

**WIDERSTANDSMESSUNGEN IM KRISTALLIN UND IN SEDIMENTEN MIT
BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER GEOLOGISCH- UND
GERÄTEBEDINGTEN EINFLUSS- UND FEHLERGRÖSSEN**

J. K. Draxler

Zusammenfassung

Die Service-Industrie bietet verschiedene Bohrlochmeßsysteme an, mit denen Widerstand oder Leitfähigkeit des durchteuften Gebirges gemessen werden können.

Mit diesen Messungen können im Kristallin Zonen mit Porosität (Klüfte) nachgewiesen werden. In Sedimenten dienen sie in der Hauptsache zur Bestimmung der Wasser- bzw. Kohlenwasserstoff-sättigung in porösen Trägerbereichen. Außerdem können die räumliche Lage, das Einfallen und Streichen von Formationen oder Kluftsystemen daraus berechnet werden.

Die Widerstandsverhältnisse im Kristallin und in bestimmten Sedimentfolgen erfordern den Einsatz der Dual-Laterolog-Methode. Nur mit diesem Gerät können Widerstände bis 60.000 Ohm m und mit einer neueren Version der Firma Schlumberger bis über 500.000 Ohm m gemessen werden.

Dabei muß jedoch berücksichtigt werden, daß diese Meßmethoden durch geologische - aber auch gerätespezifische - Einflüsse Fehllesungen ("Groningen-Effekt") ausgesetzt sind. Starke und abrupte Widerstandsänderungen zwischen dichtem und geklüftetem Kristallin oder in bestimmten Sedimentabfolgen, wie z. B. den Evaporiten des Zechsteins, können erst interpretiert werden, wenn die Lesungen vorher korrigiert worden sind (Bohrlocheinfluß, Schulterzonen).

Die Beeinflussung durch den Schulterzoneneffekt (shoulder beds) und die möglichen Korrekturen werden an Beispielen erläutert. Das Problem des Groningen-Effektes wird aufgezeigt und auf die bisherigen unbefriedigenden Lösungsversuche durch die Service-Firmen eingegangen.

Außerdem wird die Anwendung der korrigierten Widerstandswerte zur Bestimmung der Öffnungsweite von Klüften im Zechsteinkalk demonstriert.

1 Invasionsprofil

Um die Arbeitsweise von Widerstandsmessungen in Bohrungen verstehen zu können, ist es notwendig, sich die herrschenden Bedingungen zu vergegenwärtigen.

In porösen Sedimentgesteinen wird durch den druckstärkeren Spülstrom die Flüssigkeit in der Formation verdrängt. Eindringendes Spülungsfiltrat bildet einen "gefluteten Bereich" nahe der Bohrlochwand und eine "Invasionszone" im Gebirge. Diese Invasion findet solange statt, bis sich ein abdichtender Filterkuchen aufgebaut hat. In weiterer Entfernung vom Bohrloch bleibt die Formation unbeeinflusst.

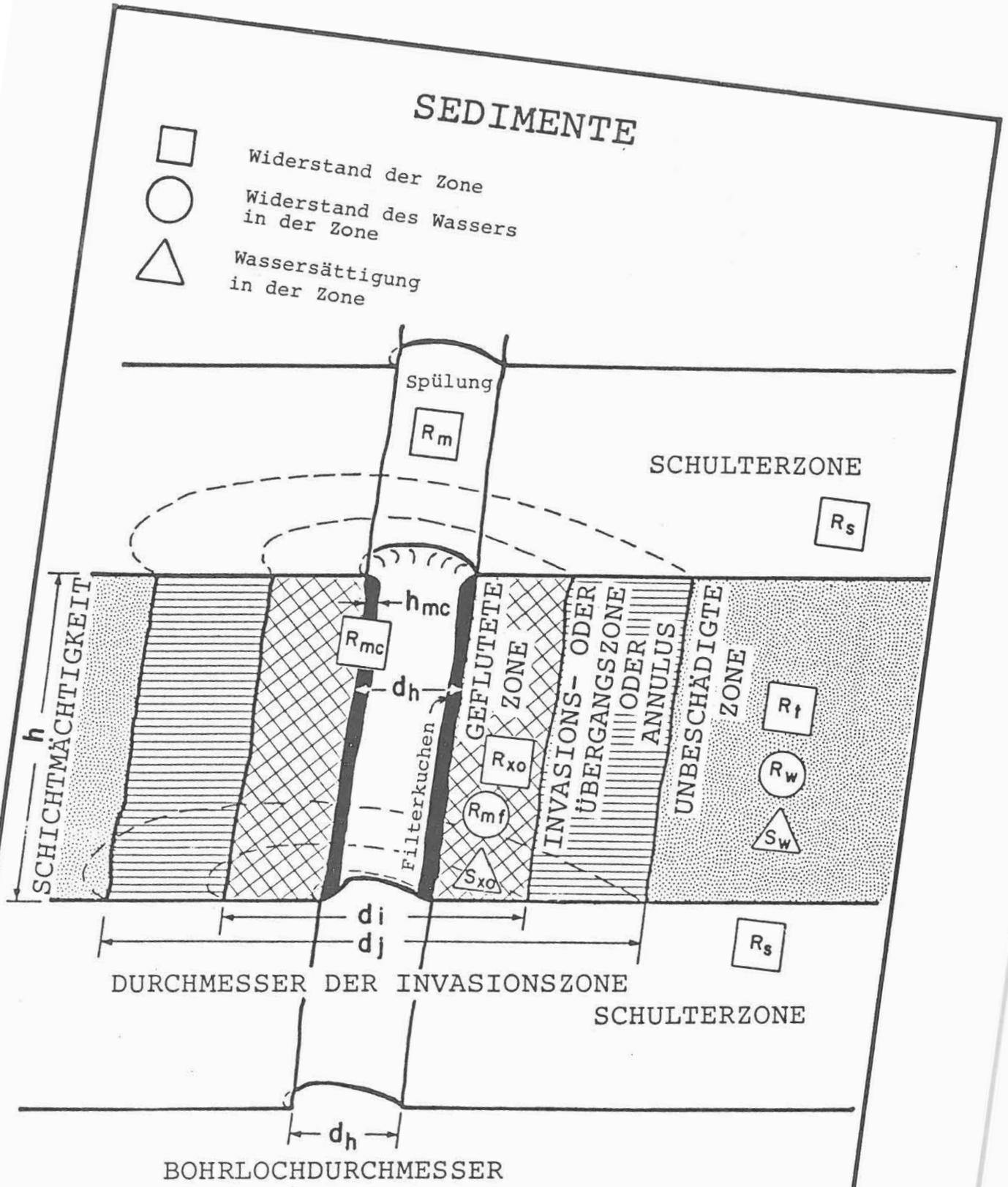
Die Formationsflüssigkeit und die Spülung bzw. das Filtrat haben meist einen unterschiedlichen Widerstand. Daraus ergibt sich ein zonenbedingtes, variierendes Widerstandsprofil in den porösen und permeablen Zonen.

In Gesteinen ohne Permeabilität fehlt jede Invasion, daher auch jede Widerstandsveränderung. Sie begrenzen die porösen Lagen im Liegenden und Hangenden (Schulterzonen) und sind durch guten Widerstandskontrast erkennbar (Abb. 1).

Im Kristallin muß von einer wesentlich anderen Widerstandsverteilung ausgegangen werden, da diese Gesteine nur sehr geringe Porositäten, meist Kluftporositäten, aufweisen. Eine Invasionsbeeinflussung erfolgt deshalb nur entlang dieser Klüfte und Risse; in unmittelbarer Nähe der Bohrung in Mikrorissen, die durch Spannungsentlastung entstehen, und tiefer im Gebirge durch vorhandene Kluftsysteme. Wenn diese sehr ausgeprägt sind, kann eine sehr weitreichende "Invasion" eintreten, da sich kein Filterkuchen aufbauen kann (Abb. 2).

2 Widerstands-/Leitfähigkeitsmeßmethoden

Von der Service-Industrie werden Systeme angeboten, mit denen versucht wird, diese komplizierten Verhältnisse meßtechnisch zu erfassen. Das Prinzip ist, mehrere Widerstandsmessungen mit unterschiedlicher Eindringtiefe zu vereinen, um daraus Korrekturen für die Invasion abzuleiten (Referenzen: 1 und 3). In Tab. 1 sind die "Makro-Widerstands-/Leitfähigkeitsgeräte" aufgelistet, die bis tief ins Gebirge lesen. Tab. 2 gibt die Geräte mit geringer Eindringtiefe - "Mikro-Widerstand" - und die Dipmetergeräte wieder. Letztere sind geeignet, das Streichen und Einfallen der Formationen zu bestimmen und Klüfte oder Kluftbereiche zu erkennen. Mit Hilfe des Diagrammes in Abb. 3 kann für die in einer Bohrung vorliegenden Verhältnisse das bestmögliche Meßsystem ausgewählt werden.



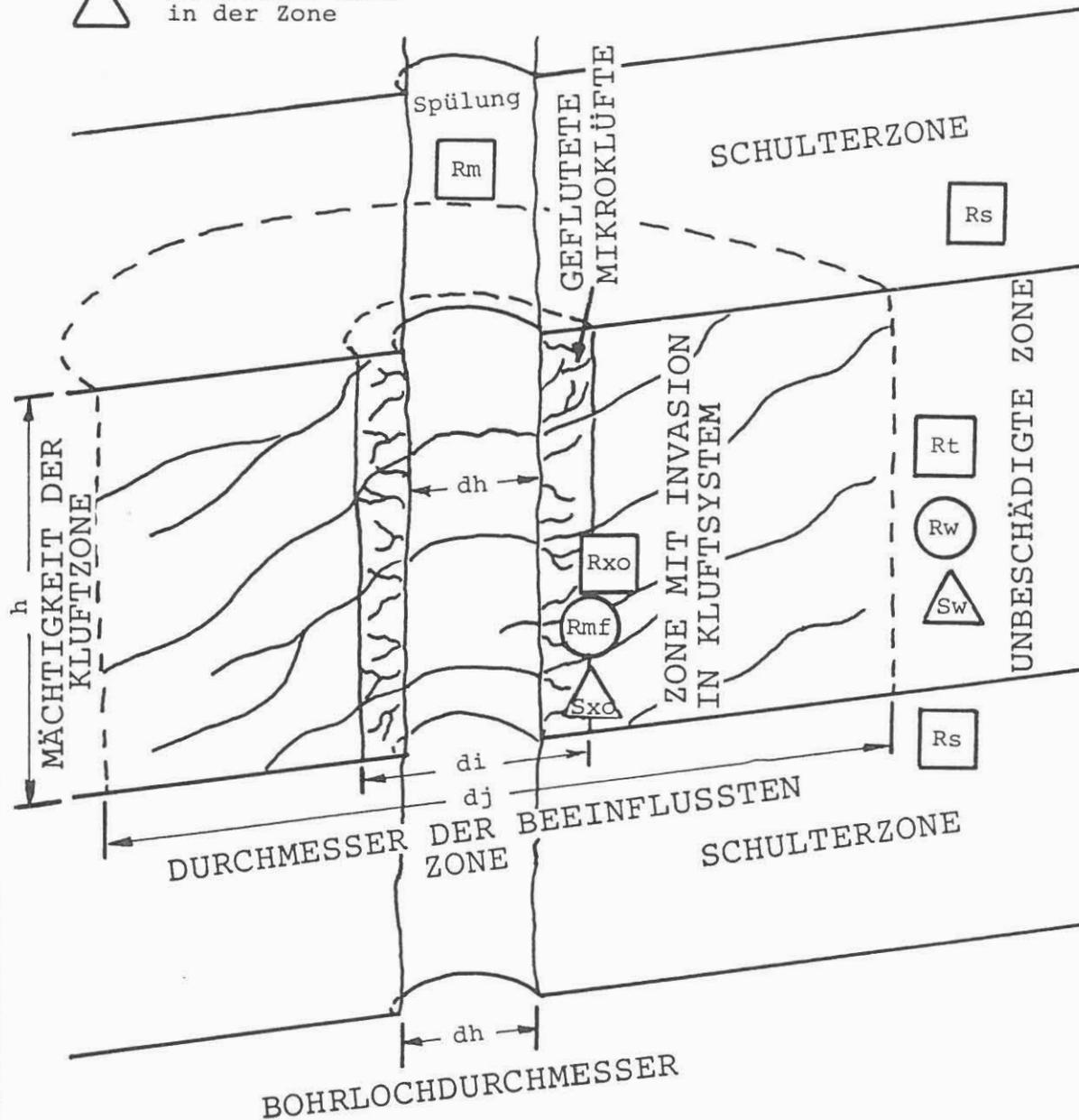
INVASIONSPROFIL

KTBB

Abb. 1

KRISTALLIN

-  Widerstand der Zone
-  Widerstand des Wassers in der Zone
-  Wassersättigung in der Zone



INVASIONSPROFIL

KTBB

Abb. 2

Schlumberger

DresserAtlas

DRESSER

Makro-Widerstand:

*ES	Electrical Survey
*LL3	Laterolog 3
*LL7	Laterolog 7
DLL	Dual Laterolog
ULSEL	Ultra Long Spacing Electrical Log
ISF	Induction Spherically Focused Log
DIS	Dual Induction Spherically Focused Log
IDPH	Phasor Dual Induction Log

*EL	Electrical Log
*LL3	Laterolog 3
*LL7	Laterolog 7
DL	Dual Laterolog
IEL	Induction Electrolog
DIFL	Dual Induction Focused Log

* veraltete Systeme

WIDERSTANDS- / LEITFÄHIGKEITSMESSUNGEN

KTB

Tabelle 1

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Schlumberger

DresserAtlas

DRESSER

Mikro-Widerstand:

ML Microlog
MLL Microlaterolog
MSFL Micro-Spherically Focused
Log
PL Proximity Log
EPL Electromagnetic Propagation
Log

ML Minilog
MLL Microlaterolog

PXL Proximity Log
DCLL Dielectric Log (47MHz)
DCLH Dielectric Log (200 MHz)

Dipmeter:

HDT High Resolution Dipmeter
SHDT Stratigraphic High Resolution
Dipmeter
FMST Formation MicroScanner

DIP High Resolution 4-Arm
Diplog

WIDERSTANDS- / LEITFÄHIGKEITSMESSUNGEN

KTB
Tabelle 2

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

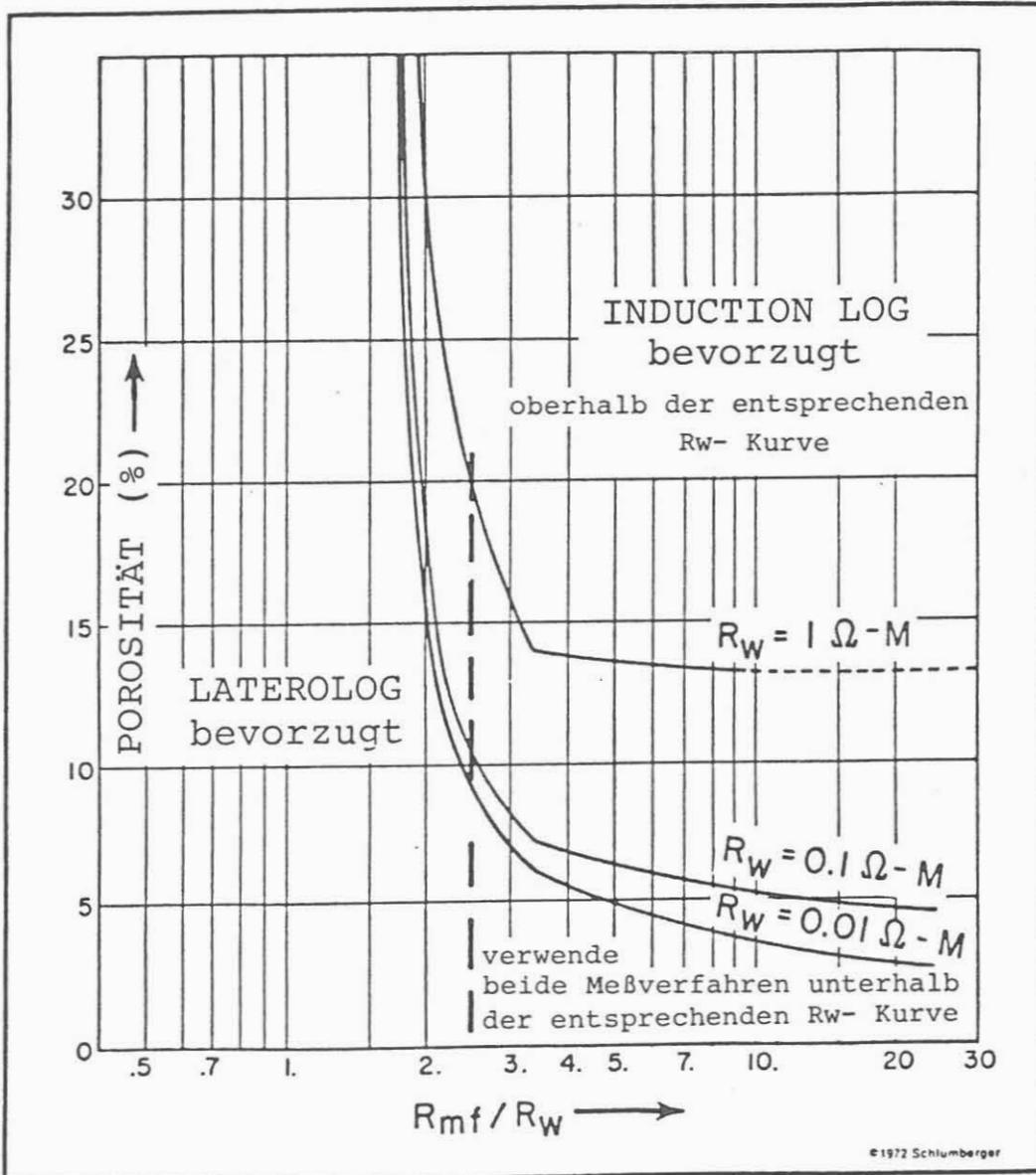
BEVORZUGTES MESSVERFAHREN

KRISTALLIN: niedrige Porosität
hoher Widerstand
geringe Wasserführung
niedrige Salinität

SEDIMENT: gute Porosität
niedriger Widerstand
gute Wasserführung
hohe Salinität

Beispiel: $\phi = 1.5\%$,
 $R_{mf}/R_w = 0.6/0.3 = 2$

Beispiel: $\phi = 20.0\%$,
 $R_{mf}/R_w = 0.2/0.05 = 4$



WAHL DES MESSVERFAHRENS

KTB

Abb. 3

Im Kristallin wird bei niedriger Porosität, hohem Widerstand, geringer Wasserführung und geringer Salinität das Laterolog und im Sediment bei guter Porosität, niedrigem Widerstand, guter Wassersättigung und hoher Salinität das Induction Log bevorzugt. Bei salzgesättigten Bedingungen - Filtrat und Formationswasser haben gleiche Salinität; das Verhältnis R_{mf}/R_w ist 1 und die Porosität liegt bei 12 % - wäre ebenfalls das Laterolog zu wählen (z. B. Zechstein, Rotliegend in Norddeutschland).

2.1 Meßprinzip Dual Laterolog: Schlumberger - Dresser Atlas

Dieses Meßsystem wird von beiden in Deutschland tätigen Service-Firmen angeboten. Eine nähere Betrachtung ist notwendig, da die gerätebedingten Fehllesungen unterschiedliche Ursachen haben. Bei Schlumberger ist die Stromrückführung für den Meß- und Fokussierstrom des Laterolog Deep (LLD) an Elektrode "B" auf Ackersohle, die Null Referenz "N" am Kabel, ungefähr 34 m von der Stromelektrode A₀ entfernt. Die Frequenz für das Laterolog Shallow (LLS) beträgt 270 Hz (Abb. 4).

Bei Dresser Atlas ist die Stromrückführung "B" für Meß- und Fokussierstrom von LLD am Kabel, die Null Referenz "N" auf Ackersohle und die LLS Frequenz beträgt 128 Hz (Abb. 5).

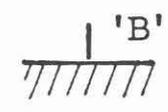
2.2 Korrekturen und Störeffekte

Es ist notwendig, die Messungen, die mit dem Dual Laterolog-System durchgeführt werden, zu korrigieren. Korrekturen für Bohrlocheinfluß etc. und für spezifische Fehllesungen sind in Tab. 3 zusammengestellt.

- Korrekturen

Beide Firmen haben in ihrem "Log Interpretation Chartbooks" Korrekturtabellen für Bohrlocheinfluß veröffentlicht. In der Ausgabe von 1985 hat Schlumberger erstmalig Korrekturen für Schulterzonen (Squeeze) vorgestellt (Abb. 6). Sie sind außerdem bereits im sogenannten SHOLAT (Shoulder bed correction Laterolog)-Computerprogramm integriert, das ein Teil der GLOBAL Interpretationsprogrammreihe ist.

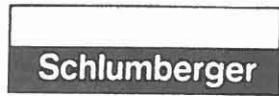
Beide Laterologmessungen (LLD und LLS) werden einer getrennten Korrektur unterzogen. Als Beispiel ist eine Messung über den Hauptdolomit des Zechsteins wiedergegeben. Der Widerstand reduziert sich um ca. 40 - 45 % im Hauptdolomit und erhöht sich um 30 - 35 % im Anhydrit für das LLD (Abb. 7). Das LLS weist im Hauptdolomit keine Abweichungen auf und zeigt eine Erhöhung um 15 % im Anhydrit (Abb. 8).



STROMRÜCKFÜHRUNG 'B'
ACKERSOEHLE

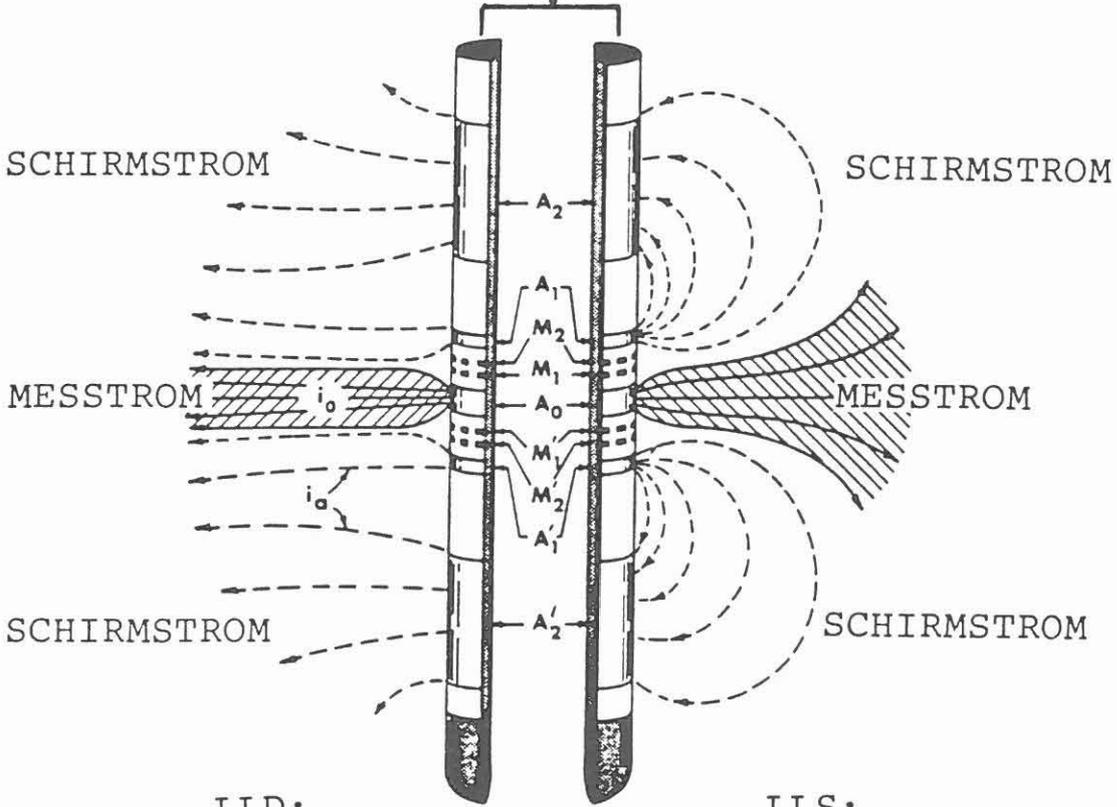
'N' NULL REFERENZ 'N'
KABEL

VI



V

MESSANORDNUNG



LLD:

LLS:

Frequenz 32 hz
Meßstrom 'Ao' - 'B'
Fokussierstrom 'A1'+ 'A2' - 'B'

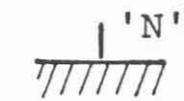
Frequenz 270 Hz
Meßstrom 'Ao' - 'A2'
Fokussierstrom 'A1' - 'A2'

Meßabstand 24"
Null Referenz 'N' am Kabel

DUAL LATEROLOG

KTB

Abb. 4

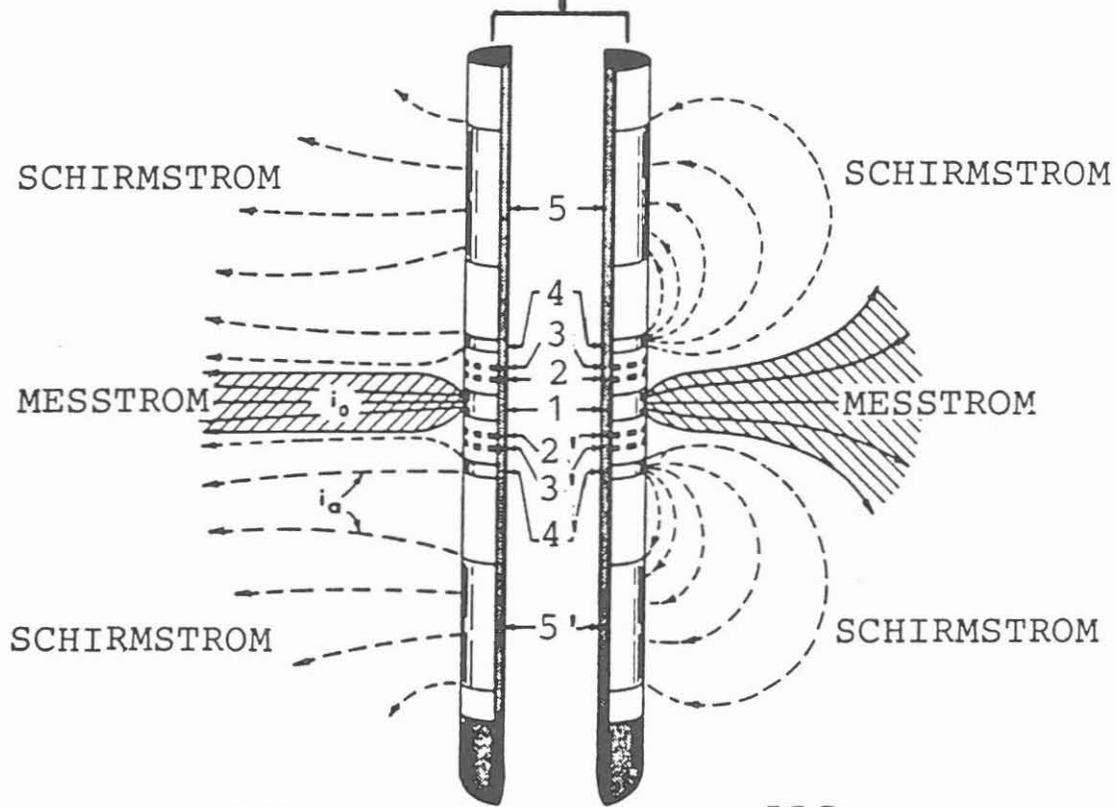


NULL REFERENZ 'N'
ACKERSOHL

'B' STROMRÜCKFÜHRUNG 'B'
KABEL



MESSANORDNUNG



LLD:

Frequenz 32 Hz
Meßstrom 1 - 'B'
Fokussierstrom 4 + 5 - 'B'
Distanz 1 - 'B' (Kabel) 35 m

LLS:

Frequenz 128 Hz
Meßstrom 1 - 5
Fokussierstrom 4 - 5

Meßabstand 24"
Null Referenz 'N' auf Ackersohle

DUAL LATEROLOG

KTB

Abb. 5

KORREKTUREN:

BOHRLOCHEINFLUSS (Tabellen für LLD, LLS,
Schlumberger, Dresser)

SCHULTERZONEN (Tabellen für LLD, LLS,
Schlumberger)

STÖREFFEKTE:

DELAWARE EFFEKT (gelöst)

GRONINGEN EFFEKT (ungelöst)

DUAL LATEROLOG BEEINFLUSSUNG

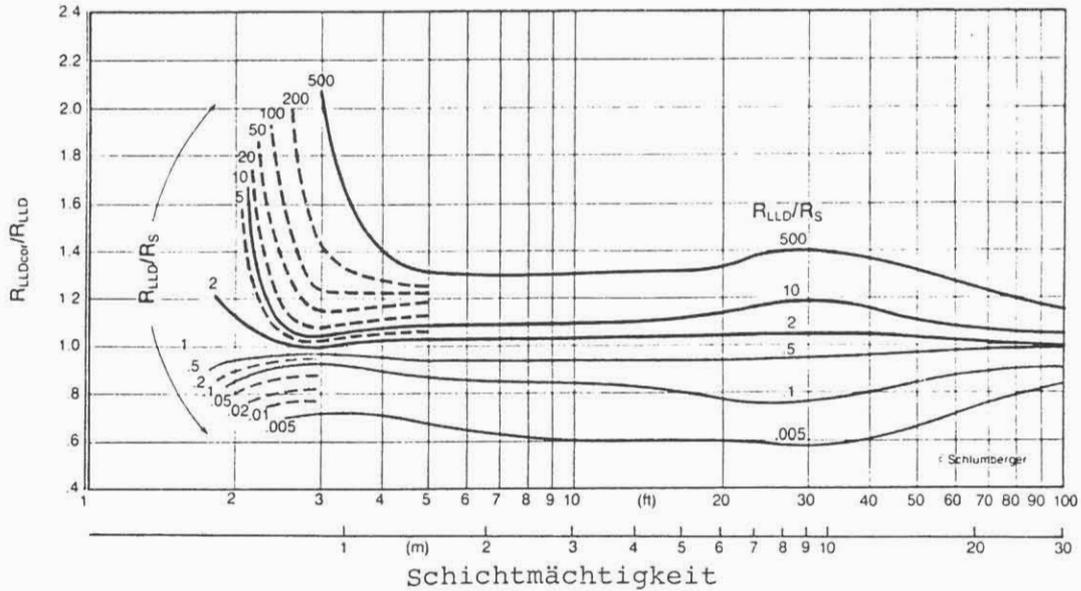
KTB
Tabelle 3

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

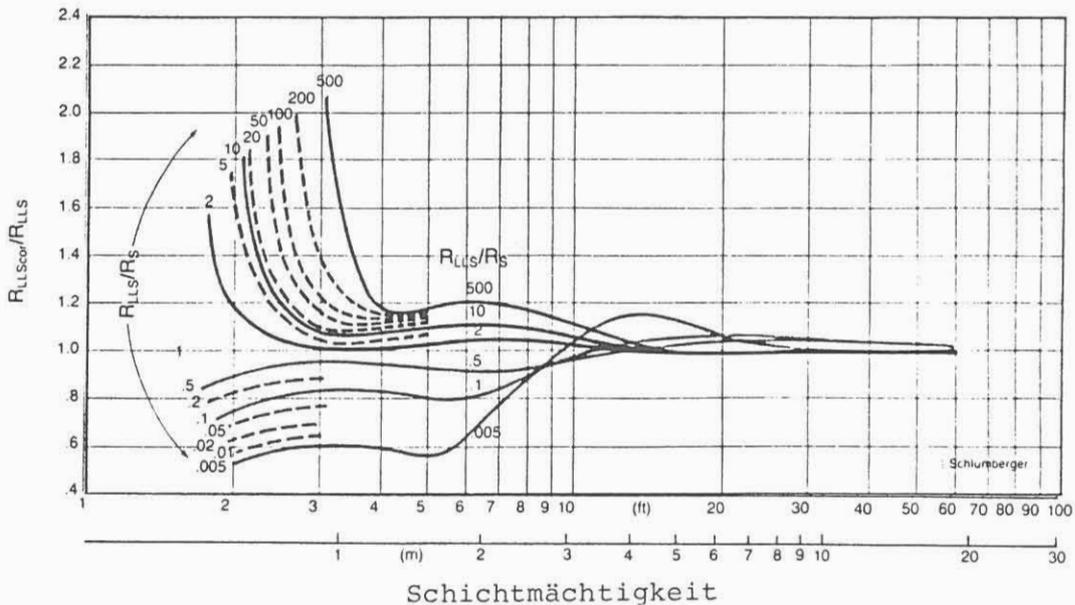
SCHULTERZONEN KORREKTUR (SQUEEZE)

Keine Invasion, "semi-infinite" Schulterzone,
8" Bohrloch

LLD DEEP LATEROLOG



LLS SHALLOW LATEROLOG



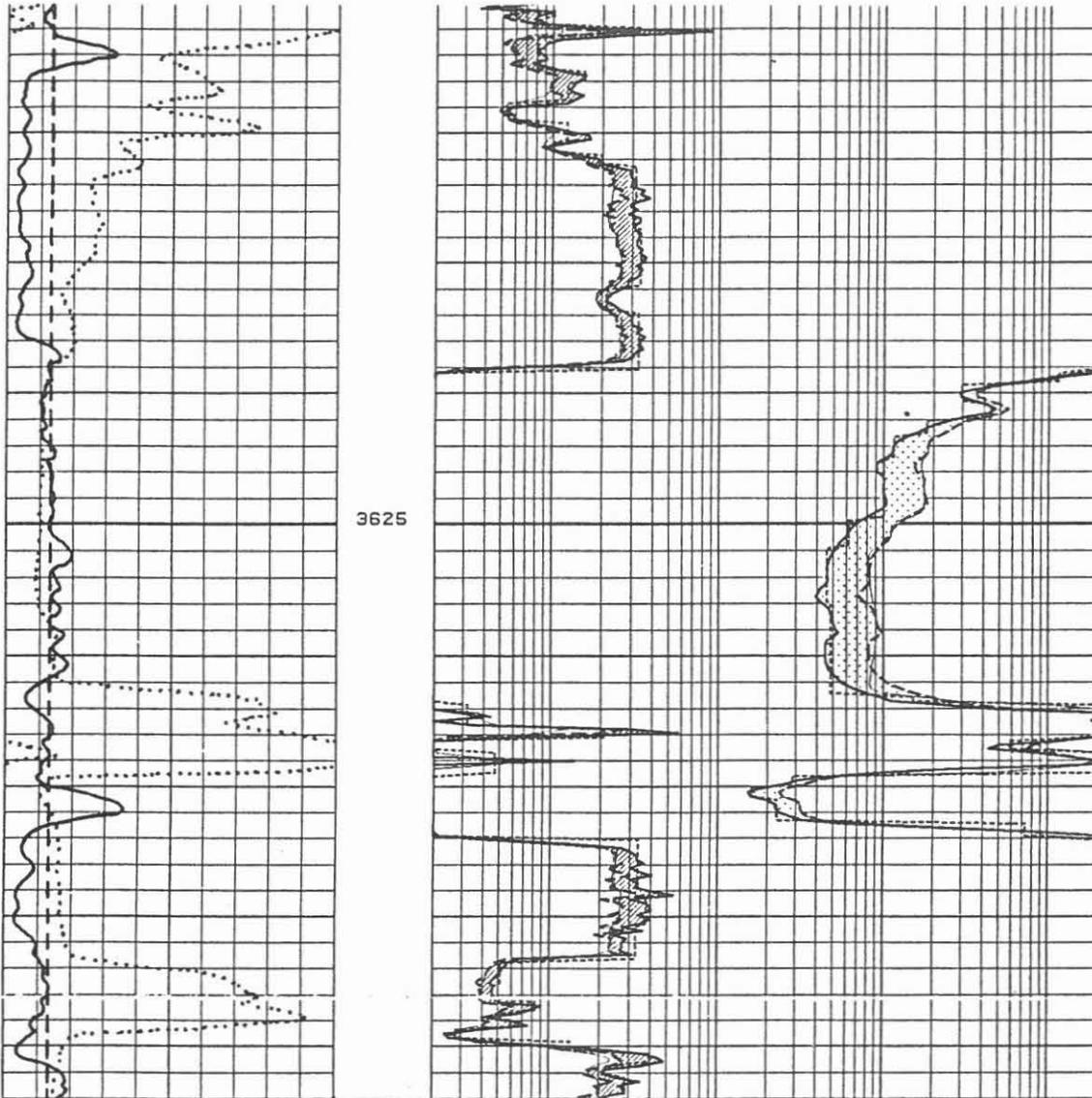
Geräte: DLL-D/E

(Schlumberger)

DUAL LATEROLOG KORREKTUR

KT&B
Abb. 6

LLD SCHULTERZONEN KORREKTUR (SQUEEZE)
ZECHSTEIN (Hauptdolomit)



<p>'SHOLAT' (Schlumberger)</p>	1/200	2000.	B.U. NORMALIZED LLD	2.E06
		.2	NORMALIZED LLD	2000.
		2000.	B.U. CORRECTED LLD	2.E06
		.2	CORRECTED LLD	2000.
		2000.	B.U. RECONSTRUCTED LLD	2.E06
		.2	RECONSTRUCTED LLD	2000.
		2000.	B.U. RECTANGULAR LLD	2.E06
		.2	RECTANGULAR LLD	2000.

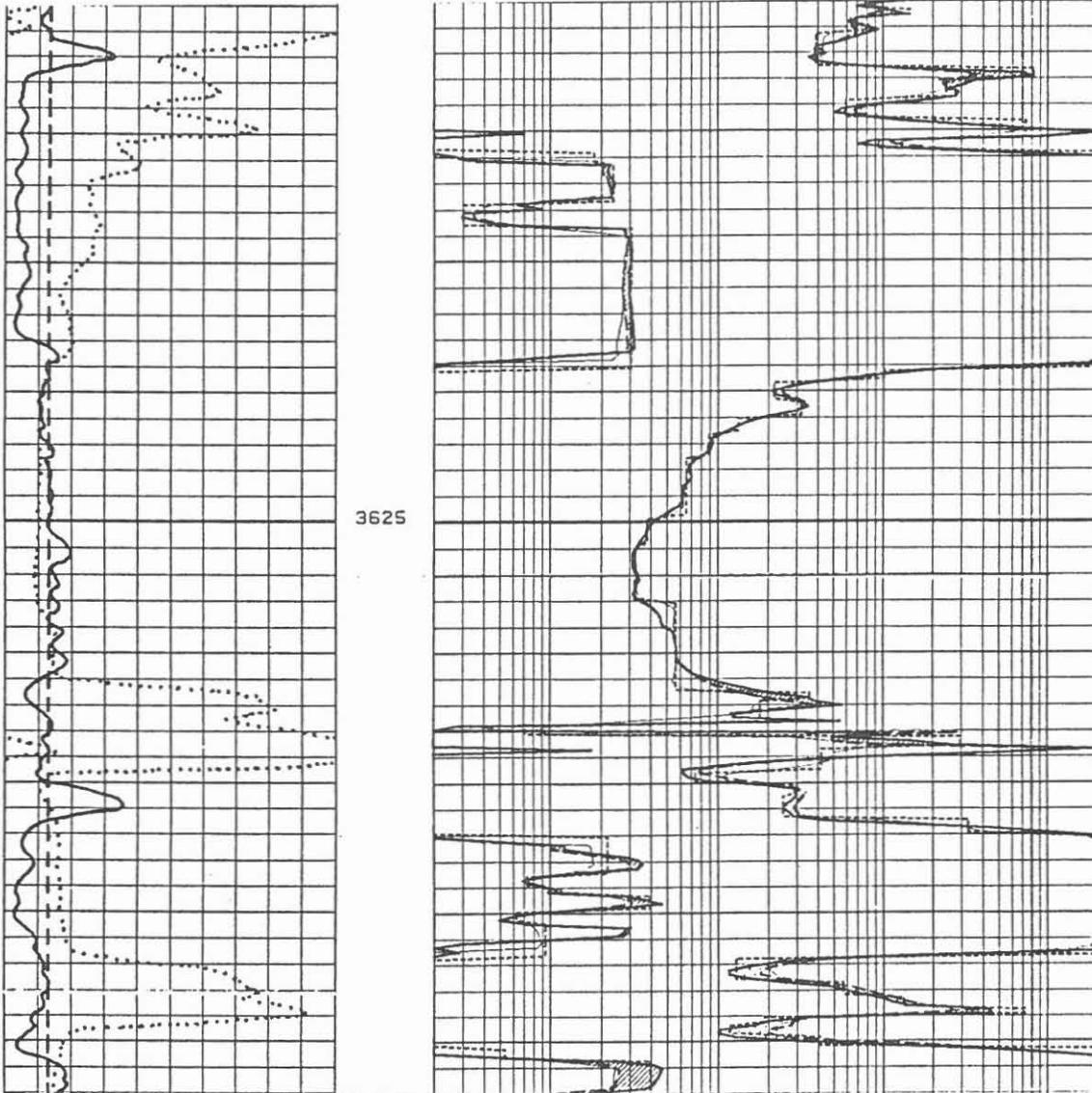
BS (IN)	
7.0000	17.000
CALI(IN...)	
7.0000	17.000
GR (GAPI)	
0.0	150.00

DUAL LATEROLOG KORREKTUR

KT&B

Abb. 7

LLS SCHULTERZONEN KORREKTUR (SQUEEZE)
ZECHSTEIN (Hauptdolomit)



<p>'SHOLAT'</p> <p>(Schlumberger)</p>	<p>1/200</p>	<p>2000. B.U. NORMALIZED LLS 2.E06</p> <p>-----</p> <p>.2 NORMALIZED LLS 2000.</p>
		<p>2000. B.U. CORRECTED LLS 2.E06</p> <p>-----</p> <p>.2 CORRECTED LLS 2000.</p>
<p>BS (IN)</p> <p>7.0000 17.000</p> <p>-----</p> <p>CAL (IN)</p> <p>7.0000 17.000</p> <p>-----</p> <p>GR (GAPI)</p> <p>0.0 150.00</p>	<p>1/200</p>	<p>2000. B.U. RECONSTRUCTED LLS 2.E06</p> <p>-----</p> <p>.2 RECONSTRUCTED LLS 2000.</p>
		<p>2000. B.U. RECTANGULAR LLS 2.E06</p> <p>-----</p> <p>.2 RECTANGULAR LLS 2000.</p>

DUAL LATEROLOG KORREKTUR

KTB

Abb. 8

Dresser teilte mit, daß Korrekturtabellen in Vorbereitung sind. Wie das Beispiel aus der Evaporitserie des Zechsteins zeigt, ist die Beeinflussung durch die Schulterzonen bemerkenswert und erfordert entsprechende Korrekturen. Bei noch größerem Widerstandskontrast im Kristallin sind sie unabdingbar.

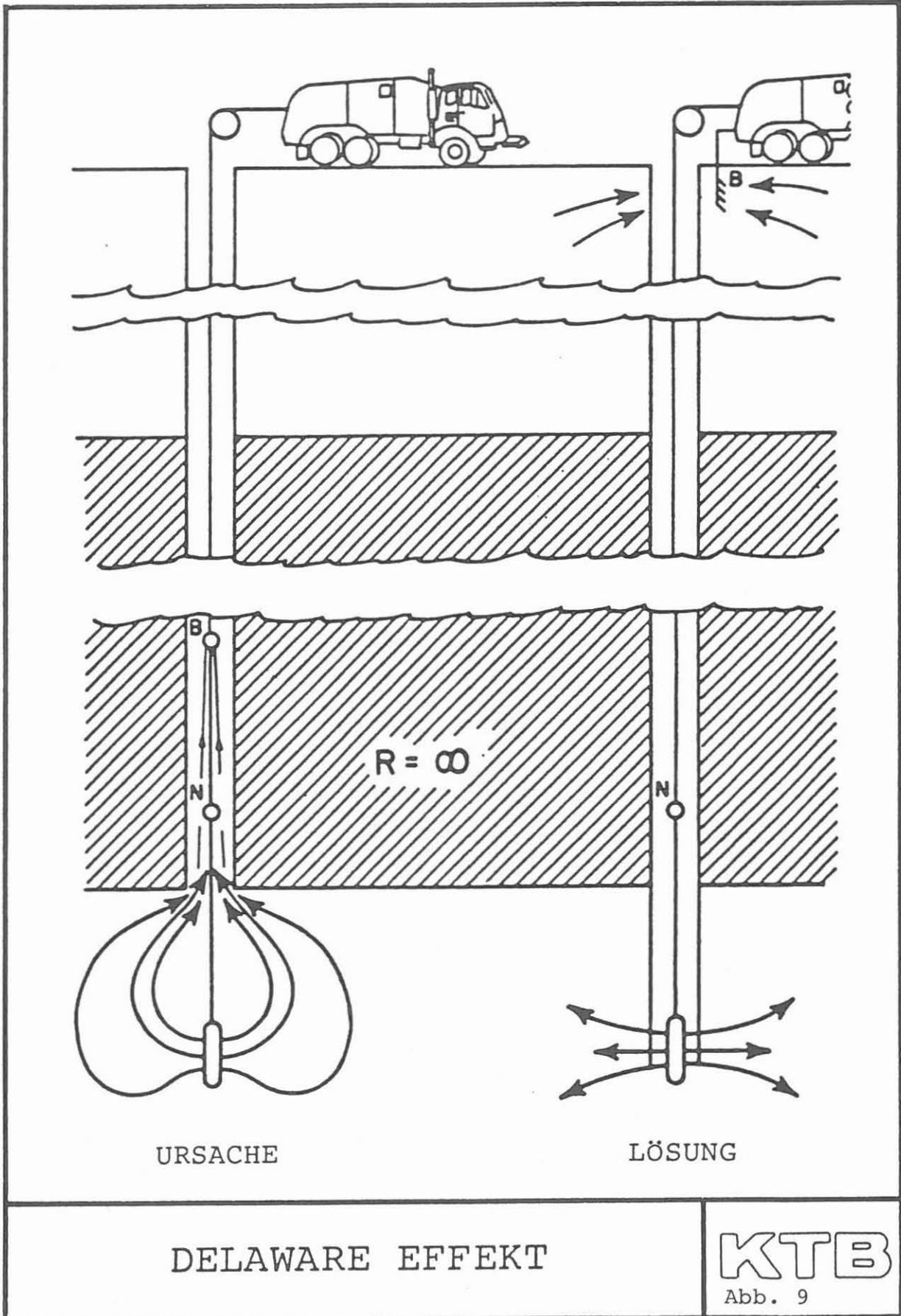
- Störeffekte

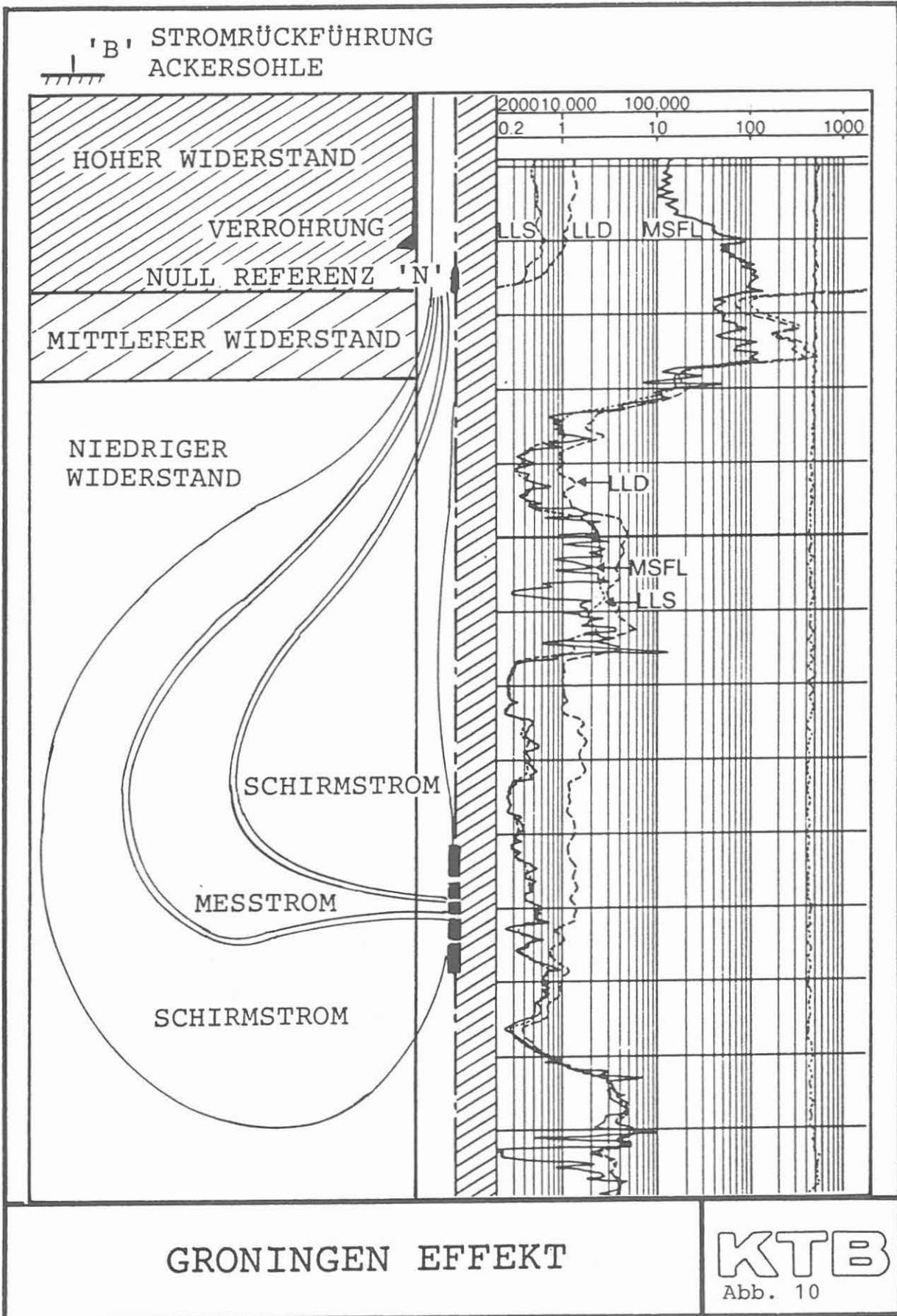
Als geologisch-gerätebedingte Störeffekte sind das "Delaware-" und "Groningen-Problem" bekannt geworden. Beide Effekte treten auf, wenn ungefähr gleiche geologische Verhältnisse vorliegen: Ein Bereich mit niedrigem Widerstand - z. B. Sandstein -, wird von einer mächtigen Zone hohen Widerstandes - z. B. Anhydrit oder Salz - überlagert. Diese Widerstandsbarriere im Hangenden zwingt den Meß- und Fokussierstrom, durch die gutleitende Spülung der Bohrung zu fließen.

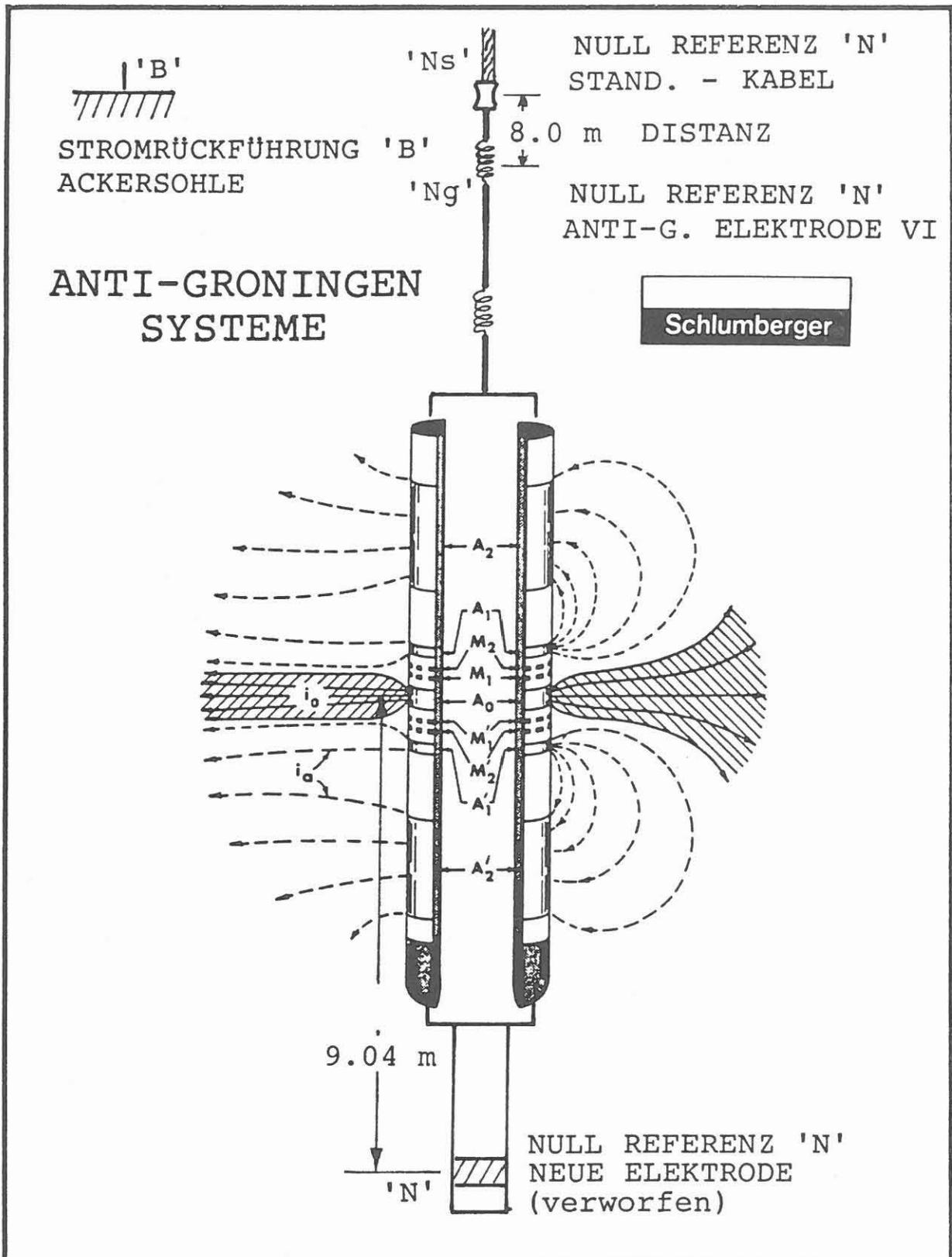
Der Delaware-Effekt trat besonders bei der LL-7-Messung auf und verursachte eine zu hohe Widerstandsmessung über 25 m unter der hochohmigen Zone, wenn Stromrückführungs- ("B") und Null Referenz ("N") im Meßsystem in der Bohrung installiert waren. Dieser Effekt wurde durch die Verlegung einer der beiden Elektroden beseitigt - Schlumberger "B" und Dresser "N" an Ackersohle (Abb. 9 - Schlumberger).

Nach der Einführung des Dual Laterolog Gerätes beobachtete man im Gasfeld Groningen erstmalig ebenfalls eine zu hohe Widerstandslesung am Laterolog Deep (LLD) unterhalb einer mächtigen Zone hohen Widerstandes. Da dieses Meßgerät nur die Null Referenz Elektrode "N" im Bohrloch hat, war ein neues Problem - der "Groningen-Effekt" - aufgetreten (Abb. 10). Er wird noch verstärkt, wenn, wie im Feld üblich, eine Verrohrung bis nahe der Basis des Basalanhydrites eingebaut ist. Die Fehllesungen des LLD beginnen meist 34 m unterhalb der Schichtgrenze Anhydrit - Sand oder Tonstein -, können sich aber über wesentlich längere Intervalle zeigen, wenn geringmächtige Zonen hohen Widerstandes zwischengelagert sind. Störungen auf 120 m Länge sind beobachtet worden. Beide Service-Firmen haben die Problematik dieses Fehlverhaltens des Meßsystems erkannt und versuchen durch neue Konzepte und veränderte Elektrodenanordnung eine Lösung zu finden.

Schlumberger versuchte bereits 1982, die Null Referenz "N" an eine Elektrode 9,04 M unterhalb der Stromelektrode A₀ an eine Verlängerung der Sonde zu bringen (Abb. 11). Die Vergleichsmessungen mit der Standard Sonde zeigten eine 9,0 m-Abweichung an Schichtgrenzen mit Widerstandswechsel (Abb. 12). Dieser Weg wurde als nicht befriedigend verworfen.



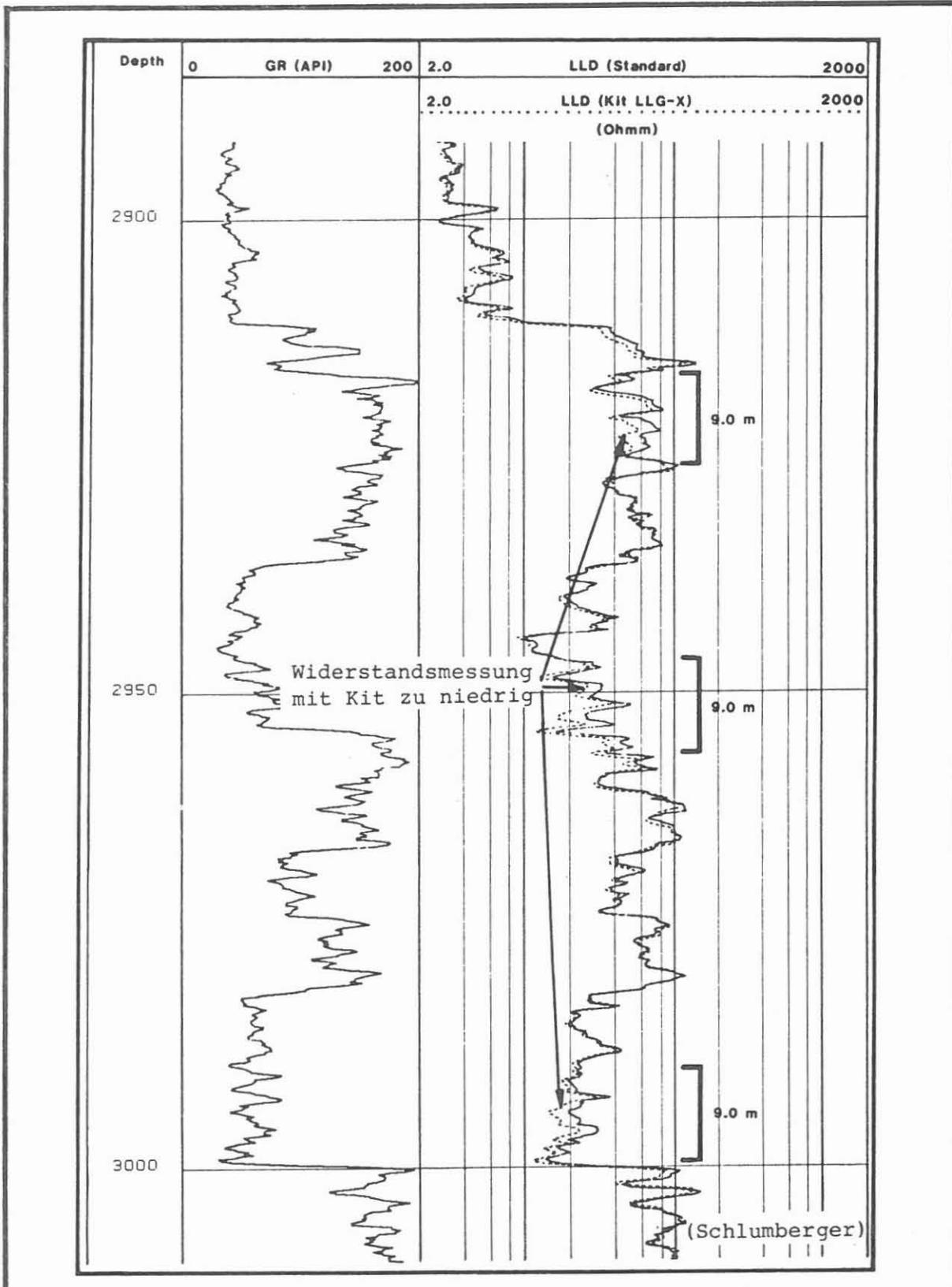




DUAL LATEROLOG

KTB

Abb. 11



DUAL LATEROLOG

GRONINGEN KIT (LLG-X) - verworfen

KT&B

Abb. 12

Heute bietet Schlumberger ein System mit zwei Null Referenzen an: Standard am Kabel und Anti-Groningen an Bridle Elektrode VI (Abb. 11). Dadurch ergibt sich ein Unterschied in der Entfernung von der Stromelektrode A₀ um 8,0 m. Dieser Längenunterschied verzögert den Einsatz der Fehllesung beim Anti-Groningen System und erlaubt dadurch eine Fehlerabschätzung.

Dresser stellte Anfang 1987 ein Anti-Groningen System vor (Referenz 2). Die Stromrückführungselektrode "B" wurde an eine Sondenverlängerung 5,0 m unterhalb der letzten Fokussierelektrode gelegt (Abb. 13). Erste Messungen zeigen eine starke Widerstandsreduzierung sowohl in Zonen hohen, wie auch niedrigen Widerstandes. Außerdem wurde eine unsymmetrische Ansprache beobachtet.

Kein bisher angebotenes Konzept hat eine brauchbare Lösung für den "Groningen-Effekt" gebracht. Die Forderung an die Service-Industrie, Verbesserungen zu suchen, besteht weiter.

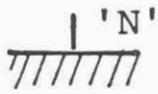
2.3 Option: Hohe Widerstände

Im Kristallin sind die gemessenen Widerstände wesentlich höher, als in den meisten Sedimentgesteinen. Die bisher verwendeten Dual Laterolog Ausrüstungen zeigten bei ungefähr 60.000 Ohm m einen Sättigungswert. In Sedimenten haben Messungen von höheren Widerständen keine geologische Relevanz und wurden deshalb nicht weiterentwickelt. Die Explorationstätigkeit in kristallinen Gesteinen verfolgt andere Ziele. Sie erfordern genaue Widerstandsangaben auch in Zonen mit sehr hohem Widerstand.

Schlumberger hat diese Notwendigkeit aufgegriffen und bietet eine Option: "Hohe Widerstände" für das Dual Laterolog an. Sie gibt eine quantitative Aussage bis Werte um 200.000 und qualitative bis 1.000.000 Ohm m. Das Beispiel auf Abb. 14 stammt aus einer Bohrung im Kristallin und zeigt die Lesungen über den Sättigungswert der Standard Dual Laterolog.

3 Bestimmung der Kluftweite

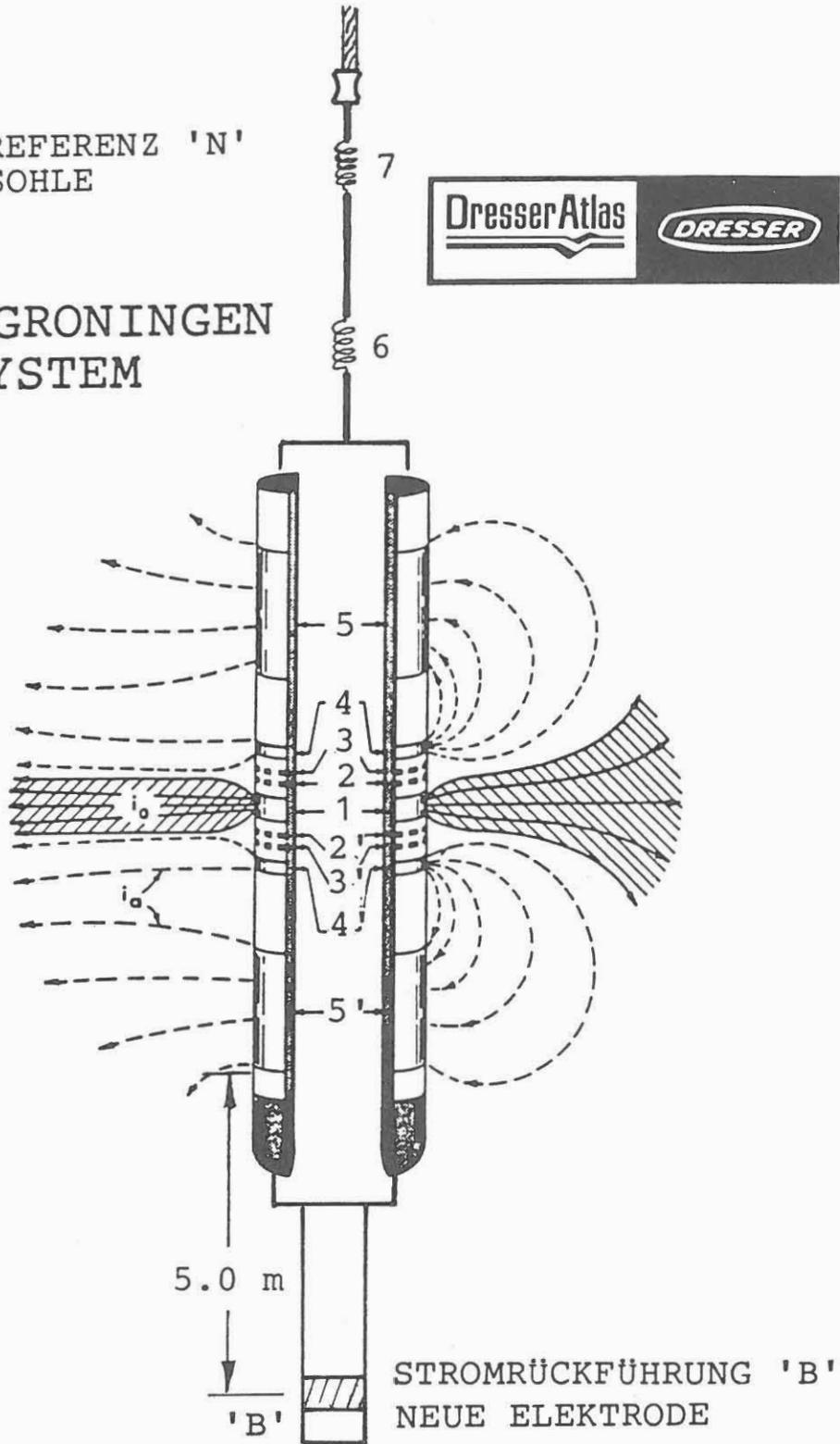
Das Hauptaugenmerk der Bohrlochmeßtechnik galt bisher der Erkennung von Einzelklüften oder Kluftbereichen. Nur über die integrierte Betrachtung aller zur Verfügung stehenden Meßsysteme war eine einigermaßen sichere Aussage möglich. Die Entwicklung des Borehole Teviewers (BHTV) und des Formation MicroScanner Gerätes (FMST) hat dies grundlegend verändert. Mit diesen beiden Meßgeräten, ergänzend eingesetzt, können heute offene und verheilte Klüfte klar erkannt werden. Wie groß nun die Porosität ist, die durch Klüfte erzeugt wird,



NULL REFERENZ 'N'
ACKERSOEHLE



ANTI-GRONINGEN SYSTEM



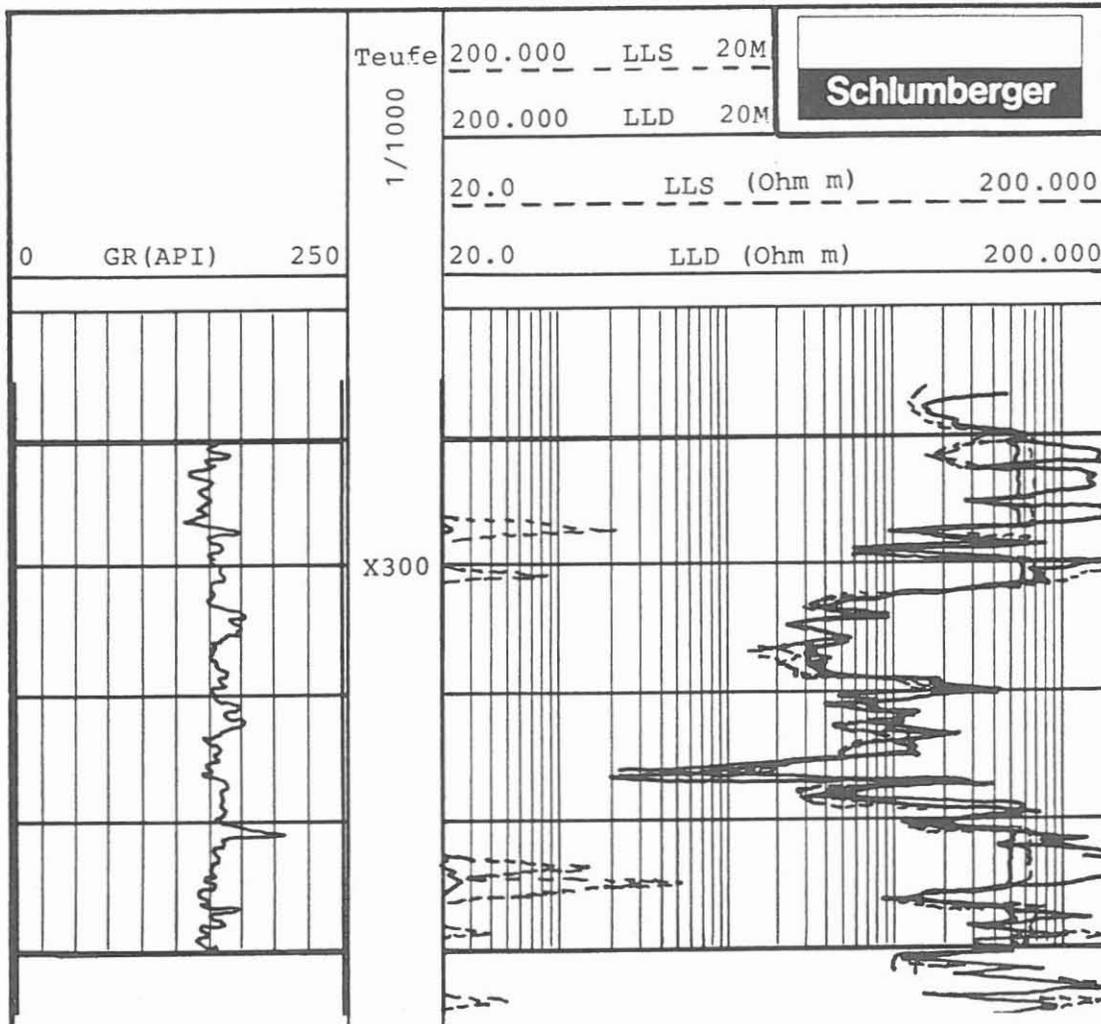
DUAL LATEROLOG

KTB

Abb. 13

OPTION: HOHE WIDERSTÄNDE

Beispiel: KRISTALLIN



Meßbereich erweitert :

quantitativ bis 200.000 Ohm m

qualitativ bis 1.000.000 Ohm m

DUAL LATEROLOG

KTB

Abb. 14

bleibt ungewiß, solange keine Aussage über die Kluftweite gegeben werden kann. Die ersten Versuche hierüber eine Antwort zu geben, stammen aus einer Computersimulation mit Annahmen wie sie in Abb. 15 gegeben sind. Die Tatsache, daß die beiden Lesungen des Dual Laterologs - LLD und LLS - aufgrund der unterschiedlichen Eindringtiefen voneinander abweichende Widerstände messen, kann genutzt werden, um eine Abschätzung der Kluftweite durchzuführen.

Abb. 16 zeigt das empirisch ermittelte lineare Verhalten zwischen Leitfähigkeit und Kluftöffnung bei konstantem Block- und Spülungswiderstand für vertikale Klüfte, wie auch die beiden Widerstandskurven für LLD und LLS im Verhältnis Widerstand gegen Produkt aus Kluftweite und Spülungsleitfähigkeit. Unter Verwendung der "Quick-Look"- Interpretationsmethode des Dual Laterologs (Referenzen 4 und 5) ergibt sich für das Beispiel der durch eine Borehole Televiwer und Formation MicroScanner Messung belegten Doppelkluft eine Gesamtweite von 4 mm (Abb. 17 und Abb. 18 - Overlays). Die Dual Laterolog Messung ist für Bohrlocheinfluß und Schulterzone korrigiert. Die Spülungsleitfähigkeit ist in diesem Beispiel sehr hochohmig.

Für eine Porositätsaussage muß diese Erkenntnis auf das untersuchte Intervall umgesetzt werden. Produktionsteste, die auf diese Zone durchgeführt worden waren, zeigen, daß diese ermittelte Kluftweite durchaus realistisch ist.

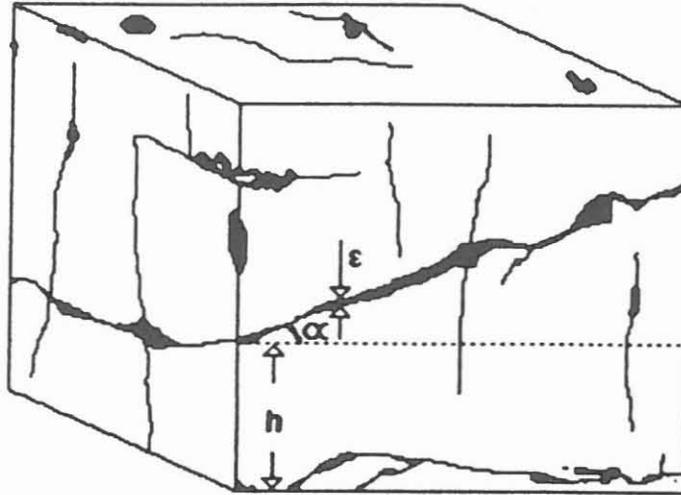
4 Schlußfolgerung

Das Dual Laterolog Meßprinzip ist am besten geeignet, hohe Widerstände zu messen. Die Fehllesungen, die durch den "Groningen-Effekt" hervorgerufen werden, müssen berücksichtigt werden. Die Service-Industrie muß sich weiter bemühen, einen brauchbaren Weg zu finden, um diesem Fehler wirkungsvoll zu begegnen. Die Option, extrem hohe Widerstände messen zu können, ist für Messungen im Kristallin unbedingt notwendig.

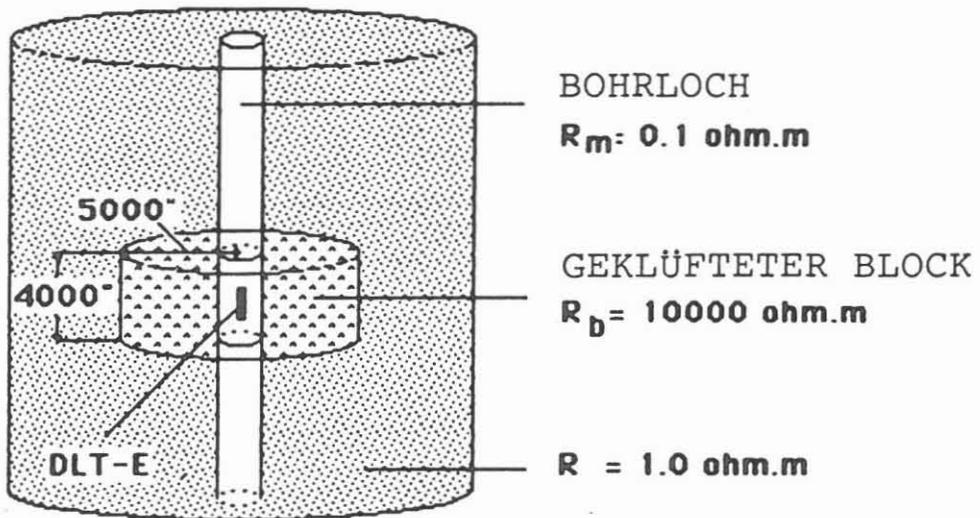
Die Bestimmung der Kluftweite mit Hilfe des Dual Laterologs eröffnet erstmalig eine Aussage über mögliche Kluftporosität. Diese Methode muß weiter erprobt und verfeinert werden.

Literaturverzeichnis

- 1 DRESSER ATLAS, Service Catalogue
- 2 DRESSER ATLAS, Vortrag über Anti-Groningen Sonde, Log Analyst Arbeitskreis
- 3 SCHLUMBERGER, Service Catalogue, Open Hole
- 4 SCHLUMBERGER, Well Evaluation Conference, China 1985
- 5 SIBBIT, A.M., The Dual Laterolog Response in Fractured Rocks, SPWLA Annual Symposium, June 1985



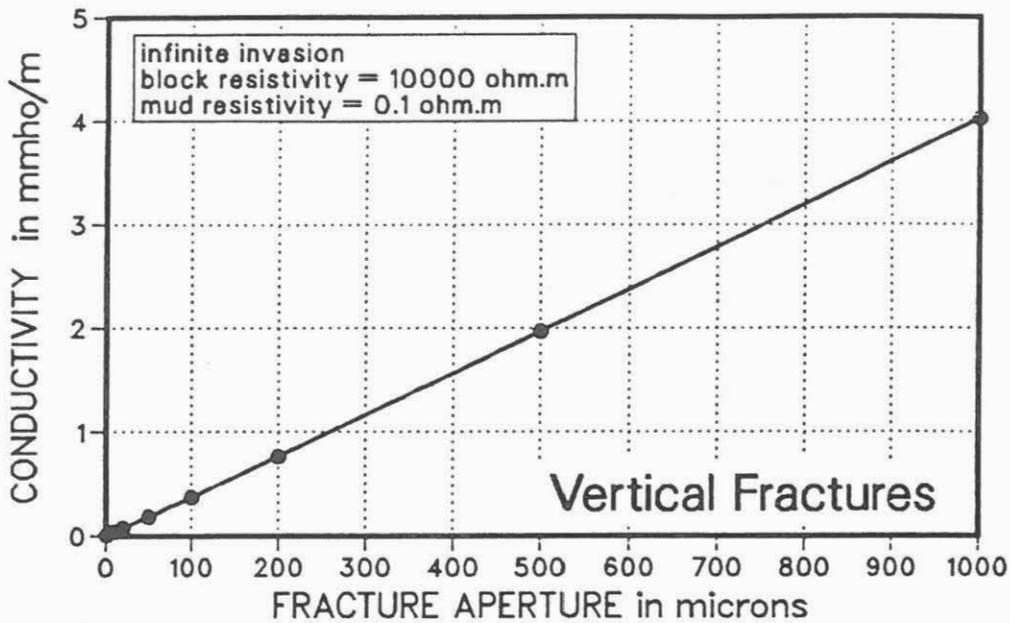
SCHEMA FÜR GEKLÜFTETES GESTEIN



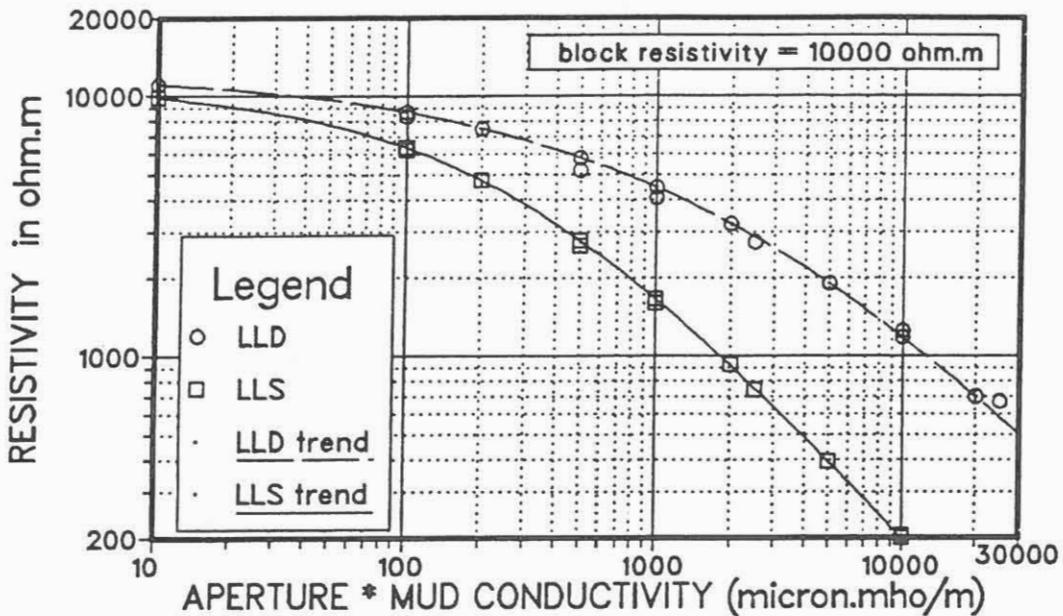
DARSTELLUNG FÜR EIN GERÄT IN EINEN
'FINITE ELEMENT' MODELL
(ohne Skala)

BESTIMMUNG DER KLUFWEITE

KT B
Abb. 15



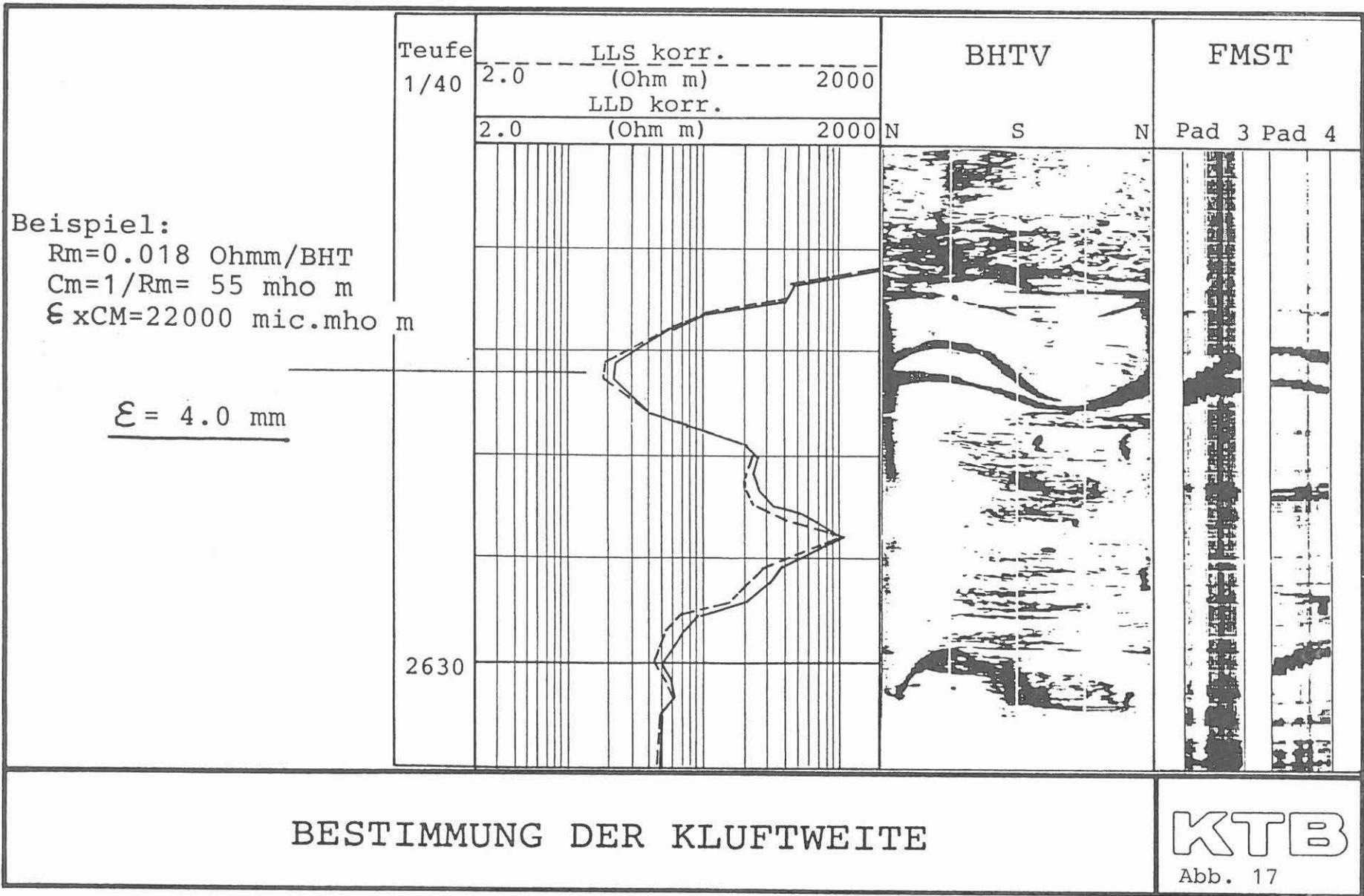
Leitfähigkeitsunterschied ist proportional der Kluftweite (bei konstantem Block- und Spülungswiderstand).



Verhältnis zwischen Widerstand und Kluftweite (ϵ) x Spülungsleitfähigkeit (C_m) in vertikalen Klüften.

BESTIMMUNG DER KLUFWEITE

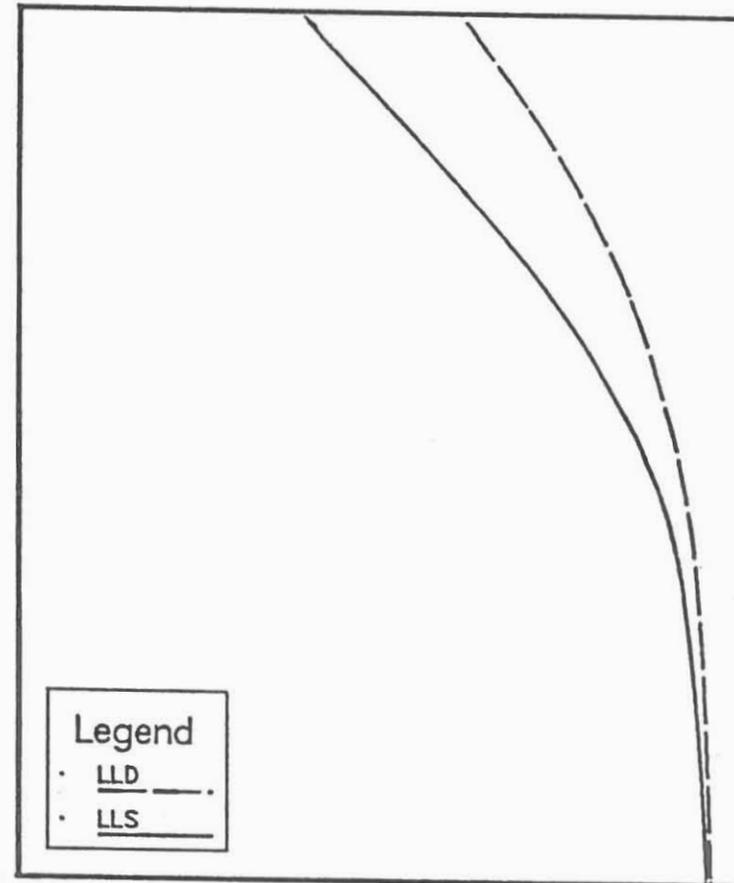
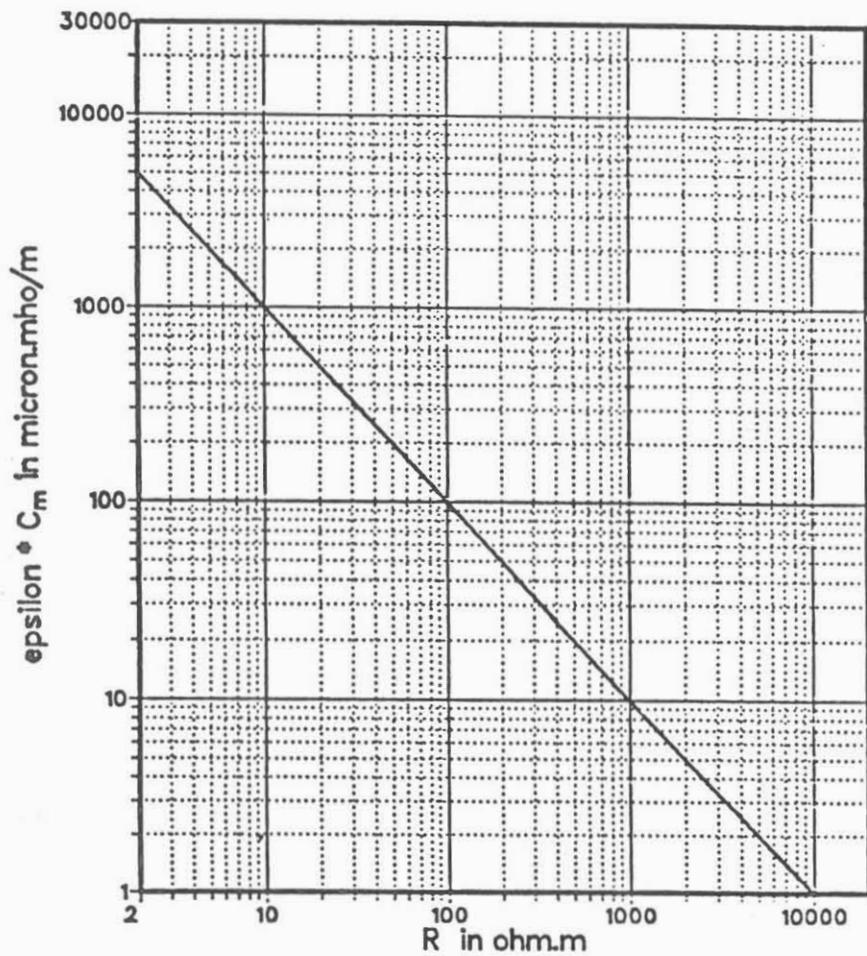
KTB
Abb. 16



BESTIMMUNG DER KLUFTWEITE

KTB

Abb. 17



DUAL LATEROLOG QUICKLOOK OVERLAY

KTBB
Abb. 18

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung