

# Deutung bohrlochgeophysikalischer Messungen aus dem Blake Ridge im NW Atlantik

Harald Lindner, Carsten Pretzschner, Maureen Woyde, Institut für Geophysik, Freiberg

## 1 Einleitung

Zwischen dem Blake Ridge und dem Blake Plateau im NW-Atlantik wurden im Zuge des ODP- Projektes eine Reihe von Bohrungen zur Untersuchung von Gashydraten abgeteuft und sowohl geologisch als auch geophysikalisch untersucht (Guerin et al., 1999). Im Beitrag erfolgt eine spezielle Betrachtung der Sites 994, 995 und 997 von Leg 164 (Bild 1). Anlaß ist das Fehlen des *Bottom Simulating Reflector* (BSR) als impedanzgebundenen Indikator

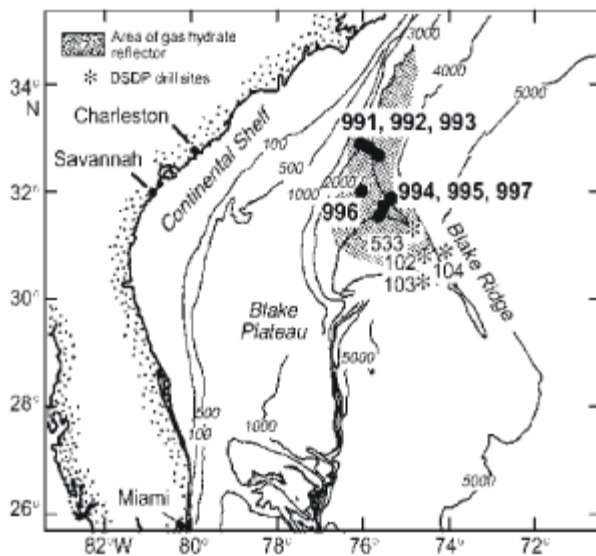


Bild 1 Lage der Bohrungen von ODP-Leg 164

zwischen der unteren Gashydratgrenze und freiem Gas in den seismischen Messungen im Bereich von Site 994 (Bild 2). Da sich mit elektrischen Verfahren Gashydrate nachweisen lassen, erscheint eine Reinterpretation vorhandener Sonic-Logs lohnend.

## 2 Genutzte Logs

Aus den gemessenen Logs (Paull et al., 1996) wurden diejenigen ausgewählt, welche sich zur Lithologieerkennung und zur Berechnung gas-hydratbetonender Parameter eignen (Bild 3). Insbesondere wird auf vorliegende Sonic-Messungen zur Ableitung von  $v_p$  und  $v_s$  verwiesen. Die Betonung bei der Interpretation lag auf dem Tiefenbereich von 175 ... 600 mbsf, in dem sowohl die Fortsetzung des BSR als auch die der GHSZ (Gashydratstabilitätszone) geprüft werden soll.

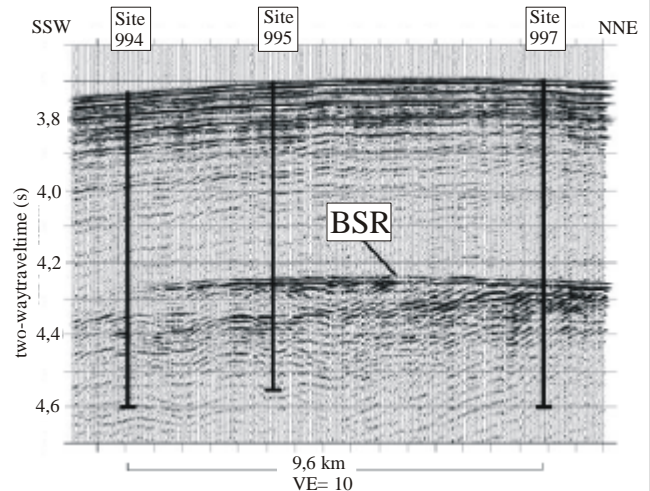


Bild 2 Seismischer Zeitschnitt längs der Sites 994, 995, 997 (Paull et al., 1996)

## 3 Deutung der Meßergebnisse

Die qualitative Betrachtung der Logs von Site 994 in Bild 3 läßt im seismisch detektierten Tiefenbereich von Site 995 von etwa 420 mbsf bereits Anzeichen für einen BSR erkennen. Diese betreffen vor allem den deutlichen Rückgang im Widerstand  $R_a$  um etwa  $0,2 \Omega\cdot m$  und in der P-Wellengeschwindigkeit  $v_p$  um  $0,1 \text{ km/s}$ .

### 3.1 Widerstand und Porosität

Die höheren Widerstandswerte oberhalb von 430 m kennzeichnen das Auftreten von Gashydraten, die als Isolatoren wirken. Daher liefert die formale Anwendung der Archie-Gleichung mit einphasigem Porenraum hier zu niedrige Porositäten. Unter Berücksichtigung von Wasser und Gashydrat im Porenraum führt die modifizierte Archie-Gleichung nach Paull et al., 1996 zu einer aus elektrischen Logs ermittelten Gashydratsättigung

$$S'_G = 1 - (R_0 / R_t)^{1/n} \quad (1)$$

$R_t$  gemessener Widerstand (Laterolog)

$n = 1,93386$  (nach Pearson et al., 1983)

$$R_0 = 0,8495 + 2,986 \cdot 10^{-4} z \quad (2)$$

Widerstands/Tiefenfunktion ohne Gashydrate sowie zu einer korrigierten Archie-Porosität

$$\Phi_{\text{korr}} = \Phi_{\text{Archie}} / (1 - S'_G) \quad (3)$$

Im Ergebnis ergibt sich eine bohrlochgeophysikalisch nachgewiesene Gashydrat-Untergrenze mit deutlichen Parameteränderungen bei 430 mbsf (*Bild 4*).

- korrigierte Archie-Porosität: 60 % auf 55 %
- Gashydratsättigung: 8 % auf 2 %

### 3.2 Elastische Moduli

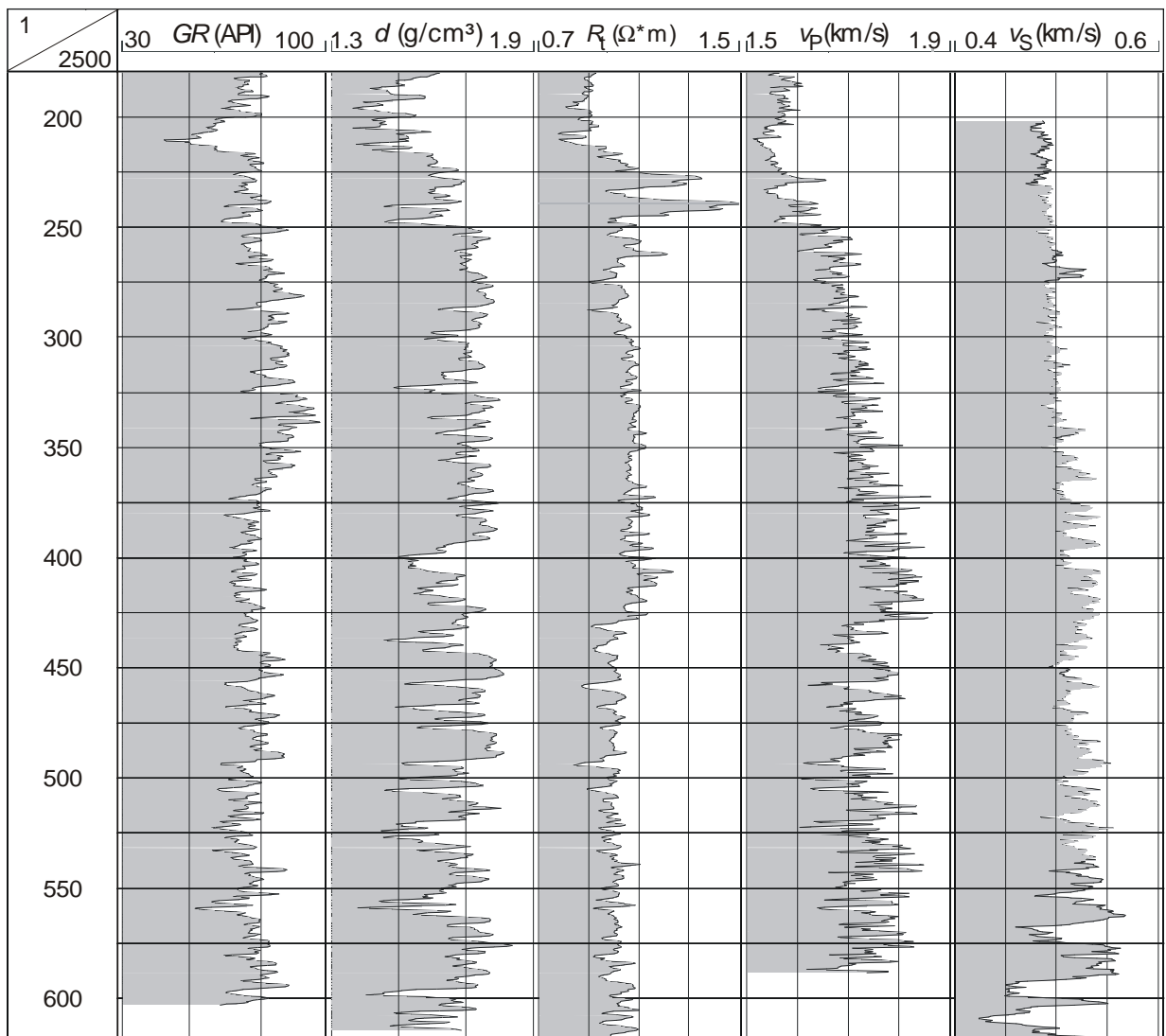
Für die Bewertung der erbohrten Sedimente wurde zunächst aus den  $v_p$ ,  $v_s$ ,  $d$  Logs der Kompressionsmodul  $K_{log}$  bestimmt (*Bild 5*). Die Matrixeigenschaften der vorliegenden Sand- Tongemische lassen sich durch die *Voigt-Reuss-Hill-Relation* beschreiben.

$$K_m = \frac{1}{2} \left[ gK_c + (1-g)K_s + \frac{K_s K_c}{gK_s + K_c(1-g)} \right] \quad (4)$$

$m$  Matrix,  $s$  Sand,  $c$  Ton,  $\gamma$  auf 1 normierte Werte der *API*-Einheiten des Gamma-Logs

*Tabelle 1 Parameter nach Lee et al., 1996*

Komponente	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$v_p$ km/s	$v_s$ km/s	$K$ 10 <sup>9</sup> Pa	$G$ 10 <sup>9</sup> Pa
Ton-Matrix	2,60	3,4	1,6	21,2	6,667
Sand/CaCO <sub>3</sub> - Matrix	2,70	5,98	4,04	38,0	44,0
Gashydrat	0,90	3,3	1,68	6,414	2,54
Gas	0,30	0,849		0,216	
Wasser	1,05	1,6		2,688	



*Bild 3 Bohrung 994c: Ausgewählte Logs, 1-4 Schlumberger, 5 LDEO-SST*

### 3.2.1 Modell von Wood

Hier wird der Kompressionsmodul unkonsolidierter Sedimente ohne Gashydratanteile betrachtet (Wood, 1941). Wir erwarten daher deutliche Abweichungen von  $K_{log}$ .

$$K_{Wood} = 1 / \left( \frac{\Phi_{korr}}{K_w} - \frac{1 - \Phi_{korr}}{K_m} \right) \quad (5)$$

w Fluid

$$\Phi_{korr} = \frac{1}{4,25} \log \frac{K_m}{K_f} \quad (6)$$

d.h. bei  $K_m = K_f$  ist  $F = 0$ . Im Gegensatz zu Wood formuliert Gassmann, 1951 für den Kompressionsmodul

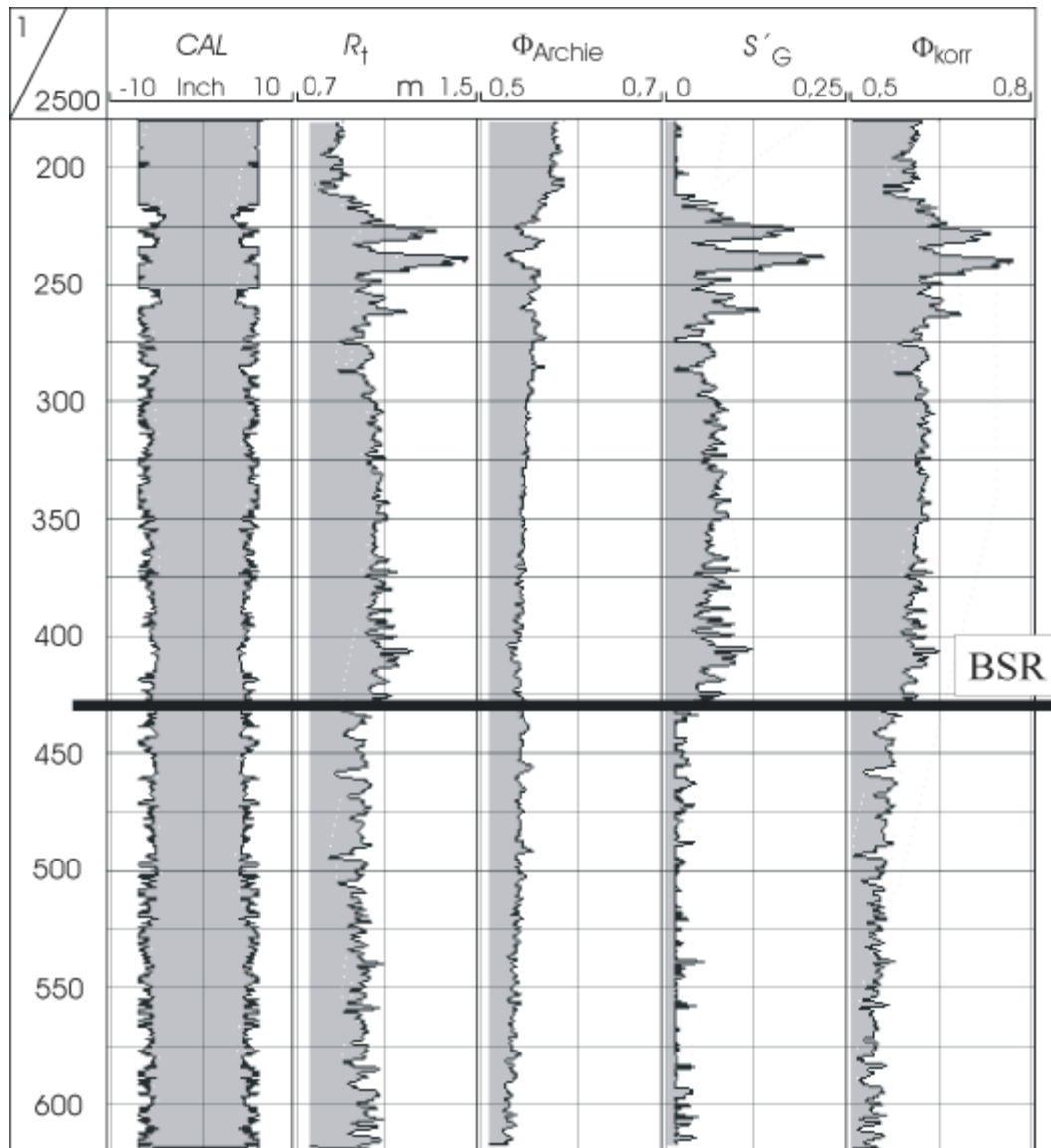


Bild 4 Bohrung 994c: Kaliber, Widerstand, Porositäten und Gashydratsättigung

### 3.2.2 Modell von Gassmann/Hamilton

Dieses beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Kompressionsmodul des trockenen Sedimentes  $K_f$  (frame bulk modulus) und der korrigierten Porosität  $F_{korr}$ . Für typische Sedimente der Blake Ridge Region findet Hamilton, 1971 ohne die Berücksichtigung der Gashydrate

$$K_{Gass} = K_m \frac{K_f + Q}{K_m + Q}; \quad Q = \frac{K_w (K_m - K_f)}{\Phi_{korr} (K_m - K_w)} \quad (7)$$

Der Vergleich der  $K_{log}$ -Werte mit denen der o.g. Modelle zeigt nach Bild 5 folgenden Trend:

- $K_{log} > K_{Wood}$ ,  $K_{Gass}$ : Indikator für Gashydrate
- $K_{log} < K_{Wood}$ ,  $K_{Gass}$ : Indikator für freies Gas

Dabei läßt sich zwischen  $K_{Wood}$  und  $K_{Gass}$  kein nennenswerter Unterschied erkennen.

### 3.3 Akustisch bestimmte Sättigung von Gashydraten und freiem Gas

#### 3.3.1 Kuster-Toksöz-(K-T) Modell

Bei zweiphasigen Medien ergibt sich nach Kuster und Toksöz, 1974 der Kompressionsmodul:

$$K_{KT} = K_m \frac{1 + I_c \left[ \frac{4G_m (K_i - K_m)}{K_m (3K_i + 4G_m)} \right]}{1 - I_c \left[ \frac{3(K_i - K_m)}{3K_i + 4G_m} \right]} \quad (8)$$

$i$  Einschuß,  $m$  Matrix,  $I_c$  Volumenanteil der Einschlüsse

Gl.(6) wird u.a. von Lee et al., 1996 für Drei-Phasen-Medien erweitert:

1. Berechnung des Kompressionsmoduls für Gashydrat-Matrix mit Wassereinschlüssen  $K'_{KT}$
2. Berechnung des Kompressionsmoduls des Gashydrat-Wasser- Gemisches als Matrix mit Korneinschlüssen  $K''_{KT}$

Unter Nutzung der Parameter von Tab. 1 läßt sich damit die Gashydratkonzentration berechnen, wenn der modifizierte Modul  $K''_{KT}$  (Gashydrat-Wassermatrix mit Korneinschlüssen) bestimmt wird.

Durch Veränderung von  $I_c=1-F_{korrr}$  im Dreiphasen-System und Anpassung von  $K''_{KT}$  an  $K_{log}$  läßt sich mit nach Gl.(3) die Gashydrat-sättigung bestimmen (Bild 6).

#### 3.3.2 Zementationsmodell (C-Modell)

Hier werden die Gashydrate als verbindender Zement zwischen den Körnern in der Matrix aufgefaßt (Dvorkin und Nur, 1966).

Der Zement wird als Teil des Porenraums betrachtet. Für trockene Sedimente gilt

$$K_{eff} = \frac{1}{6} (1 - \Phi) A d_c v_c^2 \quad (9)$$

$c$  Zement,  $A$  Faktor,  $v_c$  Kompressionswellengeschwindigkeit des Zements,  $d$  Dichte

Menge und geometrische Anordnung des Zementes wird durch

$$a = \sqrt[4]{S_c \Phi_{korrr} / 3n(1 - \Phi_{korrr})} \quad (10)$$

$n$  Anzahl der Kornkontakte,  $S_c$  Zementanteil im Porenraum

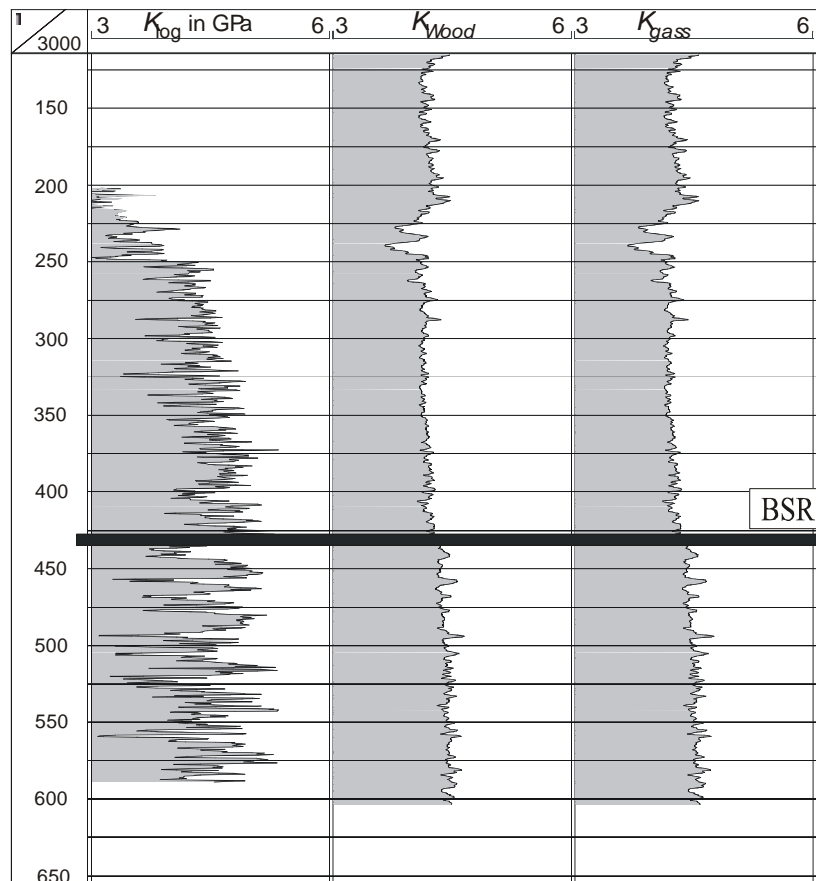


Bild 5 Bohrung 994c: Vergleich des aus Bild 3 berechneten  $K_{log}$  mit den Modellen  $K_{Wood}$  und  $K_{Gass}$

mit folgenden Relationen ausgedrückt.

$$A = A_n (\Lambda_n) \mathbf{a}^2 + B_n (\Lambda_n) \mathbf{a} + C_n (\Lambda_n) \quad (11)$$

$$A_n (\Lambda_n) = -0,024153 \Lambda_n^{-1,3646}$$

$$B_n (\Lambda_n) = 0,020405 \Lambda_n^{-0,89008}$$

$$C_n (\Lambda_n) = 0,000246 \Lambda_n^{-1,9646}$$

$$\Lambda_n = \frac{2G_c (1-n_m)(1-n_c)}{pG_m (1-2n_c)}$$

Mit  $v_p, v_s$  für Zement (Gashydrat) und Matrix berechnen sich  $G_c, G_g$  sowie die Poissonzahlen  $n_c, n_m$ .

Unter Berücksichtigung der *Gassmann-Beziehung* Gl.(7), umgestellt nach

$$K_f = K_m \left\{ \frac{K_{log} [\Phi_{kor} (K_m - K_w) + K_w] - K_m K_w}{\Phi_{kor} K_m (K_m - K_w) + K_w (K_{log} - K_m)} \right\} \quad (12)$$

wird ein Angleich zwischen  $K_{eff}$ , Gl.(9) und  $K_f$ , für gesättigte Sedimente nach Gl.(12) unter Veränderung von  $S_c$  in Gl.(10) durchgeführt. Im Ergebnis zeigen sich gegenüber der Gashydratsättigung aus dem Widerstand (*Bild 4*) wesentlich kleinere Werte. Der BSR ist nach diesem Verfahren kaum sichtbar.

### 3.3.3 Konzentration von freiem Gas unter dem BSR (G-H-Modell)

Die geringen Änderungen im GR-Log (*Bild 3*) unterhalb von 400 m lassen hier keine wesentlichen Änderungen der Lithologie erkennen (*Paull et al., 1996*). Veränderungen im Kompressionsmodul  $K_{log}$  werden daher mit dem Auftreten von freiem Gas in Verbindung gebracht. *Murphy, 1984* errechnet die Änderung des Fluidkompressionsmoduls  $K_{mix}$  bei Gasanwesenheit aus dem gewogenen Mittel der Fluidmoduli unter Vernachlässigung von Geschwindigkeitsänderungen.

$$\frac{1}{K_{mix}} = \frac{1-S_{gas}}{K_w} + \frac{S_{gas}}{K_{gas}} \quad (13)$$

$S_{gas}$  Gassättigung,  $K_{mix}, K_{gas}$  Moduli Fluidmix, Gas

Mit den Werten für  $K_w$  und  $K_{gas}$  aus *Tab.1*, Tausch von  $K_w$  in Gl.(7) mit  $K_{mix}$  sowie numerischen Variieren von  $S_{gas}$  bis zur Gleichheit von  $K_{Gass}$  und  $K_{log}$  läßt sich der freie Gasanteil im Sediment bestimmen (*Bild 6*). Im Ergebnis ist das Auftreten von freiem Gas unterhalb des zu erwartenden BSR in Site 994 mittels akustischer Logs nachgewiesen. Nach unseren Er-

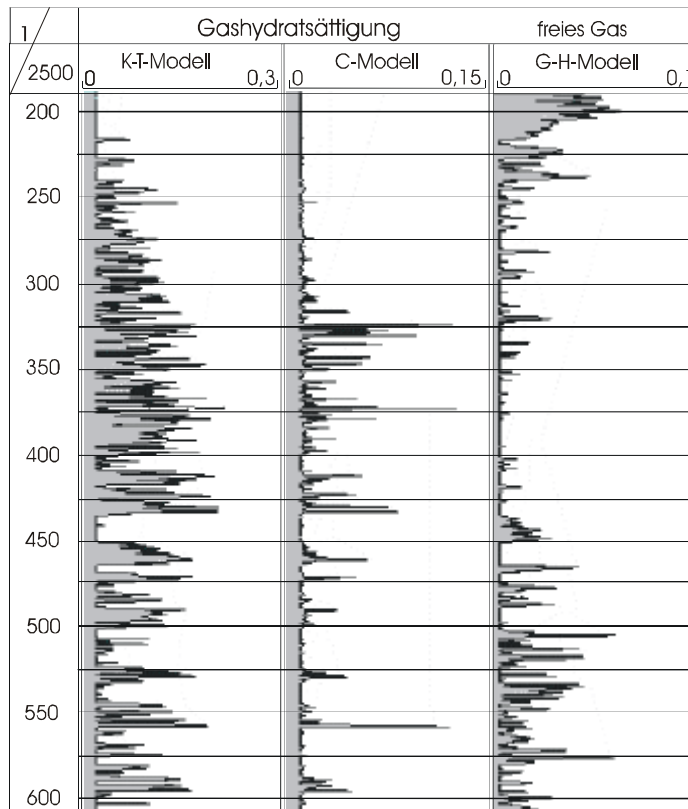


Bild 6 Gashydratsättigungen aus K-T-- und C-Modell sowie Konzentration von freiem Gas

gebnissen ist daher der BSR mit akustischen Bohrlochverfahren nur als obere Begrenzung von freiem Gas erkennbar und weniger als die untere Begrenzung der Gashydrate aufzufassen.

## 5 Zusammenfassung

Zur Diskussion über die Existenz eines BSR in Gebieten ohne ausreichende seismische Informationen erfolgte die Bearbeitung bohrloch-geophysikalischer Daten. Diese entstammen der Bohrung 994c aus dem Leg 164 innerhalb des Blake Ridge im NW-Atlantik. Die Interpretation der vorliegenden Logs belegt hier die Existenz von Gashydraten, welche u.a. in Änderungen von Widerstand und Kompressionswellengeschwindigkeit zum Ausdruck kommt. Diese Deutung läßt sich auch durch die aus Sonic-Logs bestimmten Sättigungen von Gashydraten und freiem Gas unter Anwendung der Modelle von *Kuster-Toksöz* und von *Dvorkin-Nur* belegen. Der in einer Tiefe von 420 ... 430 mbsf erwartete BSR ist allerdings besser als obere Begrenzung an freiem Gas und weniger als untere Grenze der Gashydratstabilitätszone erkennbar.

## 4 Literatur

- Dvorkin and Nur, 1996*: Elasticity of high-porosity sandstones: Theory for two North Sea data sets. *Geophysics*, 61, 1363-1370
- Gassmann, 1951*: Elastic waves through a packing of spheres. *Geophysics*, 16, 673-685
- Guerin, Goldberg and Meltser, 1999*: Characterisation of in situ elastic properties of gas hydrate-bearing sediments on the Blake Ridge. *J. Geoph. Res.*, Vorabdruck
- Hamilton, 1971*: Elastic properties of marine sediments. *Geoph. Res.*, 76, 579-60
- Kuster and Toksöz, 1974*: Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media, I. *Geophysics*, 39, 587-604
- Lee, Huchinson, Collett, Dillon, 1996*: Seismic velocities for hydrate bearing sediments using weighted equation. *J. Geoph. Res.*, 101, 20347-20358
- Murphy, 1984*: Acoustic measures of partial gas saturation in tight sandstones. *J. Geoph. Res.*, 89, 11549-11559
- Paull, Matsumoto, Wallace et al., 1996*: Proc. ODP. Initial Reports, 164, Gas hydrates sampling on the Blake Ridge and Carolina Rise.
- Wood, 1941*: Textbook of sound. Bell London