
Argon (Vol.%)	n.b.	0.19	n.b.	0.21
Kohlendioxid (Vol.%)	0.12	0.06	0.07	0.11
Methan (Vol.%)	0.64	30.90	29.37	31.73
Helium (Vol.%)	0.023	0.54	n.b.	0.57
Gasgehalt (l Gas/ m ³ Fluid)	-	440	65	620
Chlorid (ppm)	90	37000	37000	38000
Natrium (ppm)	20	6700	6400	6500
Kalzium (ppm)	20	16400	15600	15900
Strontium (ppm)	< 1	260	250	255
pH	10.7	8.0	8.1	6.6
Leitfähigkeit (mS/cm)	0.2	76.8	76.1	76.5

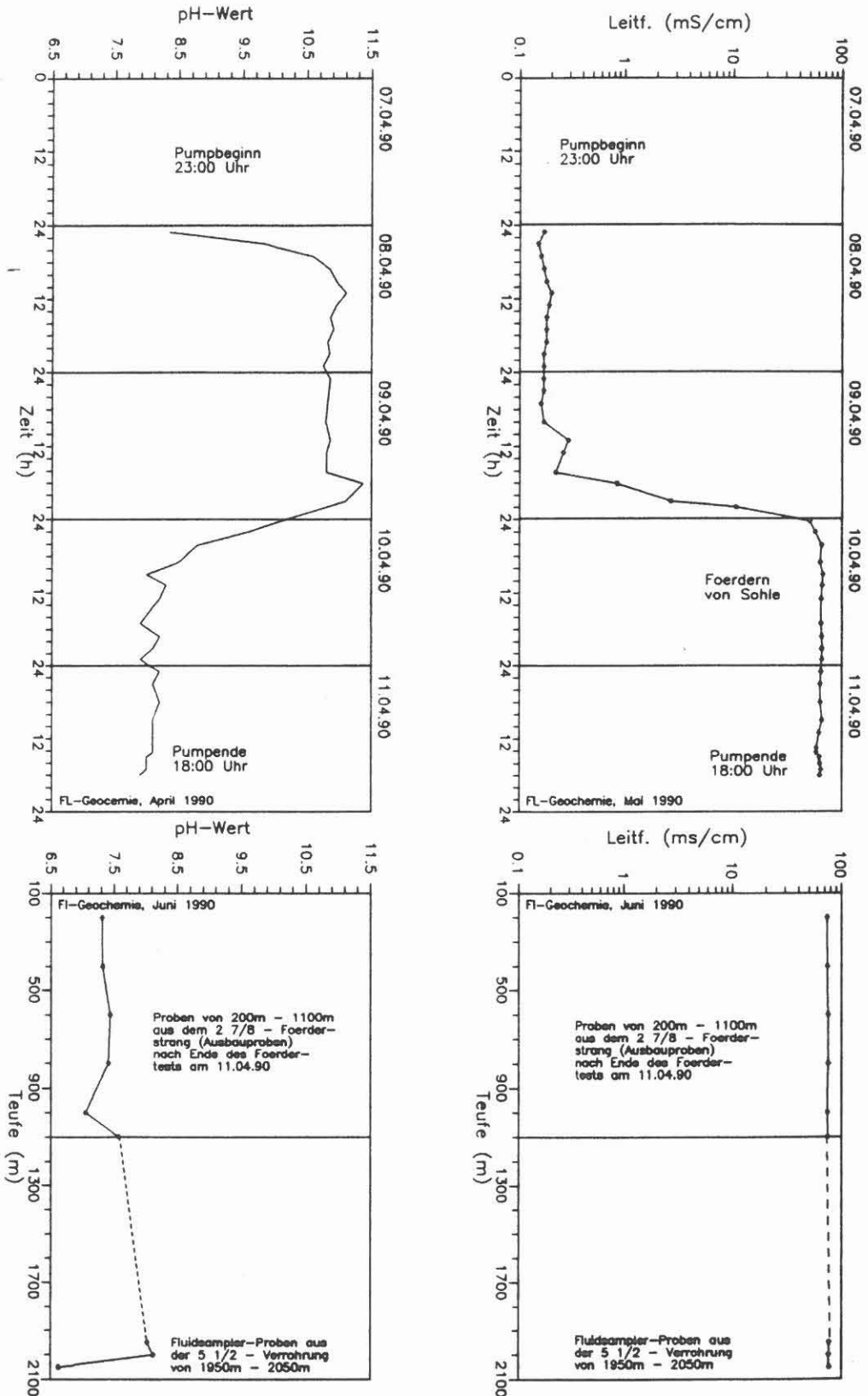


Abb. 6: Zeit- und Teufenabhängigkeit der pH- und Leitfähigkeitswerte des gefördert Fluids; oben: Probennahme am übertägigen Auslauf; unten: Probennahme aus Teststrang sowie mit Fluid Sampler

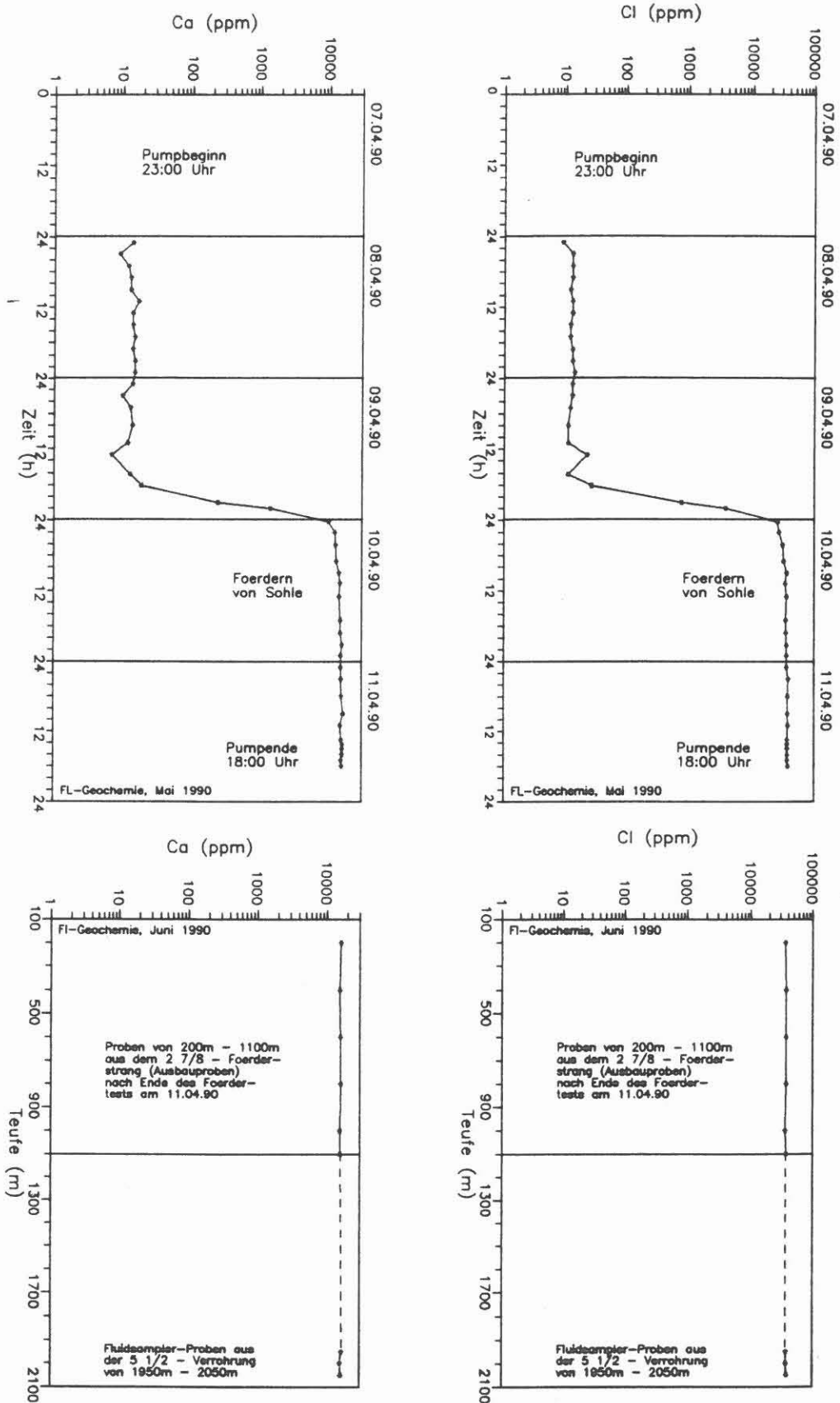


Abb. 7: Zeit- und Teufenabhängigkeit der Kalzium- und Chloridwerte des geförderten Fluids; oben: Probennahme am übertägigen Auslauf; unten: Probennahme aus Teststrang sowie mit Fluid Sampler

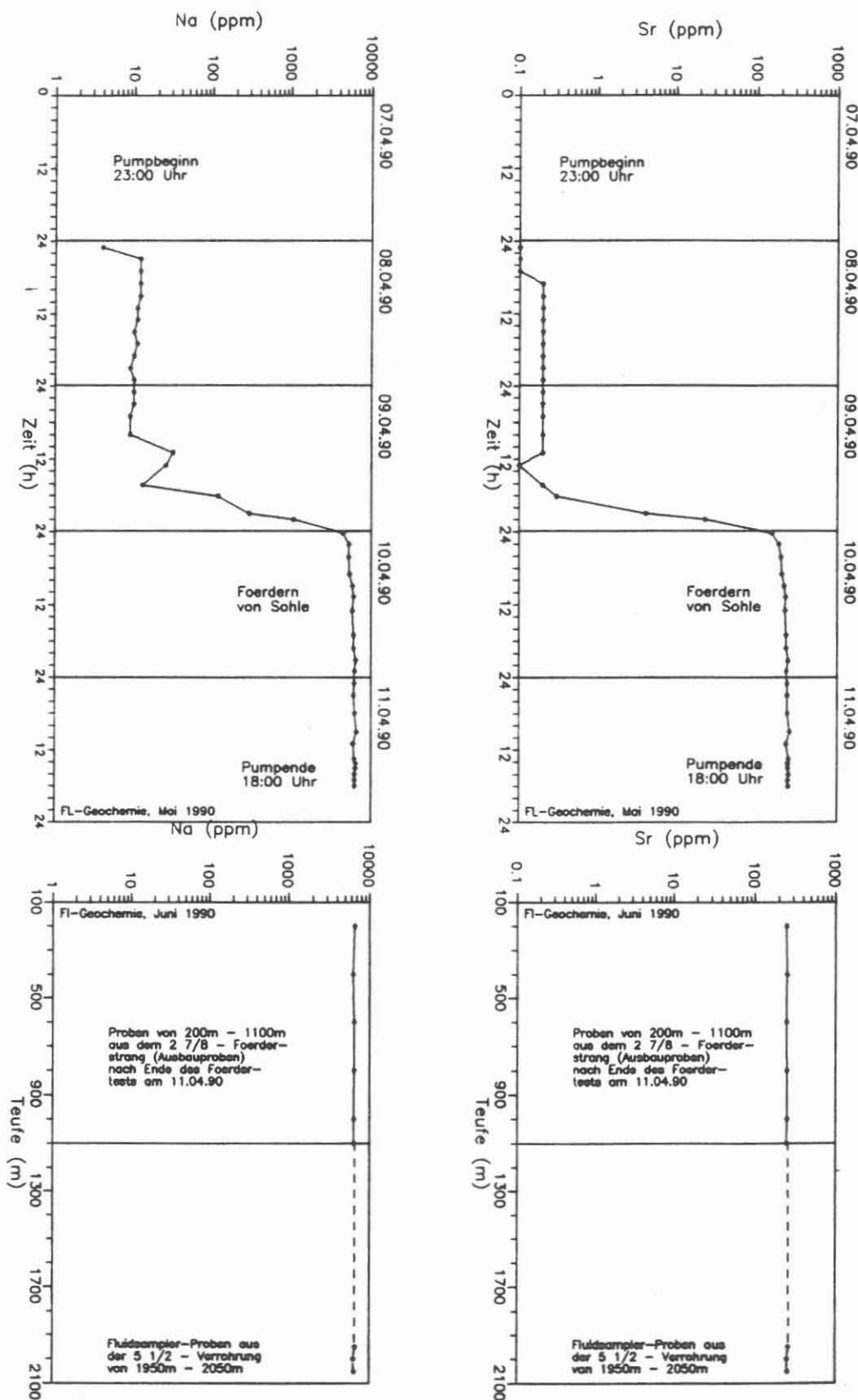


Abb. 8: Zeit- und Teufenabhängigkeit der Natrium- und Strontiumwerte des geförderten Fluids; oben: Probenahme am übertägigen Auslauf; unten: Probenahme aus Teststrang sowie mit Fluid Sampler

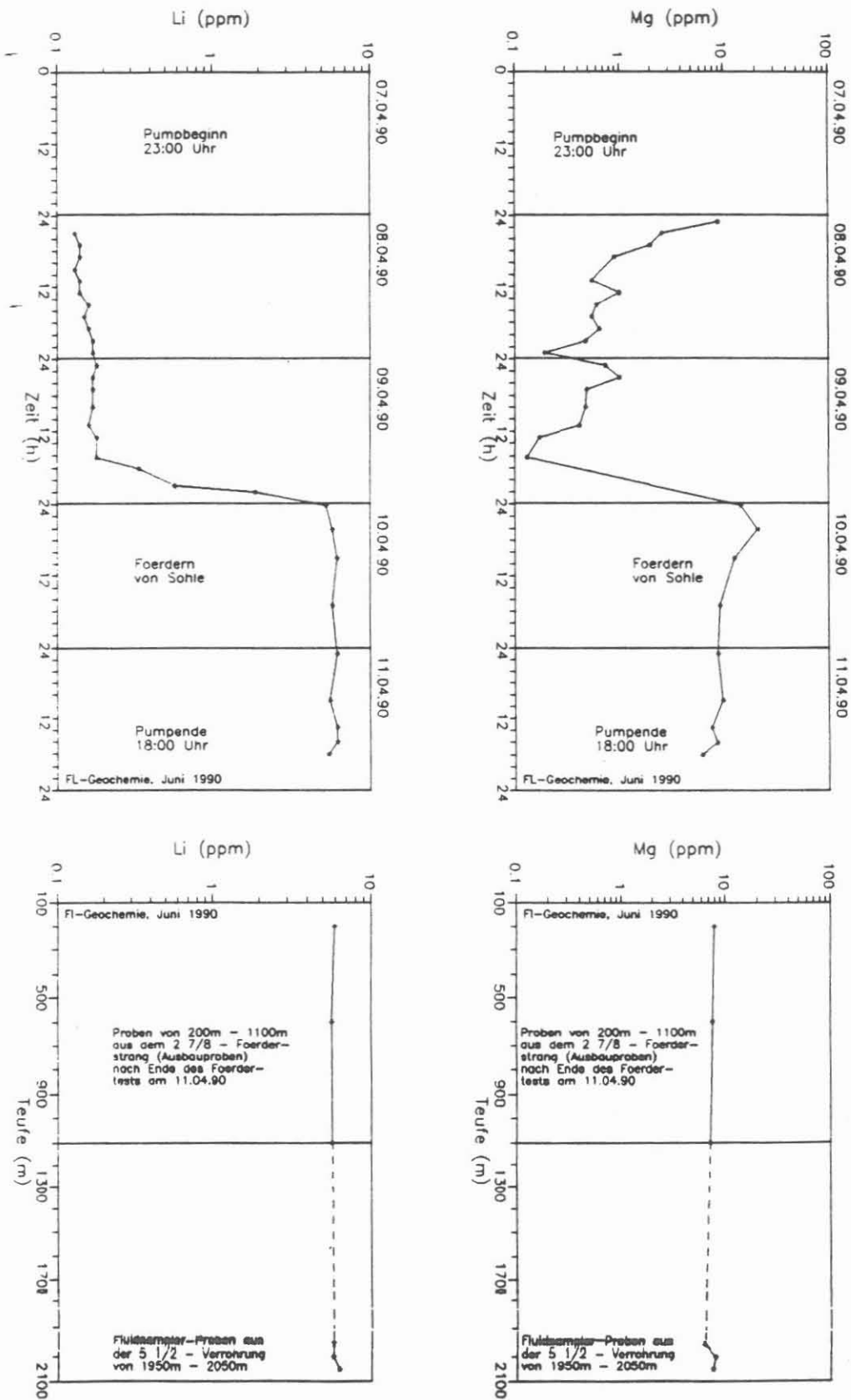


Abb. 9: Zeit- und Tiefenabhängigkeit der Lithium- und Magnesiumwerte des geförderten Fluids; oben: Probennahme am übertägigen Auslauf; unten: Probennahme aus Teststrang sowie mit Fluid Sampler

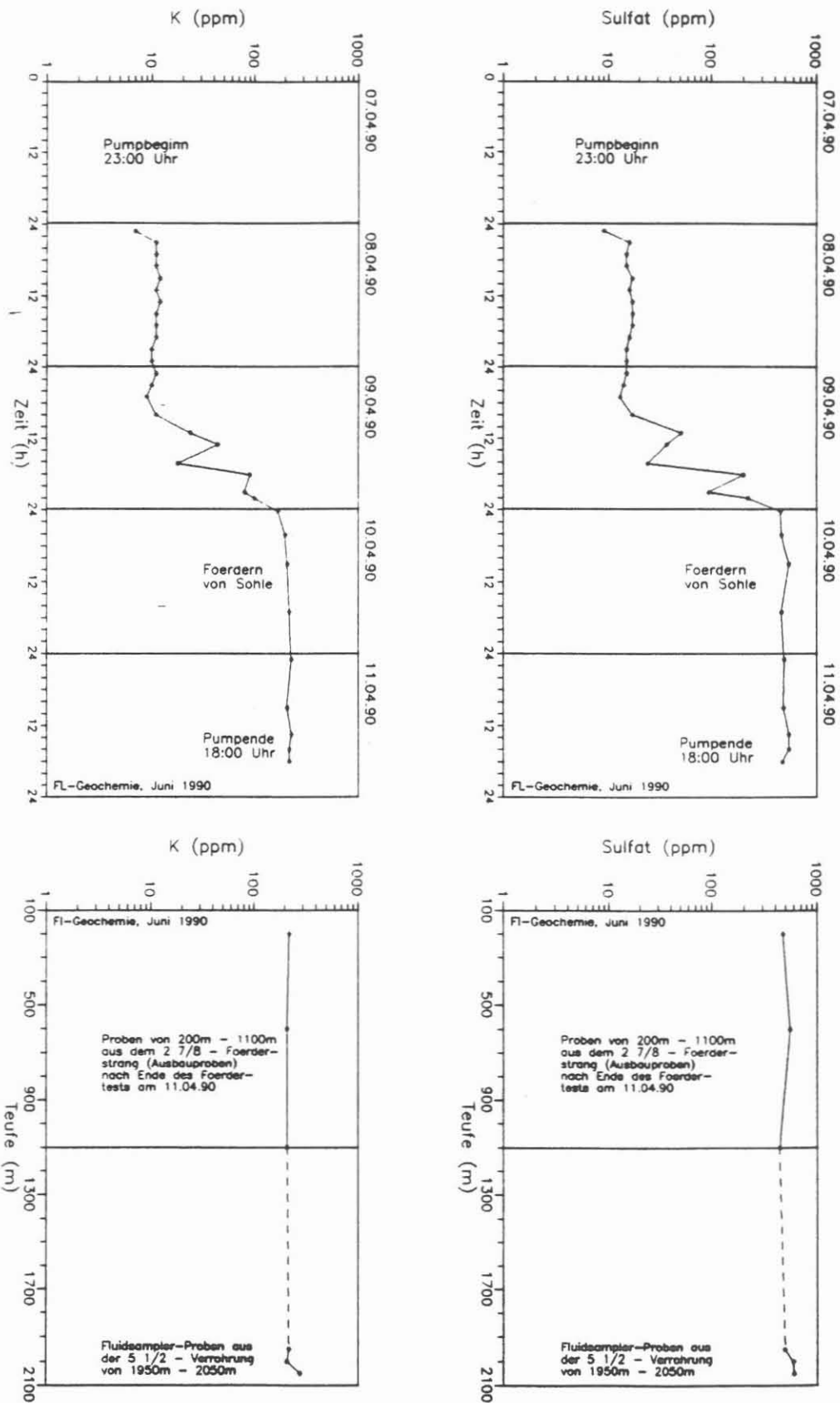


Abb. 10: Zeit- und Teufenabhängigkeit der Kalium- und Sulfatwerte des geförderten Fluids; oben: Probennahme am übertägigen Auslauf; unten: Probennahme aus Teststrang sowie mit Fluid Sampler

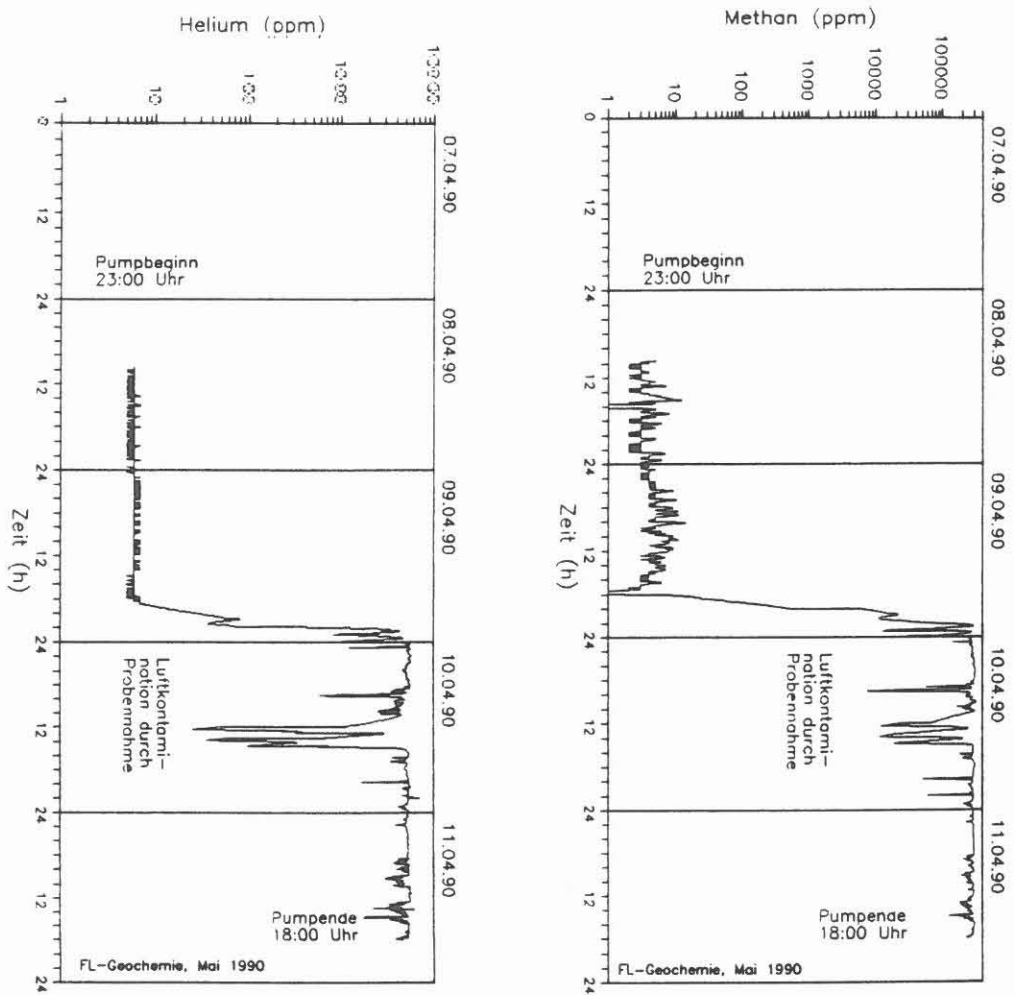


Abb. 11: Zeitabhängigkeit der Helium- und Methangehalte der aus dem geförderten Fluid freigesetzten Gasphase.

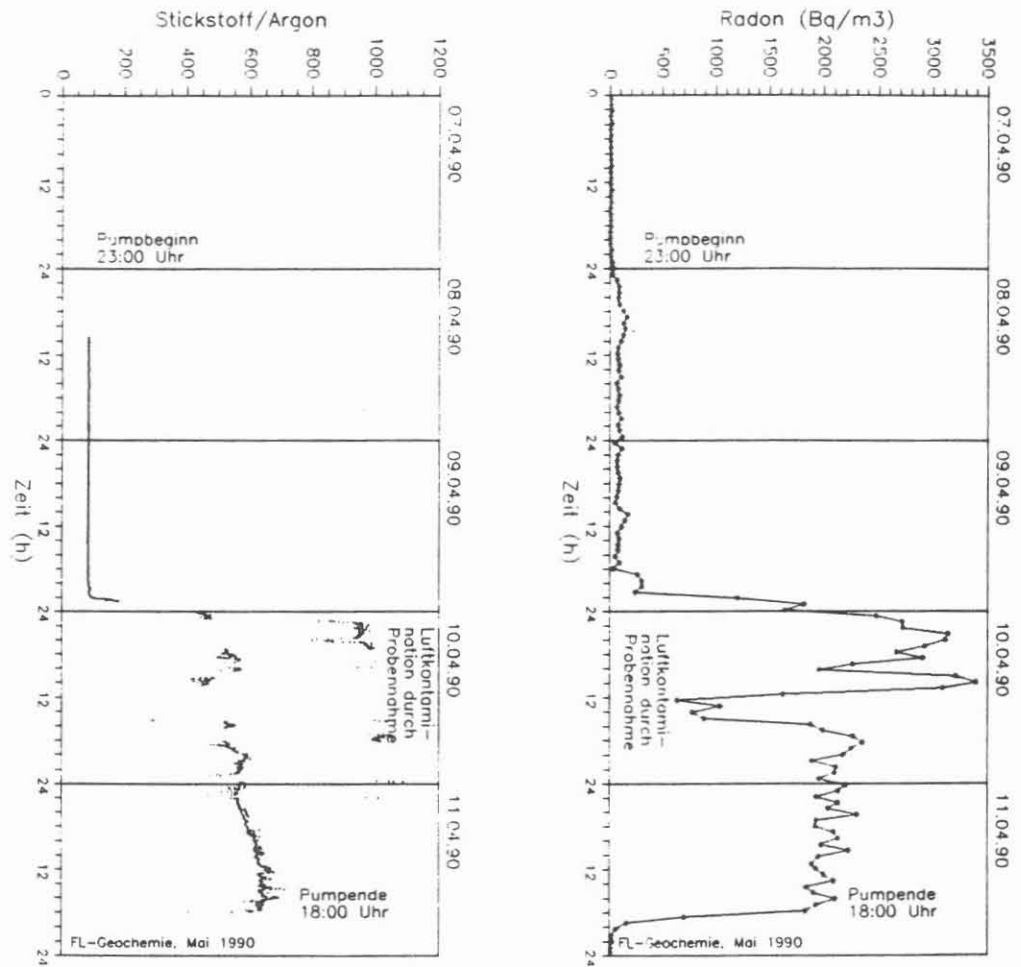


Abb. 12: Zeitabhängigkeit der Stickstoff/Argonverhältnisse sowie der Radongehalte der aus dem geförderten Fluid freigesetzten Gasphase.

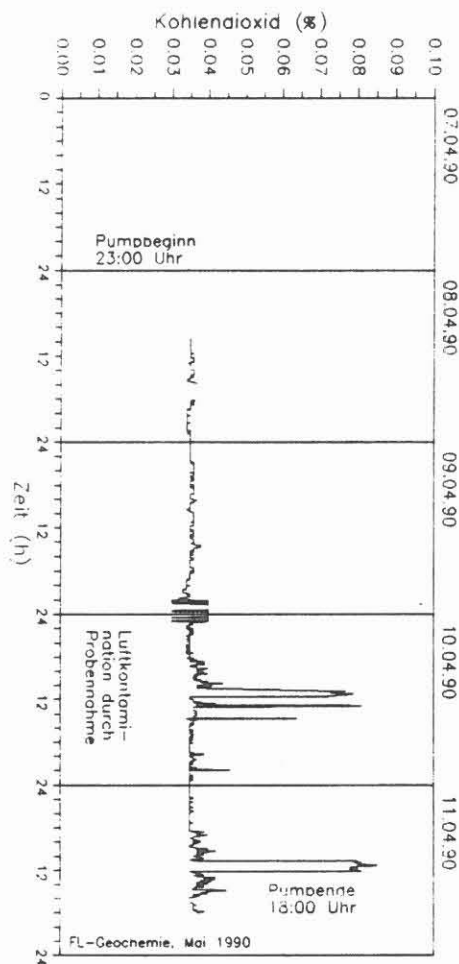


Abb. 13: Zeitabhängigkeit der Kohlendioxidgehalte der aus dem geförderten Fluid freigesetzten Gasphase

3.5.3. Diskussion und Interpretation

Anhand der chemischen Analyse der Formationsflüssigkeit und der kontinuierlich während dem Pumptest durchgeführten Gasanalyse der aus dem Fluid freigesetzten Gasphase kann sehr gut belegt werden, daß die Vermischungszone zwischen dem Leitungswasser und dem gesamten geförderten hochsalinaren Fluid nur schwach ausgeprägt war. Die Anionen- bzw. Kationen-anreicherungen erfolgten simultan zur Gasanreicherung. Die für diesen Zufluß charakteristischen Elementanreicherungen an Ca, Na, Sr und Cl⁻ sowie die der Gase CH₄ und He sind in dem gesamten geförderten Fluid während dem Pumptest konstant. Die Fluidzusammensetzung der "Gestängeausbau-Proben" und der Fluid Sampler-Proben (Ausnahme Teufe 1100) zeigen die Homogenität der chemischen Zusammensetzung an. Vor dem Ausbau des Packers (Packersitz in 1095.25 m) füllte man den Ringraum zwischen dem Teststrang und der Verrohrung oberhalb des

Packers mit Leitungswasser auf. Deshalb zeigt die Fluid Sampler Probe aus 1100 m im wesentlichen Leitungswasserzusammensetzung.

Es ließ sich bis zum Testende keine signifikante Änderung der chemische Zusammensetzung des Fluids nachweisen. Neben den konstanten Methan- und Heliumgehalten der freigesetzten Gasphase fällt auf, daß die ^{222}Rn (KTB FL) Gehalte nach Erreichen eines Plateaus (ca. $3000 \text{ Bq/m}^3 \text{ Gas}$) auf ca. 2000 Bq/m^3 fallen. Die Radonmessungen der TU Berlin zeigen einen identischen Trend.

Auffällig ist auch, daß das N_2/Ar -Verhältnis ebenfalls diesen Trend nachbildet. Eine Erklärung dieses Phänomens kann zur Zeit noch nicht gegeben werden, außerdem ist zu fragen, ob es sich um eine Scheinkorrelation handelt.

4. Vergleich unterschiedlicher Fluidzutritte

Nach den bisher durchgeführten Untersuchungen der Bohrspülungs-, Fluid Sampler- und Drillstemtest Proben lassen sich zum heutigen Zeitpunkt nur zwei der salinaren Fluidzutritte anhand des Chemismus eindeutig charakterisieren. Diese beiden fluidhaltigen Bereiche sind bei 3447 m und 4000 m. Die beiden genannten Fluidzutritte zeichnen sich allgemein durch Anreicherung von Natrium, Kalzium und Chlorid sowie der Gase Methan und Helium aus.

Abbildung 14 zeigt, daß sich die salinaren Fluide aus 3447 m und 4000 m voneinander abgrenzen lassen. Das Formationswasser aus 3447 m zeichnet sich durch höhere Na/Ca- und niedrige Ca/Sr-Verhältnisse aus.

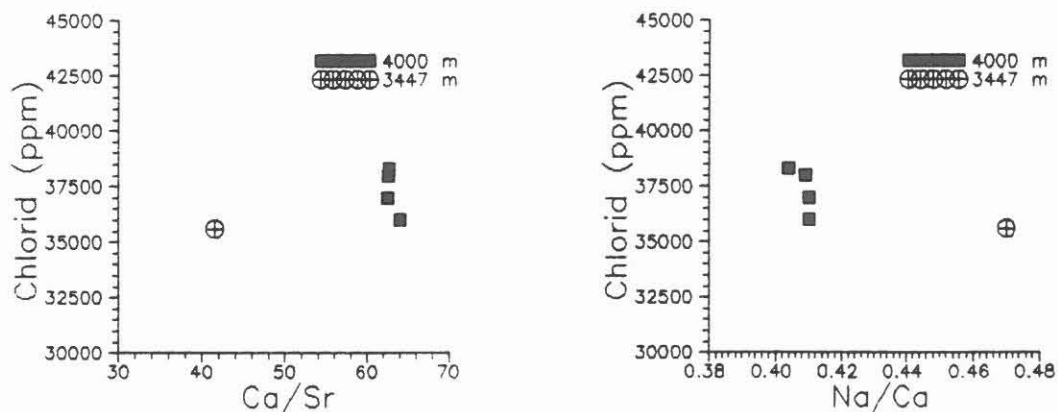


Abb. 14: Vergleich der Fluide aus 3447 m und 4000 m Bohrloch-
teufe

Im Verlauf der Bohrarbeiten konnten in bestimmten Teufenbereichen anhand der kontinuierlich durchgeführten Gasanalyse gasförmige Zutritte ins Bohrloch nachgewiesen werden. Mittels der Methan/Heliumverhältnisse lassen sich diese Zutritte voneinander unterscheiden (vgl. Abb. 15).

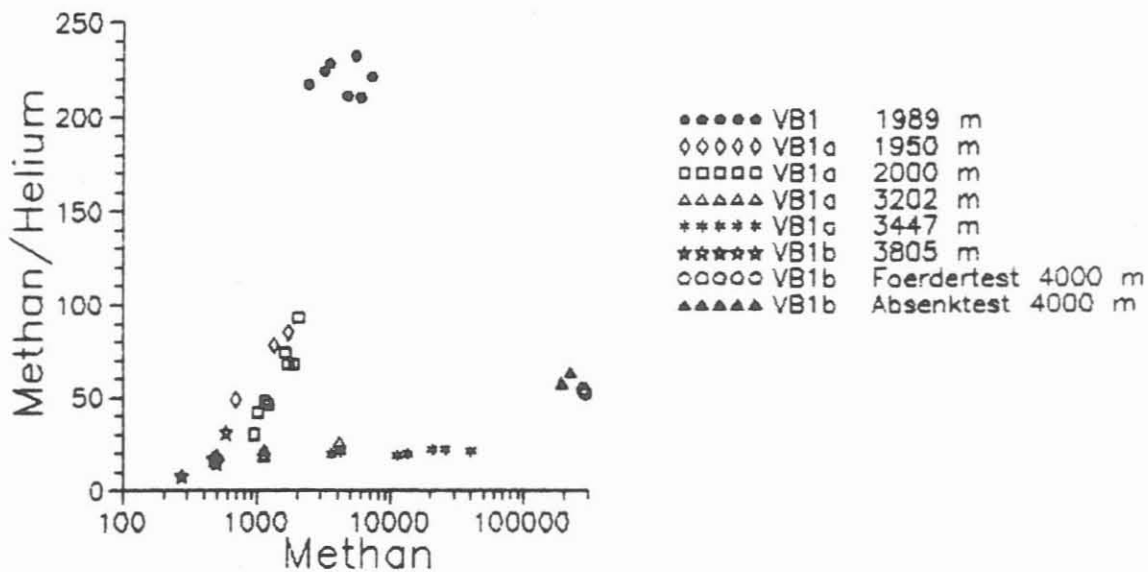
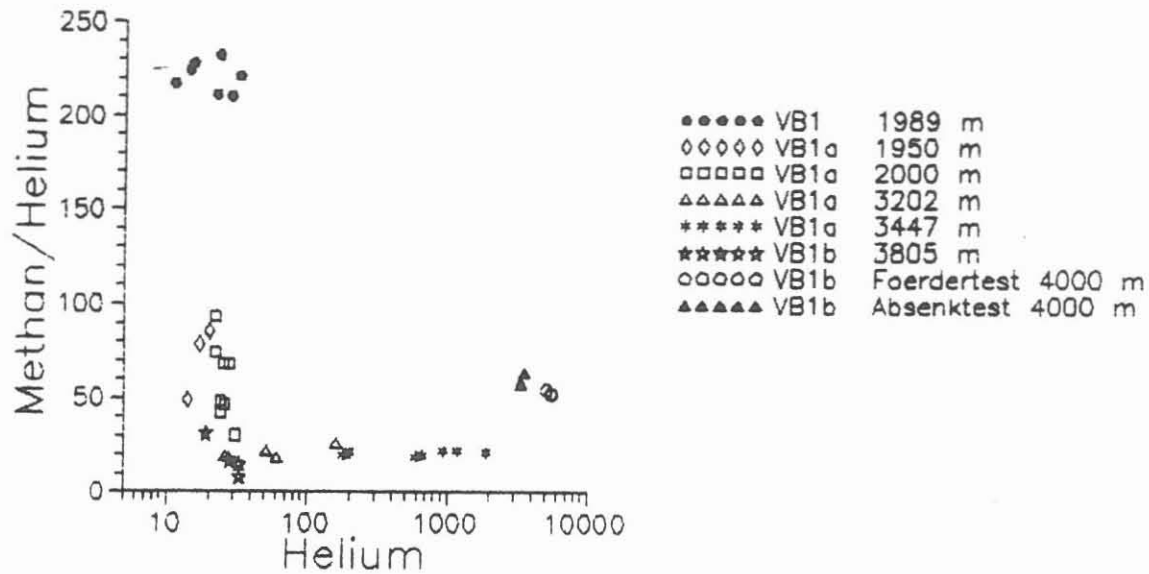


Abb. 15: Methan/Heliumverhältnisse der stärksten gasförmigen Zutritte während der KTB VB ab Teufe 1000 m

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich die Fluide aus 3447 m und 4000 m sowohl chemisch als auch durch die Zusammensetzung der Gasphase voneinander unterscheiden lassen. Offensichtlich handelt es sich um zwei unterschiedliche Fluidsysteme.

5. Schriftenverzeichnis:

- HEINSCHILD, H.J., HOMANN, K.D., STROH, A. & TAPFER, M. (1988): Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 480 bis 992 m. - In: EMMERMANN, R., DIETRICH, H.-G., HEINISCH, M., WÖHRL, T. (Hrsg.): KTB-Report, 88-2: C1-C107, Hannover.
- KESSELS, W., ZOTH, G. & KÜCK, J. (1989): Erste Ergebnisse eines Absenk- und Injektionstestes in der KTB-Oberpfalz VB, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, Projektgruppe KTB
- STROH, A., HEINSCHILD, H.J., HOMANN, K.D. & TAPFER, M. (1988): Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 992 bis 1530m. - In: EMMERMANN, R., DIETRICH, H.-G., HEINISCH, M., WÖHRL, T. (Hrsg.): KTB-Report, 88-6: C1-C109, Hannover.
- WITTENBECHER, M., HEINSCHILD, H.J., STROH, A. & TAPFER, M. (1989): Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor - Teufenbereich von 3009.7 bis 3500 m. - In: EMMERMANN, R., DIETRICH, H.-G., HEINISCH, M., WÖHRL, T. (Hrsg.): KTB-Report, 88-5: C1-C62, Hannover.

6. Danksagung

Der Dank gilt den Mitarbeitern der Geochemiegruppe im Feldlabor, Frau A. Heinschild, Herrn D. Homann, Herrn H. Kamm, Herrn S. Merz, Herrn M. Wittenbecher. Für die kritische Durchsicht des Manuskripts möchte ich Herrn Dr. H.G. Dietrich und Dr. J. Lauterjung danken.

7. ANHANG

Einsatzteufen sämtlicher erfolgreich durchgeführter Fluid
Sampler Einsätze der KTB Vorbohrung

<u>Datum</u>	<u>Teufe (m)</u>	<u>Typ</u>
04.10.87	187	G
15.10.87	351	?
05.11.87	380	G
05.11.87	430	G
05.11.87	238	S*
06.11.87	220.7	S*
04.01.88	582	G
04.01.88	602	G
04.01.88	722	G
05.01.88	817	G
05.01.88	841	G
05.01.88	907.5	G
05.01.88	971	G*
05.01.88	514	S
05.01.88	971	S
01.02.88	545	G
01.02.88	555	G
01.02.88	580	G
11.02.88	1230	G
11.02.88	1246	G
11.02.88	1295	G
31.05.88	2160	S*
05.06.88	2164	S
05.06.88	1934	G
18.08.88	2164	G
07.09.88	2833	G
08.09.88	2164	G
15.09.88	2327	G*
16.09.88	1927	G*
28.10.88	3446.5	G
28.10.88	3447	P
07.11.88	3447	DST
13.12.88	3447	G
14.12.88	3567	G
03.01.89	3736	G
14.01.89	3801	G
17.01.89	3817.2	G*
17.01.89	3799.5	G*
17.01.89	3740	G*
17.01.89	3445.5	G*
12.05.89	3985	G
13.05.89	3930	G
17.05.89	3995	G
17.05.89	3930	G
01.06.89	528	MSST
01.06.89	3730	MSST

<u>Datum</u>	<u>Teufe (m)</u>	<u>Typ</u>
01.06.89	3830	MSST
02.06.89	3300	MSST
02.06.89	3400	MSST
02.06.89	3500	MSST
02.06.89	3600	MSST
02.06.89	3625	MSST
02.06.89	3650	MSST
02.06.89	3675	MSST
02.06.89	3700	MSST
02.06.89	3730	MSST
11.12.89	3203	LA
11.12.89	3195	LA*
12.12.89	3202	G
27.02.90	451.8	P
28.02.90	480	P
28.02.90	650	P
28.02.90	540	P
28.02.90	720	P
28.02.90	650	P
28.02.90	650	P
01.03.90	505	G
01.03.90	505	G*
01.03.90	635	G*
01.03.90	708	G*
02.03.90	648	G
06.03.90	2176.5	G
12.04.90	1100	G
12.04.90	1950	G
12.04.90	2000	G
12.04.90	2050	G

G = Geocom
LA = Los Alamos
MSST = Multi Fluid Sampler
P = Preussag
S = Salvamoser
* = Probennehmer nicht
gasdicht

* Institut für Angewandte Geologie
Freie Universität Berlin
Wichernstr. 16
1000 Berlin 33

** Geologisch-Paläontologisches Institut
der Universität Kiel
Olshausenstr. 40/60
2300 Kiel

Zwischenbericht über erste Ergebnisse der Hydrochemie
(Pumpversuch vom 07. 04. 90–11. 04. 90)
an der KTB-VB

A. Pekdeger *
C. Sommer-von Jarmersted *
H. Woith **



ZWISCHENBERICHT ÜBER ERSTE ERGEBNISSE DER HYDROCHEMIE
(PUMPVERSUCH VOM 7.4.90 - 11.4.90) AN DER KTB-VB

A. Pekdeger *
C. Sommer-von Jarmersted *
H. Woith **

1. Zusammenfassung

Der Verlauf des Pumpstest an der KTB-VB vom 7.4.90 bis 11.4.90 konnte im Hinblick auf die hydrochemischen Parameter, trotz einiger bohrtechnischer Probleme, verändertem Testvolumen und nicht immer konstanten Fördervolumen, erfolgreich beurteilt und überwacht werden. Das Ziel des Tests, Formationswässer aus 4000 m Tiefe zu beproben, ist nach den dargestellten Ergebnissen (siehe Abb. 1-4) erreicht worden. Mit der zeitlichen Änderung der Ionenkonzentrationen im Verlaufe des Pumpstests, läßt sich die Entwicklung von den süßen Zirkulationswässern über eine Süß/Salzwasser-Mischzone bis hin zum Aufstieg hochsalinärer Formationswässer eindeutig aufzeigen (siehe Abb. 3). Auch die anderen dargestellten Parameter lassen diese Phasen des Pumpstests - Förderung des Süßwassers, der Mischungszone und des Formationswassers - erkennen, wobei die elektrischen Leitfähigkeiten dies am Eindeutigsten widerspiegeln. Obwohl keine Markierungsstoffe für den Test eingesetzt werden konnten, weisen die konstanten Ionenkonzentrationen der Hauptinhaltsstoffe zum Ende des Versuches (Abb. 3), darauf hin, daß unvermishtes Tiefenwasser über mehr als 20 Stunden gepumpt wurde. Inwieweit doch noch geringste Kontaminationsspuren von Spülmittelzusätzen im Salzwasser vorhanden sind, läßt sich noch nicht eindeutig ausschließen (siehe Abschnitt 5 und Abb. 4).

Abstract

During the pumping-test from april 7.th to 11.th the hydrochemical parameters could be succesfully controlled and adequate sampling was done. Although technical problems had to be encountered. The objektive of the test, sampling of formation water from 4000 m was reached. Due to continous measurements of hydrochemical parameters and a 2-hours sampling interval (fig. 1-4) it could be shown that highly saline waters could be sampled at the surface after the low saline circulation fluid was pumped out (fig. 3). Most of the measurements show the increase of salinity from the circulation water, a mixing zone to the saline formation water. This can be seen by the measurements of electrical conductivity (in fig. 1) which was registrated continuously. Although no tracer could be used due to technical difficulties, the ionic concentrations show that formation water could be extracted for 20 hours as measured at the surface. The amount of rest contamination can not be quantified adequately before the analytical work is completed.

Anschrift der Autoren: *Institut für Angewandte Geologie, Freie Universität Berlin, Wichernstr. 16, D-1000 Berlin 33.

**Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Kiel, Olshausenstr. 40/60, D-2300 Kiel.

2. Einleitung

Bei der Planung des Hydraulik- und Fluidtestprogramms war der Packereinbau in einer Teufe von 3800 m mit einem entsprechenden Testvolumen von ca. 12 m³ zugrunde gelegt worden.

Aufgrund bohrtechnischer Probleme mußte das Testprogramm umgestellt werden. Der Packer wurde in einer Teufe von 1100 m gesetzt; somit erhöhte sich das für die Probennahme uninteressante Fördervolumen von im wesentlichen Zirkulationswasser (Leitungswasser) von 12 auf ca. 38 m³.

Wegen des vorgegebenen begrenzten Zeitrahmens war damit zwangsläufig eine drastische Reduzierung des ursprünglich angestrebten 6-fachen Volumenaustausches verbunden.

Aus technischen Gründen unterblieb der geplante Einsatz von Markierungsstoffen während der Zirkulationsphase, so daß die Abschätzung der Fluidkontamination während des Pumptests lediglich über physikochemische und chemische Parameter erfolgen konnte.

3. Pumpzeit, Förderrate und Austauschrate

Der Pumptest begann am 07.04.90 um 23⁰⁰ und endete am 11.04.90 um 18⁰⁰, d. h. die Förderzeit betrug 92 Stunden.

Da das Flowmeter im Verlauf des Tests ausfiel, lassen sich die Förderraten nicht genau festlegen. Die Angaben schwanken zwischen 10 und 15 l/min. Das Gesamtfördervolumen betrug nach OSTROWSKI (Baker/Lynes & ITA) 71,0 m³; dies entspricht einem 2-fachen Volumenaustausch.

4. "In-situ" Messung der physikochemischen Parameter

Der ph-Wert (pH), die Redoxspannung (Eh), die Temperatur (T), die Leitfähigkeit (LF) und der Sauerstoffgehalt (O₂) wurden während des Pumptests kontinuierlich aufgezeichnet. Dies geschah im kontinuierlichen Durchfluß, wobei sich die Meßsonden in einem Durchflußgefäß befanden, um einen Zutritt von Luftsauerstoff zu unterbinden. Die Meßsonden wurden mit einem durchschnittlichem Volumenstrom von 0,3 l/min umspült.

Die Meßapparaturen waren anfänglich über einen Bypass hinter dem Lynes-Entgaser mit dem Hauptstrang verbunden, später aufgrund des geringen Druckgefälles direkt am ersten T-Abzweig - also vor dem Entgaser.

Die in-situ Messungen erfolgten parallel mit zwei kompletten Meßgarnituren, zusätzlich wurden zeitweilig bis zu zwei weitere Leitfähigkeitsmeßgeräte hinzugenommen. Die Daten wurden stündlich manuell abgelesen, ein Gerätesatz war zur kontinuierlichen Aufzeichnung mit einem Datenlogger, der zweite Gerätesatz mit zwei Schreibern, zusätzlich verbunden.

5. Probennahme und -behandlung, Bestimmung chemischer Inhaltsstoffe

Im Abstand von zwei Stunden wurden von der Arbeitsgruppe der FU-Berlin fünf Proben für die weiteren Bestimmungen am Probennahmeschlauch des ersten T-Abzweiges (Aufbau der Meßapparaturen und Installationen siehe HEINISCH in diesem Heft) entnommen. Davon entfielen zwei 500 ml Proben in Kautexflaschen für das KTB-Feldlabor, zwei 50 ml Proben in Kautexflaschen für die eigenen Analysen und eine Probe für die sofortige Bestimmung der Alkalität (Säureverbrauch bis pH 4,3, m-Wert). Die Proben für das Feldlabor dienten zur Bestimmung vor Ort und als Archivmaterial. Sie wurden nicht weiter behandelt. Die 50 ml Proben wurden im Anschluß feinfltriert (0,45 µm) und je eine Probe mit HNO₃-suprapur auf einen pH < 2 angesäuert. Diese Proben werden für die weiteren Bestimmungen am Institut für Angewandte Geologie (FU-Berlin) verwandt.

Vom KTB-Feldlabor wurden mittels Ionenchromatographie (IC) die Anionen CL und SO₄ und mit einer ICP- AES die Kationen Na, Ca, Li, K, Sr, Ba, Fe, Mg, Mn, und Zn bestimmt. Von diesen Parametern lagen bereits während des Pumptests erste Analyseergebnisse vor, die gemeinsam mit den ermittelten physikochemischen Größen, die Grundlage für die Überwachung des Pumptestverlaufes darstellten. Nach dem "Durchbruch" des Formationswassers konnten jedoch nicht mehr alle oben aufgeführten Ionen bestimmt werden.

Am Institut für Angewandte Geologie werden die oben aufgeführten Ionen sowie weitere Ionen und Parameter mit ionenspezifischen Analysenverfahren wie Photometrie, Titration, Flammenphotometer, AAS-Flamme und AAS-Graphitrohr nochmals einzeln bestimmt.

6. Verlauf des Pumptests und erste Ergebnisse

Durch den Förderstrom der Pumpe wurden Farbreste vom Pumpengestänge in blättriger Form, metallischer Gestängeabrieb und Gewindefett mit zutage gerissen, die mehrmals das Flowmeter und die Zuläufe zu den Durchflußmessungen verstopften. Dies verursachte letztendlich den Ausfall des Flowmeters und führte zur mehrmaligen kurzzeitigen Reduzierung der Fördermenge und zur Unterbrechung des Förderstroms für die Durchflußmessungen. Dies war besonders nach dem Aufstieg des Formationswassers festzustellen. Diese Unterbrechungen wirkten sich störend in Form von größeren Schwankungen auf die kontinuierliche Erfassung der physikochemischen Parameter aus. Die Bedeutung für die chemische Zusammensetzung der Wässer wird z. Z. untersucht.

In den Abbildungen 1 und 2 ist die Entwicklung der Leitfähigkeit, der Temperatur, des pH-Wertes und des Eh, auf der Basis der stündlichen Beobachtungen, aufgetragen. An Hand der Leitfähigkeiten (Abb.1) läßt sich schon deutlich der Aufstieg hoch-

mineralisierter Formationswässer darstellen. Der Kurvenverlauf bestätigt die vorhergesagte scharfe Trennung zwischen Süß- und Salzwasser mit einer geringen Durchmischungszone. Die langen Austiegszeiten bewirken eine Abkühlung des 118 °C heißen Formationswassers bis zum Austritt an der Oberfläche auf im Mittel ca. 12 °C (Abb.1). Weiterhin wird ein Tag- und Nachtgang der Temperaturen angezeigt, der aber auf die Schlauchauslage von mehreren 10-er Metern an der Oberfläche und die kühlen Umgebungstemperaturen während der Nächte zurückzuführen ist.

Nach dem Aufstieg der Formationswässer traten erhebliche meßtechnische Probleme bei allen Leitfähigkeitssonden auf, und zwar in der Form, daß trotz ständiger Elektrodenreinigung die Meßwerte in kurzer Zeit deutlich wieder absanken (z.T mehrere 1.000 μS pro Stunde). Dies deutet sich auch in der Graphik an, wobei zum Ende des Pumptests durch häufigeres Reinigen und wahrscheinlich durch Abnahme der Ursachen stabilere Meßwerte wieder erreicht wurden. Der achsenparallele Kurvenast zum Ende des Pumptests mit Leitfähigkeiten um $\text{LF}_{25\text{ cm}} = 82.000 \mu\text{S}$ zeigt, daß das Zirkulationswasser sicher abgepumpt wurde.

Die pH- und Eh-Messungen (siehe Abb. 2) weisen in ihrem Verlauf stärkere Schwankungen auf, die sich größtenteils auf die Unterbrechungen des Förderstroms, bzw. auf Veränderungen der Durchflußmenge, worauf beide Sondentypen sensibel reagieren, zurückführen lassen.

Wenige Stunden nach dem Pumpbeginn stellen sich pH- und Eh-Gleichgewichte für die Zirkulationswässer ein, die im weiteren Verlauf leicht fallende Tendenzen, besonders für die Eh-Werte, zeigen. Bemerkenswert sind die hohen pH-Werte, die deutlich im alkalischen Bereich liegen. Auffällig ist der deutliche pH Anstieg auf pH 11,5 und das Absinken der Eh-Werte auf Eh -580 mV kurz vor der Vermischungsfront, sowie der nachfolgende steile pH Abfall auf pH 8,3 und das wiederansteigen der Eh-Werte mit dem Erscheinen der Formationswässer (siehe auch Abb. 1, 3 und 4). Zum Ende des Pumptests lag der pH bei 8,38, also noch schwach alkalisch, und der Eh von -230 mV weist auf stark reduzierende Verhältnisse. Dieser pH dürfte mit Sicherheit nicht dem pH unter Lagerstättenbedingungen entsprechen. Hier müssen erst noch geochemische Modellierungen erfolgen, um das Lagerstättenmilieu schlüssig zu beschreiben.

Das in der ersten Phase geförderte Zirkulationswasser war sehr stark getrübt und wies eine bräunlich-schwarze Färbung auf. Nach dem Filtrieren waren diese Wässer klar und farblos; ein auffälliger Geruch konnte nicht festgestellt werden. Die Filtrationsrückstände bestanden neben den oben schon erwähnten Stoffen in dieser Phase im wesentlichen aus einer kalkhaltigen Substanz, die wahrscheinlich von der Bohrlochzementation her stammt. Mit dem Aufstieg der Mischungszone wurden die Wässer zusehens klarer und waren zum Ende des Versuches völlig klar. Die Rückstände auf den Filtern bestanden jetzt überwiegend aus metallischen Komponenten und einem "schmierigen" Anteil, der

auf Gewindefett deutet. Die metallischen Rückstände konnten durch eine RDA-Übersichtsaufnahme und durch ihre magnetischen Eigenschaften diagnostiziert werden.

Nach dem Ausbau des Pumpengestänges wies dieses zum Teil erhebliche Abriebspuren auf, womit sich die metallischen Rückstände auf den Filtern erklären.

Nach dem Filtrieren konnte besonders bei den Wässern aus der Mischungszone eine leicht gelbliche Färbung festgestellt werden. Diese Wässer wiesen alle einen sehr stark muffigen Geruch auf, der aber nicht näher bestimmbar war. H₂S-Entgasungen konnten nicht wahrgenommen werden.

In den Abbildungen 3 und 4 sind erste Ergebnisse der chemischen Analysen vom Institut für Angewandte Geologie aufgetragen. Der enge Zusammenhang zwischen der Leitfähigkeit (Abb. 1) und den Konzentrationen chemischer Inhaltsstoffe (Abb. 3) wird in der Zusammenschau deutlich. Die Zirkulationswässer besitzen nur geringe Lösungsinhalte, mit dem Aufstieg der Mischzone steigen die Ionenkonzentrationen sprunghaft an, und erreichen bereits nach wenigen Stunden konstante, die Formationswässer charakterisierende Werte. Lediglich die Cl-Konzentrationen der Formationswässer weisen gewisse Schwankungen auf. Diese lassen sich aber eindeutig auf Verdünnungsabweichungen bei der Analytik zurückführen, da bei mittleren Cl-Gehalten von 41.000 mg/l und einer analysenbedingten Verdünnung von 1:500, bereits geringste Abweichungen erhebliche Auswirkungen auf den Endwert haben. Neben Chlorid sind die Kationen Natrium und Kalzium die Hauptinhaltsstoffe der Tiefenwässer, wonach diese als Ca-Na-Cl-Wässer anzusprechen sind.

Die in der Abbildung 4 dargestellten Inhaltsstoffe zeigen ein von den bisherigen Graphiken abweichendes Bild. Zwar werden wie bei allen anderen Parametern auch die drei unterschiedlichen Ereignisse des Pumptests (Zirkulations-, Misch- und Formationswasser) angezeigt, jedoch befinden sich hier die höchsten Konzentrationen für DOC und der Alkalität im Bereich der Mischungszone. Die Werte für die Alkalität wurden als HCO₃-Werte eingegeben, eine Umrechnung auf HCO₃ + CO₃ ist noch nicht erfolgt.

Auffallend ist das Zusammentreffen des DOC- und Alkalitäts-Peaks. Hier wird eine Beeinflussung der Alkalitätsmessung durch das DOC vermutet, die noch überprüft werden muß. Überhaupt sind die hohen DOC-Gehalte (DOC=gelöster organischer Kohlenstoff) mit bis zu über 700 mg/l sehr ungewöhnlich. Da bei der DOC-Bestimmung sämtliche gelöste organische Kohlenstoffverbindungen erfaßt werden, könnten hier die bei der Bohrung im Teufenabschnitt 3800 - 4000 m als Schmierstoffadditive zugesetzten Esteröle eine Erklärung liefern. Beim Bohrvortrieb sind die Ester wahrscheinlich in die Klüfte des Gebirges eingedrungen und sind beim Auszirkulieren mit Frischwasser nicht vollständig miterfaßt worden. Das Erscheinen der "DOC-Anomalie" fällt auch mit den organoleptischen Beobachtungen (Gelbfärbung und inten-

siver Geruch), sowie auch mit der ständigen "Vergiftung" der Leitfähigkeitselektroden zeitlich zusammen.

Bedeutsam ist für die weiteren Betrachtungen, daß die DOC-Gehalte nicht wieder vollständig zurückgehen. Inwieweit dies mit der Löslichkeit von Methan im Formationswasser zusammenhängt oder ob das Tiefenwasser doch noch mit Spühlungszusätzen kontaminiert ist, kann zur Zeit noch nicht geklärt werden. Hier werden die Ergebnisse aus den Isotopenuntersuchungen (GSF, München) wichtige Anhaltspunkte liefern.

Der in der Abbildung 4 dargestellte Verlauf der SiO_2 -Konzentrationen ist dahingehend abweichend, daß in den Formationswässern mit fortdauernder Pumpzeit die SiO_2 -Gehalte noch weiter schwach ansteigen.

In den Abbildungen 5 und 6 sind die vor Ort durchgeführten Isotopenuntersuchungen dargestellt.

Die Radioaktivität in der Gasphase wurde in einem α -Counter kontinuierlich registriert. In der Abb.5 sind sie als Radon ($\text{Rn} - 222$) angegeben. Das kurzlebige Thoronisitop ($\text{Rn} - 220$) konnte in der Gasphase in höheren Konzentrationen nicht nachgewiesen werden. Die Messung in der Gasphase erfolgte hinter dem Massenspektrometer des KTB-Feldlabors. Darüberhinaus wurden stündlich die Radongehalte (^{222}Rn) und Thorongehalte (^{220}Rn) aus einer 1L Wasserprobe durch belüften extrahiert und gemessen. Das Verhältnis Radon/Thoron weicht von denen der Gasmessungen ab. Die Ergebnisse wurden noch nicht auf die Aufstiegszeiten korrigiert. Im allgemeinen zeigen die Abbildungen ebenfalls die bereits beschriebenen drei Phasen des Pumptests. Die Schwankungen sind vermutlich auf veränderte Fördervolumen zurückzuführen.

7. Ausblick auf folgende Untersuchungen

Nachdem die Analysenergebnisse der bisher noch nicht vollständig untersuchten Ionen vorliegen, wird im folgenden der wesentliche Schwerpunkt in der geochemischen Modellierung der Fluide liegen. Mit Hilfe dieser Modellbetrachtungen lassen sich die nötigen Korrekturen, im wesentlichen Temperatur-, Druck-, CO_2 - und pH-Korrekturen, vornehmen, um die Mineralgleichgewichte unter Lagerstättenbedingungen zu beschreiben. In diese Betrachtungen müssen die Ergebnisse der Gas- und Isotopenuntersuchungen mit einbezogen werden.

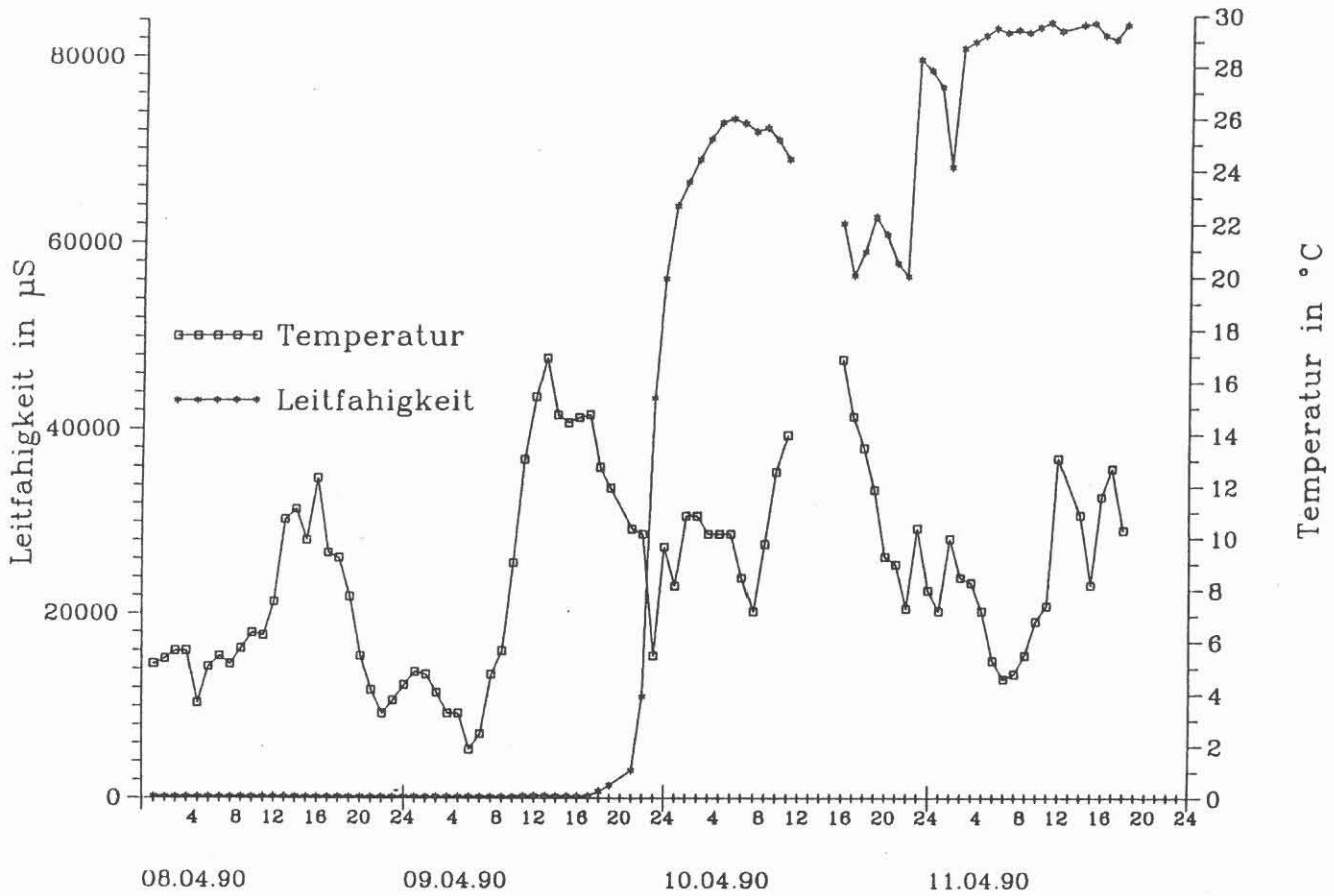


Abb. 1: Leitfähigkeits- und Temperaturverlauf beim Pumpstest KTB-VB (Analysen der FU-Berlin)

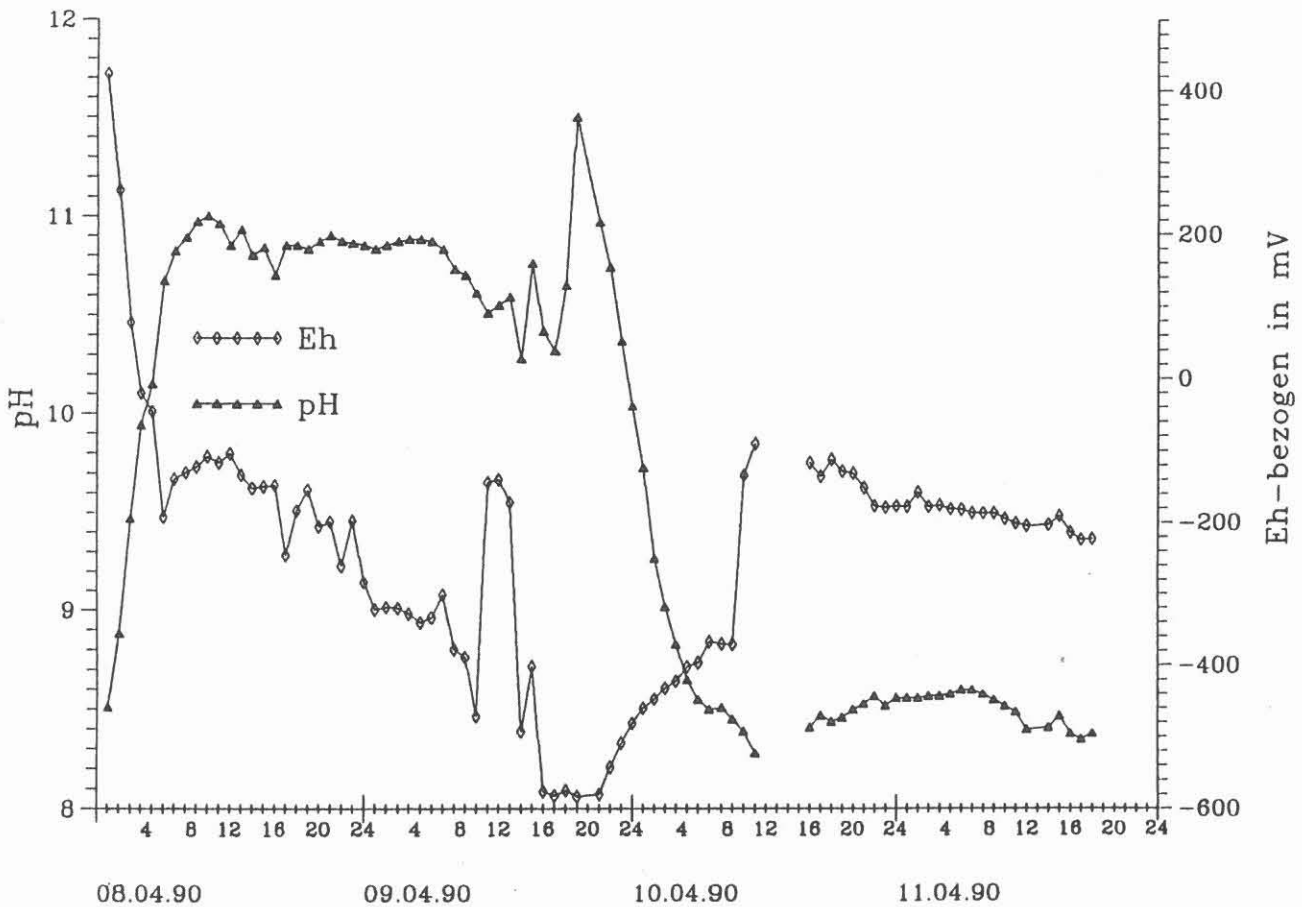


Abb. 2: pH- und Eh-Verlauf beim Pumpstest KTB-VB (Analysen der FU-Berlin)

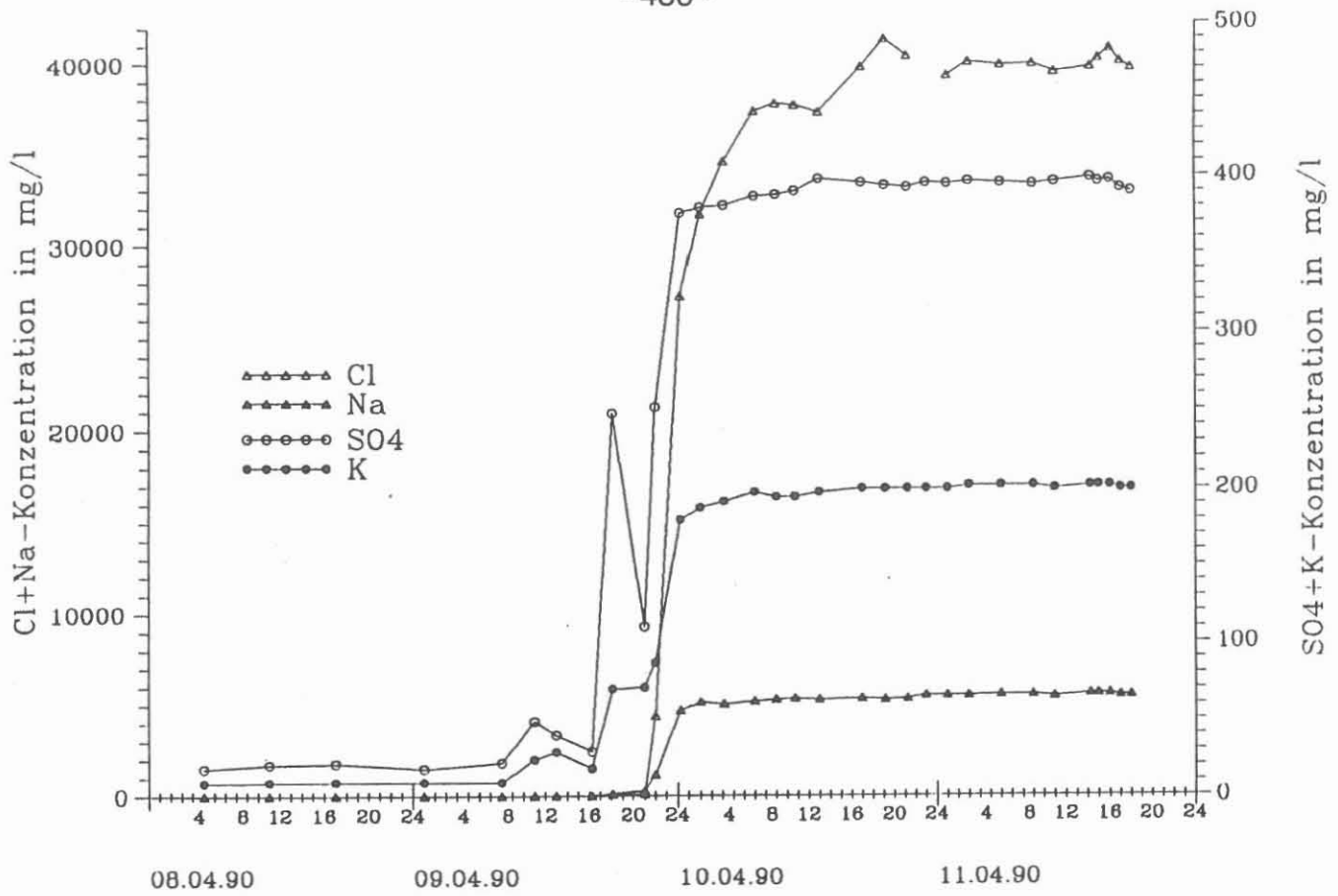


Abb. 3: Cl-, SO₄-, Na- und K-Konzentrationen während des Pumpstests KTB-VB (Analysen der FU-Berlin)

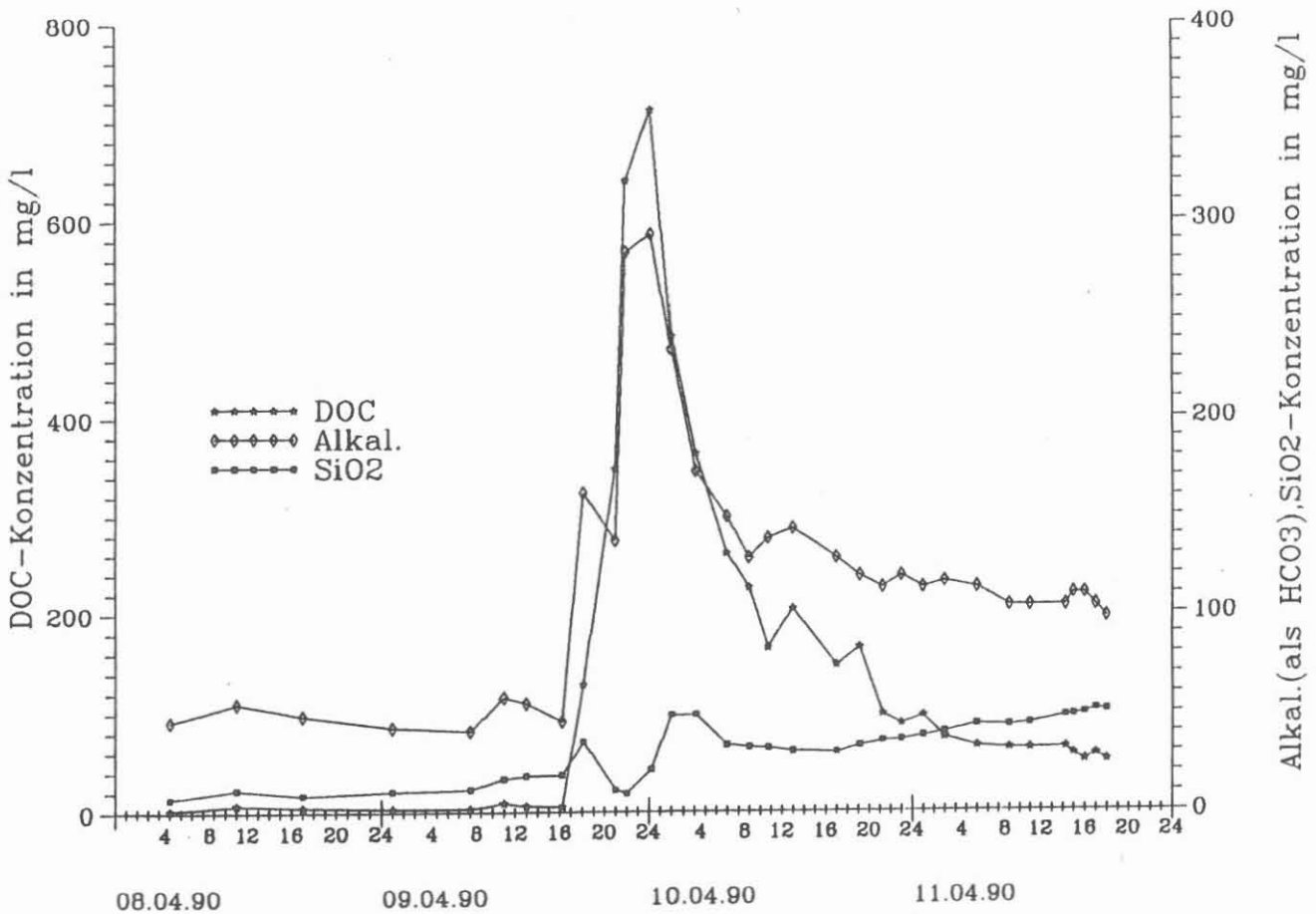


Abb. 4: DOC-, Alkalitäts- und SiO₂-Konzentrationen während des Pumpstests KTB-VB (Analysen der FU-Berlin)

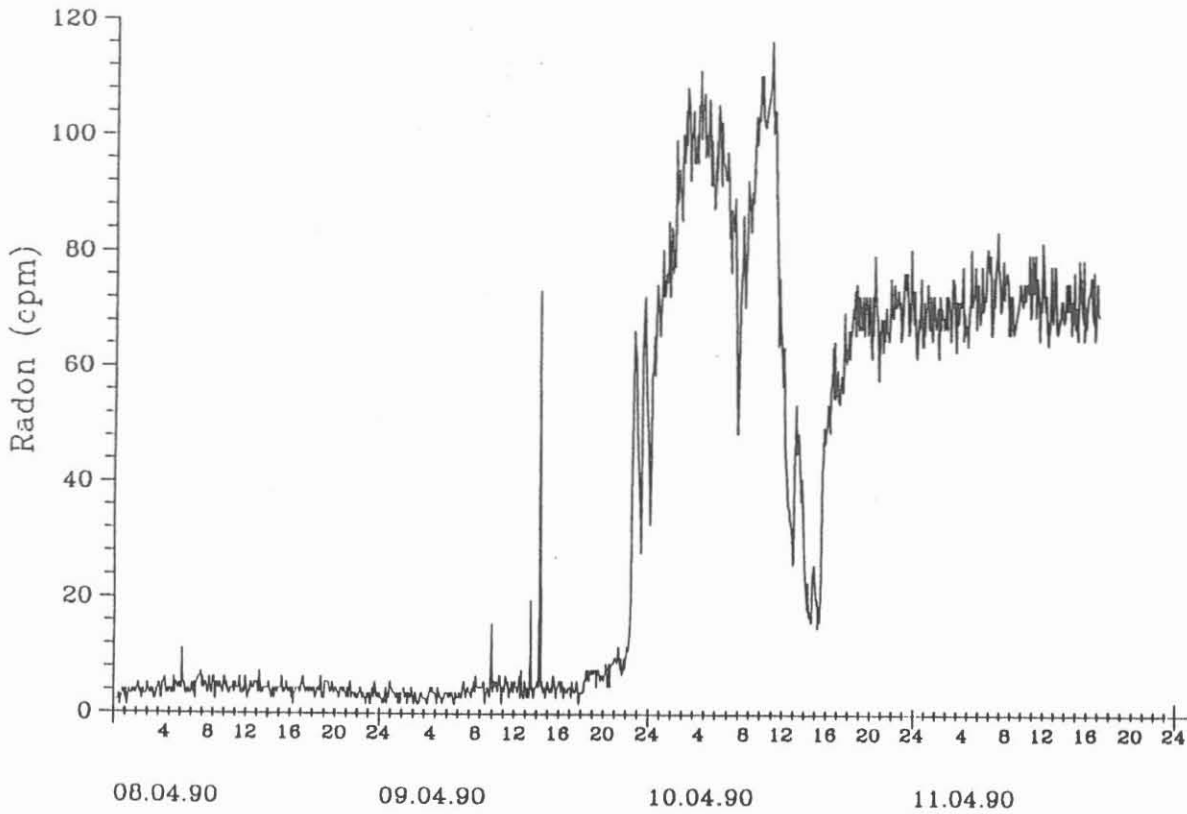


Abb. 5: Radon 220-Aktivität in der Gasphase während des Pumpstests KTB-VB (Analysen der Universität Kiel)

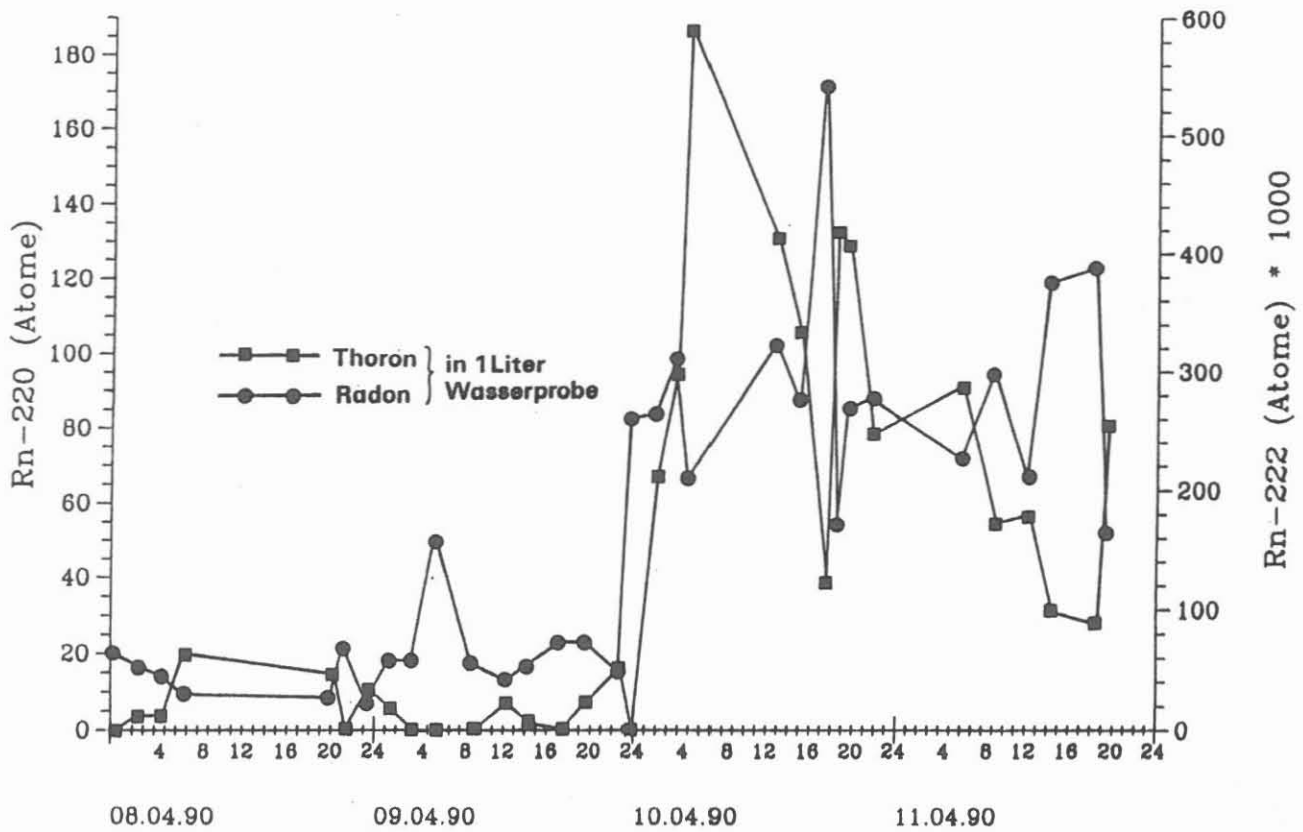
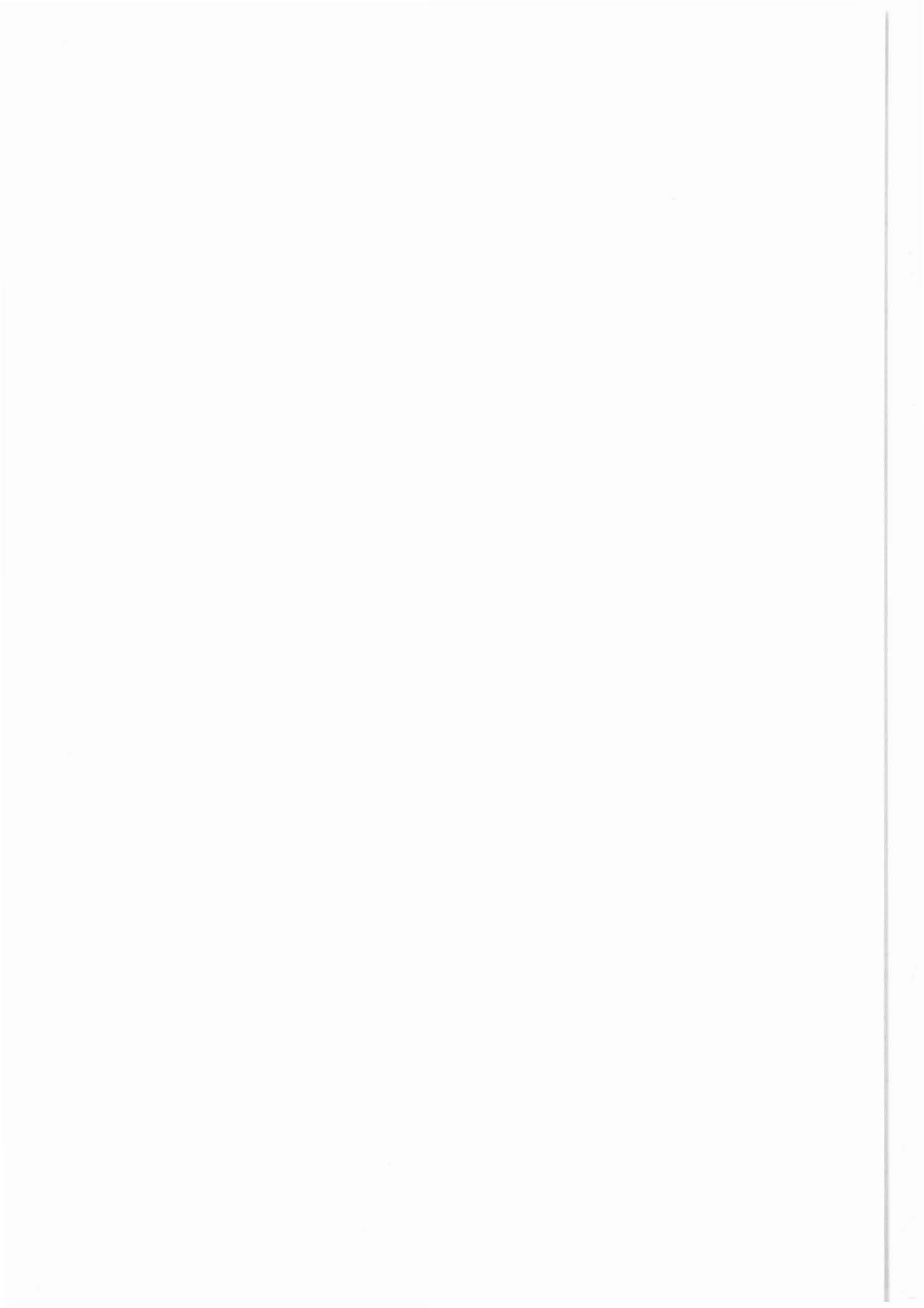


Abb. 6: Vergleich Radon (Rn-220) und Thoron (Rn-222) in Wasserproben während des Pumpstests KTB-VB (Analysen der Universität Kiel)



Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung – GSF –
Institut für Hydrologie
Ingolstädter Landstraße 1
8042 Neuherberg

Ergebnisse der Helium- und Neonisotopenmessungen



ERGEBNISSE DER HELIUM- UND NEONISOTOPENMESSUNGEN

S. Weise

ZUSAMMENFASSUNG

An den Gasproben, die vom KTB-Feldlabor aus der Entgasung von Fluidproben stammen, wurden im GSF-Institut für Hydrologie die relativen Gehalte an ^3He , ^4He und ^{20}Ne ermittelt. Zum Abschluß des Pumptestes vom 7.4.-12.4.1990 wurden mit einem Geocom-Probennehmer gewonnene Fluidproben vor Ort unter Druck in Sekundärprobenbehälter überführt, an denen auf die Fluidmenge bezogene absolute ^4He -Konzentrationen gemessen werden konnten. Das zur Druckstabilisierung bei der Überführung eingesetzte Neon war im Sekundärprobenbehälter im Promillebereich nachzuweisen. Die Heliumisotopenverhältnisse in den Gasen der beprobten Fluide sind den $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ -Werten zufolge durch atmosphärische Anteile im allgemeinen nicht beeinflusst. Die $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Werte deuten (ab ca. 2000 m) auf mit der Tiefe abnehmende Anteile sogenannten Mantelheliums. Diese Unterschiede im $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Wert der Fluide der einzelnen Klüftzonen sprechen dafür, daß die Klüftzonen nicht miteinander in Verbindung stehen.

SUMMARY

Gas samples from fluid samples degassed in the KTB-Feldlabor have been analyzed in the GSF-Institut für Hydrologie for ^3He , ^4He , and ^{20}Ne contents. Fluidsamples collected after the April 7 to 12, 1990 pump test have been transferred under pressure in secondary sample containers. For these samples analyses of absolute ^4He concentration related to the amount of fluid were available. The neon used for pressurizing and stabilizing the fluid transfer contaminated the secondary containers at the permille level. From $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ data the atmospheric contamination of former fluid sample gases is assumed to be of negligible influence to helium isotope results. Fluids $^3\text{He}/^4\text{He}$ seems to show a decrease of a so called mantle helium component with increasing depth (below 2000 m). The differences in helium isotope ratios from fluid to fluid argue against connections between the investigated fluid systems.

Anschrift des Autors: Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung - GSF -, Institut für Hydrologie, Ingolstädter Landstr.1, D-8042 Neuherberg.

1 EINLEITUNG

Die im Bereich mehrerer Größenordnungen liegenden Unterschiede im Heliumisotopenverhältnis von Atmosphäre, Erdkrusten- und Erdmantelmaterial lassen Heliumisotopenuntersuchungen als eine für die Untersuchung von Austauschprozessen zwischen diesen Reservoiren besonders geeigneten Methode erscheinen. Aufgrund ihrer hohen potentiellen Beweglichkeit können freie Fluide an solchen Prozessen wesentlich beteiligt sein.

2 PROBENGEWINNUNG

Die meisten Ergebnisse für Helium- und Neonisotopengehalte von Proben der KTB-VB wurden an Gasproben ermittelt, die durch On-line-Entgasung der Bohrspülung gezogen wurden. Diese Proben sind jedoch nicht genau Bohrlochteufen zuzuordnen, lassen keine quantitative Bestimmung der Gasgehalte pro Flüssigkeitsmenge zu und waren zudem mit Problemen der (On-line-) Entgasungsapparatur behaftet.

Die mit Fluidprobennehmern gewonnenen, teufenspezifischen Fluidproben wurden zumeist vor Ort im Feldlabor entgast. Dazu wurde im wesentlichen ein evakuiertes Volumen mit Gasmaus an den Probennehmer angeschlossen, in das sich die aus der Probe entweichenden Gase verteilen.

Die im Rahmen des Pumptestes vom 7.4.90 bis 12.4.90 geförderten großen Fluidmengen erlaubten den Einsatz eines On-line-Entgasers. Die mit ihm gewonnenen Proben sind in Tabelle 2 mit den laufenden Nummern 8 und 9 bezeichnet.

Zum Abschluß des Pumptestes wurden wieder Geocom-Probennehmer eingefahren, von denen drei (Einfahrtteufe: 1100 m, 1950 m und 2050 m) vor Ort in andere Probenbehältnisse überführt worden waren (Abb.1). Da sich bei einer sofortigen Referenzmessung im Feldlabor herausgestellt hatte, daß der erste der drei Proben

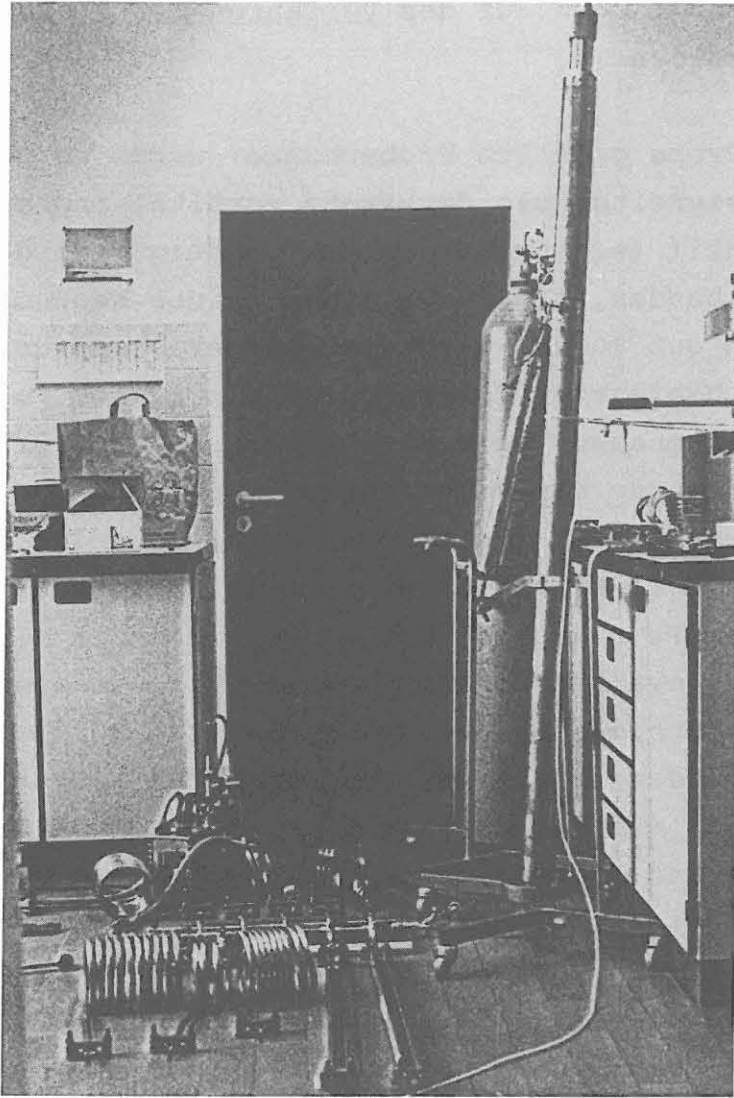


Abbildung 1: Apparatur zur Überführung einer mit dem Geocom-Probennehmer gewonnenen Fluidprobe in mehrere kleinere Sekundär-Probenbehälter.

nehmer im wesentlichen nur Süßwasser enthielt, das im Zuge des Gestängeausbaus in das Bohrloch nachgefüllt worden war, wurden nur Proben der zweiten und dritten Probenüberführung gemessen.

Im folgenden soll kurz auf das Verfahren der Probenüberführung eingegangen werden:

Der mit der Probe gefüllte Probennehmer wurde so aufgestellt, daß die Flüssigkeitssäule der Probe vertikal angeordnet war. Das obere Ventil (elektromagnetisch betätigt) wurde mit einer Apparatur verbunden, die zu 99,995 % reines Neon mit einem Überdruck von gut 20 bar lieferte. Dieser Überdruck wurde bei den hier durchgeführten Überführungen in keinem Fall durch den im Geocom-Probennehmer vorliegenden Druck übertroffen. An das untere Ventil wurde ein Verteiler angeschlossen, der vor der Überführung ebenso wie die an den Verteiler angeflanschten Sekundär-Probenbehälter mit einer zweistufigen Drehschieberpumpe auf unter 0,1 hPa evakuiert worden war. Nachdem alle Sekundär-Probenbehälter evakuiert waren, wurden sie, jeder für sich, per Ventil verschlossen, und das Pumpsystem wurde abgetrennt. Beim nun folgenden Öffnen des unteren Probennehmer-Ventils füllte sich als erstes der Verteiler. Hierbei blieb - wie auch bei den folgenden Probenabfüllungen - der Neondruck oberhalb der Probenflüssigkeit konstant. Nacheinander wurden die Sekundär-Probenbehälter abgefüllt und zumeist mit speziellen Abklemmwerkzeugen gasdicht verschlossen. Das Gesamtvolumen der Sekundärprobenbehälter war so ausgelegt, daß etwa 3 l Probenflüssigkeit überführt werden konnten. Abschließend wurde der Druck des Neongaspolsters abgelassen und nach dem Öffnen der am unteren Ventil befindlichen Verbindung der noch vorhandene Rest des Probennehmerinhalts abgefüllt.

Die Überführung konnte nur mit einem der beiden zur Verfügung stehenden Geocom-Probennehmern vollzogen werden, da nur dieser eine mit Anschlußmöglichkeiten an beiden Probennehmer-Ventilen ausgestattet ist.

Für die Probenüberführung stand eine begrenzte Zahl eigens angefertigter Sekundär-Probenbehälter zur Verfügung, deren Aufbau in Tabelle 1 beschrieben ist. Die Volumenangaben sind nur grobe Schätzungen, so daß - falls erforderlich - die Behälter

noch auszulitern waren. Bis auf die in Tabelle 1 letztangeführte Behälterart werden alle Sekundär-Probenbehälter mit speziellen Abklemmwerkzeugen verschlossen.

Tabelle 1: Aufbau und ungefähres Füllvolumen der für die Überführung von Geocom-Fluidproben eingesetzten Sekundär-Probenbehälter.

Volumen [ml]	Aufbau
40	Kupferrohr, weich, 10*1 mm
100	Kupferrohr, weich, Mittenteil 12*1 mm, Anschlußteile 10*1 mm, Verbindung hartgelötet
300	wie bei 100 ml, Mittenteil entsprechend länger
1000	VA-Rohr, Anschlußteile Kupferrohr, weich, 10*1 mm, Verbindung hartgelötet
1700	VA-Rohr, Anschluß über Ventile

3 MESSMETHODIK

Die Messung der Helium- und Neonisotopengehalte werden an einem statisch arbeitenden Magnetsektorfeld-Massenspektrometer vom Typ VG MM 3000 durchgeführt. Dieses Massenspektrometer besitzt ein speziell für Heliumisotopenmessungen ausgelegtes Doppelauffängersystem und ist in der Lage, Heliumisotopenverhältnisse bis hinunter zu ${}^3\text{He}/{}^4\text{He} \approx 5 \cdot 10^{-9}$ (entspricht $R/R_A \approx 0,004$) zu bestimmen. Zur Standardisierung des Massenspektrometers können wohldefinierte Mengen Luft verwendet werden, die allgemein ein Heliumisotopenverhältnis von $({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_{\text{Luft}} =: R_A \approx 1,4 \cdot 10^{-6}$ aufweist (MAMYRIN et al., 1970; CLARKE et al., 1976).

Vor der Messung im Massenspektrometer wird die Heliumfraktion des Meßgases von der Neonfraktionen separiert (REYNOLDS et al., 1977). Diese Separation ist auf geringe Neonmengen optimiert.

Zur Messung von Gasproben (Gasmäuse) wird ein in Druck, Temperatur und Volumen bestimmter Anteil entnommen, für den außer dem Heliumisotopenverhältniswert auch die Absolutgehalte an ^4He und ^{20}Ne gemessen werden (im folgenden angegeben in vpm: 10^{-6} Volumenanteile ^4He bzw. ^{20}Ne pro Volumenanteil Proben-gas).

Zur Messung von Flüssigkeitsproben (nach JENKINS 1981) werden die Behälter zu einem evakuierten Auffangbehälter hin geöffnet, in dem die Probenflüssigkeit zur Oberflächenerneuerung umgerührt wird. Mit diesem Auffangbehälter ist weiterhin über eine Kapillare eine Glasampulle verbunden, die mit flüssigem Stickstoff gekühlt wird. Der sich im Auffangbehälter bildende Wasserdampf strömt, begrenzt durch die Kapillare, zur Glasampulle. Dieser Wasserdampfstrom treibt die entlösten Gase in die Glasampulle. Letztere wird am Ende des Entgasungsprozesses abgeschmolzen und zur Messung am Massenspektrometer mit einem Aufschlagventil wieder geöffnet. Die Helium- und Neongehalte werden auf die Flüssigkeitsmasse bezogen in Normalmilliliter pro Gramm (Nml/g) angegeben.

4 MESSERGEBNISSE

Aus dem in Tabelle 2 gegebenen Überblick geht hervor, daß nicht von jedem Test Proben vorlagen. Zur besseren Handhabung wurden den Proben laufende Nummern zugeordnet. Die entsprechenden Meßergebnisse sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Probe 1 weist einen sehr niedrigen ^4He -Gehalt zusammen mit einem für Luft typischen $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ -Wert auf, der gemessene $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Wert entspricht ebenfalls Luft. Die Probe ist daher höchstwahrscheinlich rein atmosphärischen Ursprungs (vermutlich aufgrund eines undichten Verschlussventiles des Alu-Dosenbehälters). Ein um atmosphärische Anteile korrigiertes Heliumisotopenverhältnis kann folglich nicht angegeben werden.

Tabelle 2: Verzeichnis der im Rahmen der hydraulischen Tests gewonnenen Proben, die auf ihre Gehalte an ^3He , ^4He und ^{20}Ne hin untersucht wurden.

Lfd. Nr.	Test *)	Datum	Bezugsteufe [m]	Bezeichnung	Probenbehälter
1	3	6.11.88	3447	keine Angabe	Alu-Dose
2	3	7.11.88	3447	DST-Kammer 3.Versuch	Gasmaus
3	4	12.05.89	3985	Geocom I	Gasmaus
4	4	13.05.89	3930	Geocom I	Gasmaus
5	4	13.05.89	3930	Geocom II	Gasmaus
6	4	17.05.89	3995	Geocom	Gasmaus
7	4	17.05.89	3930	Geocom 0,5%He 850mS/cm	Gasmaus
8	6	11.04.90	3850-4000	16:05 am Gaszähler	Gasmaus
9	6	11.04.90	3850-4000	17:35 am Gaszähler	Gasmaus
10	6	12.04.90	3850-4000	Geocom-Überfg. 1950m	Cu-Rohr
11	6	12.04.90	3850-4000	Geocom-Überfg. 2050m	Cu-Rohr

*) Test 3: 03.11.88 - 07.11.88 im Bereich 3486,9 m - 3442,9 m
 Test 4: 10.05.89 - 25.05.89; Absenk- und Injektionstest
 Test 6: 07.04.90 - 12.04.90; Pumpstest

Die zweite Probe aus dem Bereich um 3447 m zeigt den im Vergleich aller in Tabelle 3 dargestellten Gasproben höchsten ^4He -Gehalt verbunden mit dem höchsten $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Wert. Diese hohen Werte werden durch eine außerhalb der hydraulischen Tests genommene Geocom-Probe vom 28.10.88 aus derselben Teufe bestätigt: ^4He -Gehalt = 7840 vpm, $^4\text{He}/^{20}\text{Ne} = 2420 \text{ vpm/vpm}$, $^3\text{He}/^4\text{He} = 0,48$.

Die Unterschiede im ^4He -Gehalt der Gasproben können allerdings nicht ohne weiteres auf die beprobten Fluide als Ganzes übertragen werden (im Sinne von ^4He - pro Fluidvolumen), da der gesamte Gasgehalt pro Fluidmenge zumeist nicht bekannt ist. Die in Tabelle 3 angegebenen ^4He -Gehalte können daher nur unter starken Vorbehalten miteinander verglichen werden.

Die Werte für die Geocom-Probe 6 aus 3995 m weichen z.T. erheblich vom allgemeinen Trend ab. Nach der Probenpräparation aufgetretene Schwierigkeiten deuten darauf hin, daß ein Ventil

nicht korrekt betätigt worden war. Diese Ergebnisse werden daher im folgenden nicht berücksichtigt.

Die während des Pumptestes gewonnenen Gasproben (Nr. 8 und 9) zeigen sehr gute Übereinstimmung. Vieles deutet darauf hin, daß das geförderte Fluid im wesentlichen aus dem untersten Bohrlochbereich stammt (ca. 3998 m). Ein Vergleich aller Proben, die aus Teufen unterhalb von 3850 m stammen, scheint darauf hinzuweisen, daß die $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Werte eine mit der Teufe abnehmende Tendenz aufzuweisen. Diese Tendenz, die sich auch in den Proben aus entgaster Spülung abzeichnet, fand ihren Anfang bei der bei etwa 2000 m Teufe angefahrenen Störungszone (Ende der VB1a; vgl. WEISE & FRITZ, 1989; WEISE et al., 1990).

Die Proben 10 und 11 wurden durch die oben beschriebene Überführung einer Geocom-Fluidprobe in Sekundärprobenbehälter gewonnen. Bei ihrer Präparation zeigte sich, daß entgegen der Erwartung das zur Erzeugung des Überführungsdruckes verwendete Neon die gesamte Fluidprobe im Zuge der Überführung merklich durchdrungen hat: Die zwei analysierten Sekundärprobenbehälter zeigten Neonanteile, die normale Werte um mehrere Größenordnungen überstiegen und den Bereich der Heliumanteile erreichten. Aus dem Vergleich der Heliumwerte mit denen der aus dem Pumptest stammenden Gasproben läßt sich ein Neonanteil im Gas im Bereich unterhalb eines Prozents abschätzen. Der Gesamtgasgehalt wird durch diese Neonkontamination also nicht wesentlich verändert. Da die Heliumisotopenanalytik jedoch nicht auf derart hohe Neongehalte ausgelegt war, ist die erste der beiden Proben für Heliumisotopenmessungen verlorengegangen, und bei der zweiten wurde bei der Probenpräparation in hohem Maße improvisiert. Die Differenz zwischen den während der Pumpphase gewonnenen Gasproben und den Geocom-Fluidproben kann deswegen nicht unbedingt als Folge von Fraktionierung bei der Gewinnung der Gasproben gewertet werden.

5 DISKUSSION

Unabhängig von den genannten präparativen Problemen liefern die Meßergebnisse für die Proben 10 und 11 die ersten Angaben der auf die Fluidmenge bezogenen ^4He -Konzentration für Fluide aus der KTB-VB. Zwar werden normalerweise die ^{20}Ne -Gehalte der Proben zur Abschätzung atmosphärischer Anteile in den KTB-VB-Proben eingesetzt (WEISE & FRITZ, 1989), jedoch kann bei den Proben 10 und 11 trotz der durch die Neonkontamination gegebenen Nichtverwendbarkeit der Neongehalte davon ausgegangen werden, daß dieses Helium praktisch vollständig nichtatmosphärischen Ursprungs ist: Übliche Werte für atmosphärisch bedingte ^4He -Konzentrationen liegen unter $1 \cdot 10^{-7}$ Nml ^4He pro Gramm

Tabelle 3: Die nach Bezugsteufe geordneten Ergebnisse der Helium- und Neonisotopenuntersuchungen. Aus den $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ -Werte wurde unter den Annahmen, daß das ^{20}Ne vollständig atmosphärischen Ursprungs ist und daß keine Fraktionierungsprozesse das $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ -Verhältnis beeinflussen, der atmosphärische bedingte Anteil am Helium bestimmt. Die angegebenen $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Werte sind um diese atmosphärische Anteile korrigiert.

Lfd. Nr.	Bezugsteufe [m]	^4He -Gehalt +): [vpm] *): [10^{-3} Nml/g])	$^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ [vpm]/[vpm]	$^3\text{He}/^4\text{He}$ [10^{-6}]
1	3447	5,2 +)	0,3	----
2	3447	7690 +)	2280	0,44
4	3930	5030 +)	4710	0,31
5 I	3930	5460 +)	≥ 3000	0,33
5 II	3930	5820 +)	≥ 2300	0,35
7	3930	5280 +)	8780	0,31
3	3985	4580 +)	2440	0,30
6	3995	(1,7 +)	≥ 10	0,40)
8	3850-4000	6650 +)	1860	0,30
9	3850-4000	6650 +)	1830	0,29
10	3850-4000	2,67 *)	---	----
11	3850-4000	2,74 *)	---	0,25

Flüssigkeit, während die Proben 10 und 11 Werte um $2,7 \cdot 10^{-3}$ Nml/g aufweisen (Tabelle 3). Der Anteil sogenannten Mantelheliums dabei läßt sich aus den Werten für das Heliumisotopenverhältnis mit zwar merklich aber weniger als fünf Prozent abschätzen. Damit dominiert die im wesentlichen mit dem natürlichen radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium zusammenhängende sogenannte radiogene Heliumkomponente.

Die Dominanz der radiogenen Heliumkomponente gilt für alle aufgeführten Proben, allerdings in unterschiedlichem Maße. Die als Mantelhelium bezeichnete Komponente scheint zumindest unterhalb 2000 m anteilig abzunehmen, über die auf die gesamte Fluidmenge bezogenen Konzentrationen kann, wie erläutert, keine Aussage getroffen werden. Die Unterschiede in den $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Werten deuten darauf hin, daß die einzelnen Fluidzonen nicht miteinander kommunizieren.

LITERATUR

- CLARKE, W.B., JENKINS, W.J., TOP, Z.: Determination of tritium by mass spectrometric measurement of ^3He . International Journal of Applied Radiation and Isotopes, 27, 515-522
- JENKINS, W.J., (1981): Mass spectrometric measurement of tritium and ^3He . In: Low-Level Tritium Measurements, Proceedings of the IAEA symposium, IAEA-Tecdoc 246, Wien.
- MAMYRIN, B.A., ANUFRIEV, G.S., KAMENSKY, I.L., TOLSTIKHIN, I.N. 1970: Determination of the isotopic composition of atmospheric helium. Geochemistry international, 7, 498-505
- REYNOLDS, J.H., JEFFREY, P.M., MCCRORY, G.A., VARGA, P.M.: Improved charcoaltrap for rare gas mass spectrometry. Dep. of Physics Berkeley.
- WEISE, ST. & FRITZ, P. (1989): Heliumisotopenmessungen an Gasen aus der Bohrspülung und aus Fluidprobennehmern. - NLFH Hannover, KTB Report 89-3, 456
- WEISE, ST., FRITZ, P., HEUSSER, E. & KIRSTEN, T. (1990): Isotope Geochemistry of fluids from open Fractures (3000 - 4000 m) - Isotopes of helium and other noble gases in fluids and cores. - NLFH Hannover, KTB Report 90-4, im Druck

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung – GSF –
Institut für Hydrologie
Ingolstädter Landstraße 1
8042 Neuherberg

Isotopenhydrologische Untersuchungen im Rahmen der
Hydraulik- und Fluidtests in der KTB-Vorbohrung.
Erste Ergebnisse

M. Lodemann
P. Fritz

**ISOTOPENHYDROLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN IM RAHMEN DER HYDRAULIK-
UND FLUIDTESTS IN DER KTB-VORBOHRUNG. ERSTE ERGEBNISSE.**

M. Lodemann und P. Fritz

ZUSAMMENFASSUNG

In der KTB-Vorbohrung wurden verschiedene fluidführende Klüfte durchteuft. Aus bohrtechnischen und spülungsspezifischen Gründen waren systematische Hydraulik- und Fluidtests in der KTB-Vorbohrung nicht möglich. Erste Ergebnisse zeigen jedoch, daß unterhalb von ca. 500 m der Übergang aktiver zu quasi-stationären Grundwassersystemen stattfindet und spätestens ab einer Teufe von ca. 3500 m hochsalinare Fluide zutreten.

Kohlenstoff- und Sauerstoffisotopenanalysen an Kluftcalciten zeigen, daß die Calcite nicht aus den heute vorliegenden Fluiden gebildet wurden. Dies wird durch Strontiumisotopenanalysen und Untersuchungen an Fluideinschlüssen bestätigt. Aufgrund chemischer und isotopischer Daten ist es wahrscheinlich, daß die ab 3447 m angefahrenen Klüfte keine oder nur sehr beschränkte hydraulische Verbindung zueinander haben. Dies wird durch Heliumisotopenuntersuchungen unterstützt.

Der Chemismus charakterisiert die Fluide als Ca-Na-dominierende Solen, die typisch für Kristallinwässer dieser Tiefen sind. Unterhalb von 3990 m wurde die salinare Hauptflußzone entdeckt. Ein abschließender Pumptest im April dieses Jahres im Teufenbereich 3850 bis 4000m erbrachte eine Gesamtkonzentration der Sole von ca. 60 g/l am übertägigen Austritt.

Eine erste Chlor-36-Analyse aus der Zone 3447 m zeigt, daß zumindest während der letzten 1,5 Millionen Jahre das Fluid mit den umgebenden Gestein im Gleichgewicht stand. Deuterium und Sauerstoff-18-Analysen weisen die für diese Wässer typische Isotopensignatur auf, die auf langfristige geochemische Gestein-Wasser-Wechselwirkung unter niedrigen Temperaturbedingungen zurückgeführt wird. Die Hydratisierung von Silikaten spielt sicherlich eine wesentliche Rolle.

Anschrift der Autoren: Gesellschaft für Strahlen- und
Umweltforschung, Institut für Hydrologie, Ingolstädter
Landstr.1 8042 Neuherberg

SUMMARY

In the KTB pilot hole several open fractures with fluids and gases were encountered through drilling. Because of technical problems and the mud additives hydraulic and fluid testing was limited. However, first results indicate that below a depth of about 500 m a change from active to inactive groundwater-flow-systems occurs. At a depth of about 3500 m the first saline inflow from an open calcite fracture was detected. It is assumed, based on chemical and isotope data, that all fractures between 3447 m and the deepest part of the borehole are not in hydraulic connection with each other. This is not only supported by carbon and strontium isotopic analyses on calcites and fluids and investigations on fluid inclusions but also by helium isotopes.

The chemistry data characterize these fluids as Ca-Na-brines with a concentration of about 60 g/L. This chemistry is typical for fluids found in other deep crystalline boreholes. Isotope data indicate a longterm rock-water reaction at low temperatures and an equilibrium between the fluid and the surrounding rocks at least during the last 1.5. m.y. It is supposed that the brines found today have a long history of alteration processes and the isotope signature only reflects the last event.

1 EINLEITUNG

In allen Kristallingebieten wurden weltweit unterhalb von ca. 2000 - 3000 m hochsalinare Fluide angetroffen. Ihr Chemismus charakterisiert sie als Ca-Na-Cl-Wässer, deren Genese noch nicht geklärt ist. Das hier bekannteste Beispiel dürfte die Kola-Bohrung sein, in der bis zu einer Teufe von fast 13 km freie Fluide auftraten und Ca-Na-Cl-Solen bis zu einer Teufe von ca. 6000 m dominant waren. Bis in diesen Teufenbereich waren diese Fluide vor allem mit Methan, Wasserstoff und Helium assoziiert.

Die Kontinentale Tiefbohrung eröffnet grundsätzlich die Möglichkeit, diese Fluide, deren Erforschung für die Geowissenschaften und deren praktische Umsetzung, u. a. im Bereich der Lagerstätten, von fundamentaler Bedeutung ist, näher zu untersuchen.

Ziel der geplanten Isotopenmethoden ist:

- Isotopische Charakterisierung der in das Bohrloch eintretenden Fluide in Bezug auf Herkunft und geochemische Entwicklung und Vergleich mit Isotopendaten anderer Tiefbohrungen im Kristallin.
- Detaillierte Untersuchungen der Wasser-Gestein-Wechselwirkungen sowie des Stofftransports
- Bestimmung und Charakterisierung der Übergangszone von aktiven Grundwasser-Fließsystemen zu quasi-stationären Tiefenwässern, sowie die Altersbestimmung der verschiedenen Wässer
- Erstellung eines systematischen "isotopischen Tiefenprofils" der angefahrenen fluidführenden Klüfte.
- Das Erkennen und Aufzeigen hydraulischer Verbindungen von fluidführenden Klüften und Störungszonen
- Einbindung der KTB-Bohrung in das regionale und weitere Umfeld
- Korrelation der Daten mit geochemischen, hydraulischen, geologischen und geophysikalischen Ergebnissen anderer im KTB tätigen Arbeitsgruppen.

2 ISOTOPENMETHODEN

Die Verteilung natürlicher Isotope in Wasser, Gasen und Kluftmineralen reflektiert deren Herkunft und gibt Auskunft über geochemische Prozesse und Bildungsbedingungen. Es wurde daher der Versuch unternommen, alle verfügbaren Techniken zum Einsatz zu bringen, nicht nur um gezielt, bereits definierte Probleme zu bearbeiten, sondern auch um grundsätzliche Informationen über die Isotopenverteilung in diesen Systemen zu erhalten. Es ist dabei zu bemerken, daß die in der Tiefbohrung zu erwartenden Fluide sich grundsätzlich in ihrer chemischen und isotopischen Zusammensetzung von der Bohrspülung unterscheiden.

Folgende Isotopenmethoden wurden im Rahmen der Fluiduntersuchungen der KTB-Vorbohrung angewendet:

Deuterium und Sauerstoff-18:

Die ^2H - und ^{18}O -Gehalte wässriger Fluide charakterisieren die Herkunft und geochemische Entwicklung von Grundwässern und deren Fließsysteme. Wenn nach der Grundwasserneubildung keine sekundären Prozesse den Isotopengehalt beeinflussen, dann geben $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte Hinweise auf paläoklimatische Bedingungen. In tieferen Systemen können bei erhöhter Temperatur Isotopen-Austauschprozesse zwischen Wasser und Gestein oder Gasphasen stattfinden. Weiterhin kann infolge chemischer Austauschprozesse, wie z.B. durch Hydratisierung von Silikaten, eine Veränderung der Isotopengehalte herbeigeführt werden.

Bisher untersuchte hochsalinare Kristallinwässer aus Kanada und Finnland sind gegenüber normalen Grundwässern entweder stark an ^2H angereichert oder an ^{18}O abgereichert und es wird angenommen, daß sowohl Austauschprozesse als auch geochemische Reaktionen dazu geführt haben.

Tritium:

Tritium (^3H) ist ein natürliches und anthropogenes, radioaktives Wasserstoffisotop und wird über Niederschläge in das Grundwasser eingetragen. Seine kurze Halbwertszeit ermöglicht die Datierung von Grundwässern im Bereich von bis zu 50 Jahren. D.h. Grundwässer, die sich vor mehr als 50 Jahren aus Niederschlägen gebildet haben, enthalten heute praktisch kein Tritium mehr. In Tiefenwässern, die keine hydraulische Verbindung zu oberflächennahen Wässern haben, dürfte daher kein Tritium mehr nachzuweisen sein.

Unter der Voraussetzung eines konstanten Tritiumgehaltes der Bohrspülung, führen Grundwasserzutritte in größeren Teufen zu einer Erniedrigung der Tritiumgehalte der Bohrspülung. Dabei ist zu bedenken, daß der hydrostatische Druck der Spülungssäule weitgehend einen freien Zutritt des Grundwassers verhindert.

Kohlenstoff-13:

Der ^{13}C -Gehalt des an im Wasser gelösten Kohlenstoffs (DIC) wird stark von biologischen und geochemischen Prozessen kontrolliert, wobei $\text{CO}_2\text{-CaCO}_3$ -Reaktionen dominieren. Der Vergleich chemischer und isotopischer Gleichgewichte erlaubt eine Aussage über die Herkunft des Kohlendioxids. Dies ist besonders für die Migration von Gasen aus großer Tiefe von Bedeutung.

Kohlenstoff-14:

Radiokohlenstoff wird hauptsächlich über Boden-Kohlendioxid in das Grundwasser eingetragen. Aktivitätsmessungen werden am gelösten anorganischen Kohlenstoff durchgeführt. Mit der ^{14}C -Methode können grundsätzlich "Grundwasseralter" zwischen ca. 2000 und 30 000 Jahren bestimmt werden. Allerdings können geochemische Prozesse die ^{14}C -Konzentration in anorganischem Kohlenstoff wesentlich beeinflussen, so daß die gemessenen Aktivitäten über geochemische und ^{13}C -Daten als Modellalter korrigiert werden müssen.

Schwefel-34 und Sauerstoff-18:

Die Bestimmung der ^{34}S - und ^{18}O -Gehalte an in Grundwässern gelösten Sulfat erlauben Aussagen über die Herkunft des Sulfats und läßt biologische Prozesse, wie Sulfatreduktion erkennen. Dies reflektiert die geochemische Entwicklung dieser Wässer. Entsprechendes gilt für ^{34}S -Analysen an Schwefelwasserstoff.

Chlor-36:

Mit der ^{36}Cl -Methode kann wegen der großen Halbwertszeit von ca. 300 000 Jahren theoretisch fossiles Grundwasser bis in den Bereich von 10^5 - 10^6 Jahren datiert werden. Chlor-36 wird in der Atmosphäre hauptsächlich über die Einwirkung kosmischer Strahlung auf Argon-40 oder Neutronenaktivität von Argon-36 gebildet und als Chlorid-Ion in das Grundwasser eingebracht. Die Konzentration des atmosphärischen ^{36}Cl kann jedoch im Grundwasser durch im Untergrund produziertes ^{36}Cl übertroffen werden. Die Hauptreaktion für in situ produziertes Chlor-36 in tieferen Gesteinen ist die Neutronenaktivität von Chlor-35.

Helium-3/Helium4:

Die über die $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältniss bestimmbare Mantelkomponente des Heliums kann Hinweise auf "aktive" Kluft- und Störungszonen und hydraulische Verbindungen zu Kluftsystemen geben. (Näheres s. Beitrag von St. WEISE in diesem KTB-Report.)

Argon-37/Argon39:

Argon-39 mit einer Halbwertszeit von 269 Jahren erlaubt eine Berechnung von Modellaltern zwischen 50 und 1200 Jahren. Es wird einerseits durch die Einwirkung kosmischer Strahlung auf Argon-40 produziert und andererseits unterirdisch über die Kernreaktion $^{39}\text{K}(n,p)^{39}\text{Ar}$ in Grundwasserleitern mit geringer Porosität und hohem Gehalt an Uran und Thorium. Da über die Reaktion $^{40}\text{Ca}(n,a)^{37}\text{Ar}$ auch ^{37}Ar produziert wird, ist durch eine Parallelbestimmung des ^{39}Ar - und ^{37}Ar -Gehaltes im Grundwasser und des $^{39}\text{K}/^{40}\text{Ca}$ -Verhältnisses im Aquifergestein eine Abtrennung der unterirdischen Produktionsrate prinzipiell möglich. Im Rahmen eines anderen von der DFG geförderten Projekts wird derzeit untersucht, inwieweit unter Berücksichtigung der Produktion der Isotope ^4He , ^{36}Cl , ^{222}Rn und Ra-Isotope eine Methode zur Erkennung und Korrektur unterirdisch produzierten Argon-39 entwickelt werden kann.

3 ERGEBNISSE

3.1. Bohrspülung

Die Viskosität der mit Dehydril-HT versetzten Bohrspülung ist abhängig vom pH-Wert. Um die rheologischen Eigenschaften innerhalb des pH-Bereiches 9-10 der Bohrspülung zu erhalten, wurde der Spülung Ätznatron (Natronlauge) zugesetzt. Bis ca. 2000 m (VB1/VB1 a) wurden weiterhin erhebliche Mengen an Soda (Natriumbikarbonat) und ab ca. 3890 m (VB1a) bzw. 3770 m (VB1b) ebenfalls erhebliche Mengen an organischen Ester eingeleitet. Ester wird langfristig über Kohlenwasserstoffe und CO_2 abgebaut.

Da mit Ausnahme des abschließenden Pumptestes alle während der Vorbohrung gewonnenen Fluidproben relativ stark mit Bohrspülung kontaminiert waren, mußten für die $^2\text{H}/^{18}\text{O}$, ^3H - und $^{34}\text{S}/^{18}\text{O}$ -Isotopenanalysen die Zusatzstoffe abgetrennt werden.

Dies wurde durch eine pH-Erniedrigung infolge der Zugabe von 85 %iger Phosphorsäure im Verhältnis von ca. 1:200 und anschließender Zentrifugation erreicht. Offensichtlich zusätzlich mit Ester kontaminierte Proben - rein äußerlich erkennbar am typischen strengen Geruch, und bei längerer Aufbewahrung in Polyäthylenflaschen an der Bildung eines Unterdrucks in den Flaschen, infolge des Sauerstoffverbrauch beim Esterabbau - wurden bisher nur vereinzelt aufbereitet und untersucht, da für Isotopenuntersuchungen spezielle Trennverfahren notwendig sind, die noch entwickelt werden müssen. Außerdem ist das Ausmaß eines wahrscheinlichen Isotopenaustausches, vor allem ^2H , ^{18}O und ^{13}C betreffend, noch nicht untersucht.

Generell war eine ^{13}C -Analytik der Bohrspülung und der Fluidsamplerproben aus folgenden Gründen nicht sinnvoll:

Bei den in der Bohrspülung künstlich aufrecht gehaltenen alkalischen pH-Werten wird freie Kohlensäure von zutretenden Grundwasser bzw. CO_2 -Gase aus Klüften als HCO_3 in der Bohrspülung gelöst. Messungen am gelösten Kohlenstoff (DIC) werden dadurch verhindert, daß durch Zugabe von Natronlauge Karbonate in der Bohrspülung ausflocken.

Um Grundwasserproben für ^{13}C (DIC)- und ^{14}C -Analysen zu präparieren, werden diese mit Natronlauge und Bariumchlorid versetzt. Dadurch wird der gelöste Kohlenstoff als Bariumkarbonat gefällt, um dann im Labor über eine Säurebehandlung wieder in Kohlendioxid umgewandelt zu werden. Eine vorherige relativ saubere Abtrennung der Fluidprobe oder Spülung von DH-T und Bohrmehl ist, wie oben erwähnt, nur über Herabsetzung des pH-Wertes möglich. Dabei wird aber gleichzeitig im Fluid und im Bohrmehl vorhandenes Karbonat als CO_2 freigesetzt und eine Verfälschung der Isotopendaten ist nicht auszuschließen. Bis in den Teufenbereich von ca. 2000 m eingeleitetes Soda machten ^{13}C -Messungen in der zu erwartenden Übergangszone von Süßwasserhorizonten zu salinaren Wasser gänzlich unmöglich.

Vereinzelt wurden Isotope am Sulfat der Bohrspülung gemessen. In der graphitreichen Kataklasezone in diesem Bereich weisen die $^{34}\text{S}/^{18}\text{O}$ -Messungen auf eine Oxidation der an den Graphit gebundenen Sulfiden zu Sulfaten hin.

Das für das Ansetzen der Bohrspülung verwendete Leitungswasser wurde zu Beginn der Bohrbeiten für ^2H , ^{18}O - und ^3H -Analysen beprobt und analysiert. Die Wasserversorgung der Tiefbohrung erfolgt über 7 Tiefbrunnen aus dem Vorland, deren Mischwasser wechselnden chemischen und isotopischen Schwankungen unterliegt. Dies wirkt sich weniger auf den Chemismus und die stabilen Isotope ^2H , ^{18}O und ^{13}C aus, jedoch erheblich auf die Tritiumgehalte der Bohrspülung, da die Wässer der einzelnen Brunnen Tritiumgehalte von <1 TU bis 23 TU enthalten. Die Spülungswerte sind daher nur bedingt interpretierbar.

Bis zu einer Teufe von etwa 3000 m wurde die Spülung in 100 m-Abständen auf ^2H , ^{18}O und ^3H analysiert. Ab 3000 m wurde dieses Messprogramm intensiviert, wobei vor jeder neuen Einleitung die vorhandene, die eingeleitete und die rückgeführte Spülung beprobt und analysiert wurden. Dies ermöglichte unter anderem über ^2H - und ^{18}O -Daten Berechnungen einer Massenbilanz, mit dem Ziel, signifikante Fluidzutritte auch isotopisch zu erkennen:

Die $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Werte der Umlaufspülung liegen im $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ -Diagramm (Abb.1) auf einer Verdunstungsgerade und weichen signifikant von der Isotopenzusammensetzung des verwendeten Leitungswassers ab. Sie reflektieren im wesentlichen Spülungsereignisse, wie Neueinleitung, Verweilzeit der Spülungsansätze in den offenen (beheizten) Tanks vor der Einleitung, sowie teufenabhängige Temperaturzunahme.

3.2. Fluide

Sowohl die während der Messphasen als auch die während der Hydrauliktests gewonnenen Fluidproben waren stark kontaminiert und mußten, wie oben beschrieben, vorbehandelt werden. Um den Grad der Kontamination abschätzen zu können, wurde zwar versucht, chemische Daten zu verwenden, jedoch sind die chemischen Variationen der Spülung so groß, daß dies nur bedingt mit Lithium möglich war. Ein besserer Tracer ist Tritium, denn Tiefenwässer dürften kein Tritium mehr enthalten, so daß bei bekannten Tritiumgehalt der Umlaufspülung vor der Fluidprobennahme und der Fluidprobe, die

Kontamination abgeschätzt werden kann. Allerdings werden für sehr genaue Messungen mindestens 1 l Wasser benötigt. Wegen der geringen Probenmengen konnten Tritiummessungen nur im Messfehlerbereich von ca. ± 1 bis 2 TU durchgeführt werden. Bei einem durchschnittlichen Tritiumgehalt der Bohrspülung von 9 bis 10 TU und Fluidproben von 2 bis 9 TU ist die Abschätzung daher sehr grob.

Nachfolgend wird nur auf die während der Hydrauliktestphasen gewonnenen Fluidproben eingegangen.

Die $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ -Analysen dieser Fluidproben und der Bohrspülung aus 3500 bis 4000 m sowie des verwendeten Leitungswassers sind im nachfolgenden Diagramm zusammengestellt. Die allgemeine Niederschlagsgerade (GMWL) stellt die Lokalität normaler Grundwässer dar, die nicht durch sekundäre Veränderungen beeinflusst wurden.

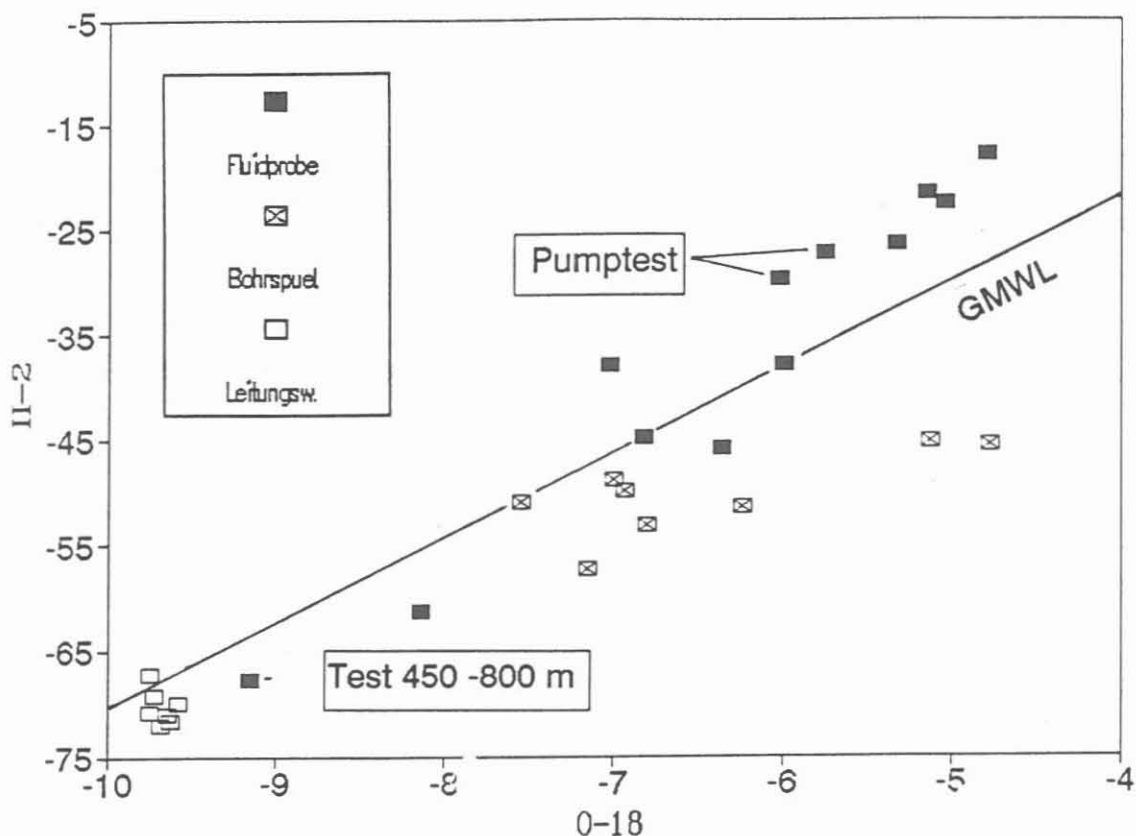


Abb. 1: ^2H - und ^{18}O - Isotopengehalte der während der Hydraulik- und Fluidtests gewonnenen Proben. Als Vergleich sind Bohrspülungsdaten aus dem Teufenbereich 3500 bis 4000 m und die Grundwässer der Brunnen für die Wasserversorgung der KTB-VB dargestellt.

Es sollte hier bemerkt werden, daß der hohe Salzgehalt für die $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ -Analytik ein größeres Problem darstellt. Vor allem im Deuterium wurden bei Kontrollmessungen große Unterschiede festgestellt. Erst nach Destillation unter Vakuum waren die Messwerte reproduzierbar. Offensichtlich werden die Isotope im Kristallwasser der Salze an- oder abgereichert.

Absenkttest 27.2.90 - 1.3.90 (Testintervall 450 - 800 m)

In der KTB-Vorbohrung wurde bei ca. 500 m ein Knick im gemessenen Temperaturprofil festgestellt. Bis 500 m betrug der Temperaturgradient $22\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$, darunter bis Endteufe $28\text{-}30\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ (GIESE et al., 1989). Der plötzliche Anstieg des Temperaturgradienten wird darauf zurückgeführt, daß bis etwa 500 m Grundwasser zirkulieren, die eine konvektive Abkühlung bewirken. Für die geplanten Hydraulik- und Fluidtests nach Beendigung der Bohrarbeiten gehörte daher dieser Teufenbereich für die Frage der Übergangszone aktiver zu quasi-stationären Grundwasser-systemen zu den ersten Prioritäten.

Während dieses Absenkttests wurden in regelmäßigen Abständen während des Swabbens und dem Ausbau des Testgestänges Proben für Isotopenanalysen entnommen. Bisher liegen jedoch nur ^2H - und ^{18}O -Isotopenanalysen aus einer mit einem Fluidsampler entnommenen Probe aus 505 m Teufe vor, sowie einer beim Ausbau des Gestänges gewonnenen Probe aus dem Packerbereich. Der Fluidsampler war nicht gasdicht und soll, auch was die Bohrspülung betrifft, kontaminiert sein (mdl. Mitteilung des KTB-Feldlabors). Im $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ -Diagramm liegen beide Werte rechts der Niederschlagsgeraden, d.h. sie sind beide an ^{18}O gegenüber ^2H angereichert. Dies kann entweder durch ^{18}O -Isotopenaustausch bei relativ hohen Temperaturen oder einfach durch Verdunstungseffekte erklärt werden. Die Werte der stärker kontaminierten Geocom-Probe bewegt sich Richtung Bohrspülungsdaten, während der ^2H -Gehalt der Gestängeprobe nahezu identisch ist mit demjenigen des für die Bohrspülung verwendeten Leitungswassers, das seinerseits mit denen im näheren Umfeld gemessenen Daten vergleichbar ist. Die Probe ist relativ gering an ^{18}O angereichert. Verbindet man die $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ -Analysenpunkte mit denen der Bohrspülung, stellt man fest, daß beide Punkte auf der Verdunstungsgeraden

liegen, d.h., beide Daten reflektieren in diesem Fall mit hoher Wahrscheinlichkeit lediglich den Grad der Kontamination.

Die Verwendung des Tritiumgehaltes als Tracer für die Kontamination scheidet in diesem Fall aus, da gerade hier die Frage von Interesse ist, wie hoch der Tritiumgehalt ist. Daten liegen zwar noch nicht vor, aber es ist zu erwarten, daß in diesem Teufenbereich der Tritiumgehalt nahezu Null ist. Um in diesem Fall die Tritiumkonzentration der reinen Fluide zu extrapolieren, muß der Grad der Kontamination über andere Parameter erfolgen. Da während dieses Hydrauliktests ein enges Beprobungsprogramm erfolgte, bietet sich hier eventuell die Möglichkeit über den Vergleich chemischer Daten mit denen stabiler Isotopen den Tritiumgehalt zu extrapolieren und andererseits eventuell eine Tendaussage der Deuterium- und Sauerstoff-18-Daten des reinen Fluids zu machen.

Im weiteren Verlauf dieses Testprogrammes wurden die Teufenbereiche 2140 bis 2190 m und 1375 bis 1390 m getestet, die aber Fluidzuflüsse betreffend keine positiven Ergebnisse erbrachten.

Stützankertest (Drill Stem Test) 3.11.88 - 7.11.88

In einer Teufe von 3447 m wurde eine ca. 1 cm offene Kluft mit Calcitkristallrasen durchteuft, die sich abgesehen von einem plötzlichen Anstieg von Methan und Helium durch eine hohe Leitfähigkeitsanomalie auszeichnete. Es erfolgte eine Fluid-samplerprobennahme durch den Kernbohrstrang. Danach wurde bis 3487 m weitergebohrt und anschließend ein Stützankertest durchgeführt, in deren Verlauf weitere Fluidproben gewonnen wurden. Allerdings konnte, bedingt durch das große Testvolumen keine unkontaminierte Probe gewonnen werden.

Ergebnisse chemischer und isotopischer Analysen an den verschiedenen Proben sind in Tabelle 1 dargestellt. Diese zeigen, daß diese Fluide als Ca-Na-Cl-Wässer zu klassifizieren sind. Sie haben damit den gleichen Chemismus wie Tiefenwässer im Kristallin des Kanadischen und Fennoskandischen Schild. Die originäre Salinität der Fluide kann nur geschätzt werden:

DATUM	27.10.88	28.10.88	7.11.88	7.11.88
BEZEICHNUNG	Spülung	Preussag-1	DST	PackerII
$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	-6,8	-6,35	-6,82	-7,02
$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	-53,1	-45,8	-44,7	-37,9
$^3\text{H}(\text{TU})$	8,5 \pm 0,9	6,3 \pm 1,4	4,1 \pm 2,5	k.A.
Na (ppm)	760	2700	3300	2880
Ca (ppm)	130	4090	3586	
Sr (ppm)	1,1	97		
Cl (ppm)	53	8700	10180	10820

Tabelle 1: Isotopengehalte und Chemismus von Fluiden vor und während des Drill-Stem-Tests

Bei einem vom ITE Clausthal berechneten Zufluß von ca. 133 l und einem Drillstemtestvolumen von ca. 660 l errechnet sich bei völliger Durchmischung eine Kontamination des Fluids mit Bohrspülung im Verhältnis 1:4. Wegen des bereits erwähnten relativ hoher Messfehlerbereichs im Tritium ist prinzipiell ein Verhältnis zwischen zwischen 1:5 und 1:2 möglich. Die Chloridkonzentration des reinen Fluids dürfte sich zwischen 30 000 und 50 000 mg/l bewegen.

Calcitkristalle dieser Kluft haben $\delta^{13}\text{C}$ - und ^{18}O -Werte von -4,4 und -19,2 ‰ (PDB). Die ^{13}C -Werte deuten hier auf Beteiligung magmatischen Kohlendioxids hin. Andere aus der Bohrung analysierten Calcite weisen ein recht weites Spektrum in den $\delta^{13}\text{C}$ -Werten auf, das möglicherweise auf unterschiedliche Kohlenstoffquellen während ihrer Bildung zurückzuführen ist. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte aller Calcite der KTB-VB liegen in einem engen Bereich, der auf Bildungstemperaturen um 100 °C hinweisen würden, wenn die an der Bildung beteiligten Fluide die gleiche Isotopenzusammensetzung wie die angetroffenen Ca-Na-Cl-Solen hätten. Hierfür gibt es keine Hinweise, und Untersuchungen an Flüssigkeitseinschlüssen an diesen Calciten deuten an, daß der Chemismus der in den Klüften zirkulierenden Fluide nicht konstant war.

Strontiumisotopenanalysen an Calciten und Fluiden der Kluffzone 3447 m, 3736 m und 3817 m zeigen ebenfalls signifikante Differenzen, die darauf hinweisen, daß die Calcite nicht aus den heute vorliegenden Fluiden gebildet wurden. Auffallend ist, daß unterhalb dieser Kluffzone alle halb-offenen Klüfte mehr oder weniger gut ausgebildete Calcitkristalle aufweisen. Ab 3850 m liegen leider keine Bohrkerne mehr vor, v.a. nicht aus der Hauptzuflußzone unterhalb 3990 m. Der Übergang von Na-Ca- zu Ca-Na-dominierenden Lösungen dürfte in der KTB-VB nach den chemischen Daten eines Multifluidsamplereinsatzes unterhalb von ca. 3800 m erfolgen. Leider können aufgrund fehlenden Bohrkernmaterials diese Fluide nicht klufftspezifisch untersucht werden.

Trotz der Kontamination der Fluidproben und der daraus möglichen resultierenden mangelnden Aussagekraft des Analysenwertes wurde eine erste Probe aus dem Drill-Stem-Test an der TU München, Institut für Physik über einen Beschleuniger auf ^{36}Cl untersucht.

Die erste Messung zeigt ein $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ -Verhältnis von $12.0 \pm 3.6 \times 10^{-15}$ oder eine ^{36}Cl -Konzentration von $2.0 \pm 0.6 \times 10^9$ Atome/l. Wenn man einen vergleichbaren kosmogenen Eintrag annimmt, sollte die ^{36}Cl -Konzentration nur 5×10^6 Atome/l betragen. Andererseits kann anthropogenes ^{36}Cl nicht ausgeschlossen werden, da thermonukleares ^3H ($4,1 \pm 2.5\text{TU}$) in dieser Probe enthalten ist. Das bedeutet, daß das gemessene $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ -Verhältnis eine obere Grenze des Gleichgewichtwertes für untertage produziertes ^{36}Cl in der Gesteinsmatrix darstellt, wenn die Verweilzeit des Fluids im Bereich von mehr als 1.5×10^6 Jahren liegt. In diesem Fall entspricht der geschätzte Neutronenfluß im Gestein einem Wert von $2.7 \pm 0.8 \times 10^{-5}$, der vergleichbar mit Werten in Graniten mit normalen Uran- und Thorium-Konzentrationen ist (ANDREWS et al. 1989) Unter Annahme von Gleichgewichtsbedingungen des Gesteins mit dem Fluid sollte die maximale Urankonzentration nur einige ppm ausmachen, dies stimmt mit den über das Gamma-Log gemessenen Werten überein.

Absenk- und Injektionstest 10.5.89 -25.5.89

Infolge des hohen salinaren Zufluß im untersten Bohrabschnitt hatte sich nach Beendigung der Bohrarbeiten im April 89 ein Spülungskuchen gebildet, der auf die Abnahme des pH-Wertes zurückzuführen ist. Nach vorhergegangenem Auszirkulieren der Bohrspülung wurde ein Absenk- und Injektionstest durchgeführt. Die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Fluidproben wurden während des Absenktests gewonnen. Als Vergleich für die $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Daten der Fluide wird hier die letzte Probe aus der Zirkulationsphase mit Werten von -45,5 bzw. -4,77 ‰ angeführt.

Infolge der Zugabe von Esteröl in der letzten Bohrphase sind die entnommenen Fluidproben zusätzlich mehr oder weniger stark kontaminiert. Obwohl eine Isotopenfraktionierung nicht ausgeschlossen werden kann, liegen die ^2H -und ^{18}O -Daten im $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ -Diagramm in dem für diese Fluide zu erwartenden typischen Bereich. Die Proben, die aufgrund der Tritiumgehalte am wenigsten mit Bohrspülung kontaminiert sind (Ester nicht berücksichtigt) liegen am weitesten oberhalb der GMWL.

DATUM	12.5.89	13.5.89	17.5.88	17.5.89
BEZEICHNUNG	Geocom	Geocom	Geocom	Geocom
TEUFE (M)	3985	3930	3930	3995
$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	--5,14	-4,8	-5,04	-5,0
$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	-21,6	-18	-22,6	-22,6
$^3\text{H}(\text{TU})$	2,2 ±1,3	5,6 ±1,5	7,7 ±2,6	k.A.
Na (ppm)	6100	6000	6100	5800
Ca (ppm)	14700	13900	14400	14100
K (ppm)	200	210	210	200
Sr (ppm)	240	220	240	225
Cl (ppm)	31150	29900	29100	32600

Tabelle2: Isotopenanalysen und Chemismus der während des Absenktests gewonnenen Fluidproben.

Nach Beendigung des Absenk- und Injektionstests wurde ein Multifluidsampler mit 12 Kammern eingefahren und ab einer Teufe von 500 m bis Endteufe Proben entnommen. Die ^2H - und ^{18}O -Daten liegen in dem für die Bohrspülung typischen Bereich. Dies korrespondiert auch mit den Chemiedaten, die nur leicht erhöhte Salinitäten zeigten. Eine relativ unkontaminierte Probe, enthielt die Kammer aus 3830 m, die im $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ -Diagramm oberhalb der GMWL, im Bereich der anderen Fluide liegt. Ihr Chemismus zeigt eine Ca-Na-Dominanz mit einem Chloridgehalt von 21 000 ppm.

Pumptest 7.4.90 - 12.4.90

Nach Beendigung der Bohrarbeiten wurde ein hoher salinärer Zufluß im untersten Bohrlochabschnitt festgestellt. Die Hauptzuflußzone liegt unterhalb von 3990 m. Nach Verrohrung und Zementation der Vorbohrung bis in den Teufenbereich 3850 m, sowie mehrfacher anschließender Auszirkulation des Bohrloches mit Frischwasser wurde im April dieses Jahres ein abschließender Hydraulik- und Pumptest durchgeführt. Ursprünglich war ein 6-facher Austausch des Bohrlochvolumens geplant, um einerseits unkontaminierte Fluidproben zu gewinnen und andererseits möglichst aussagekräftige hydraulische Parameter über dieses Kluftsystem zu erhalten.

Aufgrund einer Akkumulation technischer Probleme während dieses Tests mußte das Austauschvolumen auf das Zweifache reduziert werden. Da die Drucksensoren unterhalb des Packers, wahrscheinlich während des Einbaus beschädigt wurden und auftretender Probleme mit dem Flowmeter, mußte der Hydrauliktest abgebrochen werden.

Während des Pumpstests trat das salinare Fluid als geschlossene Front übertage. Bei einer durchschnittlichen Pumprate von 12 l/min und einem Totvolumen von 38m^3 errechnet sich eine Aufstiegszeit von ca. 53 Stunden. Das Wasser trat am Bohrlochkopf mit ca. $13\text{ }^\circ\text{C}$ aus.

Von Beginn bis Ende des Pumpstestes wurde in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen Proben für in Abschnitt 2

beschriebenen Isotopenmethoden entnommen. Darüberhinaus wurden Proben für Gesamtgase, Spurenelemente und Schwermetalle, sowie Proben für weitere Isotopenuntersuchungen anderer Mitglieder der ARGE Fluide genommen.

In der nachstehenden Tabelle sind die Chemie- und Isotopendaten der letzten während des Pumpstests gewonnenen Probe den vorherigen Fluidnehmerproben vergleichbarer Teufe gegenübergestellt. Die in mg/l angegebenen Analysenwerte der FU Berlin wurden über die während des Tests bestimmte Dichte (1,044) zu vergleichbaren ppm-Angaben umgerechnet.

TEUFE	3930 m		3985 m		4000m	
DATUM	13.5.89		12.5.89		11.4.90	
PRÄPARATION	GSF	KTB-FL	GSF	KTB-FL	GSF	FU Berlin
Na (ppm)	6520	7010	6300	6880	---	5268
Ca (ppm)	16330	17010	16530	16760	---	14080
K (ppm)	----	230	220	---	---	192
Sr (ppm)	264	269	268	267	---	260
Li (ppm)	6,8	7,1	6,4	6,5	---	5,2
Mg (ppm)	103	99	70	64	---	6,5
Cl (ppm)	39400	29300	38700	33000	---	39662
$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	-4,8		-5,14		-5,75	
$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	-18		-21,6		-27,3	
$^3\text{H}(\text{TU})$	5,6 ±1,5		2,2 ±1,3		k.A.	

Tabelle 3: Vergleich der Isotopen- und Chemiedaten aus den Fluidproben des Absenkttests (verschiedene Präparation) im Mai 1989 zu der Fluidprobe aus dem Pumpstest am 11.4.90 18 Uhr.

Um eventuelle Unterschiede festzustellen, die durch die Probenpräparation vor der chemischen Analyse entstehen könnten, wurden die mit Phosphorsäure für Isotopenanalysen aufbereitete Proben unter den gleichen Bedingungen im Feldlabor am ICP gemessen. In den Kationengehalten sind keine gravierenden Unterschiede festzustellen - bei den mit Säure

aufbereiteten Proben sind leichte Anstiege der Na- und Ca-Ionen zu erkennen- wesentlich ist jedoch die große Abweichung der Chloridgehalte. Nach der Massenbilanzierung sind die Werte der über Säure behandelten Proben wahrscheinlicher. Der Vergleich mit den im Pumpstest gewonnenen Daten scheint dies zu bestätigen.

Inwieweit die Spülmittelzusätze bestimmte Kationen und Anionen offensichtlich in diesem salinaren Milieu unter diesen Temperaturbedingungen zurückhält, sollte untersucht werden.

Noch nicht erklärbar sind die Übereinstimmungen der Analysenwerte des abschließenden Pumpstestes mit denen der kontaminierten Fluidproben. Sie stimmen sowohl im Chemismus als auch in den stabilen Isotopen einigermaßen überein. Aufgrund des Grads der Kontamination der Fluidnehmerproben wurde eine wesentlich höhere Konzentration der Salinität erwartet. Eine mögliche Erklärung wäre, daß während der langen Aufstiegszeit, verbunden mit dem Druck-Temperatur-Gefälle und der daraus resultierenden Entgasung und pH-Wert-Änderungen, chemische und isotopische Fraktionierungen auftreten. Dies muß über geochemische Modellierungen untersucht werden.

Nach Beendigung des Pumpstestes war ursprünglich ein mehrfacher Geocom-Einsatz aus verschiedenen Teufen geplant, um einerseits für die wichtigsten Isotopenanalysen, die keine größeren Probenmengen erfordern, Proben unter in-situ-Druck-Temperatur-Bedingungen zu erhalten, und andererseits, um die übertage gewonnenen Isotopendaten zu extrapolieren, da angenommen werden kann, daß bedingt durch Druck-/Temperaturänderungen sowohl chemische als auch isotopische Fraktionierungen auftreten. Dies ist besonders für die Isotopen der Gase relevant.

Da Teile des ersten bei 3800 m gesetzten Packers bei 2050 m in der Verrohrung verblieben, sollte ein Geocom-Einsatz aus den Teufen 1000 m, 1500 m und 2000 m erfolgen, um mit diesen Daten zu versuchen, die originäre chemische und isotopische Gas-Fluidzusammensetzung auf 4000 m zu extrapolieren. Während des Ausbaus des Pumpgestänges und des bei 1100 m gesetzten Packers blieben erneut Reste des Packers im Bohrloch. Es wurde versucht, diese mit Frischwasser auszuzirkulieren. Dadurch

bildete sich eine Frischwassersäule bis 1100 m im Bohrloch. Daraufhin wurden nur noch Geocom-Einsätze bei 1950, 2000 und 2050 m durchgeführt.

Es wurden zwei Geocom-Fluidnehmer parallel eingesetzt. Der eine wurde herkömmlich im Feldlabor entgast und überführt, der andere wurde vorort durch eine für diese Zwecke von der GSF angefertigten Apparatur unter 20 bar in verschiedene Behälter überführt, um den einzelnen Arbeitsgruppen quantitative Gas-Wasser-Proben unter gleichen Bedingungen für die Analytik zur Verfügung zu stellen. (Näherers s. Beitrag St. Weise in diesem Band)

Erste $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ -Analysen einer Probe am Ende des Pumptests am 11.4.90 um 18 Uhr und einer von der GSF überführten Geocom-Probe aus 1950 m sind in Abb.1 dargestellt. Im $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ -Diagramm liegen sie oberhalb der GMWL, im Bereich der anderen, während der Fluidtestphasen entnommenen salinaren Proben und damit im typischen Bereich bekannter hochsalinarer Wasser im Kristallin.

Erste Laborergebnisse der Gruppe PEKDEGER, FU Berlin zeigen, daß das salinare Fluid bei Beginn des Übertageaustritts sehr hohe Gehalte an organischen Kohlenstoff(DOC), bis über 700 mg/l enthielt, die auf Esterreste in den Kluftzonen zurückgeführt werden. Eine Analyse des DOC steht noch aus. Das Wasser hatte zwar während des gesamten Tests den typischen Estergeruch in wechselnder Konzentration, dies wurde jedoch wegen der vorangegangenen Auszirkulation und des offensichtlichen Fehlens von sonstigen Spülungsresten, sowie der nach einer gewissen Zeit konstanten vorort bestimmbar chemischen und physikalischen Parameter auf andere anorganische Kohlenwasserstoffe zurückgeführt. Die Fluide am Ende des Pumptestes enthielten immerhin noch über 50 mg/l DOC.

Der organische Kohlenstoff wird erhebliche Probleme für die gesamte Kohlenstoffanalytik bereiten. Bereits jetzt ist abzusehen, daß die entnommenen Proben für die ^{14}C -Analytik nicht brauchbar sind. Für diese Messung sind ca. 2-3 g Kohlenstoff notwendig. Vorort wurden von der FU Berlin HCO_3^-

Messungen kontinuierlich über Alkalitätsmessungen durchgeführt. Danach ergaben sich HCO_3 -Gehalte von ca. 120 mg/l. Es wurden daraufhin jeweils nur 60 l Behälter abgefüllt. Die Fällung enthielt jedoch nur 0,44 g Kohlenstoff. Offensichtlich wurden die Alkalitätsmessungen von dem organischen Kohlenstoff stark beeinflusst oder die Fällung gestört.

Abgesehen davon, sind da sich Ester über CO_2 und Kohlenwasserstoffen abbaut, Isotopenaustauschprozesse der Kohlenstoffisotope wahrscheinlich. Dies betrifft nicht nur die im Wasser gelösten Kohlenstoffe, sondern auch die Gase. In welchem Ausmaß dies der Fall ist, sollte über Laborexperimente nachgeprüft werden. Außerdem ist es fraglich, inwieweit die vorliegenden und noch zu messenden ^2H - und ^{18}O -Gehalte denen der originären Fluide entsprechen, da Ester einerseits durch seine chemische Zusammensetzung selbst als auch während des Abbaus die Isotopenzusammensetzung der Fluide beeinflussen wird.

Eine Diskussion der Ergebnisse dieses Pumptests sollte erst bei Vorliegen sämtlicher Analysenergebnisse, möglichst in Zusammenarbeit mit allen Bearbeitern der Hydraulik- und Fluidgruppe erfolgen.

LITERATUR

- ANDREWS, J.N., DAVIS, S.N., FABRYKA-MARTIN, J., FONTES, J.-CH., LEHMANN, B.E., LOOSLI, H.H., MICHELOT, J.-L., MOSER, H., SMITH, B., WOLF, M.: The in situ production of radioisotopes in rock matrices with particular reference to the Stripa granite. *Geochem. Cosmochim. Acta* 53, pp 1803-1815 (1989)
- BUHEITEL, F., EICHINGER, L., HURST, S., LODEMANN, M., WOLF, M., MEIER, H., ZIMMERHACKL, E., ZETTLER, G., BÖSCHE, D., DRAXLER, J., KÜCK, J., NOLTE, E., KORSCHINEK, G., DOCKHORN, B.: Isotope geochemistry on fluids from open fractures (3000 - 4000m). Uranium-, thorium-, radium isotopes and chlorine-36 in brines. Beiträge zum 3. KTB-Kolloquium, Gießen 28.2. bis 2.3.1990. - NLfB, Hannover, KTB Report 90-4, in Druck.
- FRITZ, P., LODEMANN, M., RAUERT, W., HEINSCHILD, H.-J., HOMANN, K.-D., MIEHE, R., PUSCH, G., DÖRR, M., PEKDEGER,

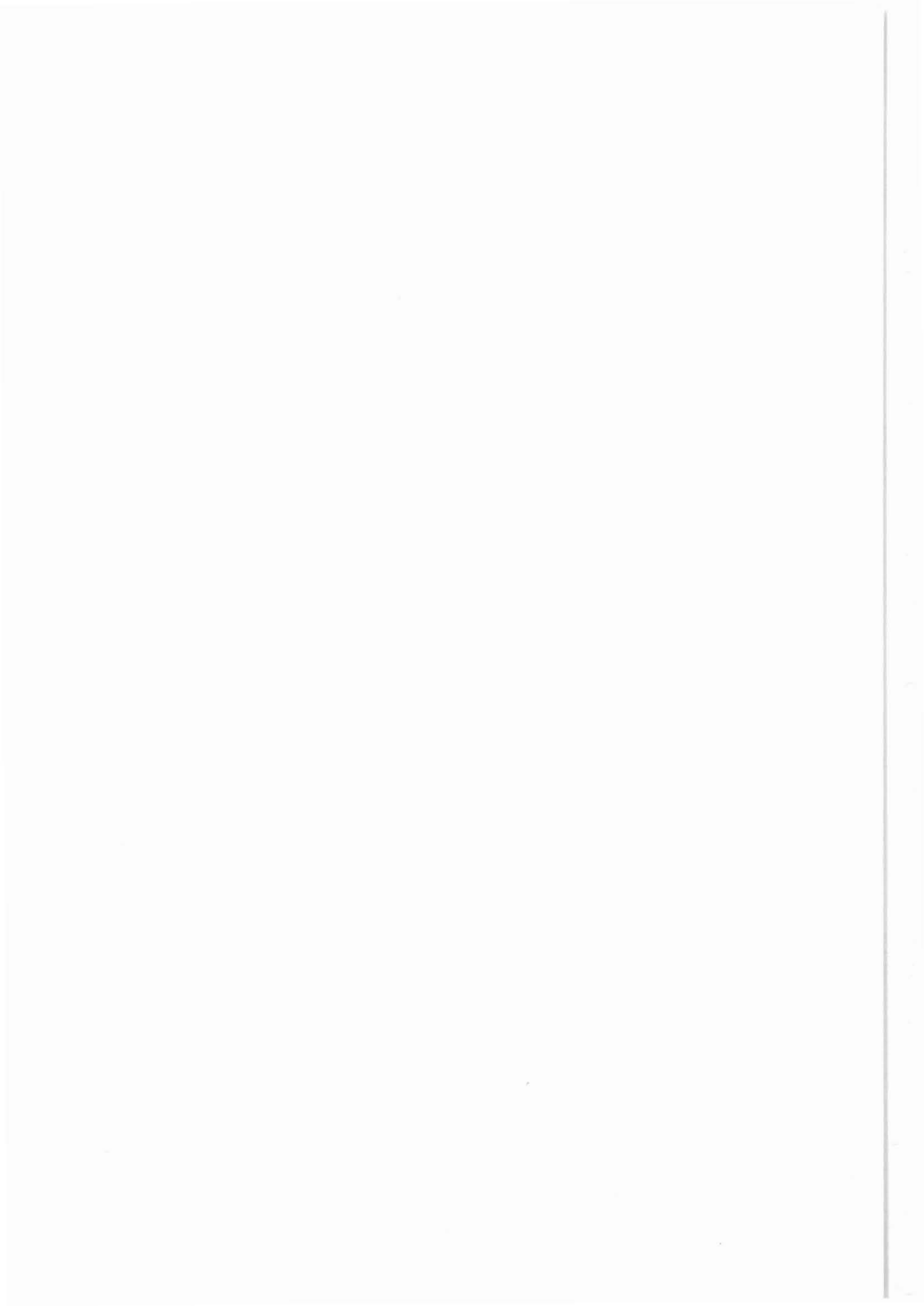
- A., RASPER, M.: Zusammensetzung von Tiefenwässern in den offenen Klüften der KTB-Vorbohrung. - Beiträge zum 2. KTB-Kolloquium, Gießen, 15. bis 17.3.1989. Teil B: Posterbeiträge. - NLfB, Hannover, KTB Report 89-3, S. 448.
- FRITZ, P., LODEMANN, M., RAUERT, W., TRIMBORN, P., BEHR, H.-J., HORN, E.-E., REUTEL, CHR., SCHMIDT-MUMM, A., TOPP; J., HEINSCHILD, H.-J., KAMM, H., MERZ, S., WITTENBECHER, M.: Isotope geochemistry on fluids from open fractures (3000 - 4000 m). Chemistry and stable isotopes of brines and fluid inclusions in fracture calcites. Beiträge zum 3. KTB-Kolloquium, Gießen, 28.2. bis 2.3.1990. Posterbeiträge. - NLfB, Hannover, KTB Report 90-4, in Druck.
- GIESE, P., BURCKHARDT, M., ERBAS, K., HAACK, U., HORNAMAND, H., HUENGES, E., STIEFEL, A., WILHELM, H., ZOTH, G., BUNTEBARTH, G., SCHULZ, R.: Das vorhergesagte und das gemessene Temperaturprofil.- Beiträge zum 2. KTB-Kolloquium, Gießen, 15. bis 17.3.1989. Teil A: Vorträge. - NLfB, Hannover, KTB Report 89-3, S. 216-242.
- HABERSTOCK, G., HEINZL, J., KORSCHINEK, G., MORINGA, H., NOLTE, E., RATZINGER, U., KATO, K., WOLF, M.: Accelerator mass spectrometry with fully stripped ^{36}Cl ions. - Radiocarbon 28, No. 2A, 204-210 (1986).
- HEINSCHILD, H.-J., STROH, A., WELKER, H.G.: Vorabinformation KTB-FL Geochemie 29.10.88
- HEINSCHILD, H.-J., KAMM, H., MERZ, S.: Vorabinformation KTB-FL Geochemie, 30.5.89
- HEINSCHILD, H.-J., KAMM, H., MERZ, S., WITTENBECHER, M.: Vorabinformation KTB-FL, 21.6.89
- HOMANN, K.-D., KAMM, H.: Vorabinformation KTB-FL Geochemie 18.12.88
- KESSELS, W., ZOTH, G., KÜCK, J.: Erste Ergebnisse eines Absenk- und Injektionstestes in der KTB-Oberpfalz VB. - NLfB, Hannover, Projektgruppe KTB, 24 S.
- LODEMANN, M., FRITZ, P., RAUERT, W., TRIMBORN, P., GRAF, W.,: Isotopenhydrologische Untersuchung an der Bohrspülung. - Beiträge zum 2. KTB-Kolloquium Gießen, 15. bis 17.3.1989. Teil B: Posterbeiträge. - NLfB, Hannover, KTB Report 89-3, S. 450.
- LODEMANN, FRITZ, P., HANSEN, B., FABER, E., WHITICAR, M.J.: Isotope geochemistry on fluids from open fractures (3000 - 4000 m). Carbon and strontium isotopes in brines, calcites, graphites and methane. Beiträge zum 3. KTB-Kolloquium Gießen, 28.2. bis 2.3.1990. Posterbeiträge. - NLfB, Hannover, KTB Report 90-4, in Druck.
- RUMMEL, F., KÜCK, J.: Hydraulische Teste. - Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik (Bericht 8).

Bohrlochmessungen in der KTB-Oberpfalz VB - Intervall
3009,7 - 4000,1 m -. - NLfB, Hannover, KTB Report 90-1, S.
171-180.

PEKDEGER, A.: Vorabinformation Hydrochemie Pumptest 11.4.90.-
20.6.90

WEISE, ST., FRITZ, P., HEUSSER, E., KIRSTEN, T.: Isotope
geochemistry on fluids from open fractures (3000- 4000 m).
Isotopes of helium and other noble gases in fluid and
cores. Beiträge zum 3. KTB-Kolloquium Gießen, 28.2. bis
2.3.1990. Posterbeiträge. - NLfB, Hannover, KTB Report
90-4, in Druck.

WITTENBECHER, M., HEINSCHILD, H.-J., STROH, A., TAPFER, M.:
Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der
geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor
Teufenbereich von 3009,7 bis 3500 m: C.Geochemie. - NLfB,
Hannover, KTB Report 89-5, S. C18 - C35.



Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Stilleweg 2
3000 Hannover 51

C- und H-Isotopenverhältnisse in leichtflüssigen Kohlen-
wasserstoffen, Kohlendioxid und Wasserstoff aus
Testuntersuchungen der KTB-Vorbohrung

E. Faber
M. J. Whiticar



C- UND H- ISOTOPENVERHÄLTNISSE IN LEICHTFLÜCHTIGEN KOHLEN-
WASSERSTOFFEN, KOHLENDIOXID UND WASSERSTOFF AUS
TESTUNTERSUCHUNGEN DER KTB-VORBOHRUNG

E. Faber und M. J. Whiticar¹

Zusammenfassung

Die isotope-geochemische Signatur der Kohlenwasserstoffe in den KTB-Gasen aus Fluidproben des Teufenbereiches 3442.9 - 3486.9 m und 478 - 4000.1 m legt eine biogene (bakterielle und thermische) Entstehung nahe. Die thermischen Gase entstehen vermutlich aus einer marinen Muttersubstanz geringer thermischer Belastung (Inkohlung ≤ 0.5 % Vitrinitreflexion). Die Kohlenstoff-Isotopenwerte des Kohlendioxides sprechen nicht gegen eine biogene CO₂-Entstehung. Da das Bohrloch in metamorphen Gesteinen abgeteuft wurde, müssen die Gase aus Formationen des weiteren Bohrgebietes einmigriert sein, wo unerwartet Sedimente gefunden wurden, die zur Ölbildung fähig. Genaue Migrationswege/-Bedingungen sind nicht bekannt. Die Deuteriumkonzentrationen (δD -Werte) des ebenfalls auftretenden molekularen Wasserstoffes liegen zwischen etwa -660 und -500 o/oo.

Summary

The isotope and chemical data of gases found in fluid samples in the depth intervals 3442.9 to 3486.9 m and 478 to 4000.1 m in the pilot well of the KTB indicate a biogenic (bacterial and thermal) generation of hydrocarbon gases and carbon dioxide. Thermal gases are thought to be generated from a marine organic source at low temperatures (maturity ≤ 0.5 % vitrinite reflectance). Unusual in metamorphic rocks, these gases are thought to be migrated into the rocks drilled from formations containing oil-prone organic matter. Formations of this type have been found in the wider drilling area. Exact migration pathways/conditions are not known today. Deuterium concentrations in molecular hydrogen, also found in the gas samples, range between -660 to -500 o/oo.

¹ Anschrift der Autoren: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Stilleweg 2, 3000 Hannover 51

1. Einleitung

Bei den verschiedenen Testuntersuchungen der KTB-Vorbohrung traten gasförmige Kohlenwasserstoffe (KW) neben anderen Gasen auf. Die Existenz dieser KW in metamorphen Gesteinen ist ungewöhnlich. Zur Klärung der Frage nach ihrer Herkunft wurde die Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe und die Verhältnisse der stabilen Kohlenstoff-Isotope der Komponenten Methan, Äthan, Propan und des Kohlendioxides und die Deuterium-Konzentration des Methans und bei einigen Proben des molekularen Wasserstoffes bestimmt. Diese Daten gestatten i.a. die Charakterisierung bakteriellen Methans einschließlich des methanogenen Entstehungspfadens (Whiticar et al., 1986) und die Identifizierung thermischer Kohlenwasserstoffe mit Beschreibung des Types sowie der Inkohlung des zugehörigen Muttergesteines (Faber, 1987).

Neben diesen insbesondere in sedimentären Formationen dominierenden Gasen können mit Hilfe der Isotopendaten jene charakterisiert werden, die auf eine abiogene Entstehung zurückgeführt und zum Teil als Mantelbeitrag betrachtet werden. Außerdem ist es möglich, Gase, die aus Salzen entlöst werden (Gerling et al., 1988), die beim Niederbringen von Bohrungen "künstlich" entstehen (Faber et al., 1988) oder die in anderen, granitischen Grundgebirgen gefunden wurden (Fritz et al., 1987) zu beschreiben und zu identifizieren.

2. PROBEN und MEßPARAMETER

Es wurden Testgas-Proben aus dem DST 4 (3442.9 - 3486.9 m) vom 27. - 28. 10. 1989 und dem Absenkttest (478 - 4000.1 m) vom 10. - 15. 5. 1989 untersucht.

Die folgenden Meßgrößen wurden gaschromatographisch und massenspektrometrisch bestimmt bzw. aus den Meßdaten errechnet:

- Volumenanteile (%) der Komponenten Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid, Wasserstoff und Kohlenwasserstoffe (gesättigte Komponenten Methan bis Pentan und die ungesättigten Komponenten Ethen und Propen),

- aus den Volumenanteilen berechnete Gasverhältnisse wie

$$C_1 / (C_2 + C_3) \quad (1/1)$$

- Isotopenverhältnisse (als δ -Werte) der Komponenten Methan, Ethan, Propan, Kohlendioxid und Wasserstoff.

$$\delta^{13}C_{1-3} \quad (o/oo) \quad (CH_4, C_2H_6, C_3H_8)$$

$$\delta^{13}CO_2 \quad (o/oo) \quad (CO_2)$$

$$\delta D-C_1 \quad (o/oo) \quad (CH_4)$$

$$\delta D-H_2 \quad (o/oo) \quad (H_2).$$

Zur Messung der Isotopenverhältnisse werden die entsprechenden Komponenten gaschromatographisch abgetrennt. Das CO_2 der Gasprobe wird aufgefangen. Die Komponenten CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 und H_2 werden online zu CO_2 (nicht H_2) und H_2O oxidiert. Das Wasser wird anschließend in einem Glasröhrchen an Zink zu molekularem Wasserstoff (H_2) reduziert. Die massenspektrometrischen Analysen erfolgen an Finnigan MAT Geräten vom Typ 251 ($\delta^{13}C$ am CO_2) bzw. Delta (δD am H_2). Die Meßgenauigkeiten betragen ca. $< \pm 1$ o/oo bzw. $< \pm 7$ o/oo für $\delta^{13}C$ und δD , die δ -Werte beziehen sich auf den PDB bzw. SMOW Standard. Einzelheiten zu den genannten Labortechniken sind bei Dumke et al. (1989) zu finden.

3. Ergebnisse

Die Meßergebnisse sind in der Tabelle 1 enthalten und in den Abbildungen 1 bis 5 dargestellt.

Hauptbestandteil der Gase ist Stickstoff (64 - 77 %). Seine Herkunft wird, ebenso wie die des Sauerstoffes (0.5 - 14.1 %)

nicht diskutiert.

Der Methangehalt der DST 4 Probe ist mit 6.5 bzw. 14 % kleiner als der bei den Proben aus dem Absenktest (22.8 - 32.4 %), in beiden Probengruppen allerdings erheblich größer als in Spülgasen (Faber und Whiticar, 1989), die während des Abteufens der Bohrung gewonnen wurden.

Innerhalb der Kohlenwasserstoffe ist das Methan mit mehr als 95 % am stärksten vertreten, danach folgen Ethan (1.7 - 3.9 %) und Propan (bis 0.2 %). Die Butane und Pentane sind nur in Spuren vertreten (< 0.1 %). Die ungesättigten Komponenten Ethen und Propen wurden, im Gegensatz zu den Spülgasen (Faber und Whiticar, 1989), nicht nachgewiesen.

Wegen der verwendeten basischen Spülung wurde Kohlendioxid in den Spülgasen allenfalls in Spuren gefunden. In den hier vorgestellten Gasen Fluidproben sind die gemessenen Konzentrationen vergleichsweise höher (<0.01 - 5.3 %), allerdings ist keine Aussage möglich, ob diese Werte die originalen CO₂-Konzentrationen der Zuflüsse widerspiegeln.

Wasserstoffgas wurde in Konzentrationen von 0 bis 5.3 % gefunden und tritt damit in einigen Proben in nicht unerheblichen Mengen auf.

4. Diskussion

Die vorgestellten Meßdaten sollen helfen die genetische Herkunft der Gase abzuleiten. Zu diesem Zweck werden die Daten der Testproben mit den Datenbereichen verglichen, die sich empirisch aus der Zusammenstellung einer Vielzahl von Meßergebnissen genetisch bekannter, überwiegend biogener, häufig aus Lagerstätten, flachen und tiefen Sedimenten und Bohrproben stammender Kohlenwasserstoffe ergeben haben (Fuex, 1977; Stahl, 1977; Schoell, 1983; Whiticar et al. 1986; Faber, 1987; Whiticar, 1989).

Der Vergleich der Kohlenstoff-Isotopenwerte des Methans und des Kohlendioxides in Abb. 1 deutet auf eine thermische, also biogene, Herkunft beider Gase hin. Die Kohlenstoff-Isotopenwerte des Kohlendioxides im Bereich von etwa -36 bis -26 ‰ lassen sich kaum in Verbindung mit einer abiogenen ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} \geq -10$ ‰) oder geothermalen Herkunft des CO_2 bringen.

Bei den Kohlenwasserstoffen sind konkretere Aussagen möglich. Ein Vergleich der Gaszusammensetzung ($\text{C}_1 / (\text{C}_2 + \text{C}_3)$) mit den Kohlenstoff-Isotopenwerten des Methans ist in Abb. 2 dargestellt. Die Proben haben eine sehr einheitliche Zusammensetzung und liegen in dem Randbereich der thermische Gase, in dem häufig auch die Zumischung von bakteriellem Methan festgestellt wurde.

Die Kohlenstoff- und Wasserstoff-Isotopenverhältnisse des Methans sind in Abb. 3 gegenübergestellt. Auch in dieser Darstellung ist die homogene Zusammensetzung der Proben erkennbar, wobei ein geringer Unterschied in der Deuteriumkonzentration zwischen den DST und den GEOCOM-Proben auffällt. Diese Abbildung zeigt eine im wesentlichen thermische Herkunft des Methans, wobei sich in den GEOCOM-Proben Anteile einer bakteriellen (CO_2 -Reduktion) Methan-komponente andeuten.

Folgt man dieser Interpretation der thermischen/bakteriellen Herkunft der Gase, so ist ein Vergleich der Methan- und Propan- mit den Ethan-Kohlenstoff Isotopenwerten und entsprechenden Korrelationslinien für eine Reifeabschätzung des zugehörigen Muttergesteines sinnvoll (Abb. 4). Die Daten der DST 4 Proben stimmen recht gut mit der Verlängerung der gezeichneten Korrelationslinien in den Bereich von Inkohlungswerten kleiner als 0.5 % Vitrinitreflexion überein. Sie untermauern damit die thermische Herkunft dieser Gase aus einem gering inkohlten, überwiegend marinen organischen Ausgangsmaterial. Die GEOCOM-Proben (es liegen nur Methan- und Ethan-Werte vor) liegen etwas unterhalb der entsprechenden Korrelationslinie. Dieses wird erwartet bei Mi-

schungen von thermischen und bakteriellen Gasen (Faber, 1987) und unterstreicht die aus der Abb. 3 getroffene Schlußfolgerung über bakterielle Methanbeimischungen in den GEOCOM-Gasen.

Die oben diskutierte Charakterisierung der Kohlenwasserstoffe basiert auf dem Vergleich der Daten mit den Datenbereichen anderer, genetisch bekannter Gase. Wenn man der vorgestellten Deutung ihrer biogenen Entstehung nicht folgt, dann müssen die Meßdaten durch alternative Modelle oder Mechanismen erklärt werden. Gase, die beim Bohren künstlich entstehen können (Faber et al. 1988) und auch in Spülungsgasen der KTB-Vorbohrung angetroffen wurden (Faber und Whiticar, 1989) oder die in Salzen gefunden wurden (Gerling et al., 1988), haben auf Grund ihrer völlig anderen Isotopenzusammensetzung keine genetische Verwandtschaft mit den hier vorgestellten Gasen. In der Abb. 5 sind weitere Literaturdaten von Gasen zusammengestellt, deren Entstehung nicht durch bakterielle oder thermische Prozesse gekennzeichnet ist. Die vorgestellten KTB-Daten lassen sich nicht in Übereinstimmung bringen mit vermutlich nicht-biogenen Gasen aus Gesteinen des Kanadischen Schildes (Sherwood et al., 1988), mit Gasen aus den geothermalen Systemen der Yellowstone und Lassen Parks (Welhan, 1988), aus Neuseeland (Lyon & Hulston, 1984), dem Salton Sea (Welhan, 1988) oder mit vermutlich abiogenen Gasen aus dem Ostpazifischen Rücken (ERP 21 °N, Welhan 1988) bzw. aus Ophiolitkomplexen in Zambales (Abrajano et al., 1988). Es lassen sich nur schwer Mechanismen vorstellen, die eine Verschiebung der Daten der genannten Gase in die Bereiche der biogenen Gase bewirken. Deshalb erscheint oben vorgestellte genetische Deutung der KTB Testgase plausibel und ihre Übereinstimmung, speziell der DST-4 Proben, mit jenen aus dem Guaymas Becken (Abb. 5), deren thermische Entstehung aus sedimentärer organischer Substanz angenommen wird (Welhan and Lupton, 1987), ist verständlich.

Nicht geklärt ist zur Zeit die Frage, wie die Kohlenwasserstoff-Gase mit biogener Signatur in die metamorphen Gesteine der KTB gelangt sind. Es wird jedoch davon ausgegangen, daß sie aus Erdöl-bildungsfähigen Formationen einmigriert sind, wie sie im

Bereich der Stadt Weiden bei einer Explorationsbohrung auf Thermalwasser durchteuft wurden (Lodemann et al., 1990). Konkrete Vorstellungen zum Mechanismus der Migration existieren dazu noch nicht.

Bei einigen Proben mit ausreichenden Gasmengen konnten die $\delta D-H_2$ -Werte bestimmt werden. Sie variieren zwischen etwa -660 und -500 o/oo. Dieser Wertebereich stimmt mit vielen publizierten Daten von Wasserstoffgasen aus geogenen Bereichen überein, über die bisher berichtet wurden:

$\delta D-H_2$ (o/oo)	Lokation (Typ) and Zitat
-400 bis -375	East Pacific Rise, Welhan and Craig, 1983
-590 bis -513	Salton Sea, Welhan, 1981
-661	Yellowstone, Gunter & Musgrave, 1971
-632 bis -358	Iceland, Arnason, 1977
ca. -700	Oman, gases from alkaline springs in ophiolitic sequences, Neal & Stanger, 1983
-826 bis -740	American Rift System, Kansas, Goebel et al., 1984
-435 bis -138	Canadian Shield, Sherwood et al., 1988

Aus den genannten Daten lassen sich zur Zeit keine allgemeingültigen Rückschlüsse auf den Bildungsmechanismus des Wasserstoffgases ableiten, es werden vielmehr verschiedene Prozesse oder Quellen in Betracht gezogen (Goebel et al., 1984) wie: biogen, aus organischer Substanz durch radioaktiven Zerfall, Hochtemperatur/magmatische oder vulkanische Prozesse, Korrosion der Verrohrung oder des Bohrgestänges, Serpentinisierung ultramafischer Gesteine, Mantel, Ionisierung von Wasser mit unterschiedlichen Potentialen oder Bildung an frischen Bruchflächen von Gesteinen.

Dank

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des DFG Vorhabens Fa 175/2-1 gefördert. Die Autoren danken dem KTB-Feldlabor für die Hilfestellung bei der Probenahme. Die Analysen wurden in dem Isotopenlaboratorium der BGR durchgeführt. Dr. Gerling hat dankenswerterweise das Manuskript kritisch durchgesehen.

Literatur

- Abrajano, T.A., Sturchio, N.R., Bohlke J.H., Lyon, G.L., Poreda, R.J. and Stevens, C.M., 1988: Methane-hydrogen gas seeps, Zambales Ophiolite, Phillipines: Deep or shallow origin? *Chem. Geol.* 71, 211-222.
- Arnason, B., 1977: The hydrogen-water isotope thermometer applied to geothermal areas in Iceland. *Geothermics*, 5, 75 - 80.
- Dumke, I., Faber, E., Poggenburg, J., 1989: Determination of stable carbon and hydrogen isotopes of light hydrocarbons. *Analytical Chemistry*, 61,19, 2149-2154.
- Faber, E., 1987: Zur Isotopengeochemie gasförmiger Kohlenwasserstoffe. *Erdöl, Erdgas, Kohle* 103, 5, 210-218.
- Faber, E. and Whiticar, M.J., 1989: C- und H-Isotope in leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen der KTB-Vorbohrung. Beiträge zum 2. KTB-Kolloquium Gießen, 15. bis 17.3.1989. KTB Report 89-3, 33- 41.
- Faber, E., Gerling, P. and Dumke, I., 1988: Gaseous hydrocarbons of unknown origin found while drilling. *Org. Geochem.* 13, 4-6, 875 - 879.
- Fritz, P., Frappe, S.K., Miles, M., 1987: Methane in the crystalline rocks of the Canadian Shield. In: P. Fritz and S.K. Frappe

(Editors), Saline Waters and Gases in Crystalline Rocks. Geol. Assoc. Can., Spec. Pap., 33: 211 - 224.

Fuex, A. N., 1977: The use of stable carbon isotopes in hydrocarbon exploration. J. Geochem. Expl. 7, 155 - 188.

Gerling, P., Whiticar, J.M. and Faber, E., 1988: Extreme isotope fractionation of hydrocarbon gases in Permian salts. - Org. Geochem. 13, 335 - 341.

Goebel, E.D., Coveney, R.M., Angino, E.E., Zeller, E.J. and Dreschhoff, G.A.M., 1984: Geology, composition, isotopes of naturally occurring H₂/N₂ rich gas from wells near Junction City, Kans.. Oil & Gas J., May 7, 215-222.

Gunter, B. D. and Musgrave, B. C., 1971: New evidence on the origin of CH₄ in hydrothermal areas. Geochim. Cosmochim. Acta 35, 113 - 118.

Neal, C. and Stanger, G., 1983: Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman. Earth Planet. Sci. Lett., 60, 315 - 321.

Lodemann, M., Weise, S., Fritz, P., Rauert, W., Trimmborn, P., Buheitel, F., Eichinger, L., Hurst S., Baumann M., Faber, E., Whiticar M.J., Schulz, R., Schellschmidt, R., Ruhland, H. und Meier, 1990: Regional isotope hydrology and chemistry of groundwaters. Poster gezeigt beim Kolloquium im Rahmen des Schwerpunktprogrammes "Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland vom 28.2. - 2.3.1990 in Gießen.

Lyon, G.L. and Hulston, J.R., 1984: Carbon and hydrogen isotopic compositions of New Zealand geothermal gases. Geochim. et Cosmochim. Acta, 48, 1161-1171.

Sherwood, B., Fritz, P., Frappe, S.K., Macko, S.A. Weise, S.M. and Welhan J.A., 1988: Methane occurrences in the Canadian shield. In: M. Schoell (Guest-Editor), Origins of Methane in the Earth.

Chemical Geology, 71, 223-236.

Schoell, M., 1983: Genetic characterisation of natural gases. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin 67, 12, 2225 - 2238.

Stahl, W. J., 1977: Carbon and nitrogen isotopes in hydrocarbon research and exploration. Chemical Geology 20, 121 - 149.

Welhan, J.A., 1981: Carbon and hydrogen gases in hydrothermal systems: the search for mantle sources. Ph.D. Thesis, University of California, San Diego, Calif., 195 pp.

Welhan, J.A.: 1988: Origins of methane in hydrothermal systems. Chem. Geol., 71 183-198.

Welhan, J. A. and Lupton, J. E., 1987: Light hydrocarbon gases in Guaymas basin hydrothermal fluids: thermogenic versus abiogenic origin. AAPG Bulletin 71, 2, 215-223.

Welhan, J.A. and Craig, H. 1983: Methane, hydrogen and helium in hydrothermal fluids at 21 degrees N on the East Pacific Rise. In: P.A. Rona, K. Boström, L. Laubier and K.L. Smith, Jr. (Editors), Hydrothermal Processes at Seafloor Spreading Centers. Plenum, New York, N.Y., 391-409.

Whiticar, M. J. and Faber, E., 1986: Methane oxidation in sediment and water column environments - isotopic evidence. Org. Geochem. 10, 759-768.

Whiticar, M. J., Faber, E. and Schoell, M., 1986: Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO₂ reduction vs. acetate formation - isotope evidence. Geochim. Cosmochim Acta 50, 693-709.

Whiticar, M. J. (in press): A geochemical perspective of natural gas and atmospheric methane. Paper presented at the 14th EAOG Meeting, Paris, 1989.

KW-NR	Art	Datum	Teufe m	CH4	CO2	N2	O2	H2	CH4	C	C2H6	C3H8	IC4	NC4	IC5	NC5	D13C1	D13C2	D13C3	D13C02	DDC1	DDH2	C1/ C2+C3
				%					KW %					o/oo									
111442	GEOCHOM	890513	3930	32.4	0.1	65.9	0.7	0.2	97.7	2.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-49.1	-38.5		-35.7	-214			42
111443	GEOCHOM	890517	3930	26.1	0.4	67.7	2.7	2.6	98.1	1.9	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-49.6	-38.0		-26.8	-205	-504		51
111441	GEOCHOM	890512	3985	27.7	0.1	70.2	0.5	0.3	95.6	3.9	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-49.6	-38.4		-35.3	-206			22
111445	ZIRKULATI	890613	4000	22.8	5.3	64.4	1.7	5.3	98.2	1.7	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-49.1	-38.6		-26.1	-210	-549		
111031	DST 4	881107	3447	14.0	0.4	76.9	8.4	0.0	98.0	1.7	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-47.2	-41.2	-39.4	-28.9	-223			51
111384	DST 4	881213	3447	6.5	<0.01	76.1	14.1	3.2	98.0	1.7	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-46.9	-44.2	-41.0		-227	-656		51

Tabelle 1: Meßergebnisse der untersuchten Proben.

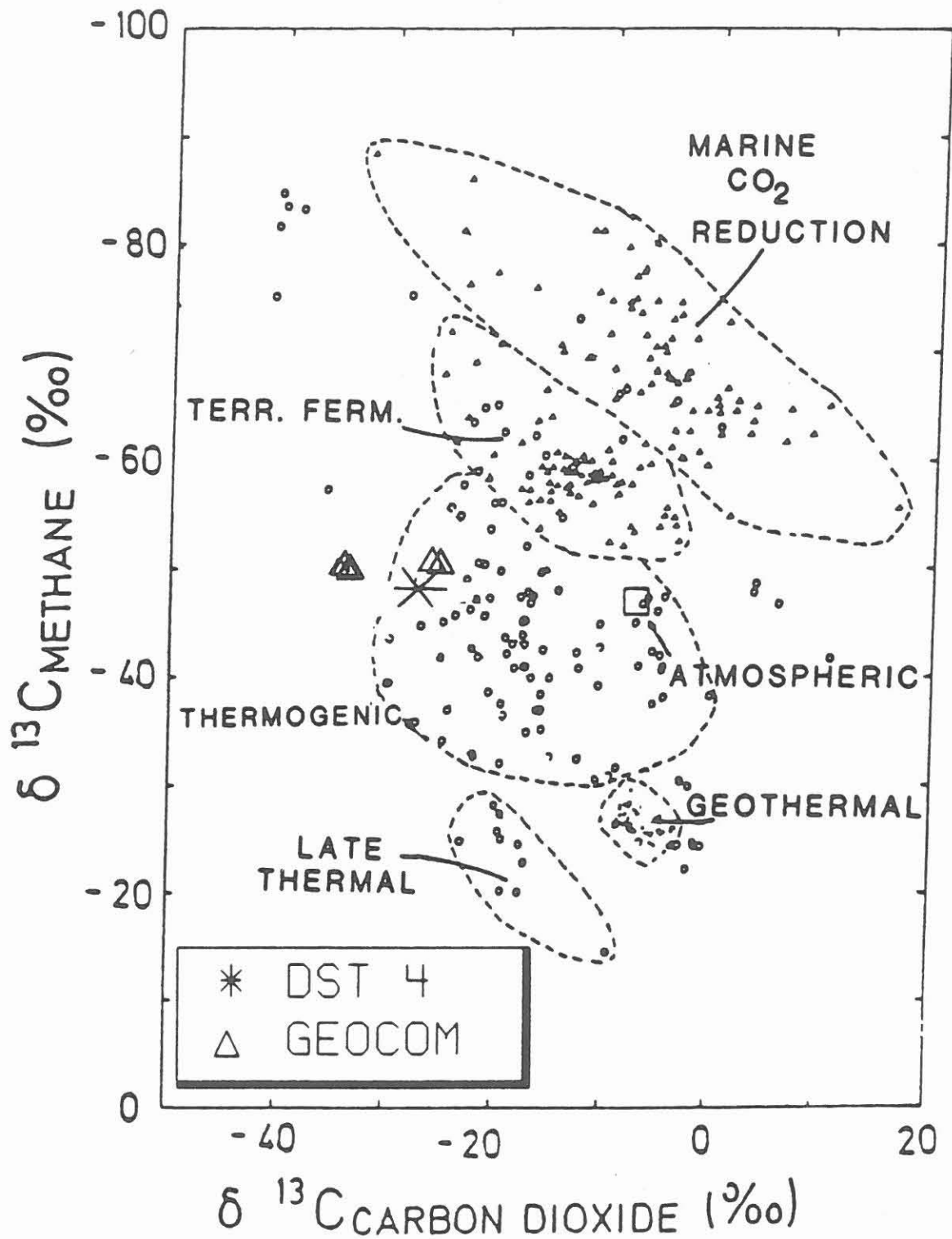


Abb. 1: Kohlenstoff-Isotopenwerte von Methan und Kohlendioxid (nach Whiticar, 1989).

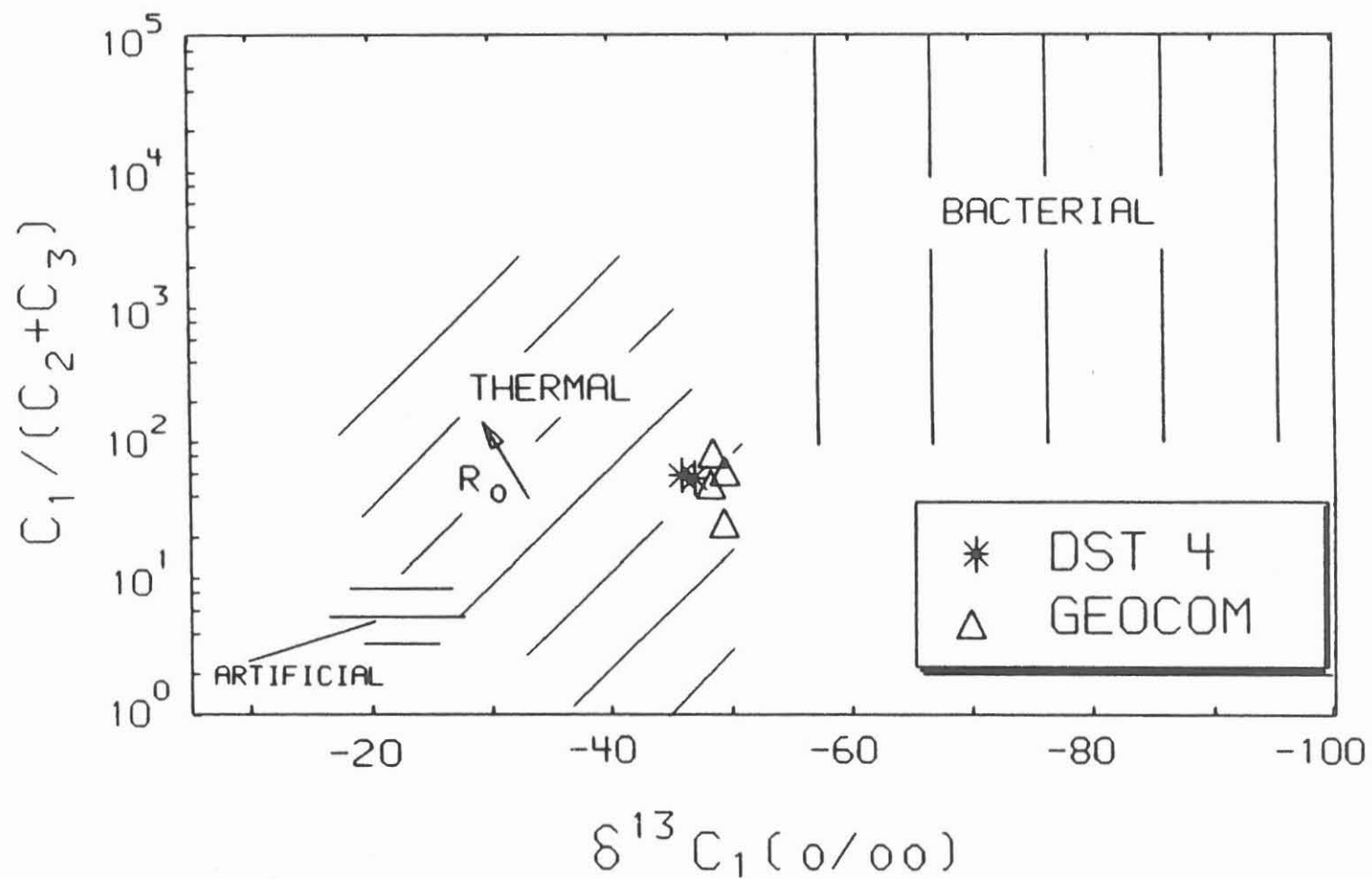


Abb. 2: Genetische Klassifizierung der untersuchten Kohlenwasserstoffe durch die Kohlenstoff-Isotopenwerte des Methans und die Gaszusammensetzung $C_1 / (C_2 + C_3)$.

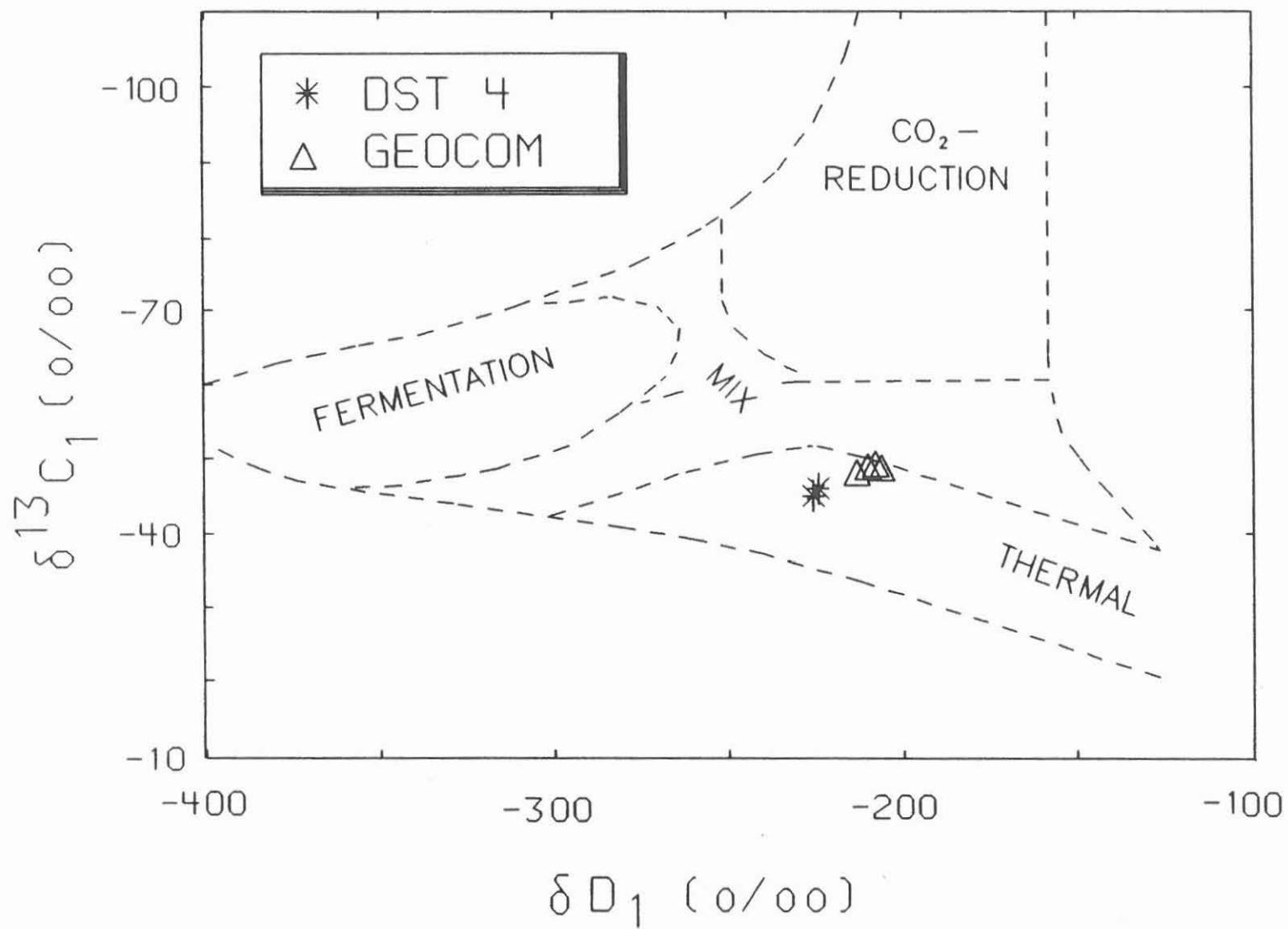


Abb. 3: Vergleich der Kohlenstoff- und Wasserstoff- Isotopen-
 werte des Methans der untersuchten Proben.

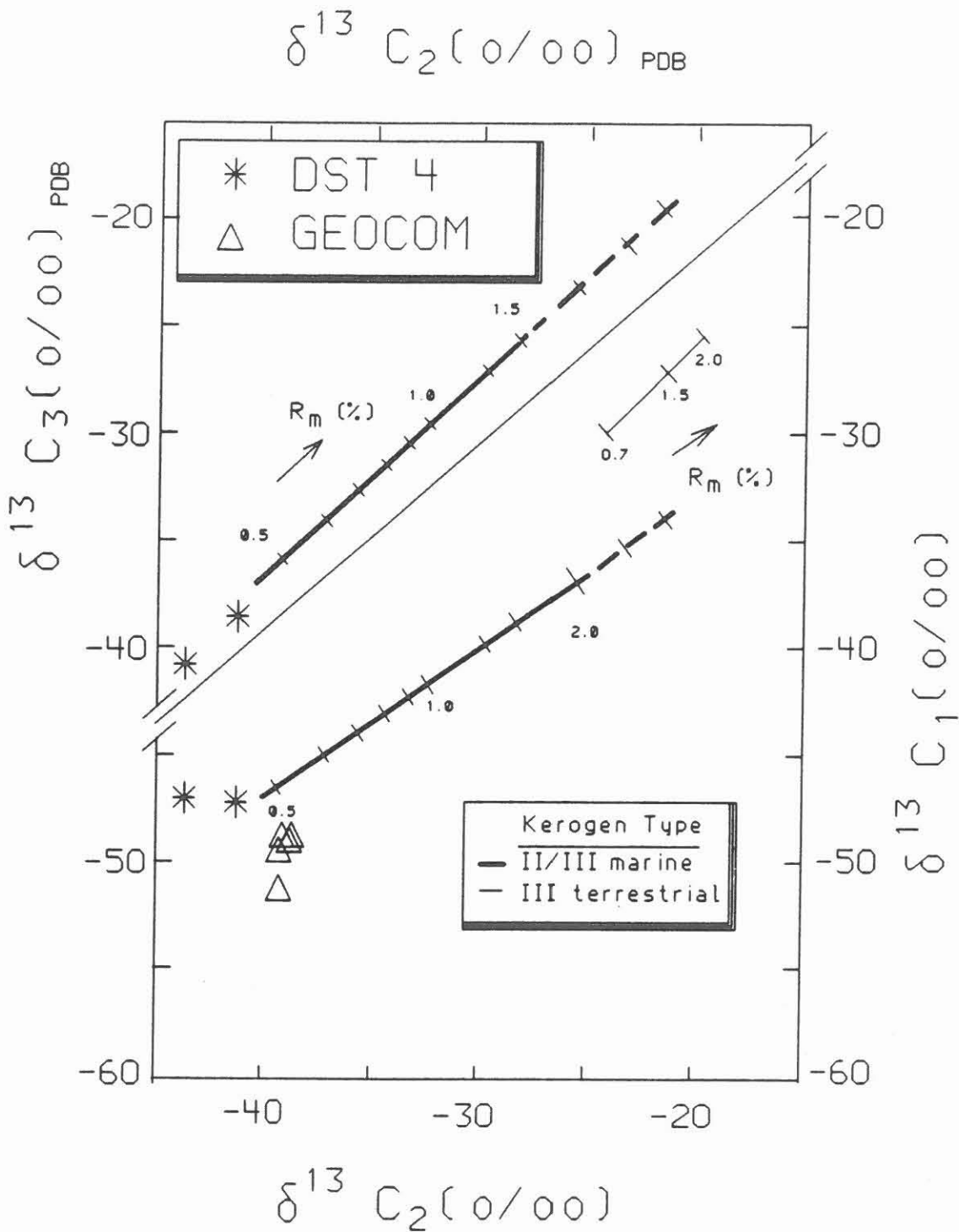


Abb. 4: Methan- und Propan- im Vergleich zu den Ethan-Kohlenstoff Isotopenwerten und den zugehörigen Korrelationslinien thermischer Gase (nach Faber, 1987).

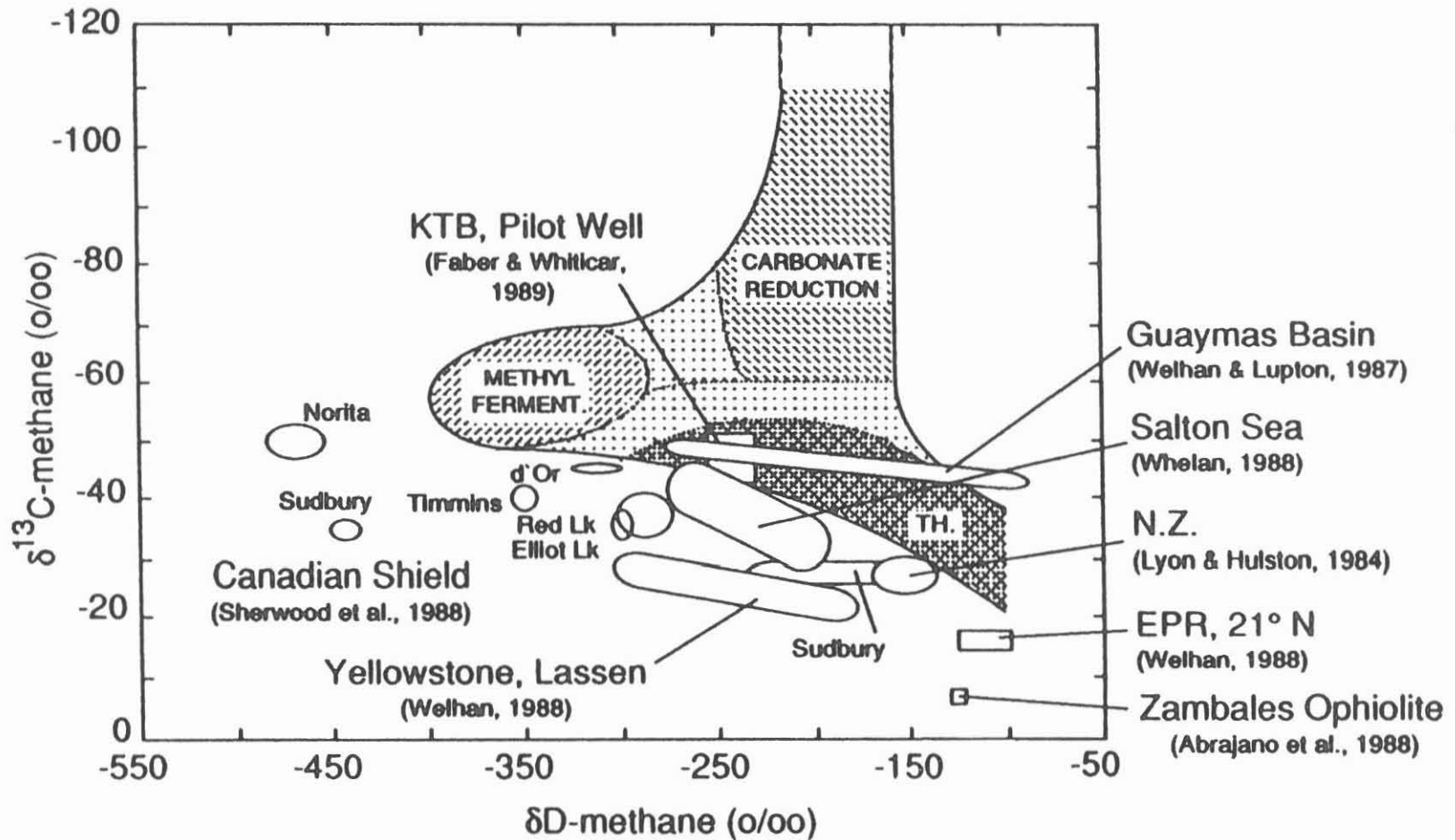
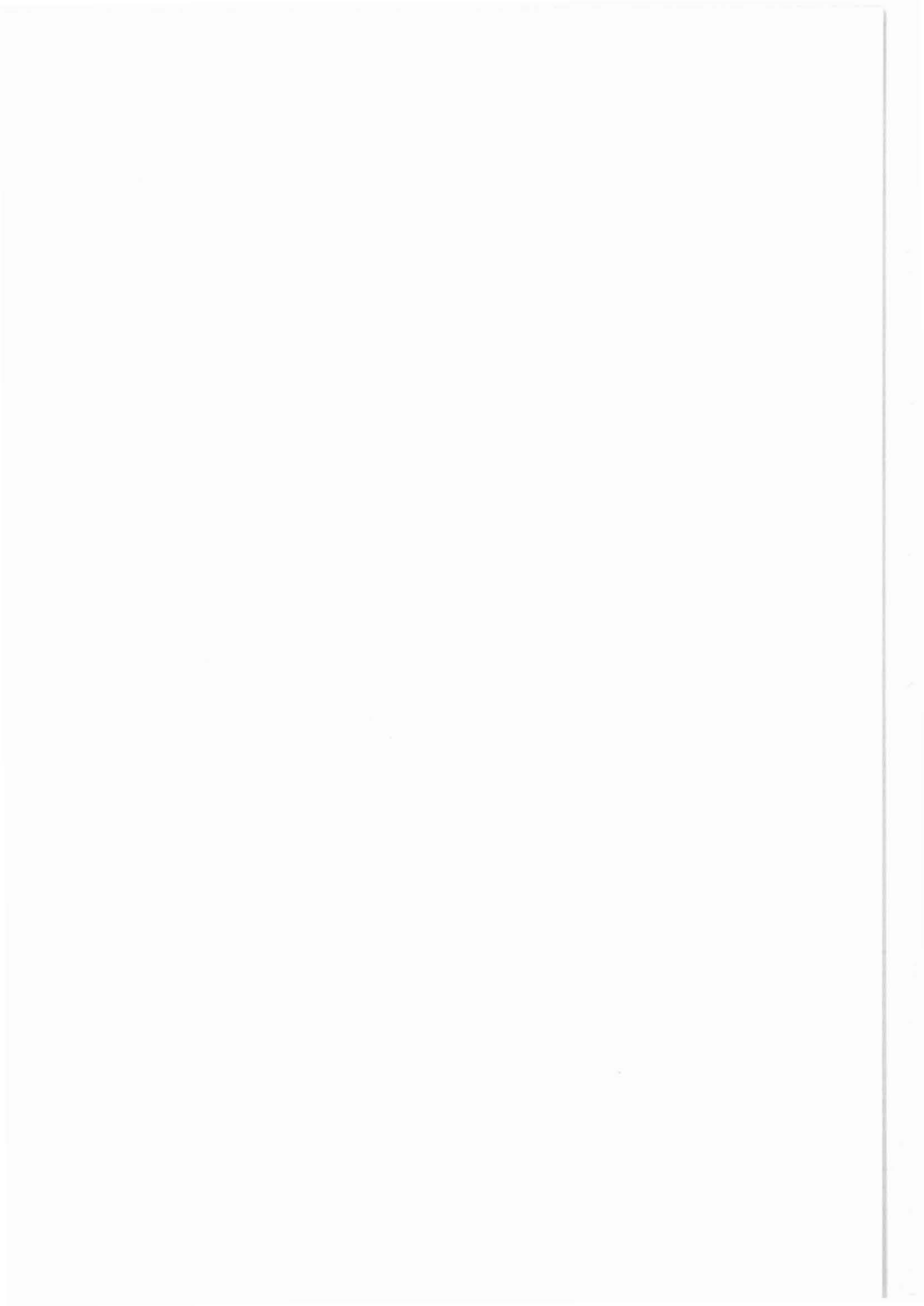


Abb. 5: Charakterisierung genetisch verschiedener Gase anhand der Methan Kohlenstoff- und Wasserstoff-Isotopenwerte. Der Bereich der KTB-Proben umfaßt die DST-4 Proben (nach Whiticar, 1989).



* Fa. Hydroisotop
Birkenstr. 7a
8053 Attenkirchen

** Radioanalytisches Labor Dr. Buheitel
Eichenstr. 4
8077 Reichertshofen 2

Radium-Isotopenuntersuchungen in Wässern
aus 3000-4000 m Teufe der
KTB-Vorbohrung

L. Eichinger *
M. Forster *
S. Hurst *
F. Buheitel **



*Radium-Isotopenuntersuchungen in Wässern
aus 3000 - 4000 m Teufe der
KTB-Vorbohrung*

L. Eichinger*, M. Forster*, S. Hurst*, F. Buheitel**

Zusammenfassung

An mit Fluidsamplern entnommenen Wasserproben aus den Teufen 3447, 3817, 3930 und 3985 m der KTB-VB wurden die Aktivitätsgehalte der Radium-Isotope ^{226}Ra und ^{228}Ra bestimmt. Die Aufbereitung der Proben wurde durch deren hohen Gehalt an Bohrspülung erschwert. Die Analysen ergaben für die Proben aus 3447 und 3817 m Teufe im Vergleich zum Umfeld etwas erhöhte Ra-Aktivitäten; im Bereich der Endteufe waren sie sehr stark erhöht. Von den beim Pumpversuch Ende März genommenen Wasserproben werden erste Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

Abstract

Water samples from 3447, 3817, 3930 and 3985 m depth of the KTB-VB were analyzed for their ^{226}Ra and ^{228}Ra activity. The preparation of the samples was complicated due to their high content of drilling mud. In general, the results of the Ra isotope analyzes showed a higher Ra activity than the samples from wells in the KTB-surroundings. Especially the samples from 3930 and 3985 m depth got extreme Ra activities. First results of analyzes of water samples taken at the pumping test end of March 1990 are presented and discussed.

Anschrift der Autoren:

*Fa. Hydroisotop, Birkenstr. 7a, 8053 Attenkirchen

**Radioanalytisches Labor Dr. Buheitel, Eichenstr. 4,
Argelsberg, 8077 Reichertshofen 2

Zielsetzung und Grundlagen

Ziel der Untersuchungen ist es, mit Hilfe der Isotope ^{222}Rn , ^{224}Ra , ^{226}Ra und ^{228}Ra Einblick in das Fließverhalten, sowie Lösungs- und Fällungsprozesse in den tieferen Aquiferen im Bereich der KTB-VB zu gewinnen.

Alle in der Natur vorkommenden Radiumisotope entstehen durch den Zerfall von Thoriumisotopen und gehören der Uran- und Thoriumzerfallsreihe an. Wegen seiner schlechten Löslichkeit ist Thorium im Wasser erfahrungsgemäß in sehr viel geringeren Konzentrationen als das Radium vorhanden (VANCE & GASCOYNE, 1987). Das bedeutet, daß das im Wasser angetroffene Radium zum weitaus größten Teil vom Gestein ins Wasser abgegeben wird. Dies geschieht auf zwei Arten: durch Rückstoß beim Thoriumzerfall, und/oder durch Anlösen des Gesteins im Zuge der chemischen Verwitterung.

Bei gleichbleibenden hydraulischen und hydrochemischen Verhältnissen stellt sich im Wasser eine Gleichgewichtskonzentration ein, die durch die Produktion aus der Gesteinsoberfläche einerseits, und den Zerfall und Abtransport andererseits bestimmt ist.

Für die verschiedenen Radiumisotope sind deshalb schon allein wegen ihrer unterschiedlichen Halbwertszeiten unterschiedliche Konzentrationen im Wasser zu erwarten. Außerdem ist dafür die Primärkonzentration von Uran und Thorium und ihre Verfügbarkeit im Gestein von Bedeutung. Die detaillierte Abfolge von Lösung und Fällung ist in der Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Präparation und Meßverfahren

Die Aufbereitung und die Interpretation der Ergebnisse der Proben aus 3000 bis 4000 m Teufe wurde durch die darin enthaltenen Schwebstoffe und Feinkornfraktionen aus Bohrspülung und Bohrmehl erheblich erschwert.

Trotz schonender Aufbereitung ist nicht auszuschließen, daß Radium im Wasser von der Spülung bzw. dem Bohrklein gebunden wurde (LANGMUIR & MELCHER, 1985; BENES et al., 1986) und Radium aus dem Gesteinsmehl ins Wasser übergang.

Es zeigte sich, daß auch bei wiederholter Verdünnung der Proben mit Wasser, Behandlung mit Ultraschall und Zentrifugieren, knapp die Hälfte des Radium im puddingartigen Rückstand verblieb.

Deshalb wurde die nach dem Zentrifugieren verbleibende überstehende Lösung nur zur Bestimmung der Ra-Isotopenverhältnisse benutzt. Die Absolutkonzentrationen der einzelnen Isotope wurde durch gammaspektrometrische Messung des ^{228}Ra an der unbehandelten Probe bestimmt.

Ergebnisse

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Radium-Isotopengehaltsbestimmungen dargestellt.

Es fällt auf, daß die Werte aus 3447 und 3817 m Teufe mit etwa 1 Bq/l im Vergleich zu den Werten aus 3930 und 3985 m sehr niedrig sind. Sie liegen aber, verglichen mit Proben aus dem Umfeld, immer noch hoch. Diese überstiegen nur in einem Fall 1 Bq/l, im Durchschnitt lagen sie aber weit unter 1 Bq/l.

Die extrem hohen ^{228}Ra -Gehalte bzw. $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ -Aktivitätsverhältnisse der Wasserproben aus 3930 und 3985 m Teufe stellen gemessen am KTB-Umfeld eine Besonderheit dar.

Sie liegen bei 17 Bq/l bzw. 6 - 7 Bq/Bq.

Kurz vor der Endteufe bei 4000 m zeigt das Thorium-Log einen extrem hohen Peak. Andere Anzeichen (siehe entsprechende Beiträge) sprechen ebenfalls für eine Kluft in diesem Bereich, deren Ausdehnung die aller darüber liegenden Klüfte übertrifft. Vermutlich handelt es sich bei den von uns analysierten Proben aus 3930 m und 3985 m Teufe um Mischproben von Grundwasser aus Klüften zwischen ca. 3930 und 4000 m.

Hochmineralisierte Wässer vom Na-Ca-Cl-Typ, wie sie hier vorliegen, begünstigen außerdem eine Ra-Lösung und tragen damit zur Entstehung der hohen Radium-Aktivitäten bei (DICKSON, 1985).

Die Radiumgehalte der Grundwässer aus der KTB-VB spiegeln also die Thorium- und Urangehalte im Gestein wieder. Es ist anzunehmen, daß der größte Teil des im Gamma-Log erkannten Thorium auf Kluftoberflächen abgeschieden ist, was die hohen Radium-Aktivitäten erklären könnte.

Tabelle 1: Radiumergebnisse der Geocom-Probenahmen von 11/88 und 5/89

Teufe (m)	^{226}Ra (Bq/l)	^{228}Ra (Bq/l)	$^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ (Bq/Bq)
3447	1.09±0.1	1.02±0.01	1.05
3817		<1.0	
3930	2.54±0.2	17.6±0.9	6.93
	2.64±0.2	17.4±1.1	6.59
3985	2.74±0.2	16.7±1.0	6.09

Erste Ergebnisse vom Pumptest Anfang April 1990

Die Ra-Aktivitätsmessungen an während des Absenkttests entnommenen Wasserproben ergaben keine großen Veränderungen in den Isotopenverhältnissen.

Tabelle 2: Vorläufige Ergebnisse der Messungen der Ra-Aktivitäten der Proben aus dem Bereich 3850-4000 m, die
a) während des Pumptests am 10. und 11.04.90
b) mit dem Geocom-Tiefensamplern am 12.04.90 entnommen wurden. Die nicht aufgeführten Ra-Messungen stehen noch aus.

	^{228}Ra (Bq/l)	^{226}Ra (Bq/l)	^{224}Ra (Bq/l)	^{222}Rn (Bq/l)
a)				
10.04.90, 10.35h:	12			
10.04.90, 11.00h:	11			
11.04.90, 17.00h:	9			
b)				
12.04.90, 1.Probe		2.2	5.8	4.4 ± 3.0
12.04.90, 2.Probe		2.2	5.5	5.7 ± 3.6

Bei der Betrachtung der Ra-Werte von Tabelle 2 fällt auf, daß diese im Verhältnis zu den ersten Messungen (Tab. 1) aus diesem Teufenbereich deutlich niedriger sind. Eine mögliche Erklärung dafür wäre, daß durch den Pumptest Ra-ärmere Grundwässer aus höhergelegenen Bereichen in den untersten Teil des Bohrlochs gelangten und sich mit dem Ra-reicheren Grundwasser vermischten. Dafür sprechen auch die in Tab. 1 aufgeführten niedrigeren Ra-Werte aus 3447 und 3817 m Teufe.

Bei den Radonmessungen handelt es sich um die einzigen Messungen aus der KTB-VB, bei denen der ^{222}Rn -Gehalt direkt auf eine bestimmte Fluidmenge bezogen werden kann. Sie erlauben somit den direkten Bezug zu der im Fluid festgestellten Ra-Aktivität und der für die ^{39}Ar -Messung durchgeführten Entgasung.

Der relativ große Fehler ist durch die sehr kleine Probenmenge bedingt.

Im KTB-Umfeld sind die $^{222}\text{Rn}/^{226}\text{Ra}$ -Verhältnisse immer bedeutend höher. Der im Vergleich zum ^{226}Ra geringe ^{222}Rn -Gehalt kann folgende Ursachen haben:

- Es trat bei der Probenahme eine Entgasung auf.
- Repräsentieren die gemessenen Werte das auch im Aquifer vorhandene ^{222}Rn , so geht der Hauptteil des an der Gesteinsoberfläche produzierten ^{226}Ra in Lösung. Dies ist durchaus wahrscheinlich, da es sich hier um eine Na-Ca-Cl-Sole handelt durch die Ra gut gelöst wird.

LITERATUR:

VANCE, E. R. & GASCOYNE, M.: Isotopic disequilibrium effects in leaching of natural uraninite and thorianite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 51, S. 2593-2594, 1987.

LANGMUIR, D. & MELCHIOR, D.: The Geochemistry of Ca, Sr, Ba and Ra sulfates in some deep brines from the Palo Duro Basin, Texas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 49, S. 2423-2432, 1985.

BENES, P., BOROVEC, Z. & STREJC, P.: Interaction of Ra with freshwater sediments and their mineral components: III. muscovite and feldspar. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles*, Vol. 98, No. 1, S. 91-103, 1986.

DICKSON, B. L.: Radium-Isotopes in saline seepages, southwestern Yilgarn Block, Western Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 49, S. 361-368, 1985.

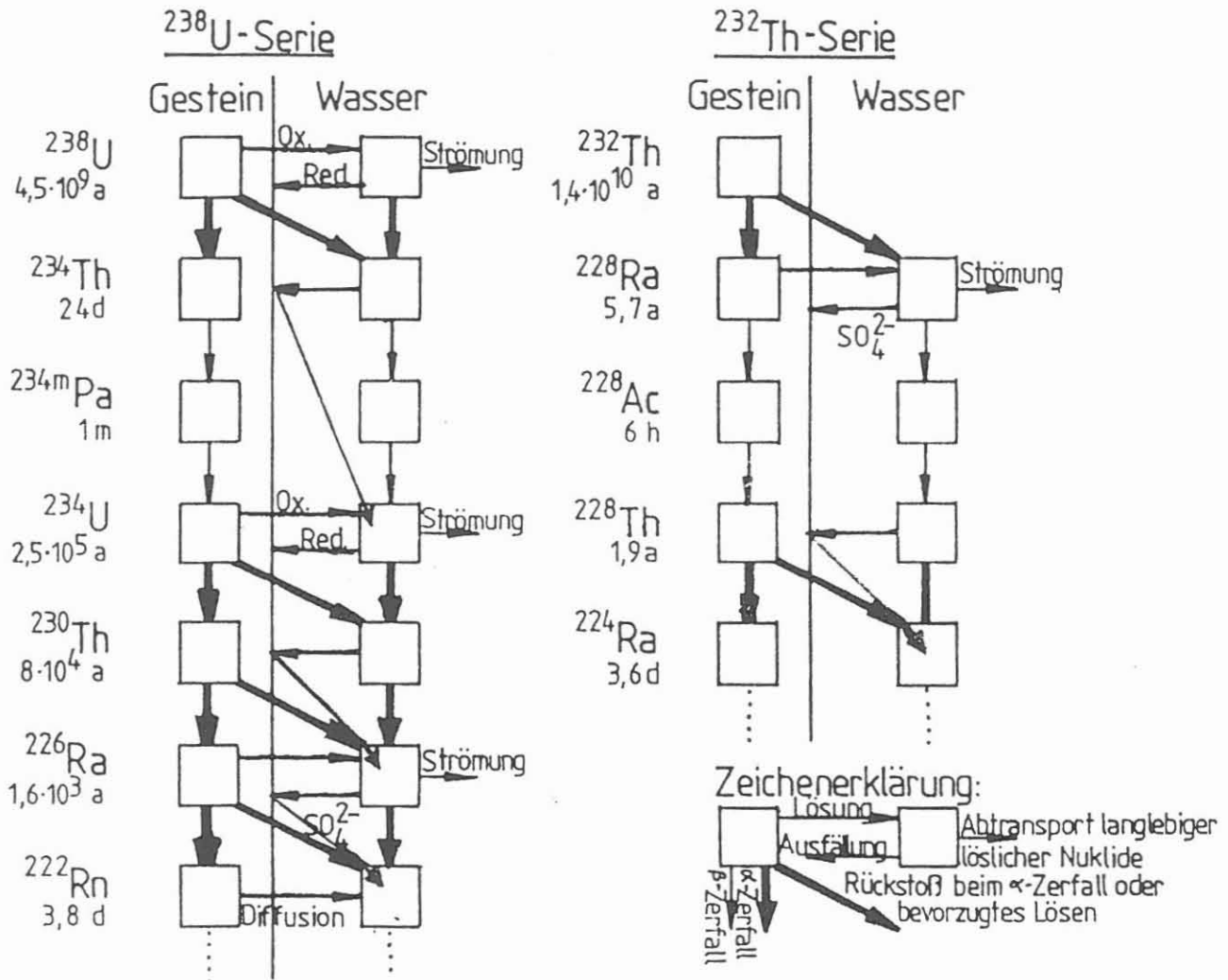


Abb.1: U-Th-Zerfallsreihe. Wechselwirkung Gestein - Wasser

