

## Das Geohydraulische Testprogramm im KTB

G. Pusch (Clausthal)

### Einleitung

Das geohydraulische Testprogramm im Kontinentalen Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland nimmt allein wegen seines auffallend großen Kostenvolumens von über 1 Mio. DM eine besondere Stellung ein.

Verglichen mit den vielen Einzelprojekten des geowissenschaftlichen Programmes mit einem verhältnismäßig geringen Budget scheint dieses Programm eine Art technischer Wasserkopf der ARGE "Fluide" darzustellen. Mit diesem Übersichtsbeitrag möchte ich die Notwendigkeit des geohydraulischen Meßprogrammes im KTB erklären.

Wie die Abb. 1 zeigt, werden insgesamt mindestens 21 Teilprojekte Zugriff auf die Daten und Fluidproben, die aus den geohydraulischen Messungen gewonnen werden, nehmen. Neben den Fluidproben und Materialdaten werden insbesondere geowissenschaftliche Erkenntnisse über die Existenz und Beschaffenheit von Fluidmigrationswegen und über das hydraulische Potential, das diesen Fluidtransport bewirkt, erwartet. Außerdem soll dieses Meßprogramm einen Standard zur Eichung der Labormessungen für In Situ-Bedingungen darstellen. Von den Materialdaten ist es keineswegs nur die Permeabilität, welche aus den Druckaufzeichnungen abgeleitet werden kann, sondern auch die Speicherkapazität für Matrix und Klüfte sowie der Porenraumdruck.

Der zeitliche Ablauf des Programms ist in eine Phase 1 während des Abteufens der Bohrung und in eine Phase 2 nach Beendigung der Bohrung unterteilt (Abb. 2.1 und 2.2).

Pumpversuche, Drill Stem Tests und Repeat Formation Tests werden je nach Ausbildung der Formation in klüftigen Zonen zur Fluidgewinnung eingesetzt. Die Anwendung der Thermo-Flowmetermessung stellt eine Möglichkeit zur Auffindung von permeablen Zonen und damit eine Orientierungshilfe für Einzelmessungen dar. Da die Messungen während der Bohrphase nur von kurzer Dauer sein können, steht an oberster Stelle das Ziel der Fluidgewinnung, erst an zweiter Stelle die Möglichkeit zur Gewinnung von Materialkennwerten.

Nach Beendigung der Bohrphase wird in einer 8 - 10 Wochen dauernden Meßphase ein Meßprogramm mit 3 Hauptzielrichtungen abgewickelt (Abb 2.2):

1. Die Erfassung von Matrixkennwerten, wie sie für die Kalibrierung der Kernuntersuchungen am Triaxialpermeameter erforderlich sind, für die unterschiedlichen Gesteinstypen.
2. Die Kurzzeitgestängetests in Klüftzonen zur Erfassung der Anteile von Kluft- und Matrixpermeabilität sowie -porosität und des Druckeinflusses auf die Permeabilität der Klüfte.
3. Die Erfassung der Kluftgeometrie von großflächigen Kluftsystemen und Einzelklüften in sogenannten Langzeitgestängetests. Als Orientierungshilfe kann wiederum eine Thermoflowmetermessung der Gesamtbohrung vorangestellt werden.

WAS LIEFERT DAS GEOHYDRAULISCHE TESTPROGRAMM ?	
<p><u>MATERIALDATEN</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Permeabilität</li> <li>- Speicherkapazität</li> <li>- Porenraumdruck</li> </ul>	<p><u>GEOWISSENSCHAFTL. ERKENNTNISSE</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Klufftranzmissivitäten</li> <li>- Ausdehnung der Klufsysteme</li> <li>- Kontaminationsgrad der Bohrungsumgebung</li> <li>- Eichung von Labormessungen</li> </ul>
	<p><u>FLUIDPROBEN</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Porenflüssigkeiten</li> <li>- Gelöste Stoffe</li> </ul>
<p>WER BENÖTIGT DIE ERGEBNISSE DES GEOHYDRAULISCHEN TESTPROGRAMMES ?</p>	
<p>ARGE FLUIDE</p> <p>10 Teilprojekte</p>	<p>ARGE GESTEINSPHYSIK</p> <p>9 Teilprojekte</p>
	<p>ARGE MODELLSTUDIEN</p> <p>mind. 2 Teilprojekte</p>
<p>G P</p>	<p>ITE 88</p>

Phase 1: Bohrphase				
MESSUNG	ANZAHL	ZIEL	MESSDAUER/ -ABSCHNITT	
Pumpversuch	1	Fluidgewinnung	6d	400 m
A Drill Stem Test DST	10	Repräsentative Fluidgewinnung, Spülungsinfil- tration, Vorinformation zu Materialdaten	je 24h	5-25 m
B Repeat Formation Test, RFT	5	Repräsentative Fluidgewinnung, Vorinformation zu Materialdaten	je 1h	0,5 m
C Thermoflow- metermessung  (Repräsentativer Intervalleinpreß- test)	3-5	Aufsuchen von permeablen Zonen, Orientierungs- hilfe für Einzel- messungen	4d	50-500 m
Fluidprobenahme		Fluidgewinnung	nach Bedarf	
G P	GEOHYDRAULISCHES TESTPROGRAMM Übersicht der KTB-Vorbohrung			ITE 88

Phase 2: Nach Beendigung der Bohrung

MESSUNG	ANZAHL	ZIEL	MESSDAUER/ -ABSCHNITT
C Thermoflow- metermessung  (Repräsentativer Gesamtbohrungs- einpreßtest)	1	Aufsuchen von permeablen Zonen, Klassifizierung nach der Fluid- aufnahmefähig- keit	10d 3000-4500 m
D Kurzzeit-Gestänge- tests in Kluftzonen  (Injektionsdruck- einfluß)	15  5	Klufttransmissi- bilität, Kluft- speicherkapazi- täten  Druckeinfluß auf Permeabilität, Porenraumdruck	Je 8h > 3 m  Je 24h > 3 m
E Langzeit-Gestänge- test in Kluftzonen (Einpreßtest/Zufluß- test)	3-5	Transmissivi- tät und Speicher- eigenschaften von Kluftsystemen (Kluft + Matrix), Ausdehnung von Kluftsystemen	Je 5d 30-100m
F Matrixtest (Einpreßtest)	10	Matrixpermeabili- tät und Speicher- fähigkeit, Skineinfluß, Poren- Porenraumdruck	Je 24 h >1 m - 72 h
Fluidprobenahme		Hinweise auf Fluid- bewegung	nach Bedarf
G P	GEOHYDRAULISCHES TESTPROGRAMM Übersicht der KTB-Vorbohrung		ITE 88

Auch sind gezielte Fluidprobenahmen möglich

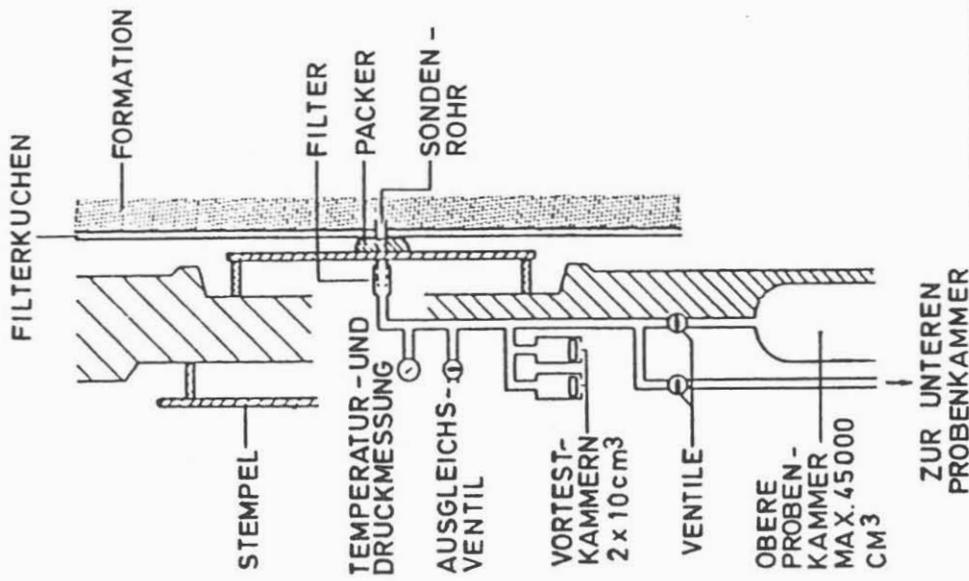
Die erforderliche Testausrüstung ist in der Abbildung 3 dargestellt. Die Gestängetestsonde besteht aus einer Doppelpacker- oder Mehrfachpackerausrüstung, um sowohl den Meßraum zwischen den eigentlichen Meßpackern als auch den Sicherheitsraum oberhalb und unterhalb der Packer im Druckverhalten beobachten zu können. Da die Packer hydraulisch gesetzt werden, d.h. aufpumpbar sind, lassen sie sich auch in nicht glattwandigen Bohrlöchern setzen. Zufluß und Einschließen der Bohrung werden über ein spezielles Schließventil geregelt. Die Aufzeichnung des Druckes erfolgt über Tage, so daß eine unmittelbare Qualitätskontrolle der Messung möglich ist. Für geringe Zuflußmengen hat sich der Repeat Formation Tester in Sedimentbohrungen bewährt. Mit einem ausfahrbaren Stempel wird ein Miniaturpacker an die Formationswand gepreßt und ein Sondenrohr durch den Filterkuchen hindurch an die Formation angepreßt. Damit ist eine direkte Probennahme über eine sehr kleine Querschnittsfläche im Milliliter-Bereich bzw. im Bereich bis zu 45 l möglich. Thermoflowmeter und kombinierte Meßgeräte erlauben die Erfassung von Temperaturgradienten, Druckgradienten und Strömungsgeschwindigkeiten von Fluiden im Bohrloch, wie es die rechte Seite der Abb. 3 zeigt.

#### Systematik der Testmethoden

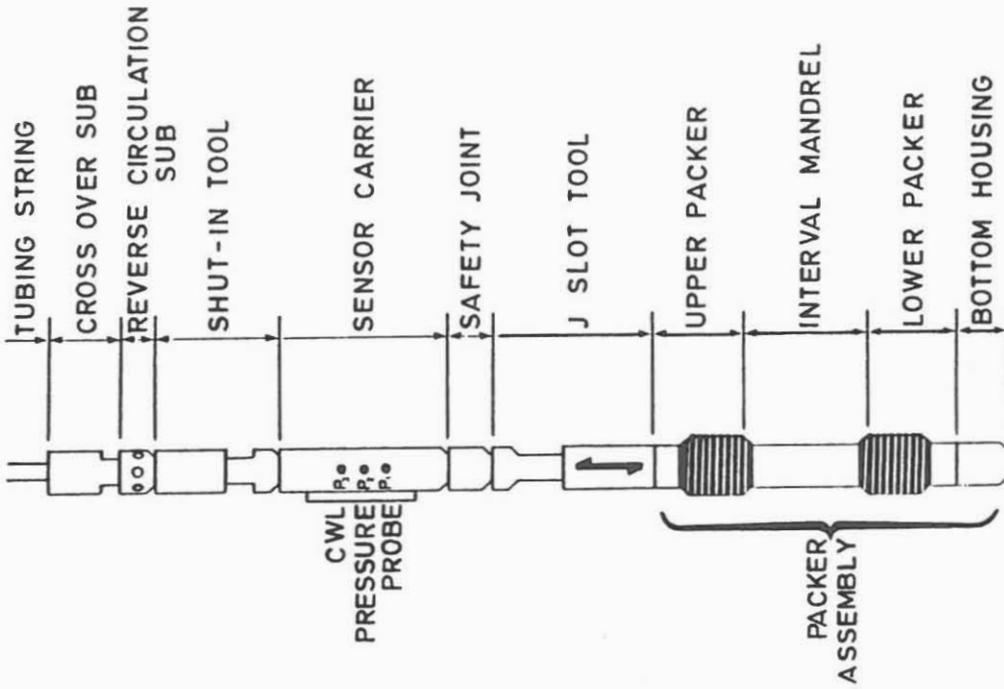
Die Testmethoden können nach 3 Merkmalen unterteilt werden (Abb. 4).

1. Wenn Druck- und Strömungsgeschwindigkeit an jedem beliebigen Ort zeitlich konstant sind, so gilt das Prinzip des stationären Flusses, der nach der Darcy-Gleichung ausgewertet werden kann.
2. Wenn die zeitliche Änderung des Druckes an jedem beliebigen Ort des Strömungsfeldes konstant ist, heißt diese Strömungsform pseudostationär und kann mit Lösungsverfahren, die dieser Randbedingung Rechnung tragen ausgewertet werden. Ein bekannter Test, der zu dieser Verfahrensgruppe gehört, ist der sogenannte Reservoir-Limit-Test, mit dem die Ausdehnung eines porösen permeablen Speichers bestimmt werden kann. Der Zeitaufwand für diese Messungen ist entsprechend groß.
3. Wenn sich der Druck mit der Zeit am Ort beliebig verändert, spricht man von instationären Fließvorgängen, die sich sehr kurzfristig nach Öffnen des Einströmventils oder bei Unterbrechung des Strömungsvorganges einstellen. Je nach den Randbedingungen beim Auslösen des Drucksignals wird von Konstant-Raten, Konstant-Druck und Mehrfachratentests gesprochen. Bei den Konstant-Ratentests werden die DST-Slugtests, Pumptestes und bei Mehrbohrlochtestverfahren die Interferenzttests unterschieden. Bei den Konstant-Druckmessungen ist der Puls-Test (Druckstoßtest) zu erwähnen. Mehrfachraten-Tests stellen eine beliebte Form zur Untersuchung von Gas- oder Ölspeichern in Hinsicht auf ihre Förderkapazität dar. Daneben sind noch Sonderformen von Bohrlochtests, wie Flowmetermessungen, Thermoflowmetermessungen und Gradiomanometermessungen bekannt.

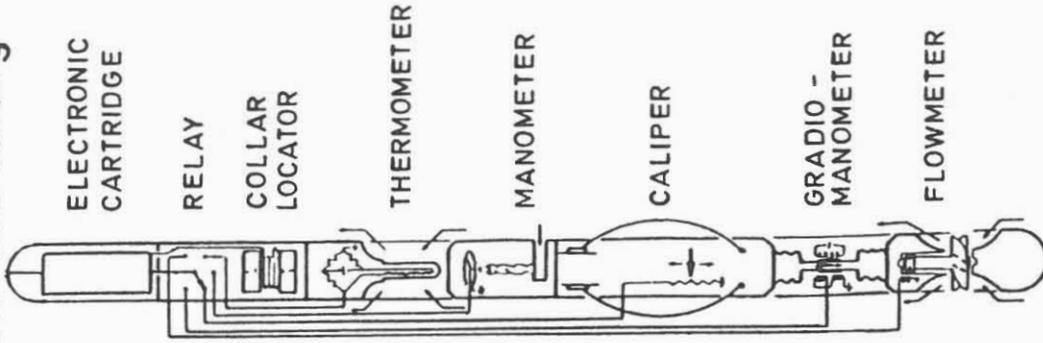
RFT - Ausrüstung



HTT - Ausrüstung



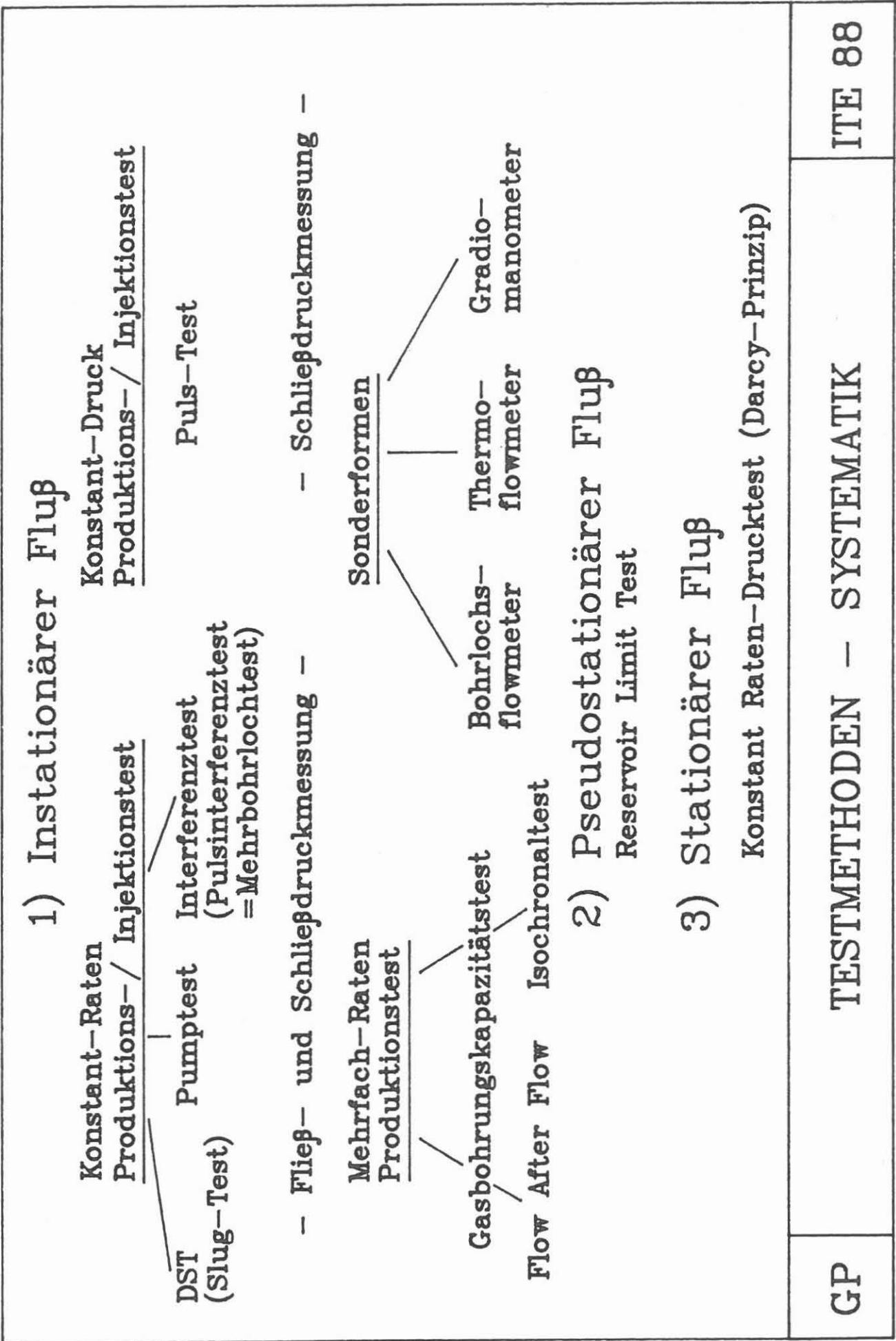
TF - GM Ausrüstung



GP

TESTAUSRÜSTUNG

ITE 88



## Auswerteverfahren

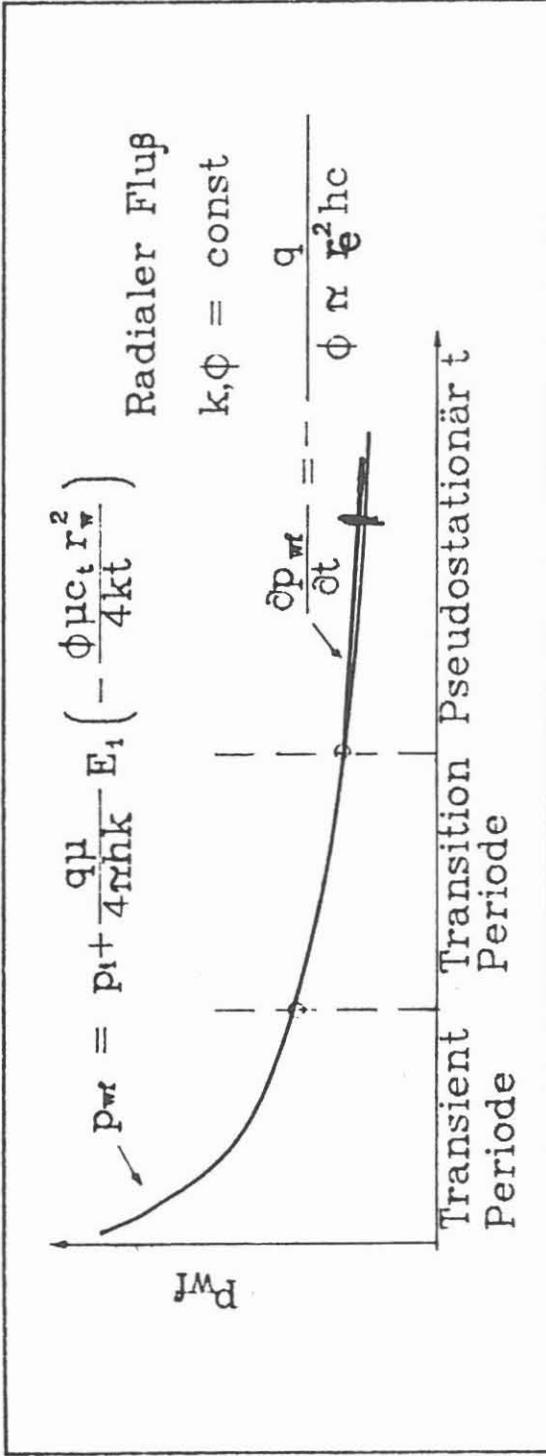
Bei den Auswerteverfahren wird zwischen homogener und heterogener Formation unterschieden. Für homogene Formationen - d.h. für geologische Einheiten, in denen die Porenraumeigenschaften isotrop verteilt sind, kann der zeitliche Druckverlauf, wie es die Abb. 5 zeigt, je nach Zeitdauer der Messung unterschiedlich ausgewertet werden. In der ersten Phase der "transienten Periode", in der sich die Strömung in der Umgebung einer Bohrung wie in einem unendlich großen Strömungsfeld verhält, gibt es zahlreiche analytische, halbanalytische und Type-Curve-Auswerteverfahren. Mit größerer Zeitdauer der Messung wächst der Informationsgehalt der Auswertung.

Mit der Komplexität der Auswertemethoden steigt in der Regel auch der Grad an Information, der aus diesen Messungen abgeleitet werden kann. Bei den analytischen Verfahren ist es in der Regel nur ein Parameter, der unabhängig von den anderen bestimmt werden kann. Es ist das Produkt aus  $k \cdot h$ , die sogenannte Permeabilitätskapazität. Zusätzlich kann durch Extrapolation auf den Porenraumdruck geschlossen werden. Bei den Type-Curve Matchverfahren lassen sich zwei Parametergruppen unabhängig voneinander bestimmen, das ist die Permeabilitätskapazität  $kh$  und der Skinfaktor  $s$ .

Mit den interaktiven Auswerteprogrammen, welche Mehrfachbestimmungen ermöglichen, kann zusätzlich zu den beiden vorhin genannten Wertepaaren auch noch der initiale Formationsdruck bestimmt werden. Auch für heterogene Formationen, als deren Prototyp gefracte Formationen in Verbindung mit einer mikroporösen oder mikroklüftigen Matrix angesehen werden, stehen wiederum analytische und halbanalytische Type-Curveverfahren und schließlich und endlich Bohrlochsimulatoren zur Auswertung zur Verfügung. Entsprechend der Dualität der Porenraumbildung lassen sich hier Informationen über die Transmissibilität und Speicherkapazität getrennt nach Kluft- und Matrixanteilen ableiten. Außerdem können Informationen bei langdauernder Messung über Ausdehnung des Kluftsystems, Kluftweiten und über das dahinter anstehende unbeeinflusste Gebirge gewonnen werden (Abb.6). Den höchsten Stand der Auswerteverfahren stellen Lagerstättensimulatoren dar, mit welchen Mehrbohrlochprobleme, Mehrphasenflußprobleme unter Einbeziehung von Schwerkraft, Kapillardruck, Adsorption und turbulenter Strömungsform berechnet werden können.

In den nachfolgenden Abbildungen 7 und 8 sind einige Testbeispiele der vorhin angesprochenen Testmethoden ausgeführt. Der Drill-Stem-Test als Kurzzeittest wird hier durch 2 Fließ- und Schließperioden von Minuten bis einigen Stunden Zeitdauer ausgeführt. Aus der ersten Fließperiode wird der Formationsdruck und aus der zweiten Fließperiode und nachfolgenden Schließperioden die Permeabilitätskapazität bestimmt. Der Pumpversuch ist ein Zuflußtest, in dem permeable Zonen identifiziert und einfache Permeabilitätskennwerte bestimmt werden können. Das im 3. Teil des Bildes dargestellte Ergebnis eines Gasinterferenztests zeigt den Druckanstieg in einer Empfängerbohrung, ausgelöst durch Stickstoffinjektion in einer 70 m entfernten Sendebohrung in einem Steinkohleflöz. Die Dämpfung der Druckamplitude und die Zeitdauer bis zum Eintreffen des Druckpulses in der Empfängerbohrung können hinsichtlich der Permeabilitätskapazität und der Speicherkapazität ausgewertet werden.

# Homogene Formation



Interaktive  
Computer  
Auswerteprog.

## Analytische      Type Curve Matching

Horner }  $kh, s, c, p^*$   
 MDH }

Gringarten       $kh, s, C$   
 Cooper, Ramey       $kh, \phi c_t, s, C$   
 Kamal, Brigham       $kh, \phi c_t$

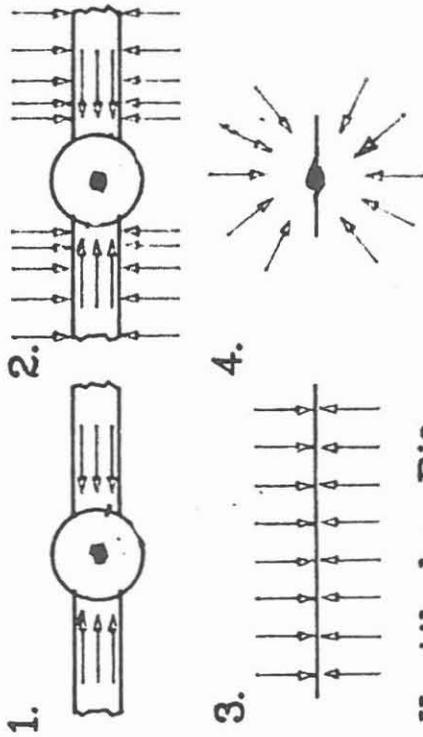
Interpret }  
 Well Test }  $kh, \phi c_t, C, s$   
 Trias }  $P_i$

GP

AUSWERTEVERFAHREN

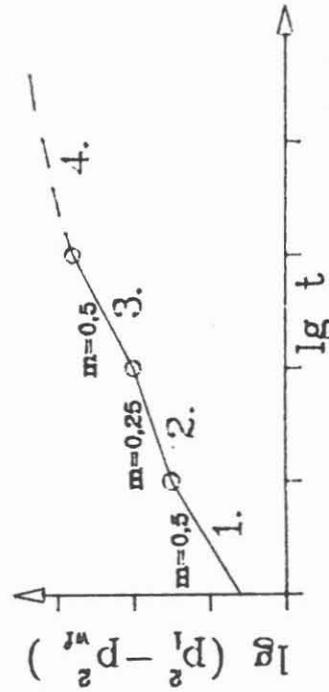
ITE 88

# Heterogene Formation



## Vertikaler Riß

1. Linearer Fluß im Riß
2. Bilinearer Fluß-Riß/Formation
3. Linearer Fluß in Formation
4. Pseudo-Radialer Fluß



## Analytische

Warren, Root

$T_{ma}$

$S_{ma}$

$T_f$

$S_f$

## Type Curve Matching

Gringarten, Bourdet  $(kh)_t, s, C$

oder Agarwal  $k_{ma}, k_f, w$

Cinco, Samaniego (Fall 2)  $x_f, k_f, w$

Lee, Holditch (Fall 3)  $x_f, k_f, w, k_{ma}$

## Numerische Simulation

Eclipse Programm

$T_{ma}$

$S_{ma}$

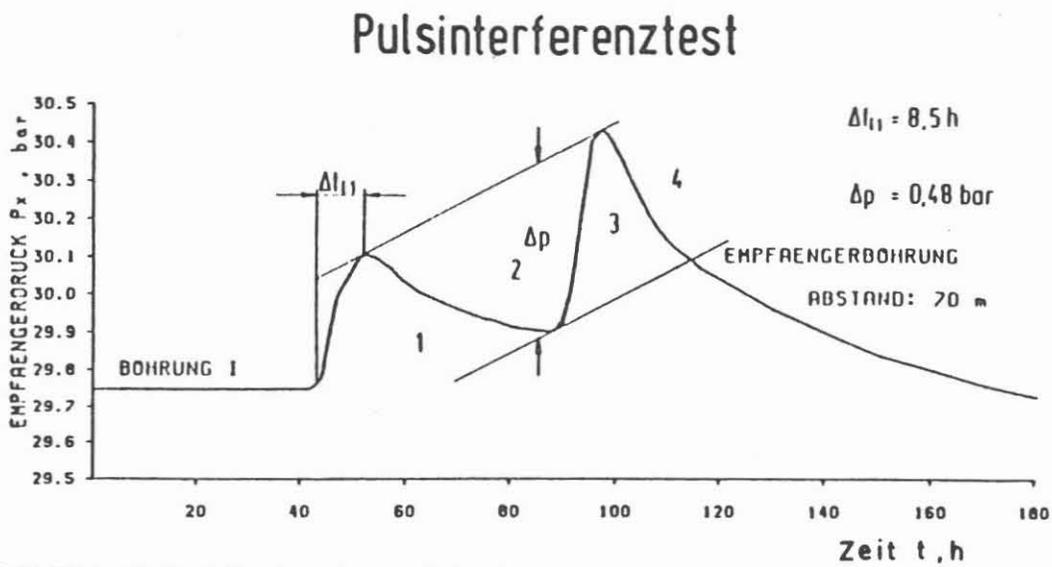
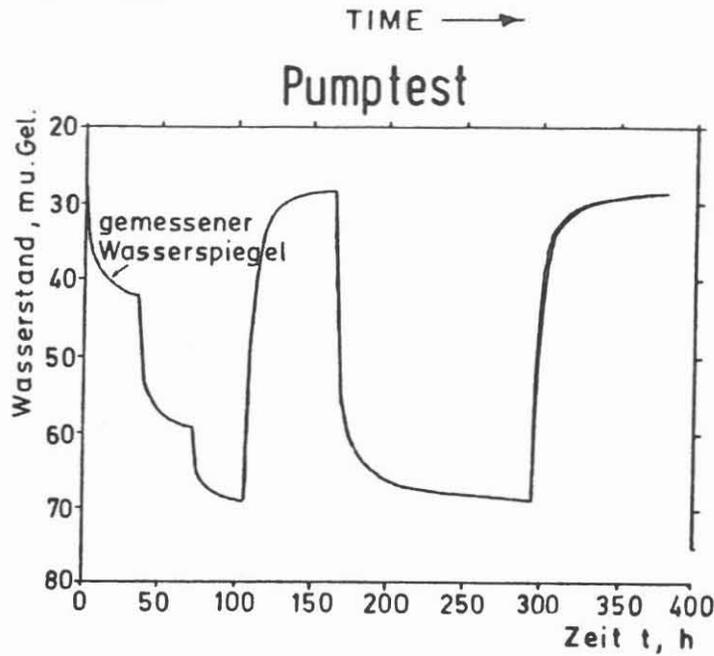
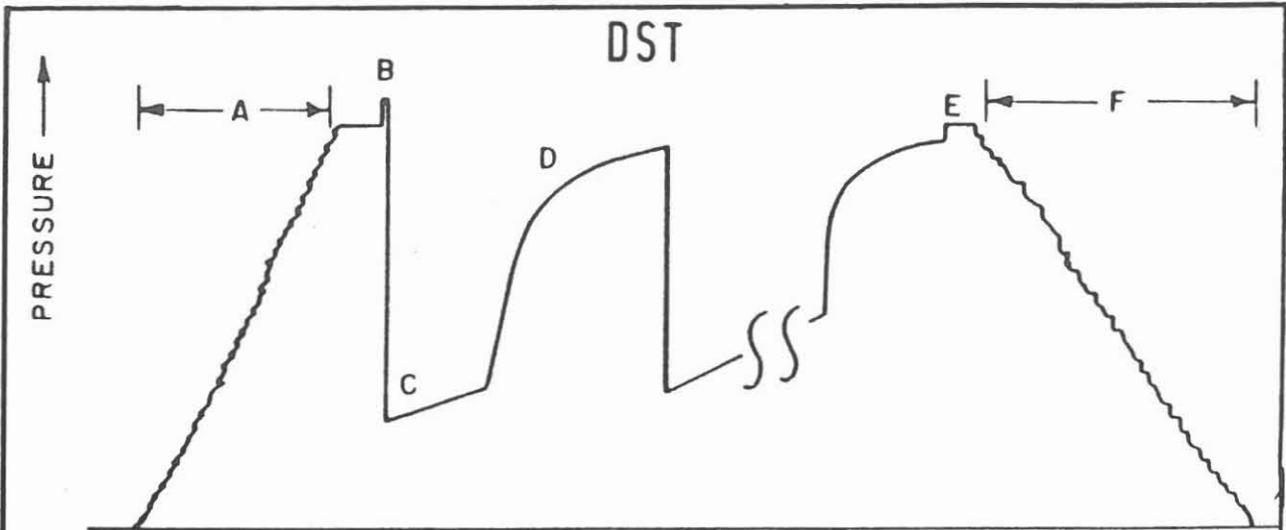
$T_f$

$S_f$

GP

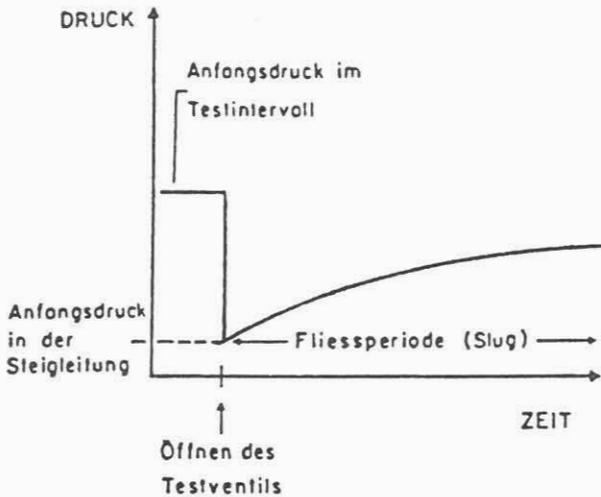
AUSWERTEVERFAHREN

ITE 88

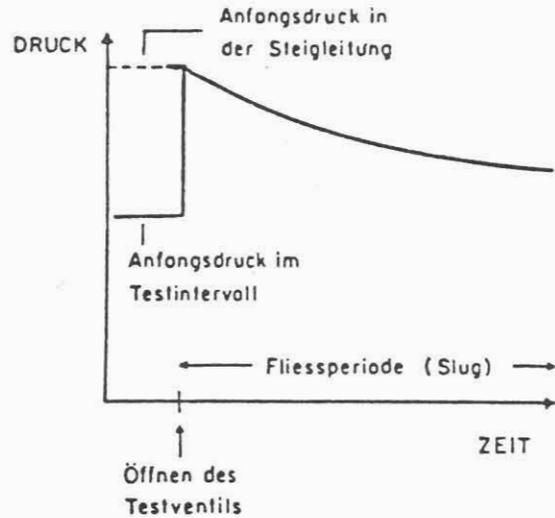


# Slug-/ Puls - Test

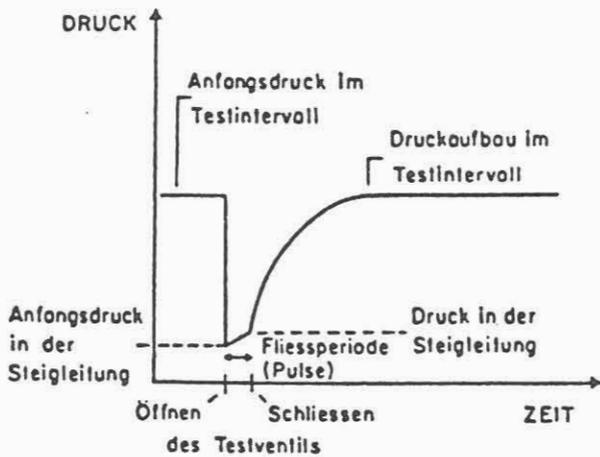
**A - Slug - Withdrawal - Test**



**B - Slug - Injection - Test**



**C - Pulse - Withdrawal - Test**



**D - Pulse - Injection - Test**



Testmöglichkeiten mit dem HTT.

A - für durchlässige Zonen geeignet, da größere Zuflußmengen erforderlich sind.

B - wie A.

C - für gering durchlässige Zonen geeignet.

D - wie C.

Slug- und Puls-Test sind Sonderformen des Drill-Stem-Tests für höherpermeable und geringpermeable Zonen. Während beim Slug-Test lediglich die Fließperiode ausgelöst durch eine konstante Druckdifferenz über der getesteten Zone ausgewertet wird, dient der Puls-Test mit einer nur kurzen Fließperiode zur Auswertung des Fließdruckanstiegs bzw. Fließdruckabfalls in dichten Formationen. Auch hier gilt als Anfangsbedingung zur Auslösung des Druckereignisses ein konstanter Differenzdruck über der getesteten Formation.

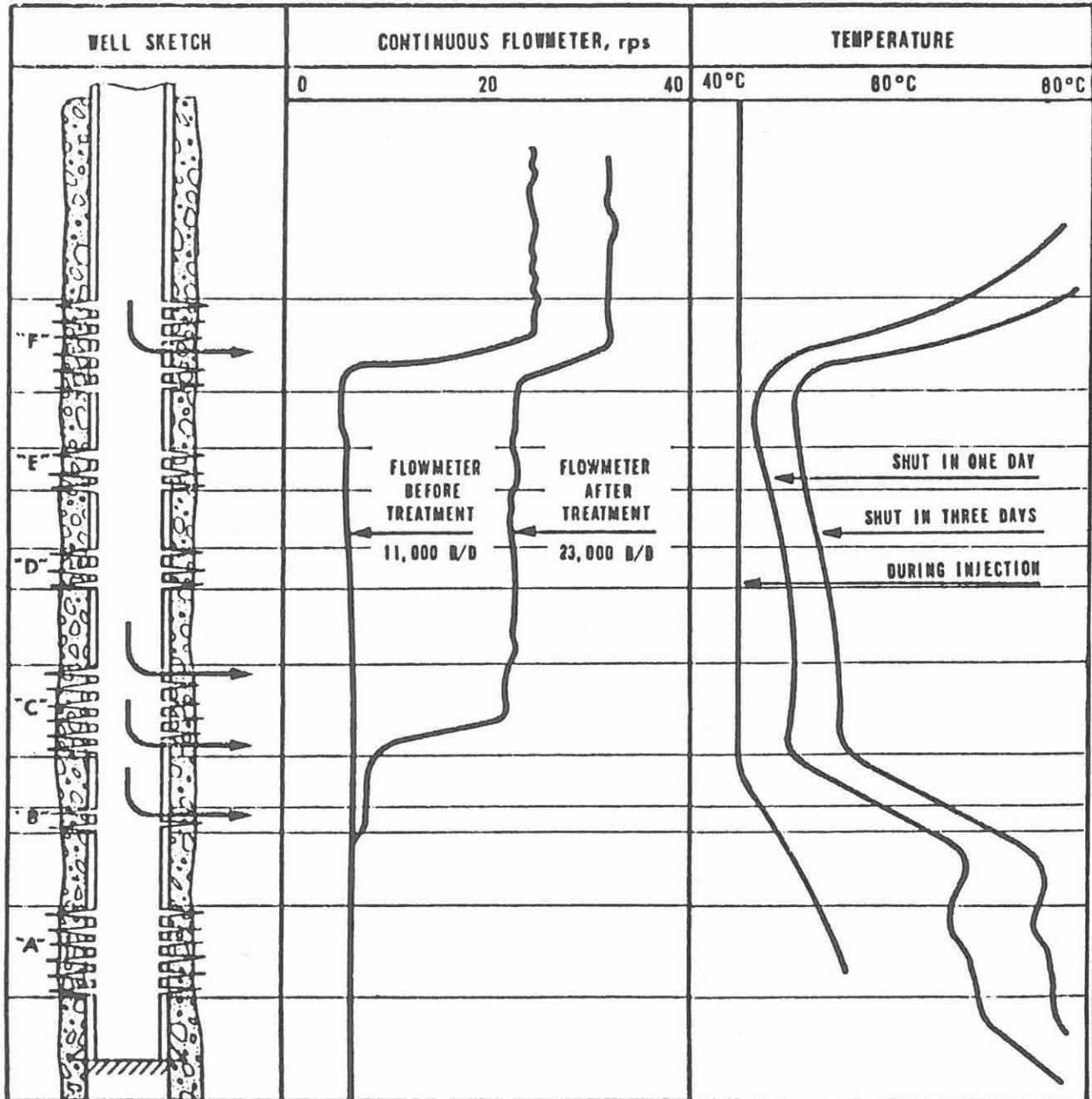
Thermoflowmetermessungen (Abb.9) werden als Vergleichsmessungen der Temperaturentwicklung in einem künstlich abgekühlten bzw. durch Förderung von Formationsflüssigkeit erwärmten Bohrloch benutzt. Der zeitliche Temperaturgradient, der durch Wiedererwärmung bzw. Abkühlung gemessen wird, ist ein Indikator für die Zuflüsse aus der Formation bzw. für die Invasion von Bohrlochsflüssigkeit. In der Abb. 10 ist das Ergebnis eines Type-Curve-Matches für den ersten Drill-Stem-Test in der KTB-Vorbohrung im Meßintervall von 220 - 257 m dargestellt. Der Druckmatch mit dem Rechenprogramm TRIAS wird durch Hinzunahme der Druckableitung über der Zeit hinsichtlich seiner Eindeutigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse verbessert. Der negative Skin-Faktor von 0,5 weist darauf hin, daß keinerlei Spülungsinfiltation stattgefunden hat. Die mittlere Permeabilität im getesteten Intervall betrug 44,6  $\mu\text{D}$ .

#### Zusammenfassung

Die hydraulischen Testverfahren stellen den einzig möglichen Zugang zu jenen Kenngrößen dar, welche für die Fluidmigration verantwortlich sind (Transmissibilität und Speicherkapazität, sowie Druckpotential). Ihre Reichweite übertrifft die übrigen Informationsquellen wie Spülproben, Bohrkerne und geophysikalische Bohrlochmessungen. Sie sind außerdem die einzige Quelle für die Beschaffung von Fluidproben aus der Formation und stellen somit einen unverzichtbaren Bestandteil des geowissenschaftlichen Programmes zur Tiefenerkundung dar.

# THERMO FLOWMETER / CONTINUOUS FLOWMETER

## WATER INJECTION WELL



G P

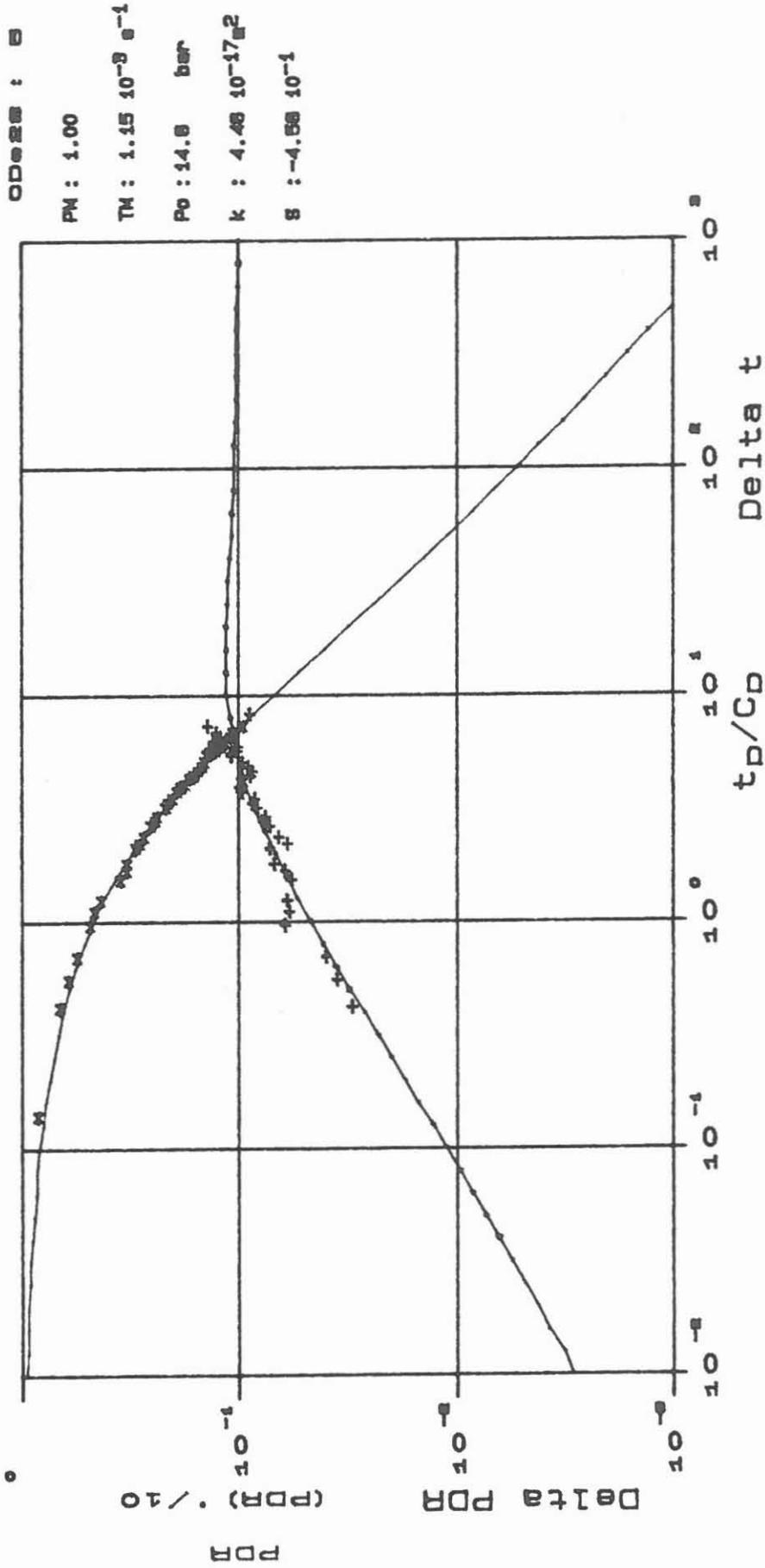
BEISPIELE FÜR TESTVERLÄUFE

ITE 88

Drill-Stem-Test Auswertung

KTB - Vorbohrung

Messintervall : 219.81-257.00 m



GP Type Curve Typ B: kh-Match

Symbolverzeichnis

C	Bohrlochspeicherkoeffizient	$m^3 / Pa$
$c_t$	Gesamtkompressibilität	$Pa^{-1}$
h	Länge des Testabschnitts	m
k	Permeabilität	$m^2$
p	Druck	$N/m^2$
$p_{DR}$	Dimensionloses Druckverhältnis	-
$p_i$	Initialer Druck	$N/m^2$
$p_{wf}$	Bodenfließdruck	$N/m^2$
$p_o$	Minimaldruck	$N/m^2$
q	Fließrate	$m^3 / s$
$r_e$	Äußerer Radius	m
$r_w$	Bohrlochradius	m
s	Skinfaktor	-
t	Zeit	s
$t_l$	Laufzeitverzögerung	s
T	Transmissibilität	$m^2 / s$
w	Rißweite	m
x	Rißlänge	m
$\phi$	Porosität	-
$\mu$	Dyn. Viskosität	Pa s

Indizes

$m_a$	Matrix
f	Kluft
M	Matchpunkt
D	Dimensionlos