

NEUERE ENTWICKLUNGEN BEI DER KORREKTUR VON KOMPENSIERTEN NEUTRONMESSUNGEN

R. Ramberger

Zusammenfassung

Die Kombination von zwei Detektoren in Neutron Geräten (CNL) dient dazu, unerwünschte Bohrlocheffekte zu vermindern. Dennoch kann die gemessene Porosität unter manchen Voraussetzungen stark von der theoretischen Neutronporosität abweichen. Zwei solcher Fälle wurden untersucht und entsprechende Korrekturen durchgeführt.

Beim Übergang zwischen Schichten verschiedener Porosität reagieren die beiden Zählraten unterschiedlich, so daß Wechselwirkungseffekte auftreten, namentlich ein Überspringen der angezeigten Porosität. Besonders gravierend wirken sich diese Effekte bei dünnen Schichten und/oder schlechten Bohrlochverhältnissen aus. Um sie zu vermeiden, wurde eine Methode entwickelt, wo der Meßpunkt der Short-Spacing-Zählrate gegenüber der Long-Spacing-Zählrate dynamisch verschoben und zugleich beide Zählraten einer Filterung unterworfen werden.

In elliptischen Bohrlöchern fährt das Gerät entlang einer Scheitellinie der großen Achse. Daher muß bei der Bohrlochkorrektur die Exzentrizität berücksichtigt werden. Unter Zuhilfenahme empirischer Formeln für die Zählraten kann man aufgrund theoretischer Überlegungen ein äquivalentes Kaliber ausrechnen. Dieses kann dann zur Bohrlochkorrektur verwendet werden.

1 Einleitung

Das Prinzip einer Neutron-Messung besteht im wesentlichen aus einer Quelle schneller Neutronen und einem Detektor für thermische oder epithermische Neutronen (Abb. 1); PIRSON 1963, PONTECORVO 1941, TITTLE et al. 1951. Die schnellen Neutronen werden durch die vorhandenen Wasserstoffatome auf thermisches Niveau abgebremst. Der gemessene Neutronenfluß bzw. die Zählraten sind daher ein Porositätsindikator. In der zentrierten Anordnung ist der Bohrlocheinfluß sehr groß (DEVAN 1956), daher wird das Gerät an die Bohrlochwand gedrückt (TITTMAN 1966).

Um den noch immer vorhandenen Einfluß des Bohrloches - besonders bei unregelmäßigem Kaliber - zu kompensieren, wurde erstmals von ALLEN et al. 1967 eine Zwei-Detektor-Anordnung vorgeschlagen (Abb. 2). Eine solche Konfiguration ist bei heutigen kompensierten Neutronmessungen (CNL) üblich.

Gemäß ALLEN et al. 1967 und TITTLE & ALLEN 1961, 1966, siehe Abb. 3, fällt bei Standardmeßgeräten der Neutronenfluß entlang des Bohrloches nach etwa 20 cm ab bzw.:

$$\psi(z) = a \frac{e^{-z/L(\phi)}}{z} \quad (1)$$

wobei $L(\phi)$ die porositätsabhängige "Diffusionslänge" und a einen Proportionalitätsfaktor darstellen. Die Größe a ist sowohl bohrlochabhängig als auch schwach porositätsabhängig, ändert sich aber kaum mit der Teufe z . Im Idealfall fällt dieser Proportionalitätsfaktor daher bei der Quotientenbildung heraus und es gibt

$$R = \frac{\psi(z_{\text{long}})}{\psi(z_{\text{short}})} \approx \frac{z_s}{z_e} \cdot e^{-\frac{z_e - z_s}{L(\phi)}} \quad (2)$$

mit R (= Ratio) dem Verhältnis, welches nunmehr nur noch von ϕ abhängt (Abb. 4).

2 Schichtgrenzeffekte

Neuerdings werden die Zählraten selbst wieder interessant. In einer kürzlich erschienenen Arbeit benutzten die Autoren (GALFORD et al. 1986) beide Zählraten, um eine verbesserte

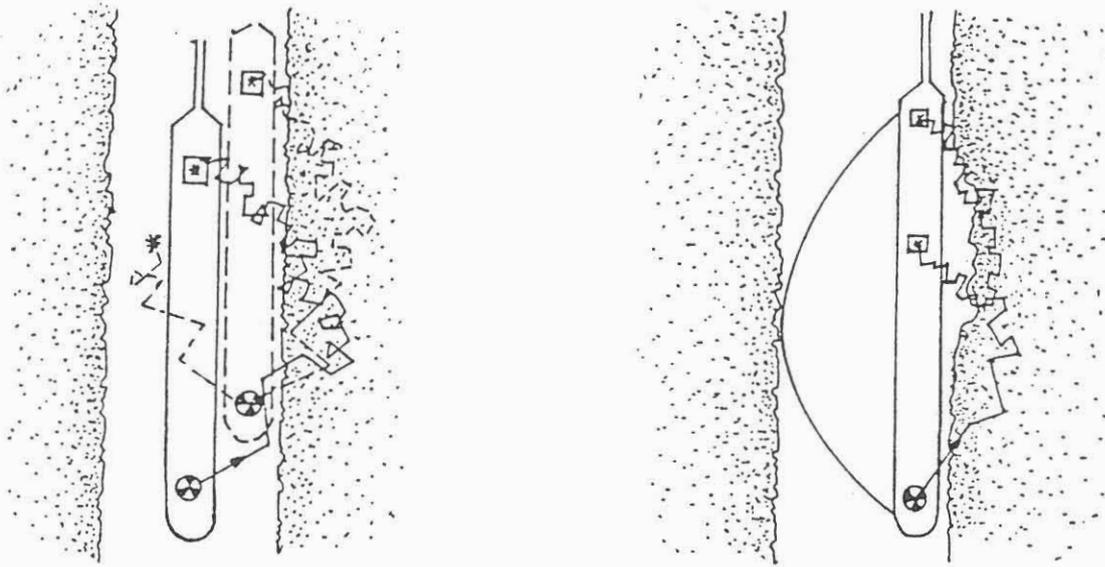


Abb. 1: Neutronen-Meßsonde in zentrierter und dezentrierter Lage. Abb. 2: Prinzip der kompensierten Neutronenmessung mit Hilfe von zwei Detektoren.

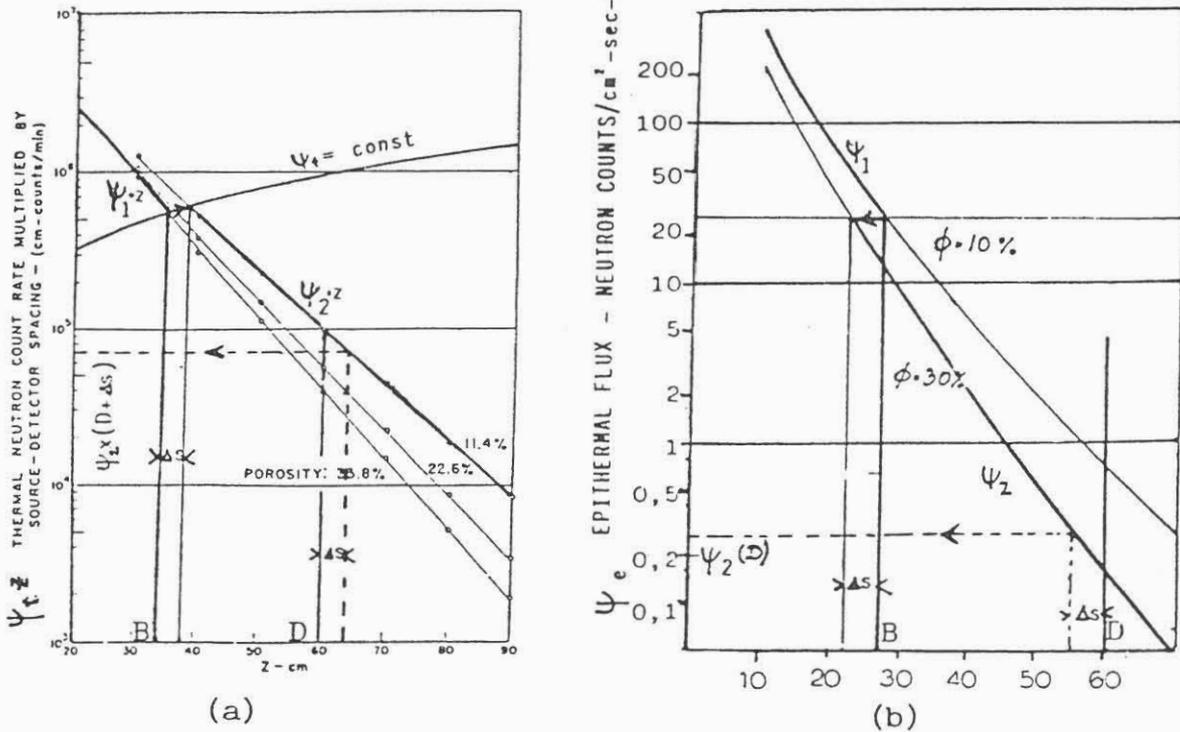


Abb. 3: Darstellungen aus TITTLE & ALLEN (1961, 1966) mit deren Hilfe der Neutronenfluß ψ_2 in einer Distanz D von der Quelle jenseits einer Grenzschicht abgeschätzt werden kann.

Auflösung zu bekommen. Sie gehen dabei von einem konstanten Verhältnis $\alpha = a_e/a_s$ über Bereiche von wenigstens 1 m aus und bekommen scheinbar die erwartete bessere Auflösung. Der Vergleich mit dem MSFL zeigt, daß dies zwar an manchen Stellen der Fall ist, manchmal aber als Überschwingen interpretiert werden muß (Abb. 6). Schon früher wurde nämlich darauf hingewiesen, daß an Schichtgrenzen bzw. bei dünnen Schichten a_{long} zu a_{short} in einem nichtkonstanten Verhältnis stehen -, selbst wenn die vertikale Auflösung der beiden Detektoren durch Glättung der Short-Spacing Zählrate angeglichen wird (RAMBERGER & WAGNER 1986).

Beim Übergang von einer höheren zu einer niedrigeren Porosität (Abb. 5) oder umgekehrt, wechselt der Neutronenfluß von einer Kurve in Abb. 3 zu einer anderen (Punkt B). Damit verschiebt sich die scheinbare Distanz Quelle - Detektor (D) um Δs . Auf dieser Basis kann man zeigen, daß an Schichtgrenzen Long- und Short-Spacing Zählraten nicht nur eine unterschiedliche Auflösung, sondern überhaupt eine unterschiedliche Charakteristik haben (Abb. 7); RAMBERGER & WAGNER 1986. Das sich ergebende Verhältnis LS/SS zeigt Nebenpeaks bzw. Überschwingungen, wie sie auch aus der Praxis bekannt und in der Literatur beschrieben sind (CASE 1982). Eine Verschiebung der Meßpunkte der beiden Detektoren, so daß diese auf die Mittelpunkte des jeweiligen Spacing fallen, verschlechtert die Situation sogar noch (Abb. 8). Besonders gravierend wirkt sich die unterschiedliche Charakteristik bei dünnen Schichten aus (Abb. 9).

Zu diesen theoretisch ableitbaren Effekten kommen außerdem noch Effekte von Bohrlochunebenheiten und von unregelmäßigen Bewegungen des Gerätes hinzu.

Eine Verbesserung besteht nun darin, die Zählraten

- durch simultanes Filtern der Short-Spacing-Rate und Invers-Filtern der Long-Spacing Rate in der Auflösung aneinander anzupassen und
- die so gefilterten Kurven teufenmäßig anzupassen, um die unterschiedliche Charakteristik und unregelmäßige Gerätebewegung auszugleichen (Abb. 10). Die teufenmäßige Anpassung geschieht durch eine automatische Korrelation der logarithmischen Zählraten. Dies entspricht einer dynamischen relativen Verschiebung der Meßpunkte von Short- und Long-Spacing Zählraten zueinander.

Aus den so angepaßten Zählraten werden dann R, und daraus abgeleitet, eine korrigierte Neutronporosität nach Abb. 4 berechnet.

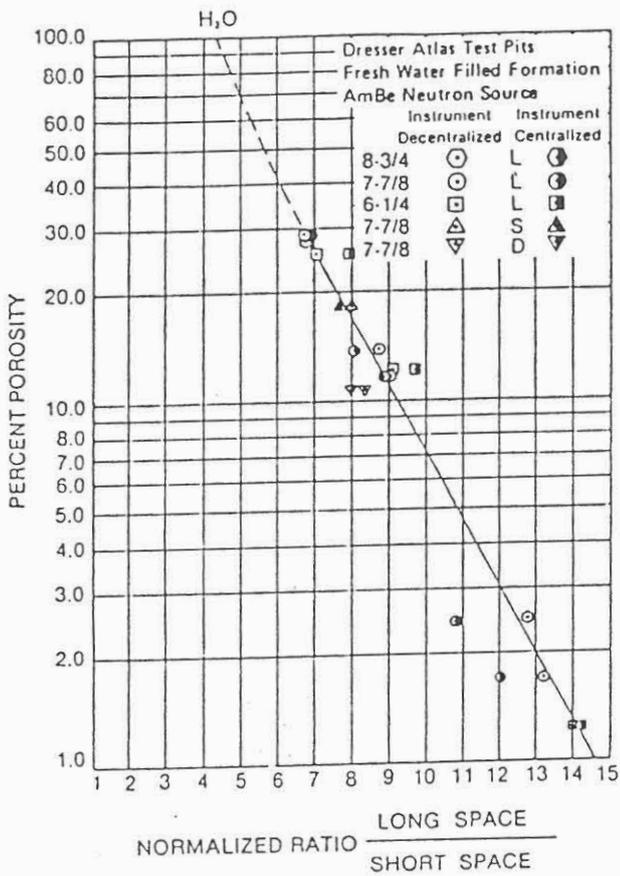


Abb. 4:

Kurve zur Kalibrierung
des CNL-Verhältnisses R;
WILSON & WICHMANN (1974, 1978).

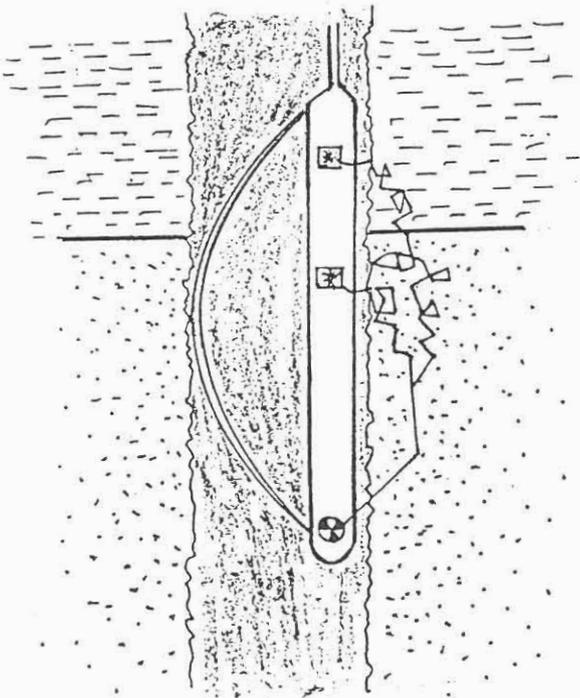
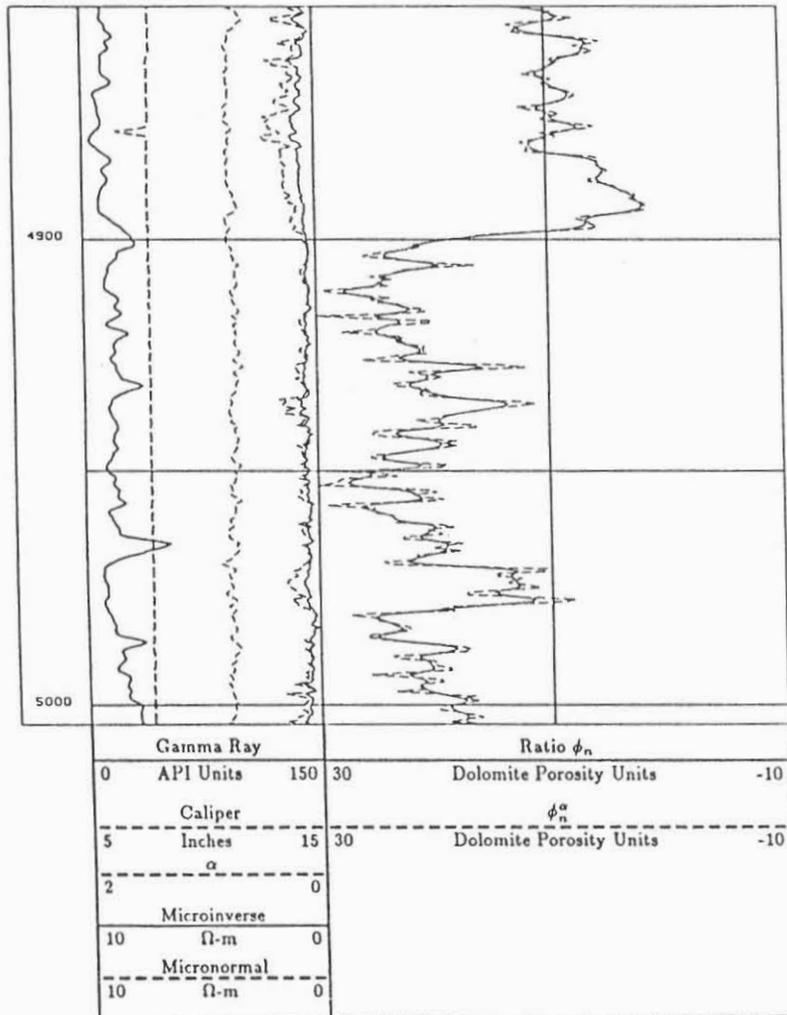
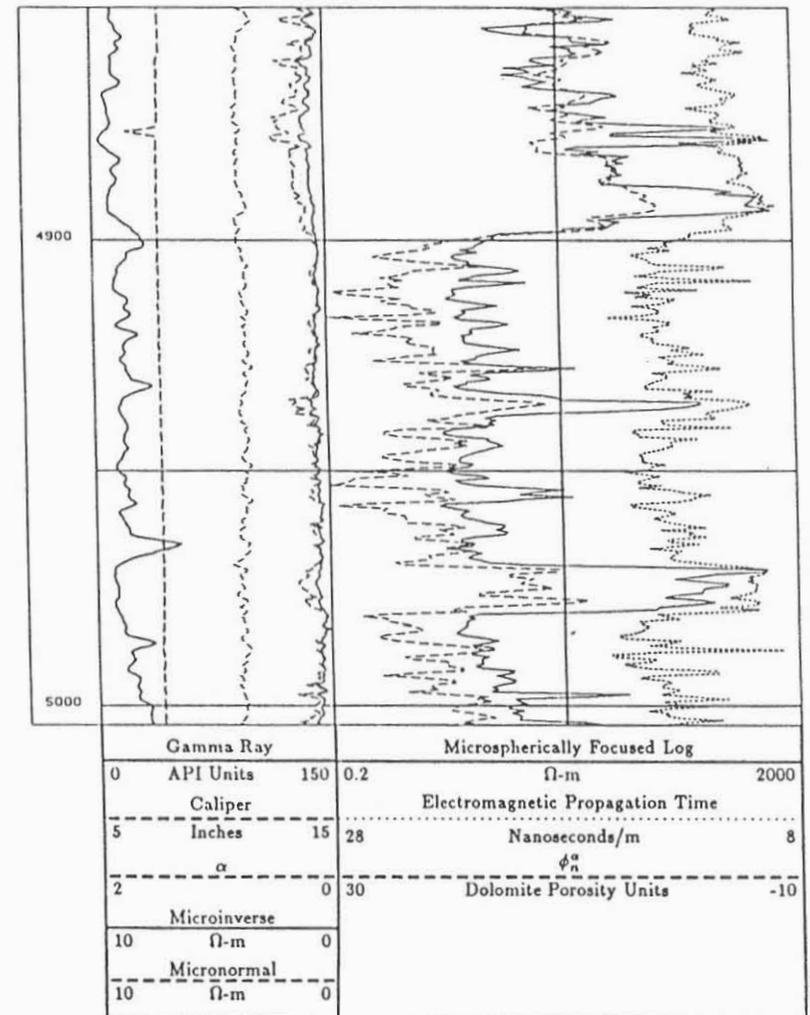


Abb. 5:

Neutronenbahnen, die sich
an der Grenze von zwei
Formationen unterschiedlicher
Porositäten ergeben.



- Enhanced-resolution porosity and ratio-derived porosity comparison in a west Texas carbonate.



- Enhanced-resolution porosity correlation with microspherically focused and electromagnetic propagation logs.

Abb. 6: Beispiel, Erläuterungen siehe Text; GALFORD et al. (1986).

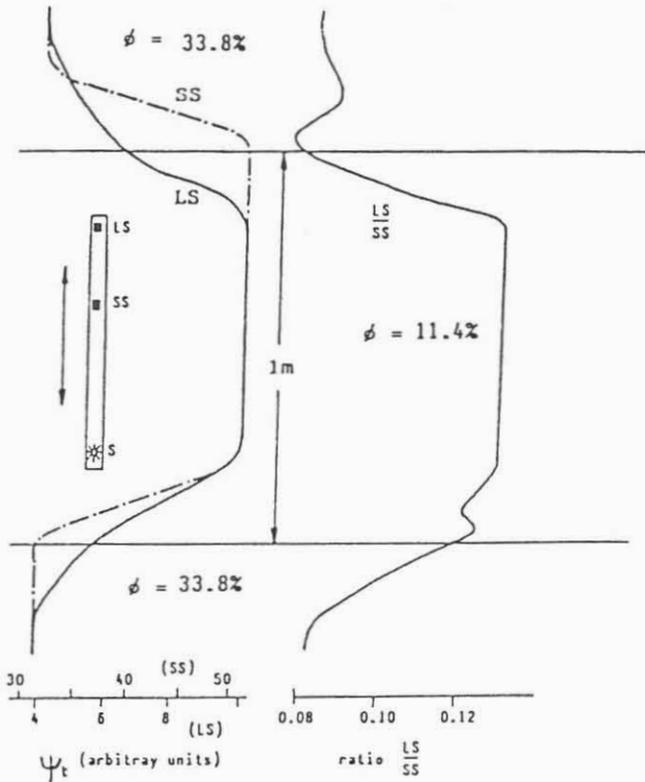


Abb. 7:

Wahrscheinliche Neutronen-Ansprachen auf Schichtgrenzen. SS und LS sind normalisiert dargestellt, die Meßpunkte sind auf SS-Position bezogen.
 (---) Short-Spacing-Zählrate, SS
 (—) Long-Spacing-Zählrate, LS

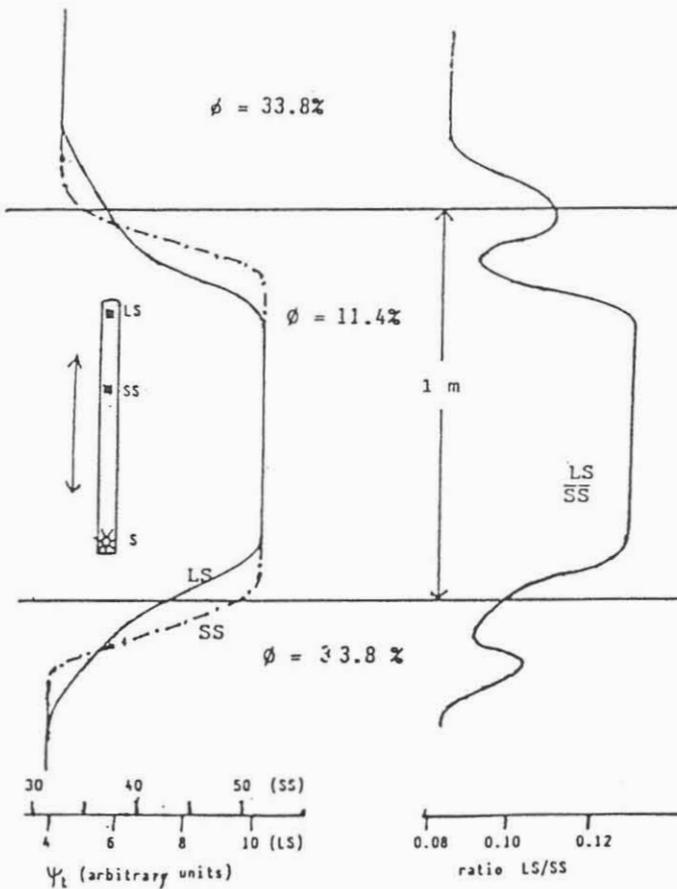


Abb. 8:

Wahrscheinliche Neutronen-Ansprache nach einer konstanten Tiefenverschiebung einer Zählrate. Der Meßpunkt fällt auf den Mittelpunkt des jeweiligen Spacings.

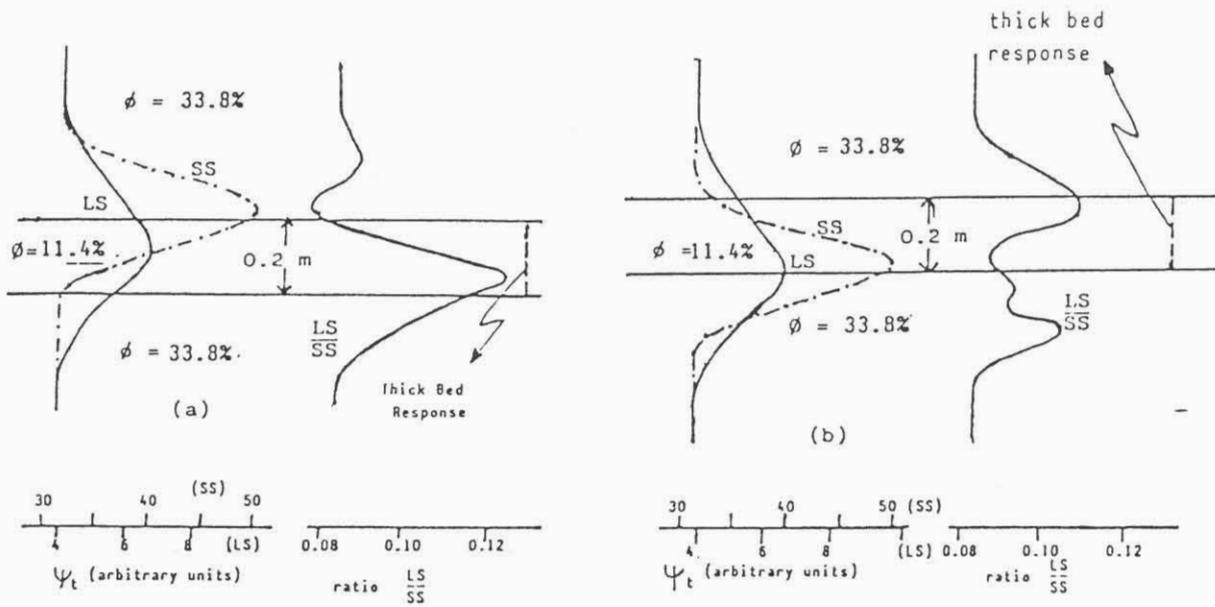


Abb. 9: Wahrscheinliche Neutronen-Ansprache für geringe Schichtmächtigkeit.
 (a) - Die Meßpunkte befinden sich in SS-Position.
 (b) - Die Meßpunkte befinden sich im Mittelpunkt des jeweiligen Spacings.

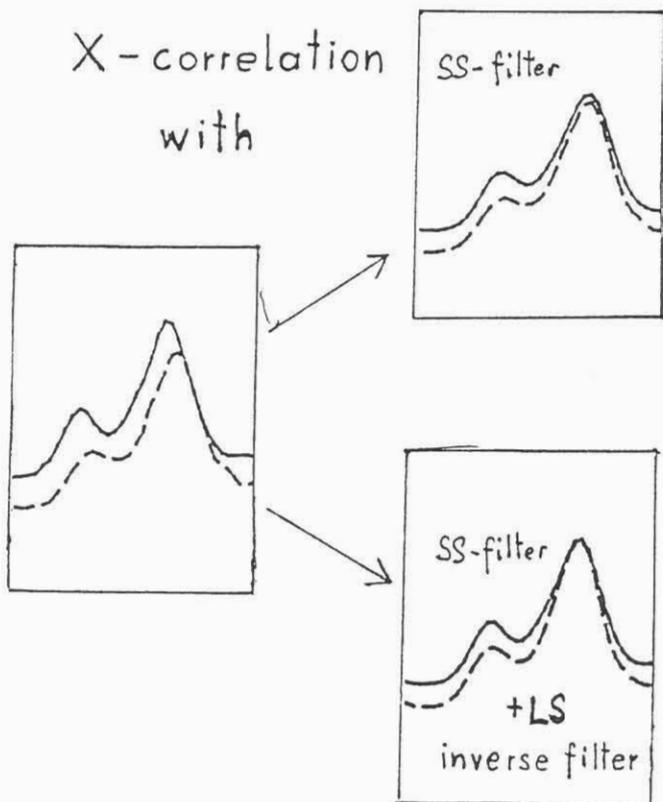


Abb. 10:
 Filterung und verbesserte Tiefenkorrelation der Zählraten vor der Bestimmung des Verhältnisses R.

Beispiele

Abb. 11 und 12 zeigen Vergleiche der rückgerechneten Porositäten (NPHI) mit der direkt aufgezeichneten Porosität (CNL). Besonders in Abb. 11 sind viele der hochfrequenten Ausschläge (Grenzeffekte) verschwunden, und NPHI läßt sich wesentlich besser zum Laterolog korrelieren. Die rückgerechnete Porosität hat die Tiefe der Long-Spacing Zählrate und daher meist eine Verschiebung gegen die direkt gemessene Neutronporosität. Deshalb ist sie in Abb. 12 auch gegen die LL3-Kurve verschoben.

In beiden Beispielen wurde ein Dresser-Atlas 2413 CNLog verwendet. Als Zählraten wurden die Bandaufzeichnungen genommen, die leider eine gewisse Dämpfung durch die Meßelektronik beinhalten. Daher kann man an manchen Stellen auch eine etwas schlechtere Auflösung der korrigierten gegenüber der gemessenen Neutronporosität beobachten (Punkte A in Abb. 12). In Zukunft sollte daher versucht werden, die beschriebene Prozedur auf die ungedämpften Zählraten anzuwenden.

3 Ovale Bohrlöcher

Auch Form und Größe des Bohrlochs wirken sich auf das Verhältnis der Proportionalitätsfaktoren $a_{\text{long}}/a_{\text{short}}$ aus. Für kreisrunde Bohrlöcher stehen diese Korrekturen in Form der bekannten Charts zur Verfügung. Ist das Bohrloch hingegen oval, dann schmiegt sich das Gerät im allgemeinen besser an die Bohrlochwand an als bei einem kreisrunden Querschnitt. Daher sind die Wege der Neutronen auf der entscheidenden Anpreß-Seite weniger spülungsbeeinflusst (Abb. 13).

In einer Modellrechnung kann man bei gegebener Porosität \emptyset das Verhältnis der gemessenen Zählraten für eine beliebige Bohrlochform wie folgt bestimmen:

Der Querschnitt des Bohrloches sei durch die Funktion $r(\vartheta)$ gegeben, wo r der Abstand der Bohrlochwand in Richtung des azimutalen Winkels ϑ ist ($\vartheta = 0$ sei die Richtung des Anpreßpunktes). Die Zählrate N setzt sich aus den über alle Wege integrierten Zählraten zusammen (Abb. 13). Charakterisiert man einen Weg durch das mittlere Azimuth ϕ , so ist die mittlere dazugehörige Zählrate $n(\vartheta)$ in erster Näherung so groß, als ob sich das Gerät im Zentrum eines kreisförmigen Loches mit dem Radius $r(\vartheta)$ befände. Daraus ergibt sich:

$$N(\phi) = \int n(r(\vartheta), \phi) d\vartheta \quad (3)$$

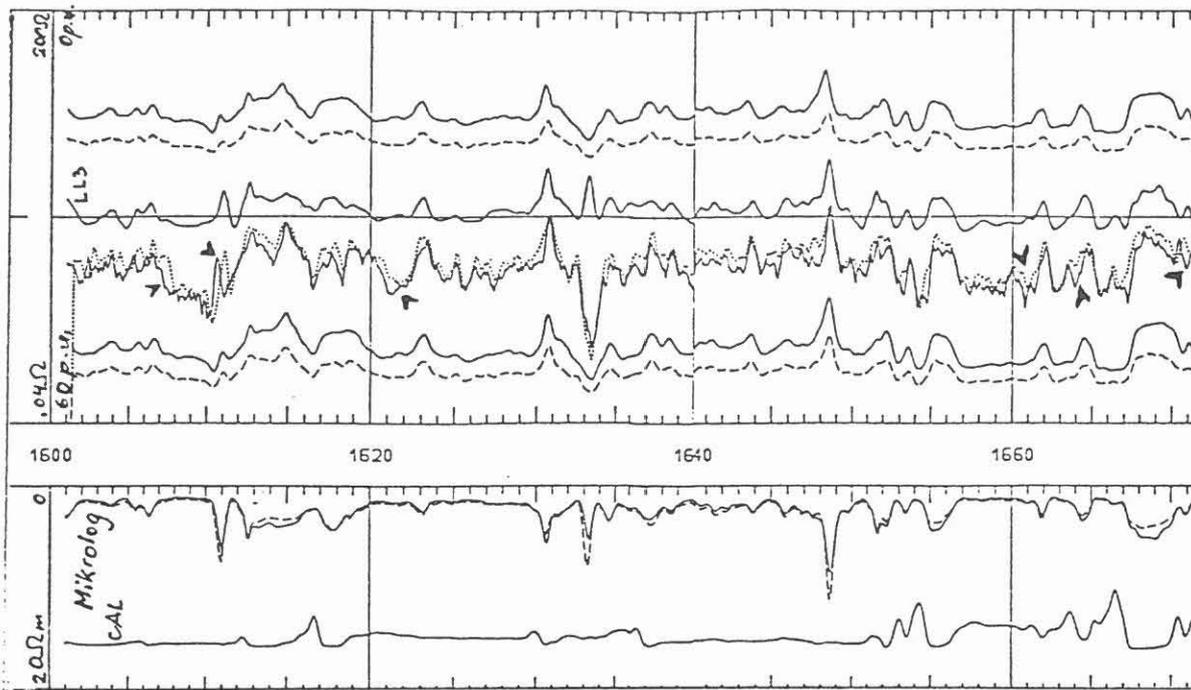


Abb. 11: Vergleich der rückgerechneten CNL-Porosität (NPHI) mit den Originaldaten (CNL) sowie tiefenkorrelierten Zählraten (NSC, NLC) mit den Originalzählraten (SSN, LSN). Deutliche Unterschiede sind mit A gekennzeichnet. Zum Vergleich sind außerdem Mikrolog- und Laterolog-Aufzeichnungen aufgetragen.

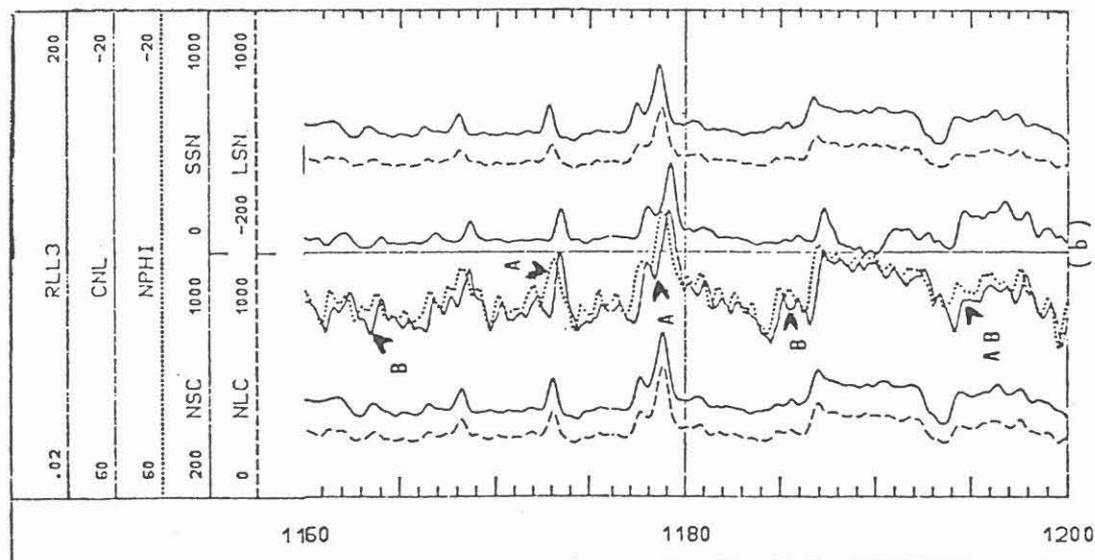


Abb. 12: Dynamisch tiefenkorrelierte Zählraten (untere Aufzeichnung) sowie rückgerechnete Porosität (punktierte Kurve).

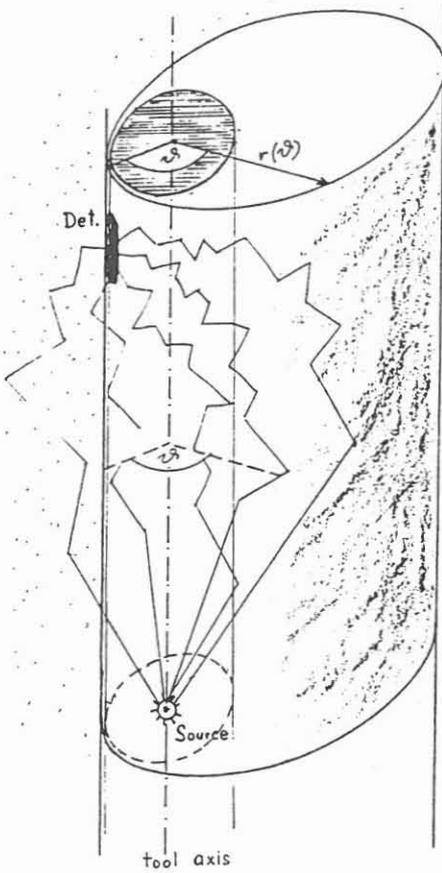


Abb. 13: Neutronen-Meßsonde und Neutronenbahnen in einem ovalen Bohrloch.

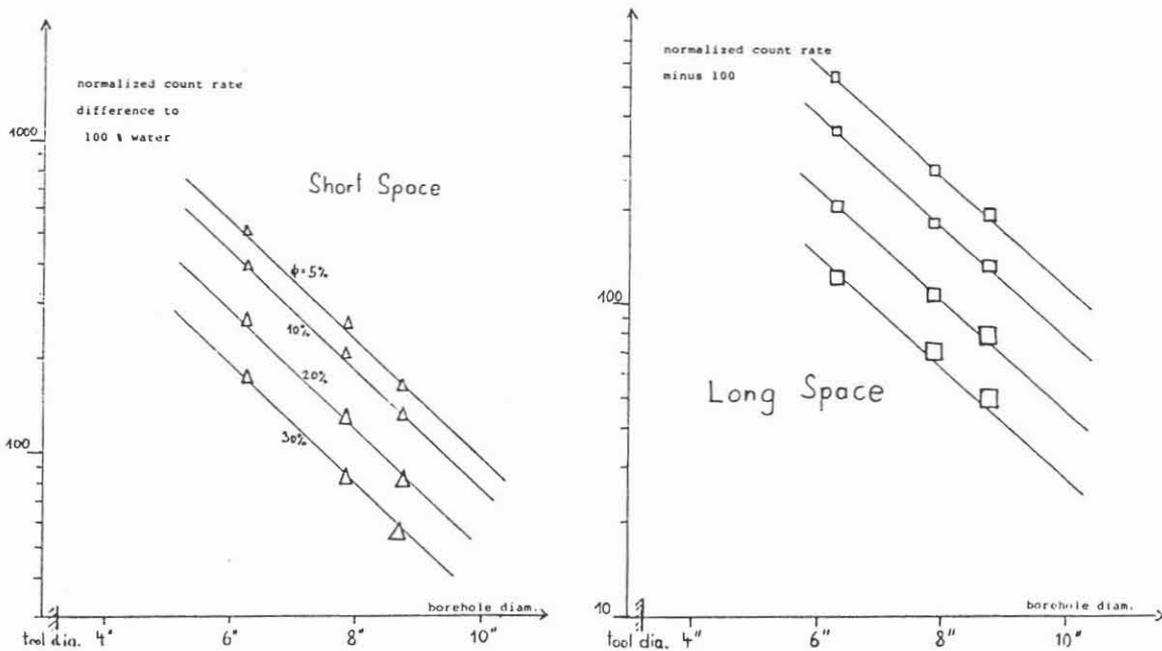


Abb. 14: Bestimmung der Zählraten basierend auf der Funktion $n = n_0 + K(\phi) \cdot 10^{-r/L_0}$

und:

$$R = \frac{\int n_{\text{long}}(r(\vartheta), \phi) d\vartheta}{\int n_{\text{short}}(r(\vartheta), \phi) d\vartheta} \quad (4)$$

Bei der Quotientenbildung werden wieder Abweichungen kompensiert, die aufgrund der vereinfachten Annahme $n = n(r(\vartheta), \phi)$ auftreten.

Die experimentellen Daten für die Zählraten am zentrierten Geräte (WILSON & WICHMANN 1974, 1978) lassen sich gut durch eine Funktion der Form:

$$n = n_0 - K(\phi) \cdot 10^{-r/r_0} \quad (5)$$

beschreiben (Abb. 14). Wenn Gl. (5) in Gl. (4) eingesetzt wird, kann man für eine gegebene Bohrlochgeometrie eine Beziehung zwischen R und Porosität ϕ erhalten.

Für den Fall elliptischer Bohrlöcher wurde R für einen weiten Bereich von langen und kurzen Kalibern bei verschiedenen Porositäten ϕ mit dieser Methode berechnet. Trägt man diese Werte in Abhängigkeit von den beiden Kalibern in ein Diagramm ein, so zeigt sich, daß sich die Linien eines konstanten Verhältnisses (ΔR) für verschiedene ϕ fast decken (natürlich mit jeweils anderen Werten von R). Diese Linien sind zugleich Linien gleicher Korrekturwerte. Man kann daher mit Hilfe eines 4-Arm-Kalibers die Korrektur von ϕ einfach auf die normale Kaliberkorrektur mit einem äquivalenten Kaliber zurückführen (Abb. 15).

Zunächst mag es vielleicht überraschen, daß das äquivalente Kaliber mit steigendem langem Kaliber sinkt. Der Grund ist einfach, weil nur die Umgebung des Pads von Bedeutung ist, und diese wird durch sinkende Krümmungsradien mit steigender Exzentrizität charakterisiert.

Beispiele

In Abb. 16 ist das Bohrloch oben stärker oval, die Kaliber liegen - mit Ausnahme der ausgekesselten Bereiche - zwischen 18" und 22". Gegenüber einer mit einem konstanten Kaliber von 19" berechneten CNL-Porosität ist die nach einem Chart in Abb. 15 berechnete Porosität daher im oberen Bereich um etwa 3 % höher. Dieses Ergebnis paßt auch besser zur Sonic-Porosität.

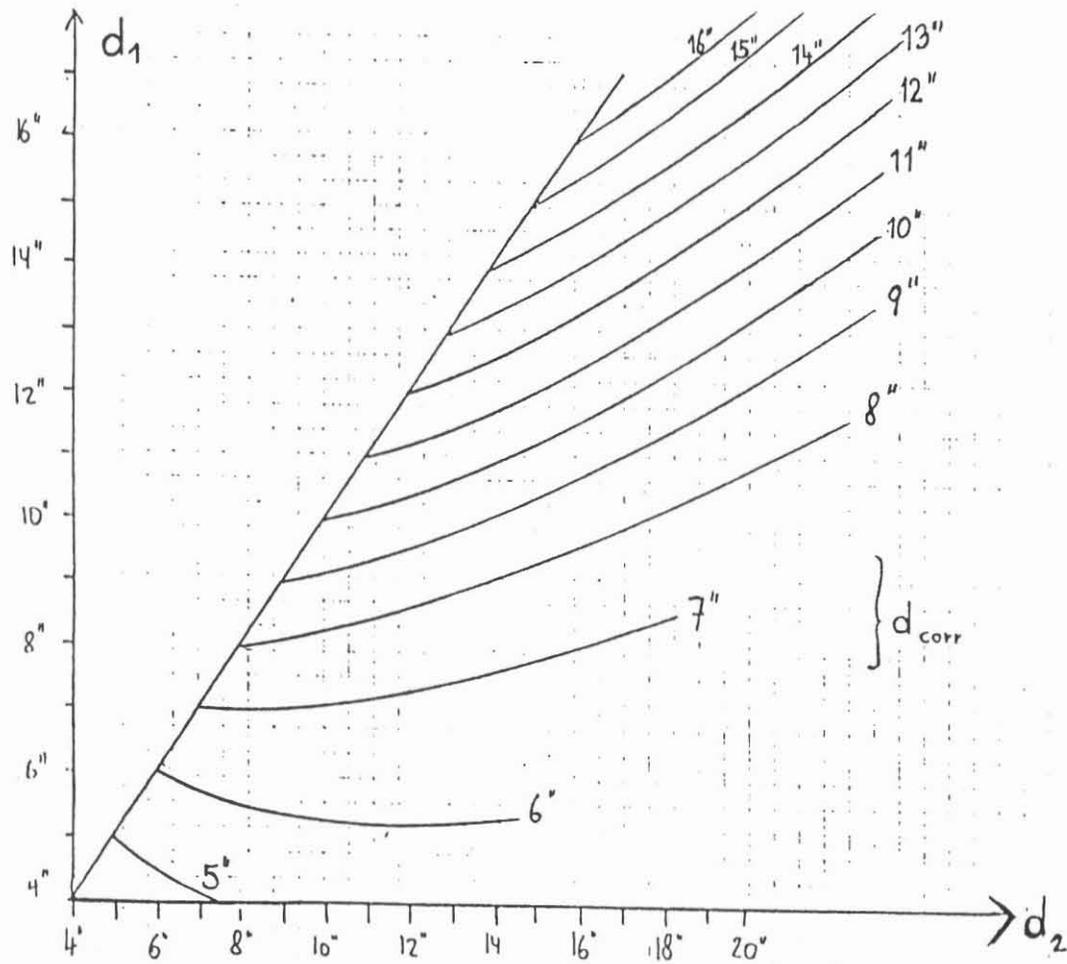


Abb. 15:

Diagramm zur Bestimmung eines "äquivalenten Kreisdurchmessers" einer elliptischen Bohrung. Die Kurven entsprechen einem konstanten Verhältnis R bei jeder gegebenen Porosität.

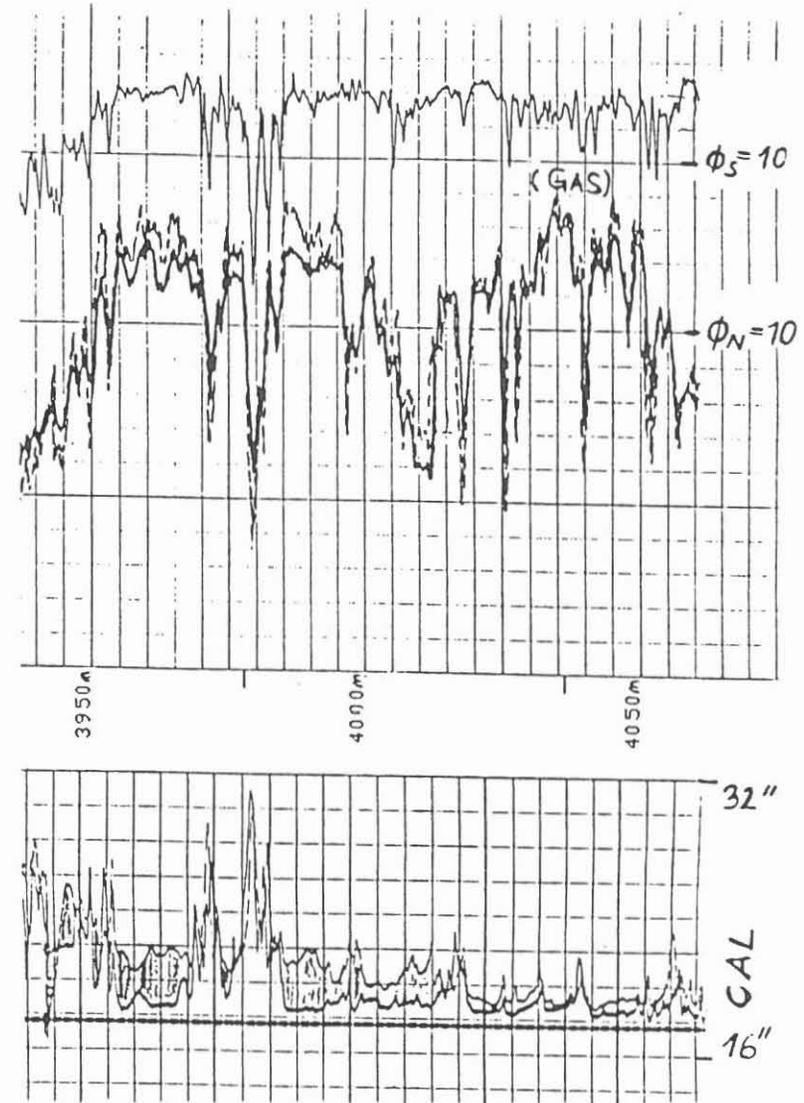


Abb. 16:

Beispiel zu Abb. 15. Gestrichelte Kurve entspricht konstanten Durchmesser, ausgeglichene Kurve wurde mit der CNL-Porosität für einen Abb. 15 ermittelt.

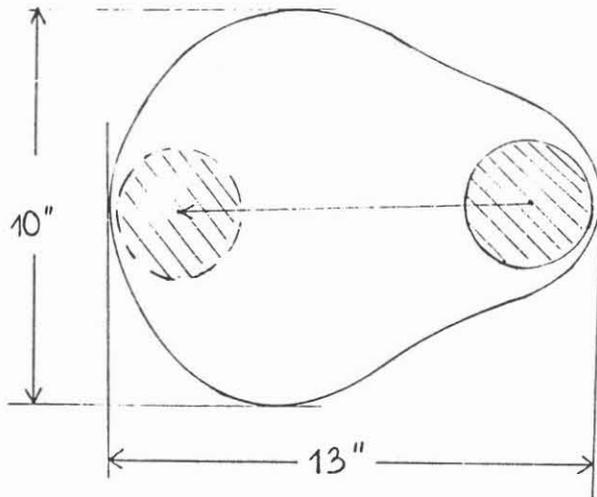


Abb. 17: Mögliche Lage einer Meßsonde in einem "Schlüsselloch".

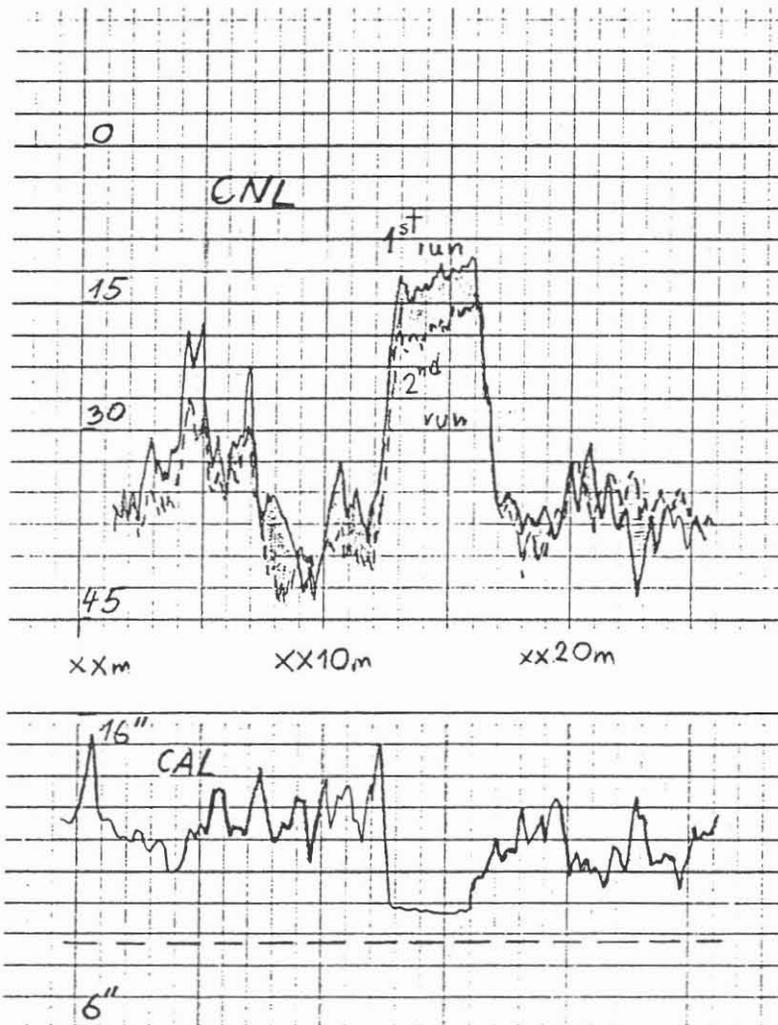


Abb. 18: Meßergebnisse eines 1. und 2. CNL-Runs sowie CAL aus einer Bohrung analog Abb. 17.

De facto treten leider oft unsymmetrische Bohrlochquerschnitte, z. B. Schlüssellocher auf. Da diese Situation oft durch eine Ablenkung des Bohrlochs entsteht, wird das Gerät meist an der Stelle der stärksten Krümmung zu liegen kommen. In diesem Fall entspricht das Ergebnis dem elliptischen Fall mit extremer Exzentrizität. In manchen Fällen kann das Gerät allerdings gerade an der gegenüberliegenden Stelle laufen, und dann entspricht die Situation eher einem kreisrunden Loch mit einem Kaliber, das etwas größer als das kurze Kaliber ist (Abb. 17).

Ein solcher Fall ist dann klar zu erkennen, wenn im Repeat-Run die CNL-Porosität um einen konstanten Wert verschoben ist (Abb. 18). Die Differenz zwischen den beiden Runs von etwa 6 % kommt durch ein Schlüsselloch der Größe von etwa 10" x 13" zustande (Abb. 17). Das effektive Kaliber beträgt im ersten Run 9" (vgl. Abb. 15) und im zweiten etwa 14".

4 Schlußfolgerungen

- Die Verwendung des Zählratenverhältnisses R kompensiert Bohrlocheinflüsse in vielen Fällen. Die volle Information der beiden Zählraten sollte nicht vernachlässigt werden.
- Bei Schichtgrenzen und an dünnen Schichten haben die beiden Zählraten eine unterschiedliche Charakteristik, daher treten Schwingungen in der direkt gemessenen CNL-Porositätskurve auf. Durch Filtern und Teufenangleichen gelingt es, eine bessere Schicht-Definition zu erreichen.
- In ovalen Bohrlöchern kann man mit Hilfe eines 4-Arm-Kalibers einen äquivalenten Durchmesser berechnen und so eine verbesserte Kaliber-Korrektur durchführen. Wenn es sich allerdings um ein unsymmetrisches Loch handelt, ist ein äquivalentes Kaliber nicht eindeutig ableitbar.

Dankadresse

Der Autor möchte sich bei der Firmenleitung der ÖMV, die diesen Vortrag ermöglicht hat, herzlich bedanken.

Literatur

- ALLEN L.S., TITTLE C.W. et al., 1967: Dual-spaced Neutron Porosity Log. - JPT, pp. 1351-1362.
- CASE C.R., 1982: CNT-G Tool Response to Bed Boundaries. - SWPLA 23rd Symp., paper L.
- DEWAN J.T., 1956: Neutron Log Correction Charts for Borehole Conditions and Bed Thickness. - Petroleum Trans. AIME 207/2, pp. 50-58.
- GALFORD J.E., FLAUM C., GILCHRIST Jr W.A. & DUCKET S.W., 1986: Enhanced Resolution Processing of Compensated Neutron Logs. - 61st Ann. Technical Conf. SPE, paper 15541.
- PIRSON S.J., 1963: Handbook of Well Log Analysis. - Prentice Hall, N.J.
- PONTECORVE B., 1941: Neutron Well Logging. - Oil & Gas J. 40/18, 32 p.
- RAMBERGER R. & WAGNER K., 1986: Dynamic Depth Shift of the Count Rates in Compensated Neutronlogs. - 10th Europ. Form Eval. Symp., paper I.
- TITTLE C.W. et al., 1951: Neutron Logging of Drill Holes: The Neutron Neutron Method. - Geophysics 16/4, 626 p.
- TITTLE C.W. & ALLEN L.S., 1961: Theory of Neutron Logging I & II. - Geophysics 26/1, pp. 27-39.
- TITTLE C.W. & ALLEN L.S., 1966: Theory of Neutron Logging I & II. - Geophysics 31/1, pp. 214-224.
- TITTMAN J. et al., 1966: The Sidewall Epithermal Neutron Porosity Log. - JPT, pp. 1351-1362.
- WILSON B.F. & WICHMANN P.A., 1974: The Compensated Neutron Log and the Effect of Environment. - SPE (AIME) paper 5118.
- WILSON B.F. & WICHMANN P.A., 1978: The Compensated Neutron Log and the Effect of Environment. - SPWLA 19th Symp., paper Q.