

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

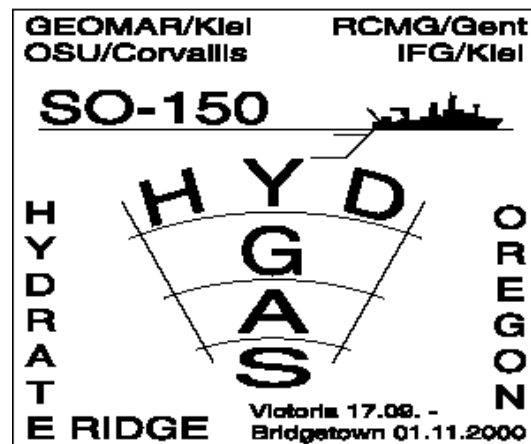
SO-150

- 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 dieser 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.