

## **Properties and Fabric of Near-surface Methane Hydrates at Hydrate Ridge, Cascadia Margin**

Erwin Suess<sup>(1)\*</sup>, Gerhard Bohrmann<sup>(1)</sup>, Dirk Rickert<sup>(1,2)</sup>, Werner F. Kuhs<sup>(3)</sup>, Marta E. Torres<sup>(4)</sup>, Anne Trehu<sup>(4)</sup>, and Peter Linke<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>GEOMAR Research Center, 24148 Kiel, Germany

<sup>(2)</sup> current address:

<sup>(3)</sup> GZG Geological Center, University of Göttingen, 37077 Göttingen, Germany

<sup>(4)</sup> College of Atmospheric and Ocean Sciences, Oregon State University, Corvallis, OR 97331, USA

Hydrate Ridge harbors a variety of methane hydrates in near-surface sediments. They coexist with free methane which migrates upwards, driven by convergent tectonics, from beneath the hydrate stability zone. Several types of hydrate fabrics, interlayered with carbonate crusts and hemipelagic sediment clasts, were recovered from the topmost 100 cm of the seafloor at 780-790 m of water depth. In most cases pure white hydrate occurs in layers millimeters to several decimeters thick. On a macroscopic scale the fabric varies from highly porous, with pore diameter up to several cm, to massive with not visible pores. Bulk densities of nearly 80 samples ranged from 0.35– 0.75 g cm<sup>-3</sup> and are inversely correlated with the pore volume which ranged from 10-70 vol-%. Pore volume was estimated from volume changes after hydraulic compression at about 160 bar. These data allow estimates for an end-member density of pure natural methane hydrate of 0.79±0.13 g cm<sup>-3</sup> which is approx. 10% less than the theoretical material density. We attribute the difference to homogenously distributed nano-pores, a fabric observed by field emission scanning electron microscopy on natural hydrates that otherwise have a dense and massive fabric. Nano-pores are absent in hydrates with visible macro- and micro-pores. The low bulk density and the porous fabric result from the formation of hydrates directly from bubbles of methane. Low densities create a high positive buoyancy force as well as low acoustic velocity of hydrated sediments. Strong buoyancy facilitates the rapid transfer of solid gas hydrates from the seafloor to the atmosphere, by hydrate floats, and hence affects the greenhouse gas budget. Whereas the low acoustic velocity affects the subsurface distribution of the bottom simulating reflector (BSR) as well as thickness of hydrated formations and hence the estimate of the amount of hydrate stored in sedimentary strata. .

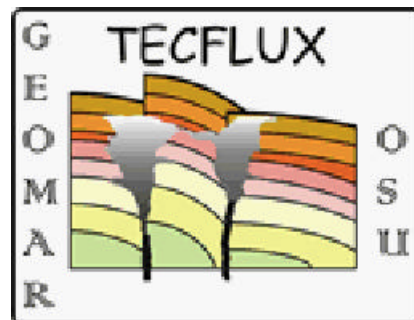
# Abschlussbericht

**Thema:** "SO 143-TECFLUX-I:  
Die Methanhydrate der Cascadia Subduktionszone und ihre  
Langzeiteinwirkung auf das Ökosystem Tiefsee"

**Projektkoordination:** Prof. Dr. Erwin Suess, Dr. Gerhard Bohrmann, Dr. Peter Linke, Dr.  
O. Pfannkuche, PD. Dr. Klaus Wallmann  
GEOMAR Forschungszentrum, Marine Umweltgeologie  
Wischhofstr. 1-3  
D-24148 Kiel

Dr. Nina Kukowski GFZ Potsdam Telegrafenberg PB 3.1 D-14473 Potsdam	Dr. Laurenz Thomsen School of Oceanography of Washington 301 Gerberding Hall, Ste. 400 Seattle, WA 98195 USA
--	--

**Projektmitarbeiter:** Dr. Dirk Rickert, Carmen Jung  
GEOMAR Forschungszentrum, Marine Umweltgeologie  
Wischhofstr. 1-3  
D-24148 Kiel



**Anlagen:** Schlussbericht  
Erfolgskontrollbericht  
Kurzfassungen  
Veröffentlichungen  
Presseberichte

**GLIEDERUNG****0. BERICHTSBLATT/ DOCUMENT CONTROL SHEET**

<b>1. SCHLUSSBERICHT .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Aufgabenstellung .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....</b>	<b>5</b>
<b>1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....</b>	<b>8</b>
<b>1.6 Erzielte Ergebnisse .....</b>	<b>8</b>
<b>1.7 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit und Erfahrungen.....</b>	<b>41</b>
<b>1.8 Fortschritt bei anderen Stellen auf diesem Gebiet.....</b>	<b>41</b>
<b>1.9 Erfolge oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse (s. Anlage).....</b>	<b>42</b>
<b>2. ERFOLGSKONTROLLBERICHT .....</b>	<b>51</b>
<b>2.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms.....</b>	<b>51</b>
<b>2.2 Wissenschaftlicher und technischer Erfolg des Vorhabens .....</b>	<b>51</b>
<b>2.3 Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplanes.....</b>	<b>52</b>
<b>2.4 Erfindungen und Schutzrechtanmeldungen.....</b>	<b>52</b>
<b>2.5 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben.....</b>	<b>52</b>
<b>3. ANLAGEN .....</b>	<b>53</b>

## 1 SCHLUSSBERICHT

### 1.1 Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel des Projektes war die langzeitliche Erfassung der Einwirkung von exponierten Gashydraten auf das Ökosystem der Tiefsee. Die geplanten Arbeiten erstreckten sich auf die Quantifizierung von Methanverteilungen und -flüssen, biogeochemischen Prozessen im oberflächennahen Sediment, der Wasser-Sediment-Grenzschicht und der bodennahen Wassersäule an Methanhydratlagen, sowie an den umgebenden Cold Vents des Cascadia Akkretionskeils.

Auf dem Hydratrücken (HR), dem zweiten Akkretionsrücken der Cascadia-Subduktionszone (Abb. 1) sind Auf- und Abbau von Gashydraten (GH) von besonderer Bedeutung für die Fluid- und Gaszirkulation und stellen somit wichtige Prozesse im globalen Stoffhaushalt dar. Einsatzschwerpunkte waren der nördliche (NHR) und südliche Hügel (SHR) des HR.

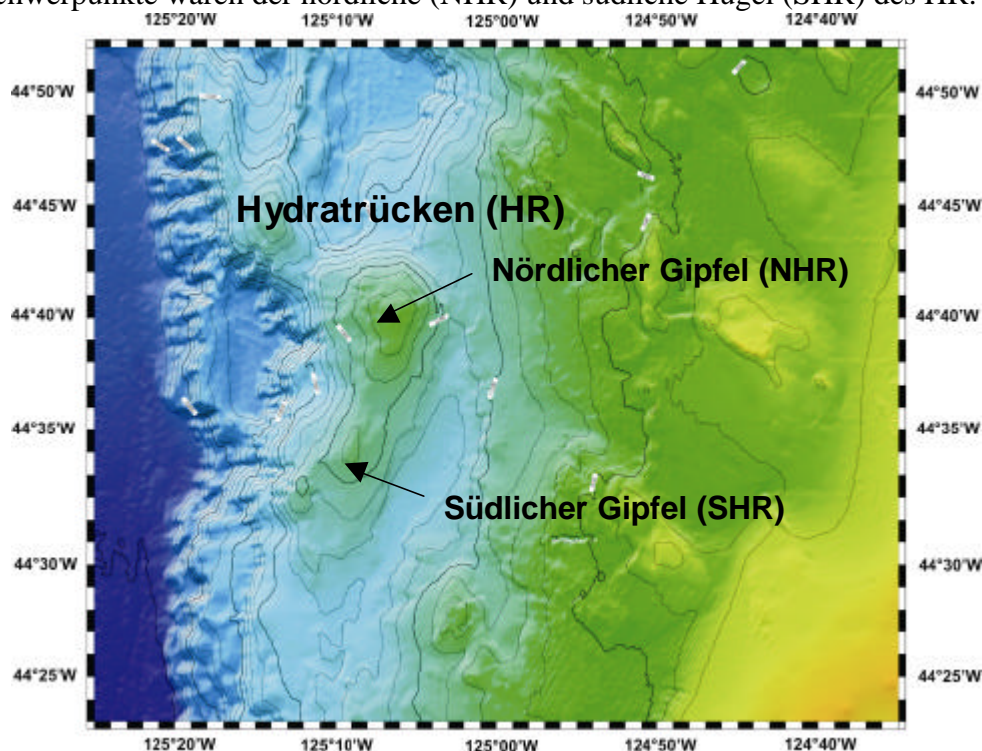


Abb. 1 Südlicher und nördlicher Gipfel des HR im 2. Akkretionskomplex der Cascadia Subduktionszone.

Zur Präzisierung der Stoffflüsse, hauptsächlich von Methan und Fluiden, der biogeochemischen Umsetzungsraten sowie des Einflusses der exponierten Gashydratlagen auf das Ökosystem der Tiefsee wurden im Einzelnen folgende Ziele und Ansätze verfolgt:

- Verteilung von Vent-, Karbonat- und Gashydratfeldern zur flächenhaften Integration
- Beprobung der massiven Gashydrate im Verbund mit Sediment und authigenen Karbonaten
- Messung von Fluidtransportraten und biogeochemischen Stoffumsätzen an Cold Seeps
- Chemische Charakterisierung der Fluide und des Methantransports in der Wassersäule
- Biogeochemische Untersuchungen und Beprobungen von Oberflächensedimenten

### 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben war vor dem Hintergrund eines deutsch-amerikanischen Gemeinschaftsprojektes TECFLUX (= TECtonically-induced material FLUXes) zu sehen,

welches auf den Erfolgen der SONNE-Reisen 109 und 110 aufbaute. Schwerpunkt der Bemühungen aller Beteiligten sollte es sein, eine Langzeitstation an den neu entdeckten Gashydratseeps des Akkretionskomplexes vor der Küste Oregons einzurichten. Dazu wurden parallel zu diesem Antrag von den amerikanischen Partnern drei flankierende NSF-Anträge eingereicht, die zusammen ein kongruentes Gemeinschaftsprojekt mit einer hohen zeitlichen Abdeckung des Arbeitsgebietes unter Einsatz verschiedenster Forschungsplattformen gewährleisten sollten (FS SONNE; RV WECOMA; RV NEW HORIZON; RV ATLANTIS-DSRV ALVIN).

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen des deutsch-amerikanischen Gemeinschaftsprojektes wurden im Zeitraum zwischen Mai und Oktober 1999 acht Expeditionen (Tab. 1) durchgeführt.

**Tab. 1:** 1999 durchgeführte TECFLUX-Expeditionen

Ausfahrt*	Zeitraum	Fahrtleiter/Institut
R/V NEW HORIZON	01.06. - 11.06.	Chris Goldfinger, OSU
R/V NEW HORIZON 2	13.06. - 23.06.	Bob Collier, OSU
R/V ATLANTIS/ALVIN	30.06. - 13.07.	Marta Torres, OSU
<b>FS SONNE 143/1a</b>	<b>29.06. - 13.07.</b>	<b>Peter Linke, GEOMAR</b>
<b>FS SONNE 143/1b</b>	<b>14.07. - 30.07.</b>	<b>Erwin Suess, GEOMAR</b>
<b>FS SONNE 143/2</b>	<b>31.07. - 25.08.</b>	<b>Olaf Pfannkuche, GEOMAR</b>
<b>FS SONNE 143/3</b>	<b>26.08. - 06.09.</b>	<b>Gerhard Bohrmann, GEOMAR</b>
R/V WECOMA	03.10. - 07.10.	Bob Collier, OSU

\*vom BMBF geförderte Forschungsfahrten sind fett gedruckt

Die SONNE-Expeditionen SO143/1 bis /3 konnten direkt auf den Erfolgen der SONNE-Reisen SO109 und 110 aufbauen. In einem multidisziplinären Verbund von Wissenschaftlern aus insgesamt 4 Nationen (Deutschland, USA, Kanada und Japan) wurden grundlegende neue Erkenntnisse zu geophysikalischen, biogeochemischen und hydrogeographischen Prozessen gewonnen, die im Zusammenhang mit tektonischen Entwässerungsvorgängen im Bereich der Cascadia-Subduktionszone und insbesondere im Bereich des HRs stehen.

Auf dem 1. Fahrtabschnitt der Sonne-Reise 143 wurde das Schiff von Hawaii in das Arbeitsgebiet vor der Küste Oregons überführt und die Transitzeit dazu genutzt, die verschiedenen Labors sowie die komplexen Tiefsee-Geräte auf den Einsatz vorzubereiten. FS Sonne wurde zeitgleich mit dem Forschungsschiff Atlantis und dem Tauchboot ALVIN in der Gashydratprovinz eingesetzt und 2 VESP-Lander als stationäre Messsysteme videografisch auf den Vents abgesetzt. Diese Stationen sollten für mehrere Wochen direkte Messungen des tektonisch induzierten und durch Gashydratdestabilisierung freigesetzten Stoffflusses durchführen, um die Langzeitdynamik der Vent-Systeme am 1. und 2. Akkretionsrücken aufzuzeichnen. Umfangreiche Untersuchungen mit dem Videoschlitten wurden zusammen mit der vorangegangenen Side-Scan-Sonar-Vermessungen durchgeführt mit dem Ziel, die räumliche Ausdehnung der Vent- und Gashydratfelder zu erfassen und die Grundlage für eine detaillierte Beprobung auf den folgenden Fahrtabschnitten zu liefern.

Auf dem Fahrtabschnitt 143/1b wurden die verschiedenen Beprobungssysteme eingesetzt, um den Meeresboden an vorher ausgewählten Stationen aktiver Fluidaustritte (sogenannter Cold Vents) zu beproben und das Signal zu verfolgen. Neben dem Videogreifer wurden auch

Multicorer und Kastengreifer videogeführt am Meeresboden eingesetzt. Geochemische Untersuchungen an den beprobten Sedimenten bildeten den Schwerpunkt dieser Reise und wurden durch intensive Arbeiten in der Wassersäule und zusätzliche Videokartierungen mit OFOS innerhalb der Gashydratprovinz ergänzt.

Schwerpunkt des 2. Fahrtabschnittes (SO143/2) war die Untersuchung der Wechselbeziehung zwischen advektivem Stofffluss (Venting) und den Stoffumsätzen der benthischen Lebensgemeinschaften. Dieses sollte mit einer Vielzahl von biologischen und geochemischen Ansätzen an räumlichen Gradienten von einer aktiven Quellen über diffuse Austritte hin zu unbeeinflussten Sedimenten erfolgen. Ziel der Untersuchungen war es abzuschätzen, inwieweit sich der Stoffumsatz benthischer Organismen, die vom tektonisch induzierten Stofffluss reduzierter Substanzen abhängen, unterscheiden gegenüber Lebensgemeinschaften, die nur vom pelagisch primärproduzierten Energie-Eintrag leben. Hierzu wurden eine Reihe von videogeführten Mess- und Probenahmesystemen eingesetzt. Der Vent Sampler (VESP) wurde für ca. 1h unmittelbar auf einer Vielzahl von Quellen abgesetzt, um hier den tektonisch induzierten Stofffluss zu bestimmen. Demgegenüber wurde der VESP-II-Lander, ein stationäres Messsystem, für mehrere Wochen zu Messungen an den Quellen eingesetzt, um die Langzeitdynamik eines Systems zu untersuchen. Der GEOMAR Kammer-Lander wurde für die Gradientenmessung von Stoffumsätzen der Lebensgemeinschaften in Sedimenten eingesetzt und für mehrere Tage verankert.

Auf dem dritten und letzten Fahrtabschnitt (SO143/3) wurde die diesjährige Beprobung mit schwerem Gerät abgeschlossen. Dabei wurde erstmals von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe aus Hannover ein neu entwickeltes Kolbenlot mit Autoklaventechnologie eingesetzt. Mit dieser Technologie sollten längere Sedimentkerne mit Gashydratlagen beprobt und unter *in situ*-Druckbedingungen vom SHR auf dem Forschungsschiff geborgen werden. So gewonnene Sedimentkernproben sollten in ein von der TU Berlin ebenfalls neu entwickeltes Druckerhaltungssystem (Bild) überführt werden. Dieses Druckerhaltungssystem sollte es ermöglichen, erstmals längere Sedimentkerne mit Gashydratlagen unter Druck nach Deutschland zu transportieren, wo detaillierte Untersuchungen zum Gefüge der Gashydrate geplant waren. Das Autoklavenkolbenlot ging leider beim Ersteininsatz durch Abriss des Kolbenseils bei 5,7 Tonnen verloren, konnte allerdings im Rahmen der TECFLUX-II-Expeditionen SO148 im Jahr 2000 wieder geborgen werden. Weitere Untersuchungen an Bord von FS SONNE beinhalteten Vermessungen mit dem Fächerecholot Hydrosweep, Plume-Kartierungen mit Sonarsystemen und weitere Beobachtungsprofile mit dem Videoschlitten OFOS. Besonders die als letztes genannten Untersuchungen dienten der Vorbereitung für die Arbeiten mit dem kanadischen Roboter ROPOS, welcher im TECFLUX-II-Projekt im Jahr 2000 in der Gashydratprovinz durchgeführt wurde. Im Zeitraum 2000-2001 standen die Auswertungen und Veröffentlichungstätigkeiten der im Zeitraum zwischen Mai und Oktober 1999 erhobenen Daten im Vordergrund.

## **1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

### **1.4.1 Gas- und Fluidfreisetzung**

Für den Ansatz der direkten Beobachtung im Bereich von Plattenkonvergenzzonen ist das markanteste Element der Fluidzirkulation die am Meeresboden sichtbaren Austrittsstellen, die Cold Seeps oder Cold Vents, die bereits in unterschiedlichen Gebieten bearbeitet wurden (Suess et al., 1985; Kulm et al., 1986; Linke et al., 1994; Torres et al., 1996). Es wurden aktive neue Entwässerungszonen entlang des Aleutengrabens entdeckt (Suess and Bohrmann, 1997; Suess et al., 1998; Bohrmann et al., 1997; Wallmann et al., 1997). Weitere Arbeiten der Antragsteller zur Fluidzirkulation wurden im Mittelmeer (Wallmann et al., 1997; Wallmann et

al., in press; Winckler et al., in press), im Europäischen Nordmeer (Long et al., 1998; Lammers et al., 1995a) und im Ochotskischen Meer (Lammers et al., 1995b) durchgeführt. Weiterhin konnte durch direkte Beobachtungen an Cold Seeps ein völlig neuer Antriebsmechanismus der Entwässerung von Akkretionskeilen festgestellt werden: Die Zersetzung von Gashydraten, die zur Aussüßung des Porenwassers und mit der einhergehenden Dichteänderung und tektonisch-induzierten Überdruck zu enormen Ausstromraten führt (Suess et al., 1996; Suess et al., 1997b). Die von den Antragstellern entwickelte Probenkammern erlauben die direkte Messung von Stofftransportraten (Linke et al., 1994).

#### **1.4.2 Tektonischer Aufbau im Bereich der Gashydratprovinz**

Das Segment der Cascadia-Konvergenzzone vor der Küste Oregons ist das erste Beispiel, an dem tektonische Entwässerung beobachtet und dokumentiert werden konnte (Kulm et al., 1986; Suess et al., 1985). Seit dieser Entdeckung ist es eines der klassischen Arbeitsgebiete für unser Verständnis von Prozessen der Fluidfreisetzung an Kontinentalrändern und die Entstehung von Akkretionskomplexen geworden (Moore et al., 1990; Westbrook et al., 1994; Carson et al., 1995). Die Art der Akkretion wechselt entlang dieses Kontinentalrandes von Störungsbahnen, die zum Kontinent hin einfallen zu solchen, die auf die ozeanische Platte hin einfallen. Die Ursache ist noch nicht verstanden. Die oberflächliche Manifestation dieser Akkretion sind verschiedene in N-S-Richtung ausgerichtete Rücken mit zunehmenden Alter in Richtung der kontinentalen Platte. Zahlreiche seismische und bathymetrische Untersuchungen lagen bereits vor.

#### **1.4.3 Gashydrate**

Im Akkretionskeil der Cascadia-Subduktionszone sind Auf- und Abbau von Gashydraten von besonderer Bedeutung für die Fluidzirkulation, wie die Verbreitung geophysikalisch nachgewiesener BSRs, Bohrergebnisse während ODP-LEG 146 oder direkte Funde massiver Hydrate ergaben (Westbrook et al., 1994; Suess et al., 1997; Suess et al., 1999).

Der Einfluss, der von natürlichen Gashydraten auf Fluidfluss und Entwässerung, Klima und Hangstabilität ausgeht, ist zur Zeit noch schwer abschätzbar, weshalb erheblicher Forschungsbedarf bestand und weiter besteht.

#### **1.4.4 Bottom Simulating Reflector (BSR): Freies Gas und Gashydrat**

In den vergangenen Jahren 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 markiert quasi die Untergrenze der Gashydratstabilität (Hyndman et al., 1992; Tréhu et al., 1995), wobei freies Gas aufgrund der höheren Temperaturen unterhalb existiert. Ob der BSR im wesentlichen durch eine Geschwindigkeitszunahme oberhalb des BSR oder durch eine Geschwindigkeitsabnahme unterhalb des BSR verursacht wird (Pecher et al., 1996), ist eine Frage, die durch eine bessere Abschätzung der Gas- bzw. Gashydratkonzentrationen der jeweiligen Sedimente, besser beantwortet werden könnte. Bohrergebnisse während ODP LEG 164 (Blake Outer Ridge) zeigen, dass Gashydrate auch dort existieren, wo kein BSR registriert wurde, und dass das Gas sehr viel tiefer reicht als bisher angenommen (Holbrook et al., 1996; Dickens et al., 1997).

### 1.4.5 Regionaler Fluidtransport und Temperaturfeld

Die Heranführung grosser Fluidmengen durch Akkretion mariner Sedimente und ihre Auspressung infolge tektonischer und chemischer Prozesse führt zu einem strukturkontrollierten und durch Porenüberdrücke gekennzeichneten Transportverhalten bei regional relativ geringen Permeabilitäten (Moore und Vrolijk, 1992). Regional wichtig für das Fluidbudget sind vor allem der diffuse Fluidtransport durch den Porenraum (z.B., Sreaton et al., 1990; Mann und Kukowski, submitted), der um 3-4 Grössenordnungen höhere Transportraten aufweist. Zumindestens in Störungszonen erfolgt ein signifikanter Anteil des Wärmetransports advektiv (Kukowski und Pecher, submitted; Mann und Kukowski, 1999), woraus sich ein direkter Zusammenhang zwischen dem Fluidtransport und der Mächtigkeit der Gashydratstabilitätszone ergibt.

Auch der Porendruck wird deutlich durch den Fluidtransport beeinflusst (Mann und Kukowski, 1999). Dabei benötigt man eine detaillierte Kenntnis des zeitabhängigen Fluiddruck- und Temperaturfeldes, um zeitliche Änderungen der Gashydratstabilität zu verstehen. Da umgekehrt die Bildung und Zersetzung von Gashydraten Wärme freisetzt bzw. verbraucht, sind hier Rückkopplungseffekte wahrscheinlich.

### 1.4.6 Die benthische Resuspensionsschleife an Cold Seeps

Die Aggregation partikulären Materials spielt eine bedeutende Rolle beim Transfer der Partikel durch die Wassersäule (McCave, 1984). Im Kohlenstoffbudget der Tiefsee spielen ausserdem Aggregate, die innerhalb der Bodengrenzschicht (BGS) entstehen (Muschenheim et al., 1989), eine wichtige Rolle als Lebensraum, Nahrung, Substrat und Transportvehikel für Mikroorganismen. Es ist davon auszugehen, dass an Vent-Ökosystemen mit den erhöhten bakteriellen Umsetzungen von gelösten in partikulären organischen Kohlenstoff vermehrt Aggregate gebildet werden, welche über die Bodenströmung zu einer internen benthischen Kopplung von Kohlenstoffproduktion und -verbrauch führen (Thomsen, 1998). Verglichen mit der benthisch-pelagischen Kopplung zwischen Prozessen in der euphotischen Zone und dem Benthos, bei denen lokale Kohlenstoffproduktionen über den Vertikaltransport bilanziert werden, kann die "Ventproduktion" ebenfalls als Exportproduktion auf lateralem Weg zur Versorgung weit entfernter Benthosgemeinschaften angesehen werden.

### 1.4.7 Ergebnisse der SONNE-Reisen 109/110

Während dieser beiden Reisen wurden der kanadische Tiefseeroboter ROPOS sowie verschiedene andere videogeführte Beobachtungsgeräte und Probennehmer auf dem Hydratrücken (Abb. 1) eingesetzt. Während SO-110/1a konnten dabei erhebliche Mengen festen Methanhydrats (> 50 kg) mit dem TV-Greifer vom SHR geborgen werden, ein bis heute einmaliger Fund. Videobeobachtungen mit dem Photoschlitten EXPLOS konnten belegen, dass hier offensichtlich grössere Mengen Gashydrat direkt an der Sedimentoberfläche anstehen. Die Gashydrate sind möglicherweise mit Bakterienmatten überzogen und werden von Karbonatkrusten und anderen Ventorganismen umrahmt. Innerhalb der Sedimente formen die Gashydrate weisse Lagen von bis zu 10 cm Mächtigkeit. Es handelt sich um methandominierte Hydrate überwiegend biogenen Ursprungs, wie erste Isotopenanalysen zeigten (Suess et al., 1999).

Die Dünnschliffanalysen reiner Hydratlagen zeigen die Struktur ehemaliger Gasblasen, die von Gashydraten umrandet werden und die ehemaligen Gasblasen nachzeichnen (Bohrmann, 1998).

Die Oxidation von reduzierten Substanzen an Cold Seeps hat eine deutliche Auswirkung auf die Sauerstoffzehrung am Meeresboden (Wallmann et al., 1997). Auf dem Cascadia-



Akkretionskeil wurden sehr hohe Sauerstoffzehrungsraten und Geschwindigkeiten der Entwässerung festgestellt (Linke et al., 1994; Suess et al., 1999). Es ist jedoch noch nicht bekannt, wie sich die Höhe des biogeochemischen Stoffumsatzes und die Zusammensetzung und Aktivität der Fauna in zunehmender Entfernung der Methanaustritte verändert.

Die Arbeitsgruppe des Antragstellers bearbeitet biogeochemische Stoffflüsse in der Tiefsee (Pfannkuche, 1992; 1993a). Es wurden mehrere Freifallgeräte (Lander) u.a. zur in situ-Bestimmung der Sauerstoffzehrung entwickelt (Tengberg et al., 1995) und in den letzten Jahren mit den Forschungsschiffen METEOR und SONNE im Atlantik und im Arabischen Meer erfolgreich eingesetzt. Biochemische Analysen an Tiefseesedimenten zur Bestimmung von Biomasse und Aktivität benthischer Organismen wurden als Routinemessungen entwickelt (Pfannkuche and Thiel, 1987; Pfannkuche, 1993b; Pfannkuche and Soltwedel, 1998). Diese für die Untersuchung "normaler" Tiefseesedimente entwickelten Methoden sollten jetzt erstmals auf die durch Methanaustritte beeinflussten Gebiete angewandt und zusätzliche Proxies zur Erfassung chemoautotropher Aktivität untersucht werden.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

### **Nationale Partner** (ausserhalb von GEOMAR):

R. Bayer, Umweltphysik, Universität Heidelberg  
G. Gust, Meerestechnik I, Technische Universität Hamburg-Harburg  
W. Press, Experimentalphysik, Christian-Albrechts-Universität  
H.-J. Hohnberg, Institut für Schiff- und Meerestechnik, TU Berlin  
A. Boetius, U. Witte, M. Elvert, MPI Bremen

### **Internationale Partner:**

M. Whitticar, University of Victoria  
M. Torres, J. McManus, Oregon State University, Corvallis, OR, USA  
B. Collier, G. Klinkhammer, Oregon State University, Corvallis, OR, USA  
C. Goldfinger, Oregon State University, Corvallis, OR, USA,  
A. Trehu, Oregon State University, Corvallis, OR, USA  
M. de Angelis, Humboldt State University, Arcata, CA, USA  
P. Brewer, Monterey Bay Aquarium Research Institute, Monterey, CA, USA

## 1.6 Erzielte Ergebnisse

### **1.6.1 Verteilung von Gashydraten, authigenen Karbonaten und Vent-Feldern**

Im Rahmen des TECFLUX-Projektes wurde der Hydratrücken (HR) der Cascadia-Subduktionszone vor Oregon, während der SO 143 Ausfahrten mit dem Forschungsschiff SONNE, mit Hilfe des Ocean Floor Observation Systems (OFOS) optisch kartiert. Zahlreiche Profilschnitte und hochauflösende flächige Kartierungsarbeiten erlauben eine äusserst detaillierte geologisch-morphologische Bearbeitung des Untersuchungsgebietes.

Während der Expeditionen des Forschungsschiffes SONNE wurden im Arbeitsgebiet insgesamt 46 OFOS-Profile gefahren. Das OFOS ist mit zwei Videokameras (Farbkamera und Schwarz-Weiss-Kamera) sowie mit zwei Filmkameras für stereographische Bildaufnahmen ausgerüstet. Für eine umfassende geologische, morphologische und biologische Kartierung des Untersuchungsgebietes stehen anhand der letztjährigen Expeditionen ca. 500 Stunden Filmmaterial und ca. 52 000 Diaaufnahmen zur Verfügung. Die Auswertungen des Film- und Diamaterials ergeben einen Überblick über die geomorphologische Ausbildung des HR und dessen Umgebung, unter Berücksichtigung der Verteilung der unterschiedlichen authigenen Karbonate, der Gashydrate und der Vent-Faunenvergesellschaftung. Der zweite Akkretionsrücken der Cascadia Subduktionszone ist geprägt durch unterschiedliche Typen

authigener Karbonatpräzipitate, die in direktem Zusammenhang zur Dynamik der Fluidentwässerung und der einhergehenden Gashydratbildung stehen. Die jüngsten Ergebnisse haben bestätigt, dass in den oberen Sedimentschichten, sowohl wenige Millimeter unterhalb der Sediment-Wassergrenzfläche als auch unterhalb von 100 cm mehrere millimeter- bis zentimeterdicke Gashydratlagen auftreten.

Die visuelle Kartierungsarbeit wird ausserdem durch Karbonat- und Sedimentproben, die mittels videogesteuertem Greifer, Multicorer und Schwerelot gewonnen wurden, ergänzt. Die erarbeitete Klassifizierung der Karbonatproben, basierend auf einer genetischen-diagenetischen Charakterisierung, soll den direkten Einfluss des aktiven Ventgeschehens und dessen Auswirkung auf die Entstehung und strukturelle Ausbildung der authigenen Karbonatpräzipitation hervorheben. Diese Informationen unterstützen die geologisch-morphologische Kartierung der Karbonatpräzipitate im Bereich der aktiven Fluidaustrittsstellen. Die Häufigkeit und die Verteilung der Karbonate, die morphologische Ausbildung des Meeresbodens sowie die Faunenvergesellschaftung geben direkte Hinweise auf aktive Ventaustrittsstellen und Gashydratvorkommen. Zusätzliche Informationen liefern seismische und tektonische Untersuchungen unterschiedlicher Arbeitsgruppen in diesem Gebiet. Der prominenteste Hinweis auf GH-führende Schichten im Meeresboden ist hierbei der seismische Reflektionshorizont BSR (Bottom Simulating Reflektor), der parallel zur Meeresbodenoberfläche ausgebildet ist (Tréhu et al., 1999).

Wir unterscheiden Karbonatpräzipitate nach ihrem Entstehungsort und ihrer Assoziation zu den aktiven Fluidaustrittsstellen. Die Karbonatproben lassen sich in zwei Hauptgruppen einteilen: Vent- und Non-vent-Karbonate. Die sogenannten Vent-Proben können wiederum vent-beeinflusst (vent-influenced) sein oder auch vent-initiiert (vent-initiated). Diese werden unterteilt in Chemoherm-Karbonate und Gashydrat-Karbonate (Aragonite und Gashydrat-Breccia). Zur weiteren Ergänzung der Klassifizierung und Kartierung sind die Proben in Bearbeitung und wurden mineralogisch-petrographisch untersucht (Röntgendiffraktometrische Messungen, Karbonatsgehalt-Messungen, Sauerstoff- und Kohlenstoff-Isotopenbestimmungen, REM-Untersuchungen und Dünnschliffmikroskopie).

Weitere OFOS-Profil-Fahrten ergaben, dass morphologisch ähnlich ausgebildete Rückenstrukturen des 2. Akkretionsrückens, nördlich und südlich des HR, ebenfalls durch venttypische Karbonatpräzipitate, die Chemoherm-Karbonate, und durch Vent-Fauna geprägt sind. Diese authigenen Chemoherm Karbonate und die biologische Vergesellschaftung sind ein eindeutiger Hinweis auf aktive Ventereignisse. Diese Ergebnisse zeigen, dass ausgeprägtes aktives Venting hauptsächlich am HR beobachtet werden konnte und in enger Verbindung mit den "vent-initiated" Karbonaten und der Vent-Fauna steht. Es gibt jedoch weitere Lokationen, die eindeutige Hinweise auf aktives Venting liefern (z.B.: SE-Knoll, NW-Knoll und die nördlichere R1 Struktur). Diese rückenähnlichen Strukturen sind ebenfalls charakterisiert durch exponierte Chemoherm-Karbonate und die typische Fauna.

Der NHR ist an den Flanken hauptsächlich durch eine mehrere cm-mächtige Sedimentbedeckung gekennzeichnet. Östlich zeigt der Meeresboden eine Bedeckung aus weichem Sediment mit Strömungsrippeln sowie Blöcken und Geröll. Zum Gipfel hin, Richtung Westen, nimmt die Gesteinsbedeckung zu und bildet schließlich einen Geröllkomplex, der hauptsächlich aus den rauen unregelmäßig geformten Chemoherm Karbonaten besteht. In diesem Bereich wird Fluid Venting durch das Auftreten der Muschel Gattung *Calyptogena* angezeigt (Abb. 2). Ausserdem sind weisse Bakterienmatten in unmittelbarer Nachbarschaft zu den fleckig verteilten Muschelfeldern zu beobachten. Kompaktere und mächtigere Gesteinskomplexe sind geprägt durch Klüfte und Störungen

einer Dehnungstektonik. Diese sind mit den Störungen in reflektions-seismischen Aufzeichnungen (Westbrook et al., 1994) korrelierbar. Der BSR markiert die Untergrenze der GH-führenden Zone und wird im Bereich der Störung in höhere Sedimentbereiche aufgewölbt, wodurch die Fluidzirkulation entlang tektonischer Störungszonen unterstützt wird (Abb. 1). Die Profile weiter südlicher zeigen eine Abnahme der aktiven Venttätigkeit aufgrund deutlich weniger lebender calyptogener Muscheln und Bakterienmatten. Dennoch ist eine stärkere Geröllbedeckung des hier besser zementierten Sedimentes zu beobachten.

Der SHR ist geprägt durch äusserst aktives Venting, welches mit den genannten Tools oft beobachtet werden konnte. Eindeutige Indizien sind oberflächennahe Gashydratbildungen, morphologische Auswirkungen und aufsteigende Gasblasen durch die Wassersäule. Zudem ist die typische Vent-Faunenvergesellschaftung zu beobachten (Abb. 2). Die Morphologie des Meeresbodens ist in 100 m - Arealen sehr unruhig und durch Hügel und Vertiefungen von ein paar Metern gekennzeichnet. Diese unruhige Struktur wird vermutlich durch die Bildung und Zersetzung von Gashydraten nahe der Sediment-Wasser-Grenze verursacht. Die videogeführten Beobachtungen lassen eine relativ mächtige Sedimentbedeckung und eher weniger Karbonatpräzipitate erkennen. Die Beprobung durch den videogesteuerten Greifer beförderte jedoch einige sehr junge authigene Karbonatpräzipitate (s. 2) an Deck des Forschungsschiffes.

Zusätzliche Informationen zu den Meeresbodenbeobachtungen liefern Fächerecholotaufnahmen und seismische Untersuchungen der amerikanischen Kooperationspartner der Oregon State University. Das Ziel der zeitintensiven weiteren Auswertung ist es, diese Daten mit dem vorhandenen Bildmaterial zu verknüpfen, um detailliertere Aussagen über die seismischen Aufzeichnungen in Bezug auf die Meeresbodenbeschaffenheit zu treffen. Ausserdem steht das aktive Fluid-Venting des gesamten Arbeitsgebietes in sehr engem Zusammenhang mit der geologischen und tektonischen Struktur des Akkretionskeilkomplexes. Die Verteilung und Art der Austrittsstellen und Fluidwege durch das Sediment sind an die Störungszonen und Verwerfungen geknüpft (Abb. 1).

Die von Muschelfeldern (*Calyptogena* sp.) und Bakterienmatten (*Beggiatoa* sp.) bedeckten Flächen des SHR, die mit Hilfe des OFOS vermessen wurden, geben Hinweise auf die Raten der austretenden Fluide (Sahling et al., accepted). Eine Bilanzierung der Stoffflüsse für den SHR ist damit prinzipiell möglich. Diese Bilanzierung konnte jedoch abschliessend noch nicht erfolgen, da die kleinräumigen geologischen Störungszonen noch nicht vollständig verstanden sind. Zusätzliches Bildmaterial der Forschungsfahrten AT 9904 und SO 148 wird diesbezüglich zur Zeit ausgewertet.

## 1.6.2 Authigene Karbonate

Authigene Karbonate haben eine grosse Verbreitung in den Sedimenten des Cascadia Akkretionskomplexes (Kulm and Suess, 1990). Sie dokumentieren nicht nur ihr Bildungsmilieu, Alter und Wachstumsgeschwindigkeit, sondern konservieren auch die geochemische Signatur der zirkulierenden Fluide. Sie sind daher hervorragend geeignet, die räumliche und zeitliche Entwicklung der kalten Methanquellen zu rekonstruieren.

Während der Ausfahrt SO 143 (Bohrmann et al., 2000) wurden verschiedene Karbonattypen (Greinert et al., 2001) am NHR und SHR mit dem TV-Greifer beprobt. Weitere Proben wurden während der ATLANTIS Ausfahrt AT3-35b mit dem amerikanischen Tauchboot ALVIN genommen (Torres et al., 1999).

Zwei verschiedene Environments der Karbonatbildung lassen sich charakterisieren. Im weiteren Verlauf wird von Gashydrat-Karbonaten (Abb. 2, Bohrmann et al., 1998) und von Chemoherm-Karbonaten (Abb. 3, Greinert et al., 2001) gesprochen.

Im direkten Kontakt zu oberflächennah anstehendem GH werden lagig-krustige Aragonite, sogenannte Gashydrat-Karbonate (Abb. 2) gebildet. Gas dringt beim Aufstieg aus tieferen Schichten, sehr wahrscheinlich aus der Zone unterhalb des Bottom Simulation Reflectors (BSR), meist schichtparallel in das noch unverfestigte Sediment ein und bildet dort porenreiche Gashydrate. In dem neu geschaffenen Porenraum im Sediment können Aragonite in direktem Kontakt mit GH gefällt werden. Pseudomorphosen der Blasenstrukturen belegen die Assoziation mit Gashydraten (Bohrmann et al., 1998). Möglicherweise spielen methanoxidierende Bakterien hierbei eine wichtige Rolle (Boetius et al., 2000).

Gashydrat-Karbonate findet man hauptsächlich am SHR. Die Sr-Isotopie zeigt eine Ausfällung aus Meerwasser-beeinflussten Fluiden von  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ :  $0,709164 \pm 0,000007$  an.



**Abb. 2:** Lagig, krustig ausgebildetes Gashydrat-Karbonat des SHR.

Meerwasserproben von verschiedenen Lokalitäten am HR haben ebenfalls Werte um  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$   $0,709164 \pm 0,000007$  (Teichert et al., in prep.).

Die U-Isotope dagegen zeigen, dass bei der Präzipitation von authigenen Karbonaten nicht nur Meerwasser, sondern auch Porenwasser eine Rolle spielt. Die  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisse der Gashydrat Karbonate zeigen eine grosse Variabilität bis maximal  $\delta^{234}\text{U} = 316 \pm 5$ . Meerwasser hat einen deutlich geringeren Wert von  $\delta^{234}\text{U} = 140 \pm 2$ . Dies zeigt den Einfluss eines Tiefenfluids, das durch den recoil-Effekt an  $^{234}\text{U}$  angereichert wurde. In diesem speziellen Milieu erwiesen sich die U-Isotope als sensitivere Tracer für den Einfluss von Porenwasser. U/Th-Altersdatierungen ergaben für ausgewählte Gashydrat-Karbonate des SHR  $1.700 \pm 50$  bis  $7.800 \pm 400$  Jahre. Eine Probe vom NHR wurde auf  $70.500 \pm 1.000$  Jahre datiert. Obwohl aus diesen scheinbaren Altersdatierungen noch keine endgültigen Schlüsse gezogen werden können, bestätigt diese Beobachtung, dass sich der NHR bereits in einem späteren Evolutionsstadium eines Vent Gebietes befindet (Tréhu et al., 1999), während das Venting am SHR offensichtlich noch nicht so lange andauert (Teichert et al., in prep.).

Wie die Sr-Isotopendaten zeigen, werden die Chemoherm-Karbonate (Abb. 3), im Gegensatz zu den Gashydrat-Karbonaten, in direktem Kontakt mit Meerwasser gefällt. Durch fokussierten Fluidfluss bilden sich steile, karbonatische 'mounds', die sich 40-60 Meter vom Meeresboden erheben. Die Aragonite sind geprägt von hoher Porosität und unregelmässiger Form. Dies sind Indikatoren für ein fluiddurchströmtes Milieu. U/Th-Datierungen von

ausgewählten Proben eines Chemoherms an der westlichen Flanke des SHR, genannt 'Pinnacle', ergaben Alter von  $8.500 \pm 100$  bis  $10.900 \pm 200$  Jahren (Teichert et al., in prep.).



**Abb. 3:** Aragonitisches Chemoherm-Karbonat mit hoher Porosität.

### 1.6.3 Fluidtransportraten und biogeochemische Stoffumsätze an Cold Seeps

Unmittelbar vor den SONNE-Expeditionen SO-143/1b bis SO-143/3 wurden mit Hilfe des Tauchbootes ALVIN an Bord von RV ATLANTIS aktive Gasaustritte auf dem NHR und SHR beobachtet und beprobt. Weiterhin wurden mit zahlreichen *in situ*-Geräten (e.g. Tryon et al., 1999) Fluidausstromraten bestimmt. Wiederholte hydroakustische Aufzeichnungen von Gas-Plumes ergaben kurzskalige Oszillationen der Ausstromintensitäten im Tidenzyklus. Vor diesem Hintergrund war das Ziel, auf den SONNE-Expeditionen mittels Messungen der Fluidtransportraten, Videobeobachtungen und Umsatzmessungen der chemoautotrophen Gemeinschaften eine flächige Bilanzierung der Fluidfreisetzung und Stoffumsetzung in der Hydratprovinz des Cascadia-Akkretionskomplexes zu ermöglichen.

Mehrfach wurden das VESP (VESP-I) und die neu-entwickelte ‚free-return‘-Version von VESP (VESP-II), die als Prototyp einer Langzeitstation zu sehen ist, von Bord FS SONNE videogeführt am NHR und SHR auf Muschelfeldern oder Bakterienmatten exakt positioniert und dabei die austretenden Fluide beprobt.

Am VESP wurde zum ersten Mal auch der Prototyp eines am GEOMAR entwickelten Autoklaven-Fluidprobennehmers eingesetzt, der die Fluidproben für die Methan- und Helium-Isotopenbestimmung unter *in situ*-Druck hält. Diese Geräte wurden im Rahmen von TECFLUX-II mit dem ROV ROPOS und an den VESP-Landern eingesetzt. Die gemessenen Methankonzentrationen ergaben einen mehr als doppelt so hohen Wert als bei zeitgleich mit konventionellen Wasserschöpfern gewonnenen Proben. Damit konnte die wissenschaftliche Notwendigkeit und das Potential dieser neuen Beprobungstechnik eindrucksvoll unter Beweis gestellt werden.

Weitere wissenschaftliche und zugleich technische Höhepunkte waren die Einsätze der videogeführten Lander auf dem Fahrtabschnitt SO 143/2. So wurde der DOS-Lander (Deep-Sea Observation System), bestückt mit einer Stereokamera, 2 ADCP's (nach unten/nach oben gerichtet) und elektrochemischen Sensoren, nur ca. 2 m neben einen der beiden VESP-Lander auf einer Bakterienmatte positioniert. Der DOS-Lander lieferte zeitgleich zu den Ausstrommessungen des VESP-Landers hochauflösende Messungen bodennaher Strömungsmuster, tidenbeeinflusste Veränderungen in Bodenwasserchemismus und eine Foto-Dokumentation biologischer Aktivitäten im 30 Minutentakt. Hiermit konnte erstmals das

Wachstum einer Bakterienmatte während eines 7-tägigen Einsatzes dokumentiert werden. DOS- und VESP-Lander funktionierten fehlerfrei und haben die ersten Langzeitdatensätze erbracht. Dabei ergaben zeitgleich am NHR durchgeführte Messungen mit Fluid Flow-Metern

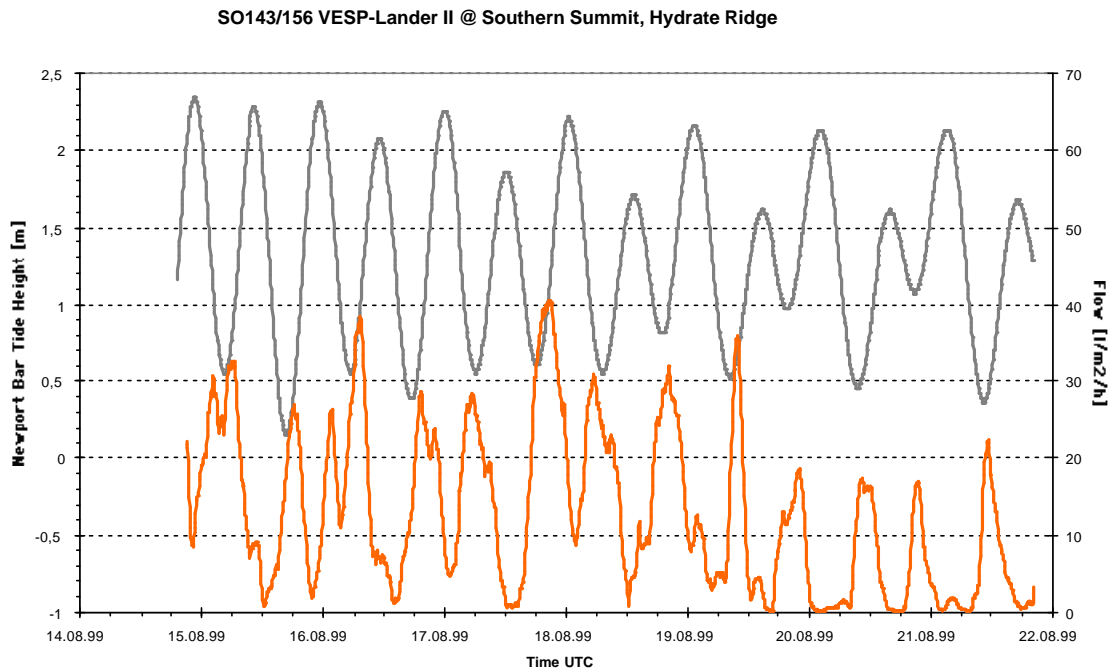


Abb. 4: Gemessene Auströmraten im Vergleich zur Tidenrhythmik; beachte die gute Korrelation zwischen den Maxima im Ausstrom und den Minima des hydrostatischen Drucks.

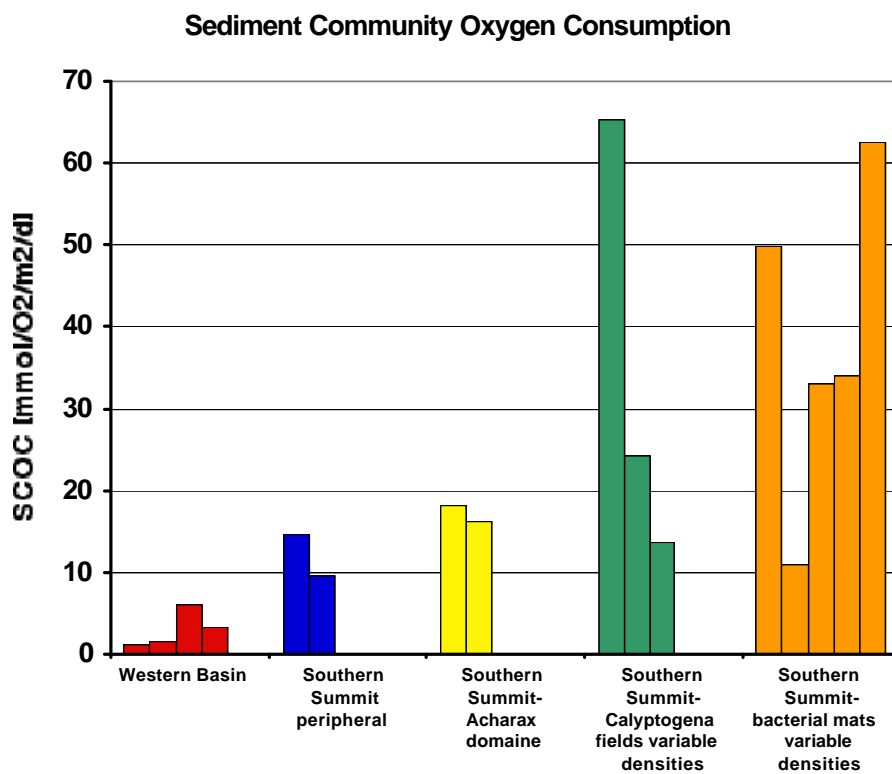


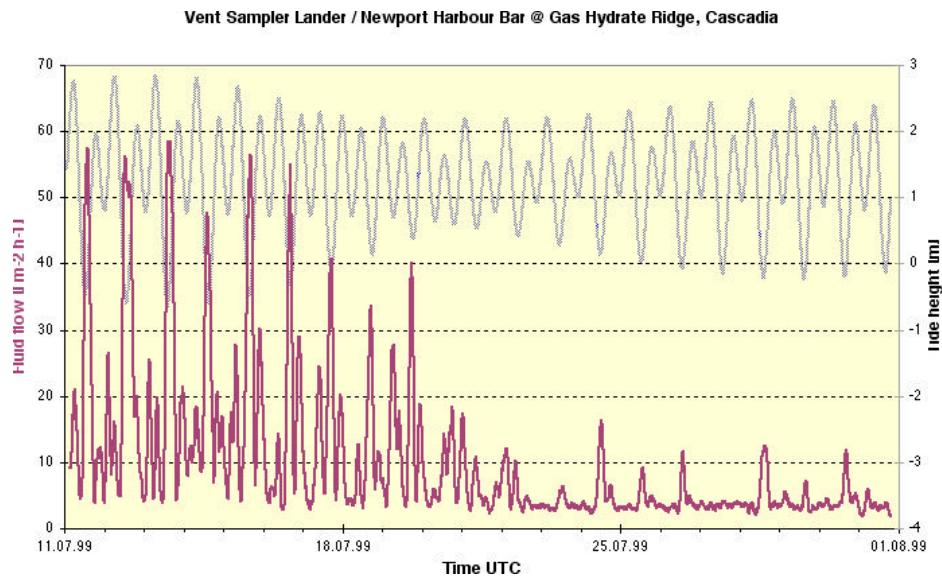
Abb. 5: Sauerstoffverbrauch durch benthische Lebensgemeinschaften in einem Gradienten von fluid-beeinflussten Sedimenten zu Kontrollstationen.

(Tryon and Brown, 1999) und dem VESP-Lander ein erstaunlich kohärentes Bild zum Verständnis der zeitlichen Dynamik des Hydratfluidsystems. Danach variieren die Ausstromraten in kurzen Zeitskalen deutlich mit dem Tidenrhythmus (Abb. 4). Ansonsten variieren die gemessenen Ausstromraten im Einsatzgebiet um einige Grössenordnungen, was die kleinräumige Heterogenität der Porenwasserchemie bzw. der Besiedlungsfauna erklärt. Sauerstoffsverbrauchsmessungen der benthischen Lebensgemeinschaft (SCOC: sediment community oxygen consumption) zeigten extrem hohe Stoffumsätze in Bakterienmatten und Muschelfeldern, während der SCOC an Kontrollstationen ohne typische cold seep - Organismen deutlich reduziert ist (Abb. 5). Sowohl an Bakterienmatten als auch in den Muschelfeldern treten starke Variationen im SCOC auf. Diese Unterschiede sind sowohl in der Dichte der Organismen als auch in der Höhe des ambienten Sauerstoffgehalts des Bodenwassers begründet. In einigen Fällen lag der O<sub>2</sub>-Gehalt des Bodenwassers im hypoxischen Bereich, so dass keine Sauerstoffaufnahme durch Organismen gemessen wurde. Zwischen der Versorgung des Bodenwassers mit Sauerstoff und der Tidenrhythmik sowie einer Rückkoppelung auf den SCOC besteht offensichtlich ein Zusammenhang, der weiterer Analysen bedarf.

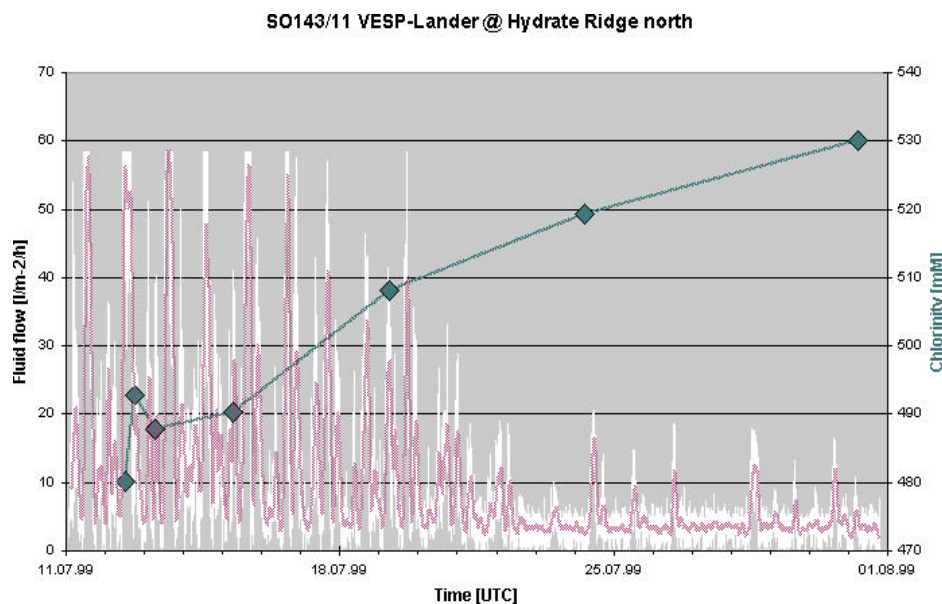
Im Jahr 2000 wurden schwerpunktmässig die umfangreichen Datensätze der verschiedenen Lander ausgewertet, die im Rahmen der SONNE-Reise 143 eingesetzt worden waren (Bohrmann et al., 2000). Im Zentrum standen dabei die bislang noch ausstehende Auswertung der Proben aus dem Spritzenprobennehmer des VESP-Landers sowie die ADCP-Daten des DOS-Landers (Deep-Sea Observation System). Diese Daten wurden auf dem SONNE-Statusseminar in Hannover vorgestellt (Linke et al., 2001). Erste Langzeiteinsätze des VESP-Landers am NHR hatten eine deutliche Korrelation der Ausstromraten im Vergleich zur Tidenrhythmik sowie erste Anhaltspunkte zu überlagernden kurzzeitigen Ereignissen ergeben. Während des 3-wöchigen Einsatzes konnten zunächst Ausstromraten mit ausgeprägten Maxima erfasst werden (Abb. 6), welche in die gleiche Grössenordnung wie die ersten in situ-Ausstrommessungen von 1991 am HR fallen (Linke et al., 1994). Nach 8 Tagen Aufzeichnung ist jedoch ein plötzlicher Einbruch in den Ausstromraten zu verzeichnen, der zeitgleich durch unabhängige Messungen amerikanischer Kollegen bestätigt wurde (Brown et al., 1999) und auf den Einfluss von Ereignissen oder langwelligen Oszillationen schliessen lässt (Linke et al., 1999).

Die Analyse der Wasserproben aus dem Spritzenprobennehmer des VESP-Landers zeigt einen deutlichen Anstieg in der Chlorinität des austretenden Fluides, welches auf einen möglichen Salzausschluss bei der Bildung von oberflächennahen Gashydraten hindeutet. (Abb. 7).

Diese Ergebnisse zeigen die Notwendigkeit von Langzeituntersuchungen auf, um die Steuergrössen zu erfassen, welche die Ausstromdynamik der Fluide sowie die Bildung und Zersetzung von oberflächennahen Gashydraten beeinflusst. Der DOS-Lander war neben einem Stereokamerasystem und verschiedenen elektrochemischen Sensoren mit einem nach oben gerichteten (low resolution) und einem nach unten gerichteten (high resolution) ADCP ausgerüstet. Während die Daten des nach oben gerichteten ADCPs für die Austauschprozesse mit der Wassersäule herangezogen werden, sind die Daten des high-resolution ADCP für die Interpretation der Daten der VESP- und Kammer-Lander von grossem Interesse.



**Abb. 6:** Gemessene Ausstromraten im Vergleich zur Tidenrhythmik; man beachte die gute Korrelation zwischen den Maxima im Ausstrom und den Minima des hydrostatischen Drucks sowie den plötzlichen Abfall der Ausstromraten nach 8 Tagen Verankerung des VESP-Landers.

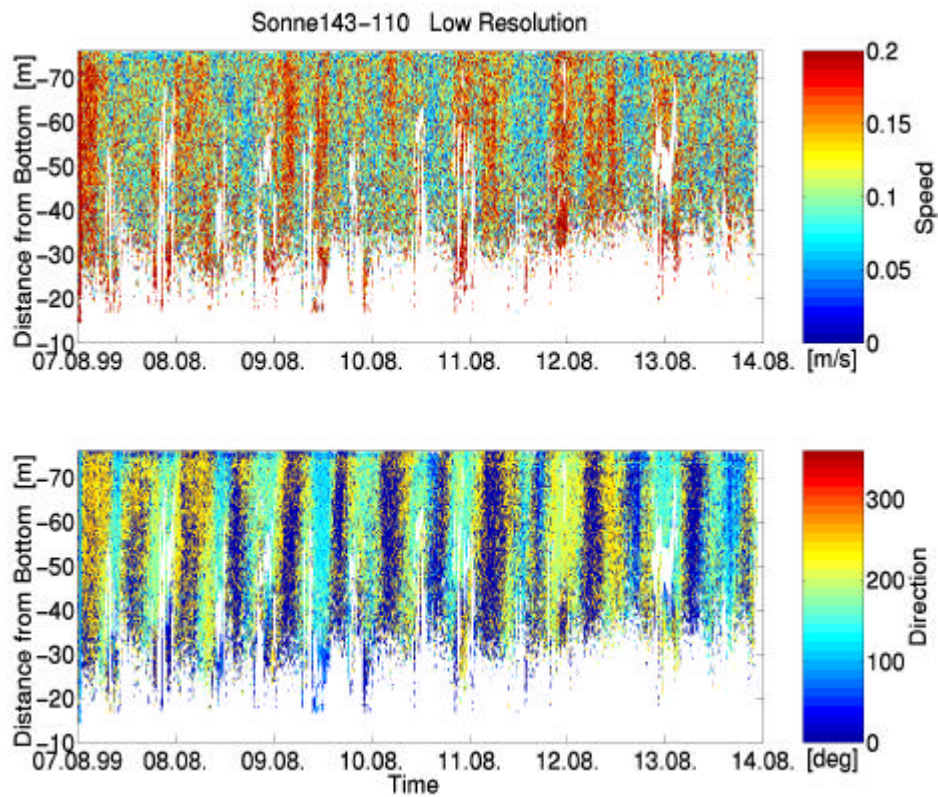


**Abb. 7:** Konzentration der Chlorinität in den Wasserproben des VESP-Landers im Vergleich zu den Ausstromraten.

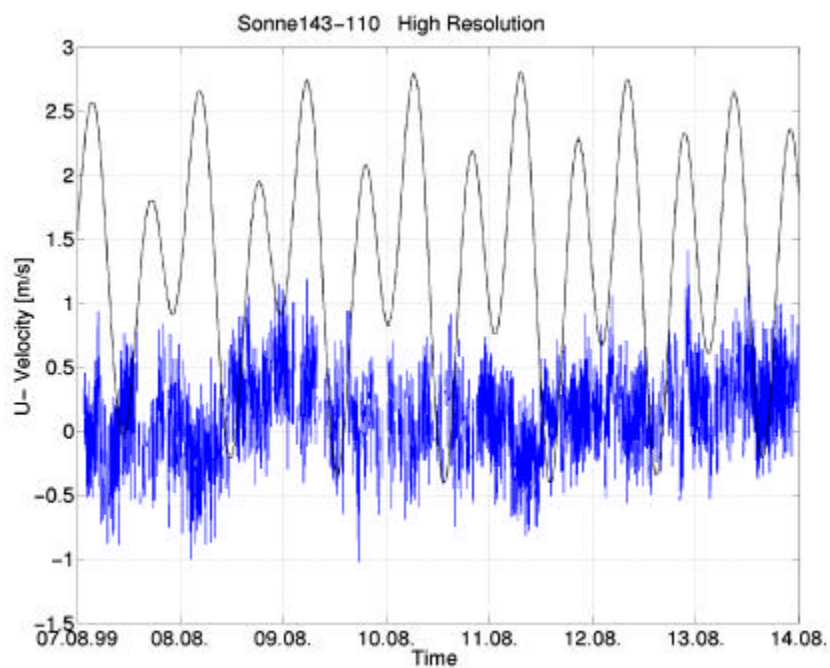
Die Auswertungen ergaben Strömungsverhältnisse, die einen deutlichen tidalen Einfluss auf den gesamten Wasserkörper über dem HR zeigen. Die Strömungsrichtung zeigt 60 m über Grund einen deutlichen Wechsel von WSW (High Tide) auf SSE (Low Tide), sowie Geschwindigkeiten von 14 bzw. 8 cm/s (Abb. 8). Demgegenüber treten 60 cm über Grund erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten mit einem Mittelwert von ca. 20 cm/s auf (Abb. 9).. Diese relativ hohen Werte verdeutlichen das grosse Potential dynamischer Wechselwirkungen und Austauschprozesse zwischen der Sedimentoberfläche und dem Bodenwasser. Sauerstoffverbrauchsmessungen der benthischen Lebensgemeinschaften hatten zum einen extrem hohe Stoffumsätze in Bakterienmatten und Muschelfeldern, aber auch starke Variationen aufgezeigt. Der Frage, inwieweit ein Zusammenhang zwischen der Versorgung



des Bodenwassers mit Sauerstoff, der Tidenrhythmik und dem Sauerstoffverbrauch der benthischen Lebensgemeinschaft besteht, wird derzeit noch nachgegangen.



**Abb. 8:** Strömungs-Geschwindigkeit und -richtung (60 m über Grund) aus der Auswertung der ADCP-Daten des DOS-Landers am SHR.



**Abb. 9:** Bodennahe Strömungsgeschwindigkeit (60 cm über Grund) im Vergleich zur Tidenrhythmik aus der Auswertung der ADCP-Daten des DOS-Landers am SHR.

#### 1.6.4 Methan in der Wassersäule

Der Akkretionskeil des Cascadia-Margins vor der Küste Oregons (USA) ist besonders im Bereich des HR durch intensive methanreiche Fluidaustritte (cold vents) gekennzeichnet, hervorgerufen durch tektonische Kompression. Verstärkt wird dieser Prozess durch das Vorhandensein von Gashydraten nahe ihren Stabilitätsgrenzen in den obersten Zentimetern und Metern des Sedimentpaketes (Suess et al., 1999). An den höchsten Erhebungen des HR finden sich im Norden (NHR, 600 m) wie Süden (SHR, 800 m) Gasaustrittsstellen. Dieses zu 98 % aus Methan bestehende Gas stammt aus Bereichen, die sich unterhalb der Stabilitätszone der Gashydrate befinden. Die Obergrenze dieses gasführenden Bereiches ist in geophysikalischen Aufzeichnungen als BSR (Bottom Seismic Reflector) zu erkennen (McKay, 1994). Durch tiefreichende Störungen kann dieses Gas schnell durch die Gashydratstabilitätszone gelangen und am Meeresboden austreten (Suess et al., 1999). Die Stärke des Gasaustrittes ist jedoch nicht gleichbleibend, sondern variiert in der Stärke und kann zeitweise auch vollständig unterbrochen sein. Einer der kontrollierenden Faktoren ist die Tide, die verbunden ist mit Druck- und Strömungsänderungen (Torres et al., 1998).

Während der TECFLUX-I-Untersuchungen wurden im besonderen die räumliche und zeitliche Verteilung des Methans und ihre Variabilität in der Wassersäule des Quellgebietes untersucht. Steuernde Faktoren hierbei sind: die Stärke, Variabilität und Art der Quellen, die Oxidation von Methan an oder nahe der Sedimentoberfläche, die Oxidation in der Wassersäule, die Advektion und damit verbunden das Strömungssystem, sowie der Austausch mit der Atmosphäre. Hierzu wurden im Zeitraum Juni 1999 - Oktober 1999 95 vertikale und 12 horizontale CTD-Profile mit 1402 Methanmessungen (Methodik siehe u.a. Rehder et al., 1999) durchgeführt. Es wurde ein Bereich von der Schelfkante über den Kontinentalhang bis in das sich dem Akkretionskeil anschliessende Becken abgedeckt (Bohrmann et al., 2000). Bodenwasserproben der Quellregionen am HR stammen aus OSU-Barrel (RS Alvin) bzw. VESP-Lander (FS SONNE). Weiterhin wurden zur Detektion von Gasblasenaustritten an den Ventlokationen akustische Untersuchungen in der Wassersäule mit dem 18 kHz System von RV SONNE (bzw. 12 kHz System auf RV Atlantis und RV Wecoma) vorgenommen. Für die Messung der Methankonzentrationen im Oberflächenwasser wurde für die Dauer von 6 Wochen ein kontinuierlich messendes Equilibratorsystem eingesetzt (Rehder et al., 2002).

Methankonzentrationen im Bereich der Quellregionen reichen von Werten nahe der Hintergrundkonzentration um 1 nmol/L bis zu 1394 nmol/L, einer 444fachen Übersättigung im Vergleich zur Gleichgewichtskonzentration mit dem atmosphärischen Methan (1.793 ppmV). Mit zwei Ausnahmen, in denen die Maximalwerte in der bodennächsten Probe auftraten, finden sich die Methanmaxima im Bereich von 50-120 m über dem Meeresgrund. Sie werden von ein oder zwei kleineren Maxima (20-150 nmol/L) begleitet, deren Lage besonders am NHR variabel ist. Die Lage, aber besonders auch die Stärke der Maxima kann sich innerhalb weniger Stunden an einer Station um fast 3 Grössenordnungen ändern und weist, wie auch direkte Messungen, auf die teilweise unterbrochene Ausgasung in den Quellgebieten hin (Abb. 10). Änderungen der Strömung als alleinige Ursache der Konzentrationsänderungen können durch Voruntersuchungen mit dem akustischen System, wie es für die Station SO130 durchgeführt wurde, ausgeschlossen werden. In 3 Fällen mit hohen Methanwerten konnten Gasblasen detektiert werden, während im Falle der CTD 25 keinerlei Signale gefunden wurden.

Abb. 11 zeigt das zeitliche Verhältnis des Tidenstandes mit maximalen Methankonzentrationen der Stationen am SHR und NHR. Vergleicht man das Auftreten der Maxima mit dem Tidenstand, so ist für den NHR eine Korrelation zwischen Niedrigtide und hohen Methangehalten zu finden. Für den SHR trifft dies nicht zu, finden sich doch eine

**Abb. 10** Variationen der Methankonzentration an den Cold Vent-Lokationen des HR: Stationen 43 (CTD 7-10; A) und 130 (CTD23-26;B). Die Proben wurden in Abständen von 4 Stunden genommen in Relation zu Tidenstandsänderungen, dargestellt in den kleinen Diagrammen.

**Abb. 11** Korrelation zwischen den höchsten Methankonzentrationen der jeweiligen Stationen am NHR (rot) und SHR (blau) mit dem Tidenstand (Newport Harbor). Stationen mit mehr als einer Probennahme sind durch ihre Stationsnummer gekennzeichnet.

Reihe der höchsten Messwerte im Laufe von Hochtiden. Hieraus muss geschlossen werden, dass der Einfluss der Tide auf die Aktivität der Quellen an dem tiefer gelegenen SHR hinter den anderen Faktoren zurücktritt. Tyron et al. (1999) schlagen u.a. den Auf- und Abbau von flachen Gasspeichern für unterschiedlich starke bis hin zu reversiblen Fluidaustritten vor.

Auffällig ist die Tiefe der Methanmaxima, die am NHR und SHR im Mittel 100 m über dem Meeresgrund zu finden sind. Die methanreichen Fluide der Cold Vents besitzen weder durch erhöhte Temperaturen, wie bei den hydrothermalen Fluiden, noch durch geringere Salzgehalte eine niedrigere Dichte als das Bodenwasser und schichten sich daher unter letzteres oder mischen sich je nach Dichte mit ihm. Ein lokaler Aufstieg mit kleinräumigen Methanmaxima, wie sie am HR gefunden wurden, ist jedoch nicht möglich. Auch sind keinerlei entsprechende Anomalien in den Salinitäts- oder Temperaturprofilen zu finden.

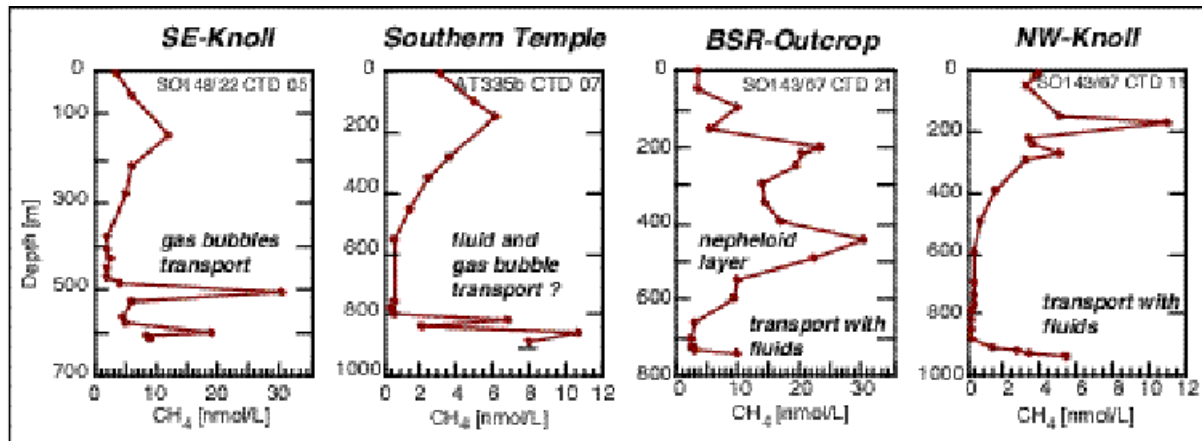
Anders dagegen verhält sich das sehr lokal austretende Methangas, das durch seine deutlich niedrigere Dichte aufsteigt, wobei die Aufstiegsgeschwindigkeit und die Lösung des Methangases durch die Blasengrösse bestimmt wird und umgekehrt (Clift et al., 1978). Es ist anzunehmen, dass Methanmaxima dort auftreten, wo die Gasblasen durch die Lösung des Methans im methanarmen Meerwasser so weit geschrumpft sind, dass sie eine kritische Grösse erreicht haben, bei der sie deutlich langsamer ansteigen, sich aber gleichzeitig durch ihre im Verhältnis grosse Oberfläche sehr schnell lösen. Je nach anfänglicher Blasengrösse muss dieses "Kollabieren" in unterschiedlichen Wassertiefen zu finden sein. Bimodale Blasenverteilungen können verantwortlich sein für das Auftreten zweier, voneinander getrennter Maxima, die mehrfach beobachtet wurden. Berechnungen und Auswertungen von Videoaufzeichnungen der japanischen Partner im Projekt TECFLUX-II (SONNE 148) sollen hierzu weitere Aufschlüsse liefern. Eine weitere Erklärung ergibt sich aus der Verminderung der Aufstiegsgeschwindigkeit der Gasblasen im Bereich von Scherflächen zwischen Wassermassen mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen. Hierzu sollen detaillierte Aufzeichnungen der tiefsten 70 m mit einem ADCP auf der SO148 (TECFLUX-II) im Jahr 2001 ausgewertet werden.

Das Untersuchungsgebiet findet sich im Bereich des kalifornischen Strömungssystems, eines durch Upwelling hervorgerufenen äquatorwärts fliessendem Oberflächenstroms vor der amerikanischen Westküste mit Kerngeschwindigkeiten von 50-80 cm s<sup>-1</sup> (Huyer et al., 1998). In Tiefen von 150 - 375 m und tiefer fliesst der Unterstrom entlang der Schelfkante und des oberen Kontinentalhanges Richtung Pol. Vorsprünge der Küstenlinie und das starke Relief des aktiven Kontinentalhanges führen zu Ablenkungen der Küstenströme, sowie zu einem gehäuften Vorkommen von mesoskaligen Wirbeln (u.a., Pierce et al, 2000, Barth et al, 2000) im Bereich der 'transition zone' (Kosro et al., 1991). Diese befindet sich ca. 50-150 km von der Küste entfernt und schliesst damit den HR ein. Strömungsmessungen am HR, durchgeführt vom College of Atmospheric and Oceanic Sciences (COAS) zeigen deutlich unterschiedliche Strömungsrichtungen in 500 und 600 m Wassertiefe, wobei in 600 m Wassertiefe zwei topographisch induzierte antizyklonale mesoskalige Wirbel zu beobachten sind (Abb. 12). In beiden Tiefen konnten auch halbtägige, durch die Tide bedingte Strömungsänderungen beobachtet werden. Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten lagen bei 6-10 cm/s. Temperatur- und Salinitätsprofile des HR zeigen sowohl lang- als auch kurzfristige zeitliche und räumliche Wechsel von durchmischten und stratifizierten Bereichen in Lagen unter 400 m an. In hydrographischen Schnitten im Süden (40°33') bzw. Norden (44°44') vom HR finden sich keine lokalen Maxima in Tiefen von 500-800 m. Statt dessen werden in weiten Bereichen im Süden wie im Norden Methankonzentrationen gefunden, die geringfügig über denen der Referenzstation im westlichen Becken liegen (1.5 nmol/L bis maximal 7.5 nmol/L).

**Abb. 12** Daten der verankerten Strömungsmessungen in 500 und 600 m Wassertiefe vom NHR (Tiefe 620 m) gemessen über den gesamten Zeitraum der Probennahme von Juni – Oktober 1999 (A). B und C geben die halbtägigen, durch die Tide induzierten Strömungsänderungen wieder (Oregon State University, R. Collier).

Mit anderen Worten verhindert dieses hoch variable küstennahe Strömungssystem durch die starke Mischung die weite Ausbildung von ‚plumes‘, wie sie häufig bei hydrothermalen Quellen an Riftsystemen zu finden sind. Zur detaillierten Bestimmung der Methanflüsse wurden daher weitere hydrographische Schnitte auf der SONNE-Reise 148 (TECFLUX-II) durchgeführt.

Bodennahe Methanmaxima wurden des weiteren am SE-Knoll und NW-Knoll, sowie an einer Mud-Mount-artigen Struktur im Süden ( $44^{\circ}27'$ ), dem sogenannten Southern Temple, gefunden (Abb. 13). Während die Verteilung am SE-Knoll derjenigen des HR gleicht, zeigt der NW-Knoll eine auf die bodennahen Proben beschränkte Übersättigung bis 5.2 nmol/L an, dessen Verteilung auf den Einfluss von Fluiden anstatt von Gasaustritten hindeutet. Am Southern Temple wurden Konzentrationen bis 13 nmol/L in 60 m über dem Grund gefunden. Neben den tiefen Methanmaxima wurden auch im Bereich von 400 m (Abb. 14) und flacher deutlich erhöhte Methankonzentrationen gefunden, die in den Bereichen von 150-400 m möglicherweise eher auf Nepheloidlagen vom Schelf und oberen Kontinentalhand zurückzuführen sind, denn auf die tiefen Quellen. Ein Hinweis findet sich in der isotopischen Signatur des Kohlenstoffes vom Methan.



**Abb. 13** Methanverteilung an weiteren morphologischen Erhebungen und in der Zone, wo nach seismischen Aufzeichnungen der BSR an der Sedimentoberfläche auftritt.

Während Maxima bis 450 m Tiefe  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  Werte von  $-66\text{‰}$  PDB bis  $-50\text{‰}$  PDB zeigen, steigen diese Werte bei 400 m abrupt auf ca.  $-30\text{‰}$  PDB an. Der Schelf und obere Kontinentalhang vor Oregon sind für z.T. sehr intensives seepage thermogenen Methans bekannt, dessen isotopische Signatur im Bereich von  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4} = -28\text{‰}$  PDB (Collier & Lilley, 1995) liegt. Die Bestimmung der isotopischen Signatur  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  in 180 der extrahierten Gasproben wurde mit der finanziellen Unterstützung der National Science Foundation durch die Projektpartner des COAS im Labor der kanadischen Partner an der University of Victoria durchgeführt. Weitere Proben der TECFLUX-I und TECFLUX-II-Projekte wurden im Jahre 2001 gemessen. Eine detaillierte Probennahme und der Einsatz eines Transmissiometers im Rahmen des Projektes TECFLUX II sollen hier weitere Erkenntnisse liefern.

Während einer speziellen Vermessung auf der Expedition SO143/1b, auf dem die Methanverteilung im Oberflächenwasser zwischen dem HR und dem Schelf mit dem Equibratorsystem (Rehder et al., 1999; Rehder and Suess, submitted) untersucht wurde, konnte ein verstärkter Austritt von Methan aus dem Oberflächenwasser in die Atmosphäre festgestellt werden. Die ansteigenden Methankonzentrationen von SW nach NE korrelieren eindeutig mit dem Abfall der Oberflächentemperatur von  $16,5^\circ\text{C}$  bis weniger als  $13,5^\circ\text{C}$ , nahe der Schelfkante (Abb. 15). Der Methananstieg kann auf den Auftrieb von methanangereichertem Tiefenwasser nahe der Schelfkante zurückgeführt werden. Dazu wurde ein Manuskript eingereicht (Rehder, submitted).

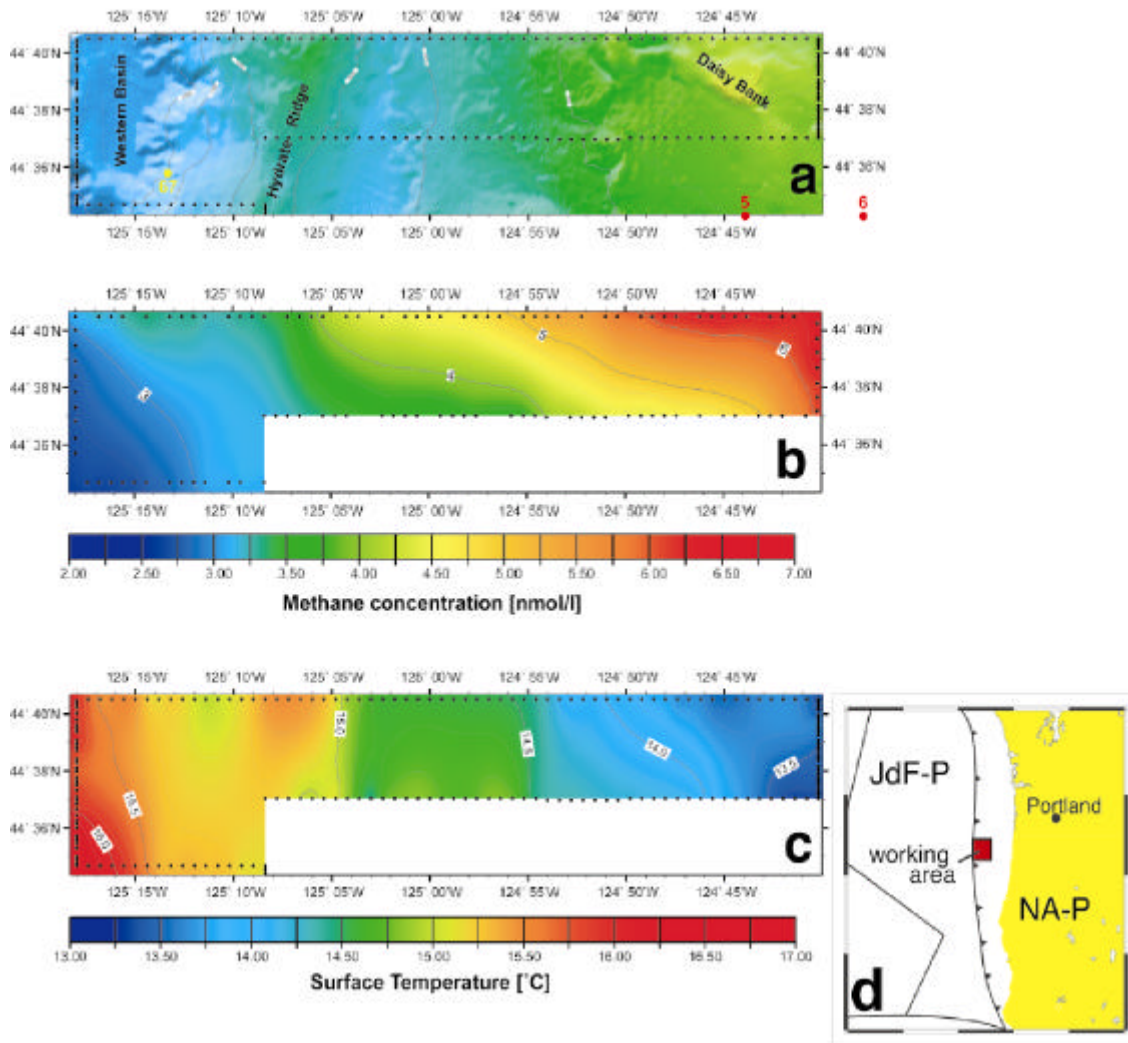


Abb. 14 Ergebnisse einer hochauflösenden Methanmessung im Oberflächenwasser am 24. Juli 1999. a. Bathymetrie; b. Methan, c. Temperatur, d. Salinität im Oberflächenwasser.

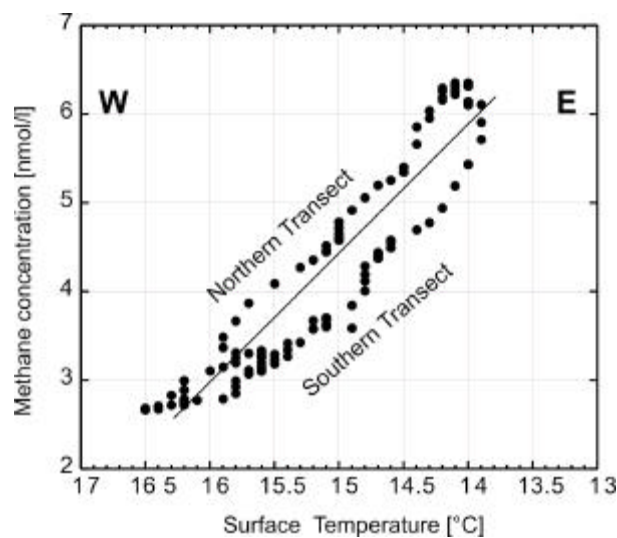


Abb. 15 Korrelation des Methangehaltes und der Temperatur im Oberflächenwasser (Abb. 14bc). Für einen besseren Vergleich von West nach Ost wurde die x-Achse umgedreht.

## 1.6.5 Biogeochemische Untersuchungen der Sedimente, Gashydrate und Porenwässer

### 1.6.5.1. Biogeochemische Gradienten

Gashydrate bestimmen die Biogeochemie der Sedimente am Meeresboden des SHR. Die methanhydrat- und karbonathaltigen Sedimente bilden Hügel von einigen Metern im Durchmesser und einer Höhe bis zu 2 m, die von Sediment und Bakterienmatten bedeckt waren. Die Bakterienmatten bestanden aus filamentösen schwefeloxidierenden Bakterien der Gattung *Beggiatoa*. Die Hügel wurden umgeben von Muscheln der Familie Vesicomysidae (*Calyptogena pacifica*, *C. kilmeri*), die wiederum umgeben waren von Muscheln der Familie Solemyidae (*Acharax* sp.) (Sahling et al., accepted).

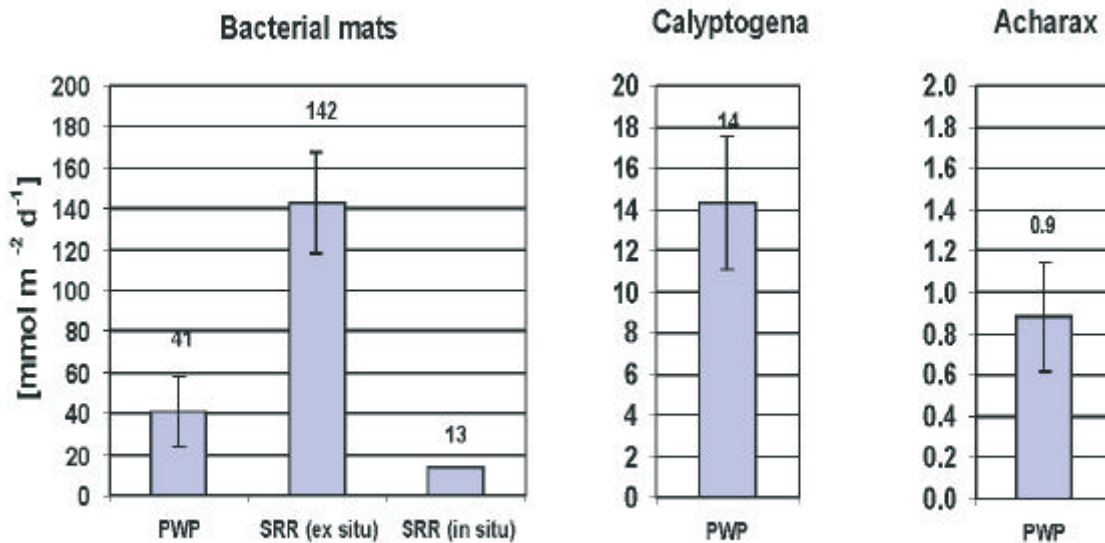
Die Schwefelwasserstoff-Gradienten im Porenwasser der Sedimente unterhalb der *Acharax*-, *Calyptogena*- oder *Beggiatoa*-Gemeinschaften unterschieden sich dramatisch. Der diffusive Fluss von Schwefelwasserstoff war am grössten in der *Beggiatoa*-Gemeinschaft ( $23 \pm 13 \text{ mol m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ), etwas geringer in der *Calyptogena*-Gemeinschaft ( $6,6 \pm 2,4 \text{ mol m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ) und am geringsten in der *Acharax*-Gemeinschaft ( $0,05 \pm 0,05 \text{ mol m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ). Damit zeigt sich, dass das sulfidische Milieu bedeutenden Einfluss auf die Zusammensetzung der chemoautotrophen und heterotrophen Gemeinschaften in GH-reichen Sedimenten der Tiefsee hat. Die Methananalysen im Sediment wurden teils an Bord und teils am GEOMAR durchgeführt. Die Analysen lieferten wichtige Informationen über die unterschiedliche Aktivität des Fluid-Venting im Einsatzgebiet. Bedingt durch eine sehr kleinräumige Variabilität zeigte sich jedoch, dass die Porenwasser- und Methanuntersuchung an zwei unterschiedlichen Multicorer-Rohren desselben Einsatzes nicht immer zu den zu erwartenden Überschneidungen im Bereich der höchsten Sulfatreduktionsaktivität führte. Daher wurden auf den Expeditionen SO148/1 & 2 die geochemischen, aber auch die mikrobiologischen und makrofaunistischen Untersuchungen noch enger aufeinander abgestimmt und die Datensätze an möglichst gleichen Kernen erhoben (Linke et al., 2001).

Die vertikale Verteilung der Nährstoffe innerhalb der obersten 15 cm, die ganz wesentlich durch die biologische Besiedlung indiziert wird, zeigt ganz erheblich abgesenkte Methankonzentrationen im Einflussbereich der Muschelkolonien (*Calyptogena* sp.) im Vergleich zu Bakterienmatten (*Beggiatoa* sp., Boetius et al., 2001). Dies kann zum einen auf die Bioirrigation durch die Muscheln, durch verringerten Methanaufstieg, bedingt durch tieferlagernde Gashydrate, aber auch auf erhöhte  $\text{CH}_4$ -Oxidationsraten zurückzuführen sein. Eine Erhöhung der Methanoxidationsrate könnte dann auf deutlich erhöhte Fluidausstromraten oder einen zusätzlichen Methanaufstieg durch sich zersetzende Gashydrate hindeuten. Methanoxidations- bzw. Sulfatreduktionsraten wurden nach Bergung der Sedimentkerne durch Zugabe von radioaktivem Sulfat bereits nach kurzer Inkubationszeit direkt an Bord bei in situ - Temperaturen bestimmt (1.6.6.2). Die Sulfatreduktionsraten waren extrem hoch in Sedimenten, die von Bakterien überlagert waren. Die über 15 cm integrierten Raten ergaben  $\sim 140 \text{ mmol SO}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ . Diese Ergebnisse sind mittlerweile in *Nature* publiziert (Boetius et al., 2000). Weitere mikrobielle Untersuchungsergebnisse sind im Kapitel 1.6.6.2. aufgeführt.

Die aus Porenwasserdaten aus insgesamt 8 Bakterienmatten-Kernen modellierten diffusiven Sulfatflüsse zeigen im Bereich von Bakterienmatten deutlich kleinere Werte von  $\sim 40 (\pm 20) \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ , die eher in der Grössenordnung der *in situ* gemessenen Sulfatflüsse (A. Boetius, unpublished data) liegen (Abb. 16). Während die von *Calyptogena* sp. überlagerten Sedimente immer noch etwa halb so grosse Sulfatflüsse zeigen  $14 (\pm 3)$ , sind die Sulfatflüsse bei *Acharax*-durchmischten Sedimenten bereits um eine Zehnerpotenz geringer. Analog zu den hohen Sulfatreduktionsraten im Bereich der Bakterienmatten ergaben in benthischen Kammern gemessene Sauerstoffrespirationsdaten Werte von bis zu  $60 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  (Abb. 5). Ähnliche Grössenordnungen wurden auch bei *Calyptogena*-besiedelten Sedimenten



gemessen. Dagegen lagen Sauerstoffzehrungsraten an Referenzstationen auf dem HR bereits um eine, in Vent-unbeeinflussten Gebieten sogar um 2 Grössenordnungen niedriger.



**Abb. 16** Darstellung der an die Methanflüsse gekoppelten Sulfatflüsse aus 8 Bakterienmatten-, 7 Calyptogena- und 4 Acharax-dominierten Sedimentkernen, berechnet anhand der Porenwasserdaten (PWP). Durch Zugabe von radioaktivem Sulfat wurden von Boetius et al. (2000) an Bakterien-dominierten Sedimenten sowohl ex situ als auch in situ Sulfatreduktionsraten (SRR) bestimmt, die tiefenintegriert im Vergleich zu den aus Porenwasserdaten ermittelten Sulfatflüssen dargestellt sind.

Eine statistisch grössere Anzahl von *in situ* gemessenen Sulfatreduktionsraten wird nötig sein, um zu einer statistisch gesicherteren Aussage der Sulfatreduktionsaktivität in diesen von Hydrat ganz unterschiedlich beeinflussten Habitaten zu gelangen.

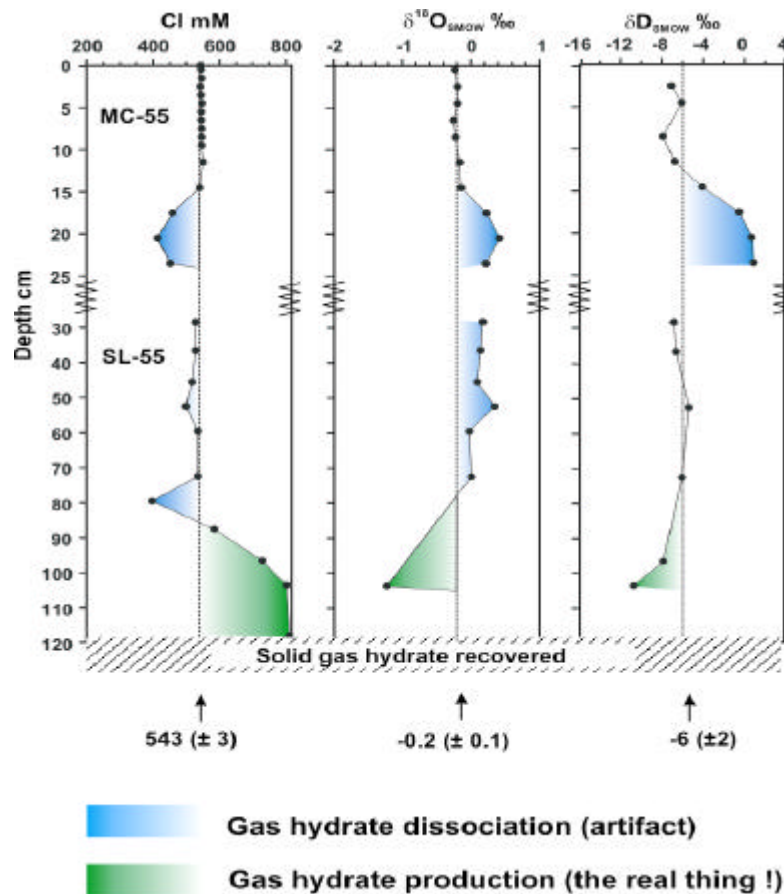
Weitergehende Porenwassermodellierungen in Kombination mit den Sauerstoffzehrungsraten lassen auf einen advektiven Transport in von Bakterienmatten besiedelten Sedimenten mit einer Entwässerungsrate von etwa 20 cm/yr schliessen (Torres et al., 2002).

### 1.6.5.2 Salzanomalien im Porenwasser durch Hydratbildung und -zerfall

Ein weiterer wissenschaftlich sensationeller Fund der TECFLUX-I-Expeditionen gelang mit dem Schwereloteinsatz SL-55-5: Während die oberen der drei Gashydratlagen im Schwerelotkern (25-38 cm, 60-65 cm, 100-105 cm) schon weitestgehend zersetzt waren, war die unterste Gashydratlage überwiegend unzersetzt. Das umgebende Sedimentgefüge war durch den Wasserentzug bei der Gashydratbildung auffällig trocken. Eine sofort angestellte Porenwasseruntersuchung ergab eine extreme Verdünnung des Wassers in der unmittelbaren Umgebung der bereits zersetzten Gashydratlagen, deutlich zu erkennen an den negativen Chloridanomalien im Porenwasser. In der Nähe der unzersetzten Gashydratlage dagegen wurden erstmalig bei der Gashydratbildung theoretisch zu erwartende positive Chloridanomalien (580-840 mM) gefunden. Im Schwerelot SL-221-1 konnte eine solche positive Chloridanomalie – wenn auch weniger markant – ebenfalls gefunden werden.

Die im vergangenen Jahr durchgeführten Messungen der Sauerstoff- und Wasserstoffisotopen konnten die Entstehung der Salzanreicherung durch Hydratbildung hinreichend bestätigen. In Abb. 15 sind die Daten exemplarisch für die Lokation 55 auf dem SHR dargestellt. Die im Schwerelot 55-5-SL durch die Beprobungstechnik gestörte bzw. fehlende Sedimentoberfläche

wird durch den Multicorer 55-2C repräsentiert. Mit Hilfe der Chloridanreicherungen und einer modifizierten Form des Transport-Reaktionsmodells C. CANDI (Boudreau, 1996; Luff et al., 2000 a,b) werden mit Hilfe bekannter Advektionsraten aus Sauerstoffzehrungsmessungen, Direktausstrommessungen oder den Porenwasser-Sulfatprofilen realistischere Abschätzungen zu der flächenhaften Verteilung der Gashydrate und zu den Gashydratbildungsraten ermittelt.



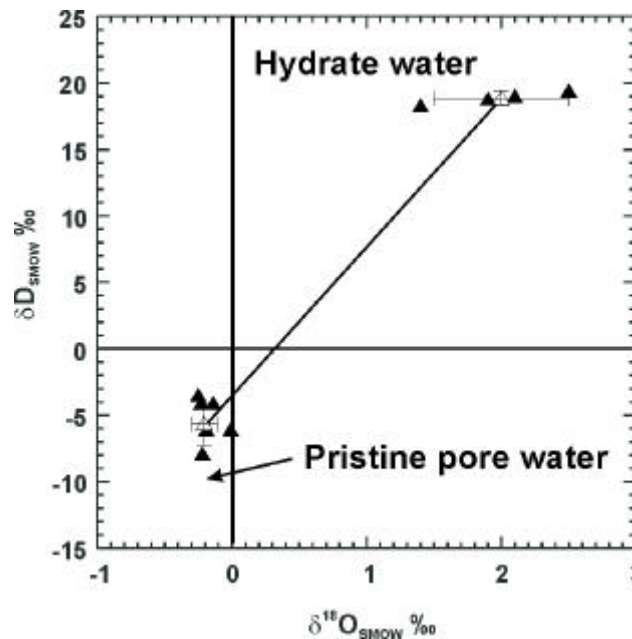
**Abb. 17** Chlorid- und Isotopensignaturen im Porenwasser bei der Gashydratbildung und -zersetzung. Positive Chloridanomalien durch Salzentzug bei der Hydratbildung rufen gleichzeitig negative Abweichungen in der Wasserisotopie ( $\delta^{18}\text{O}$ - und  $\delta\text{D}$ ) hervor, bedingt durch den Einbau der schweren Isotope im Hydrat. Beim Zerfall tritt der jeweils umgekehrte Effekt auf.

### 1.6.5.3 Isotopenfraktionierungen bei der Hydratbildung

Die Untersuchung stabiler Isotope ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) in den Porenwässern und Hydratwässern dissoziierter Hydratproben ist von besonderer Bedeutung für Gashydratstudien, weil Bildung und Zersetzung von Gashydraten verbunden sind mit Isotopenfraktionierungseffekten.

Mit Hilfe des videogesteuerten TV-Greifers wurden gashydrathaltige Sedimente geborgen und kontrollierte Entgasungen an Gashydratproben durchgeführt, um Gesamtgas- und Wasseranalysen für Isotopenbestimmungen zu erhalten. Das Methan der Gashydrate ist mit  $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen von  $-61(\pm 2)$  mikrobieller Natur. Bei einer Untersuchung der Hydratwässer bestätigte sich eine Anreicherung der schweren  $^{18}\text{O}$ - und  $^2\text{H}$ -Isotope im Clathratgitter von 4 Gashydratproben mit  $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopen von  $2,0 (\pm 0,5)$  und  $\delta\text{D}$ -Werten von  $18,9 (\pm 0,5)$ . Die relativ hohen Standardabweichungen der Isotopenwerte können mit unterschiedlichen Fraktionierungen und isotopisch gleichem Bildungsporenwasser, aber auch mit gleichen Fraktionierungen und isotopisch unterschiedlichem Bildungsporenwasser erklärt werden. Für

eine abschliessende Beantwortung dieser Frage sind Messungen an weiteren Proben nötig, wie



**Abb. 18** Berechnung der Isotopenfraktionierungen aus  $\delta^{18}\text{O}$ - und  $\delta\text{D}$ -Daten von Hydratwasser und Hydrat-unbeeinflusstem Porenwasser.

sie im Rahmen von TECFLUX-II während der Sonne-Expeditionen 148-1 & 2 gewonnen wurden. Anhand der gemittelten Isotopen-Endglieder für Hydratwasser und unbeeinflusstes Porenwasser lassen sich die Isotopenfraktionierungsfaktoren des oberflächennahen Hydratbildungsprozesses ermitteln (Abb. 18). Für die Sauerstoff- bzw. Wasserstofffraktionierung wurden Werte von  $\alpha^{\text{O}} = 1,0021 (\pm 0,008)$  und  $\alpha^{\text{H}} = 1,025 (\pm 0,003)$  bestimmt. Diese Werte liegen im Rahmen des Fehlers im Bereich von jüngsten Laboruntersuchungen an künstlichem Methanhydrat (Maekawa and Imai, 2000).

#### 1.6.5.4 Biomarkeruntersuchungen

Die mikrobielle Vergesellschaftung in den anaeroben Sedimenten des HR wird durch ein syntrophes Konsortium aus Archaeobakterien und Bakterien bestimmt, welches Methan unter anaeroben Bedingungen oxidiert. Der Prozess wird durch die Dominanz spezifischer archaeobakterieller und bakterieller Biomarker wie Crocetan, PMI, Archaeol, Hydroxyarchaeol, iso-/anteiso  $\text{C}_{15:0}$  und ungesättigte  $\text{C}_{16:1}$  Fettsäuren sowie verschiedener Monoalkylglycerolether angezeigt. Die Isotopensignatur all dieser Biomarker ist durch die Kohlenstoffquelle Methan ( $\delta^{13}\text{C} = -65$  bis  $-72\text{‰}$  PDB) geprägt, wobei die am stärksten mit  $^{13}\text{C}$  angereicherten Biomarker ( $\delta^{13}\text{C} = -100$  bis  $-127\text{‰}$  PDB) methanoxidierenden Archaeobakterien und die geringer angereicherten ( $\delta^{13}\text{C} = -60$  bis  $-105\text{‰}$  PDB) sulfatreduzierenden Bakterien zugeschrieben werden können (Elvert et al., 2001). Diese extremen Kohlenstoffisotopensignaturen werden durch einen kontinuierlichen Methanfluidausstrom am HR erzeugt, der dafür sorgt, dass der kinetische Kohlenstoffisotopeneffekt zwischen Substrat und Produkt ( $\epsilon_{\text{CH}_4\text{-Biomarker}}$ ) innerhalb des Prozesses der anaeroben Methanoxidation am Standort maximale Werte annimmt ( $\epsilon_{\text{max}} = 72\text{‰}$ ).

Betrachtet man nun das beobachtete Biomarkermuster in Kombination mit den erhaltenen Kohlenstoffisotopenwerten, lassen sich isoprenoidische Kohlenwasserstoffe (Crocetan, PMI) und isoprenoidische Glycerolether (Archaeol, Hydroxyarchaeol) methanoxidierenden

Archaeobakterien zuschreiben, während weniger stark an  $^{13}\text{C}$  angereicherte Fettsäuren und Monoalkylglycerolether sehr wahrscheinlich von sulfatreduzierenden Bakterien produziert werden. Diese wiederum nutzen ein ebenfalls isotopisch an  $^{13}\text{C}$  angereichertes Intermediat, welches von den Archaeobakterien zur Verfügung gestellt wird, als Kohlenstoffquelle für die Biosynthese. Als mögliche Intermediate des syntrophen Konsortiums kommen dabei  $^{13}\text{C}$  angereichertes  $\text{CO}_2/\text{H}_2$  oder Acetat in Frage, so dass unter den physikochemischen Bedingungen am HR entweder von einer Reversion der Karbonatreduktion oder der Acetatfermentation gesprochen werden kann.

Der Nachweis der Aktivität dieses Konsortiums am HR gelingt am besten in Bereichen mit oberflächennahen Gashydraten, wie sie am SHR häufig zu beobachten waren. Ohne den Prozess der höchst effizienten anaeroben Methanoxidation wäre der Methanfluss in die Wassersäule wesentlich grösser und könnte möglicherweise zu einem verstärkten Eintritt von Methan in die Atmosphäre führen. Aus diesem Grunde stellt die anaerobe Methanoxidation eine wichtige Senke im globalen Methanhaushalt dar.

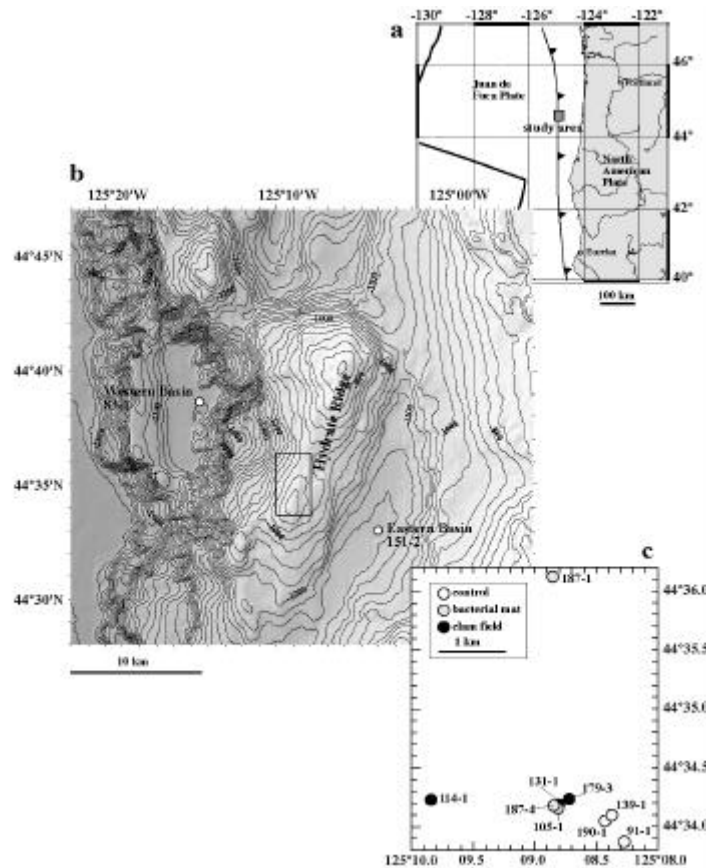
## 1.6.6 Biochemische Stoffumsätze an Gradienten

### 1.6.6.1 Ökologie der kleinen und grossen benthischen Grössenklassen

Ziel der biologischen bzw. biochemischen Untersuchungen war es, die Koppelung der kleinen und grossen benthischen Grössenklassen (Bakterien, Pilze, Protozoen und meiobenthische Organismen) mit der von GH stark beeinflussten Biogeochemie der Sedimente aufzuzeigen.

In den Sedimenten des SHR kommen GH oft nur wenige Zentimeter unter der Sedimentoberfläche vor. Diese sehr oberflächennahen GH sind oft mit dem Auftreten von Bakterienmatten, die von sulfidoxidierenden chemoautotrophen Bakterien der Gattung *Beggiatoa* sp. gebildet werden, verbunden. Mit zunehmender Distanz zu diesen GH und damit reduziertem Sulfidfluss (1.6.5.1.) wird die Oberfläche des Sediments zunächst durch Muscheln der Gattung *Calypptogena* sp. und in Folge durch *Acharax* sp., die im Sediment eingegraben lebt, besiedelt. Diese Zonierung der drei Charakterarten *Beggiatoa*, *Calypptogena*, *Acharax*, deren Ernährung auf Chemoautotrophie beruht, ging einher mit einem Wechsel der gesamten Makrofauna-Gemeinschaft. Die *Beggiatoa*-Gemeinschaft in den Sedimenten über den Gashydraten bestand aus endemischen Arten mit hohen Dichten: Gastropoda (*Provanna laevis*, *P. lomana*, *Pyropelta corymba*, *Hyalogyrina* sp. nov.), Bivalvia (*Nuculana* sp. nov.) und Polychaeta (Ampharetidae, Polynoidae, Dorvilleidae). Basierend auf allen Proben zeigen die ‚Rarefaction‘-Kurven eine geringere Diversität in den *Calypptogena*- und *Beggiatoa*-Gemeinschaften.

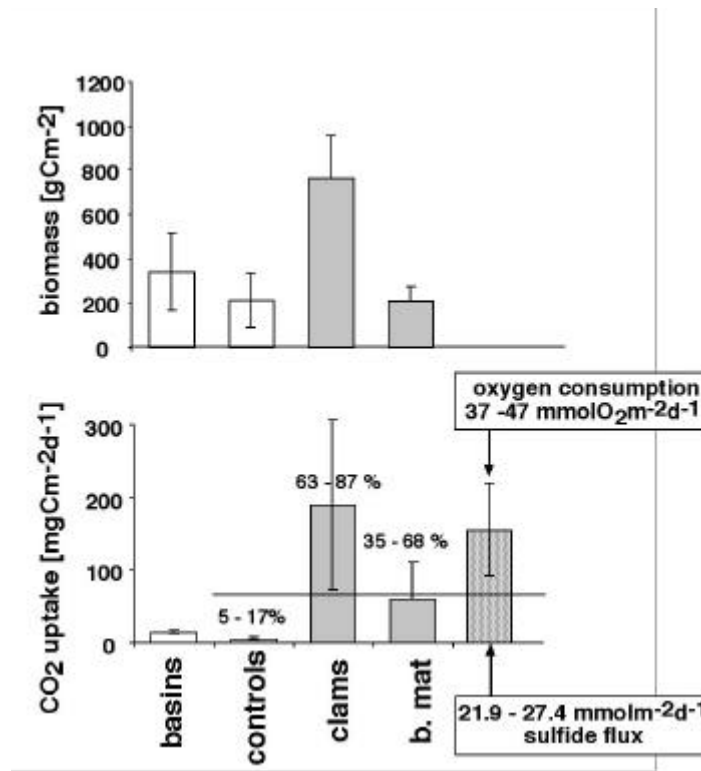
Im Rahmen einer integrativen Studie wurde während der Sonne-Expedition 143/2 der oben beschriebene, von GH induzierte biogeochemische Gradient mittels eines TV-geführten Multicorers (TV-MUC) beprobt (Abb. 19a-c). Zur Erfassung des natürlichen Hintergrunds wurden weitere TV-MUC-Einsätze an von GH unbeeinflussten Stationen des südlichen HR bei gleicher Wassertiefe durchgeführt. Als zusätzliche Referenzstationen wurden tiefergelegene Becken westlich und östlich des HR beprobt. Der Verlauf der Sonne-Reise 143/2 sowie die genauen Stationstiefen und -positionen können dem Fahrtbericht SO 143 (Bohrmann et al., 2000) entnommen werden.



**Abb. 19a-c** Bathymetrie und Positionen der Stationen, die während der Sonne Expedition 143/2 am SHR (Cascadia Subduktionszone) und flankierenden Becken mittels einem TV-MUC beprobt wurden. Abb 19c zeigt die Positionen der Kontrollstationen, Muschelfelder und Bakterienmatten mit höherer räumlicher Auflösung.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden kürzlich bei Marine Ecology Progress Series unter dem Titel “ Surficial marine gas hydrates and their ecological implications for the small-sized benthic biota at the Hydrate Ridge” zur Begutachtung eingereicht. Deshalb soll im folgenden nur ganz kurz auf die Ergebnisse eingegangen werden. Die Biomasse der kleinen benthischen Grössenklassen wurde anhand der Konzentration von DNA und Gesamtadenylnaten im Sediment bestimmt. Die potentielle bakterielle exoenzymatische Aktivität wurde mittels der Zugabe des Modellsubstrates Fluoresceindiacetat ermittelt. Zur Abschätzung der chemoautotrophen Produktion von partikulärem organischem Kohlenstoff (POC) wurde die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme des Sedimentes in Dunkel-Inkubationen erfasst. Inventare von Chlorophyll a und Phaeopigmenten dienen als Parameter zur Abschätzung des primärproduzierten POC-Eintrags.

Die mittlere Biomasse der kleinen benthischen Grössenklassen in Muschelfeldern (integriert über die oberen 10 cm des Sedimentes) war mit  $765 \text{ gCm}^{-2}$  3,6fach höher als in den nahe gelegenen Kontrollstationen mit  $213 \text{ gCm}^{-2}$  (Abb. 20). Die mittlere Biomasse in bakteriellen Matten, die sehr verarmt an eukaryontischen Organismen  $> 31 \mu\text{m}$  waren, betrug  $209 \text{ gCm}^{-2}$  (Abb. 20). Der autotrophe Eintrag von POC in den Kontrollstationen, den bakteriellen Matten und den Muschelfeldern war jeweils 5,7, 59,7 und  $190,0 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$  (Abb. 20). Der relative autotrophe POC-Eintrag im Vergleich zum Eintrag von primärproduziertem POC durch die Wassersäule beträgt in den verschiedenen Habitaten jeweils 5-17, 35-68 und 63-87%. Die stark erhöhte autotrophe Aktivität in den Muschelfeldern ist möglicherweise durch erhöhte



**Abb. 20:** a. Biomasse der kleinen benthischen Größenklassen (Bakterien, Pilze, Protozoen und meiobenthische Organismen) entlang des von GH induzierten biogeochemischen Gradienten, Kontrolle, Muschelfeld und Bakterienmatte. b. CO<sub>2</sub>-Dunkelfixierung (chemoautotrophe POC Produktion) entlang dieses Gradienten. Die theoretisch zu erwartende chemoautotrophe POC-Produktion in einer Bakterienmatte bei einem gemessenen Sulfidfluss von 21,9 – 27,4 mmolm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> ist gepunktet unterlegt dargestellt. Der für eine Bakterienmatte berechnete Sauerstoffverbrauch basiert auf der kompletten Oxidation des Sulfids. Die Linie zeigt den mittleren monatlichen POC-Eintrag (Juli) in die Kontrollstationen und die von GH beeinflussten Sedimente durch die Wassersäule. Die Fehlerbalken stellen Standardabweichungen dar.

Transportraten von partikulären und gelösten Substanzen, bedingt durch die Filtrierleistung und Bioturbationsaktivität der calyptogenen Muscheln, zu erklären. In den von GH beeinflussten Sedimenten (bakterielle Matten, Muschelfelder) waren die Inventare von Chlorophyll a und Phaeopigmenten um ca. die Hälfte geringer als in den Kontrollstationen. Dies mag auf eine erhöhte Abbauproduktivität von phytodetritischem Material zurückzuführen sein. Die daraus resultierenden niedermolekularen organischen Verbindungen stellen potentielle Substrate für sulfatreduzierende Bakterien dar. Diese leisten in enger Syntrophie mit methanogenen Archaeen die anaerobe Methanoxidation in den GH-haltigen Sedimenten des HR. Diese Syntrophie ist ein Schlüsselprozess, durch den die Energie von Methan aus sich zersetzenden GH auf Sulfid übertragen und über autotrophe Bakterien in das benthische Nahrungsnetz eingeschleust wird. Unter der Annahme, dass die o.g. Stimulation stattfindet, stellt dieses bakterielle Konsortium eine wichtige Schnittstelle zwischen dem Umsatz des im Methan gebundenen Kohlenstoffs und des primärproduzierten Kohlenstoffs dar. Daher könnte die Abbaukinetik von oberflächennahen GH durch z.B. jahreszeitlich schwankenden POC-Eintrag beeinflusst werden.

#### *Gesamtbenthische Sauerstoffverbrauchsraten*

Des Weiteren wurden in Zusammenarbeit mit dem MPI Bremen (U. Witte) GEOMAR-Lander eingesetzt, um in-situ-Messungen des gesamtbenthischen Sauerstoffverbrauchs in von GH beeinflussten Sedimenten durchzuführen. Aufbau und Einsatzplan der Kammer-Lander können dem Fahrtbericht SO 143 (Bohrmann et al. 2000) entnommen werden.

Ziel dieser Messungen war es, die Rolle des Sauerstoffs als Elektronenakzeptor in den von GH beeinflussten Sedimenten zu quantifizieren. In Bakterienmatten und Muschelfeldern wurden die höchsten  $O_2$ -Verbrauchsraten mit bis zu ca.  $65 \text{ mmol } O_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  gemessen (Abb. 5). Der Sauerstoffverbrauch nimmt über die Acharax- und die Kontrollstationen bis zum westlichen Becken graduell ab (Bohrmann et al., 2000) (Abb. 5).

#### *Gegenwärtige Untersuchungen*

Im Rahmen einer Diplomarbeit (E. Gutzmann) werden zur Zeit Verteilungsmuster und taxonomische Zusammensetzung meiobenthischer Gesellschaften in Sedimentproben vom HR, des westlichen und des östlichen Beckens (Sonne-Expedition 143/2) untersucht. Diese Resultate sollen mit der Biogeochemie und Umsatzraten (z.B.  $CO_2$ -Dunkelfixierung, Chlorophyll a, Exoenzymatische Aktivität, Methan, Sulfid, gesamtbenthischer  $O_2$ -Verbrauch) an den verschiedenen Stationen korreliert werden.

Die Verbreitung der Megaepifauna im Bereich der GH-Vorkommen und der umliegenden Tiefsee wird zur Zeit im Rahmen einer weiteren Diplomarbeit (M. Porzelt) untersucht, die Beendigung der Arbeit erfolgt im Juli dieses Jahres. Die Ergebnisse zeigen, dass an den GH-Vorkommen einige megaepibenthische Tiere der Tiefsee nicht vorkommen. Wahrscheinlich vermeiden diese Organismen die Gebiete aufgrund des toxischen Schwefelwasserstoffs und/oder der Veränderung der Sedimentstruktur durch z.B. GH-Bildung und -Zerfall sowie Karbonatpräzipitation. Die Karbonatpräzipitation stellt einen der wichtigsten indirekten Einflüsse auf das Benthos der Tiefsee dar: sessile Organismen (z.B. *Anthomastus ritteri*: Alcyonaria: Cnidaria) und einige räuberisch lebende Tiergruppen (Buccinidae: Gastropoda, Skorpionsfische) treten vermehrt auf dem Hartsubstrat auf. Vergleichbare Einflüsse auf das Tiefsee-Megaepibenthos wurden an den Methanquellen am Sachalin-Schelf/ Ochotskisches Meer gefunden (Sahling et al., 2001).

#### **1.6.6.2 Mikrobielle Ökologie**

Ziel der vom Kooperationspartner MPI Bremen durchgeführten Untersuchungen war die Bestimmung mikrobieller Aktivität an unterschiedlich methanreichen Standorten des HR sowie in den umliegenden Beckenbereichen. Für die Analyse der Bakterienbiomasse, sowie der bakteriellen Aktivität und Diversität wurden Proben von insgesamt 17 Multicorer-Stationen und eine Kammerlander-Station erhalten. Für Bakterienanzahlen, extrazelluläre Enzymaktivität (EEA), bakterielle Produktion sowie für die Bestimmung der Sulfatreduktionsraten (SRR) wurden die oberen 30 cm des Sedimentes beprobt. Die mikrobielle Diversität wurde an Parallelproben mit Fluoreszenz - in situ - Hybridisierung (FISH) untersucht.

Ein eindeutiger Hinweis auf gashaltige Sedimente war das Vorkommen von weissen und orangefarbenen Bakterienmatten auf dem Meeresboden. Diese Matten von sulfidoxidierenden Riesenbakterien waren fleckenhaft verteilt, mit Durchmessern von wenigen Zentimetern bis Metern. Die Matten ragten ca. 1-4 mm aus dem Sediment ins Überstandswasser, und teilweise 1-2 cm ins Sediment hinein. Wahrscheinlich sind diese Bakterien in der Lage, Sulfid nicht nur mit Sauerstoff, sondern auch mit Nitrat zu oxidieren, wie es mehrfach z.B. in Sedimenten von Auftriebsgebieten beobachtet wurde (z.B. bei *Beggiatoa*, *Thioploca* und *Thiomargarita*). Weiterhin deuten die in Porenwasseruntersuchungen auftretenden starken Nitrat anomalien in den obersten Sedimentsegmenten auf einen solchen Mechanismus hin (Rickert et al., 1999). Stark gashaltige Sedimente wurden ausserdem von Vorkommen der symbiontischen Muschel *Calyptogena* angezeigt, die sulfid-oxidierende Bakterien in ihren Kiemen beherbergt. Unterhalb der Bakterienmatten oder Muschelfelder war das Sediment schwarz und stark sulfidhaltig, sowie teilweise durch den Austritt von Gasblasen sehr schwammig. Da die

Gashydrate selber nur wenig Sulfid enthalten, ist es wahrscheinlich, dass das Auftreten hoher Biomassen der Sulfidoxidierer, bzw ihres Wirtes, der Muschel *Calyptogena*, direkt von dem Prozess der anaeroben Oxidation von Methan (AOM) abhängt. Daher wurden zur Untersuchung der mikrobiellen Sulfatreduktion sowie der bakteriellen Diversität vor allem Kerne aus dem Bereich von Bakterienmatten und Muschelfeldern gesammelt. Als Referenzstationen dienten Proben von Sedimenten nahe der chemosynthetischen Lebensgemeinschaft, oder aus umliegenden Beckenbereichen des HR.

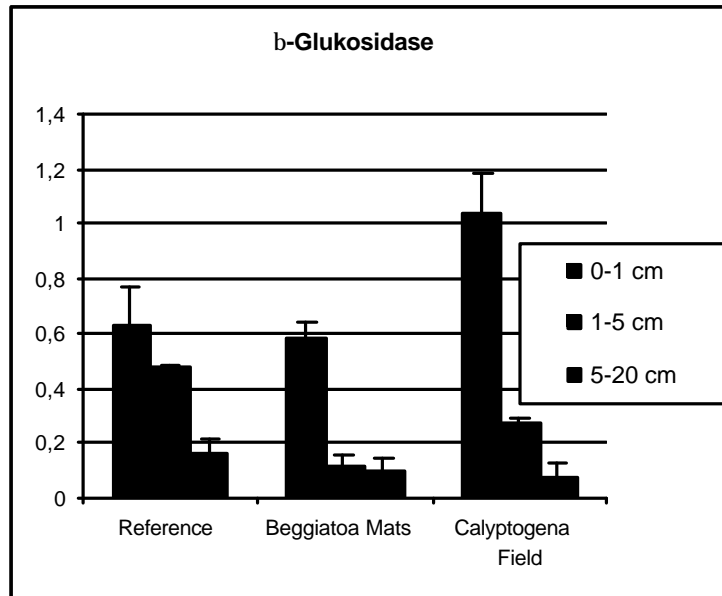


Fig. 21  $\beta$ -Glucosidase Aktivität ( $\mu\text{M h}^{-1}$ ).

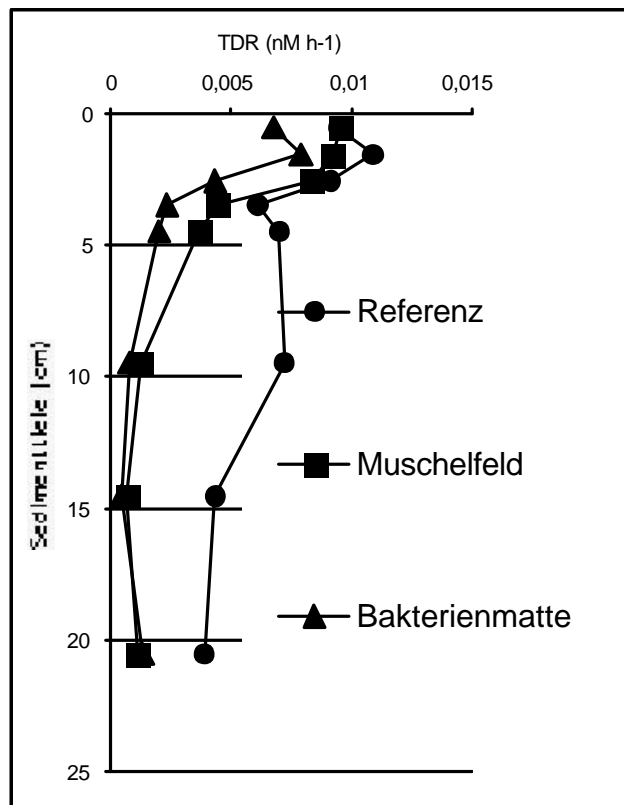
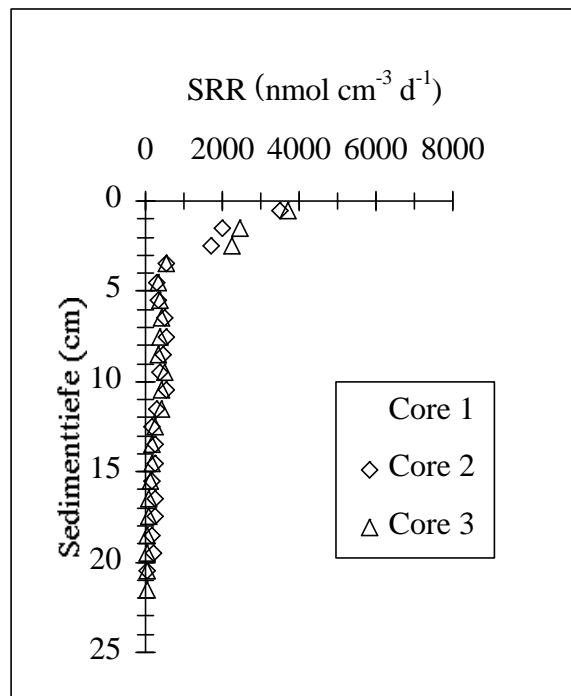


Abb. 22 Bakterielle Sekundärproduktion (Thymidin-Aufnahmerate).



Die Enzymaktivität (EEA) verschiedener extrazellulärer Hydrolasen ( $\alpha$ -,  $\beta$ -Glukosidase, Chitobiase, Lipase, Sulfatase, Phosphatase, Butyrase, Leucin-Peptidase) wurde direkt an Bord bestimmt. An allen Stationen von 680-2900 m Wassertiefe waren relativ hohe Enzymaktivitäten zu messen, vergleichbar mit Sedimenten aus Auftriebsgebieten gleicher Wassertiefe. Die höchsten Aktivitäten wurden zumeist direkt an der Sedimentoberfläche gemessen. Es waren keine generellen Unterschiede in der Enzymaktivität zwischen den verschiedenen Stationen festzustellen (Abb. 21), ähnlich wie in der heterotrophen Produktion bakterieller Biomasse.

Die Thymidin-Aufnahmeraten in tieferen Sedimentschichten waren allerdings im suboxischen Bereich der Referenzstationen deutlich höher als in den stark sulfidischen Sedimenten unterhalb der Bakterienmatten und Muschelfelder (Abb. 22). Es ist bekannt, dass Sulfatreduzierer sowie verschiedene andere anaerobe Bakterien nur bestimmte organische Moleküle aufnehmen, wie zum Beispiel kurzkettige Fettsäuren und Alkohole. Deutliche Unterschiede wurden hingegen bei der Aktivität anaerober Bakterien festgestellt. Die Sulfatreduktionsraten (SRR), die unterhalb der Bakterienmatten und Muschelfelder gemessen wurden, gehören zu den höchsten, die aus kalten Sedimenten bekannt sind. Direkt unterhalb der Bakterienmatten wurden bis zu  $8 \mu\text{mol cm}^{-3} \text{ h}^{-1}$  Sulfat umgesetzt (Abb. 23). Dagegen war



**Abb. 23** Sulfatreduktionsraten in Sedimenten unterhalb einer Bakterienmatte.

keine Sulfatreduktion in den Oberflächensedimenten der Referenzstationen zu messen. Das zeigt eine direkte Kopplung der Sulfatreduktion an die Oxidation von Methan, so wie sie der Stöchiometrie der anaeroben Methanoxidation entspricht. Die Sulfatreduktionsraten waren in methanhaltigen Sedimenten am höchsten im Bereich von 0-10 cm Sedimenttiefe, wo die Sulfatkonzentrationen noch höher als 2 mM lagen. Darunter waren immerhin noch SRR von  $10\text{-}100 \text{ nmol cm}^{-3} \text{ h}^{-1}$  zu messen, was ähnlichen Raten wie z.B. in Wattensedimenten entspricht.

Proben aus diesen Sedimenten wurden genutzt, um die Zellzahl und bakterielle Biomasse zu bestimmen, sowie um die Diversität der Sulfatreduzierer mittels Fluoreszenz in situ Hybridisierung zu untersuchen. Dabei wurden sehr hohe Anzahlen von kleinen Zellklumpen in den Sedimentschichten mit den höchsten Sulfatreduktionsraten entdeckt, die als ein

Konsortium aus Archaea und Sulfatreduzierern identifiziert werden konnten. Bisher war noch kein Mikroorganismus entdeckt worden, der in der Lage ist, Methan anaerob mit Sulfat zu oxidieren. Die stabilen Isotopensignaturen verschiedener Lipide, die als spezifische Biomarker für methanogene Archaea und Sulfatreduzierer gelten, zeigten eine deutliche Anreicherung im  $\delta^{13}\text{C}$ , die nur durch eine Aufnahme von Methan in die Zellbiomasse erreicht werden kann. Damit konnte erstmals die anaerobe Methanoxidation in gashydrathaltigen Sedimenten auf eine symbiotische Vergesellschaftung von Archaea und Sulfatreduzierer zurückgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der Veröffentlichung Boetius et al. (2000) dargestellt.

### 1.6.7 Numerische Modellierung von Gashydratsystemen

Um ein quantitatives Verständnis der in natürlichen Gashydratsystemen stattfindenden, voneinander abhängigen Prozesse der Gashydrat-/ Gasblasenbildung zu erlangen, ist zum einen die Kenntnis der raumzeitlichen Änderung der Primärvariablen (Fluiddruck, Temperatur, Konzentration) sowie der physikalischen Parameter der Sedimente am Kontinentalrand notwendig, zum anderen die mathematische Beschreibung der nicht-linearen Transportprozesse (Abb. 24). Hierfür ist die numerische Simulation hervorragend geeignet.

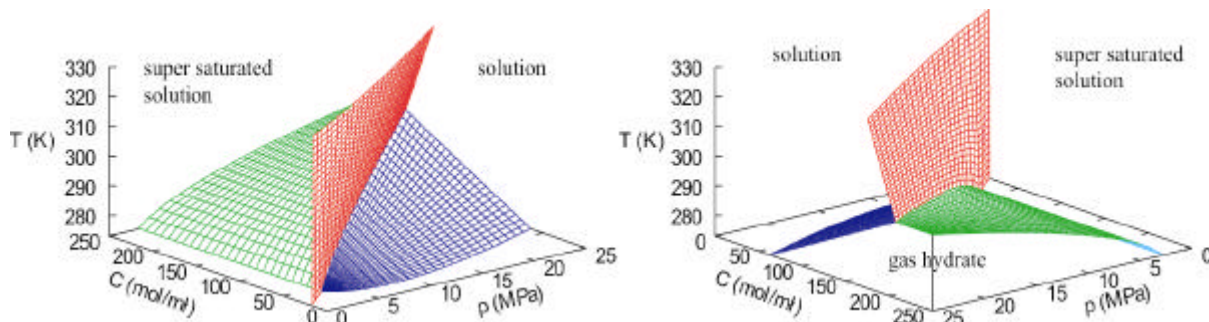


Abb. 24 Phasendiagramm für das Wasser-Gas-Gashydratsystem.

In den letzten Jahren wurden mehrere theoretische Ansätze zur Beschreibung der Transportvorgänge in Gashydratsystemen vorgestellt (z.B. Rempel und Buffett, 1997, Clennell et al., 2000). Aussagen über den kritischen Methanflux, der notwendig ist, um einen BSR hervorzurufen, wurden mit Hilfe von einem eindimensionalen Ansatz erzielt (Wu und Ruppel, 1998). Jedoch ist wegen ihrer Komplexität nur ein mindestens zweidimensionaler Ansatz geeignet, um die Transport- und Phasenübergangsprozesse in Gashydratsystemen, wie sie an Kontinentalrändern vorkommen, realistisch zu modellieren.

Daher wurde im Rahmen dieses Vorhabens ein eigener FE-Ansatz (Bohnert et al., 1999) weiter entwickelt und sowohl für das "Flachwasser"- als auch für das "Tiefwasserumfeld" getestet.

Die partiellen Differentialgleichungen, mit denen die Transportvorgänge für Fluid, Temperatur und Masse (hier für Methan) beschrieben werden, wurden für das Wasser-Gas-Gashydratsystem hergeleitet (Abb. 25). Sie weisen umfangreiche gashydratspezifische Erweiterungen gegenüber früheren Formulierungen auf. Die Gleichungen werden über die Fluidgeschwindigkeit sowie die physikalischen Materialparameter miteinander gekoppelt und mit Hilfe von finite-Elemente-Methoden numerisch gelöst. Wegen der dreifachen Kopplung und der Nichtlinearität der Materialgesetze gestaltet sich das Lösungsverfahren sehr komplex (Abb. 26), was umfangreiche Tests notwendig macht.

Hydraulic equation (conservation of mass and momentum)

$$\mathbf{K} f_{fl} \Delta p + (\mathbf{K} \vec{\nabla} f_{fl} + f_{fl} \nabla \mathbf{K}) \vec{\nabla} p = f_{fl} S_p \frac{dp}{dt} + f_{fl} \left[ S_T \frac{dT}{dt} + S_C \frac{dC}{dt} + \rho_o \vec{g} (2\mathbf{K} \vec{\nabla} f_{fl} + f_{fl} \nabla \mathbf{K}) - \beta \frac{d\alpha}{dt} \right] + \frac{s_p}{\rho_o}$$

Storage coefficients affected by fluid pressure ( $S_p$ ), bulk temperature ( $S_T$ ) and methane concentration ( $S_C$ )

$$\begin{aligned} S_p &= \beta(1 - \alpha)(\kappa_{fl} - \kappa_{sp}) + \kappa_{sp} \\ S_T &= -\beta(1 - \alpha)(\gamma_{fl} - \gamma_{sp}) - \gamma_{sp} \\ S_C &= \beta(1 - \alpha)\zeta_{fl} \end{aligned}$$

Accumulation rate of gas hydrate

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{R}{C_p}(1 - \alpha)$$

Thermal equation (conservation of enthalpy)

$$\bar{\lambda} \Delta T + (\nabla \lambda - c_{fl} \rho_o f_{fl} \vec{d}) \vec{\nabla} T = \bar{c} \bar{\rho} \frac{dT}{dt} - \left( T \bar{c} (\rho_o f_{fl} - \rho_p) + L(\bar{\rho} - \rho_p) \right) \beta \frac{d\alpha}{dt} - s_t$$

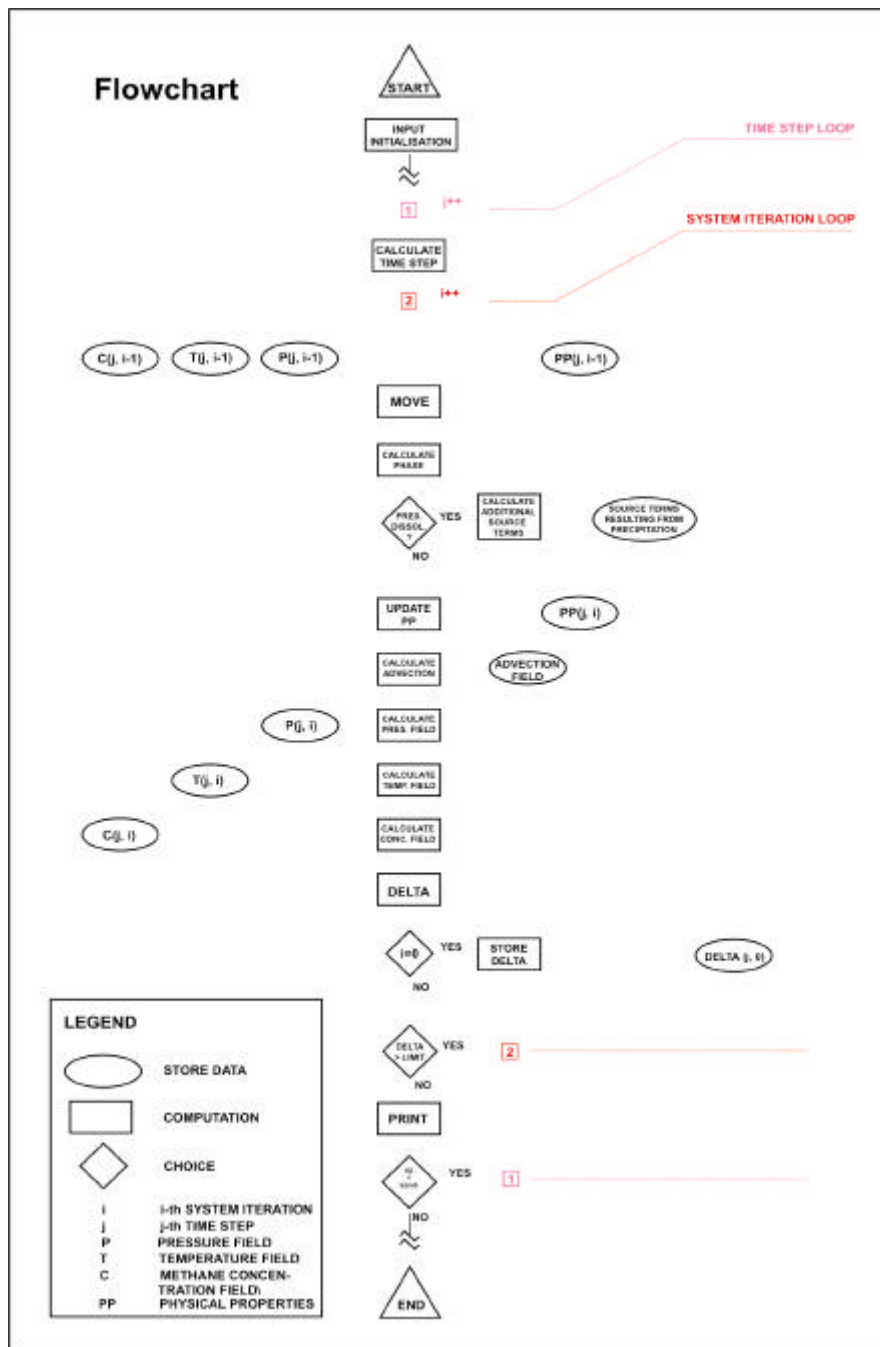
Equation of transport (conservation of methane quantity)

$$\mathbf{D} \Delta C + \left( \nabla \mathbf{D} - \frac{\vec{d}}{\beta(1 - \alpha)} \right) \vec{\nabla} C = \frac{dC}{dt} - \frac{C_p - C}{1 - \alpha} \frac{d\alpha}{dt} - \frac{s_c}{\beta(1 - \alpha)}$$

Notation

$1 - \beta$	-	grain volume per unit volume (UV)
$\beta(1 - \alpha)$	-	free pore space per UV
$\beta\alpha$	-	volume of gas hydrate per UV
$p$	-	pressure
$T$	-	temperature
$C$	-	concentration
$S_p$	-	store coefficient affected by pressure
$S_T$	-	store coefficient affected by temperature
$S_C$	-	store coefficient affected by concentration
$\mathbf{K}$	-	hydraulic conductivity
$\rho_o f_{fl}$	-	fluid density
$\rho_p$	-	gas hydrate density
$\rho_{sp}$	-	mean value density of gas hydrate and grain per UV
$\kappa_{fl}$	-	fluid compressibility
$\kappa_{sp}$	-	mean compressibility of gas hydrate and grain per UV
$R$	-	reaction rate of gas hydrate formation
$C_p$	-	methane concentration in gas hydrate
$\vec{g}$	-	gravity vector
$\bar{c}$	-	mean value specific heat of all components per UV
$c_{fl}$	-	specific heat of the fluid
$\lambda$	-	mean value of thermal conductivity of all components
$\vec{d}$	-	Darcy velocity
$L$	-	latent formation heat
$\mathbf{D}$	-	diffusivity of methane

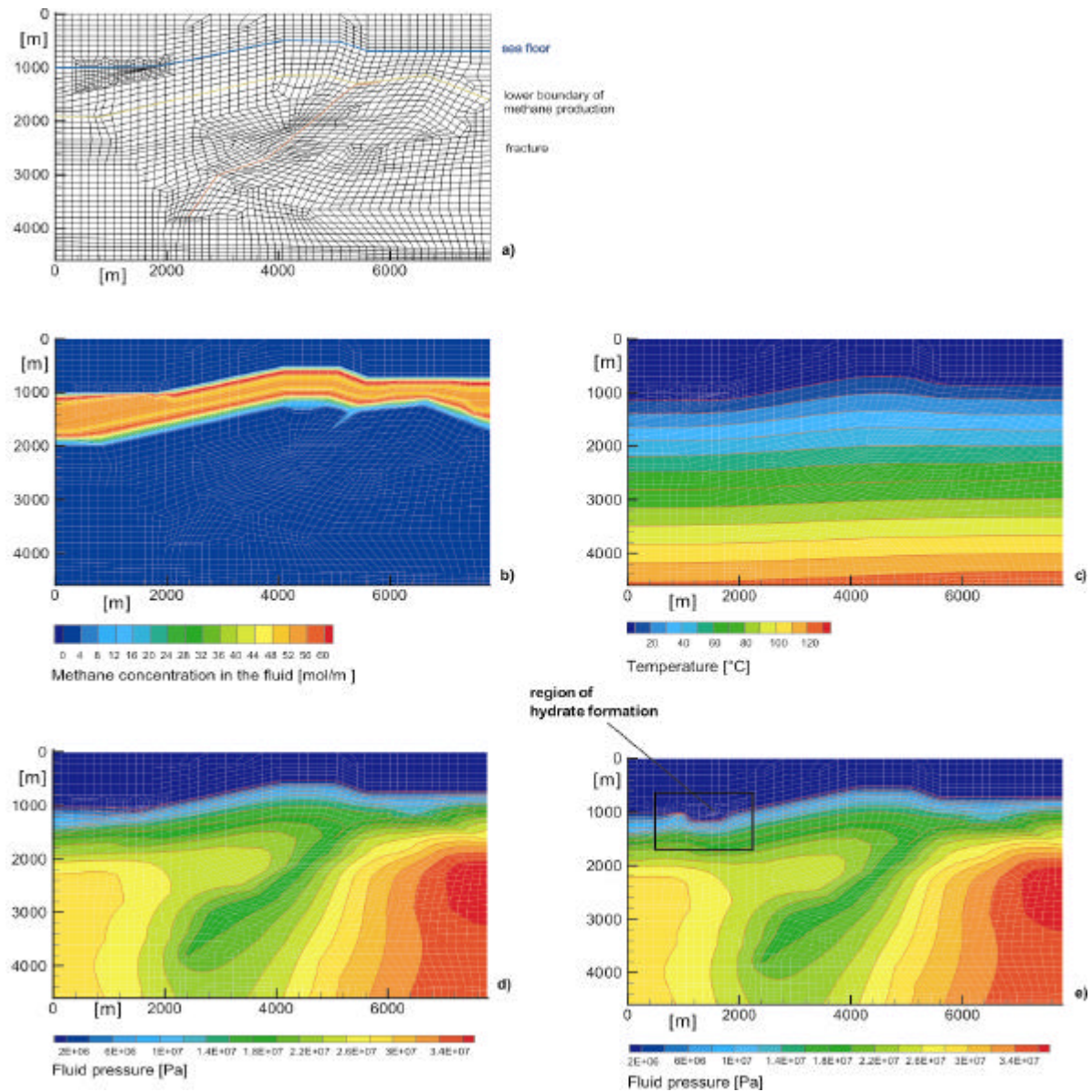
Abb. 25 Partielle Differentialgleichungen zur Beschreibung der Transportvorgänge in Gashydratsystemen.



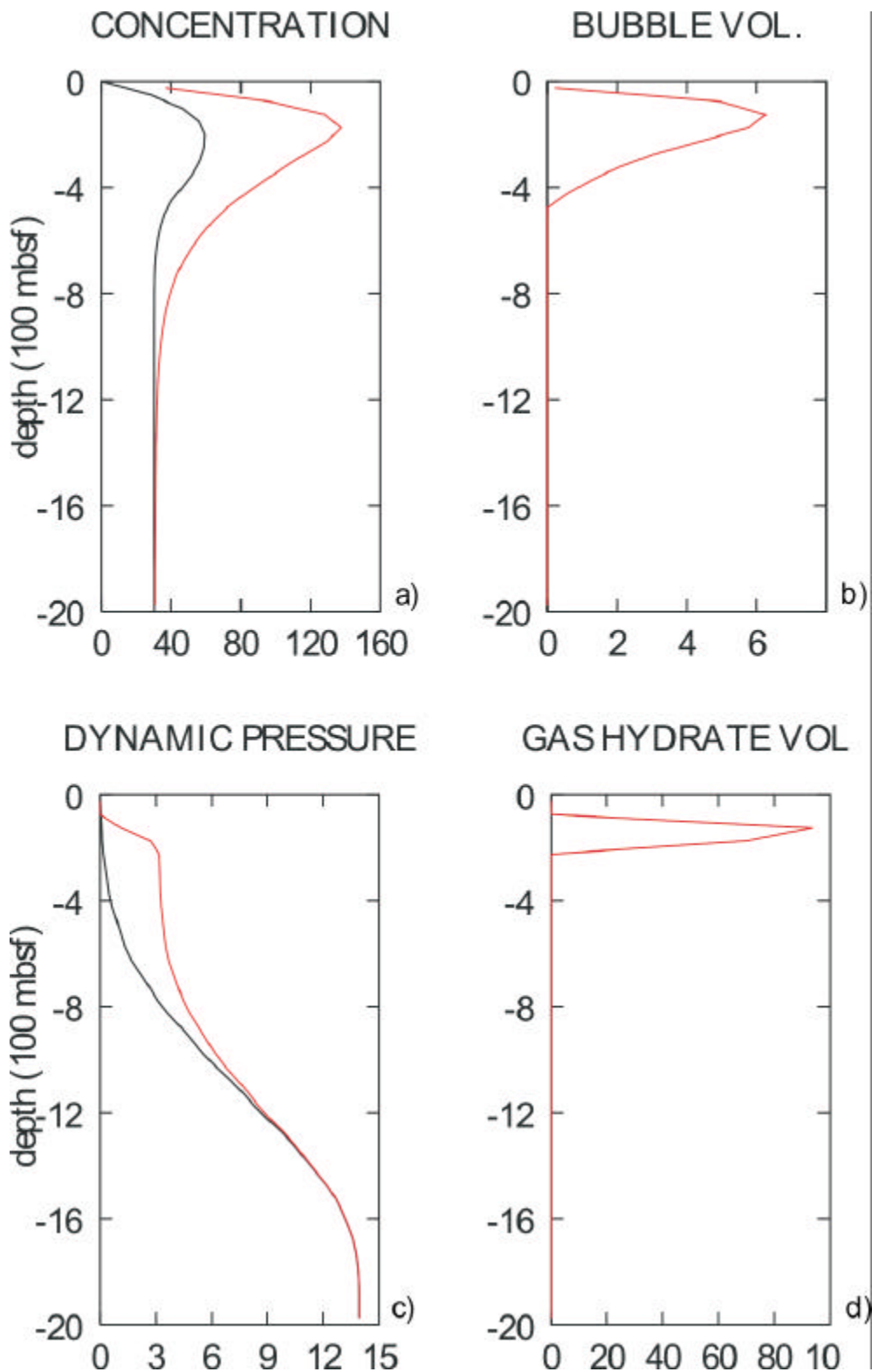
**Abb. 26** Flussdiagramm für das von uns entwickelte finite Elemente tool. Die Lösung erfolgt in vier Schritten. Für jede Gleichung wird ein eigener Löser eingesetzt. Die physikalischen Parameter, z.B. Porosität, Permeabilität, thermische Konduktivität, werden nach jedem Iterationsschritt entsprechend den neuen PTC-Bedingungen aktualisiert.

Bei der Entwicklung des Codes in FORTRAN90 wurde auf eine größtmögliche Kompatibilität hinsichtlich verschiedener Compiler und Betriebssysteme geachtet, um das Programm auf möglichst vielen Rechnerumgebungen einsetzen zu können. Zum Testen wurde ein Modellgebiet gewählt, das eine Störungszone und ihre Umgebung darstellt mit einer Geometrie, wie man sie am Cascadia-Akkretionskeil vorfindet (vgl. auch die Arbeiten im Projekt ORWELL) (Abb. 27). So konnten die Ergebnisse hinsichtlich Temperatur und Fluiddruck mit denen rein hydrothermischer Modellrechnungen einer ähnlichen/derselben

Störungszone am Cascadia-Akkretionskeil (Mann und Kukowski, 1999) verglichen und verifiziert werden.



**Abb. 27** 2D Simulation einer Störungszone und ihrer Umgebung. Mit Hilfe eines stationären Durchlaufs wurden Anfangsfelder für Druck und Temperatur gewonnen, die als Startbedingungen in die transiente Simulation eingehen: a) finite Elemente Netz, b) Methankonzentration, c) Temperaturfeld, d) Fluiddruckfeld, bevor die Gashydratbildung beginnt, e) Fluiddruckfeld, nachdem 1% des Porenraums in der entsprechenden Region (durch den Rahmen gekennzeichnet) mit Gashydrat gefüllt ist.



**Abb. 28** Methankonzentration am Start (schwarz) und nach 3 Mill. Jahren (rot) (a) und Anteil an freiem Gas nach 3 Mill. Jahren (b) für ein Gashydratsystem in geringer Wassertiefe. Dynamischer Druck am Start (schwarz) und nach drei Mill. Jahren (c) und Anteil an Gashydrat im Porenraum nach 3 Mill. Jahren (d) für ein Gashydratsystem in grosser Wassertiefe. Der sehr hohe Gashydratanteil führt zu einer signifikanten Erhöhung des Fluiddrucks.

Für anschliessende Langzeitsimulationen über einen Zeitraum von 3 Millionen Jahren wurde ein idealisiertes Modellgebiet mit Bedingungen ausgewählt, die für den Cascadia-

Akkretionskeil vor Oregon typisch sind. Der Temperaturgradient wurde entsprechend den Ergebnissen von ODP Leg 146 vorgegeben. Die initiale Methankonzentration liegt bei 30 mol/m<sup>3</sup> und ist im Bereich bis zu einigen hundert Metern unter dem Meeresboden erhöht. Die Anfangsdruckverteilung ist hydrostatisch und korreliert zu einer Wassertiefe von 250 m bzw. 750 m (Abb. 28). Für die Simulationen wird die Methankonzentration deutlich erhöht. Bei geringer Wassertiefe wird dadurch in den oberen 400 m der Sedimentschicht das Porenfluid an Methan übersättigt und es entsteht freies Gas (bubbles) (Abb. 28 a,b). Auch bei der grösseren Wassertiefe ist eine Phasenänderung zu beobachten (Abb. 28 c,d), hier entsteht Gashydrat, das nach 3 Millionen Jahren einen grossen Teil des Porenraums ausfüllt. Das von uns entwickelte tool bietet also die Möglichkeit, die zeitabhängigen Prozesse in Gashydratsystemen realistisch zu simulieren. Die hier beschriebene Ergebnisse wurden auf dem AGU Fall Meeting 2000 vorgestellt (Bohnert et al., 2000). Sie fliessen in eine in Vorbereitung befindliche Dissertation ein.

## 1.6.8 Literatur

- Barth J.A., Pierce S.D. and Smith R.L. (2000) A separating coastal upwelling jet at Cape Balco, Oregon and its connection to the California Current System Methane. *Deep Sea Res. II*, **47**, 783-810.
- Bohnert J, Kukowski N, Suess E, Mann D (1999): Finite element modelling of fluid transport and gas hydrate formation in accretionary wedges. AGU Fall Meeting, EOS 80/F482.
- Bohnert J, Kukowski N, Suess E (2000): Finite element modelling of nonlinear dynamic gas hydrate formation in accretionary wedges. AGU Fall Meeting, EOS 81/F.
- Bohrmann, G., Suess, E., Linke, P., Sahling, H., Greinert, J., Dählmann, A., von Mirbach, N., Wallmann, K., Zuleger, E., Lammers, S., Biebow, N., and Weinrebe, W. (1997) Aktive Fluidaustritte im Aleutengraben: Geologie und Biologie der Cold Vents im Golf von Alaska. *Geowissenschaften*, **15(69)**, 200-204.
- Bohrmann, G., Greinert, J., Suess, E., and Torres, M. (1998) Authigenic carbonates from the Cascadia subduction zone and their relation to gas hydrate stability. *Geology*, **26**, 647-650.
- Bohrmann, G., Linke, P., Suess, E., and Pfannkuche, O. (2000) Cruise Report SO143, TECFLUX I: *GEOMAR Report*, **93**, 1-217.
- Boudreau, B. P. (1996) A method-of-lines code for carbon and nutrient diagenesis in aquatic sediments. *Comput. Geosci.*, **22(5)**, 479-496.
- Brown, K., Goldfinger, C., Bohrmann, G., Torres, M., Tryon, M., Jung, C., Suess, E., Sahling, H., and A. M. Trehu (1999) Geological and hydrogeologic interrelationships around seep and gas vent regions on Hydrate Ridge; Seabed observation. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*, **80 (46)**, 510.
- Carson, B. Westbrook, G.K., Musgrave, R.J., and Suess, E. (1995) Proc. ODP, Sci. Res., 146 (Pt. 1) : College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Carson, B., Seke, E., Paskevich, V. and Holmes, M.L. (1994): Fluid expulsion sites on the Cascadia accretionary prism: Mapping diagenetic deposits with processed GLORIA imagery. *J. Geophys. Res.*, **99 (B6)**, 959-969.
- Goldfinger, C., Kulm, L.D., Yeats, R.S., Hummon, C., Hustile, G.J., Niemi, A.R., and Clift, R. Grace J. R. and M.E. Weber, Bubbles, Drops, and Particles, 380 pp., Academic Press, New York, 1978.
- Collier R. W. and Lilley M. (1995) Geochemistry of gases and fluids from seeps on the S.Oregon continental shelf. Geol. Assoc Canada Annual Meeting, Geol. Assoc. Canada Annual Meeting, May 1995, Victoria, Canada.
- Dickens, G.R., Paull, C.K.Wallace, P., et al. (1997) Direct measurement of in situ methane quantities in a large gas hydrate reservoir. *Nature*, **385**, 426-428.
- Elvert, M., E. Suess, M. Whiticar, and J. Greinert, (2001) Carbon isotopes of biomarkers derived from methane-oxidizing microbes at Hydrate Ridge. In *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Dynamics* (eds. Paull, C. and W. Dillon), AGU, Monograph Series, Washington, 115-129.
- Greinert, J., G. Bohrmann, and E. Suess (2001). Gas hydrate associated carbonates and methane venting: Classification, distribution and origin of authigenic lithologies. In *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Dynamics* (eds. Paull, C. and W. Dillon), AGU, Monograph Series, Washington, 99-113.
- Holbrook, W.S., Hoskins, H., Wood, W.T., Stephen, R.A., Lizarralde, D. (1996) Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from vertical seismic profiling. *Science*, **273**, 1840-1843.
- Huyer A., Barth J.A., Kosro P.M., Shearman R. K. and Smith R.L. (1998) Upper-ocean water mass characteristics of the California current, Summer 1993. *Deep-Sea Res. II*, **45**, 1411-1442.

- Hyndman, R.D., and Davis, E.E. (1992) A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom simulating reflectors by vertical fluid expulsion. *J. Geophys. Res.*, **97**(B5), 7025-7041.
- Kosro P.M., Huyer A., Ramp S.R., Smith R.L., Chavez F.P., Cowles T.J., Abbott M.R., Strub P.T., Barber R.T., Jessen P. and Small L.F. (1991) The structure of the transition zone between coastal waters and the open ocean off northern California, Winter and Spring, 1987. *J. Geophys. Res.* **96**(C8), **14**, 707-14730.
- Linke, P., Suess, E., Torres, M., Martens, V., Rugh, W.D., Ziebis, W., and Kulm, L.D. (1994) *In situ* measurement of fluid flow from cold seeps at active continental margins. *Deep-Sea Res.*, **41**, 721-739.
- Linke, P., Pfannkuche, O., Torres, M. E., Collier, R. W., Witte, U., McManus, J., Hammond, D. E., Brown, K. M., Tryon, M. D., and K. Nakamura (1999) Variability of benthic flux and discharge rates at vent sites determined by in situ instruments. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80** (46), 509-510.
- Linke P., Suess E., et al. (2001) RV SONNE Cruise Report SO148 TECFLUX-II-2000, Geomar Report, 98.
- Luff, R., Haeckel, M., and K. Wallmann (in press) Robust and fast FORTRAN and MATLAB libraries to calculate pH distributions in a non-steady-state model for aqueous systems. *Comput. Geosci.*
- Luff, R., Wallmann, K., Grandel, S., and M. Schlüter (2000) Numerical modelling of benthic processes in the deep Arabian Sea. *Deep-Sea Res II*, **47**, 3039-3072.
- Kulm, L.D., Suess, E., Moore, J.C., Carson, B., Lewis, B.T., Ritger, S.D., Kadko, D.C., Thornburg, T.M., Embley, R.W., Rugh, W.D., Massoth, G.J., Langseth, M.G., Cochrane, G.R., and Scamman, R.L. (1986) Oregon margin subduction zone: Geological framework, fluid venting, biological communities, and carbonate lithification observed by deep submersible. *Science*, **231**, 561-566.
- Kulm, L.D., and Suess, E., 1990, Relationship between carbonate deposits and fluid venting: Oregon accretionary prism. *J. Geophys. Res.*, **95**, 8899-8915.
- Lammers, S., Suess, E., and Hovland, M. (1995a) A large methane plume east of Bear Island (Barents Sea): Implications for the marine methane cycle. *Geol. Rundschau*, **84**, 59-66.
- Lammers, S., Suess, E., Mansurov, M.N., Anikiev, V.V. (1995b) Variations of atmospheric methane supply from the Sea of Ochotsk induced by the seasonal ice cover. *Global Biogeochem. Cycles*, **9**(3), 351-358.
- Long, D., Lammers, S., and Linke, P. (1998) Possible hydrate mounds within large seafloor craters in the Barents Sea. In: Gas hydrates: Relevance to world margin stability and climate change (eds. Henriot, J.-P., and Mienert, J.).
- MacKay, M. E., R. D. Jarrad, G. K. Westbrook, R. D. Hyndman, and Shipboard Scientific Party of Ocean Drilling Leg 146 (1994) Origin of bottom-simulating reflector: Geophysical evidence from the Cascadia accretionary prism. *Geology*, **22**, 459-462.
- Mann, D., and Kukowski, N. (1999) Numerical modelling of focussed fluid transport in the Cascadia accretionary prism. *J. Geodynamics*, **27**, 359-372.
- McCave, I.N. (1984) Size spectra and aggregation of suspended particles in the deep ocean. *Deep-Sea Res.*, **31**, 329-352.
- Moore, J.C., Mascle, A., et al. (1990) *Proc. Ocean Drill. Prog. Sci. Res. (College Station Ocean drilling program, TX)*, **11**, 448pp.
- Moore, J.C., and Vrolijk, P. (1992) Fluids in accretionary prisms. *Rev. Geophys.*, **30**, 113-135.
- Muschenheim, D.K., Kepkay, P.E., and Kranck, K. (1989) Microbial growth in turbulent suspension and its relation to marine aggregate formation. *Netherlands J. Sea Res.*, **23**, 283-292.
- McNeill, L.C. (1996): Oblique strike-slip faulting of the Cascadia submarine forearc: The Daisy Bank Fault Zone off Central Oregon. In Bebout, G.E. et al. (eds.): Subduction top to bottom. Geophysical Monograph 96. American Geophysical Union, 65-74.
- Pecher, I.A., Minshull, T.A., Singh, S.C., von Huene, R. (1996) Velocity structure of a bottom simulating reflector offshore Peru: Results from full waveform inversion. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **139**, 459-469.
- Pierce S.D., Smith R.L., Kosro P.M., Barth J.A. and Wilson C.D. (2000) Continuity of the poleward undercurrent along the eastern boundary of the mid-latitude north Pacific. *Deep-Sea Research II*, **47**(5-6), 811-829.
- Pfannkuche, O., and Thiel, H. (1987) Meiobenthic stocks and benthic activity on the NE-Svalbard Shelf and in the Nansen Basin. *Polar Biol.*, **7**, 253-266.
- Pfannkuche, O. (1992) Organic carbon flux through the benthic community in the temperate abyssal Northeast Atlantic. In: *Deep-Sea food chains and the global carbon cycle* (eds. J. T. Rowe and V. Pariente), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 183-198.
- Pfannkuche, O. (1993a) Benthic response to the sedimentation of particulate organic matter at BIOTRANS station, 47°N, 20°W. *Deep-Sea Res. II*, **40**, 135-149.
- Pfannkuche, O. (1993b) Benthic standing stock and metabolic activity in the bathyal Red Sea from 17°N to 27°N. *Mar. Ecol.*, **14**, 67-79.
- Pfannkuche, O., and Soltwedel, T. (1998) Small benthic size classes along the western European continental margin: Spatial and temporal variability in activity and biomass. *Progr. Oceanogr.*, **38**, 189-207.
- Rehder, G., and E. Suess (submitted) Methane and pCO<sub>2</sub> in the Kuroshio and the South China Sea: The extreme summer situation, *Marine Chemistry*.



- Rehder G., Keir R., Rhein M. and Suess E (1999) Methane in the northern Atlantic controlled by microbial oxidation and atmospheric history. *Geophys. Res. Lett.*, **26(5)**, 587-590.
- Rehder G., Collier R.W., Heeschen K.U., Kosro M. Barth, J.A. and Suess, E. (2002) Enhanced marine CH<sub>4</sub> emission to the atmosphere off Oregon caused by coastal upwelling. *in press*
- Rempel, A. and Buffett, B.A. (1997) Formation and accumulation of gas hydrate in porous media. *J. Geophys. Res.*, **102**, 10151-10164.
- Rickert, D., Suess, E., Sahling, H., Heeschen, K., and A. Heuser (1999) Gas venting environment: Relationship between vent biota and pore water chemistry; evidence for nitrate-storing sulfur bacteria and salt-exclusion through gas hydrate formation, *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*, **80 (46)**, 529.
- Sahling, H. (2001) The influence of hydrogen sulfide on the benthic community structure at cold seeps and interactions between the cold-seep and deep-sea ecosystems. Doktorarbeit, Universität Kiel.
- Screaton, E.J., Wuthrich, D.R., and Dreiss, S.J. (1990) Permeabilities, fluid pressures and flow rates in the Barbados Ridge Complex. *J. Geophys. Res.*, **95**, 8997-9007.
- Shipboard Scientific Party (1994a) Leg 146 Introduction: Cascadia Margin. *Proc. Oc. Drill. Prog., Initial Rep.* 146, 5-14.
- Suess, E., Carson, B., Ritger, S.D., Moore, J.C., Kulm, L.D., and Cochrane, G.R. (1985) Biological communities at vent sites along the subduction zone off Oregon. In: *The hydrothermal vents of the Eastern Pacific: An overview* (eds. Jones, M.L.). *Bull. Biol. Soc. Washington*, **6**, 475-484.
- Suess, E., and Bohrmann, G. (1997) FS SONNE, Fahrbericht SO110 SO-RO. *GEOMAR Report*, **59**, 181.
- Suess, E., Bohrmann, G., Von Huene, R., Linke, P., Wallmann, K., Lammers, S., Sahling, H., Winckler, G., Lutz, A., and Orange, D. (1998) Fluid venting in the Alaeutian subduction zone. *J. Geophys. Res.*, **103(B2)**, 2597-2614.
- Suess, E., Torres, M.E., Bohrmann, G., Collier, R.W, Greinert, J., Linke, P., Rehder, G., Trehu, A., Wallmann, K., Winckler, G., Zuleger, E. (1999) Gas hydrate destabilization: enhanced dewatering, benthic material turnover and large methane plumes at the Cascadia convergent margin. *Earth and Plan. Sci. Let.*, **170**, 1-15.
- Suess, E., Torres, M.E., Bohrmann, G., Collier, R.W., Rickert, D., Goldfinger, C., Linke, P., Heuser, A., Sahling, H., Heeschen, K., Jung, C., Nakamura, K., Greinert, J., Pfannkuche, O., Trehu, A., Klinkhammer, G., Whiticar, M.J., Eisenhauer, A., Teichert, B., Elvert, M. (2001) Sea floor methane hydrates at Hydrate Ridge, Cascadia Margin. In *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Dynamics* (eds. Paull, C. and W. Dillon), AGU, Monograph Series, Washington, 87-98.
- Tengberg, A., et al. (1995) Benthic chamber and profiling landers in oceanography – A review of design, technical solutions and functioning. *Progr. Oceanogr.*, **35**, 253-294.
- Thomsen, L. (1998) Processes in the benthic boundary layer at continental margins and their implication for the benthic carbon cycle, *J. Sea Res.*, **41**, 73-86.
- Torres M., Bohrmann G., et al. (1999) Atlantis Geochemical observations on Hydrate Ridge, Cascadia margin during R/V-ATLANTIS-cruise AT 3-35b, July 1999: Oregon State University, COAS-Data Report 174.
- Tréhu, A.M., Lin, G., Maxwell, E., and Goldfinger, C. (1995) A seismic reflection profile across the Cascadia subduction zone offshore central Oregon: new constraints on the deep crustal structure and/or the distribution of methane in the accretionary prism. *J. Geophys. Res.*, **100**, 15101-15116.
- Tréhu, A.M., Torres, M.E., Moore, G. F., Suess, E., and Bohrmann, G., 1999, Temporal and spatial evolution of a gas hydrate-bearing accretionary ridge on the Oregon continental margin. *Geology*, **27**, 939-942.
- Tryon, M.D., Brown, K.M., Torres, M.E., Tréhu, A.M, McManus, J. and Collier, R.W. (1999) Measurements of transient and downward fluid flow near episodic methane gas vents, Hydrate Ridge, Cascadia. *Geology*, **27(12)**, 1075-1078.
- Xu, W., Ruppel, C. (1999) Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrates in porous marine sediments. *J. Geophys. Res.*, **104**, 5081 - 5095.
- Wallmann, K., Linke, P., Suess, E., Bohrmann, G., Sahling, H., Schlüter, M., Dählmann, A., Lammers, S., Greinert, J., and v. 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)**, 5209-5219.
- Wallmann K., Aghib F. S., Castradori D., M. B. Cita, Suess E., Greinert J., and Rickert, D. (in press) Sedimentation and formation of secondary minerals in the hypersaline Discovery Basin, eastern Mediterranean. *Marine Geol.*
- Westbrook, G.K., Carson, B., Musgrave, R.J., et al. (1994): Proc. ODP, Init. Repts.; 146 (Pt.1): College Station, TX (Ocean Drilling Program), 55-125.
- Winckler, G., Suess, E., Wallmann, K., De lange, G.J., Westbrook, G.K., and Bayer, R. (1999) Excess helium and argon of radiogenic origin in Mediterranean brine basins. *Earth Planet. Sci. Let.*, **151**, 225-231.
- Zatsepina, O. Y., and Buffett, B.A. (1997) Phase equilibrium of gas hydrate: implications for the formation of hydrate in the deep sea-floor. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1567-1570.
- Zatsepina, O. Y., and Buffet, B. A. (1998) Thermodynamic conditions for the stability of gas hydrate in the seafloor. *J. Geophys. Res.*, **103**, 24127-24139.



## 1.7 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit und Erfahrungen

Neben der möglichen Bedeutung als zukünftiger Rohstoffträger und in Kontinentalrandnähe als Hangstabilisator sind Gashydrate eine wesentliche Komponente bei der Klimadiskussion, da Methan als Treibhausgas beim Abbau von Gashydraten in flachen Meeresgebieten in die Atmosphäre gelangen kann. Im Akkretionskeil der Cascadia Subduktionszone sind Auf- und Abbau von Gashydraten von besonderer Bedeutung für die Fluidzirkulation. BSRs sind weit verbreitet und deuten auf ein sehr kompliziertes Verteilungsmuster von Gashydraten auf dem Hydratrücken. Die Untersuchungen während SO143 und eine 3D-seismische Untersuchung von US-amerikanischer Seite (Texas/Oregon) haben dazu beigetragen, Bohrziele auf dem südlichen Hydratrücken besser zu definieren. Die ODP-Bohrkampagne Leg 204 ist für Juli/August 2002 geplant.

## 1.8 Fortschritt bei anderen Stellen auf diesem Gebiet (Auszug)

### 1999

- Buffett, B.A., and O.Y. Zatsepina (1999) Metastability of gas hydrate. *Geophys. Res. Lett.*, **26(19)**, 2981-2984.
- Clennell, M.B., Hovland, M., Booth, J.S., Henry, P., and Winters, W.J. (1999) Formation of natural gas hydrates in marine sediments: 1. Conceptual model of gas hydrate growth conditioned by host sediment properties. *J. Geophys. Res.*, **104**, 22985-23003.
- Egeberg, P.K., and Dickens, G.R. (1999) Thermodynamic and pore water halogen constraints on gas hydrate distribution at ODP site 997 (Blake Ridge). *Chem. Geol.*, **153**, 53-79.
- Egorov, A.V., Crane, K., Vogt, P.R., and Rozhkov, A.N. (1999) Gas hydrates that outcrop on the sea floor: stability models. *Geo-Mar. Lett.*, **19**, 68-75.
- Henry, P., Thomas, M., and Clennell, M.B. (1999) Formation of natural gas hydrates in marine sediments: 2. Thermodynamic calculations of stability conditions in porous sediments. *J. Geophys. Res.*, **104**, 22985-23003.
- Norris, R.D., and Röhl, U. (1999) Carbon cycling and chronology of climate warming during Palaeocene/Eocene transition. *Nature*, **401**, 775-778.
- Pimenov, N., Savvichev, A., Rusanov, I., Iein, A., Egorov, A., Gebruk, A., Moskalev, L., and Vogt, P. (1999) Microbial processes of carbon cycle as the base of food chain of Håkon Mosby Mud Volcano benthic community. *Geo-Mar. Lett.*, **19**, 89-96.
- Xu, W., Ruppel, C. (1999) Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrates in porous marine sediments. *J. Geophys. Res.*, **104**, 5081 - 5095.
- Yuan, T., Spence, G.D., Hyndman, R.D., Minshull, T.A., Singh, S.C. (1999) Seismic velocity studies of a gas hydrate bottom-simulating reflector on the northern Cascadia continental margin: Amplitude modeling and full waveform inversion. *J. Geophys. Res.*, **104**, 1179-1191.

### 2000

- Barth J.A., Pierce S.D. and Smith R.L. (2000) A separating coastal upwelling jet at Cape Blanco, Oregon and its connection to the California Current System Methane. *Deep Sea Res. II*, **47**, 783-810.
- Buffett, B.A., and O.Y. Zatsepina (2000) Formation of gas hydrate from dissolved gas in natural porous media. *Mar. Geol.*, **164**, 69-77.
- Buffett, B.A. (2000) Clathrate hydrates. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **28**, 477-507.
- Hesse, R., Shaun, K.F., Egeberg, P.K., and Matsumoto, R. (2000) Stable isotope studies (Cl, O, and H) of interstitial waters from site 997, Blake Ridge gas hydrate field, West Atlantic. *Proc. Ocean Dril. Prog.*, **164**, 129-137.
- Lorenson, T.D., and Collett, T.S. (2000) Gas content and composition of gas hydrate from sediments of the southeastern North American Continental Margin. *Proc. Ocean Dril. Prog.*, **164**, 37-46.
- Matsumoto, R., Uchida, T., Waseda, A., Uchida, T., Takeya, S., Hirano, T., Yamada, T., Yamada, K., Maeda, Y., and Okui, T. (2000) Occurrence, structure, and composition of natural gas hydrate recovered from the Blake Ridge, Northwest Atlantic. *Proc. Ocean Dril. Prog.*, **164**, 13-28.
- Matsumoto, R., and Borowski, W.S. (2000) Gas hydrate estimates from newly determined oxygen isotopic fractionation ( $\delta_{\text{GH-IW}}$ ) and  $^{18}\text{O}$  anomalies of the interstitial waters: LEG 164, Blake Ridge. *Proc. Ocean Dril. Prog.*, **164**, 59-66.

Pierce S.D., Smith R.L., Kosro P.M., Barth J.A. and Wilson C.D. (2000) Continuity of the poleward undercurrent along the eastern boundary of the mid-latitude north Pacific. *Deep-Sea Research II*, **47(5-6)**, 811-829.

## 2001

Dickens, G.R. (2001) Sulfate profiles and barium fronts in sediment of the Blake Ridge: Present and past methane fluxes through a large gas hydrate reservoir. *Geochim Cosmochim. Acta*, **65**, 529-543.

Dickens, G.R. (2001) On the fate of past gas: What happens to methane released from a bacterially mediated gas hydrate capacitor? *Geochem. Geophys. Geosystems*, **2**.

Hinrichs, K.U. (2001) A molecular recorder of methane hydrate destabilization. *Geochem. Geophys. Geosystems*, **2**.

Orphan, V.J., House, C.H., Hinrichs, K.U., McKeegan, K.D., and DeLong, E.F. (2001) Methane-consuming Archaea revealed by directly coupled isotopic and phylogenetic analysis. *Science*, **293**, 484-487.

Reimers, C.E., Tender, L.M., Fertig, S., Wang, W. (2001) Harvesting energy from the marine sediment-water interface. *Environ. Sci. Technol.*, **35**, 192-195.

Ussler III, W., and Paull, C.K. (2001) Ion exclusion associated with marine gas hydrate deposits. In *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Dynamics* (eds. Paull, C. and W. Dillon), AGU, Monograph Series, Washington, 41-51.

## 1.9 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse (s. Anlage)

### 1.9.1 Themenbezogene Publikationen

#### 1999

Gutt, C., Asmussen, B., Press, W., Merkl, C., Casalta, H., Greinert, J., Bohrmann, G., Tse, J.S. and Hüller A (1999). Quantum rotations in natural methane- clathrates from the Pacific sea-floor. *Europhysics Letters*, **48(3)**, 269-275.

Suess, E., Torres, M., Bohrmann, G., Collier, R., Greinert, J., Linke, P., Rehder, G., Tréhu, A., Wallmann, K., Winckler, G., and E. Zuleger (1999). Gas hydrates destabilization: Enhanced dewatering, benthic material turnover and large methane plumes at the Cascadia margin: *Earth and Planetary Science Letters*, **170**, 1-15.

Tréhu, A., Torres, M., Moore, G., Suess, E., and Bohrmann, G. (1999) Temporal and spatial evolution of a gas hydrate-bearing accretionary ridge on the Oregon continental margin: *Geology*, **27(10)**, 939-942.

#### 2000

Boetius, A., Ravensschlag, K., Schubert, C.J., Rickert, D., Widdel, F., Gieseke, A., Amann, R., Jørgensen, B.B., Witte, U., Pfannkuche, O. (2000) A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane. *Nature*, **407**, 623-626.

#### 2001

Elvert, M., E. Suess, M. Whiticar, and J. Greinert, (2001) Carbon isotopes of biomarkers derived from methane-oxidizing microbes at Hydrate Ridge. In *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Dynamics* (eds. Paull, C. and W. Dillon), AGU, Monograph Series, Washington, 115-129.

Grant, N.J., Whiticar, M.J., and E. Suess (submitted) Stable carbon isotopic evidence for methane oxidation in plumes above Hydrate Ridge, Cascadia Oregon Margin. *Global Biogeochem. Cycles*.

Greinert, J., G. Bohrmann, and E. Suess (2001). Gas hydrate associated carbonates and methane venting: Classification, distribution and origin of

- authigenic lithologies. In *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Dynamics* (eds. Paull, C. and W. Dillon), AGU, Monograph Series, Washington, 99-113.
- Rehder G., Collier R.W., Heeschen K.U., Kosro M. Barth, J.A. and Suess, E. (in press) Enhanced marine CH<sub>4</sub> emission to the atmosphere off Oregon caused by coastal upwelling. *Global Biogeochemical Cycles*.
- Sahling H, Rickert D, Lee R W, Linke P, Suess E (accepted) Macrofaunal community structure and sulfide flux at gas hydrate deposits from the Cascadia convergent margin, NE Pacific. *Marine Ecology Progress Series*.
- Sommer, S., Pfannkuche, O., Rickert, D., Kähler, A. (accepted) Surficial marine gas hydrates and their ecological implications for the small-sized benthic biota at the Hydrate Ridge. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*
- Suess, E., Torres, M.E., Bohrmann, G., Collier, R.W., Rickert, D., Goldfinger, C., Linke, P., Heuser, A., Sahling, H., Heeschen, K., Jung, C., Nakamura, K., Greinert, J., Pfannkuche, O., Tréhu, A., Klinkhammer, G., Whiticar, M.J., Eisenhauer, A., Teichert, B., Elvert, M. (2001) Sea floor methane hydrates at Hydrate Ridge, Cascadia Margin. In *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Dynamics* (eds. Paull, C. and W. Dillon), AGU, Monograph Series, Washington, 87-98.
- Torres, M.E., McManus, J., Tryon, M.D., Brown, K.M., Hammond, D., Colbert, S., Suess, E., and K. Heeschen (submitted) Fluid and chemical fluxes in and out of sediments hosting methane hydrate deposits on Hydrate Ridge, OR: I. Hydrological provinces. *Earth P. Sci. Lett.*

### 1.9.2 Themenbezogene Berichte

- Bohrmann G., Linke P., Suess E., and Pfannkuche O. (2000) FS SONNE Cruise Report SO143. GEOMAR, Kiel.
- Bohrmann, G., Greinert, J., Suess, E. (in press) Methanhydrate. Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik. Ecomend Verlag.
- Gutt, C., Press, W., Bohrmann, G., Greinert, J., and A. Hüller (2001) Brennendes Eis: Methanhydrat - Energiequelle der Zukunft oder Gefahr fürs Klima: Physikalische Blätter, v. 59, p. 1-6.
- Linke P., and E. Suess (2001) FS SONNE Cruise Report SO148, *GEOMAR Report 98*, Kiel.
- Paull, C., Bohrmann, G., Brewer, P., Cochonat, P., Collett, T., Edwards, N., Hovland, M., Johnson, A., Kvenvolden, K., Matsumoto, R., Sloan, D., Tréhu, A., and G. Westbrook (2000) Excerpts from the Final Report of JOIDES Gas Hydrate Program Planning Group: 26, v. 2, p. 33-39.
- Suess, E. (submitted) The evolution of an idea: From avoiding gas hydrates to actively drilling for them. *Joides Journal (Special Issue devoted to the legacy of the Ocean Drilling Program)*.
- Suess, E., Bohrmann, G., Greinert, J., Lausch, E. (1999) Flammable ice. *Nikkei Science* 3: 74-89.
- Suess, E., Bohrmann, G., Greinert, J., Lausch, E. (1999) Flammable Ice. *Majallat Aloloom (Arabic Edition)* March 2000: 34-41.
- Suess, E., Bohrmann, G., Greinert, J., Lausch, E. (1999) Hielo ardiente. *Muy Interesante* 229: 207-212.
- Suess, E., Bohrmann, G., Greinert, J., Lausch, E. (1999) Hielo inflamable. *Investigación y Ciencia* 281: 30-37.
- Suess, E., Bohrmann, G., Greinert, J., Lausch, E. (1999) Le méthane dans les océans. *Pour la Science*, 264: 80-89.
- Suess, E., Bohrmann, G., Greinert, J., Lausch, E. (1999) Plonacy Lód. *Swiat Nauki* 2 (102): 38-47.

Torres, M., Bohrmann, G., Brown, K., de Angelis, M., Hammond, D., Klinkhammer, G., McManus, J., Suess, E., and A. Trehu (1999). Geochemical observations on Hydrate Ridge, Cascadia Margin during R/V-ATLANTIS-cruise AT3-35b, July 1999: Oregon State University, COAS-Data Report 174.

### 1.9.3 Themenbezogene Präsentationen und Abstracts

#### 1998/1999

##### ***AGU Fall Meeting, San Francisco (06.-10. Dezember 1998)***

Torres, M. E., Brown, K. M., Colbert, S., Collier, R. W., de Angelis, M., Hammond, D., Heeschen, K., Hubbard, D., McManus, J., Moyer, C., Rehder, G., Trehu, A., Tryon, M., Whaling, P. (1998). Active gas discharge resulting from decomposition of gas hydrates on Hydrate Ridge, Cascadia margin. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1998 Fall Meeting*. **79 (45)**, 461. (Poster)

##### ***AAPG Pacific Section Monterey, Kalifornien ( 28. April – 1. May 1999)***

Goldfinger, C., Torres, M., and A. Trehu (1999) Possible strike-slip fault source for hydrate ridge methane vents, Cascadia Margin. In: Fluid seeps at transform and convergent margins: A symposium. AAPG Pacific Section Monterey, CA, April 28 to May 1, 1999.

Greinert, J., Jung, C., Bohrmann, G., and E. Suess E (1999). Cold vent-induced carbonate types and their relation to isolated chemoherm complexes and dewatering patterns at the Cascadia Margin. In: Fluid seeps at transform and convergent margins: A symposium. AAPG Pacific Section Monterey, CA, April 28 to May 1, 1999.

Torres, M., Collier, R., deAngelis, M., McManus, J., Rehder, G., and E. Suess (1999). Isotopic evidence for methane oxidation of hydrate methane in water samples overlying Hydrate Ridge, Cascadia. In: Fluid seeps at transform and convergent margins: A symposium. AAPG Pacific Section Monterey, CA, April 28 to May 1, 1999.

Tryon, M. and K. Brown (1999). Aqueous flow measurements on Hydrate Ridge, Cascadia. In: Fluid seeps at transform and convergent margins: A symposium. AAPG Pacific Section Monterey, CA, April 28 to May 1, 1999.

##### ***Sediment '99, Bremen (26.-28. Mai)***

Bohrmann, G.: Vortrag: Die Gashydratkarbonate des Cascadia Akkretionskomplexes: Ein Signal für Gashydratbildung und –rückbildung, Terra Nostra 99/4, 30.

##### ***AGU Spring Meeting, Boston (31. Mai-4. Juni)***

Tréhu, A., Torres, M., Goldfinger, C., Moore, C., Bohrmann, G., Flueh, E., Gerdome, M., and Suess, E. (1999). Dissociation of gas hydrates in response to slumping and folding on the Oregon continental margin. (Vortrag)

##### ***AGU Fall Meeting, San Francisco (13.-17. Dezember 1999)***

Bohnert, J., Kukowski, N., Suess, E., and D. Mann (1999) Finite element modelling of fluid transport and gas hydrate formation in accretionary wedges. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 482. (Poster)

Bohrmann, G., Greinert, J., Jung, C., Naehr, T., and B. Teichert (1999) Gas Hydrate Carbonates a Potential Indicator for Past Gas Hydrate Deposits. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 503. (Poster)

Brown, K., Goldfinger, C., Bohrmann, G., Torres, M., Tryon, M., Jung, C., Suess, E., Sahling, H., and A. M. Trehu (1999) Geological and hydrogeologic interrelationships around seep

- and gas vent regions on Hydrate Ridge; Seabed observation. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 510. (Poster)
- Bussell, J., Klinkhammer, G., Collier, R. W., Linke, P., Appel, F., Heeschen, K., Suess, E., de Angelis, M. A., Masson, M., and S. Marx. (1999) Application of the METS methane sensor to the in situ detection of methane over a range of time scales and environments. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 510. (Poster)
- Colbert, S., Hammond, D. E., Heeschen, K., Torres, M. (1999) Applications of Radon to study fluid dynamics in the Cascadia margin. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 511. (Poster)
- Collier, R. W., Klinkhammer, G., Torres, M., Trehu, A., Heeschen, K., Rehder, G., Suess, E., de Angelis, M., A., Carnocki, H., Whiticar, M., Barrazoul, L., Eby, P., Eek, Magnus, Grant, N., Schäfer, H., and K. Nakamura (1999) Methane distribution and fluxes in the water column above an emerging methane hydrate field on the Cascadia Accretionary Prism. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 528. (Talk)
- De Angelis, M. A., Collier, R. W., Klinkhammer, G., Torres, M. E., and K. Heeschen (1999) Oxidation of methane derived from gas hydrates of the Cascadia accretionary prism. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 528. (Talk)
- Elvert, M., Whiticar, M., and E. Suess (1999) Reverse Methanogenesis Associated with Marine Gas Hydrates: Extreme 12-C Enrichments of Isoprenoid Biomarkers. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 100. (Poster)
- Hammond, D. E., McManus, J., Colbert, D., Colbert, S., de Angelis, M. A., Heeschen, K., Kohlbray, S., Meredith, C., Rickert, D., and M. E. Torres (1999) Diagenesis and benthic exchange in the vicinity of fluid vents in the Cascadia margin, *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 529.
- Heeschen, K., Rickert, D., Sahling, H., and C. Goldfinger (1999) Highly variable methane distribution at Hydrate Ridge Sediments, *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 511. (Poster)
- Hutnak, M., Torres, M., Johnson, P., and R. W. Collier (1999) Periodic Negative Heat Flow on Southern Hydrate Ridge: Implications for the Destabilization of Gas Hydrate. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 482. (Poster)
- Johnson, J., Goldfinger, C., and G. Bohrmann (1999) Detailed Structural Characterization of Hydrate Ridge, Oregon Margin, and its Influence on Fluid Flow in Gas Hydrate Systems. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 481. (Poster)
- Jung, C., Bohrmann, G., Sahling, H., Teichert, B., and M. Whiticar (1999) Seafloor Evidence for Fluid Venting: New Results From TV-Sled Surveys at Cascadia Margin. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 503. (Poster)
- Linke, P., Pfannkuche, O., Torres, M. E., Collier, R. W., Witte, U., McManus, J., Hammond, D. E., Brown, K. M., Tryon, M. D., and K. Nakamura (1999) Variability of benthic flux and discharge rates at vent sites determined by in situ instruments. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 509-510. (Poster)
- Rehder, G., Heeschen, K., Collier, R. W. (1999) Enhanced marine CH<sub>4</sub> emissions to the atmosphere in the TECFLUX area caused by upwelling. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 511. (Poster)
- Rickert, D., Suess, E., Sahling, H., Heeschen, K., and A. Heuser (1999) Gas venting environment: Relationship between vent biota and pore water chemistry; evidence for nitrate-storing sulfur bacteria and salt-exclusion through gas hydrate formation. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 529. (Talk)
- Sahling, H., Rickert, D., and E. Suess (1999) Faunal community structure along a sulphide gradient: Interrelationship between porewater chemistry and organisms associated with gashydrates, Oregon subduction zone. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 511. (Poster)

- Suess, E., Bohrmann, E., Rickert, D., Eisenhauer, A., and M. Whiticar (1999) Occurrence, fabric, and composition of hydrates in near-surface sediments of the Cascadia margin. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 511. (Poster)
- Torres, M., Mix, A., Haley, B. (1999) A trace-metal strategy for determining diagenetic overprinting on the isotopic composition of foraminifera associated with methane seeps. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 511. (Poster)
- Torres, M. E., Linke, P., Brown, K. M., and K. Heeschen (1999) Gas hydrate dynamics at Hydrate Ridge, Cascadia. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 527. (Talk)
- Tryon, M., and K. Brown (1999) Transient fluid flow patterns on Hydrate Ridge, Cascadia: A response to methane gas discharge ? *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 528. (Talk)
- Whiticar, M., Grant, N. J., Suess, E. (1999) Characterization of methane formation. Oxidation and fluxes associated with cold seeps and hydrates at the Oregon margin. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 510-511. (Poster)
- Yongdong, Z., Goldfinger, C., Johnson, J. E., Torres, M., Trehu, A. M., Clague, D., Paull, C., and G. Bohrmann (1999) Distribution and morphology of venting-related carbonates near Hydrate Ridge, Oregon margin, based on Sidescan Sonar and Multibeam Imagery. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 510. (Poster)
- Zhou, Y., Goldfinger, C., Johnson, J., Torres, M., Trehu, A., Clague, D., Paull, C., and G. Bohrmann (1999) Distribution and Morphology of Venting-Related Carbonates near Hydrate Ridge, Oregon Margin, Based on Sidescan Sonar and Multibeam Imagery. *EOS Transactions, Am. Geophys. Union, 1999 Fall Meeting*. **80 (46)**, 510. (Poster)

## 2000

### **Kiel: Meeresforschungstechnik 2000 plus, 13. Januar**

Linke P, Pfannkuche O: Vortrag: Videogesteuerte Positionierung und Einsatz von Landersystemen in der Tiefsee.

### **Jena: ODP/DSDP-Schwerpunktkolloquium der DFG, 23. - 25. März**

Bohrmann G, Suess E, Rickert D, Eisenhauer A, Whiticar M: Vortrag: Vorkommen, Gefüge und Zusammensetzung von oberflächennahen Gashydraten in Sedimenten vom Hydrat Rücken (Cascadia Akkretionsrücken).

Jung C, Bohrmann G, Sahling H, Teichert B, Whiticar M: Poster: Aktive Fluidaustritte im Bereich der geplanten ODP-Bohrungen Leg 198: Neue Ergebnisse einer submarinen Kartierung (Hydrat-Rücken, Cascadia Akkretionskomplex).

### **Salzau: Deep-Sea Workshop, 28. - 31. März**

Pfannkuche O: Vortrag: Biogeochemical fluxes in the deep sea: Status and outlook.

### **Moskau: KOMEX Workshop, 17. - 20. April**

Suess E: Fluid venting: Vortrag: Global phenomena along continental margins.

### **Galway (Irland): 9th Deep-Sea Biology Symposium, Juni 2000**

Sahling H, Rickert D, Suess E, Boetius A, Witte U, Pfannkuche O, Linke P: Community structure and biogeochemical interactions associated with gas hydrates, Cascadia Subduction Zone, NE-Pacific., Galway, Irland.



***Kopenhagen: ASLO-Meeting, Juni 2000***

Witte U, Boetius A, Linke P, Pfannkuche O, Rickert D, Sahling H.: Vortrag: Sediment biogeochemistry and solute fluxes through the sediment-water interface of gas-hydrate bearing sediments at the Cascadia Subduction Zone.

Boetius A, Ravenschlag K, Rickert D, Witte U.: Vortrag: Bacterial activity and diversity in gas hydrate bearing sediments from the Cascadia Subduction Zone.

***Oxford: Goldschmidt 2000, September 2000***

Böttcher ME, Boetius A, Rickert D: Poster: Sulfur isotope biogeochemistry related to intense microbial sulfate reduction and anaerobic methane oxidation in marine deep-sea sediments (Hydrate Ridge).

***San Francisco: American Geophysical Union (AGU), Fall Meeting, 15-19. Dezember***

Bohrmann G, Suess E, Goldfinger C, Jung C, Teichert B, Greinert J, Torres M, Trehu A, Johnson J, Heath R : Poster: Calcareous chemoherm buildups and their relation to gas venting at Cascadia Convergent Margin.

Bohnert J, Kukowski N, **Suess E**: Poster: Finite element modelling of nonlinear dynamic gas hydrate formation in accretionary wedges.

Suess E, Bohrmann G, Rickert D, Elvert M, Klinkhammer G, Whiticar M: Vortrag: Carbonate mounds derived from fluid-venting and gas-hydrate dynamics: Diagnostic features observed at hydrate ridge, Cascadia Margin.

Johnson J, Goldfinger C, Clague D, Paull C, Torres M, Trehu A, Bohrmann G: Poster: Surface deformation and distribution of venting-related carbonates along Hydrate ridge, Oregon Accretionary.

**2001*****Statusseminar "Meeresforschung mit FS Sonne", Hannover (14.-16. März 2001)***

Boetius, A., Ravenschlag, K., Schubert, C.J., Rickert, D., Widdel, F., Gieseke, A., Amann, A., Jörgensen, B.B., Witte, U., Pfannkuche, O. (2001) A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane. (Poster).

Bohrmann, G. , Suess, E. , Linke, P. , Pfannkuche, O. , Rickert, D. , Jung, C., Sahling, H. , Sommer, S. , Teichert, B. , Heuser, A. , Rehder, G. , Weinrebe, W., Kopf, A., Torres, M., Collier, R., Heeschen, K. , Goldfinger, C. , Klinkhammer, G., Tréhu, A. ; Nakamura, K (2001) Der Hydratrücken von Oregon: ein akkretionärer Rücken der Cascadia Subduktionszone in dem Gashydrate über vieles bestimmen. (Vortrag)

Elvert, M., Greinert, J., Suess, E., Whiticar, M.J. (2001) Carbon isotopes of lipid biomarkers in sediments and carbonate crusts at Hydrate Ridge, Cascadia: Implications for methane oxidation. (Poster).

Heeschen, K., Collier, R.W., Rehder, G., Klinkhammer, G., Suess, E. (2001) Methanverteilungen und -flüsse in der wassersäule im Bereich von Cold Vent Lokationen des Hydrat-Rückens, Cascadia Margin. (Poster).

Jung, C., Bohrmann, G (2001) Authigene Karbonate an den Cold Vents des Hydratrückens (Cascadia Akkretionskomplex): Fluidaustritte und ihre geologischen Zusammenhänge. (Poster)

Linke, P., Pfannkuche, O., Witte, U., and Nakamura, K. (2001) Variabilität benthischer Stoffflüsse und Freisetzungsraten an Vent Sites des Hydratrückens – Ergebnisse der SONNE-Reisen SO143 und SO148. (Vortrag)

Rickert, D., Suess, E., Jung, C., Karpen, V., Heuser, A., Bohrmann, B. Teichert, B. , Bock, B (2001): Gashydrate in Sedimenten am südlichen Hydrate Ridge: Geochemische und isotopische Analysen der Gashydrate und Porenwässer. (Vortrag)

- Sahling, H., Rickert, D., Linke, P., Suess, E., Lee, R. (2001): Community structure and sulphide flux with gas hydrates, Cascadia Subduction Zone, NE-Pacific. (Poster).
- Sommer, S., Pfannkuche, O. (2001): The small-sized benthic biota in surficial marine gas hydrate sediments: Results from TECFLUX Expedition SONNE 143-2. (Poster).
- Teichert B., G. Bohrmann, A. Eisenhauer (2001): Authigene Karbonate an den Cold Vents des Hydrat Rückens (Cascadia Akkretions-komplex): Charakterisierung geochemischer Environments. (Poster).
- Witte, U., Pfannkuche, O., Cremer, A., Sahling, H., Rickert, D., Linke, P., Boetius, A. (2001) Biogeochemistry of gas-hydrate bearing sediments at the Cascadia subduction zone off Oregon. (Poster).

***Straßburg: EUG XI (8.-12. April)***

- Boetius, A., Ravenschlag, K., Schubert, C., Rickert, D., Widdel, F., Gieseke, A., Amann, R., Joergensen, B.B., Witte, U., and O. Pfannkuche (2001) Anaerobic oxidation of methane mediated by a microbial consortium above gas hydrate. (Vortrag).
- Linke, P., Pfannkuche, O., Witte, U., and K. Nakamura (2001) Variability of benthic flux and discharge rates at vent sites determined by in situ instruments. (Vortrag).
- Sommer, S., and O. Pfannkuche (2001) The small sized benthic biota in surficial marine gas hydrate sediments. (Vortrag).
- Teichert, B., Bohrmann, G., Eisenhauer, A., Haase-Schramm, A., and B. Bock (2001) U Isotopes: a Sensitive Tracer for Pore Fluid Signatures in Authigenic Carbonates at Methane Vents. (Vortrag).

***Kiel: Margins Meeting (2.-6. Oktober)***

- Bohrmann, G., Kuhs, W., Techmer, K., Heinrichs, T., and T. Gunkel: Scanning electron microscopic investigations on natural gas hydrates: New insights on the formation of hydrates.
- Bohnert, J., Kukowski, N., Hampel, A., Suess, E.: Poster: A new 2.5 D finite element tool to simulate the nonlinear dynamics of gas hydrate or gas bubble formation on active margins.
- Elvert, M., Boetius, A., Rickert, D., Treude, T., Nauhaus, K., and K. Ravenschlag: Vortrag: Anaerobic methane oxidation of methane mediated by a microbial consortium above marine gas hydrates, Cascadia Margin.
- Papenberg, C., Petersen, J., Klaeschen, D.: Poster: Pinnacle structures at Hydrate Ridge off the Oregon Continental Margin.
- Papenberg, C., Petersen, J., Klaeschen, D.: Poster: High reflectivity patches at Hydrate Ridge off the Oregon Continental Margin.
- Rickert, D., Suess, E., Karpen, V., Heuser, A., Jung, C., Bohrmann, G., Linke, P., Teichert, B., and B. Bock: Vortrag: Geochemical and isotopic characteristics of gas hydrates and their pore water.
- Teichert, B.M.A., Eisenhauer, A., Bohrmann, G.: Chemoherm buildups at the Cascadia Margin (Hydrate Ridge)-Evidence for long-term fluid flow.
- Torres, M.E., McManus, J., Tryon, M.D., Brown, K.M., Suess, E., Heeschen, K., Trehu, A.: Vortrag: Gas hydrate dynamics and benthic fluxes at Hydrate Ridge, Cascadia.
- Treude, T., Boetius, A., Ravenschlag, K., Rickert, D.: Poster: Anaerobic oxidation of methane above gas hydrates.

## 1.9.4 Themenbezogene Gastvorträge

### 1999

- Bohrmann G: Gashydrate: Bildung, Vorkommen und mögliche Nutzung als Energiereserve. Hannover, ODP-Industrie-Kolloquium, 18. November.
- Bohrmann G: Gas hydrate research at Hydrate Ridge, Cascadia Margin. Qingdao (China), Kolloquiumsvortrag am 1. Institute of Oceanography, 8. Dezember.
- Suess E: Biologische und chemische Oasen in der Tiefsee: Neue Ergebnisse plattentektonischer Vorgänge. Köln, Geologisches Institut der Universität, 20. Januar
- Suess E: Gas hydrates and Climate. Utrecht, Institut für Erdwissenschaften der Universität, 4. April.
- Suess E: Biologische und chemische Oasen in der Tiefsee: Neue Ergebnisse plattentektonischer Vorgänge. Hamburg, Jungius-Gesellschaft, 13. April.
- Suess E: Methanhydrate: Brennbares Eis als Energiereserve und Klimafaktor. Bonn, Wissenschaftszentrum, Tag der Geowissenschaften, 30. September.

### 2000

- Bohrmann, G: Gashydratforschung bei GEOMAR: Stand und Zukunft. Essen: Ruhrgas AG, 08. Februar.
- Bohrmann G: Die Gashydratprovinz der Cascadia Subduktionszone: ein hochdynamisches System mit Methanhydraten. Tübingen: Geologisch-Paläontologisches Institut, 15. Juni.
- Bohrmann G: Der Hydratrücken am Kontinentalrand vor Orgeon, ein Akkretionsrücken, in dem Gashydrate über vieles bestimmen. Göttingen: Geologisch-Paläontologisches Institut, 22. November.
- Bohrmann G: Hydrate Ridge - an accretionary ridge, highly influenced by gas hydrates. Brest: IFREMER, 08. Dezember.
- Rickert D: The influence of pore water chemistry on the community structure at Hydrate Ridge. Tokyo: Meeting zur Shinkai 6500 Expedition, Oktober.
- Suess E: Gashydrate: Energievorräte und ihre Rolle im Kohlenstoffkreislauf. Garching bei München: Max-Planck Institut für Plasmaphysik, 21. Januar.
- Suess E: Gashydrate: Fakten und Umweltfaktor. Essen: Ruhrgas AG, 08. Februar.
- Suess E: Marine gas hydrates: Effect on deep-sea environments and perturbation of the C-cycle. Leeds: Departemental Seminar in the School of Earth Sciences, 17. Februar.
- Suess E: Hydrate Ridge: Gashydrate occurrence, composition and fluid expulsion at the Cascadia convergent margin. China: China Ocean Mineral Resources R&D Association(Beijing)/ First Institute of Oceanography (Qingdao)/ Second Institute of Oceanography (Hangzhou)/ Marine Geological Survey, Ministry of Land & Resources (Guangzhou) V. R. China, Mai.
- Suess E: The Aleutian subduction zone: Fluid expulsion rates from geophysical and biogeochemical perspectives. China: China Ocean Mineral Resources R&D Association(Beijing)/ First Institute of Oceanography (Qingdao)/ Second Institute of Oceanography (Hangzhou)/ Marine Geological Survey, Ministry of Land & Resources (Guangzhou) V. R. China, Mai.
- Suess E: Research strategy for gas hydrate research in Germany. China: China Ocean Mineral Resources R&D Association(Beijing)/ First Institute of Oceanography (Qingdao)/ Second Institute of Oceanography (Hangzhou)/ Marine Geological Survey, Ministry of Land & Resources (Guangzhou) V. R. China, Mai.

**2001**

- Bohrmann, G: Der Hydratrücken von Oregon: ein aktiver Akkretionsrücken mit Gashydraten.. Abendvortrag auf dem Berichtskolloquium des DFG Schwerpunktprogrammes 1054, 28.-30.03.2001, Neustadt an der Weinstrasse, 29. Februar.
- E. Suess: Gashydrat - Eine Verbindung aus Methan und Wasser. Deutsche Akademie der Naturforscher LEOPOLDINA, Jahreshauptversammlung, 6.-9. April, Halle (Saale), 7. April.

**1.9.5 Themenbezogene Vorträge in der Öffentlichkeit****1999**

- Bohrmann G: Gashydrate am Meeresboden: Ein Stoff mit vielen Überraschungen. Kiel, Naturwissenschaftlicher Verein für Schleswig-Holstein, 1. Dezember.

**2000**

- Bohrmann G: Gashydrate in Meeresablagerungen. Ein wichtiger Stoff für unsere Zukunft? Bönningstedt: Schleswig-Holsteinische-Universitätsgesellschaft Kiel, Rugenberger Schule, 19. Januar.
- Bohrmann G: Brennendes Eis. Methanhydrat am Meeresgrund. Hamburg: Innerbetriebliche Fortbildung DESY, 12. April.
- Bohrmann G: Gashydrate vom Meeresboden: Klimafaktor und potenzieller Brennstoff. Maasholm: Maasholmer Meereskundlichen Vorträge, 29. August.
- Bohrmann G: Methanhydrate: Illusion oder Option auf eine riesige Energiequelle. Berlin: Arbeitstreffen der Medienverantwortlichen der Ruhrgas AG, 17. November.
- Bohrmann G: "Brennendes Eis": Gashydrate vom Meeresgrund und ihre Bedeutung für unsere Zukunft. Essen: Essener Geologische Verein, 12. Dezember.
- Rickert D: Mit dem Forschungsschiff Sonne auf dem Weg zum brennenden Eis. Kiel: Der blaue Ozean, Projekt EXPO-2000, 26. September.
- Suess E: Gashydrate an biologischen und geochemischen Oasen in der Tiefsee. Kiel: Kieler Woche, 23. Juni.

**2001**

- Bohrmann, G: Gashydrate in Meeresablagerungen – Ein wichtiger Rohstoff für unsere Zukunft. Vortrag im Rahmen der Schleswig-Holsteinischen-Universitäts-gesellschaft Kiel in Großhansdorf, Schulzentrum, 9. Januar.
- Bohrmann, G: Gashydrate - Rohstoffreserve oder Klimakiller. Lehrerfortbildung GEO-Zentrum an der KTB Windischeschenbach, 30. Januar.

## 2. Erfolgskontrollbericht

### 2.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen

Die Durchführung des Projektes und die darin erzielten Forschungsergebnisse stehen in unmittelbarem Zusammenhang zu den 3 thematischen Schwerpunkten in den forschungspolitischen Zielsetzungen des BMBF-Förderprogrammes (das Meer als Klimafaktor, Ökosystem und Ressourcenquelle). Mit dem weltweit wachsenden Interesse an Gashydrat und dessen Erforschung aus verschiedenen wissenschaftlichen und technologischen Bereichen haben diese Ergebnisse zugleich auch eine Relevanz für gesellschaftliche und wissenschaftliche Belange:

1. **Klima** - da große Mengen an Methan in Gashydratablagerungen -hauptsächlich in den Sedimenten der Kontinentalränder- gespeichert sind, kommt der Freisetzung dieses klimarelevanten Gases eine Schlüsselrolle im Klimawechsel der Gegenwart sowie bei der Betrachtung vergangener Klimaschwankungen zu.
2. **Katastrophen** - da Gashydratschichten in geringen Tiefen ein bedeutendes, aber kaum beschriebenes Phänomen an fast allen Kontinentalrändern, Schelfen und Permafrostböden sind, kann die Gasfreisetzung aus diesen Quellen in Beziehung zu Erdbeben, Rutschungen und Tsunamis gesetzt werden.
3. **Kohlenstoffkreislauf** - obwohl der globale Einfluß des Methanflusses aus Hydraten auf die Meereschemie weitgehend unbekannt ist, sind die Zersetzung und der Abbau von Hydraten sowie die hydrat-assoziierten Prozesse eine bedeutende Kohlenstoffquelle. Darüberhinaus könnte die Quantifizierung des Kohlenstoffeintrages aus derartigen Quellen in den Ozean durch die extreme Isotopenfraktionierung des Hydrat-Methans unsere Blickrichtung auf Isotopensprünge im marinen Sedimenten ändern, die eines der primären Werkzeuge sind, um vergangene Klimata zu studieren.
4. **Energie** - obwohl die absolute Menge an Energie, die in Gashydraten gespeichert ist, noch nicht bekannt ist, könnten diese Ablagerungen in ozeanischen Sedimenten die größte fossile Brennstoffreservoir der Erde ausmachen.

### 2.2 Wissenschaftlicher und technischer Erfolg des Vorhabens

Die SO143 Expedition war 1999 wesentlicher Bestandteil des internationalen und multidisziplinären TECFLUX Forschungsprogrammes auf dem Hydratrücken. Neben FS SONNE waren die Schiffe RV NEW HORIZON, RV ATLANTIS mit dem Tauchboot ALVIN und RV WECOMA beteiligt. Die Untersuchung von Stoffflüssen, hauptsächlich von Methan und Fluiden, die biogeochemischen Umsetzungsraten, sowie der Einfluß der exponierten Gashydratlagen auf das Ökosystem der Tiefsee wurden im Rahmen von TECFLUX untersucht. Im Einzelnen waren dies:

- Verteilung von Vent-, Karbonat- und Gashydratfeldern zur flächenhaften Integration
- Beprobung der Gashydrate im Verbund mit Sediment und authigenen Karbonaten
- Untersuchung der oxidativen Erosion von Gashydraten
- Messung von Fluidtransportraten

- Quantifizierung von Fluid- und Wärmebudgets
- Chemische Charakterisierung der Fluide
- Biologische Beprobungen und Untersuchungen
- Stoffflüsse in der bodennahen Grenzschicht
- Quantifizierung der Umsatzraten in Oberflächensedimenten

Wir verweisen auf die im Schlußbericht und in den Publikationen dargestellten Ergebnisse.

### **2.3 Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplans**

Der Finanzierungs- und Zeitplan wurde eingehalten. Für die Beschaffung wurden die Richtlinien des Landes Schleswig-Holstein beachtet. Der Verwendungsnachweis und die Schlussrechnung sind dem Projektträger 2001 zugegangen.

### **2.4 Erfindungen und Schutzrechtanmeldungen**

Keine

### **2.5 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Keine