

# Fluidaustritte an kollidierenden Plattengrenzen

## Abstract

Plate collision causes expulsion of fluids and gases and material turnover in the deep ocean along the global subduction zones. Such cold vents are characterized by mineral precipitates and characteristic assemblages of macro organisms. The latter harbor symbiotic bacteria which utilize the chemically-reduced constituents ( $\text{CH}_4$  and  $\text{H}_2\text{S}$ ) of the expelled fluids as their energy and supply their host with food. The interaction between tectonically-induced fluid flow and pumping activity of the vent fauna sets up a shallow recirculation system whose magnitude can be estimated from direct measurements by an *in situ* vent sampling device (VESP) in connection with tracer studies. The dewatering rates based on the biogeochemical estimates agree surprisingly well with those derived from geophysical estimates.

## 1 Gas- und Fluidzirkulation an konvergenten Plattengrenzen

Für die globalen Stoffkreisläufe spielen die Austauschprozesse zwischen der Erdkruste, Ozeanwasser und Atmosphäre eine entscheidende Rolle. Austauschprozesse sind vor allem an den tektonisch definierten Rändern der Erdkrustenplatten konzentriert. So sind die divergenten Plattengrenzen, an denen ozeanische Kruste durch Sea-Floor Spreading kontinuierlich neu gebildet wird, wichtige Gebiete des Ozeans, an denen ein enormer Wärmeaustausch eine hydrothermale Zirkulation aufrechterhält. Hier finden eine Reihe von geochemischen Austauschprozessen statt, welche die Meerwasserzusammensetzung nachhaltig beeinflussen und bis hin zur Existenz der eigenständigen chemoautotrophen Ökosysteme der Hot Vents am Meeresboden führen.

Im Bereich von Plattengrenzen sind ähnliche Fluid- und Gas-austauschprozesse bekannt, deren Antriebsmechanismus letztendlich auf die mechanische Wirkung der Konver-

genzbewegung und des dadurch entstehenden Überdruckes im Porenraum zurückzuführen ist. Tektonischer Stress wird in Subduktionszonen aufgebaut, weil eine der beiden Krustenplatten entlang einer meist seismisch aktiven Zone (Wadati-Benioff-Zone) unter die angrenzende Platte abtaucht. Dabei kommt es in zahlreichen Fällen zur Ausbildung eines aus mehreren Rücken bestehenden Akkretionskeils, welcher beginnend von der Stoßkante der beiden Platten bis zu Zehnern und Hundert Kilometern im seewärtigen Abschnitt der Oberplatte reichen kann.

Obwohl im Einzelfall geologisch meist kompliziert gebaut, sind Akkretionskomplexe generell durch intensive tektonische Faltungs- und Schuppungsstrukturen gekennzeichnet.

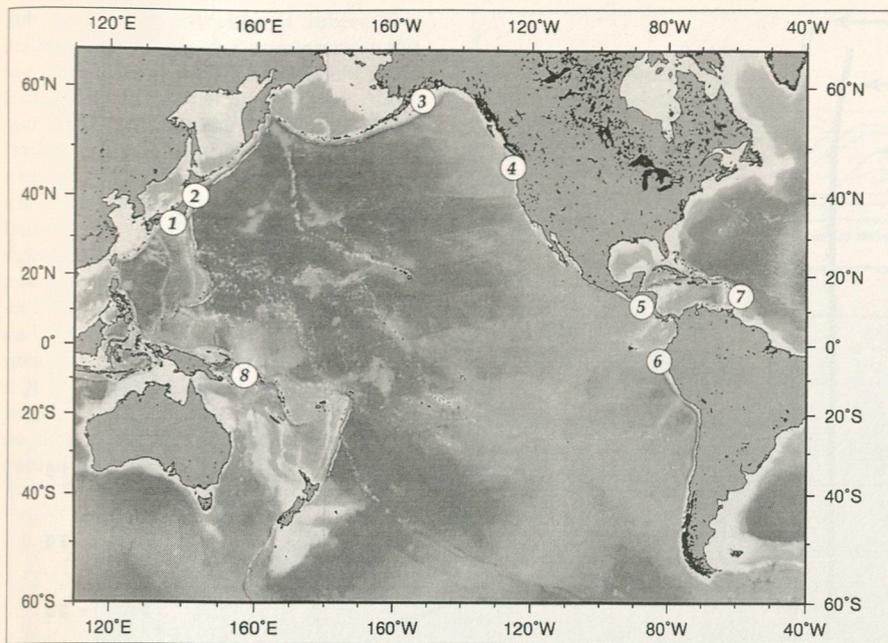
Durch die einengenden Bewegungsvorgänge im Zuge der Subduktion kommt es zu einer Entwässerung der ehemals im Tiefseegraben und auf der ozeanischen Platte abgelagerten, meist mächtigen und initial mit hohem Wassergehalt ausgestatteten pelagischen Sedimente. Der kontinuierliche Vorgang der Subduktion mit Plattenkonvergenzraten von weniger als 1 cm/Jahr bis circa 10 cm/Jahr führt zu einer Fluid- und Gaszirkulation innerhalb des Akkretionskomplexes, wobei für den Fluidtransport neben permeablen Schichten vor allem das gesamte Inventar an Störungssystemen (Auf-, Ab- und Überschiebungen sowie Strike-Slip-Störungen) genutzt wird.

Trotz einer sehr komplexen submarinen Hydrologie kommt es zu einem Nettotransport gelöster Bestandteile aus dem Akkretionskeil in das Bodensee. Im Rahmen des Ocean Drilling Programs werden seit 1986 gezielte Bohrkampagnen durchgeführt, um neben den struktur-geologischen Fragen auch der Auflösung von Fluidregimen und den Stofftransportprozessen im Bereich kollidierender Platten nachzugehen.

## 2 Cold Vents und benthische Faunenvergesellschaftung

Ein weiterer Ansatz, der am GEOMAR Forschungszentrum besprochen wird, um quantitative Aussagen über den tektonisch induzierten Fluidtransport zu gewinnen, liegt in der Erfassung und Bearbeitung aktiver Fluidaustrittsstellen am Meeresboden. Der Zugang zu diesen Stellen erlaubt die Durchführung von direkten Fluidaustrittsmessungen. Aktive Fluidaustrittsstellen, im Unterschied zu den Hot Vents der Hydrothermalsysteme als Cold Seeps bzw. Cold Vents bezeichnet, wurden erstmals durch Einsätze mit Tief-Tauchbooten in der Cascadia Subduktionszone [1, 2] und im Japangraben [3] dokumentiert. Sie sind heute von zahlreichen Lokalitäten entlang der Tiefseegräben besonders aus dem zirkumpazifischen Raum bekannt aber auch von Kollisionszonen des Atlantiks, des Mittelmeeres und des Indischen Ozeans (Abbildung 1). Dabei wurde gezeigt, dass in bestimmten tektonischen Einheiten die Vents, neben der Zementation durch Karbonat- und Barytpräzipitate, von besonderen Organismengemeinschaften, meist von Mollusken und Bartwürmern (Pogonophora), besiedelt sind.

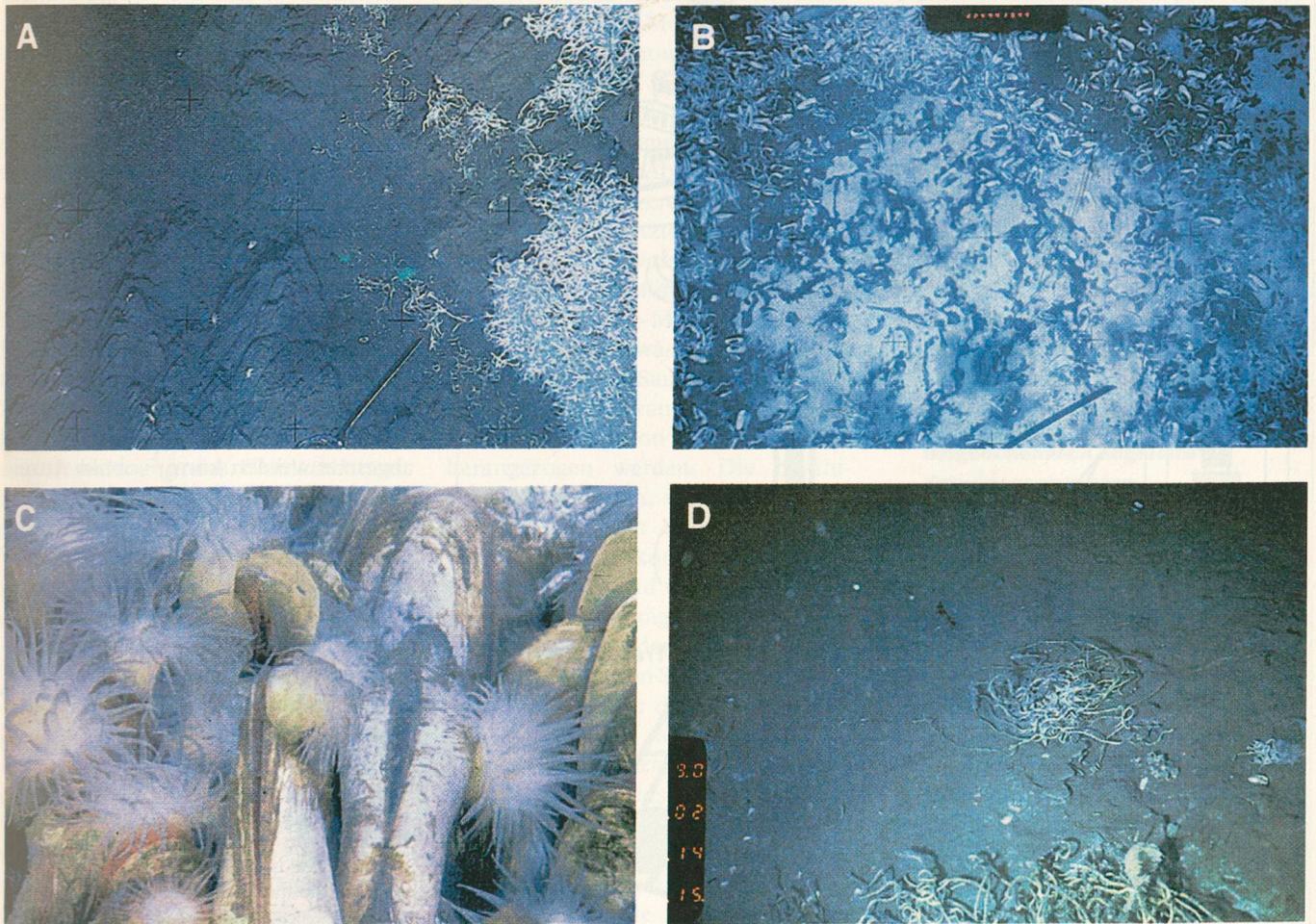
Die Populationen erreichen ihre Größe und Dichte durch eine Symbiose mit chemoautotrophen Bakterien, die an die Oxidation von  $\text{CH}_4$  und  $\text{H}_2\text{S}$  in unmittelbarer Nähe der Vents gekoppelt ist (Abbildung 2). Dominiert werden die Gemeinschaften an den Cold Vents durch Kolonien vesicomycider Muscheln (Abbildung 2C). Durch ihr dichtes Auftreten und ihre helle Farbe sind sie für das optische Auffinden von Vents geeignet. Die Ansiedlung und die Ausbildung einer derartigen Biomasse setzt eine ausreichende Versorgung mit reduzierten chemischen Verbindungen voraus und gilt daher als sicherer Hinweis auf einen



**Abb. 1.** Fluidaustritte an aktiven Plattenkonvergenzzonen, die durch Vent-Organismen am Meeresboden belegt sind. 1 = Nankai Trog [8], 2 = Japangraben [3], 3 = Aleutengraben [6], 4 = Cascadia Subduktionszone [1], 5 = Kontinentalrand vor Costa Rica [9], 6 = Peru Kontinentalhang [10], 7 = Barbados Subduktionszone [11], 8 = Woodlark Becken [12].

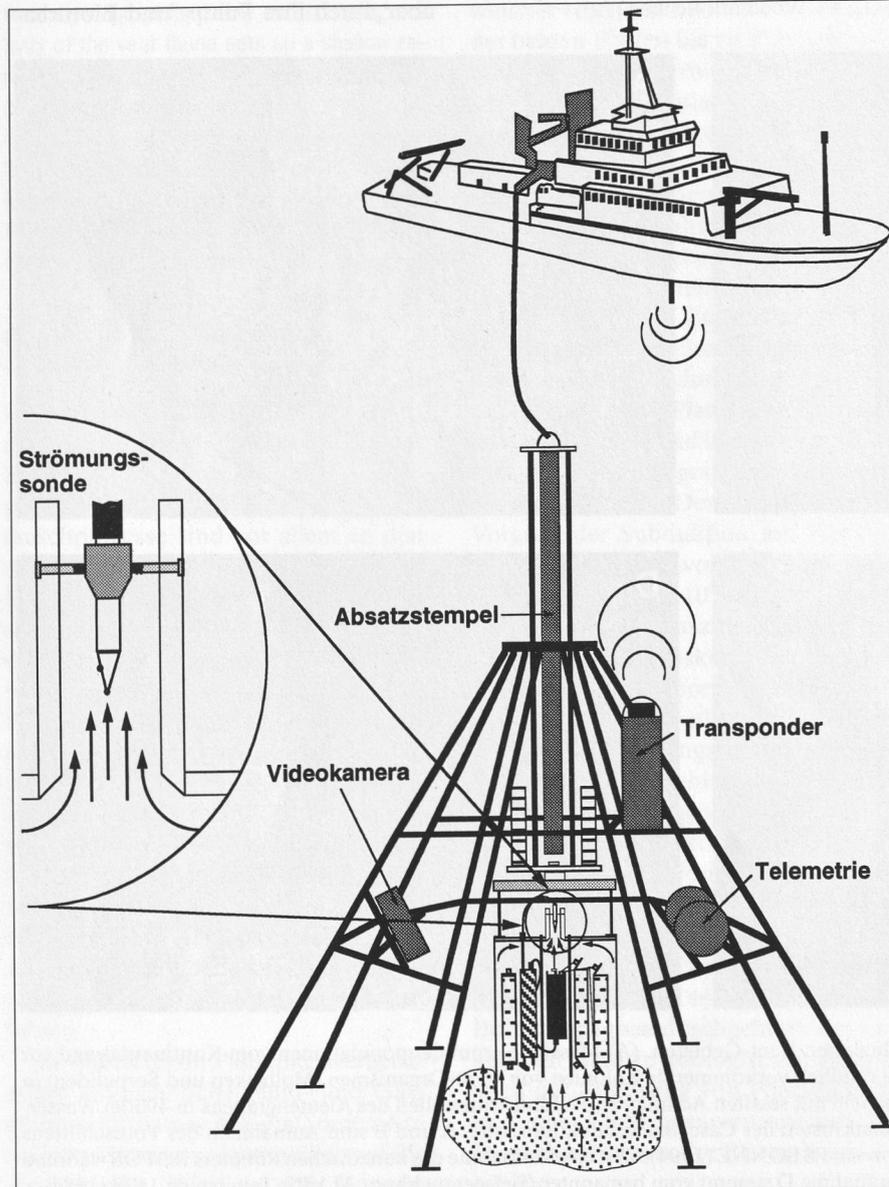
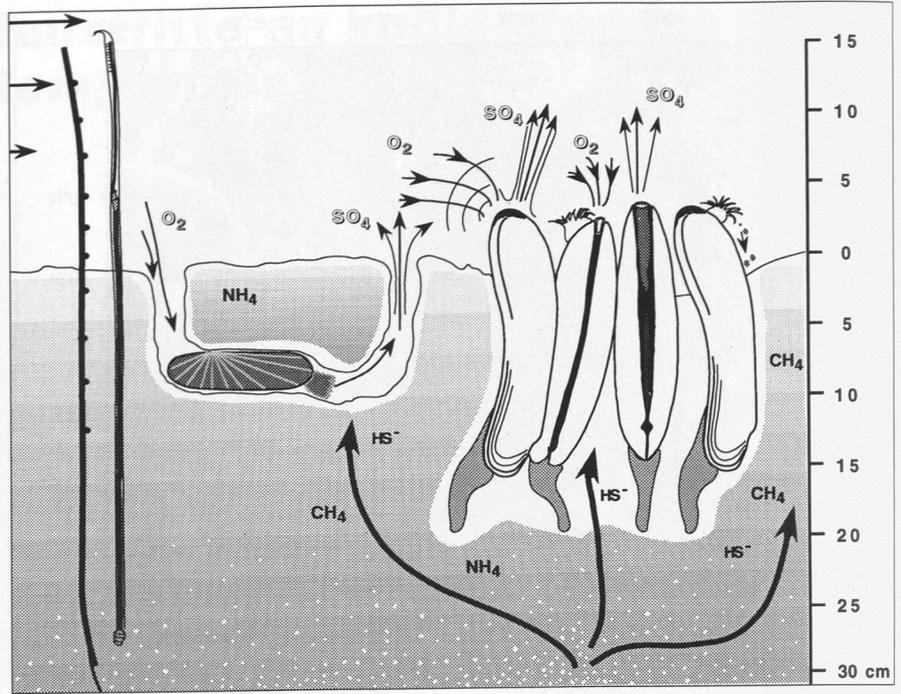
Austritt von Fluiden aus dem Meeresboden (Abbildung 2).

Die Muscheln der Gattungen *Calyptogena* und *Solemya* sowie die Bartwürmer (Pogonophora) leben in Symbiose mit Bakterien, die in der Lage sind,  $\text{CH}_4$  und  $\text{H}_2\text{S}$  aus den Ventfluiden zu oxidieren und daraus Energie zu gewinnen. Die kleinräumige Fluidzirkulation und die Wechselwirkung zwischen chemisch reduzierten Ventfluiden und oxischem Bodenwasser sowie die chemoautotrophe Stoffumsetzung sind in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Hierfür werden Mikroorganismen von den Muscheln und Bartwürmern in speziellen Geweben beherbergt, den Kiemen oder dem Trophosom, eine Umbildung des Darmtraktes. Für die Stoffumsetzung benötigen die Bakterien Sauerstoff, welcher im Fall der Muscheln durch ihre Pumpaktivität herantransportiert wird. Gleichzeitig üben die Muscheln aber durch ihre Pump- und Bioturba-



**Abb. 2.** Fotoaufzeichnungen aus subduktions-induzierten Vent-Gebieten. (A) Massive Serpulidenpopulationen vom Kontinentalrand vor Peru; (B) mit Baryt zementierter Meeresboden und randlich vorkommende Kolonien von Vent-Organismen (Mollusken und Serpuliden) in 3400 m Wassertiefe vor Peru; (C) calyptogene Muscheln mit sessilen Actinien an Fluidaustrittsstellen des Aleutengrabens in 4950m Wassertiefe; (D) Kolonien von Vestimentifera und Karbonatkrusten der Cascadia Subduktionszone. A und B sind Aufnahmen des Fotoschlittens EXPLOS, aufgenommen während der 78. Expedition mit FS SONNE (1994); C ist eine Aufnahme des kanadischen Roboters ROPOS während der 110. Expedition mit FS SONNE (1996), und Aufnahme D stammt vom bemannten Tiefseetauchboot ALVIN; Tauchgang 1428 (1984).

**Abb. 3.** Vent-Organismen an einer aktiven Fluidaustrittsstelle aus der Kollisionszone des Aleutengraben (von links nach rechts: Bartwürmer unterschiedlicher Arten, eingegrabene *Solemya* mit dunklem Periostrakum und aufrecht im Sediment stehende calyptogene Muscheln mit aufsitzenden Actinien). Die Pfeile geben die Strömungsrichtungen des Bodenwassers, der Pumpaktivitäten und des subduktions-induzierten Entwässerungsstromes an. Dargestellt ist auch der chemoautotrophe Umsatz der Vent-Organismen von reduzierten Verbindungen ( $\text{CCH}_4$  und  $\text{H}_2\text{S}$ ) aus den Vent-Fluiden sowie der Sauerstoffbedarf aus dem Bodenwasser.



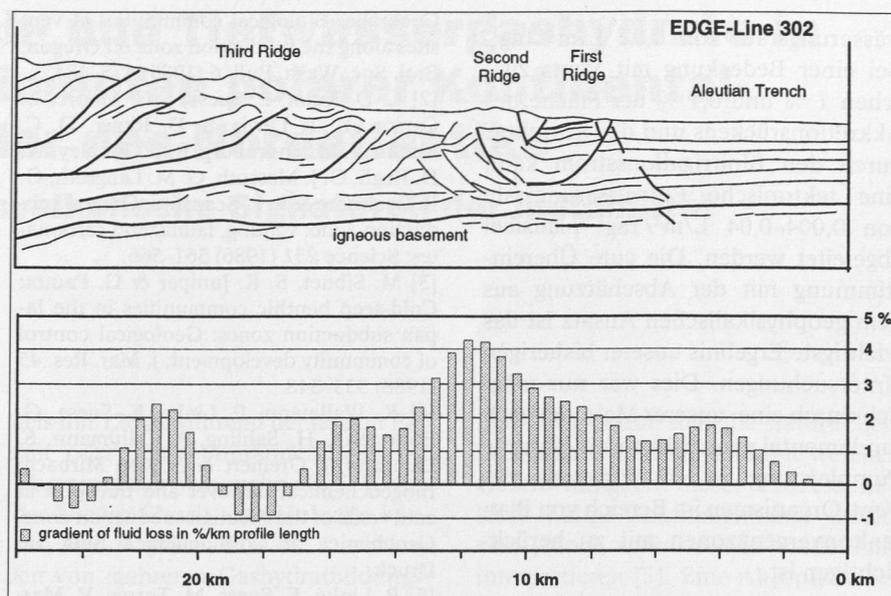
tionsaktivität einen deutlich Einfluss auf chemische Gradienten im Porenwasser aus [4].

### 3 Ausstromraten

Für die Bestimmung von benthischen Flussraten werden Kammern eingesetzt, die entweder direkt von einem Tauchboot oder ROV auf einem Vent positioniert werden oder mittels geschleppter video-geführter Geräte von konventionellen Forschungsschiffen aus betrieben werden. Am GEOMAR wurde hierzu der Vent Sampler VESP entwickelt, der in circa 3–4 m Abstand über den Meeresboden geschleppt und abgesetzt werden kann, sobald Anzeichen aktiver Fluidaustritte, also meist Muschelkolonien, sichtbar werden [5]. Das Gerät trägt eine Kammer mit Wassers schöpfen und einer Strömungs-sonde in der Ausstromöffnung (Abbildung 4). Das vor dem Absetzen in der Kammer vorhandene Bodenwasser wird durch das ausströmende Vent-

**Abb. 4.** Schema des von GEOMAR entwickelten Vent Samplers (VESP) und sein Einsatz vom Forschungsschiff [5]. Das Absatzgestell trägt Transponder, Telemetrie und Videokamera zur Führung und zum Einsatz des Gerätes über Fluidaustrittsstellen (gepunktete Fläche). Die zentrale Einheit ist eine Probenkammer mit CTD-Speichersonde, Wassers schöpfen, Schrittmotor und eingebauter Strömungs-sonde in der Ausstromöffnung (Ausschnitt); als Zusatzkomponenten können Photokamera, Photoblitz und Temperaturlanze eingesetzt werden.

**Abb. 5.** Kollisionsstrukturen (obere Darstellung) und Fluidentwässerungsraten (untere Darstellung) im Übergangsbereich der Plattenkollisionszone im Golf von Alaska nach [7]. Von Südosten (rechts) wird die Pazifische Platte unter die Nordamerikanische Platte (links) subduziert, wobei mehrere Akkretionsrücken angelegt werden. Durch Analyse der seismischen Geschwindigkeiten, der Porositätsabnahme und der geologischen Strukturen, wurde ein Modell der Fluidfreisetzung entlang der dargestellten Linie entwickelt, welches Freisetzungsraten in 0,5 km langen Streckenabschnitten zeigt. Die maximalen Raten treten an den jüngsten Akkretionsrücken auf, wo auch die dichtesten Vent-Kolonien beobachtet wurden [6].



Wasser zum Teil ersetzt. Hierdurch tritt eine Konzentrationsänderung der gelösten Vent-Tracer ein, die mittels der sequentiell ausgelösten Wasserschröpfer über die Standzeit erfasst wird. Gleichzeitig wird der *In-situ*-Ausstrom über eine Strömungssonde gemessen.

VESP probiert während der Standzeit von circa 30–120 Minuten eine Mischung aus Vent-Fluid und Bodenwasser. Der gesamte Ausstrom ist die Summe aus dem tektonisch induzierten Entwässerungsfluss und der Pumpleistung der vent-assoziierten Makrofauna. Auch kann der Sauerstoffverbrauch innerhalb der Kammer als Maß für den Umsatz der chemisch reduzierten Bestandteile der Fluide ( $\text{CH}_4$  und  $\text{H}_2\text{S}$ ) und der Anstieg des gelösten Silikats unter bestimmten Annahmen für eine Berechnung des Fluidausstroms benutzt werden [4]. Bisher wurden bei mehreren erfolgreichen Einsätzen des VESP-Systems Ausstromraten zwischen  $85$  und  $2000 \text{ L/m}^2/\text{Tag}^1$  gemessen.

#### 4 Porenwasserprofile

Die Porenwässer der durch aktive Entwässerung beeinflussten Oberflächensedimente sind eine Mischung aus Vent-Fluiden, diagenetischem Porenwasser und zum Teil auch Bodenwasser, das durch die Vent-Fauna eingepumpt wird. Durch eine Gegenüberstellung von Konzentrationsgradienten aus Vent- beeinflussten und nicht beeinflussten Sedimenten kann der advective vom diffusiven Stofftransport unterschieden werden. Die Porenwässer der Vent-beinflussten Sedimente

zeichnen sich durch ein Fehlen der Nitrat-führenden suboxischen Schicht, sehr niedrige Sulfatgehalte, hohe Ammoniakgehalte und herabgesetzte Silikatkonzentrationen aus. Porenwasserprofile mit diesen Merkmalen wurden von der Kollisionszone des Aleutengraben beschrieben [4, 6] und zeigen, dass die obersten 20 cm durch die Aktivität der Organismen, wie hier beschrieben und in Abbildung 3 dargestellt, beeinflusst werden.

Die herabgesetzte Silikatkonzentration im Porenwasser sowie der erhöhte Silikatgehalt in der VESP-Kammer sind wichtige Merkmale zur Abschätzung der Entwässerungsraten. Da Silikat gegenüber Sauerstoff nicht aufgenommen wird, kann es als Anzeiger für die Bioirrigation der Makrofauna herangezogen werden. Die benthischen Organismen, wie zum Beispiel *Solemya*, pumpen Bodenwasser mit niedrigen Silikatkonzentrationen in das Ventsystem und verdünnen so das diagenetisch geprägte Porenwasser. Zur Berechnung der Pumprate muss von der gemessenen Silikatzunahme in der VESP-Kammer der Anteil des diffusiven und des advektiven Vent-Transportes abgezogen werden. Aus den Konzentrationsdifferenzen zwischen Bodenwasser und dem Porenwasser an den Vents lässt sich dann eine Bioirrigationsrate berechnen [4] und zugleich die Bedeutung der benthischen Organismenvergesellschaftungen an Vents für den Stofftransport aus dem Sediment in das Bodenwasser ableiten.

Zum einen transportiert der tektonisch-induzierte Entwässerungsstrom

energiereiche Fluide in Form von  $\text{CH}_4$ - und  $\text{H}_2\text{S}$ -haltigen Lösungen heran. Diese dienen nach chemoautotropher Umsetzung den Ventorganismen als Nahrung. Zum anderen induzieren die Ventorganismen durch ihre Pumpaktivität einen Rezirkulationsstrom. Die beiden Anteile zusammen, der Bioirrigationsstrom und der tektonisch-induzierte Entwässerungsstrom, sind mit dem VESP-System *in situ* messbar. Eine erstmalige Abschätzung in der Aleuten-Subduktionszone vor Alaska ergibt Werte von  $3,5 \pm 0,5 \text{ L/m}^2/\text{Tag}^1$  für den Entwässerungsstrom und  $85 \pm 40 \text{ L/m}^2/\text{Tag}^1$  für den Bioirrigationsstrom [6].

#### 5 Geophysikalisch und biogeochemisch abgeleitete Entwässerungsraten

Die Änderungen der seismischen Geschwindigkeit in den Akkretionskomplexen, basierend auf Porositätsabnahme, lassen sich in Entwässerungsraten transformieren [7]. Bei Kenntnis der Konvergenzraten, wie zum Beispiel für ein Segment der Aleuten-Subduktionszone entlang des seismischen Profils EDGE-302 (Abbildung 5, obere Darstellung), kann ein räumliches Verteilungsmuster der Entwässerungsraten konstruiert werden (Abbildung 5, untere Darstellung). Die Maxima dieser Raten fallen in den initialen Bereich der Deformation, dem 1. und 2. Akkretionsrücken, und liegen genau in dem Gebiet der beobachteten Vents am Boden des Tiefseegraben.

Für das Fallbeispiel der EDGE-Line 302 ergibt sich dort eine maximale Ent-

wässerungsrate von 0,02 L/m<sup>2</sup>/Tag<sup>1</sup>. Bei einer Bedeckung mit Vents zwischen 1 % und 0,1 % der Fläche des Akkretionsrückens und der Korrektur durch den Bioirrigationsstrom kann eine tektonische Entwässerungsrate von 0,004–0,04 L/m<sup>2</sup>/Tag<sup>1</sup> plausibel abgeleitet werden. Die gute Übereinstimmung mit der Abschätzung aus dem geophysikalischen Ansatz ist das wichtigste Ergebnis unserer bisherigen Untersuchungen. Dies war nur möglich durch eine, unserer Meinung nach fundamental neue Erkenntnis, dass die Pumpleistung (= Bioirrigation) der Vent-Organismen im Bereich von Plattenkonvergenzzonen mit zu berücksichtigen ist.

### Danksagung

Die Expeditionen mit FS SONNE, welche die grundlegenden Daten zu diesen Untersuchungen lieferten, wurden vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) finanziert (Kenn-Nummern: 03G0078A, 03G0097A, 03G0109B, 03G0110A).

### Literatur

[1] E. Suess, B. Carson, S. D. Ritger, J. C. Moore, M. L. Jones, L. D. Kulm & G. R.

Cochrane: Biological communities at vent sites along the subduction zone off Oregon; Biol. Soc. Wash. Bull. 6 (1985) 475–484.

[2] L. D. Kulm, E. Suess, J. C. Moore, B. Carson, B. T. Lewis, S. D. Ritger, D. C. Kadko, T. M. Thornburg, R. W. Embley, W. D. Rugh, G. J. Massoth, G. M. Langseth, G. R. Cochrane & R. L. Scamann: Oregon subduction zone: venting, fauna, and carbonates; Science 231 (1986) 561–566.

[3] M. Sibuet, S. K. Juniper & G. Pautot: Cold-seep benthic communities in the Japan subduction zones: Geological control of community development; J. Mar. Res. 45 (1988) 333–348.

[4] K. Wallmann, P. Linke, E. Suess, G. Bohrmann, H. Sahling, A. Dählmann, S. Lammers, J. Greinert & N. von Mirbach: Biogeochemical turnover and transport at cold vents of the Aleutian subduction zone. Geochimica et Cosmochimica Acta, im Druck.

[5] P. Linke, E. Suess, M. Torres, V. Martens, W. D. Rugh, W. Ziebis & L. D. Kulm: In situ measurement of fluid flow from cold seeps at active continental margins; Deep-Sea Res. 41/4 (1994) 721–739.

[6] E. Suess, G. Bohrmann, R. von Huene, P. Linke, K. Wallmann, H. Sahling, S. Lammers, G. Winckler, R. A. Lutz & D. Orange: Fluid venting in the Aleutian subduction zone; J. Geophys. Res. (im Druck).

[7] R. von Huene, D. Klaeschen, M. Gutschner & J. Fruehn: Mass and fluid flux during accretion at Alaska Margin; Geol. Soc. Am. Bull. (im Druck).

[8] X. LePichon, K. Kobayashi & Kaiko-Nankai Scientific Crew: Fluid venting wit-

hin the eastern Nankai Trough accretionary wedge: A summary of the 1989 Kaiko-Nankai results; Earth Planet. Sci. Lett. 109 (1992) 303–318.

[9] B. G. McAdoo, D. L. Orange, A. Silver et al.: Seafloor structural observations, Costa Rica accretionary prism; Geophysical Research Letters 23/8 (1996) 883–886.

[10] J. Y. Bourgois, P. Lagabrielle, E. De Wever, E. Suess & NAUTIPERC Team: Tectonic history of a non-accreting active margin during the past 400 ka; Geology 21 (1993) 531–534.

[11] P. Henry, X. LePichon, S. Lallemand, S. Lance, J. B. Martin, J.-P. Foucher, A. Fiala-Médioni, F. Rostek, N. Guilhaumou, V. Pranal, & M. Castrec: Fluid flow in and around a mud volcano field seaward of Barbados accretionary wedge: Results from Manon Cruise; J. Geophys. Res. 101 (1996) 20297–20323.

[12] A. V. Ivanov: Pogonophora, 1963, Academic Press, London.

### Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr. Erwin Suess et al., GEOMAR Forschungszentrum für Marine Geowissenschaften, Wischhofstraße 1–3, D-24148 Kiel.

2 = SO97

4 = SOMO

1 = ?

3 = ?