

HYDGAS

Quantification of gas hydrates and gas in the sediment of the Cascadia accretionary wedge using seismic methods

Seismische Quantifizierung von Gashydraten im Sediment der Cascadia-Subduktionszone

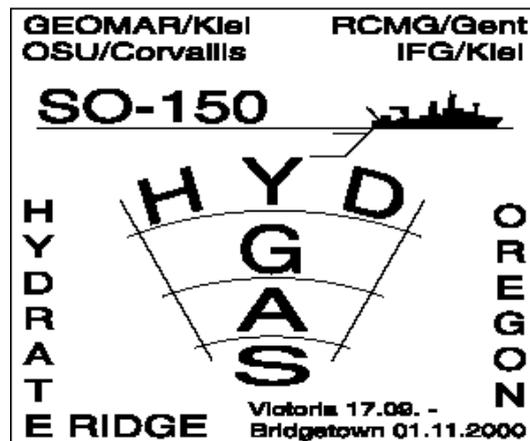
SO-150

- 03G0150A -

Abschlußbericht 2002

Berichtszeitraum: 01.01.2001 – 31.12.2002

D. Klaeschen, E. R. Flüh, C. Papenberg, J. Petersen



GEOMAR
Forschungszentrum für Marine Geowissenschaften
an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Wischhofstraße 1 - 3
24148 Kiel

1. Zielsetzung

Im Rahmen der geologischen Untersuchungen aktiver Kontinentalränder haben die Prozesse der Fluidzirkulation sowie der Gashydratbildung und -zersetzung weltweit an Bedeutung zugenommen. Prinzipielle Fragestellungen globalen Ausmaßes wurden in der Aleuten-Subduktionszone, vor Costa Rica und am Cascadia-Kontinentalrand geklärt (Wallmann et al., 1997; Suess et al., 1999). Gashydrate spielten dabei die besondere Rolle als wichtiger Speicher für Methan. Interdisziplinäre Untersuchungen haben erst kürzlich die komplexen Wechselwirkungen von Gashydraten im Gebiet des Hydratrückens vor Oregon aufgezeigt. HYDGAS ist im Zusammenhang mit einer Serie von weiteren Fahrten des FS SONNE, z.B. SO108, 109, 110 und der Tiefbohrlokation 892 des Ocean Drilling Programs sowie fast einem Dutzend Fahrten im Rahmen des internationalen TECFLUX- Programms auf dem Hydratrücken durchgeführt worden (Flueh and Fisher, 1996; Herzig et al., 1997; Suess and Bohrmann, 1997; Bohrmann et al., 1999; Westbrook et al., 1994). Der Hydratrücken ist die zweithöchste topographische Erhebung landwärts der Deformationsfront des Cascadia-Akkretionskomplexes am Kontinentalrand von Oregon (MacKay, 1995). Seine Meeresbodentopographie wurde während der Fahrt SO110 detailliert kartiert. Der Rücken besteht aus pliozänen Sedimenten, die von der Juan-de-Fuca- Platte im Rahmen von Akkretionsprozessen tektonisch am Kontinentalrand angeschweisst wurden. Ein Bodensimulierender Reflektor (BSR) ist dort weit verbreitet und belegt das Vorkommen von Gashydraten (MacKay et al., 1992, 1994). Gashydrate konnten außerdem während der Bohrfahrt 146 im Rahmen von ODP erbohrt werden (Westbrook et al., 1994). In den Sedimentkernen konnten ebenfalls Karbonate erbohrt werden, deren Kohlenstoffisotopie eindeutig Methan als Ausgangsstoff für den eingebauten Kohlenstoff diente. Die Oxidation des Methans geschieht dabei unter Sauerstoffabwesenheit durch Sulfatreduktion. Auf dem Hydratrücken wurden massive Gashydrate und authigene Karbonate während der TECFLUX-Kampagnen untersucht, wobei eine enge Wechselbeziehung etabliert werden konnte. Signaturen von Sauerstoffisotopen zeigen normale marine Charakteristika und weisen manchmal auf von Gashydraten gebundene Wassermoleküle hin. Authigene Karbonate aus den Bohrungen jedoch zeigten Isotopensignaturen, die deutlich auf ein tiefes Quellgebiet hinweisen (Sample and Kopf, 1995). Daraus wird geschlossen, daß der Fuß des Keils durch Fluide aus der Tiefe geprägt wird, während der zweite Rücken (der Hydratrücken) vor allem durch Niederschläge von Meerwasser und Gashydratwasser gekennzeichnet ist (Deyhle et al., 2001). Während Tauchboot- und Roboteruntersuchungen konnten Gasblasenaustritte beobachtet werden, die eine deutliche Tidenabhängigkeit zeigten. Das Gas steigt aus einer Zone unterhalb des BSR auf und bildet in der Wassersäule Gasplumes aus, die mit akustischen Methoden detektiert werden können. Die Untersuchungen im Rahmen von HYDGAS zielen darauf ab, mit geophysikalischen Mitteln den Anteil des Gashydrats und freien Gases innerhalb der Sedimente zu bestimmen. Im zweiten Schritt können diese quantitativen Schätzungen in Modelle zur Gashydratdynamik umgewandelt werden. Zusammenfassend sollen folgende Ansätze realisiert werden, um Rückschlüsse auf Fluidwege und Gebiete erhöhter Konzentrationen freien Gases und Gashydrats zu liefern:

- Kartierung der räumlichen und tiefenabhängigen Verteilung der BSR-Signatur (Oberflächen- und tiefgeschleppte Systeme, breites Frequenzspektrum, MCS-OR89)
- Identifizierung des Hydratanteils und Anteil des freien Gases im Sediment (seismische Inversions- und Migrationsmethoden von OBH/OBS/MCS-Daten => Rp, Rs)
- Kalibrierung der seismischen Attribute anhand von in situ-Messungen (Rp, Rs, Logging: Vp, Dichte => Vs, Probencharakterisierung)
- Quantifizierung des Gashydratanteils und des freien Gases (Vp, Vs, Dichte, Porosität, Wassersättigung, Porenraumfüllung, Theorie von Biot-Gassmann)
- 3D-viskoelastische seismische Vorwärtsmodellierung zur Modellverifikation (Quantifizierung der Güte des erarbeiteten Untergrundmodells)

2. Voraussetzung

Während der Ausfahrt mit FS SONNE (SO150, 17.09 bis 15.10.2000, Victoria nach Los Angeles) wurden die für die Untersuchungen notwendigen Daten gewonnen. Anschließend war ein Transit von Los Angeles nach Bridgetown Bestandteil der Fahrt. Während des Transit wurden bathymetrische und magnetische Daten gewonnen. Die Erteilung der Forschungsgenehmigungen erfolgte problemlos.

3. Planung und Ablauf

Seismische Arbeiten der HYDGAS-Fahrt

Während der Fahrt SO150 kamen verbesserte geophysikalische Methoden zur Anwendung, um räumliche Unterschiede der Gashydrate über den gesamten Hydratrücken zu quantifizieren. Engabständige Empfänger auf dem Meeresboden (ca. 200 m Abstand), oberflächen- und tiefgeschleppte Systeme und eine große Bandbreite an Quellenfrequenzen (5 Hz bis 2 kHz) wurden angewendet, um eine optimale Datenqualität zu gewährleisten. Besonderes Augenmerk galt dabei den Parametern, die bei der Identifizierung und Quantifizierung von Gashydraten helfen konnten. Die neuen geophysikalischen Daten wurden unter Verwendung direkter Messungen an der ODP-Bohrlokation Site 892 von ODP Leg 146 und Site 1244 und 1245 von ODP-Leg 204 verglichen und kalibriert.

Die seismischen Arbeiten auf SO150 stellten sowohl für die Schiffsbesatzung als auch für das Wissenschaftsteam eine Herausforderung dar, da abwechselnd sechs verschiedene Akquisitionssysteme mit sechs möglichen Quellenkonfigurationen betreut werden mußten. Das Hauptexperiment bestand aus fünf Auslagen an drei Stationen, an der Bohrlokation 892 von ODP Leg 146 und ODP-Bohrlokationen 1244 (HR1a) und 1245 (HR3a) von ODP Leg 204. Zur Aufnahme gab es drei ferngesteuerte Systeme, die auf dem Meeresboden abgesetzt wurden: DPG, OBH und OBS. Zusätzlich waren drei schiffsgebundene Systeme (manchmal gleichzeitig) im Einsatz: Ministreamer, Oberflächenstreamer und tiefgeschleppter Streamer. Die sechs verschiedenen Quellenkonfigurationen mit Sparker, Wasserkanone, GI-Kanone, Luftkanonen-Array, 32-Bolt-Kanonen und Fallgewicht in Verbindung mit allen verschiedenen Aufnahmesystemen erforderten eine völlig neue Strategie bei der seismischen Datenverarbeitung und Archivierung und im Umgang mit dem Datenfluß. Die Hauptexperimente waren mit großem Zeitaufwand verbunden. Um die zusätzliche Zeit, die für das Abspielen und die Qualitätskontrolle der Daten aus diesen Experimenten notwendig war, sinnvoll zu nutzen, wurden insgesamt 1490 km an zusätzlichen hochauflösenden Reflexionsprofilen aufgenommen. In Übereinstimmung mit Profilsuren der Fahrt OR89 wurde ein Satz regionaler hochauflösender Reflexionsprofile aufgenommen. Von einer zinnenförmigen Struktur, die einen Chemoherm mit aktiver Austrittstätigkeit darstellt, wurde mit Sparker und Parasound ein Datensatz von 8 Profilen angelegt. Zwei Gebiete mit einer pockennarbigen Topographie (am nördlichen und südlichen Gipfel des Hydratrückens), die bisher auf regionale Verwerfungen, lokale Meeresbodenhebungen und eine unregelmäßige Schichtung unterhalb des Meeresbodens zurückgeführt wurden, sind mit verschiedenen Quellen kartiert worden.

Bathymetrische und magnetische Arbeiten der HYDGAS-Fahrt

Wetterbedingte Unterbrechungen der seismischen Arbeiten wurden genutzt, um Lücken in den bestehenden bathymetrischen Daten am südlichen Hydratrücken zu schließen. Während eines anschließenden Transit von Los Angeles bis vor die Küste Panamas wurden mit verkleinerter wissenschaftlicher Besatzung bathymetrische und magnetische Daten gewonnen.

Auswertung

Die Auswertung der Messungen mußte aufgrund personeller Umbesetzung abgeändert werden. Anstelle eines Postdoc und eines Doktoranden wurden zwei Doktoranden für die Auswertung

beschäftigt. Die Ergebnisse werden im Rahmen von zwei Dissertationen zusammengefaßt, die im Sommersemester 2004 an der Universität Kiel eingereicht werden.

4. Wissenschaftlich-technischer Stand

Die Juan de Fuca-Platte wird gegenwärtig entlang des Oregon-Washington Kontinentalrandes unter die Nordamerikanische Platte subduziert (Riddihough, 1984; Duncan & Kulm, 1989). In dem Segment der Cascadia Konvergenzzone vor der Küste Oregons wechselt die Art der Akkretion entlang von Störungsbahnen. Es werden sowohl landwärts als auch seewärts vergente Überschiebungen beobachtet. Die Ursache dieses Wechsels innerhalb der Vergenz der Akkretionsstrukturen ist noch nicht verstanden. Bisher wurde versucht, das atypische Deformationsverhalten durch spezielle physikalische Randbedingungen (extrem niedrige basale Reibung) und Materialparameter (außerordentliche Materialfestigkeit) zu erklären (Seely, 1997; MacKay, 1995).

Die oberflächliche Manifestation dieser Akkretion sind verschiedene in Nord-Süd-Richtung ausgerichtete Rücken mit zunehmendem Alter in Richtung der kontinentalen Platte. Zwischen den Rücken konnten sich sedimentäre Becken entwickeln. Die detaillierte Struktur des Akkretionskomplexes konnte in zahlreichen seismischen und bathymetrischen Untersuchungen erfaßt werden (MacKay et al., 1992; MacKay et al., 1995; Pizarro-Wallon, 1997). Von West nach Ost können folgende morfo-tektonische Einheiten unterschieden werden:

- die Proto-Deformationszone direkt westlich vor dem 1. Akkretionsrücken;
- der 1. Akkretionsrücken, welcher durch eine tiefreichende seewärtige Flanke gekennzeichnet wird;
- der 2. Akkretionsrücken, auch "Hydrat-Ridge" genannt (Bohrmann et al., 1998), der von landwärts geneigten seismischen Reflektoren unterlegt ist;
- die westliche Begrenzung des Siletz-Terrans in unmittelbarer Küstennähe (Gedom et al., 1999).

Der krustale Aufbau in diesem Küstenstreifen wurde im Rahmen des Projektes ORWELL (SO108) untersucht. U.a. wurden bei diesem kooperativen Experiment von GEOMAR, USGS und COAS drei refraktionsseismische Profile über den Kontinentalrand aufgenommen, wobei zur Registrierung der Airgunschüsse sowohl OBH und OBS als auch Landstationen eingesetzt wurden. Der Verlauf des EW-Profiles wurde koinzidierend mit dem Reflexionsprofil OR89-8 gewählt. Die Hauptziele der Untersuchung waren die Bestimmung der internen Struktur der Cascadia-Subduktionszone und der Verlauf der abtauchenden Juan-de-Fuca Platte.

Im Gegensatz zu anderen Subduktionszonen zeigt die Cascadia-Subduktionszone eine ungewöhnliche Seismizität. Es wurden bislang keine großen Interplattenbeben registriert, und auch die Seismizität in der oberen und unteren Platte ist heterogen verteilt. Ein möglicher Grund für diese außergewöhnliche Erdbebenverteilung ist das Siletz-Terran, ein im Paleozän bis Eozän akkretierter Mikrokontinent aus ozeanischem Basalt, der das kontinentale Basement in weiten Teilen des Forearc von Oregon und Washington bildet. Die Grenzen diese Terrans sind in den durch Laufzeitmodellierung ermittelten Geschwindigkeitsmodellen recht deutlich zu erkennen (Gedom et al., 2000). Zwischen diesem Terran und der abtauchenden Platte befindet sich ein Bereich erniedrigter Geschwindigkeit. Die Neigung der Juan-de-Fuca-Platte nimmt in diesem Abschnitt des Modells zu. Im übrigen zeigt das Modell eine gut ausgebildete ozeanische Kruste seewärts des Kontinentalrandes, bestehend aus hauptsächlich drei Einheiten: a) zwei sedimentäre Schichten mit Geschwindigkeiten von etwa 1.9 km/s bzw. 2.3-3.0 km/s, b) obere ozeanische Kruste mit Geschwindigkeiten von 5.0-6.0 km/s, c) untere ozeanische Kruste mit bis zu 6.9 km/s. Für die Modellierung des Akkretionskomplexes (1. und 2. Akkretionsrücken) wurden Informationen zu Struktur und Geschwindigkeit aus den oben erwähnten Reflexionsdaten herangezogen. Die mit der Juan-de-Fuca-Platte in die Subduktionszone eingebrachten Sedimente

des Cascadia-Beckens erfahren in einer ausgebildeten Protothrust-Zone eine zunehmende Tektonisierung und haben, nach Osten anwachsend, Geschwindigkeiten von bis zu 3.6 km/s. Die zuletzt akkretierten Sedimente zeigen demgegenüber erniedrigte Geschwindigkeiten von 3.1-3.6 km/s am Decollement und 1.8 km/s am Meeresboden. Diese regionale Information des Krustenaufbaus im Untersuchungsgebiet kann bei einer abschließenden Interpretation und Beschreibung der tektonischen Ursachen für die Ausbildung des Hydrat-Ridges mit integriert werden.

BSR (Bottom Simulating Reflector): freies Gas und Gashydrate

Gegenwärtig wird angenommen, daß weit mehr als die Hälfte des gesamten als Rohstoff nutzbaren organischen Kohlenstoffs in Gashydraten gespeichert ist, jedoch bestehen hier noch große Unsicherheiten hinsichtlich quantitativer Aussagen. Diese Quantifizierung wurde auch auf den letzten gashydratbezogenen Symposien der AGU - und EGS - Tagungen als die wichtigste Gashydratfrage priorisiert. Zwar kann man bei Vorhandensein eines BSR (Bottom Simulating Reflector) die Menge an freiem Gas unterhalb der Hydratschicht durch eine Wellenforminversion bzw. AVO-Analysen abschätzen, es fehlen aber noch aussagekräftige, verlässliche und kalibrierte seismische Attribute, die die Menge an Hydraten in den Sedimenten sicher bestimmen lassen.

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Existenz eines Bottom Simulating Reflectors (BSR) sowohl zur Identifizierung als auch zur Abschätzung des Vorkommens von Gashydraten in marinen Sedimenten bewährt. Der BSR ist ein seismischer Reflektor mit negativem Reflexionskoeffizient (Shipley et al., 1979; Dillon and Paull, 1983). BSR-Strukturen verlaufen häufig parallel zum Meeresboden und folgen nicht dem Verlauf stratigraphischer Horizonte. Der Reflektor tritt in Tiefen von bis zu einigen hundert Metern auf, in denen nach den dort herrschenden Druck-Temperaturbedingungen die Untergrenze der Gashydratstabilität liegt (Hyndman et al., 1992; Tréhu et al., 1995). Gashydrate sind demnach prinzipiell oberhalb des BSR zu erwarten, wobei freies Gas aufgrund der höheren Temperaturen darunter existiert. Zur Zeit wird kontrovers diskutiert, ob der BSR im wesentlichen durch eine Geschwindigkeitszunahme oberhalb des BSR oder durch Geschwindigkeitsabnahme unterhalb des BSR verursacht wird (siehe z.B. Pecher et al., 1996; MacKay et al., 1994). Um diese Frage beantworten zu können, müssen physikalische Meß- und Auswertemethoden auf die Unterscheidung dieser Gas- bzw. Gashydratphasen abgestimmt werden. Reine Gashydrate haben Vp-Geschwindigkeiten von 3.3-3.8 km/s, und ihr Vorkommen in Sedimenten muß deren Geschwindigkeiten erhöhen. Auf der anderen Seite können bereits geringe Gehalte an freiem Gas die Vp-Geschwindigkeiten sehr stark vermindern (Murphy, 1984). Unsicherheiten bestehen vor allem deshalb, da in gemessenen seismischen Profilen nicht klar ist, wie hoch die Geschwindigkeit in den jeweiligen Sedimenten ohne die Gashydratzementation sind. Es fehlen insbesondere Modelle, die den Hydratgehalt aufgrund ihrer seismischen Geschwindigkeiten vorhersagen können (Lee et al., 1996). Um diesen Fragen nachzugehen, wurden in neuerer Zeit BSR-Horizonte im Rahmen des Ocean Drilling Programs (ODP) durchbohrt (Cascadia Margin, Blake Outer Ridge). Die Ergebnisse dieser Bohrungen (MacKay et al., 1994; Holbrook et al., 1996) unterstützen vor allem die Hypothese, daß das freie Gas unterhalb des BSR die bedeutendere Komponente zur Ausbildung eines BSR ist. Während ODP Leg 164 wurden drei Bohrungen in einer gleichen stratigraphischen Sequenz mit unterschiedlichem Aussehen des BSR abgeteuft (Holbrook et al., 1996). Die Bohrergebnisse zeigen, daß Hydrate auch dort existieren, wo kein BSR beobachtet wurde, und daß das Gas sehr viel tiefer reicht als bisher angenommen (Dickens et al., 1997). Dieser letztere Befund ist dafür verantwortlich, daß die Schätzungen über die Gasmengen solcher natürlichen Vorkommen wieder steigen.

5. Zusammenarbeit

Während der Laufzeit des Projektes gab es eine stetige und fruchtbare Zusammenarbeit mit den an der Fahrt beteiligten Kooperationspartnern, die auch darüberhinaus fortgesetzt werden wird.

Insondere die Kooperationspartner A. Trehu (Oregon State University, Corvallis) und G. Bohrmann (Universität Bremen, ehem. GEOMAR, Kiel), beide co-chief scientists auf ODP-Leg 204, konnten die Ergebnisse der Bearbeitungen der SO-150 Reflexionsdaten auf dem südlichen Hydratrücken für die Positionierung der ODP-Sites nutzen. Die Auswahl der Bohrlokationen für ODP Leg 204 wurde maßgeblich von dem HYDGAS Datensatz unterstützt.

Die Arbeitsgruppe um J.P. Henriot, die mit ihrem tiefgeschleppten System an der Fahrt beteiligt war, hat maßgeblich dazu beigetragen, ein deutsches tiefgeschlepptes System auf hohem technischen Niveau zu entwickeln. Die langjährige Erfahrung von J.P. Henriot in der Gashydratforschung bei der Datenaufbereitung sind in das Forschungsvorhaben HYDGAS eingeflossen und werden darüber hinaus in anderen Forschungsvorhaben weiter vertieft.

6. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Hauptexperiment an ODP Lokation 892 (ODP LEG 146), 1244 und 1245 (ODP LEG 204)

Die regionalen MCS (Mehrkanalseismik)-Profile OR89-1 bis OR89-12 und OR89-43 bis OR89-44, die 1989 vor Oregon aufgenommen worden waren, wurden bei GEOMAR unter Erhaltung der Amplitudeninformation reprozessiert. Eine Prestack-Migration, gefolgt von einer AVO-Inversion, lieferte zwei weitere Abbildungen der Strukturen, die Rp-Reflexionsstärke und die Stärke des AVA (Amplitude Versus Angle)-Gradienten. Der Interzept entspricht dem P-Reflexionskoeffizient für vertikalen Einfall, während der Gradient eine komplexe Funktion von P- und S-Wellen Geschwindigkeiten und Dichtekontrast darstellt. Die seismischen Refraktions- und Weitwinkelreflexionsprofile von HYDGAS wurden über die ODP-Bohrlokation 892, 1244 und 1245 und die reprozessierten reflexionsseismischen Profile OR89-9 (über Site 892) und OR89-2 (über Site 1244 und 1245) mit den vorhandenen Bohrinformationen kalibriert. Das Reflexionsprofil OR89-9 hat einen gut entwickelten BSR in geringer Tiefe, mit hoher Rp-Reflexionsstärke und starken lateralen Schwankungen in der Gradientensektion. Dementgegen zeigt das Reflexionsprofil OR89-2 eine signifikant geringere Rp-Reflexionsstärke und sehr moderate laterale Schwankungen in der Gradientensektion.

Pinnacle-Gebiet

Die zinnenförmige Struktur Pinnacle wurde erstmals während Meeresbodenkartierungen 1998 beobachtet und als mud volcano interpretiert. Innerhalb des TECFLUX Programms wurde bei Tauchfahrten mit R/S Alvin eine 30m hohe zinnenförmige Struktur festgestellt und als Chemoherm identifiziert. Diese Struktur wurde im Sommer 2000 mit Hilfe von 3D seismischen Messungen kartiert (A. Trehu et al., 2000) und stellte ein Zielgebiet für das ODP-Leg 204 dar. Zusätzlich wurden in enger Absprache mit A. Trehu während der HYDGAS-Ausfahrt 8 hochauflösende Profile in SW-NE und NW-SE gemessen, um die Feinstrukturen und mögliche Fluidwege aufzulösen. Die Ergebnisse wurden auf nationalen und internationalen Tagungen präsentiert und im Zwischenbericht dokumentiert.

Gebiete hoher Meeresbodenreflektivität

Mit Hilfe der *Sidescan Sonar* Technik wurden 1999 mit der *New Horizon* Vermessungen durchgeführt, die Gebiete hoher Reflektivität auf dem Hydratrücken zeigten. Aufgrund der runden Formen der Reflektivitätsmuster wurden diese Gebiete zunächst mit Pockmarks assoziiert. Ozeanbodenbeobachtungen mit dem OFOS System auf SO143 konnte einige wenige Gebiete der hohen Rückstreuung mit dem Auftreten von autigenen Karbonaten korrelieren und teilweise konnte aktives Venting beobachtet werden.

Um die Ursachen der erhöhten Rückstreuung mit Hilfe der Untergrundstrukturen zu verifizieren wurde während der HYDGAS-Fahrt in ausgewählten Gebieten auf dem nördlichen und südlichen Hydratrücken hochauflösende Reflexionsprofile gemessen. Diese Profile zeigen, daß es sich nicht

um klassische Pockmarkstrukturen handelt (Depressionen), sondern um lokale Erhöhungen, die einhergehen mit einem unterbrochenen BSR, der sogar teilweise um mehrere 10ms vertikale Versätze zeigt. Ferner korrelieren Verwerfungszonen, die als Fluidwege im Untergrund dienen, mit der erhöhten Meeresbodenrückstreuung. Die Ergebnisse wurden auf nationalen und internationalen Tagungen präsentiert und im Zwischenbericht dokumentiert.

Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse sind in Publikationen im Rahmen von zwei Dissertationen eingeflossen. Auf mehreren Tagungen wurde über Detailergebnisse und Zwischenresultate berichtet (siehe 8). Es besteht ein großes Interesse an unseren Ergebnissen, insbesondere durch die aktuellen ODP-Bohrungen von Leg 204, die in dem Messgebiet von HYDGAS liegen. Die Ergebnisse der Hauptziele von HYDGAS werden im folgenden kurz dokumentiert. Eine umfassende Darstellung der gewonnenen Erkenntnisse wird in den zwei Dissertationen enthalten sein.

- *Kartierung der räumlichen und tiefenabhängigen Verteilung der BSR-Signatur*

Im HYDGAS Projekt wurden die Aufnehmer (Ozeanboden und schiffsgebundene Systeme) mit unterschiedlichen seismischen Quellen angeregt, um eine große Bandbreite an Signalfrequenzen zu gewährleisten. Als Beispiel der tiefenabhängigen Änderung der BSR-Signatur in Abhängigkeit von der angeregten Signalfrequenz ist in Abb. 1 ein Profilausschnitt über die ODP-Bohrung 892 dargestellt. Das Profil OR89-9 beinhaltet Signalfrequenzen von 5-80 Hz, das Profil SO150-142 Signalfrequenzen von 50 bis 200 Hz und das Profil SO150-141 Signalfrequenzen von 100-1000Hz. Auffallend ist die starke laterale Variation des BSR-Signals, insbesondere bei den hochfrequenten Signalfrequenzen, was auf eine starke räumlich variable Verteilung von freiem Gas und Gashydrat schließen läßt.

Als Beispiel der flächenhaften BSR-Charakteristik am nördlichen Hydratrücken sind in Abb. 2 die Auswertungen der Single Channel Streamer (SCS)-Daten der GI-Gun-Profile berücksichtigt worden. Zur regionalen Kartierung der Tiefen- und Amplitudenverteilung des BSRs wurde ein Netz von 34 GI-Gun-Profilen am nördlichen Hydratrücken abgeschossen. Für den gewählten Ausschnitt von etwa 4x5 km um den Gipfel herum standen 29 Profile mit Abständen von 400–1500 m zur Verfügung, die mit dem Single Channel Streamer (SCS) aufgezeichnet wurden. Abb. 2 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Analyse.

Rechts oben ist zunächst die Bathymetrie dargestellt mit dem Gipfel in einer Wassertiefe von 592 m und der nordwestlich gelegenen ODP Bohrlokation 892 in 675 m Tiefe.

Der BSR wurde in den zeitmigrierten SCS-Daten abgegriffen. Die Zeiten wurden unter Annahme einer mittleren Sedimentgeschwindigkeit von 1550 m/s in BSR-Tiefe unter dem Meeresboden umgerechnet. Die links oben dargestellte resultierende Tiefenkarte zeigt im Großen und Ganzen drei Regionen mit ungewöhnlich flachem BSR, eine unmittelbar westlich des Gipfels, eine westlich der ODP-Bohrung sowie eine nordöstlich des Gipfels am Rand des Kartenausschnitts. Allgemein spiegelt sich der Einfluß der Wassertiefe und der damit veränderte hydrostatische Druck in der Korrelation der abnehmenden BSR-Tiefe mit abnehmender Wassertiefe wider. Die drei Anomalien deuten jedoch eindeutig auf erhöhte Temperaturgradienten hin, die durch warme, aufsteigende Fluide hervorgerufen werden.

Die rechts unten dargestellte Karte der mit einem tiefgeschleppten Sidescan-Sonar gemessenen Rückstreuungsintensität bestätigt dies. In unmittelbarer Nähe der BSR-Tiefenanomalien sind Strukturen mit erhöhter Rückstreuung klar erkennbar, die als Karbonatkrusten bzw. Chemoherde identifiziert wurden und somit durch aufsteigende methanreiche Fluide bzw. Gase entstanden sind.

Zusätzlich wurde eine Karte der normierten BSR-Amplitude aus den SCS-Daten erstellt, die links unten gezeigt ist. Auffallend ist zunächst eine starke Variation der Amplituden, die sich aber auch mit den Rückstreuungsintensitäten am Meeresboden korrelieren läßt. An Stellen mit gleichförmigen, starken BSR-Signaturen wie z.B. östlich der ODP-Bohrung oder südwestlich des Gipfels zeigt die Sonarmessung geringe Intensitäten, was ebenfalls auf einen ungestörten Untergrund schließen läßt. Dort, wo sich jedoch aktive Gasaustrittsstellen und Chemoherde befinden, erkennbar an der erhöhten Rückstreuung und auch den BSR-Tiefenanomalien, bricht

auch die BSR-Amplitude abrupt weg. Dies ist ein klarer Indikator dafür, daß kohlenstoffreiche, tiefliegende Fluide unterhalb des BSRs entlang von Verwerfungen aufwärts migrieren und als Antrieb für das biochemische System fungieren.

- *Identifizierung des Hydratanteils und Anteil des freien Gases im Sediment*

Zur Unterstützung des HYDGAS-Projekts wurde am GEOMAR im Rahmen einer Dissertation eine neue amplitudenerhaltende seismische Migrationsmethode entwickelt, um Mehrkanal -und Ozeanbodenreflexionsdaten zu bearbeiten (Haris, 2003). In Abb. 3 ist eine Prestack-Tiefenmigration des Profiles OR89-2, gefolgt von einer AVO-Inversion gezeigt. Diese Inversion lieferte zwei weitere Abbildungen der Strukturen, die Rp-Reflexionsstärke (intercept) und die Stärke des AVA-Gradienten. Der BSR, der ungefähr parallel zum Meeresboden verläuft, zeichnet sich durch eine sehr geringe Reflexionsstärke aus, während der AVA-Gradient einen positiven Wert annimmt mit geringen lateralen Variationen. Aus diesen Attributen und der seismischen Geschwindigkeitsverteilung wurden Modellrechnungen aufgrund der Mehrdeutigkeit durchgeführt, um plausible Abschätzungen des freien Gas- und Gashydratanteils zu gewinnen (Abb 4). Aus den Analysen ergibt sich für den südlichen Hydratrücken eine geringmächtige Hydratlage (< 35m) mit ca. 1% Hydratkonzentration und Wasser bzw. freiem Gas gesättigten Sedimenten unterhalb der Hydratschicht (Haris, 2003). Diese Ergebnisse, die vor der Bohrung des ODP Leg 204 bestimmt wurden, sind durch die Bohrungen mit ca. 2% Hydratkonzentration bestätigt worden (Trehu et al., 2003 in prep).

- *Kalibrierung der seismischen Attribute anhand von in situ-Messungen*

Vor der Bohrausfahrt des ODP 204 wurden die HYGAS-Daten bei der Planung der Sites einbezogen. So wurde z.B. ein Geschwindigkeitsprofil entlang des OR89-2 aus HYDGAS-Daten und den existierenden MCS-Daten gewonnen und die Tiefenlage des BSR bestimmt und G.Bohrmann und A. Trehu zur Verfügung gestellt (beide co-chief scientists auf ODP-Leg 204). Nachdem jetzt die Bohrinformationen vorliegen, sind in Abb. 5 die vorhergesagten Geschwindigkeitsprofile und die in situ gemessenen Geschwindigkeitsprofile gegenübergestellt. Auffallend ist die sehr gute Übereinstimmung der Geschwindigkeitstiefenfunktion. Die BSR-Tiefe unterhalb des Meeresbodens wurde am Site 1244 mit 128m vorhergesagt (erbohrt 125m) und am Site 1245 mit 131m vorhergesagt (erbohrt 132m).

Die für einen BSR typische Geschwindigkeitsstruktur, d.h. höhere Gashydratgeschwindigkeiten über niedrigen Gasgeschwindigkeiten, läßt sich in den Logs nicht direkt erkennen. Erst die Amplitudenanalyse mit zunehmenden Offset (AVO) bringt die für den BSR charakteristische Amplitudenzunahme hervor. Diese ist jedoch stark Frequenzabhängig. Die hohe Abtastrate der Logtiefe (ca. 2cm) liefert ein sehr hochauflösendes Geschwindigkeitsprofil, welches mit der Signalfrequenz (von 50-200Hz) nicht zu trennen ist. Das 1D modellierte synthetische Seismogramm zeigt daher ein Interferenzbild. In Abb. 6 sind Synthetik- und Realdaten einander gegenübergestellt.

Die markanten Reflexionseinsätze der OBH-Sektionen (real und synthetisch) korrelieren mit denen der Einkanal-Streamersektion in Amplitude und Phase. Dies ist eine Voraussetzung für eine Extrapolation der physikalischen Parameter mit Hilfe der Seismik in unbeprobten Bereichen.

- *Quantifizierung des Gashydratanteils und des freien Gases*

Als Beispiel dient hier eine AVO-Analyse von OBS-Daten zur Quantifizierung von Gashydrat und freiem Gas am nördlichen Hydratrücken. Um die Porenraumanteile an Gashydrat und freiem Gas im Sediment abzuschätzen, wurde eine AVO-Analyse der am BSR reflektierten seismischen Wellen für OBS 41 durchgeführt.

In Abb.7 ist das tiefenmigrierte MCS-Profil OR89-9, das sich mit dem verwendeten, in Ost-West-Richtung verlaufenden GI-Gun Profil 103 überdeckt, zusammen mit den OBH/OBS-Positionen dargestellt. Der Untergrund in der Umgebung von Station 41 ist durch einen ebenen, starken und gleichförmigen BSR gekennzeichnet, wodurch es möglich war, neben der reinen P-Wellenreflexion

am BSR zusätzlich eine am BSR konvertierte S-Welle (PPS) sowie eine am Meeresboden konvertierte und dann am BSR reflektierte S-Welle (PSS) in den Daten zu identifizieren (Abb. 8) und in die AVO-Analyse einfließen zu lassen. Die in Abb. 9 dargestellte Laufzeitmodellierung ermöglichte die klare Zuweisung der seismischen Phasen der Radialkomponente und damit die Bestimmung der mittleren Scherwellengeschwindigkeit oberhalb des BSRs zu etwa 370 m/s. Weiterhin waren v_P oberhalb des BSR aus der Laufzeitinversion sowie die Dichte aus der ODP-Bohrung 892 bekannt, so daß das in Abb. 10 dargestellte Modell für die elastischen Parameter am BSR entwickelt werden konnte, das mittels einer synthetischen Reflektivitätsmodellierung mit der OASES-Software verifiziert wurde. Der Vergleich der realen Amplitudenkurven mit den synthetisch bestimmten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung für die PP- und PS-Reflexion am BSR (Abb. 11). Die PSS-Reflexion ist jedoch in den realen Daten um ein Vielfaches zu stark, was eine weitaus effizientere PS-Konversion am Meeresboden vermuten lässt, eventuell hervorgerufen durch anstehende Karbonatkrusten bzw. Gashydrate.

Um von den elastischen Parametern auf eine Quantifizierung des Hydrats und freien Gases zu gelangen, wurden die Resultate der AVO-Modellierung von gashydrathaltigen Sedimenten nach Carcione und Tinivella (2000) verwendet. Aus dem Vergleich der gemessenen AVO-Kurven mit den modellierten (Abb. 12) ließ sich ein Porenraumanteil von 35-45% für Gashydrat und von 2-5% für freies Gas bestimmen.

3D-viskoelastische seismische Vorwärtsmodellierung zur Modellverifikation

Diese Arbeiten konnten im Berichtszeitraum aufgrund der personellen Umbesetzung (Reduzierung) nicht durchgeführt werden. Die elastischen und viskoelastischen Modellierungen beruhen bis jetzt auf 1D-Modellen. Im Rahmen der laufenden Dissertationen wird allerdings noch angestrebt, die Modelle auf 3 Dimensionen zu erweitern.

7. Ergebnisse Dritter

Die Kooperationspartner A. Trehu (Oregon State University, Corvallis) und G. Bohrmann (GEOMAR, Kiel), beide co-chief scientists auf ODP-Leg 204, konnten die Ergebnisse der Bearbeitungen der SO-150 Reflexionsdaten auf dem südlichen Hydratrücken für die Positionierung der ODP-Sites erfolgreich nutzen. Die Auswahl der Bohrlokationen für ODP Leg 204 wurde maßgeblich von dem HYDGAS-Datensatz unterstützt.

8. Liste der Vorträge und Veröffentlichungen

Berichte (2001)

Sonne Fahrtbericht / Cruise Report HYDGAS Klaeschen D, Kopf A, Arsenault M, Bialas J: FS-Sonne-Fahrtbericht/Cruise Report SO150 HYDGAS; 245pp.

Sonne Status Seminar, Hannover, 14.-16.03.2001:

Klaeschen D, Könitz D, Bialas J, Flüh ER und HYDGAS Working Group: Erste Ergebnisse der SONNE Fahrt SO150 HYDGAS in der Cascadia-Subduktionszone entlang des Hydratrückens (Vortrag).

Klaeschen D, Könitz D, Bialas J, Flüh ER und HYDGAS Working Group: Erste Ergebnisse der SONNE Fahrt SO150 HYDGAS in der Cascadia-Subduktionszone entlang des Hydratrückens (Poster).

DGG, Frankfurt, 19.-23.03.2001:

Klaeschen D, Könitz D, Bialas J, Kopf A, Flueh ER & HYDGAS-Working Group: Erste Ergebnisse der SONNE Fahrt SO-150 HYDGAS in der Cascadia-Subduktionszone entlang des Hydratrückens (Poster, siehe Anlage 1).

EGS, Nizza, 26.-30.03.2001:

Klaeschen D, Könitz D, Bialas J, Kopf A, Flueh ER & HYDGAS-Working Group: AVO and multispectra images of Gas Hydrates on the Hydrate Ridge off the Cascadia Margin (Poster).

MARGINS Meeting, Kiel, 2.-6.10.2001:

Papenberg C, Petersen J, Klaeschen D: Pinnacle Structure at Hydrate Ridge off the Oregon Continental Margin (Poster, siehe Anlage 2).

Petersen J, Papenberg C, Klaeschen D: High Reflectivity Patches at Hydrate Ridge off the Oregon Continental Margin (Poster, siehe Anlage 3).

EGS-Tagung, 2002:

Petersen J, Papenberg C, Klaeschen D: AVO analysis of Gas Hydrates at Hydrate Ridge off the Cascadia Margin using well-log calibrated Ocean Bottom Seismometer (OBS) data (Poster).

DGG-Tagung, 2002:

Petersen, J, Papenberg C, Klaeschen D: Gas Hydrate Occurrence at Hydrate Ridge off the Continental Margin – A well-log calibrated Ocean Bottom Seismometer (OBS) study (Poster).

Papenberg C, Petersen J, Klaeschen D: Multi system acquisition of a BSR signature on Hydrate Ridge off Oregon Continental margin (Poster).

AGU-Tagung, San Francisco, 2002:

Petersen J, Papenberg C, Klaeschen D: Gas Hydrate Reservoir Characterization at Hydrate Ridge Using PS Converted Waves From Ocean Bottom Seismometer (OBS) Data (Vortrag).

Papenberg C, Petersen J, Klaeschen D: Frequency Dependent Amplitude Analysis of a Bottom Simulating Reflector (BSR) (Poster).

DGG-Tagung 2003:

Papenberg C, Petersen J, Klaeschen D: Wide-angle reflection amplitude variations along a bottom simulating reflector (BSR) at Hydrate Ridge (Poster).

EGS-Tagung 2003:

Papenberg C, Petersen J, Klaeschen D: Seismic Studies of Gas Hydrate Bearing Sediments at Hydrate Ridge (Poster).

AGU-Tagung, San Francisco, 2003:

Petersen J, Papenberg C, Klaeschen D: Seismic Study of Natural Gas Hydrates at Northern Hydrate Ridge, Cascadia Accretionary Complex (Poster).

Papenberg C, Petersen J, Klaeschen D: Combined Studies of ODP log Data and Seismic Reflection Data at Southern Hydrate Ridge (Poster).

Literaturverzeichnis

Bohrmann G, Linke P, Suess E, Pfannkuche O (1999): FS Sonne Fahrtbericht/Cruise Report SO143 TECFLUX; Geomar Report 93, ISSN 0936-5788, 243pp.

Carcione JM, Tinivella U (2000): Bottom-simulating reflectors: Seismic velocities and avo effects, *Geophysics* 65: 54-67.

Deyhle A, Kopf A, Eisenhauer A (2001): Boron systematics of authigenic carbonates: A new approach to identify fluid processes in accretionary prisms. *Earth Planet. Sci. Letts.*, 187, 191-205.

Flueh ER, Fisher MA (1996): FS-Sonne-Fahrtbericht/Cruise Report SO108 ORWELL; GEOMAR Report 49, 252pp.

Haris Abd (2003): Amplitude-preserving migration and its application to image of a BSR in marine multichannel seismic reflection data, Aachen, Shaker Verlag, ISBN3-8322-1504-2, 126pp.

Herzig P, Suess E, Linke P (1997): Cruise Report SO109: Hydrotrace; GEOMAR Report 58, 249pp.

MacKay ME (1995): Structural variation and landward vergence at the toe of Oregon accretionary prism; *Tectonics*, 14, p. 1309-1320.

MacKay ME, Moore GF, Cochrane GR, Moore JC, Kulm LD (1992): Landward vergence and oblique structural trends in the Oregon margin accretionary prism: Implications for fluid flow; *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 109, p. 477-491.

MacKay ME, Jarrad RD, Westbrook GK, Hyndman RD, and the Shipboard Scientific Party of ODP leg 146 (1994): Origin of bottom simulating reflectors: geophysical evidence from the Cascadia accretionary prism, *Geology*, V. 22, p. 459-462.

Sample JC, Kopf A (1995): Geochemistry of syntectonic carbonate cements and veins from the Oregon margin (ODP Leg 146), Implications for hydrogeologic evolution of the accretionary wedge; In: B. Carson, G.K Westbrook, R.J. Musgrave, et al., *Proc. ODP, Sci. Results*, 146, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 137-148.

Suess E, Bohrmann G (1997): RV SONNE - Cruise Report SO110; GEOMAR Report 59, 181pp.

Suess E, Torres M, Bohrmann G, Collier RW, Greinert J, Linke P, Trehu A, Wallmann K, Winckler G, Zuleger E (1999): Gas hydrates destabilization at the Cascadia margin: A new mechanism for enhanced dewatering of accretionary wedges and benthic material turnover; *Earth Planet. Sci. Lett.* 170 (1/2) 1-15.

Tréhu AM, Bangs N (2000): Report of Cruise TNN112 R/V Thomas Thompson June 19 - July 2, 2000; Oregon State University Data Report.

Tréhu AM, Bohrmann G, Rack FR, Long PE, Milkov AV, Riedel M, Schultheiss P, Torres ME, Bangs NL, Barr SR, Borowski WS, Claypool GE, Collett TS, Delwiche ME, Dickens GR, Goldberg DS, Gracia E, Guerin G, Holland M, Johnson JE, Lee Y-J, Lui C-S, Su X, Teichert B, Tomaru H, Vanneste M, Watanabe M, Weinberger JL (2003): Distribution and Concentration of Gas Hydrate Beneath an Accretionary Ridge – Constraints from ODP Leg 204, in prep.

Westbrook GK, Carson B, Musgrave RJ et al. (1994): Site 892 in: *Proceedings of the Ocean Drilling Program; Initial Reports*, Vol. 146 (Part 1), p. 301-376.

Wallmann K, Linke P, Suess E, Bohrmann G, Sahling H, Schlüter M, Dählmann A, Lammers S, Greinert J, Mirbach N (1997): Quantifying fluid flow, solute mixing, and biogeochemical turnover at cold vents of the eastern Aleutian subduction zone; *Geochim. Cosmochim. Acta* 61 (24), 5209-5021.

Danksagung

Wir danken dem BMFT für die gewährte Unterstützung und dem Projektträger BEO-Warnemünde für die unbürokratische administrative Abwicklung. Besonderer Dank gilt Kapitän Papenberg und der Besatzung des FS SONNE für ihre Kooperation während der Ausfahrt.

Verzeichnis der Abbildungen/Anlagen

Abbildung 1: Änderung der BSR-Signatur in Abhängigkeit der angeregten Signalfrequenz über die ODP-Bohrung 892 des nördlichen Hydratrückens.

Abbildung 2: Analyse der SCS-Daten zur Charakterisierung der BSR-Signaturen am nördlichen Hydratrücken.

Abbildung 3: AVA Attribute (Intercept und Gradient) des tiefenmigrierten Profils OR89-2 (aus Haris, 2003)

Abbildung 4: Modellabschätzungen des freien Gases und des Gashydratsanteils aus den AVO Attributen und der seismischen Geschwindigkeitsverteilung entlang des Profils OR89-2 (aus Haris, 2003).

Abbildung 5: Vorhergesagte Geschwindigkeitsprofile (rot) aus HYDGAS und OR89-Daten und die in situ gemessenen Geschwindigkeitsprofile des ODP-Leg 204.

Abbildung 6: Gegenüberstellung von synthetisch berechneten Daten aus in situ Log Informationen des ODP-Leg 204 und Realdaten aus dem HYDGAS Projekt.

Abbildung 7: Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeit im Bereich des ODP Leg 892.

Abbildung 8: Modell der elastischen Parameter im Bereich des ODP Leg 892.

Abbildung 9: Tiefenmigriertes Profil OR89-9 im Bereich des ODP Leg 892 mit den OBH/S Positionen des HYDGAS-Datensatzes.

Abbildung 10: SO150-OBS41 nach der Rotation (Komponentenzerlegung in Radial-, Transversal- und Vertikalkomponente).

Abbildung 11: Vergleich von realen und synthetisch berechneten Amplituden des SO150-OBS41 im Bereich des ODP Leg 892.

Abbildung 12: Quantifizierung von Gashydrat und freiem Gas im Bereich des ODP Leg 892.

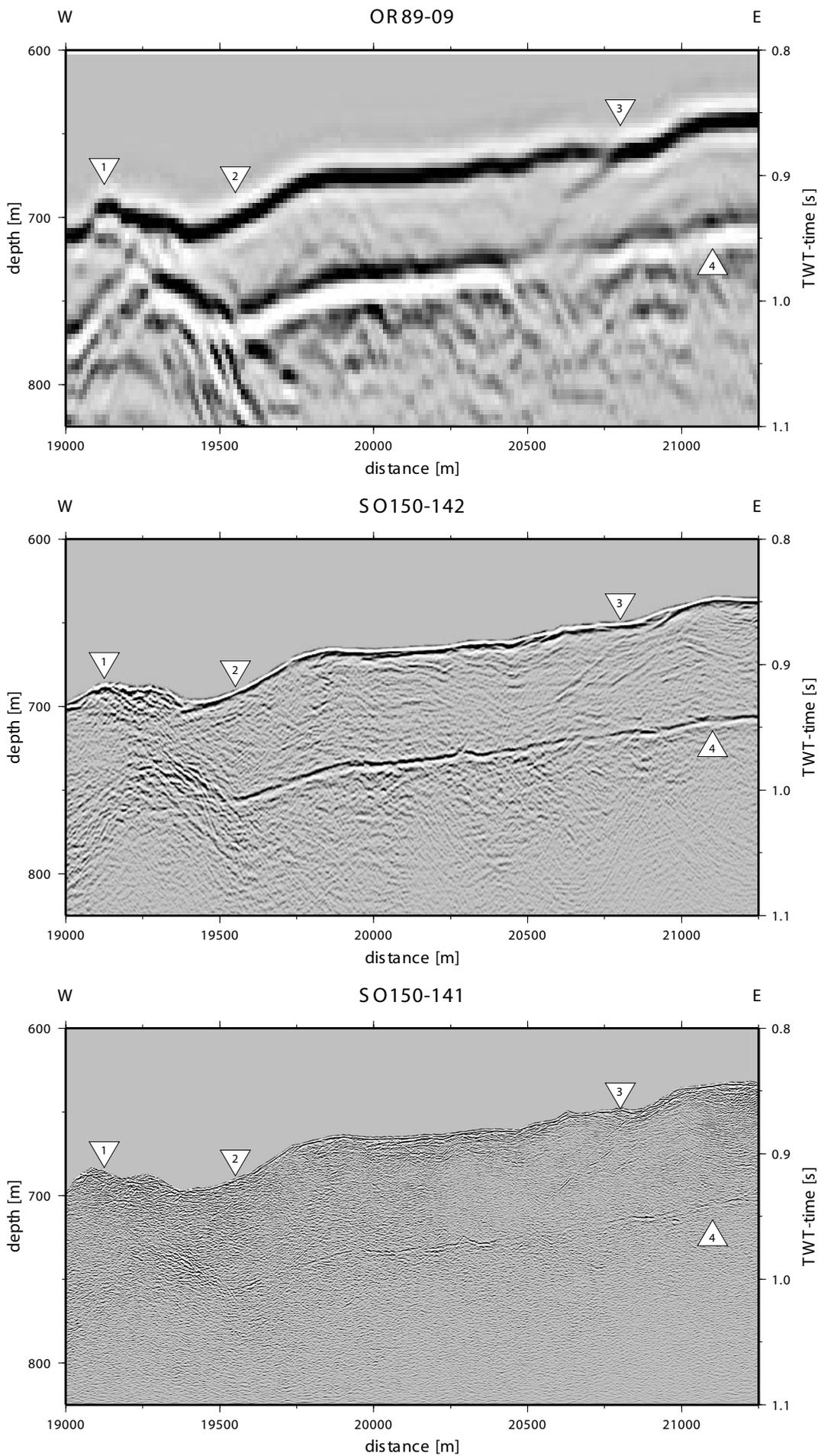


Abb. 1: Änderung der BSR-Signatur in Abhängigkeit der angeregten Signalfrequenz über die ODP-Bohrung 892 des nördlichen Hydratrückens. 1 - aktive Fluidentwässerung entlang einer Störungszone, 2 - Lokation der ODP-Bohrung 892, 3 - aktive Fluidentwässerung entlang einer Störungszone, 4 - BSR Reflexion.

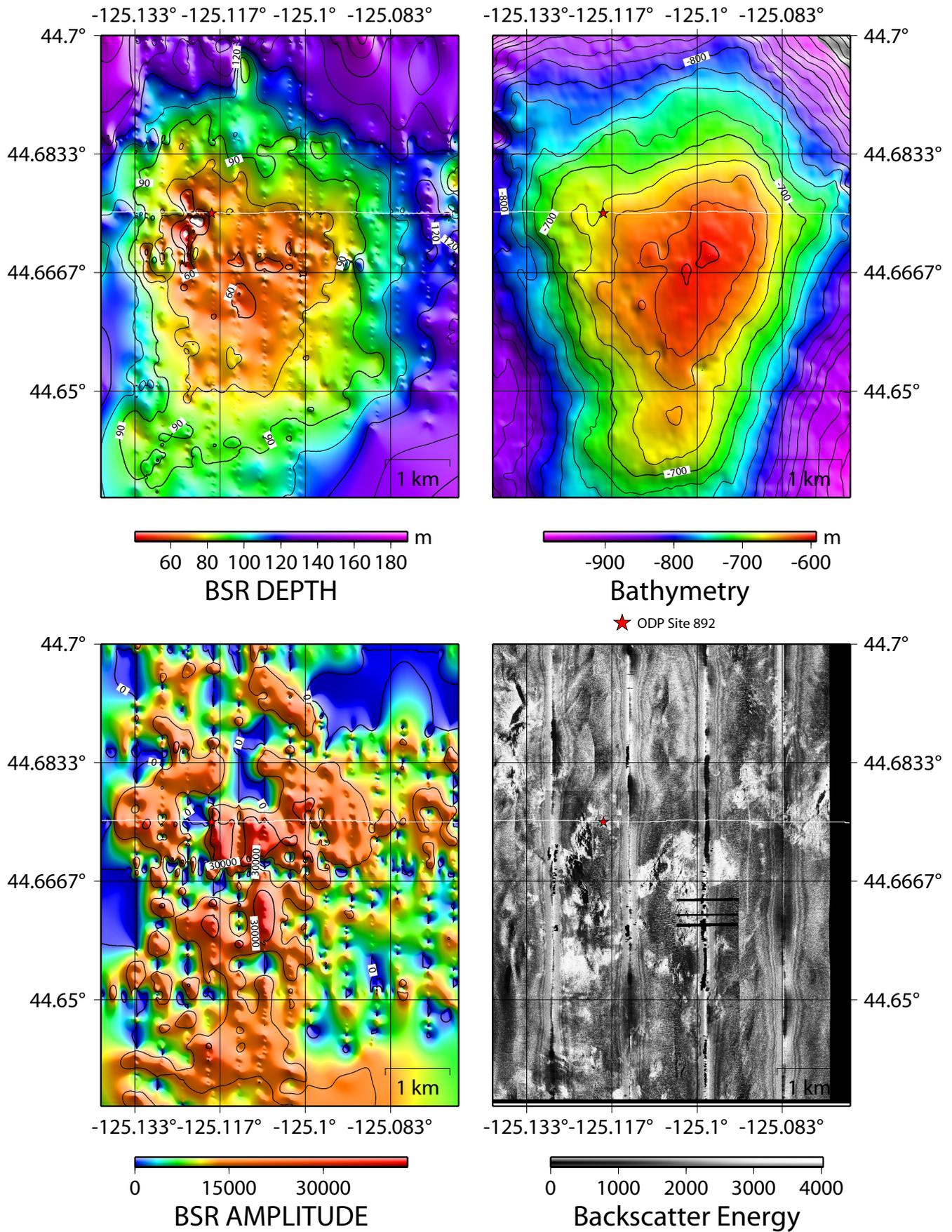


Abb.2: Analyse der SCS-Daten zur Charakterisierung der BSR-Signaturen am nördlichen Hydratrücken.

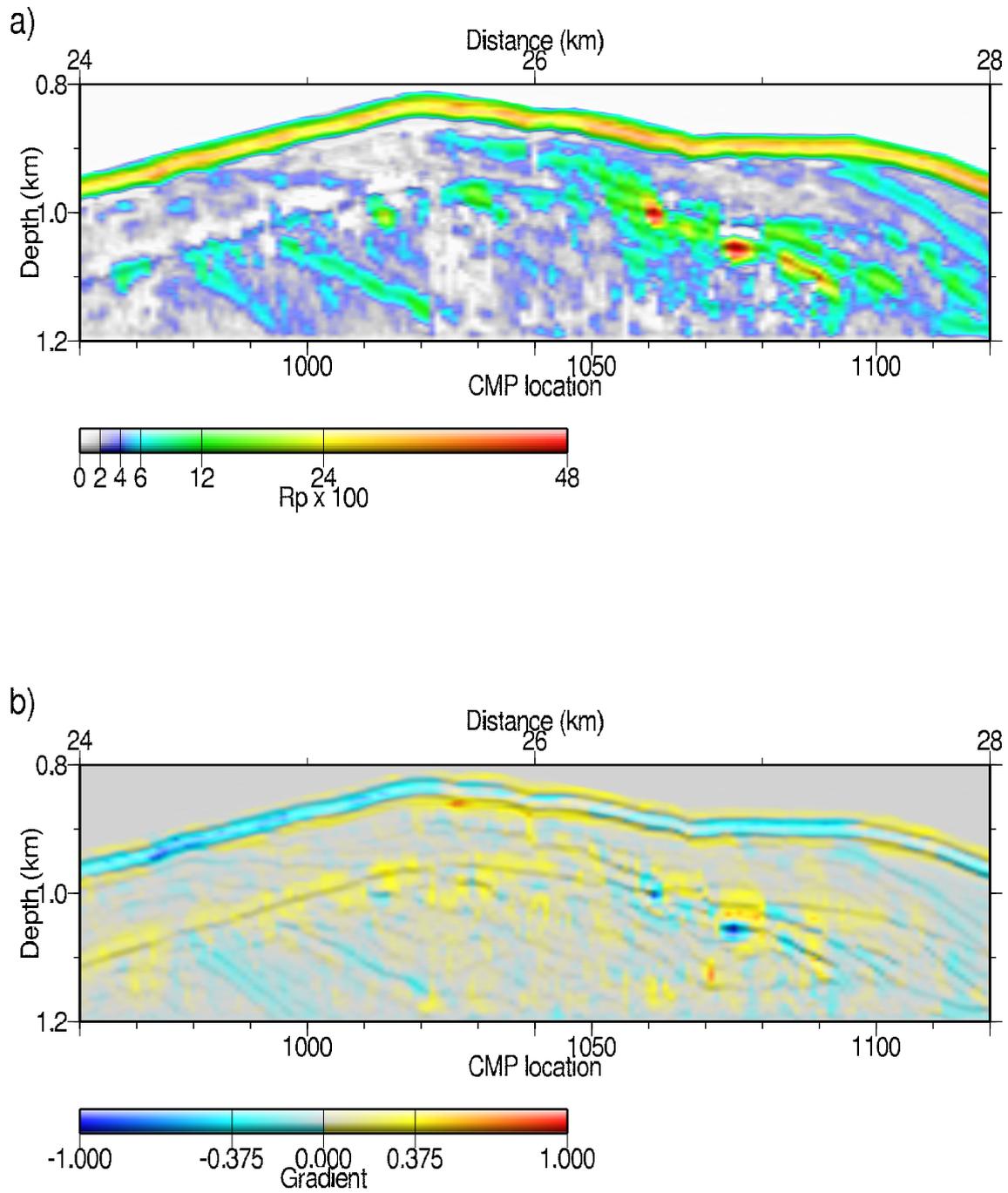


Figure 5.14. AVA attributes consist of intercept a), and gradient b).

Abb. 3: AVA Attribute (Intercept und Gradient) des tiefenmigrierten Profils OR89-2 (aus Haris, 2003).

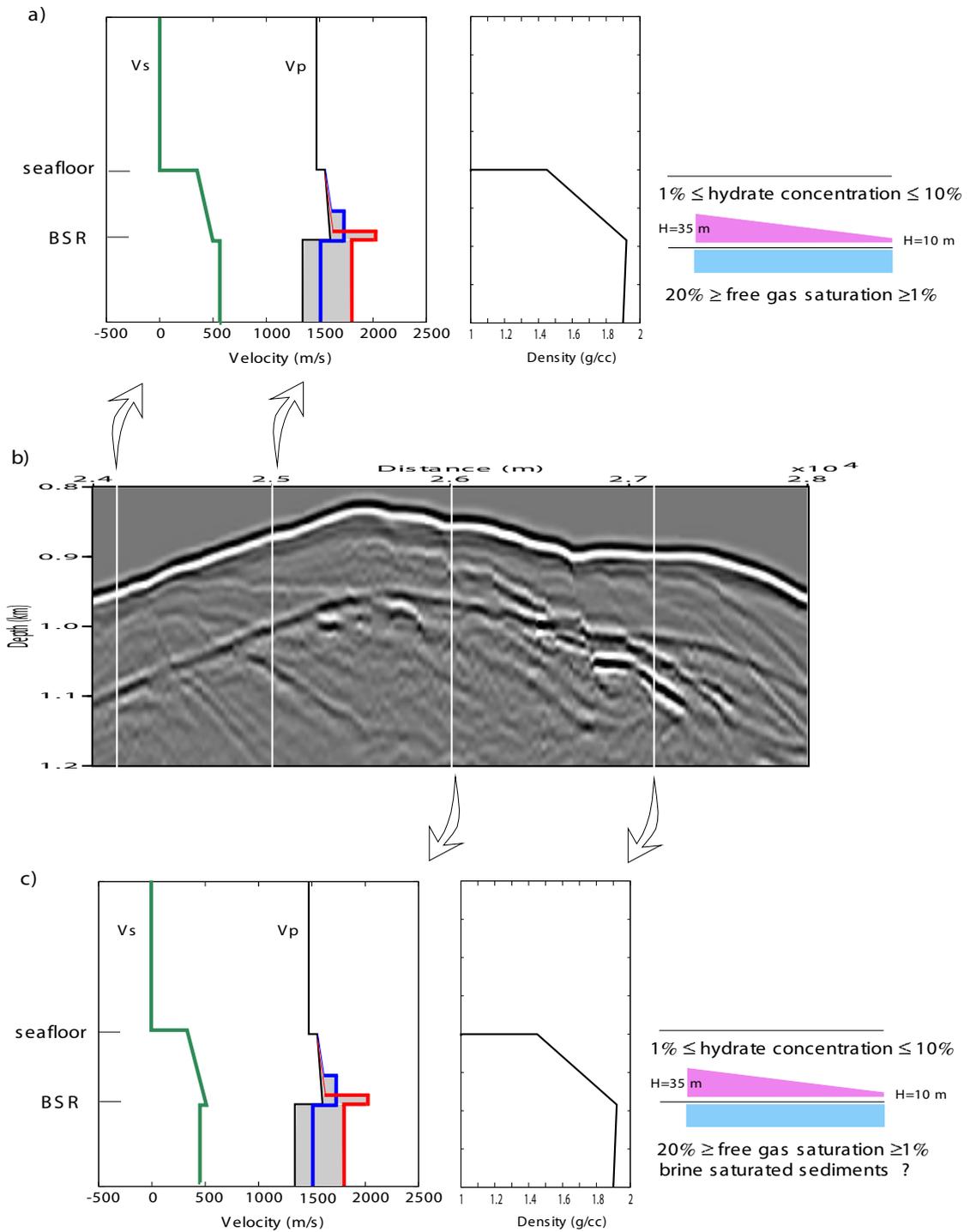


Figure 5.15. The estimated models for the observed AVA curves at lateral distances of 24200 m and 25000 m a) and at lateral distances of 26000 m and 27200 m c). The locations of the observed data are indicated by white lines superimposed on the migrated section b).

Abb. 4: Modellabschätzungen des freien Gases und des Gashydratanteils aus AVO Attributen und der seismischen Geschwindigkeitsverteilung entlang des Profils OR89-2 (aus Haris, 2003).

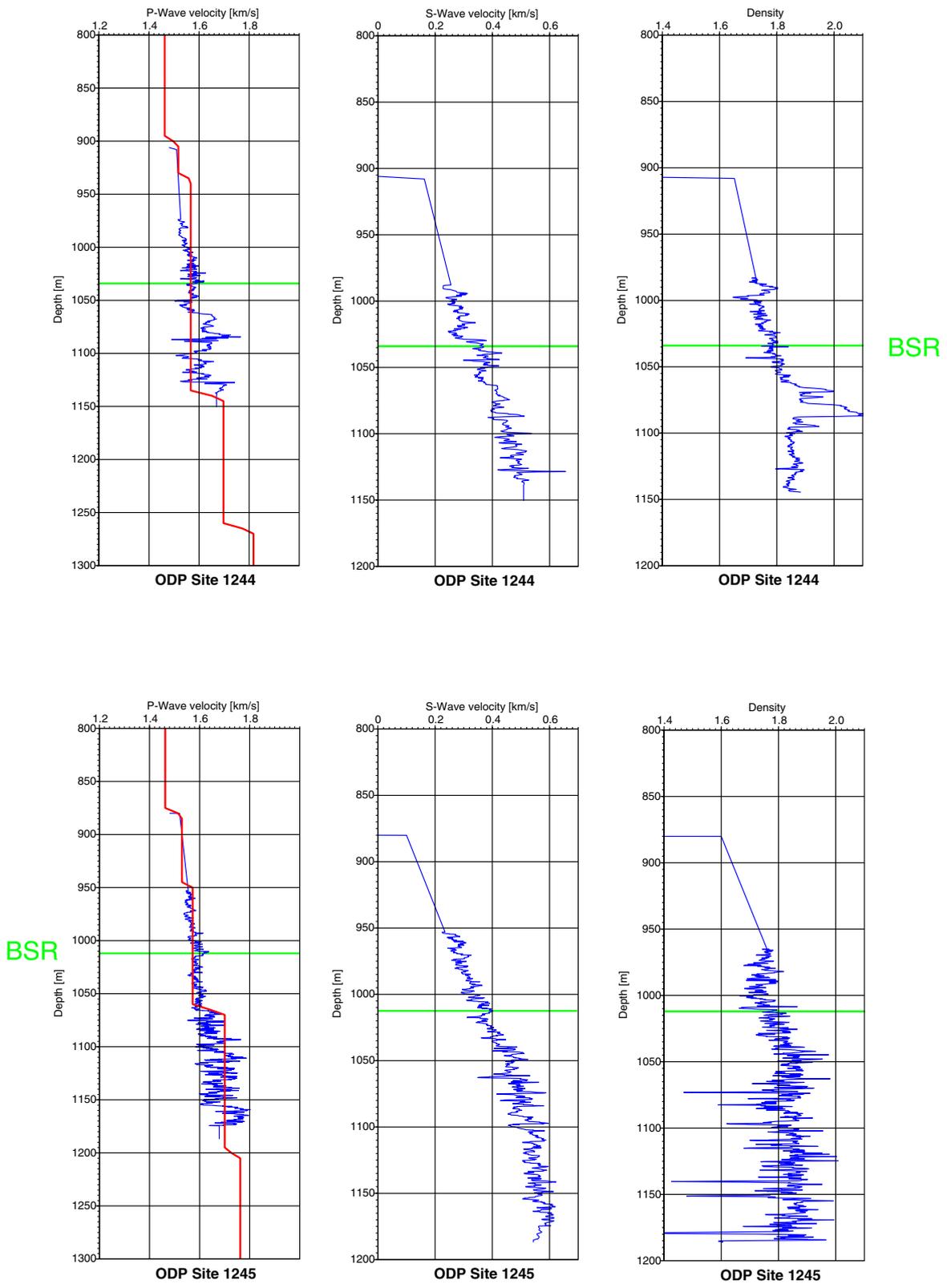


Abbildung 5: Bohrlogs der physikalischen Parameter von ODP-Site 1244 (oben) und 1255 (unten). Der BSR (grün) markiert die Untergrenze der Gashydratstabilitätszone (GHSZ) und liegt 132 Meter (Site1245) und 128 Meter (Site 1244) unterhalb des Meeresbodens. Die rote Kurve in den P-Wellenlogs ist die aus der Geschwindigkeitsanalyse der Seismik vorhergesagten P-Wellengeschwindigkeits-Tiefen-Funktion.

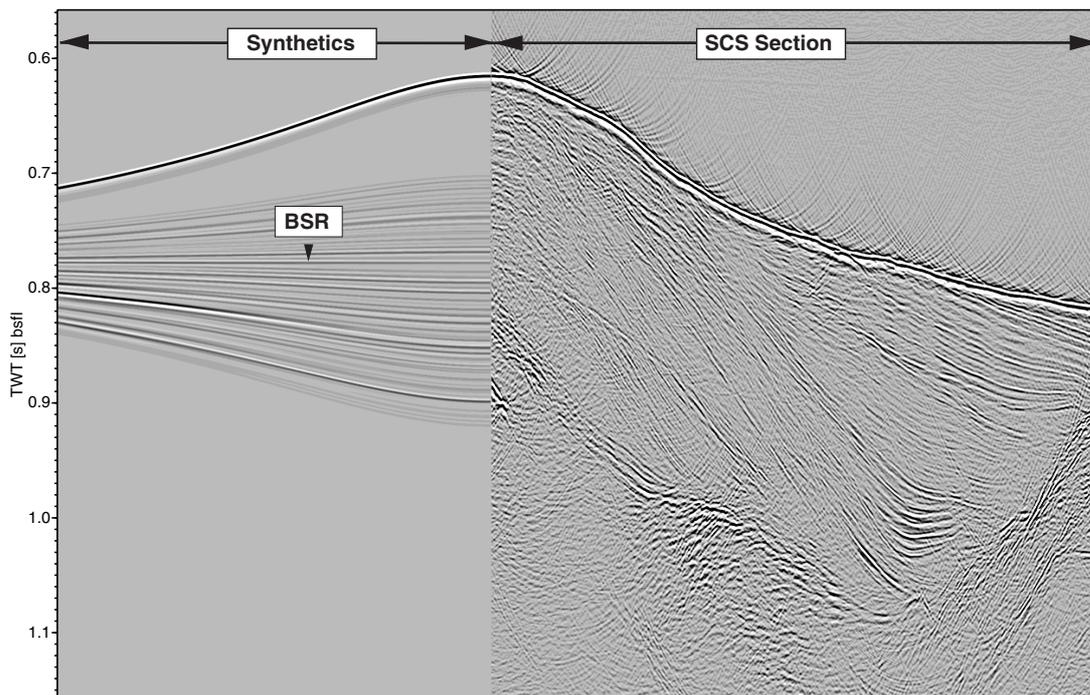
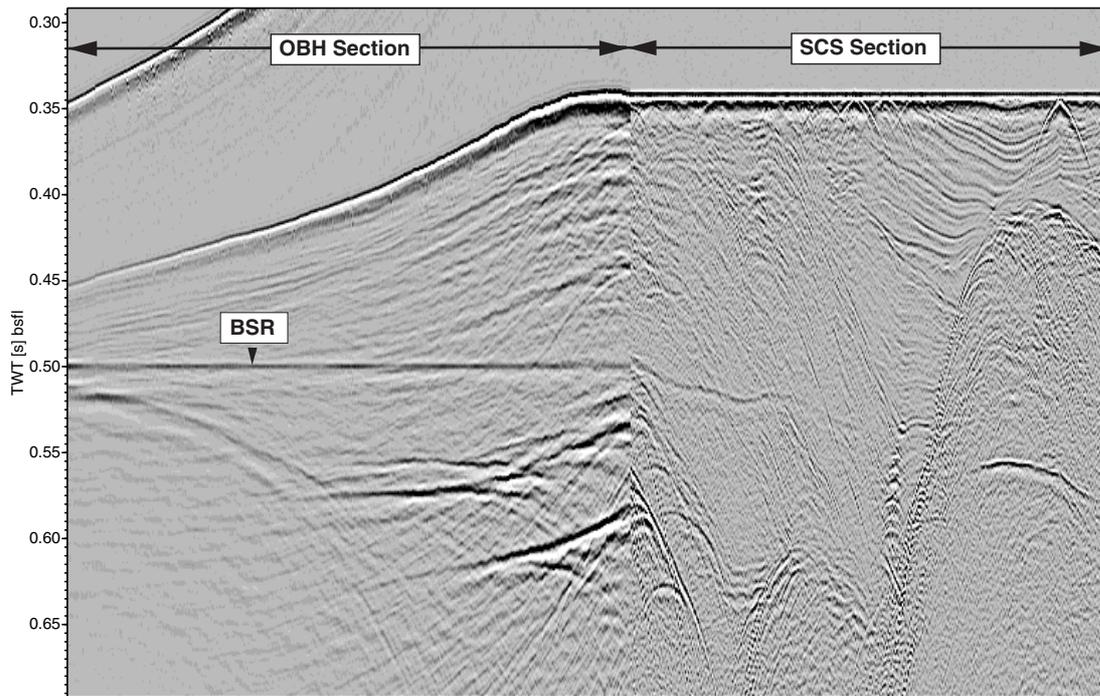


Abbildung 6: Einkanal Streamer Sektionen, korreliert mit OBH Reflektionsdaten.
Oben: OBH Sektion (links) auf BSR Einsatz statisch korrigiert und Streamersection (rechts) auf Meereseboden statisch korrigiert.
Unten: OBH Sektion (links) auf BSR Einsatz statisch korrigiert und migrierte Zeitsektionen der Streamerdaten.

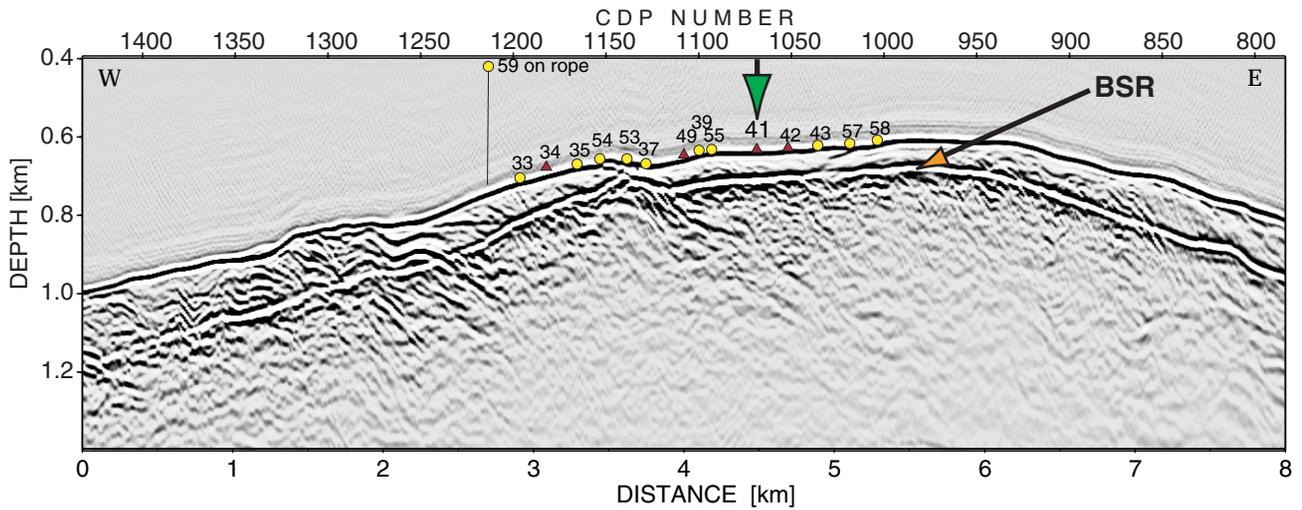


Abb. 7: Profil OR89-09 MCS - FD Prestack Tiefenmigration

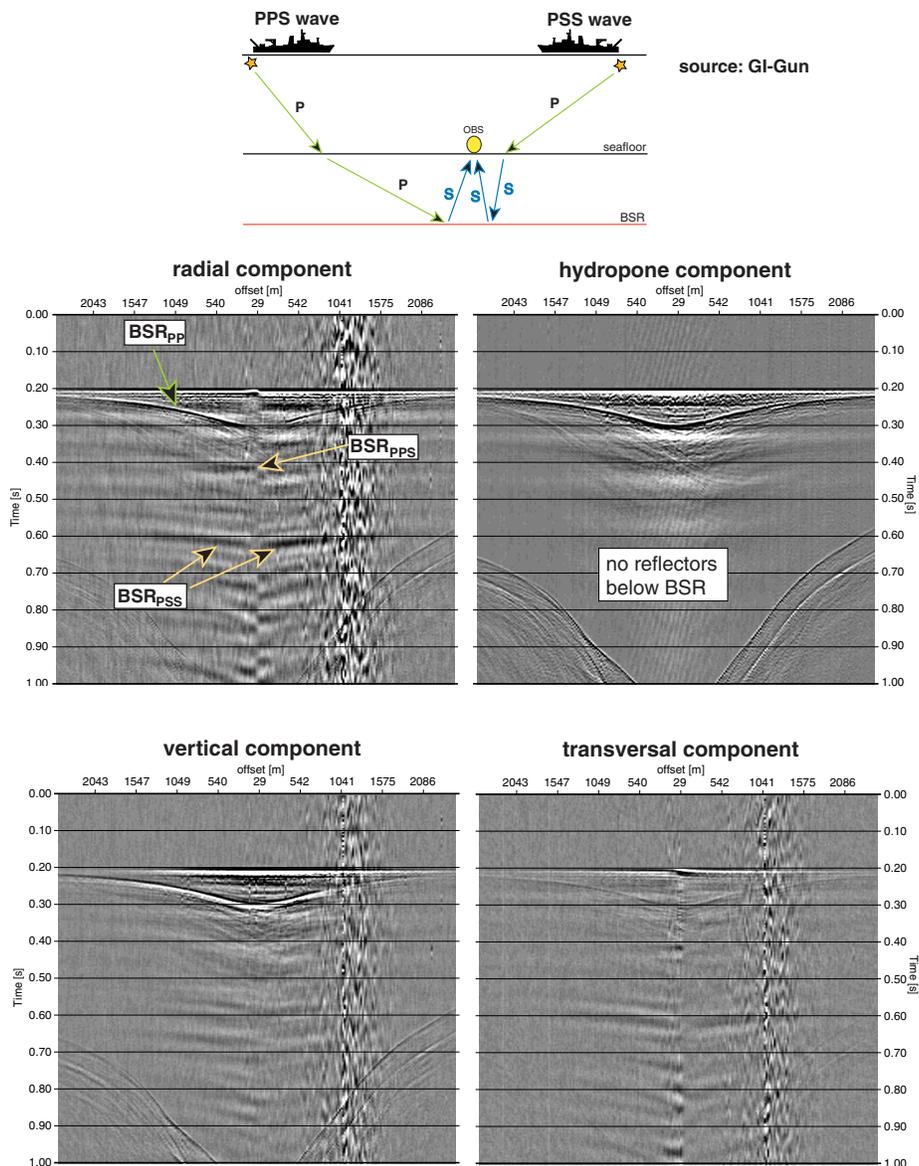


Abb. 8: OBS41 nach Rotation und horizontaler Korrektur der direkten Welle.

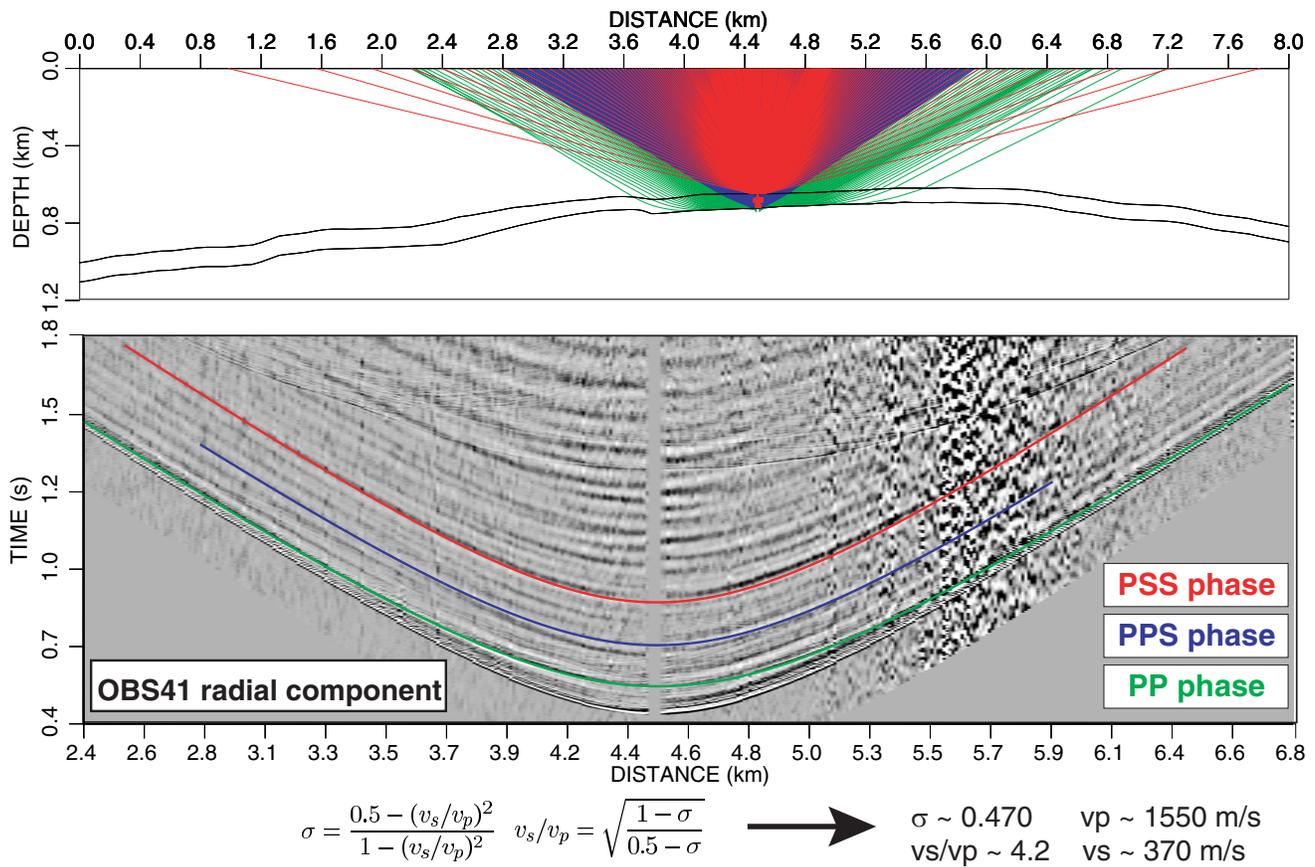


Abb. 9: Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeit oberhalb des BSR durch Laufzeitmodellierung (rayinvr, C. Zelt, 2000).

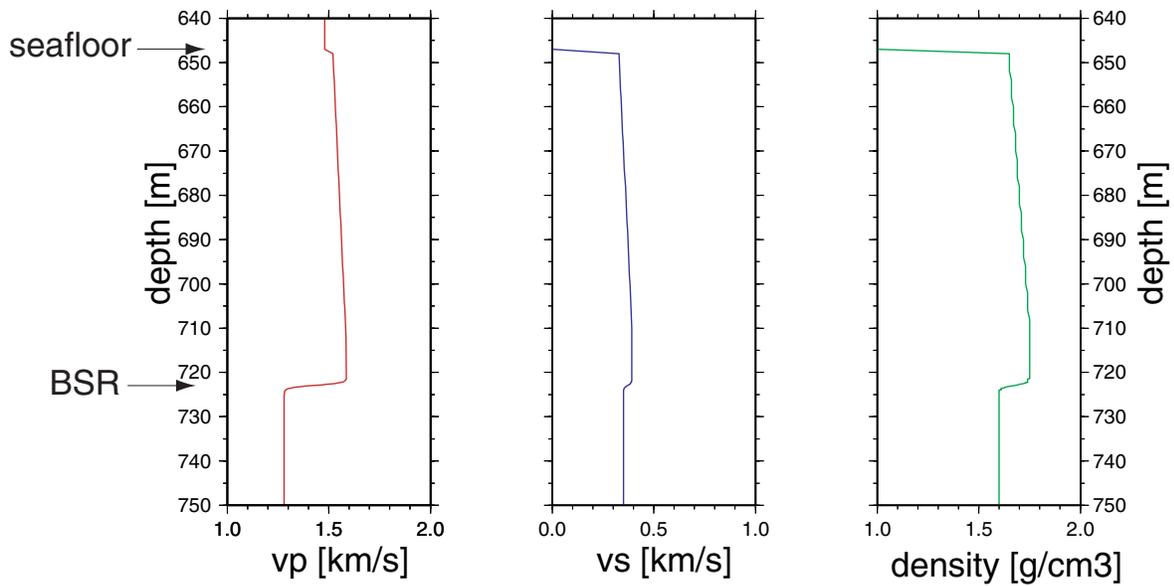


Abb. 10: Modell der elastischen Parameter am BSR verifiziert durch synthetische Reflektivitätsmodellierung (OASES, Schmidt, 1999).

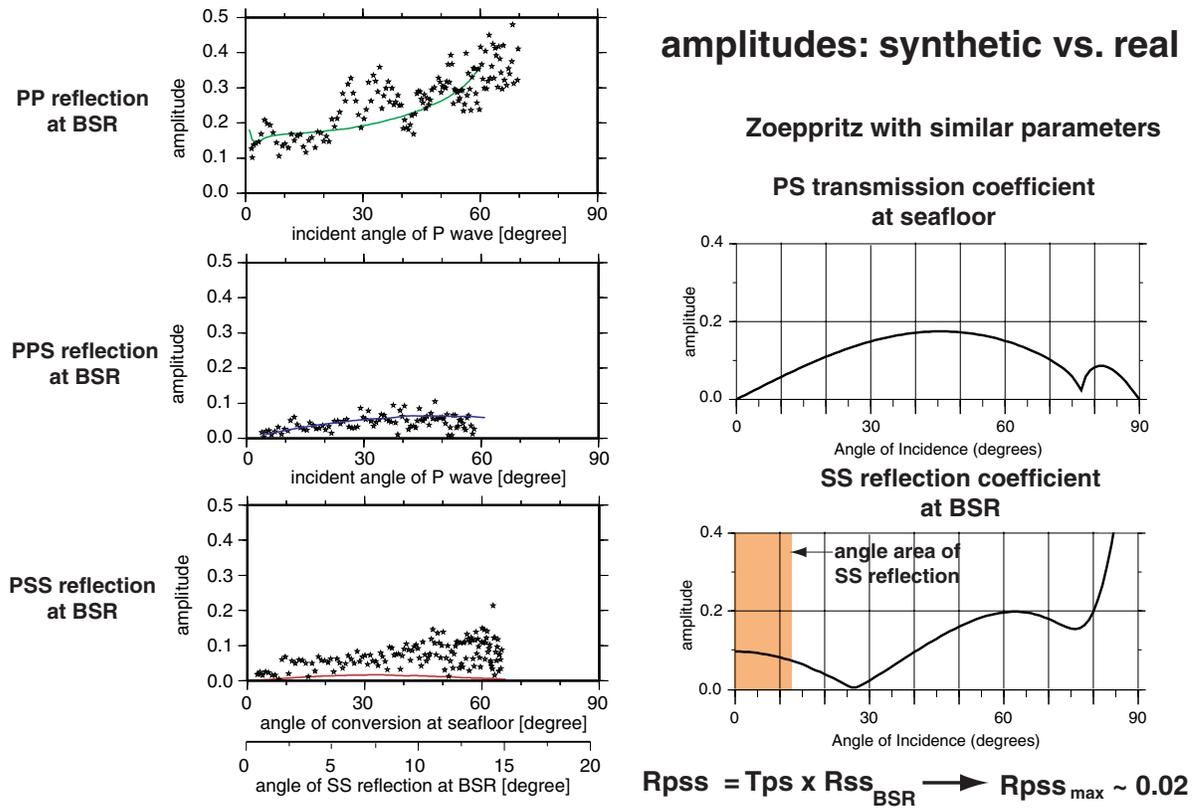


Abb.11: Vergleich von realen und synthetischen Amplituden (Reflektivitätsberechnung mit OASES für das Modell in Abb.4).

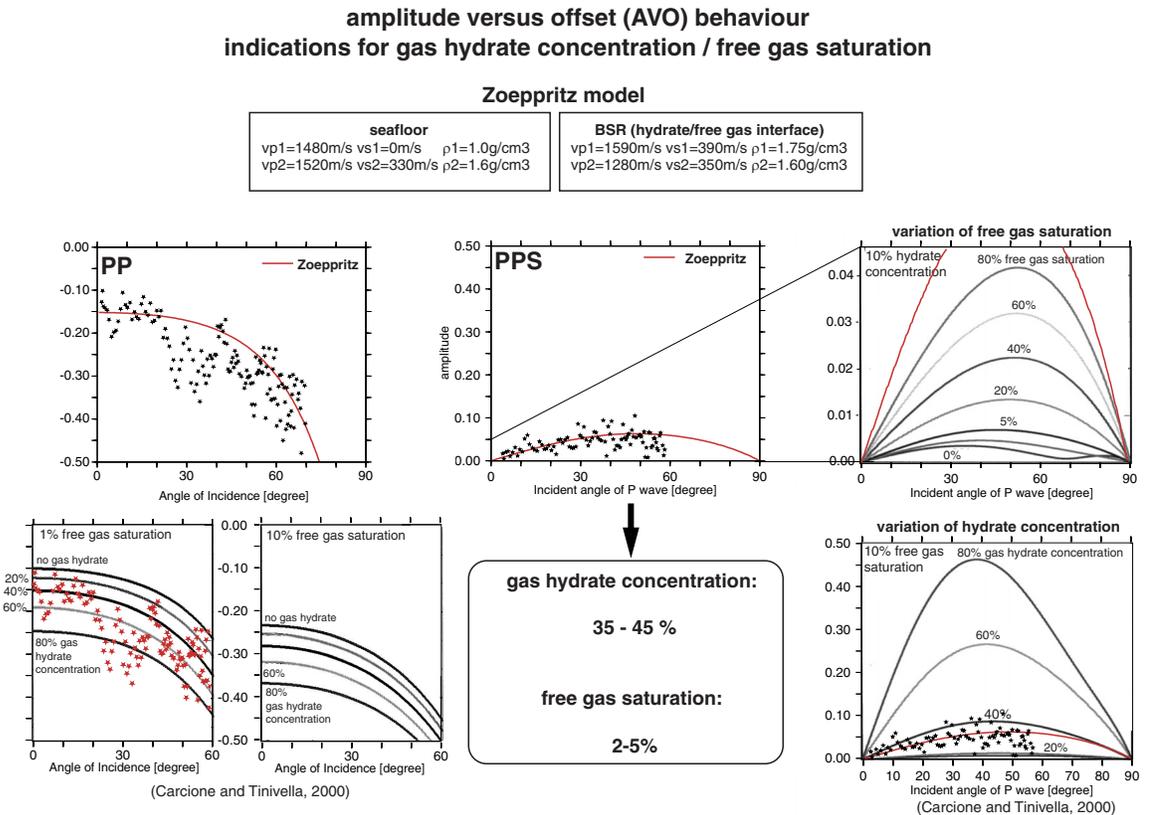


Abb.12: Quantifizierung von Gashydrat und freiem Gas durch Vergleich der AVO-Kurven mit Modellkurven nach Carcione und Tinivella (2000).