

**Sulfidaufnahme von *Calyptogena pacifica* im
Vergleich mit geochemischen Untersuchungen in
Cold Seep Sedimenten vor Makran und West-Java**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität
zu Kiel

vorgelegt von
Nikolaus von Mirbach
Kiel 2000

Referent:

Korreferent:

Tag der mündlichen Prüfung:

zum Druck genehmigt:

Kiel, den

Der Dekan

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Sulfidaufnahme von <i>Calyptogena pacifica</i>	5
2.1 Untersuchungsgebiet	5
2.2 Methodik.....	8
2.2.1 Meßprinzip	8
2.2.2 Sulfidmessung	10
2.2.3 Sauerstoffmessung.....	11
2.2.4 pH Messung.....	12
2.2.5 Aufbau des Chemostaten und Regelungsprogramm.....	12
2.2.6 Probengewinnung	17
2.3 Ergebnisse.....	21
2.3.1 Sulfidaufnahme von <i>Calyptogena pacifica</i>	21
2.3.2 Verbrauchsberechnungen	27
2.4 Diskussion	30
2.4.1 Verbreitung vesicomyider Muscheln.....	30
2.4.2 Lebensweise vesicomyider Muscheln	31
2.4.3 Methodenkritik	37
2.4.4 Sulfidaufnahme von <i>Calyptogena pacifica</i>	39
2.4.5 Verbrauchsberechnungen	46
3 Geochemische Untersuchungen an Cold Seep Lebensgemeinschaften.....	51
3.1 Untersuchungsgebiete.....	52
3.1.1 Makran.....	52
3.1.2 West-Java	55
3.2 Methodik.....	58
3.2.1 Geräteinsatz und Probengewinnung	58
3.2.2 Analytik an Bord	60
3.2.3 Analytik am Institut	62
3.3 Ergebnisse.....	66
3.3.1 Porenwasserprofile vor Makran.....	67
3.3.2 Porenwasserprofile vor West-Java	74
3.4 Diskussion	88
3.4.1 Porenwasserprofile vor Makran.....	88
3.4.2 Porenwasserprofile vor West-Java	94
4 Geochemischer Sulfidfluß und Sulfidaufnahme von <i>Calyptogena pacifica</i>	103
4.1 Makran.....	103
4.1.1 Sulfidfluß.....	103
4.1.2 Sulfidfluß im Vergleich zur Sulfidaufnahme	104
4.2 West-Java	107
4.2.1 Sulfidfluß.....	107
4.2.2 Sulfidfluß im Vergleich zur Sulfidaufnahme	109
5 Zusammenfassung	113
6 Literatur	115

1 Einleitung

Die Lithosphäre ist die äußere relativ starre Hülle der Erde. Sie ist keine zusammenhängende, erdumspannende Schale, sondern besteht aus unterschiedlich mächtigen Einzelplatten. Die Mächtigkeit variiert zwischen 50 und 350 km (Press & Siever, 1995). Der obere Anteil der Lithosphärenplatte wird als Kruste bezeichnet, der untere Teil ist der lithosphärische Mantelanteil (Eisbacher, 1991). Die Grenze zwischen der Lithosphäre und dem darunter liegenden Erdmantel (Asthenosphäre) wird durch die Moho-Diskontinuität (Mohorovičić-Diskontinuität) gebildet. Die Erdplatten bewegen sich auf dem flüssigen Erdmantel, da sie durch die thermisch-mechanischen Instabilitäten und die daraus resultierenden Konvektionsströme des Mantelmaterials in Bewegung versetzt werden. Die Ursache der thermisch-mechanischen Instabilitäten ist noch nicht vollständig aufgeklärt, doch zeigen andere Himmelskörper in unserem Sonnensystem ähnliche Phänomene. So ist die Oberfläche des Jupitermondes "Europa" von einem 150 km dicken Eispanzer bedeckt, der aus vielen einzelnen Bruchstücken besteht, die sich in Relation zueinander bewegen (Sullivan et al., 1998). Unter dem Eispanzer wird flüssiges Wasser vermutet (Carr et al., 1998). Es wird angenommen, daß die Gezeitenkräfte zwischen Europa und dem Jupiter zu einer Wärmeentwicklung führt. Diese Wärme sorgt dafür, daß das Wasser im flüssigen Aggregatzustand vorliegt (Pappalardo et al., 1998). Vermutlich sind Konvektionsströme im flüssigen Wasser vorhanden, die die Bewegungen der Bruchstücke auf der Oberfläche des Jupitermondes Europa hervorrufen (Sullivan et al., 1998).

Die Konvektionsströme im Erdinneren sind für die Relativverschiebungen zwischen den Erdplatten verantwortlich. Die Bewegungen zwischen den Platten können drei verschiedene Formen annehmen: 1.) divergent (auseinanderstrebend), 2.) transform (aneinander vorbeigleitend) oder 3.) konvergent (zueinanderstrebend). Divergente Bewegungen beobachtet man an den mittelozeanischen Rücken, transforme Bewegung findet man beispielsweise an der San Andreas Störung in Kalifornien, und konvergente Bewegungen werden in den Tiefseerinnen angetroffen (Press & Siever, 1995). Eine Bewegungsform der Erdoberfläche ohne tektonischen Ursprung sind die rezenten Hebungsvorgänge des kanadischen und skandinavischen Schildes. Diese Bewegungen sind Ausgleichsbewegungen, die beim Abschmelzen des pleistozänen Eiskörpers einsetzten (Eisbacher, 1991).

An konvergenten Plattengrenzen an denen die ozeanischen Platten mit kontinentalen Platten kollidieren, findet man Subduktionszonen mit einem vorgelagerten Tiefsee graben. Hier

wird die aus Basalt bestehende schwerere ozeanische Kruste unter die leichtere kontinentale Kruste geschoben (Abbildung 1). Die auf der ozeanischen Kruste aufgelagerten Sedimente werden teilweise subduziert, und teilweise im Akkretionskeil zusammengeschoben. In seltenen Fällen, wie vor Costa Rica, wird das gesamte aufgelagerte Sediment mit der ozeanischen Kruste subduziert (Moritz et al., 2000). Im Erdmantel wird die subduzierte Kruste wieder aufgeschmolzen. Der Vulkanbogen (Abbildung 1) wird durch die aufsteigenden flüchtigen Komponenten und partiellen Schmelzen mit Material versorgt (Press & Siever, 1995).

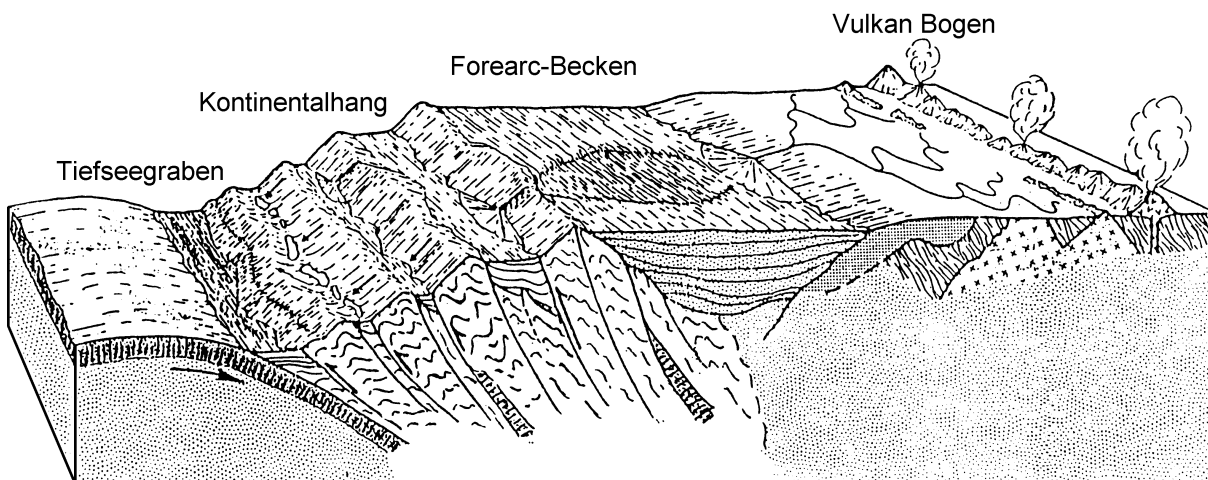


Abbildung 1: Aufbau einer Subduktionszone. Die ozeanische Kruste (links) schiebt sich unter die kontinentale Kruste (rechts). Weitere Erläuterungen im Text (modifiziert nach Curray, 1989).

Das Material des Akkretionskeils besteht aus abgeschürften Sedimenten und Krustensplittern (Stephenson et al., 1994). Die tektonischen Bewegungen sind dafür verantwortlich, daß diese Ablagerungen des Akkretionskeils intensiv gefaltet und zerschuppt sind (Press & Siever, 1995). Senkrecht zur Subduktionsrichtung entstehen dabei hintereinander liegende Akkretionsrücken. Durch Rotation der höheren Teile des Keils und akkretionärer Unterschiebung in den tieferen Lagen entwickelt sich der äußere Rücken, der das Forearc-Becken (Abbildung 1) seewärtig abschließt (Eisbacher, 1991). Das Forearc-Becken wird mit Sedimenten aufgefüllt, die vom Kontinent stammen. Diese Sedimentfüllungen sind meist ungestört.

Durch die Plattenkonvergenz wird das Sediment mit dem darin enthaltenen Porenwasser in die Subduktionszonen transportiert. Eine globale Abschätzung dieses Transportvorganges ergibt für das Wasser einen Wert von $0,9 \cdot 10^{15} \text{ g a}^{-1}$ (Rea & Ruff, 1996). Das Porenwasser

wird durch den Subduktionsprozeß hohen Drücken ausgesetzt und wegen der Reduktion des Porenvolumens ausgepreßt. Es entweicht über Störungszonen in den bodennahen Wasserkörper (Langseth & Moore, 1990; Huene & Scholl, 1991). Der Ausstrom des Porenwassers erfolgt dabei meist in kanalisierter Form (Grehan & Juniper, 1996; Olu et al., 1997; Carson & Screaton, 1998). An solchen Austrittsstellen, wurden in den 80er Jahren chemoautotrophe Lebensgemeinschaften entdeckt, die nicht auf die Zufuhr von organischem Material aus der euphotischen Zone angewiesen sind (Paull et al., 1984; Kennicutt et al., 1985). Die austretenden Fluide sind an chemisch reduzierten Substanzen wie Methan und Sulfid angereichert. Solche Austrittsstellen, aus denen kaltes Porenwasser aus dem Sediment ausströmt, werden Cold Seeps genannt. Da entsprechende deutschsprachige Begriffe zur Zeit nicht gebräuchlich sind, wird im folgenden auf den in der internationalen Literatur üblichen Ausdruck "Cold Seep" zurückgegriffen.

Die Makrofauna in den Cold Seep Gemeinschaften wird von den Muschelfamilien Vesicomidae und Mytilidae dominiert (Sibuet & Olu, 1998). In den Kiemen dieser Vertreter findet man endosymbiontische sulfidoxidierende Bakterien, die das Sulfid des austretenden Porenwassers zum Aufbau organischen Materials nutzen und damit ihren Muschelwirt versorgen (Fiala-Médioni & Métivier, 1986). Die Muscheln siedeln in dichten Kolonien um die einzelnen Austrittsstellen herum.

Als die Cold Seep Gemeinschaften entdeckt wurden, nahm man an, daß es sich um einzelne Oasen in der Tiefsee handelt, doch hat man mittlerweile in vielen Subduktionszonen rund um die Erde solche um die Fluidaustrittsstellen siedelnden chemoautotrophen Lebensgemeinschaften entdeckt (Sibuet & Olu, 1998).

Die Gemeinschaften an den mittelozeanischen Rücken basieren ebenfalls auf der Zufuhr von reduzierten Substanzen. Sie weisen Biomassewerte von 10 bis 15 kg m⁻² auf (Hessler et al., 1985). Die Muschelansammlungen an den Cold Seeps können Individuendichten von über 1000 Ind. m⁻² und Biomassen von 30 kg m⁻² aufweisen (Olu et al., 1996a). Bei der Suche nach Lokationen mit Fluidaustritt dienen die Muschelkolonien als optischer Anzeiger. Die Suche nach Cold Seeps kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Es können videogeführte Geräte in geringem Abstand über das Sediment geschleppt werden. Aber auch bemannte Tauchboote und unbemannte Tauchroboter können für die Suche genutzt werden. Ein Cold Seep Gebiet ist durch viele kleinere Felder von Muschelkolonien charakterisiert. Die flächenhafte Ausdeh-

nung der einzelnen Kolonien liegt dabei in einem Bereich von wenigen Quadratmetern (Sibuet & Olu, 1998).

Die Ausdehnung und Individuendichte der Muschelfelder kann zusammen mit der faunistischen Zusammensetzung einen Hinweis auf die Menge der austretenden Fluide geben. In diesem Zusammenhang werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit folgende Themen bearbeitet:

- Der Aufbau einer Versuchsanlage zur Messung der Sulfidaufnahme von vesicomiden Muscheln der Gattung *Calypptogena pacifica* aus dem Cold Seep im Eel River Becken, Nordkalifornien (Kapitel 2).
- Geochemische Analysen im Porenwasser von Sedimenten aus den beiden neu entdeckten Cold Seep Gebieten vor Makran (Pakistan) und West-Java (Indonesien) dienen der Charakterisierung dieser Seeps (Kapitel 3).
- Eine Abschätzung des Sulfidflusses über die Sediment-Wasser-Grenzfläche im Vergleich zu dem Sulfidbedarf der Muschelgemeinschaften vor Makran und West-Java (Kapitel 4).

2 Sulfidaufnahme von *Calyptogenia pacifica*

2.1 Untersuchungsgebiet

Die Eel River Subduktionszone vor der nordkalifornischen Pazifikküste (Abbildung 2) ist der südlichste Teil der Cascadia Subduktionszone (Gorda Platte). Sie grenzt südlich an die Mendocino Bruchzone. An dieser Bruchzone treffen die pazifische, die nordamerikanische und die Juan de Fuca Platte aufeinander (Oppenheimer et al., 1993).

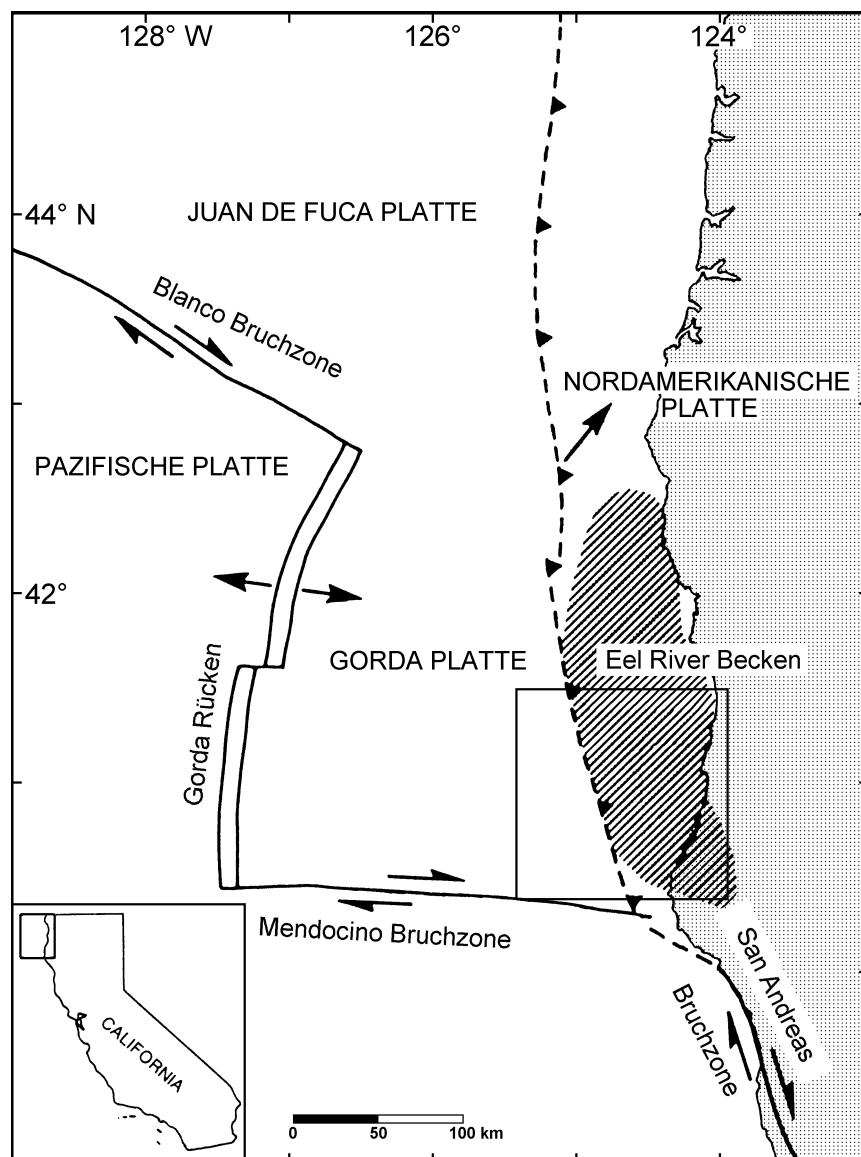


Abbildung 2: Übersicht über das Arbeitsgebiet. Die schraffierte Fläche kennzeichnet das Eel River Becken. Die Deformationsfront an der die ozeanische Platte mit der kontinentalen kollidiert, ist durch ▲ gekennzeichnet. Das Quadrat (□) entspricht dem Ausschnitt des Untersuchungsgebietes in Abbildung 3 (modifiziert nach McCrory, 1990).

Die Eel River Subduktionszone (Abbildung 3) kann in zwei unterschiedliche Gebiete eingeteilt werden: An der seewärtigen westlichen Seite überwiegen tektonisch angetriebene Subduktionsprozesse; während der östliche Teil mit dem Eel River Becken stärker von Sedimentations- und Erosionsprozessen beeinflusst wird (Orange, 1999).

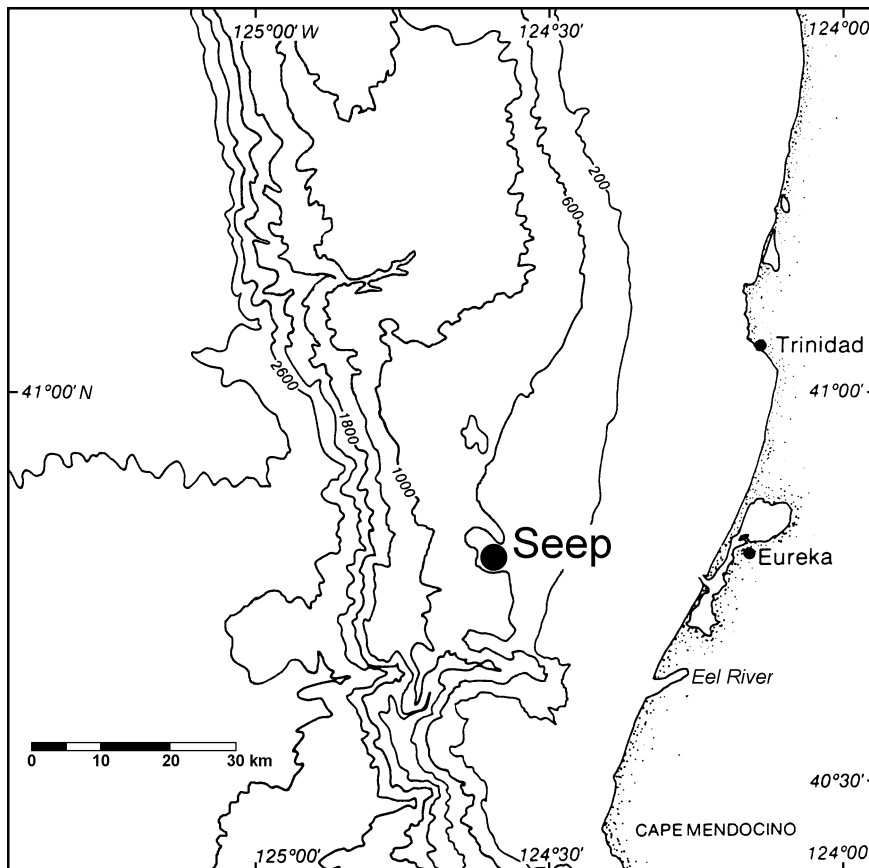


Abbildung 3: Untersuchungsgebiet vor der Küste Nordkaliforniens im östlichen Pazifik. Der ausgefüllte Kreis ● kennzeichnet das Seep Gebiet, in dem die Tauchgänge mit dem Tauchroboter durchgeführt wurden: 124° 35,6' W und 40° 47,1' N, Wassertiefe 492 m (modifiziert nach Brooks et al., 1991).

Die Sedimente des Akkretionskeils stammen aus der geologischen Zeitserie des Pliozän und Pleistozän (Brooks et al., 1991). Ein kleiner Teil dieser Sedimente (200 bis 600 m Sedimentmächtigkeit) wird mit der Gorda Platte unter die kontinentale nordamerikanische Platte subduziert; der größere Teil (1500 bis 3200 m Sedimentmächtigkeit) aggregiert an die nordkalifornische Schelfkante (Gulick et al., 1998; Green & Harry, 1999). Die ozeanische Platte schiebt sich mit einer Geschwindigkeit von 30 mm a^{-1} in einem flachen Winkel von 10 bis 12° unter die kontinentale nordamerikanische Platte (Oppenheimer et al., 1993; Wilson, 1993). Durch die tektonische Bewegung werden die Sedimente starken Deformationen, vor-

wiegend Kompressionen, ausgesetzt, die zur Bildung von Bruchzonen, Faltungen und Hebungen im Sediment führen (Brooks et al., 1991). Das Porenwasser, das in den Sedimenten enthalten ist, wird durch die Kompression ausgepreßt und gelangt durch Bruchzonen an die Sediment-Wasser-Grenzschicht (Langseth & Moore, 1990; Huene & Scholl, 1991). Das weiter östlich gelegene Eel River Becken stammt geologisch gesehen aus dem Zeitalter des späten Känozoikum (Brooks et al., 1991) und gilt als Sedimentbecken, das hohen fluvialen Sedimentanlieferungen ausgesetzt ist (McCrorry, 1995). Während im Winter die Einträge über die Flüsse dominieren, findet im Sommer eine hohe biologische Produktion in der euphotischen Zone bedingt durch Auftriebserscheinungen statt (Monaghan & Ruttenberg, 1999).

Zahlreiche im Sediment befindliche Gasanomalien und deren Austrittsstellen sind aus diesem Gebiet bekannt (Field & Jennings, 1987; Yun et al., 1999). Die Gase stammen von sich auflösenden Gashydraten, die dicht an der Sediment-Wasser-Grenzfläche liegen (Field & Kvenvolden, 1985; Brooks et al., 1991). Gashydrate sind eisähnliche feste Mischungen aus Methan und Wasser, die bei niedrigen Temperaturen und hohen Drücken stabil sind (Kvenvolden, 1988). Die meisten Untersuchungen deuten im Eel River Becken auf austretendes biogenes Methan hin (Field & Jennings, 1987). Hier im östlichen Eel River Becken wurden durch Kennicutt et al. (1989) und Brooks et al. (1991) chemoautotrophe Lebensgemeinschaften entdeckt und untersucht. Dabei belegen Messungen von $\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{15}\text{N}$ an den Geweben von benthischen Organismen aus dem Eel River Becken, daß die Kohlenstoff-Fixierung in ihrem Metabolismus auf Bakterien zurückzuführen ist (Kennicutt et al., 1989). Dies ist ein Hinweis auf die chemoautotrophe Lebensweise der Organismen.

2.2 Methodik

2.2.1 Meßprinzip

Es gibt zwei Verfahren, um den Bedarf einer chemischen Komponente im Metabolismus eines Organismus zu bestimmen. Zum einen kann die Abnahme der Komponente über die Zeit in einem geschlossenen System gemessen werden. Dabei mißt man die Ausgangskonzentration und nach einer festgelegten Zeitspanne die Endkonzentration im Umgebungsmedium (z.B. Bernard & Noakes, 1990; Vismann, 1990a). Der Nachteil dieser Methode ist, daß sie nicht den physiologischen Bedürfnissen des Organismus entspricht, da die Verminderung der chemischen Komponente nicht zwangsläufig den natürlichen Lebensbedingungen des Organismus entspricht. Die zweite Herangehensweise wird in einem Versuchsaufbau verwirklicht, bei dem die chemischen Komponente gemessen, und entsprechend dem Verbrauch des Organismus nachgeliefert wird (Mickel & Childress, 1982; Eriksen & Iversen, 1997). Solch ein Versuchsaufbau kann mit einem Chemostaten verwirklicht werden. Ein Chemostat kann einzelne oder mehrere chemische Komponenten kontrollieren und regeln (z.B. Vismann, 1996a; Eriksen & Iversen, 1997).

Ein experimenteller Aufbau für die Messung von Sulfidaufnahmeraten von *Calyptogena pacifica* muß verschiedene chemische Komponenten berücksichtigen. Neben der Bestimmung des Sulfidgehaltes ist es wichtig, sowohl die Sauerstoffkonzentration als auch den pH-Wert zu bestimmen. Der Sulfidgehalt einer Lösung nimmt durch Oxidation des Sulfids zu Thiosulfat bzw. Sulfat ab. Die Sulfid-Oxidationsrate hängt von dem Sauerstoffpartialdruck, der Temperatur, dem Grad der Vermischung, der Zusammensetzung der gelösten Ionen und dem pH-Wert der Lösung ab (Vismann, 1996a). Eine gleichzeitige Anwesenheit von Sauerstoff und Sulfid in einer Lösung ist nicht stabil. Millero (1986) untersuchte solche Mischungen und stellte fest, daß in Abhängigkeit der physikalischen und chemischen Versuchsbedingungen die Hälfte des Sulfids nach 24 Minuten bis 65 Stunden durch den vorhandenen Sauerstoff oxidiert sein kann. Die Konzentrationen von Sulfid und Sauerstoff müssen daher direkt im System kontrolliert werden, da die Oxidations- und Reduktionsraten nicht vorhergesagt werden können. Eine naßchemische Analyse, für Sauerstoff nach Winkler (1888) und Grasshoff et al. (1983), für Sulfid über N,N-Dimethyl-1,4-phenylendiamin-dihydrochlorid (Cline, 1969), ist aus diesem Grunde nicht angezeigt, da sich die chemischen Bedingungen im System schon

geändert haben können, bevor die Ergebnisse der Analyse vorliegen. Daher ist der Einsatz von kontinuierlich messenden Elektroden für den Versuchsaufbau angebracht. Für solche Messungen bietet sich eine direktpotentiometrische Methode an, weil Sulfid damit ohne Störung des chemischen Gleichgewichts bestimmt werden kann (Frevert & Galster, 1978).

Der pH-Wert kontrolliert die Anteile der einzelnen Sulfidionen in der Lösung, da H_2S in zwei Schritten dissoziieren kann:



Welche der drei Dissoziationsstufen (H_2S , HS^- oder S^{2-}) in der Lösung dominiert, ist pH abhängig (Mickel & Childress, 1982; Millero, 1986; Millero et al., 1988). In Abbildung 4 ist die Verteilung der drei Sulfidspezies in Abhängigkeit vom pH-Wert aufgetragen. Der normale pH-Wert des Meerwassers liegt zwischen 7,2 und 8,2 (Wright & Colling, 1995). In diesem Bereich liegt Sulfid vorwiegend als HS^- Ion vor.

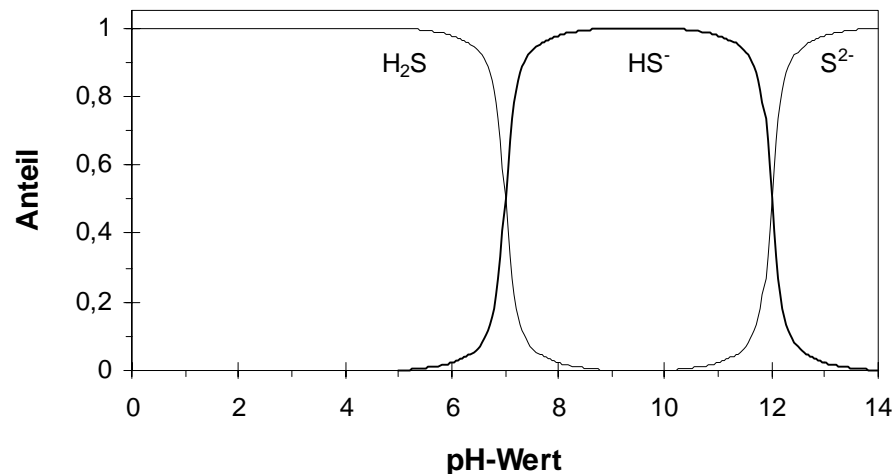


Abbildung 4: Prozentuale Verteilung der verschiedenen Sulfidspezies H_2S , HS^- und S^{2-} in Abhängigkeit vom pH-Wert in einer wässrigen Lösung. Die Kurve für HS^- wurde in einer größeren Strickstärke dargestellt, um sie besser von den anderen Kurven unterscheiden zu können (modifiziert nach Faure, 1998).

Ein solcher Versuchsaufbau, der die Komponenten Sauerstoff, Sulfid und pH-Wert mißt und reguliert, wurde für die Untersuchung von Sulfidtoleranzen an marinen Organismen eingesetzt (Hagerman & Vismann, 1993; Vismann, 1996b; Vistisen & Vismann, 1997; Game-

nick et al., 1998). Für die Ermittlung des Sulfidbedarfs chemoautotropher Muscheln, die ihre sulfidoxidierenden endosymbiontischen Bakterien mit Sulfid versorgen müssen, kam ein solcher Versuchsaufbau bisher nicht zum Einsatz.

2.2.2 Sulfidmessung

Die Sulfidkonzentration einer Lösung kann mit einer ionensensitiven Silber-Silbersulfid-Elektrode gemessen werden (Berner, 1963). Sie besteht aus einem Silberdraht, der in eine elektrisch nichtleitende Vergußmasse eingebettet wird (Microscale Measurement, Den Haag, Niederlande). Der aus Edelstahl gefertigte Elektrodenkörper wird auf die elektrische Masse gelegt und ist damit gegenüber Störspannungen abgeschirmt. Der aktive Teil der Kathode ist die Silbersulfidschicht, die sich bildet, wenn die Spitze des Silberdrahtes mit Sulfidionen in Kontakt kommt. Dabei lautet die Reaktion der Elektroden Halbzelle:



Die Gegenelektrode (Anode) ist eine Ag/AgCl Bezugselektrode, die mit einer 3 M KCl-Lösung gefüllt ist. Gemessen wird das elektrische Potential zwischen den beiden Elektroden mit einem Millivoltmeter (Schott Modell CG 825, Hofheim). Streng genommen mißt die Ag-Ag₂S Elektrode nicht Sulfid, sondern die elektromotorische Kraft (EMK) der Silberionenaktivität (Peiffer et al., 1986). Werden die Messungen aber in einer Lösung vorgenommen, die die gleiche Salinität, Temperatur und den gleichen pH-Wert wie die Kalibrierlösung hat, so entfallen laut Vissman (1996a) die Berechnungen zur Konzentration bzw. Aktivität der einzelnen Dissoziationsstufen der Sulfidionen in der Lösung nach den Gleichungen 1 und 2.

Zur Ausbildung der Silbersulfidschicht und Aktivierung wurde die Elektrode vor der Kalibrierung und dem Meßeinsatz für 12 h in eine 1 M Na₂S Lösung getaucht.

Die Kalibrierung der Sulfidsonde wurde in einem abgedunkelten Reaktionsgefäß bei *in situ* Temperatur von +4°C in pH-Wert gepuffertem, sauerstofffreiem Meerwasser durchgeführt. Nach Erreichen eines konstanten Potentials zwischen Meß- und Gegenelektrode wurde die Sulfidkonzentration in der Meerwasserlösung durch Zugabe einer 3,15 M Natriumsulfidlösung schrittweise bis auf 250 µM erhöht.

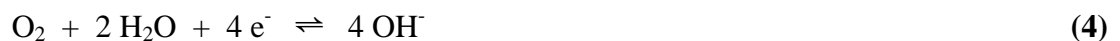
Die direktpotentiometrische Sulfidmessung ist gekennzeichnet von einer logarithmischen Beziehung zwischen der Sulfidkonzentration in der Lösung und der gemessenen Spannung

zwischen Meß- und Gegenelektrode. Auch die hier eingesetzte Meßelektrode folgte dieser Gesetzmäßigkeit. In dem Meßbereich von 40 bis 70 μM lag die gemessene Spannung zwischen Anode und Kathode zwischen -89 bzw. -135 mV. Für die Sulfidelektrode wurde eine Genauigkeit von $\pm 2 \mu\text{M}$ ermittelt.

Im Verlauf der vorliegenden Arbeit wird der Begriff "Sulfid" stets für die Summe der drei Sulfidspezies H_2S , HS^- und S^{2-} verwandt.

2.2.3 Sauerstoffmessung

Der Gehalt an gelöstem Sauerstoff wurde ampèrometrisch gemessen. Für die Messung wurde eine Mikroelektrode eingesetzt, die bei Bestimmungen von Sauerstoffprofilen im Sediment auf Submillimeterskalen eingesetzt werden können (Revsbech et al., 1998). Sie ist aus einer goldbeschichteten Platinkathode und einer Silberanode aufgebaut (Revsbech & Jørgensen, 1986). Beide Elektroden sind in einem konischen elektrolytgefüllten Glaskörper eingebettet. Die 5 μm dicke Spitze des Glaskörpers ist mit einem Silikonstopfen verschlossen, der aber im hohen Maße sauerstoffpermeabel ist. Dieser Elektrodenaufbau entspricht dem Clark-Typ (Revsbech & Jørgensen, 1986) mit geschirmter Kathode (Revsbech, 1989). Der eindringende gelöste Sauerstoff wird an der Goldkathode gemäß Gleichung 4 reduziert.



Pro Sauerstoffmolekül werden demnach vier Elektronen verbraucht. Die Elektronen stammen von der Gegenelektrode. An ihr geht Silber nach Gleichung 5 oxidativ in Lösung.



Der bei dieser chemischen Reaktion fließende Strom ist der Menge des chemisch umgesetzten Stoffes proportional (Kunze, 1986). Da die Reduktion des Sauerstoffes an der Kathode nicht spontan abläuft, wurde eine Vorspannung von -650 mV zwischen Kathode und Anode angelegt (Revsbech & Jørgensen, 1986). Aus Gleichung 4 wird deutlich, daß die Sauerstoffelektrode für die Messung selbst schon Sauerstoff verbraucht. Der Vorteil der Glaselektroden gegenüber herkömmlichen Elektroden liegt in der geringen Sauerstoffzehrung der extrem dünn ausgezogenen Elektrodenspitze. Herkömmliche Sauerstoffelektroden weisen einen Eigenverbrauch an Sauerstoff auf, der in stagnierenden Systemen nicht zu vernachlässigen ist

(Revsbech & Ward, 1983). Ein weiterer Vorteil liegt in der Unempfindlichkeit der Glaselektroden gegenüber gleichzeitig in der Lösung anwesendem Sulfid (Revsbech & Ward, 1983).

Die Sauerstoffelektroden wurden am Forschungszentrum GEOMAR gefertigt (S. Grandel, GEOMAR, Kiel). Die Zweipunktkalibrierung der Elektrode wurde mit einem Picoamperemeter (Keithley 485, Cleveland Ohio, USA) gegen eine Winklertitration durchgeführt. Bei konstanter Temperatur besteht zwischen der Konzentration des gelösten Sauerstoffes und dem Elektrodensignal eine lineare Beziehung (Archer et al., 1989). Die Kalibrierung wurde bei *in situ* Temperatur von +4°C durchgeführt.

2.2.4 pH Messung

Die pH Messung wurde mit einer handelsüblichen pH Sonde durchgeführt, die zusätzlich mit einem Pt 100 Temperaturfühler ausgestattet war (Mettler Toledo, Urdorf, Schweiz). Die Kalibrierung der Sonde wurde bei *in situ* Temperatur von +4°C mit Puffern durchgeführt, die an die marinen Verhältnisse angepaßt sind (Dickson, 1984; Dickson, 1993; Millero et al., 1993). Als Meßgerät diente ein pH Meter der Firma Schott (Modell CG 841, Hofheim).

2.2.5 Aufbau des Chemostaten und Regelungsprogramm

Als Inkubationsgefäß wurde ein 750 ml fassendes Plexiglas[®]-Aquarium eingesetzt. Die Sonden wurden durch den Aquariumsdeckel geführt. Das Aquarium wurde mit filtriertem Meerwasser gefüllt, und mittels Rührfisch und Magnetrührer langsam und stetig durchmischt. Diese gesamte Anlage wurde in einem Kühlschrankschrank aufgebaut. Nach dem Temperaturangleich auf +4°C wurde die Oberfläche mit Paraffinöl überschichtet, um den Gasaustausch zwischen Meerwasser und Atmosphäre zu verringern. Das Versuchsaquarium war frei von Sediment.

Der Sulfidgehalt im Versuchsaquarium wurde über die geregelte Zugabe einer Sulfidstammlösung gesteuert: Ein 200 ml Erlenmeyerkolben oberhalb des Aquariums war mit einer 3,125 M Na₂S Lösung gefüllt, die ebenfalls mit Paraffinöl überschichtet wurde. Ein gasdichter Tygon[®]-Schlauch verband nach dem Heberprinzip den Vorratszylinder mit dem Aquarium, wobei ein elektrisch gesteuertes Magnetventil (Bürkert, Kiel) zwischengeschaltet war.

Der pH-Wert wurde auf ähnliche Weise reguliert: Zwei 250 ml Vorratsflaschen waren mit je 0,25 M NaOH bzw. 0,25 M HCl Lösung gefüllt. Auch hier war die Schlauchverbindung mit je einem zwischengeschalteten elektrischen Magnetventil versehen, das mit säure- bzw. lau-

genfesten Dichtungen ausgestattet war. Alle Vorratslösungen wurden mit filtriertem Meerwasser angesetzt, um eine Verringerung des Salzgehaltes im Versuchsaquarium zu vermeiden. Die Zugabemenge wurde über die Zeit gesteuert, in der das Magnetventil geöffnet war. Im Rahmen dieses Versuchsaufbaus war es möglich, das Ventil für die Dauer von 0,5 sec zu öffnen. Die zeitabhängigen Durchflußmengen wurden im Labor mit einer Feinwaage kalibriert. Dabei wurde der gleiche Versuchsaufbau mit denselben Schläuchen und Schlauchlängen und den gleichen Höhendifferenzen verwandt. Bei der Sulfidzugabe wurde bei einer Ventilöffnung von 0,5 sec eine Menge von $0,102 \pm 0,015$ ml in das Aquarium eingeleitet. Eine Veränderung des hydrostatischen Druckes durch Abnahme des Vorratsvolumens war bei den gegebenen Mengen zu vernachlässigen. Es wurde somit von einem konstanten Durchflußvolumen bei einem gegebenen Öffnungsintervall des Magnetventils ausgegangen.

Die Säure- bzw. Laugenzugaben betragen bei gleicher Öffnungszeit von 0,5 sec $0,068 \pm 0,008$ ml. Die zugegebene Menge an Säure bzw. Lauge war geringer, da die Vorratsgefäße auf einem niedrigeren Niveau standen, und somit ein geringerer hydrostatischer Druck aufgebaut wurde. Auch hier wurde keine meßbare Verringerung der Zugabemenge durch Abnahme des Vorratvolumens festgestellt.

Der Sauerstoffgehalt wurde mittels Druckluft bzw. Stickstoffgas geregelt. Die Druckluft wurde über eine Aquariumpumpe und Sprudelstein zugeführt. Der Stickstoff gelangte aus einer 200 bar Vorratsflasche mit Reduzierventil. Das Ventil verminderte den Druck auf 0,2 bar über Umgebungsdruck. Über ein elektrisch gesteuertes Magnetventil und Sprudelstein gelangte das Stickstoffgas in das Versuchsaquarium.

Für die Registrierung und Steuerung des Chemostaten wurde ein Laptop-Computer mit Pentium Prozessor und Docking-Station eingesetzt. Die Docking-Station diente der Aufnahme einer Analog/Digital-16 Bit I/O Karte mit bis zu acht analogen Eingängen und 20 digitalen Ausgängen (Kolter, Erfstadt).

Die Schreiberausgänge der Sauerstoff- und Sulfidmeßgeräte wurden mit abgeschirmten BNC Kabeln direkt auf die AD-Karte gelegt. Da die pH-Elektrode zusätzlich mit einem Temperaturfühler ausgestattet war, wurden beide Signale über die serielle Schnittstelle von Meßgerät und Computer übertragen und nicht auf die AD-Karte geschickt. Der schematische Versuchsaufbau ist in Abbildung 5 dargestellt.

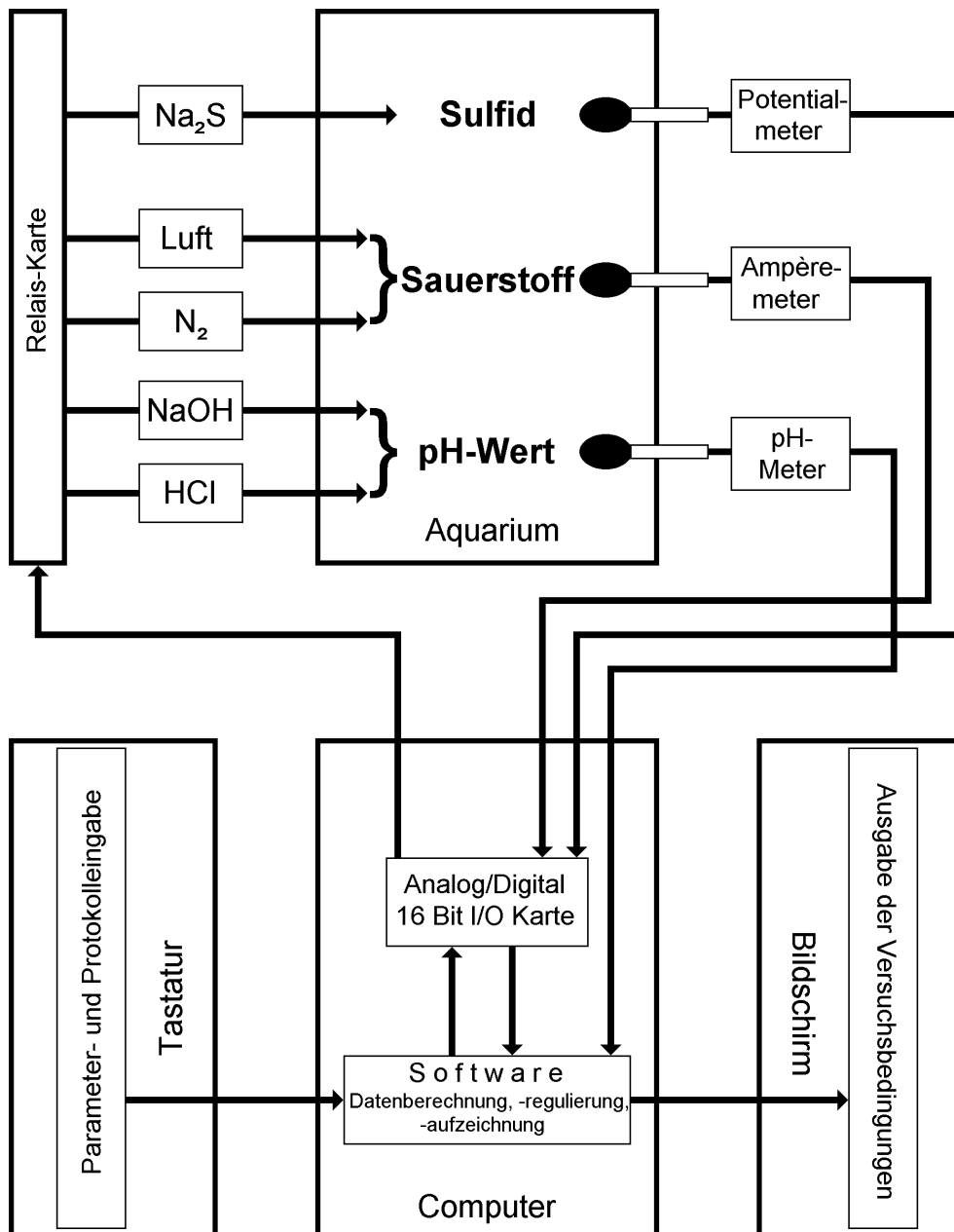


Abbildung 5: Schematischer Aufbau des Chemostaten und seiner Steuerung. Der detaillierte Aufbau der Relais-Karte (oben links) ist in Abbildung 6 dargestellt.

Die vom Computer ausgehenden Steuersignale für die verschiedenen Magnetventile bzw. für die Aquariumpumpe wurden auf eine eigens angefertigte Relaiskarte geschickt, die mit einer eigenen Stromversorgung ausgestattet war. Damit wurde die AD-Karte nicht mit den Schaltimpulsen und -strömen für die Magnetventile belastet, die zu Störungen der Meßsignale führen könnten. Der Aufbau der Relaiskarte ist in Abbildung 6 dargestellt.

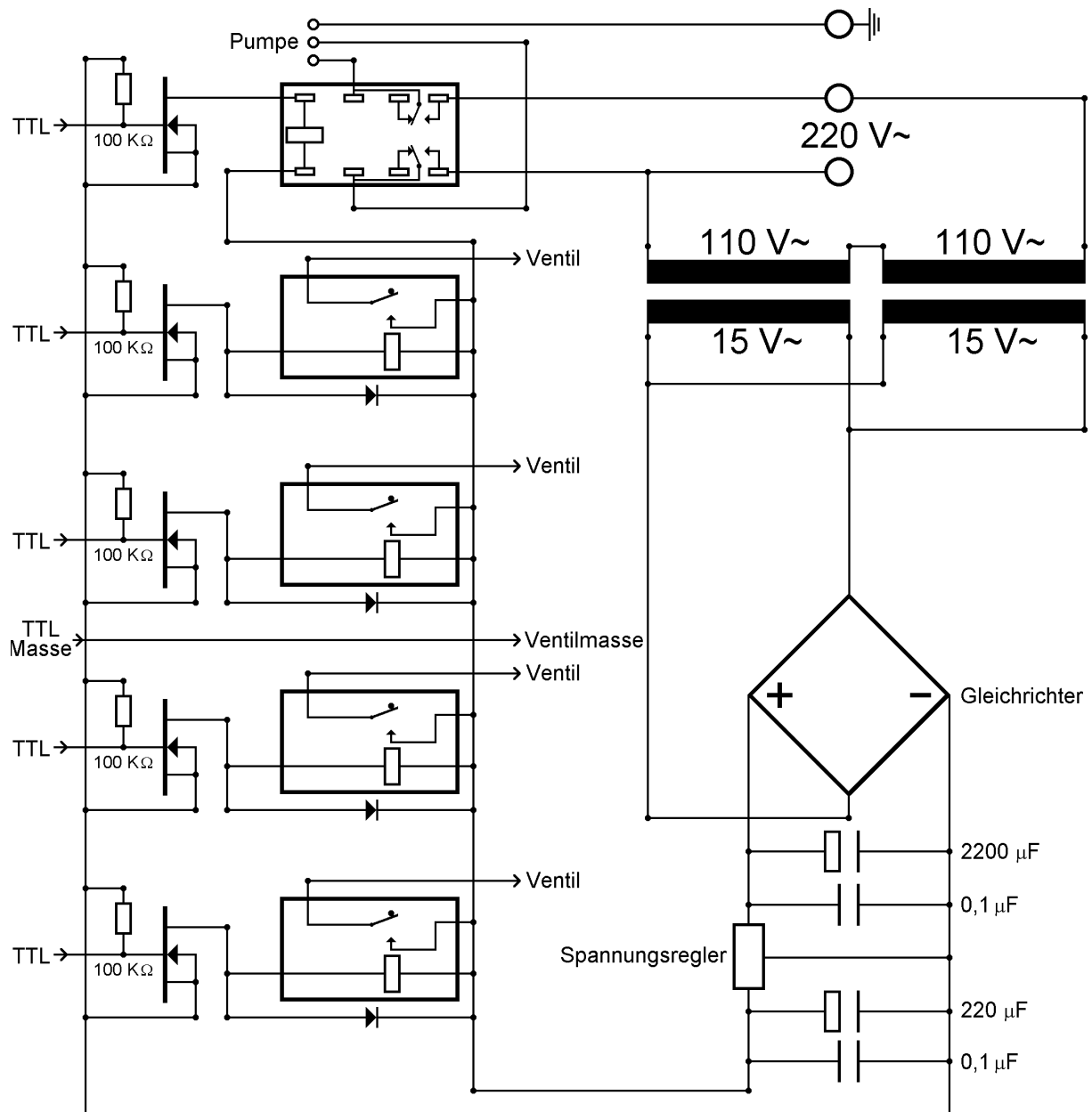


Abbildung 6: Schaltplan der Relaiskarte zur Übertragung der TTL-Steuersignale auf die Magnetventile bzw. Aquariumpumpe. Das TTL-Signal wird über einen MOSFET (links) auf das Steuerrelais (Mitte) geleitet. Dieses schaltet die Ventile, die mit geregelten Gleichstrom (rechts) betrieben werden. Die 230 V Aquariumpumpe ("Pumpe") wird mit einem doppelschaltenden Relais (oben) geschaltet (Schaltungsdesign: T. Viergurz, GEOMAR, Kiel).

Das TTL-Signal (**T**ransistor-**T**ransistor-**L**ogik) von der AD-Karte wurde über einen MOSFET (**M**etal **O**xid **S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor), der als Verstärker wirkte, auf ein Schaltrelais geleitet. Im Gegensatz zu herkömmlichen Transistoren, die durch das Anlegen von elektrischen Strömen geschaltet werden, reicht beim MOSFET allein das Anlegen einer elektrischen Spannung zum Umschalten aus. Das durch eine Schutzdiode abgesicherte Relais,

schaltete den Strom für das Ventil. Der Ventilstrom stammte folglich von der Relaiskarte und nicht von der AD-Karte. Auf diese Weise wurde die Übertragung von Störspannungen auf die AD-Karte vermieden, die die Meßsignale hätten beeinflussen können. Für die Schaltung der Aquariumpumpe wurde ein doppelschaltendes Relais verwandt, da in diesem Fall 220 V statt 15 V geschaltet wurden. Auf diese Weise lag im abgeschalteten Zustand keine Spannung an der Aquariumpumpe an.

Das Computerprogramm CHEMOST.BAS zur Datenberechnung, -regulierung und -aufzeichnung wurde in QBasic Version 1.1 geschrieben. Diese Programmiersprache ist in dem PC Betriebssystem DOS[®] implementiert und garantiert einen einfachen Austausch auf verschiedenen Rechnern.

Nach der Deklaration der Variablen und Prozeduren wurde die AD-Karte initialisiert. Daraufhin forderte das Programm den Benutzer auf, den Sollwert und das Abweichungsintervall für die drei Parameter Sulfid, Sauerstoff und pH-Wert einzugeben. Die Grenzkonzentrationen errechneten sich aus Sollwert plus bzw. minus Abweichungsintervall. Anschließend wurden vom Benutzer die Öffnungszeiten der einzelnen Ventile abgefragt, die die Zugabemengen der Lösungen steuerten. Die Sensoren hatten verschieden schnelle Ansprechzeiten auf die Veränderung der chemischen Bedingungen im Versuchsaquarium. Um ein Überschießen der Werte zu verhindern, wurde im folgenden die erforderliche Wartezeit für die einzelnen Parameter vom Benutzer eingegeben, bevor der Sollwert erneut mit dem Istwert verglichen wurde. Die Eingangswerte wurden geglättet, um das Rauschen besonders des Sauerstoffsignals zu vermindern. Wie viele Glieder die Glättung haben sollte, wurde ebenfalls beim Start des Programms abgefragt. Die Signale der Sulfid- und pH-Elektrode waren so stabil, daß keine Glättung notwendig wurde. Nachdem der Dateiname und das zeitliche Speicherintervall abgefragt wurde, speicherte das Programm CHEMOST.BAS in einer Kopfzeile alle eingegebenen Parameter, Datum und Uhrzeit. Anschließend sprang das Programm in die Hauptmeßschleife. Hier wurde in einer Endlosschleife der Sollwert und der Istwert für die drei Parameter Sulfid, Sauerstoff und pH-Wert verglichen und auf dem Bildschirm ausgegeben. Bei einer Abweichung über die zuvor definierten Grenzen hinaus, veranlaßte das Computerprogramm die zeitlich definierte Öffnung der entsprechenden Ventile. Daraufhin wurde die Wartezeit für den entsprechenden Parameter aktiviert, die verstreichen mußte, bevor ein erneuter Vergleich zwischen Soll- und Istwert stattfinden konnte. Alle zu Beginn eingegebenen Parameter wurden ebenfalls auf der Bildschirmmaske ausgegeben.

Gemäß der Speicherintervalle wurden die Uhrzeit, die gemessenen Konzentrationen, die Aktivitäten an den Ventilen bzw. an der Pumpe, die gemessene Temperatur der pH Sonde und gegebenenfalls ein eingegebener Kommentar (mit genauer Uhrzeit) in das Datenfile auf der Festplatte geschrieben. Alle Werte, die beim Start des Programms CHEMOST.BAS abgefragt und festgelegt wurden, konnten bei Bedarf auch im laufenden Programm verändert werden. Die abgeänderten Variablen wurden dann ebenfalls mit der Uhrzeit in dem Datenfile abgespeichert. Das Datenfile wurde in einem Format gesichert, das in üblichen Tabellenkalkulationsprogrammen für die Auswertung eingelesen werden konnte.

2.2.6 Probengewinnung

Die seep-assoziierten chemoautotrophen Lebensgemeinschaften sind um die Fluidaustrittsstellen angesiedelt. Die flächenhafte Ausdehnung der beprobten Gemeinschaften beträgt nur wenige Quadratmeter. Mit einer unkontrollierten, blinden Probennahme mit Greifer oder Dredge sind diese Gemeinschaften leicht zu verfehlen. Daher wurden diese Lebensgemeinschaften mit videogeführten Geräten gesucht und anschließend wie unten beschrieben beprobt.

Während der Fahrt "PACNORWEST 97" vom 14. bis 22. Oktober 1997 auf dem umgebauten Ölplattformversorger LANEY CHOUEST (LüA: 71 m, Heimathafen San Diego, Kalifornien) wurde das ROV "Scorpio" (**R**emotely **O**perating **V**ehicle) eingesetzt. Die Beprobungsstation für die Muscheln der Gattung *Calyptogena pacifica* (Familie Vesicomidae) lag auf 124° 35,6' W und 40° 47,1' N in einer Wassertiefe von 492 m (Abbildung 3). Bei dem ROV handelt es sich um einen unbemannter Tauchroboter, der über den Draht mit dem Schiff verbunden ist (Abbildung 7).

Der Draht dient neben dem Ein- und Aussetzen zusätzlich der Energieversorgung zum Tauchroboter und der Datenübertragung vom Gerät zurück auf das Schiff. Die Energieversorgung wird über Koaxialleitungen gewährleistet, die Datenübertragung wird durch ebenfalls im Draht enthaltene Lichtwellenleiter sichergestellt. Der Tauchroboter besitzt neben mehreren schwenkbaren Videokameras und entsprechenden Scheinwerfern einen eigenen Antrieb. Er wird von Bord des Schiffes aus über die Propeller mit Hilfe der Kameras aktiv und zielgerichtet von einem oder zwei Piloten gesteuert. Die beiden Manipulatoren am vorderen Ende des Tauchroboters sind in mehreren Achsen frei beweglich und dienen der Probensammlung während des Tauchganges.



Abbildung 7: Das ROV "Scorpio" beim Bergen. Rechts erkennt man die beiden Manipulatoren und den Stahlrahmen, der die Lampen und die Videokameras trägt. In der Mitte sind die Telemetrie-einheiten und die Querpropeller sichtbar. Ganz links ist der senkrecht angebrachte Sender für die Respondernavigation erkennbar (Foto: N. v. Mirbach).

Über eine Respondernavigation kann die genaue Position des Tauchroboters nach geographischer Länge und Breite online dokumentiert werden. Das Forschungsschiff LANEY CHOUEST war während der Ausfahrt mit einem DGPS-System (**D**ifferential **G**lobal **P**ositioning **S**ystem) ausgestattet, das mit Hilfe landgestützter Referenzstationen eine Navigation mit ± 10 m Genauigkeit erlaubte (Holler, 1995). Zusätzlich war das Schiff mit einem dynamischen Positionierungssystem ausgerüstet, das es ermöglichte, die Schiffsposition mit Hilfe der DGPS-Daten automatisch zu korrigieren.

Der Vorteil des unbemannten Tauchroboters gegenüber bemannten Tauchbooten lag beim Einsatz im Eel River Becken in den zeitlich unbegrenzten Tauchzeiten. Tauchroboter sind nicht durch Energie- und Sauerstoffversorgung limitiert. Zudem kann auf aufwendige Technik verzichtet werden, um Menschen sicher nach unten und wieder zurück an die Oberfläche zu bringen. Da die Videobilder an Bord des Schiffes übermittelt werden, konnten gleichzeitig mehrere Wissenschaftler den Tauchgang beobachten und flexibler auf verschiedene Situationen reagieren. Bei einem Einsatz mit einem bemannten Tauchboot sind höchstens zwei

Wissenschaftler neben dem Piloten anwesend. Bei einem ROV-Einsatz ist es sogar möglich, den Teilnehmerkreis über die Schiffsbesatzung hinaus auszudehnen, wenn das Videosignal über Satellit direkt an Land übermittelt wird. In diesem Fall könnte ein großes Auditorium am Tauchgang aktiv teilnehmen.

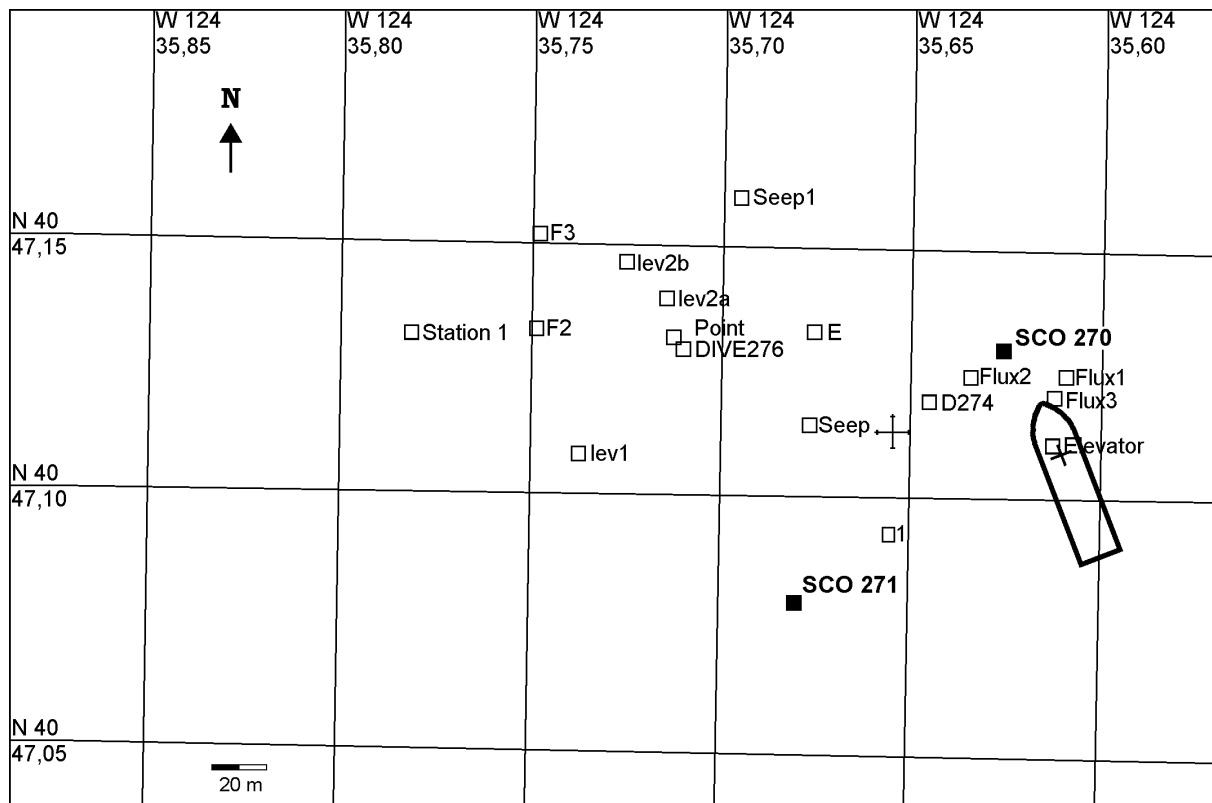


Abbildung 8: Der Navigationsbildschirm vom Probenahmegebiet vor der nordkalifornischen Küste in einer Wassertiefe von 492 m. Die vesicomiden Muscheln stammen von den Tauchgängen SCO 270 und SCO 271. Rechts ist maßstabstreu der Umriss des Forschungsschiffes LANEY CHOUEST abgebildet (vergleiche auch Tabelle 1).

Während der Taucheinsätze, die der Probenahme dienten, war das ROV mit einem Sammelkasten zwischen den beiden Manipulatoren ausgestattet. Die Manipulatorarme des Tauchroboters waren während dieser Tauchgänge mit einem kescherartigen Netz (scoop bag) ausgerüstet, mit dem die an der Sediment-Wasser-Grenzfläche lebenden Muscheln, eingesammelt und an Bord des Schiffes gebracht wurden. *Calypptogena pacifica* wurde während der Tauchgänge SCO 270 und SCO 271 gesammelt (Abbildung 8 und Tabelle 1). Bei Wassertiefen von nur 492 m wurden die geborgenen lebenden Tiere in einem Kühllaquarium gehalten, bevor sie in das Versuchsaquarium überführt wurden. Das Kühllaquarium war mit sauerstoffhaltigem, sulfidfreien, gefiltertem Oberflächenwasser gefüllt, und die Temperatur betrug

+4°C. Kurze Zeit nachdem sich die Muscheln im Kühlaquarium befanden, öffneten sie ihre Schalen, streckten den Fuß aus und begannen, Wasser durch ihre Kiemen zu pumpen.

Tabelle 1: Übersicht über die beiden ROV-Tauchgänge SCO 270 und 271, auf denen die vesicomyi- den Muscheln *Calyplogena pacifica* gesammelt wurden.

	Tauchgang SCO 270	Tauchgang SCO 271
Position	124° 35,68' W / 40° 47,08' N	124° 35,63' W / 40° 47,13' N
Wassertiefe	492 m	492 m
Start des Tauchgangs	15.10.97 17:00 UTC	16.10.97 22:44 UTC
Bodensicht	15.10.97 17:30 UTC	16.10.97 23:31 UTC
Boden verlassen	16.10.97 04:44 UTC	17.10.97 15:50 UTC
ROV an Deck	16.10.97 05:14 UTC	17.10.97 16:36 UTC

Vor Beginn der Versuche wurden die Schalen der lebenden Tiere vom anhaftenden Sedi- ment gereinigt. Die Tiere wurden erst in das Versuchsaquarium gesetzt, nachdem der Sulfid- gehalt die Versuchskonzentration erreicht hatte. Zwischen den Versuchen mit den Muscheln aus Tauchgang SCO 270 und SCO 271 wurde ein Blindversuch durchgeführt. Der Aufbau dieses Blindversuches war bis auf das Fehlen der Muscheln identisch zu den anderen Versu- chen. Er sollte das Eigenverhalten, insbesondere den Sulfidverbrauch der Versuchsanordnung selbst bestimmen.

Nach der Beendigung der Versuche wurden die Tiere eingefroren. An Land wurden die Muscheln im Labor vermessen, geöffnet und das Feuchtgewicht der Tiere ohne Schale be- stimmt. Die Muschelspezies wurde von J. Barry, Monterey Bay Research Institute, Moss Lan- ding, Kalifornien anhand von Schalenmerkmalen identifiziert.

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Sulfidaufnahme von *Calypptogena pacifica*

Versuch 1: *C. pacifica* mit einer Schalenlänge von 32 mm

In der ersten Versuchsdurchführung wurde eine Muschel der Gattung *C. pacifica* in das Versuchsaquarium verbracht. Das Tier stammt von dem über 12 Stunden dauernden Tauchgang SCO 270. Die Muschel hatte eine Schalenlänge von 32 mm und ein Gewicht von 0,7 g (Feuchtgewicht ohne Schale). Nach einer fünfstündigen Anpassungszeit im Kühlaquarium wurde mit dem Versuch begonnen. Der Versuch selbst erstreckte sich über 3 h 17 min. In Tabelle 2 sind die Grenzkonzentrationen der drei Parameter Sulfid, Sauerstoff und pH-Wert sowie die Aktivitäten an den Ventilen aufgeführt. Die Grenzkonzentrationen errechneten sich aus dem Sollwert plus bzw. minus Abweichungsintervall.

Tabelle 2: Übersicht über die Grenzkonzentrationen der drei Parameter und die Aktivitäten an den Ventilen des ersten Versuchs mit *C. pacifica* mit einer Schalenlänge von 32 mm. Für Sulfid wurde keine obere Grenzkonzentration angegeben, da der Versuchsaufbau keine Verminderung der Sulfidkonzentration vorsah.

Parameter	Grenzkonzentration		Anzahl der Ereignisse				
	untere	obere	Sulfid	Luft	Stickst.	Lauge	Säure
Sulfid	47,0 [µM]	–	16	–	–	–	–
Sauerstoff	66,1 [µM]	241,5 [µM]	–	6	6	–	–
pH-Wert	7,89	7,91	–	–	–	0	0

Die Konzentrationsverläufe der drei Parameter sind in Abbildung 9a-c aufgezeigt. Nach dem Absinken der Sulfidkonzentration auf den Schwellenwert von 47 µM wurde das Ventil für die Sulfidstammlösung zweimal geöffnet. Daraufhin stieg die Sulfidkonzentration an, um nach 2½ Stunden wieder auf die Grenzkonzentration abzusinken. Daraufhin wurde das Ventil der Sulfidstammlösung innerhalb von 40 Minuten 14 mal geöffnet, bevor der Meßwert deutlich anstieg. Gegen 05:50 UTC wurde der Versuch beendet.

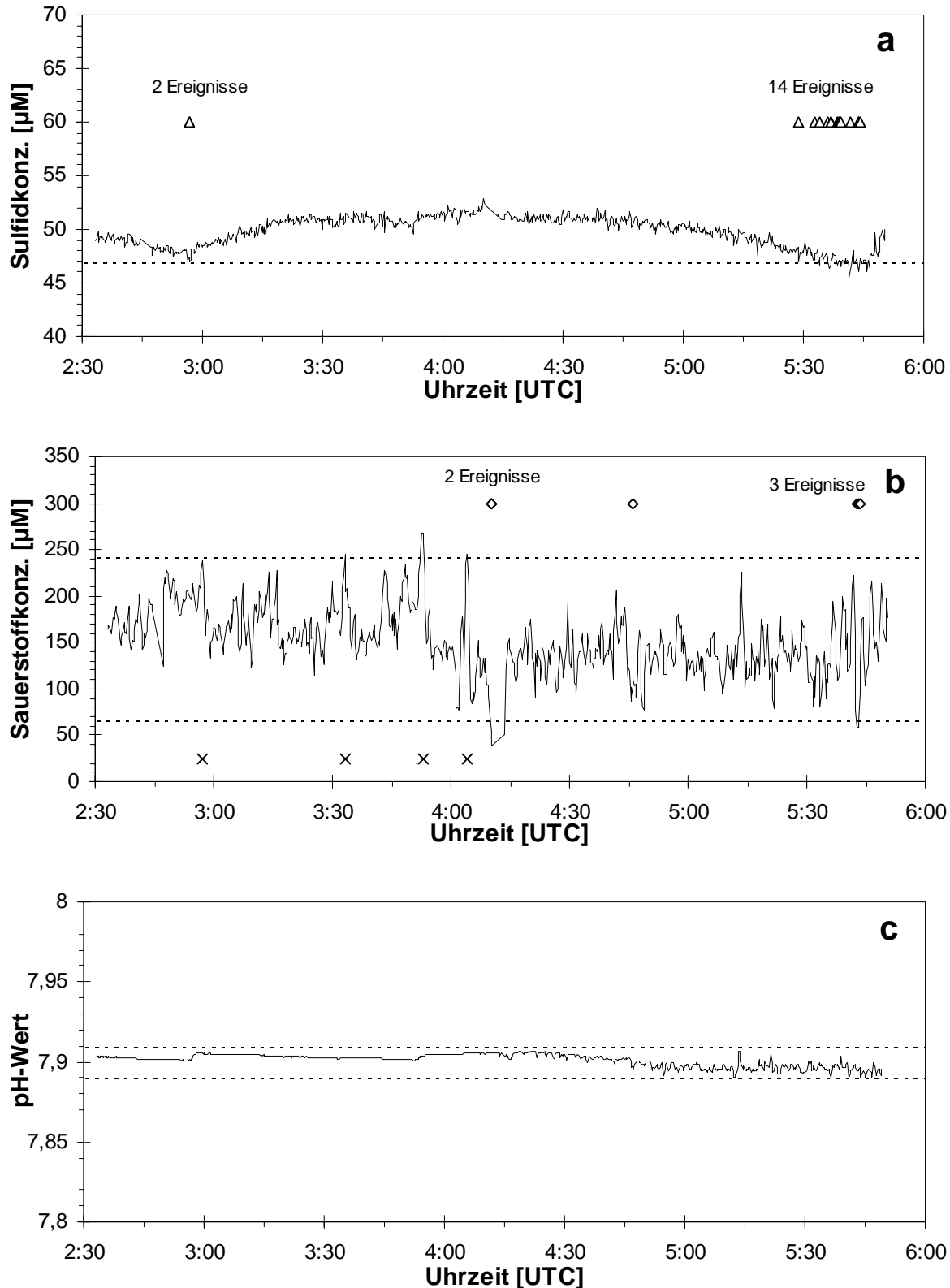


Abbildung 9: Zeitabhängiger Konzentrationsverlauf von Sulfid (a), Sauerstoff (b) und pH (c) im Versuchsaquarium für *Calyptogena pacifica* von 32 mm Schalenlänge (Tauchgang: SCO 270) über einen Zeitraum von 3 h 17 min. Die gestrichelten Linien repräsentieren die Ober- bzw. Untergrenze des jeweiligen Parameters. Die Symbole (Δ \diamond \times) markieren die Zugabe von Sulfid, Luft bzw. Stickstoff in das Versuchsaquarium.

Die Meßwerte der Sauerstoffkonzentration fluktuierten trotz einer 10 stufigen Glättung der Meßwerte stark. In der ersten Hälfte des Versuches bewegten sich die Sauerstoffmeßwerte eher an der oberen Grenze von 241,5 μM , wodurch vermehrt Stickstoffgas in das Aquarium gegeben wurde. In der zweiten Versuchshälfte erreichten die Konzentrationen dagegen häufiger den unteren Schwellenwert von 66,1 μM , wodurch wiederholt Luft in das Aquarium gegeben wurde.

Der Verlauf des pH-Wertes verlief über die gesamte Zeit in dem vorgegebenen Intervall. In den ersten zwei Stunden ist in Abbildung 9c ein recht konstanter Konzentrationsverlauf erkennbar. Anschließend wurden die Schwankungen der pH-Meßwerte größer, ohne daß es zu einer Überschreitung der Grenzwerte von 7,89 bzw. 7,91 kam. Daher wurde in diesem Versuchsabschnitt weder Säure noch Base in das Versuchsaquarium gegeben.

Blindversuch

Zwischen dem ersten und dem zweiten Versuch wurde ein Blindversuch durchgeführt, der den Sulfidverbrauch des Versuchsaufbaus selbst bestimmte. Die Anordnung war identisch zu den anderen Versuchen bis auf die Tatsache, daß kein Tier in das Aquarium gesetzt wurde. Der Blindversuch wurde über einen Zeitraum von 3 h 44 min durchgeführt. Die vorgegebenen Parameter und die Reaktionen sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht über die Grenzkonzentrationen der drei Parameter und die Aktivitäten an den Ventilen des Blindversuches. Für Sulfid wurde keine obere Grenzkonzentration angegeben, da der Versuchsaufbau keine Verminderung der Sulfidkonzentration vorsah.

Parameter	Grenzkonzentration		Anzahl der Ereignisse				
	untere	obere	Sulfid	Luft	Stickst.	Lauge	Säure
Sulfid	47,0 [μM]	–	3	–	–	–	–
Sauerstoff	0,0 [μM]	535,5 [μM]	–	0	0	–	–
pH-Wert	7,89	7,91	–	–	–	0	2

Die Konzentrationsverläufe der drei Parameter sind in der Abbildung 10a'-c' aufgezeigt. Die Sulfidkonzentration wies nur geringe Schwankungen auf, während des Blindversuches wurde insgesamt nur drei mal Sulfid in das Versuchsaquarium gegeben. Die Sauerstoffkonzentrationen schwankten bei diesem Blindversuch zu stark, so daß die Grenzkonzentrationen weit auseinander gelegt werden mußten.

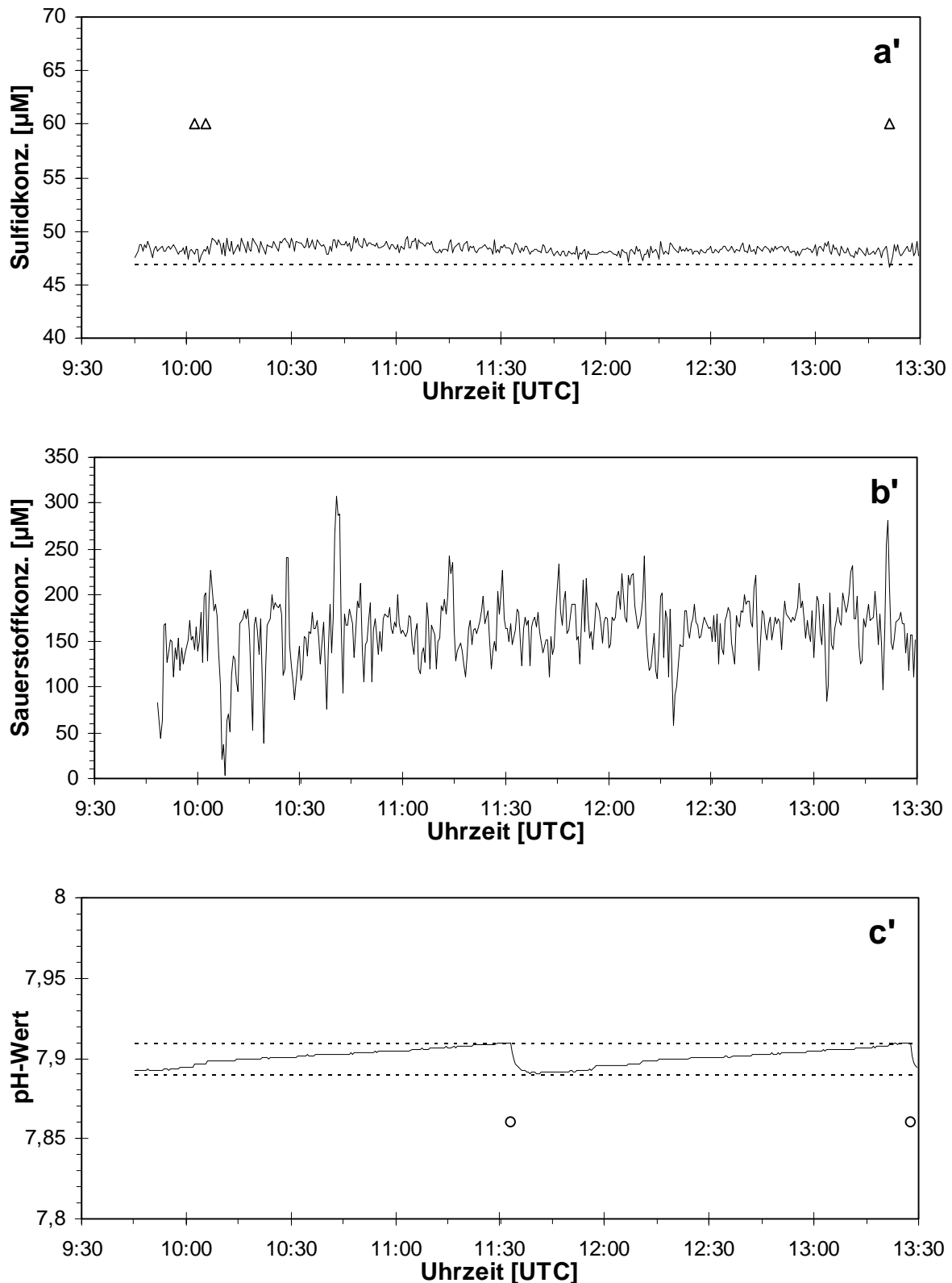


Abbildung 10: Zeitabhängiger Konzentrationsverlauf von Sulfid (a'), Sauerstoff (b') und pH (c') im Blindversuch **ohne** *Calyptogena pacifica* über einen Zeitraum von 3 h 44 min. Die gestrichelten Linien repräsentieren die Ober- bzw. Untergrenze des jeweiligen Parameters. Die Symbole (Δ \circ) markieren die Zeitpunkte der Zugabe von Sulfid bzw. Säure in das Versuchsaquarium.

Die obere Grenzkonzentration für Sauerstoff ist somit nicht mehr in der Abbildung 10b' dargestellt, die untere Grenzkonzentration verläuft auf der x-Achse. Dieses Auseinanderlegen bedeutete faktisch ein Abschalten der Regelung der Sauerstoffkonzentration im Versuchsaquarium. Entsprechend wurde in diesem Versuchsablauf weder Stickstoffgas noch Druckluft in das Aquarium geleitet. Die Sauerstoffkonzentration pendelte sich auf eine mittlere Konzentration von 160 μM ein. Anders verhielt sich dagegen der Verlauf des pH-Wertes. Über einen Zeitraum von 2½ Stunden stieg der Wert stetig an. Eine zweimalige Säurezugabe während des Blindversuches reichte jedoch aus, um den pH-Wert in den vorgegebenen Grenzen zu halten.

Versuch 2: *C. pacifica* mit einer Schalenlänge von 40 mm

Der zweite Versuch wurde mit einer zweiten *C. pacifica* von dem Tauchgang SCO 271 durchgeführt (Abbildung 8). Diese Muschel hatte eine Schalenlänge von 40 mm und ein Gewicht von 1,4 g (Feuchtgewicht ohne Schale). Der Tauchgang dauerte über 16 h. Nach 3 h Anpassungszeit an Bord des Schiffes wurde mit dem Versuch begonnen. Die zweite Versuchsdurchführung dauerte 19 h 31 min. In Tabelle 4 sind die vorgegebenen Parameter für Sulfid, Sauerstoff und pH-Wert sowie die Aktivitäten an den Ventilen aufgeführt.

Tabelle 4: Übersicht über die Grenzkonzentrationen der drei Parameter und die Aktivitäten an den Ventilen des zweiten Versuchs. Für Sulfid wurde keine obere Grenzkonzentration angegeben, da der Versuchsaufbau keine Verminderung der Sulfidkonzentration vorsah.

Parameter	Grenzkonzentration		Anzahl der Ereignisse				
	untere	obere	Sulfid	Luft	Stickst.	Lauge	Säure
Sulfid	47,0 [μM]	–	13	–	–	–	–
Sauerstoff	0,0 [μM]	535,5 [μM]	–	0	0	–	–
pH-Wert	7,89	7,91	–	–	–	104	13

Die Konzentrationsverläufe der drei Parameter sind in Abbildung 11a-c dargestellt. Bei dem Verlauf der Sulfidkonzentration in Abbildung 11a erkennt man eine stetige Abnahme der Konzentration von 70 auf 47 μM nach 6 Stunden. Bis zum Versuchsende wurde insgesamt 13 mal SulfidstammLösung in das Aquarium zugegeben. Man erkennt einen dreigipfeligen Kurvenverlauf. Der erste Anstieg nach einer dicht aufeinanderfolgenden siebenmaligen Sulfidzugabe ist dabei am steilsten. Es wird eine Konzentration von annähernd 67 μM erreicht.

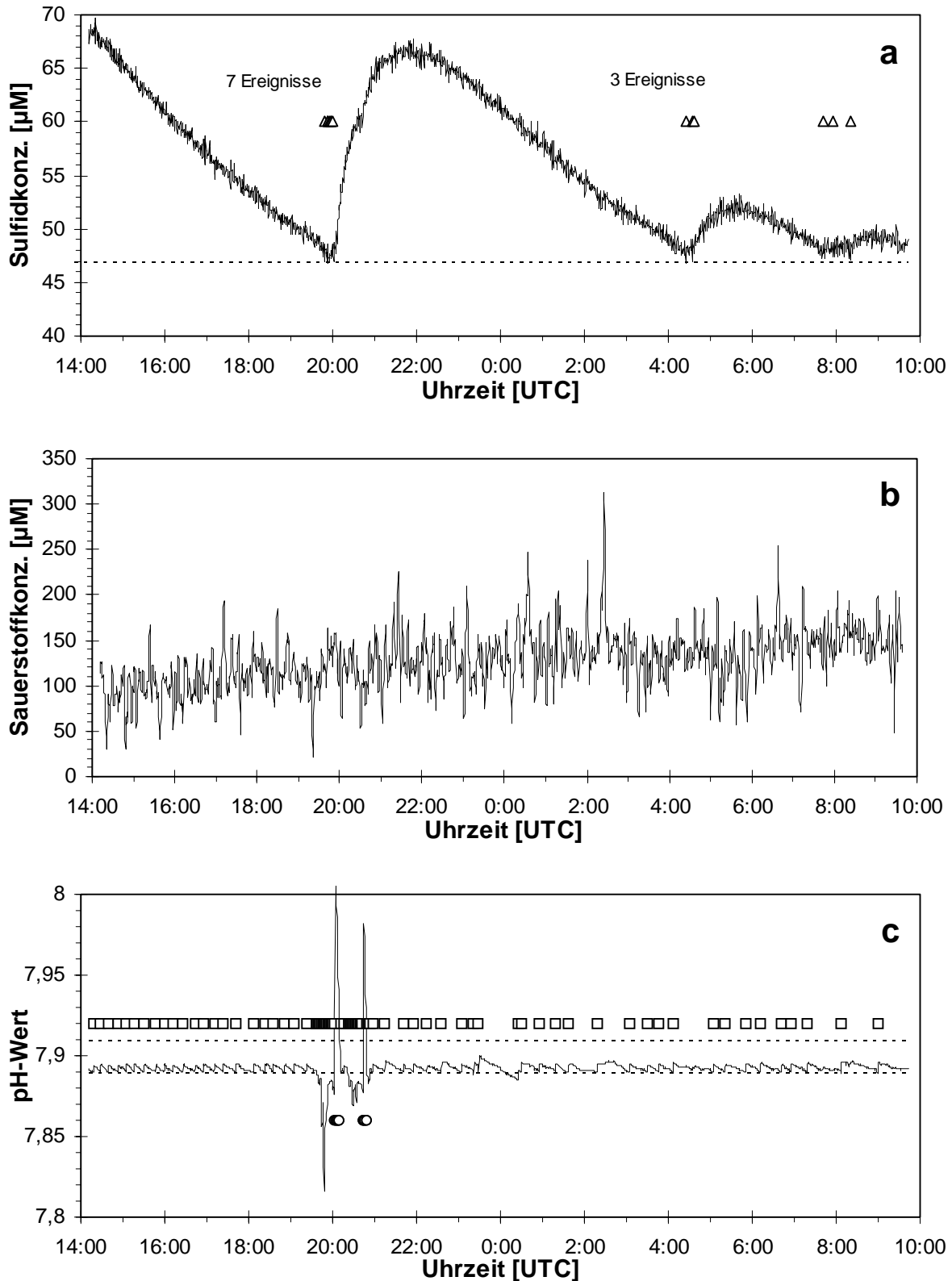


Abbildung 11: Zeitabhängiger Konzentrationsverlauf von Sulfid (a), Sauerstoff (b) und pH (c) im Versuchsaquarium für *Calyptogena pacifica* von 40 mm Schalenlänge (Tauchgang SCO 271) über einen Zeitraum von 19 h 31 min. Die gestrichelten Linien repräsentieren die Ober- bzw. Untergrenze des jeweiligen Parameters. Die Symbole (\blacktriangle \square \bullet) markieren die Zugabe von Sulfid, Lauge bzw. Säure in das Versuchsaquarium.

Die beiden folgenden Konzentrationsanstiege fallen zunehmend geringer aus. Die Maxima- und Minimalgrenzen für die Sauerstoffkonzentration in Abbildung 11b mußten weit auseinander gelegt werden, da die Schwankungen der Sauerstoff-Glaselektrode wie schon im Blindversuch zu groß waren. Die Konzentrationsgrenzen, ab wann das Programm die Zugabe von Druckluft bzw. Stickstoffgas veranlassen würde, liegen auf der x-Achse bzw. außerhalb der y-Achse. Die Sauerstoffkonzentration wurde in diesem Versuchsablauf also nur aufgezeichnet und nicht geregelt. Es ist ein leicht ansteigender Trend der Sauerstoffkonzentration zu erkennen. In der ersten Versuchshälfte wurde im Mittel eine Konzentration von $114,0 \mu\text{M}$ erreicht. In der zweiten Hälfte stieg der Wert auf $140,5 \mu\text{M}$. Die Abbildung 11c macht deutlich, daß die Anlage den pH-Wert zuverlässig in einem engen Bereich halten kann, mit Ausnahme von einigen Ausreißern im Zeitraum zwischen 19:37 und 20:55 UTC. Im Gegensatz zum ersten Versuch mußte über die gesamte Versuchszeit wiederholt Lauge in das Aquarium gegeben werden, damit der pH-Wert nicht absank. Von den insgesamt 104 Laugenzugaben wurden 60% in dem Zeitintervall zugegeben, wo einige Ausreißer auftraten. Die Säuerungszugaben befinden sich dagegen ausnahmslos in dem Bereich der starken Schwankungen des pH-Wertes.

2.3.2 Verbrauchsberechnungen

Verbrauchsberechnung für *Calypptogena pacifica* von 32 mm Schalenlänge

Die Abbildung 9a zeigt, daß die Sulfidzugabe während des Versuchszeitraumes in zwei Gruppen erfolgte. Die erste Gruppe bestand aus zwei Ereignissen gegen 03:00 UTC, die zweite Gruppe bestand aus insgesamt 14 Ereignissen gegen 05:30 UTC. Die Verbrauchsberechnungen für Sulfid wurden in dem Zeitraum zwischen der ersten Sulfidzugabe der ersten Gruppe und der ersten Zugabe der zweiten Gruppe durchgeführt. Dieser Zeitraum erstreckt sich über 2,54 Stunden (2 h 32 min). Während dieser Zeit wurde die zweimalige Sulfidzugabe der ersten Gruppe aufgebraucht. Die Berechnungen wurden nur für dieses Zeitintervall durchgeführt, da die 14 Zugaben der zweiten Gruppe zwar in das Versuchsaquarium gegeben wurden, aber damit ist noch keine Aufnahme des Sulfids durch die Muschel verbunden. Dieses Sulfid wurde von der Muschel noch nicht aufgebraucht.

Die zugegebene Menge errechnet sich nach der Gleichung 6:

$$\begin{aligned} \text{Menge [mmol]} &= \text{Anzahl der Zugaben} \times \text{Menge pro Zugabe [dm}^3\text{]} \\ &\quad \times \text{Konzentration der Sulfidlösung [mmol dm}^{-3}\text{]} \quad (6) \\ &= 2 \times 0,102 \cdot 10^{-3} \text{ [dm}^3\text{]} \times 3,125 \text{ [mmol dm}^{-3}\text{]} \\ &= 0,64 \cdot 10^{-3} \text{ [mmol]} \\ &= 0,64 \text{ [\mu mol]} \end{aligned}$$

Pro Stunde sind demnach

$$\begin{aligned} &0,64 \text{ [\mu mol]} \div 2,54 \text{ [h]} \\ &= 0,25 \text{ [\mu mol h}^{-1}\text{]} \end{aligned}$$

in das Versuchsaquarium gegeben worden. Die Korrektur um den Eigenverbrauch des Systems errechnet sich ebenfalls nach Gleichung 6 aus dem Sulfidverbrauch des Versuchsaufbaus selbst, der durch den Blindversuch bestimmt wurde. Der Zeitraum in dem der Blindversuch lief, erstreckte sich über 3,32 Stunden (3 h 19 min.) von der ersten der drei Sulfidzugaben bis zur dritten Sulfidzugabe (siehe Abbildung 10a). Der Blindversuch ergab einen Sulfidverbrauch von $0,19 \mu\text{mol h}^{-1}$. Nach den Berechnungen ergibt sich demnach ein um den Blindwert korrigierter täglicher Verbrauch von $1,42 \mu\text{mol d}^{-1}$ für *Calyptogena pacifica* mit einer Schalenlänge von 32 mm. Bezogen auf das Feuchtgewicht ohne Schale ergibt sich ein täglicher Sulfidverbrauch von $1,42 \mu\text{mol d}^{-1} \div 0,7 \text{ g} = 2,03 \mu\text{mol g}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

Verbrauchsberechnung für *Calyptogena pacifica* von 40 mm Schalenlänge

Man erkennt in Abbildung 11a, daß die Sulfidzugabe während der Versuchszeit in drei Gruppen erfolgte. Die erste Gruppe besteht aus sieben Ereignissen gegen 20:00 UTC, die zweite Gruppe besteht aus drei Ereignissen gegen 04:30 UTC und die dritte Gruppe besteht ebenfalls aus drei Ereignissen gegen 08:00 UTC. Die Verbrauchsberechnungen für Sulfid wurden vom Zeitpunkt der ersten Sulfidzugabe der ersten Gruppe bis zur ersten Zugabe der dritten Gruppe durchgeführt. In dieser Zeit wurde das zugegebene Sulfid bis zum Absinken auf den Schwellenwert von $47 \mu\text{M}$ bei zehn Zugaben zwei mal verbraucht. Dieser Zeitraum erstreckt sich über 11,88 Stunden (11 Std. 53 Min). Die zugegebene Menge errechnet sich ebenfalls nach der Gleichung 6:

$$\begin{aligned}
 \text{Menge [mmol]} &= 10 \times 0,102 \cdot 10^{-3} [\text{dm}^3] \times 3,125 [\text{mmol dm}^{-3}] \\
 &= 3,20 \cdot 10^{-3} [\text{mmol}] \\
 &= 3,20 [\mu\text{mol}]
 \end{aligned}$$

Pro Stunde sind demnach

$$\begin{aligned}
 &3,20 [\mu\text{mol}] \div 11,88 [\text{h}] \\
 &= 0,27 [\mu\text{mol h}^{-1}]
 \end{aligned}$$

in das Versuchsaquarium gegeben worden. Die Blindwertkorrektur erfolgte nach den bereits errechneten Wert von $0,19 \mu\text{mol h}^{-1}$. Nach den Berechnungen ergibt sich ein um den Blindwert korrigierter täglicher Verbrauch $1,83 \mu\text{mol d}^{-1}$. Dieser Verbrauch wurde für *Calypstogena pacifica* mit einer Schalenlänge von 40 mm ermittelt. Bezogen auf das Feuchtgewicht der Muschel ergibt sich ein täglicher Sulfidverbrauch von $1,83 \mu\text{mol d}^{-1} \div 1,4 \text{ g} = 1,31 \mu\text{mol g}^{-1} \text{ d}^{-1}$. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zusammengefaßt.

Tabelle 5: Täglicher Sulfidverbrauch zweier Muscheln der Gattung *Calypstogena pacifica* aus dem Eel River Seep Gebiet vor der Küste Nordkaliforniens (FG: Feuchtgewicht).

Schalenlänge	FG ohne Schale	Versuchszeit	Sulfidverbr. pro Tier	Sulfidverbr. pro g FG
32 mm	0,7 g	3,28 h	$1,42 \pm 0,03 \mu\text{mol d}^{-1}$	$2,03 \mu\text{mol g}^{-1} \text{ d}^{-1}$
40 mm	1,4 g	19,52 h	$1,83 \pm 0,15 \mu\text{mol d}^{-1}$	$1,31 \mu\text{mol g}^{-1} \text{ d}^{-1}$

2.4 Diskussion

2.4.1 Verbreitung vesicomider Muscheln

Im Jahre 1977 wurden von Corliss et al. (1979) am mittelozeanischen Rücken vor den Galápagos Inseln die ersten chemoautotrophen Lebensgemeinschaften an Hydrothermalquellen entdeckt. An diesen geologischen Spreizungszonen wird neuer Meeresboden gebildet (Spiess et al., 1980). Aus Kontinuitätsgründen muß der Meeresboden im gleichen Maße wieder in den Erdmantel abtauchen. Dies geschieht unter anderem an den Kontinentalrändern in den Subduktionszonen. Hier wird die basaltische ozeanische Kruste unter die relativ leichtere granitische kontinentale Kruste geschoben. In den 80er Jahren wurden am Florida Escarpment und am Louisiana Slope die ersten chemoautotrophen Lebensgemeinschaften an Cold Seeps entdeckt (Paull et al., 1984; Kennicutt et al., 1985). Viele weitere Gemeinschaften, die mit dem Austritt von kalten reduzierten Flüssigkeiten aus dem Sediment assoziiert sind, wurden seitdem sowohl an aktiven wie an passiven Kontinentalrändern gefunden (siehe Abbildung 12 und Tabelle 6).

An den aktiven Kontinentalrändern dominiert die Entwässerung durch tektonisch induzierte Kompaktion der Sedimente. Hier wurden chemoautotrophe Lebensgemeinschaften an den folgenden Lokationen entdeckt: im Aleutengraben (Suess et al., 1998), vor der Küste Oregons (Suess et al., 1985; Kulm et al., 1986), in der Bucht von Monterey, Kalifornien (Embley et al., 1990; Barry et al., 1996; Stakes et al., 1999), vor der Küste Costa Ricas (Kahn et al., 1996; Barry et al., submitted), vor Nordperu (Fiala-Médioni et al., 1992; Olu et al., 1996a), vor der chilenischen Küste (Stuardo & Valdovinos, 1988), am südlichen Barbados Akkretionskeil (Jollivet et al., 1990; Olu et al., 1996b), im östlichen europäischen Mittelmeer (Corselli & Basso, 1996), im Ochotskischen Meer (Zonenshayn et al., 1987; Bibow & Hütten, 1999), in der Sagami Bucht (Hashimoto et al., 1989) und im Japan- und Kurilengraben (Cadet et al., 1987; Sibuet et al., 1988). Hier wurden bislang auch die tiefsten chemoautotrophen Lebensgemeinschaften in einer Wassertiefe von über 7300 m dokumentiert (Fujikura et al., 1999). Weitere Lokationen finden sich im Nankai Trog vor Japan (Juniper & Sibuet, 1987; Ohta & Laubier, 1987; Sibuet et al., 1988; Henry et al., 1992), und schließlich in der San Clemente Bruchzone, deren Antrieb der Entwässerung zunächst auf Hydrothermalismus zurückgeführt wurde (Lonsdale, 1979). Die Gemeinschaftszusammensetzung läßt aber eher auf

Cold Seeps schließen (Sibuet & Olu, 1998). Neuste Funde von chemoautotrophen Lebensgemeinschaften wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit vor der pakistanischen Küste im Akkretionskeil vor Makran (Rad et al., 1998; Linke et al., in prep.) und vor der Südküste Javas in einem Forearc-Becken entdeckt (Beiersdorf et al., 1999, siehe Kapitel 3).

An den passiven Kontinentalrändern findet keine Subduktion von ozeanischer Kruste unter die kontinentale Kruste statt. Durch Kompaktion von Sedimenten mit einem hohen Anteil organischer Substanz und einer hohen Sedimentationsrate kommt es zu einer Entwässerung des Porenraums ohne tektonische Prozesse (Eisbacher, 1991). Chemoautotrophe Lebensgemeinschaften wurden hier im nördlichen Golf von Mexiko mit seinen Erdöl- und Erdgasvorkommen, am Florida Escarpment (Paull et al., 1984), am Kontinentalrand vor North Carolina (Paull et al., 1995), im Laurentian Fächer (Mayer et al., 1988), im Eel River Gebiet vor der Küste Nordkaliforniens (Kennicutt et al., 1989) und im Golf von Guinea (Sibuet & Olu, 1998) entdeckt.

Auch fossile Seep Gemeinschaften wurden an verschiedenen Lokationen beschrieben (Bitter et al., 1990; Goedert & Squires, 1990; Bitter et al., 1992; Campbell & Bottjer, 1995; Cavagna et al., 1999; Peckmann et al., 1999). Auf toten Walkörpern, die zum Meeresgrund abgesunken sind, wurden ebenfalls vesicomyyide Muscheln gefunden (Bennett et al., 1994; Smith & Baco, 1998; Smith et al., 1998; Baco et al., 1999). Goedert et al. (1995) untersuchten fossile Fundstellen von solchen toten Walkörpern.

2.4.2 Lebensweise vesicomyyider Muscheln

Cold Seep Gebiete sind dadurch charakterisiert, daß die austretenden Flüssigkeiten nur sehr geringe Temperaturanomalien aufweisen (Paull et al., 1984; Suess et al., 1985; Kulm et al., 1986). Die Hot Vents der mittelozeanischen Rücken weisen dagegen im Zentimeterbereich Temperaturdifferenzen von bis zu 100°C auf (Tunnicliffe et al., 1985; Fisher, 1998). Ein starker Gradient besteht bei den Cold Seeps aber auf chemischer Ebene: die austretenden Flüssigkeiten sind schwefelwasserstoffhaltig und abgereichert an gelöstem Sauerstoff; das bodennahe Wasser weist dagegen praktisch keine Schwefelwasserstoffkonzentration auf und ist sauerstoffhaltig (Childress et al., 1991). Die hier siedelnden Gemeinschaften werden auf der Ebene der Makrofauna von Muscheln der Familien Vesicomyyidae und Mytilidae dominiert (Barry et al., 1996; Sibuet & Olu, 1998; Tyler & Young, 1999).

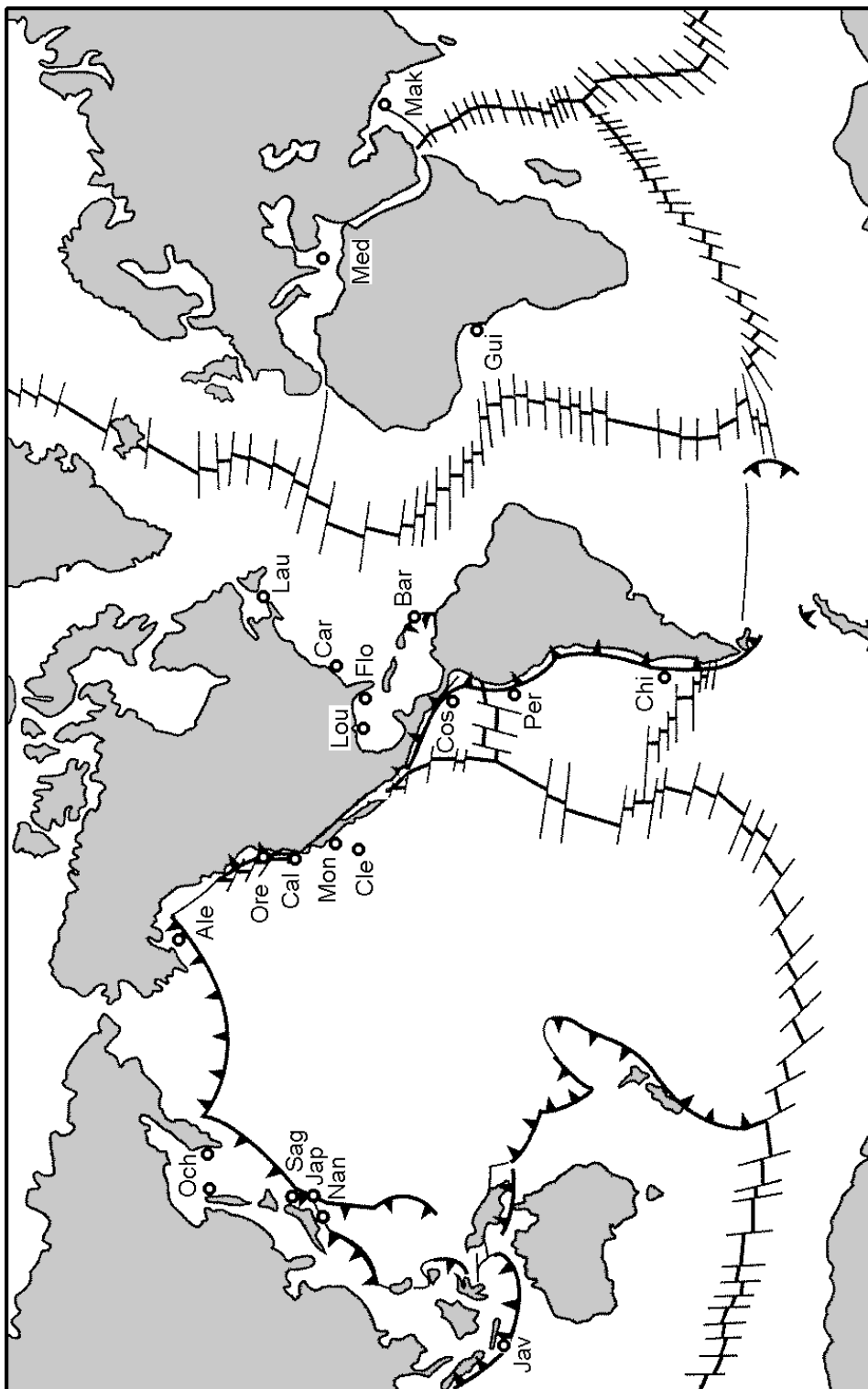


Abbildung 12: Weltweite Verbreitung der Cold Seeps an aktiven und passiven Kontinentalrändern. Die abgekürzten Ortsbezeichnungen sind in Tabelle 6 aufgeführt (modifiziert nach Sibuet & Olu, 1998).

Tabelle 6: Auflistung der weltweiten Verbreitung von Cold Seeps, wie sie in Abbildung 12 bezeichnet wurden.

Abkürzung	Ort	Beschrieben durch
Ale	Aleutengraben	Suess et al. (1998)
Bar	Barbados Akkretionskeil	Jollivet et al. (1990); Olu et al. (1996)
Cal	Nord Kalifornien	Kennicutt et al. (1989)
Car	North Carolina	Paull et al. (1995)
Chi	Chile	Stuardo & Valdovinos (1988)
Cle	San Clemente Bruchzone	Lonsdale (1979)
Cos	Costa Rica	Kahn et al. (1996); Barry et al. (submitted)
Flo	Florida Escarpment	Paull et al. (1984)
Gui	Guinea	Sibuet & Olu (1998)
Jap	Japan- und Kurilengraben	Cadet et al. (1987); Sibuet et al. (1988)
Jav	Java	Beiersdorf et al. (1999)
Lau	Laurentian Fächer	Mayer et al. (1988)
Lou	Louisiana	Paull et al. (1984); Kennicutt et al. (1985)
Mak	Makran	Rad et al. (1998); Linke et al. (in prep.)
Med	Europäisches Mittelmeer	Corselli & Basso (1996)
Mon	Monterey Bucht	Embley et al. (1990); Barry et al. (1996); Stakes et al. (1999)
Nan	Nankai Trog	Juniper & Sibuet (1987); Ohta & Laubier (1987); Sibuet et al. (1988); Henry et al. (1992)
Och	Ochotskisches Meer	Zonenshayn et al. (1987); Bibow & Hütten (1999)
Ore	Oregon	Suess et al. (1985); Kulm et al. (1986)
Per	Nordperu	Fiala-Médioni et al. (1992); Olu et al. (1996)
Sag	Sagami Bucht	Hashimoto et al. (1989)

Die beiden Familien sind durch Enzyme gekennzeichnet, die dem Calvin-Benson-Zyklus entstammen, den man nur bei Pflanzen und Bakterien antrifft (Felbeck et al., 1981; Felbeck & Somero, 1982). Bei den beiden Muschelfamilien sind die endosymbiontischen Bakterien in den Kiemen die Quelle dieser Enzyme (Felbeck et al., 1981). Andere Tiergruppen mit Endosymbionten gehören zu den Gruppen Solemyidae, Thyasiridae, Cladorhizidae und Pogonophora (Reid, 1980; Southward et al., 1981; Felbeck, 1983; Powell & Somero, 1985; Dando & Southward, 1986; Anderson et al., 1987; Dando et al., 1991; Dando et al., 1994; Barry et al., 1996; Sibuet & Olu, 1998).

Zu den vesicomymiden Muscheln gehören die Gattungen *Vesicomya* und *Calyptogena*. Es wurden bisher insgesamt 20 verschiedene Arten beschrieben, wobei die beiden Gattungen nach Vrijenhoek et al. (1994) nicht klar voneinander abgegrenzt sind und einer systematischen Revision bedürfen (Peek et al., 1997). Craddock et al. (1995) kamen durch elektrophoretische Untersuchungen an Muschelproteinen von Cold Seeps und Hydrothermalquellen zu dem Ergebnis, daß die Muscheln phylogenetisch aus dem Flachwasser stammen, und daß die endosymbiontischen Bakterien der Muscheln von freilebenden Formen abstammen.

Die Muscheln leben mit ihrem hinteren Ende halb eingegraben im Sediment (Arp et al., 1984; Suess et al., 1985; Kulm et al., 1986). Dabei ist ihr vergrößerter, vaskulöser Fuß, der stark gestreckt werden kann, in das Sediment gegraben (Arp et al., 1984). Über den Fuß nehmen die Muschel den Schwefelwasserstoff auf.

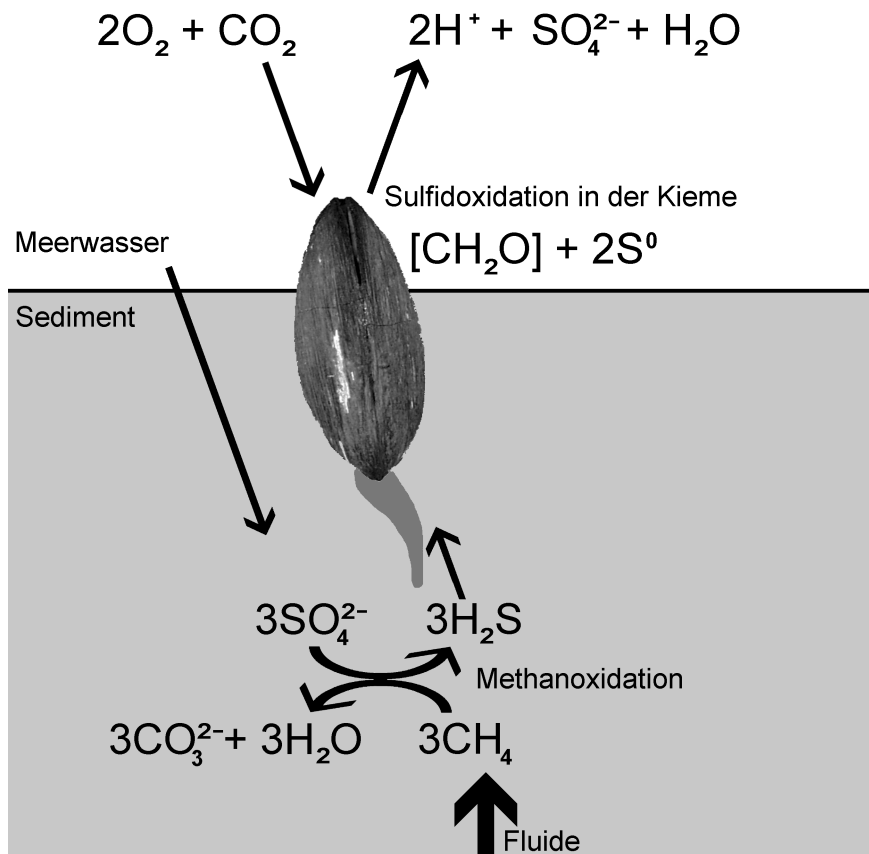


Abbildung 13: Schematische Darstellung der chemischen Abläufe in einem von chemoautotrophen Muscheln besiedelten Cold Seep Gebiet. Die Methanoxidation wird von einem Konsortium freilebender Bakterien durchgeführt. Die bakterielle Sulfidoxidation findet in den Muschelkiemen statt. $[\text{CH}_2\text{O}]$ repräsentiert die von den Endosymbionten gebildete organische Substanz. Das Sulfat für die Methanoxidation stammt aus dem Bodenwasser. Weitere Erläuterungen im Text (modifiziert nach Jannasch, 1993; Sibuet & Olu, 1998).

Die Flüssigkeiten aus tieferen Sedimentschichten sind angereichert an biogenem Methan, das beim Abbau von organischer Substanz in Abwesenheit von Sauerstoff gebildet wird (Iversen & Jørgensen, 1985; Whiticar et al., 1986). Das Methan steigt mit den Fluiden in höhere Sedimentschichten auf. Man nimmt an, daß hier ein Konsortium aus methanogenen und sulfatreduzierenden Bakterien das Methan unter Reduktion von Sulfat zu Sulfid abbauen (Hoehler et al., 1994; Hinrichs et al., 1999). Die Sulfatreduktion findet noch unterhalb der Zone der Nitratreduktion, der Manganreduktion und der Eisenreduktion statt (Martens & Klump, 1980; Canfield, 1993). Bei der Sulfatreduktion entsteht aus dem Sulfat des Meerwassers Schwefelwasserstoff (Jensen et al., 1992; Masuzawa et al., 1992). Dieser Schwefelwasserstoff wird von den vesicomiden Muscheln über den Fuß aufgenommen (Arp et al., 1984; Fisher et al., 1988; Childress et al., 1993). Das Mantel- und Fußgewebe der Muscheln ist frei von endosymbiontischen sulfidoxidierenden Bakterien (Powell & Somero, 1986). Die Bakterien befinden sich in den Kiemen der Muscheln (Cavanaugh, 1980). Der Schwefelwasserstoff muß also im offenen Blutgefäßsystem der Muscheln zu den Kiemen transportiert werden (Scott & Fisher, 1995), wo er dann aerob unter Bildung von organischem Kohlenstoff abgebaut wird (Abbildung 13). Im Kiemengewebe befinden sich zahlreiche Bakteriozysten. Das sind Zellen, die mit aktiv metabolisierenden Bakterien angefüllt sind (Fiala-Médioni & Métivier, 1986; Childress et al., 1993). Die Morphologie der Kiemen der vesicomiden Muscheln weist zudem darauf hin, daß die Kiemen nicht an aktiven Filtrationsprozessen zur Nahrungsaufnahme beteiligt sind (Fiala-Médioni & Métivier, 1986). Die Mikrovilli besetzte Außenseite der Bakteriozysten ist nach Fiala-Médioni & Métivier (1986) für die direkte Aufnahme von Sulfid und möglicherweise gelösten organischen Molekülen verantwortlich. Die Autorinnen führen weiter aus, daß elektronenmikroskopisch klare granuläre Strukturen innerhalb der Bakteriozysten von aufgelösten Bakterien stammen können. Die dabei frei werdenden organischen Moleküle können dann vom Muschelgewebe aufgenommen werden (Fiala-Médioni & Métivier, 1986). Der verbleibende elementare Schwefel (Abbildung 13) wird in körnigen Strukturen in Nachbarschaft zu den Bakteriozysten gelagert (Vetter, 1985; Fiala-Médioni & Métivier, 1986; Fiala-Médioni & Pennec, 1989). Wenn kein Sulfid zur Verfügung steht, kann dieser elementare Schwefel von den endosymbiontischen Bakterien genutzt werden (Vetter, 1985; Childress et al., 1991). Beispielsweise kann die Muschel bei der Fortbewegung auf dem Sediment kein Sulfid aufnehmen. Der elementare Schwefel wäre dann als Nahrungsreserve anzusehen.

Ein Problem stellt der Transport von reduzierten Schwefelverbindungen vom Fuß in die Kieme der Muschel dar. In den 70er Jahren wurde erstmals der sulfidische marine Lebensraum beschrieben (Fenchel & Riedl, 1970; Johnson et al., 1986; Anderson et al., 1987). Dennoch ist für viele Organismen das Sulfid toxisch (Vismann, 1990b; Vismann, 1991a; Vismann, 1991b; Vismann, 1993; Vismann, 1996b; Hauschild & Grieshaber, 1997; Jahn et al., 1997; Julian et al., 1999). Sulfid greift auf zweifache Weise in den aeroben Stoffwechsel ein: zum einen wird der Sauerstofftransport über das Hämoglobin unterbrochen (Fenchel & Riedl, 1970; Terwilliger et al., 1983; Somero et al., 1989; Frenkiel et al., 1996), zum anderen greift Sulfid die Cytochrom-c-Oxidase Aktivität an und hemmt somit die ATP-Produktion in der Elektronentransportkette (Arp et al., 1984; Powell & Somero, 1986; Jahn & Theede, 1997; Grieshaber & Völkel, 1998).

Die Gruppe der vesicomiden Muscheln hat verschiedene Strategien entwickelt, um einerseits ihre Endosymbionten mit Sulfid zu versorgen, andererseits sich selbst aber davor zu schützen. Das über den Fuß aufgenommene Sulfid wird an eine hochmolekulare, zinkhaltige Komponente gebunden, die eine hohe Sulfidaffinität aufweist und im Blutserum der Muschel nachgewiesen wurde (Childress et al., 1993). Die Muscheln sind in der Lage, das Sulfid im Serum gegenüber der Sulfidkonzentration des Außenmediums stark anzureichern (Childress et al., 1991; Childress et al., 1993). Der Anteil an Sulfid, der nicht an diese zinkhaltige Komponente gebunden wurde, wird im Fuß zu Thiosulfat oxidiert und somit in eine minder toxische Form überführt (Powell & Somero, 1986; Powell & Arp, 1989; Childress et al., 1993). Die in den Kiemen beherbergten chemoautotrophen Bakterien können bei den vesicomiden Muscheln beide Schwefelformen zur Kohlenstoffixierung nutzen (Arp et al., 1984; Childress et al., 1991; Childress & Fisher, 1992; Childress et al., 1993). Die vesicomiden Muscheln haben keine sulfidresistente Form der Cytochrom-c-Oxidase, da sie genauso empfindlich auf Sulfid reagiert, wie die anderer Arten, die nicht Schwefelwasserstoff in ihrer Umgebung ausgesetzt sind (Powell & Somero, 1986). Der Schutz der Cytochrom-c-Oxidase und des Hämoglobins vor dem toxischen Sulfid erfolgt also über die feste Bindung des Sulfids an die zinkhaltige Serumkomponente einerseits und die Oxidation des verbleibenden Sulfids zu Thiosulfat andererseits (Felbeck et al., 1985; Powell & Somero, 1986; Childress et al., 1993).

2.4.3 Methodenkritik

Druckeffekte

Für die Ermittlung des Sulfidbedarfs einzelner vesicomyider Muscheln der Gattung *Calypotogena pacifica* hat sich der in der vorliegenden Arbeit verwandte Versuchsaufbau zur Messung, Regelung und Registrierung der gelösten Komponenten Sulfid, Sauerstoff und pH-Wert bewährt.

Die Dekompression der Tiere beim Herausheben an die Wasseroberfläche stellt prinzipiell ein Problem dar. Neben der Dekompression spielt auch die starke Temperaturänderung in der Deckschicht eine Rolle. Daher kommen beim Sammeln von Organismen aus größeren Wassertiefen thermisch isolierte Sammelbehälter zum Einsatz (Childress & Mickel, 1982; Childress et al., 1991). Eine kurzfristige Dekompression auf Atmosphärendruck wird von den vesicomyiden Muscheln oftmals vertragen; allein eine länger andauernde Dekompression ist letal (Arp et al., 1984). Untersuchungen im Aleutengraben (Nord Pazifik) und vor Makran (nördliches Arabisches Meer) haben gezeigt, daß die Muscheln aus über 5000 bzw. 2300 m Wassertiefe mit einem herkömmlichen Sedimentgreifer nicht lebend an Bord des Schiffes gebracht werden konnten (Sahling, 1997; Rad et al., 1998).

Die Probengewinnung vor der nordkalifornischen Küste mit dem Einsatz des ROV (**R**emotely **O**perating **V**ehicle) verlief bei den relativ geringen Wassertiefen von knapp 500 m bezüglich negativer Dekompressionseffekte bei den Muscheln ohne Probleme. Die Muscheln öffneten kurze Zeit nach dem Überführen in das gekühlte Meerwasser ihre Schalen, streckten ihren Fuß aus und begannen Wasser durch ihre Kiemen zu pumpen. Auch nach Beendigung der Versuche wurde stets kontrolliert, ob die Tiere noch am Leben waren.

Sulfidkonzentration

Wegen technischer Probleme war es nicht möglich, den Sulfidgehalt im Porenwasser an den Stationen im Eel River Becken zu bestimmen, an denen die Muscheln gesammelt wurden. Andere Arbeiten haben gezeigt, daß Sulfidkonzentrationen von 40 bis 50 μM üblicherweise im Fußbereich vesicomyider Muscheln anzutreffen sind (Johnson et al., 1988; Childress et al., 1991; Barry et al., 1997). Der Versuchsaufbau für physiologische Untersuchungen an *Calypotogena magnifica* von den hydrothermalen Quellen vor Galápagos (Childress et al., 1991) wurde in ähnlicher Weise wie in der vorliegenden Arbeit gestaltet. Die Muscheln wurden in

einem Milieu gehalten, in dem gelöster Sauerstoff und Sulfid nebeneinander vorlagen (Childress et al., 1991), obwohl die vesicomiden Muscheln natürlicher Weise an der Grenzfläche zwischen anoxischem, sulfidhaltigem Sediment und oxischem bodennahen Meerwasser leben (Childress, 1988; Childress et al., 1991). Diese Trennung konnte beim Aufbau des Chemostaten in der vorliegenden Arbeit ebenfalls nicht berücksichtigt werden. Die Konzentration von gelöstem Sauerstoff im bodennahen Wasser schwankt in Abhängigkeit von der Lateralströmung. Johnson et al. (1988) konnten am Hydrothermalfeld in der Galápagos Spreizungszone zeigen, daß die Bodenwasserkonzentrationen von Sauerstoff, Silikat und Sulfid schon über Distanzen von 50 cm starken Schwankungen unterworfen sind. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird angenommen, daß die Muscheln auch an den Cold Seeps im Eel River Becken temporären Sulfidfluktuationen ausgesetzt sind. Die Stärke der bodennahen Lateralströmung sollte mit erhöhten Sauerstoffgehalten positiv korreliert sein.

Sauerstoffkonzentration

Childress & Mickel (1982) führten ebenfalls Versuche zu Aufnahmeraten von Sulfid und Sauerstoff an *Calyptogena pacifica* durch. Ihre Versuchstiere stammten aus 1750 m Wassertiefe vor der Küste San Diegos (Childress & Mickel, 1982). Der Versuchsaufbau für ihre Messungen bestand aus einem Drucktank mit einem Durchflußsystem (Quetin & Childress, 1980). In diesem Durchflußsystem wurde den vesicomiden Muscheln ebenfalls Sulfid und Sauerstoff im Meerwassermedium gleichzeitig angeboten (Quetin & Childress, 1980; Childress & Mickel, 1982). Die Sauerstoffkonzentration bei den Versuchen von Childress & Mickel (1982) lag bei 290 bis 335 $\mu\text{M O}_2$ und liegt damit in einem ähnlichen Bereich wie bei den Versuchen zur Sulfidaufnahme in der vorliegenden Arbeit.

pH-Wert

Der pH-Wert einer Lösung beeinflußt maßgeblich die Verteilung der drei Sulfidspezies in einer Lösung (Millero et al., 1988). Je höher der pH-Wert liegt, um so mehr verschiebt sich das Gleichgewicht zwischen $\text{H}_2\text{S} \rightleftharpoons \text{HS}^- \rightleftharpoons \text{S}^{2-}$ auf die rechte Seite (siehe Abbildung 4, Seite 9). Die erste Dissoziationsstufe (HS^-) wird von Organismen bevorzugt aufgenommen, die mit endosymbiontischen Bakterien vergesellschaftet sind, wie zum Beispiel *Solemya reidi* (Bivalvia) und *Riftia pachyptila* (Vestimentifera) (Felbeck, 1983; Goffredi et al., 1997; Goffredi et al., 1998). Für die vesicomiden Muscheln der Gattung *Calyptogena* wird dieser Aufnahmemodus ebenfalls angenommen (Somero et al., 1989; Fiala-Médioni et al., 1993; Hashi-

moto et al., 1995). Bei den drei Versuchsabläufen der vorliegenden Arbeit wurde ein pH-Wert von 7,9 festgelegt. Bei diesem Wert liegt 3% des Gesamtsulfids als H_2S und 97% als HS^- vor. Bei den zuvor erwähnten Untersuchungen an *Calyptogena elongata* und *C. magnifica* wurde der pH-Wert im Umgebungswasser ebenfalls auf einen Wert zwischen 7,9 und 8,1 eingestellt (Childress et al., 1991; Childress et al., 1993).

Regelungsprogramm und Versuchsaufbau

Mit dem hier verwandten Versuchsaufbau des Chemostaten und seiner Steuerung mit dem Computerprogramm CHEMOST.BAS konnte die *in situ* Situation in einem Cold Seep Gebiet vor der Küste Nordkaliforniens simuliert werden. Die Nachlieferung des verbrauchten Sulfids im Aquarium wurde durch den Versuchsaufbau gewährleistet. Die Regelung der Sulfidzugabe könnte für weitere Untersuchungen verbessert werden. Das Programm CHEMOST.BAS könnte dafür das Öffnungsintervall und die damit verbundene Zugabemenge in Abhängigkeit von dem Betrag der Abweichung zwischen Sollwert und aktuellem Wert regeln. Ist die Abweichung groß, wird das Öffnungsintervall für das Magnetventil verlängert, es fließt daraufhin mehr Sulfidvorratslösung in das Versuchsaquarium, und die Sulfidkonzentration steigt schneller an. Bei geringen Abweichungen, wird das Magnetventil dagegen nur kurz geöffnet, damit die Sulfidkonzentration nur langsam ansteigt. Ein Überschießen der Konzentrationswerte kann auf diese Weise vermieden werden.

Eine weitere Verbesserung kann in der Trennung von stärker sulfidischem Milieu im Bereich des Muschelfußes und stärker oxischem Milieu im Bereich der Kiemen der vesicomyi-den Muscheln liegen. Die Muscheln würden dann vorzugsweise in einem künstlichen Sedi-ment siedeln, in dem sie von unten mit Sulfid und lateral im Bodenwasser mit Sauerstoff versorgt würden.

2.4.4 Sulfidaufnahme von *Calyptogena pacifica*

Versuch 1: *C. pacifica* mit einer Schalenlänge von 32 mm

Während der ersten Versuchsdurchführung mit *Calyptogena pacifica* von 32 mm Schalenlänge erkennt man in Abbildung 9a (Seite 22), daß die Sulfidzugaben nicht kontinuierlich erfolgten. Während der Versuchszeit von über drei Stunden erfolgte die Sulfidzugabe in zwei Gruppen. Nach den zwei Zugaben von 0,102 ml der Sulfidstammmlösung der ersten Gruppe stieg der Sulfidgehalt nach kurzer Zeit an. Nach den 14 einzelnen Zugaben gleichen Volu-

mens der zweiten Gruppe reagierte das System träger. Dennoch ist gegen Ende des Versuchs ein Anstieg der Sulfidkonzentration zu erkennen. Es wird vermutet, daß die Sulfidkonzentration noch stärker angestiegen wäre, wenn der Versuch nicht vorzeitig um 05:50 UTC geendet hätte. Die Zeit, die nach einem Zugabeereignis verstreichen mußte, bevor der Sollwert der Sulfidkonzentration im Versuchsaquarium erneut mit dem aktuellen Meßwert verglichen werden sollte, betrug 120 Sekunden. Die Zeitverzögerung diente der mechanischen Durchmischung des Meerwassers im Versuchsaquarium und der verzögerten Ansprechzeit der Sulfid-elektrode. Die Zeitverzögerung konnte andererseits auch nicht zu lange gewählt werden, da die Regelung durch das Computerprogramm CHEMOST.BAS bei höheren Sulfidaufnahmeraten die Sulfidkonzentration nicht mehr auf einem konstanten Niveau hätte halten können. Bei der Kalibrierung der Sulfidelektrode wurde eine Ansprechzeit von 45 Sekunden ermittelt. Vismann (1996a) stellte in seiner Versuchsanordnung ebenfalls eine relativ lange Ansprechzeit der Sulfidelektrode auf sich verändernde Konzentrationen fest, ohne die Zeit explizit zu nennen.

Die Sauerstoffkonzentration wurde im ersten Versuch in den Grenzen zwischen 66,1 und 241,5 $\mu\text{M O}_2$ geregelt. Bei einer Wassertemperatur des Meerwassers im Versuchsaquarium von +4°C entspricht das einer Sauerstoffsättigung zwischen 20 und 75% (Weiss, 1970; Dietrich et al., 1975). Aufgrund starker Rauscheffekte der Sauerstoffelektrode mußte die Spanne zwischen Minimal- und Maximalkonzentration so groß gewählt werden. An Bord eines Forschungsschiffes gibt es zahlreiche Quellen für elektrische Felder, die trotz größtmöglicher Abschirmung aller elektrischen Verbindungen von der Sauerstoffelektrode zum Meßgerät nicht ohne Einfluß auf ampèrometrische Messungen im Bereich einiger Picoampère (10^{-12} A) sind. In der ersten Versuchshälfte wurde sechs mal Stickstoff, in der zweiten Versuchshälfte wurde sechs mal Luft in das Versuchsaquarium geleitet (siehe Tabelle 2 und Abbildung 9b, Seite 22). Während eines Öffnungsintervalls der Ventile für Stickstoff bzw. Luft wurde jeweils ca. 10 ml Gas in das Aquarium geleitet. Es stellt sich die Frage, ob über das durchper-lende Gas Sulfid mittransportiert werden könnte. Dabei käme es zu einer Sulfidabnahme, da die Gasblasen durch das überschichtete Paraffinöl hindurch perkolieren. Die häufigste Einlei-tung von Gas fand in diesem Versuch zwischen 04:00 und 04:15 UTC statt (einmal Stickstoff, zwei mal Luft). Die zeitabhängige Konzentrationskurve für Sulfid in Abbildung 9a zeigt keine Verminderung der Sulfidkonzentration im Bereich zwischen 04:00 und 04:15 UTC. Folglich gab es keinen meßbaren Einfluß der Gaseinleitung in das Versuchsaquarium.

Der pH-Wert hielt sich im ersten Versuch ohne äußere Einflußnahme im vorgegebenen Intervall zwischen 7,89 und 7,91. Während des 3 h 17 min laufenden Experiments sind einige Fluktuationen des pH-Wertes erkennbar. Gegen 03:00 UTC und 03:50 UTC sind in Abbildung 9c leichte Anstiege von 0,01 pH Einheiten erkennbar. Diese Anstiege sind aber nicht mit den Zugabeereignissen von Sulfid, Luft oder Stickstoff korreliert. Es wird vermutet, daß sie durch variierende Aktivitätsmuster von *Calyptogena pacifica* hervorgerufen wurden. Das wichtigste Stoffwechselendprodukt vieler Invertebraten ist Ammonium (Khalil, 1994). Follum & Gray (1987) konnten zeigen, daß die Exkretion von Stoffwechselendprodukten der benthischen Muschel *Nucula tenuis* bei einer Hälterung in einem künstlichen Sediment um 37% höher liegt, als unter natürlichen Bedingungen. Ähnliche Effekte werden auch bei den Versuchen zur Sulfidaufnahme von *Calyptogena pacifica* vermutet. Unter diesen Annahmen würde die Ausscheidung von Ammonium für einen Anstieg des pH-Wertes verantwortlich sein. Die verstärkte Variation des pH-Wertes in der zweiten Versuchshälfte wird ebenfalls auf die Aktivität der Muschel zurückgeführt.

Neben der Makrofauna, die mit endosymbiontischen sulfidreduzierenden Bakterien vergesellschaftet ist, leben auch freie chemoautotrophe Bakterien (Juniper & Sibuet, 1987; Nelson & Hagen, 1995) und Meiofauna mit ekto-symbiontischen sulfidreduzierenden Bakterien in den Sedimenten der Cold Seeps (Powell et al., 1979; Vanreusel et al., 1997; Hentschel et al., 1999). In dem Versuchsaufbau wurden die Muscheln der Gattung *Calyptogena pacifica* ohne Sediment gehältert, um andere Organismengruppen auszuschließen und die isolierte Sulfidaufnahme der Muscheln zu messen. Die Muscheln konnten während des Versuches nicht visuell beobachtet werden, da das Versuchsaquarium in einem Kühlschrank untergebracht war. Aber es ist bekannt, daß die Muscheln der Gattung *Calyptogena* auf dem Sediment umherkriechen und zahlreiche Kriechspuren hinterlassen (Rosman et al., 1987; Embley et al., 1990; Fisher, 1990). Es wird angenommen, daß solche Kriechbewegungen für die Fluktuationen des pH-Wertes in der zweiten Versuchshälfte verantwortlich waren. Für die Muschel bestand während der zweiten Versuchshälfte eine nicht reproduzierbare Streßsituation, die sie veranlaßte im Aquarium umherzukriechen. Bei der benthischen Muschel *Nucula tenuis* sind Streßsituationen für eine verstärkte Exkretion verantwortlich (Follum & Gray, 1987). Es wird angenommen, daß *Calyptogena pacifica* in ähnlicher Weise reagiert. Unterstützt wird die Vermutung durch die veränderte Position der Muschel am Versuchsende.

Blindversuch

Im Rahmen des Blindversuches wurde der 'Sulfidverbrauch' des Versuchsaufbaus selbst bestimmt. Sulfidhaltige Lösungen sind am charakteristischen Geruch nach faulen Eiern erkennbar. Dies zeigt, daß Sulfid spontan aus der Lösung in die Gasphase übertritt. Verschiedene Maßnahmen im Versuchsaufbau wurden getroffen, um den diffusiven Verlust von Sulfid zu minimieren: 1.) das Überschichten des Meerwassers im Versuchsaquarium und der Sulfidstammlösung im Vorratsgefäß mit Paraffinöl, 2.) die Verwendung von Plexiglas[®] für die Wandungen des Versuchsaquariums, das eine geringe Gasdurchlässigkeit aufweist, 3.) die Benutzung von Tygon[®]-Schläuchen zwischen dem Vorratsgefäß mit der Sulfidstammlösung und dem Versuchsaquarium diene ebenfalls der Vermeidung von Sulfidverlusten. Die Abbildung 10a' (Seite 24) zeigt einen konstanten Verlauf der Sulfidkonzentration über die Versuchszeit. In diesem Zeitraum wurde drei mal Sulfid zugegeben.

Die gemessenen Maximal- und Minimal-Werte der Sauerstoffkonzentration lagen in diesem Blindversuch weiter voneinander entfernt als im ersten Versuch (Abbildung 10b'). Aus diesem Grunde wurden auch die Grenzkonzentrationen so weit auseinander gelegt. Die obere Grenzkonzentration von 535,5 $\mu\text{M O}_2$ entspricht bei der vorherrschenden Versuchstemperatur von +4°C einer 1,7fachen Sauerstoffübersättigung (Weiss, 1970; Dietrich et al., 1975). Die untere Grenzkonzentration lag bei 0 $\mu\text{M O}_2$. Die Sauerstoffkonzentration wurde also nur gemessen und nicht mehr geregelt. Trotz der größeren Fluktuationen der Sauerstoffwerte verläuft die Konzentrationskurve aber im gleichen Bereich wie beim ersten Versuch. Die Werte schwanken zwischen 4,5 und 307,9 $\mu\text{M O}_2$ mit einer mittleren Konzentration von $160,6 \pm 35,7 \mu\text{M O}_2$.

Der pH-Wert wurde während des Blindversuches durch das Computerprogramm CHEMOST.BAS im vorgegebenen Konzentrationsintervall gehalten (Abbildung 10c'). Der pH-Wert stieg langsam an und erreichte die obere Grenzkonzentration von 7,91. Eine einmalige Säurezugabe aus dem Vorratsgefäß senkte den pH-Wert ab, ohne daß er die untere Grenzkonzentration überschritten wurde. Die Säurezugabe von 0,068 ml hätte nicht größer sein dürfen, da sonst nach der einmaligen Zugabe die untere Grenzkonzentration überschritten worden wäre. Die Steuerung konnte den pH-Wert stabil halten, es kam zu keinem Oszillieren des pH-Wertes. Die Reaktion des pH-Wertes auf eine Zugabe von Lauge bzw. Säure ist abhängig von 1.) der Zugabemenge von Lauge bzw. Säure, 2.) dem Meerwasservolumen im Versuchsaquarium, 3.) dem Pufferverhalten des Meerwassers und 4.) den Wechselwirkungen

mit dem Versuchstier. Alle diese Faktoren sind durch Vorversuche nicht eindeutig bestimmbar, daher eröffnete das Computerprogramm CHEMOST.BAS die Möglichkeit alle einzustellenden Parameter, auch die Zugabmengen der einzelnen Lösungen, ohne Unterbrechung des laufenden Programms in geeigneter Weise abzuändern.

Versuch 2: *C. pacifica* mit einer Schalenlänge von 40 mm

Der zweite Versuch wurde mit einer Muschel der Gattung *Calyplogena pacifica* von 40 mm Schalenlänge durchgeführt und war zeitlich sechs mal länger als der erste Versuch. Der zeitabhängige Verlauf der Sulfidkonzentration in Abbildung 11a (Seite 26) läßt drei Gruppen von Zugaben erkennen. Nach der siebenmaligen Zugabe gegen 20:00 UTC steigt die Sulfidkonzentration rasch auf 66 μM an. Im Verlauf der nächsten 8½ Stunden wird dieses zugegebene Sulfid allmählich aufgebraucht. Die daraufhin folgende dreimalige Zugabe wird nach 3½ Stunden aufgebraucht. Der Verbrauch pro Zeit ist bei beiden Zugaben jedoch annähernd gleich: Eine einzelne Sulfidzugabe von 0,102 ml ist im Fall der sieben Zugaben nach 1 h 13 min aufgebraucht, die gleiche Menge ist im Fall der drei Zugaben nach 1 h 10 min aufgebraucht. Eine verminderte Durchmischung des Meerwassers im Versuchsaquarium könnte dafür verantwortlich sein, daß es zu sieben einzelnen Zugaben gegen 20:00 UTC gekommen ist. Dadurch ist der Sulfidgehalt stark angestiegen. Die Durchmischung war dann gegen 04:30 UTC besser, und der Sulfidgehalt stieg nicht mehr so steil an.

Die Spanne der Sulfidkonzentrationen in diesem Versuch mit Werten zwischen 47 und 66 μM sind für Muscheln der Gattung *Calyplogena* nicht ungewöhnlich. Childress et al. (1993) führten Versuche an vesicomiden Muscheln zwischen 65 und 140 μM durch. Barry & Kochevar (1998) untersuchten *Calyplogena pacifica* und *C. kilmeri* Muscheln, die von den Cold Seeps der Monterey Bucht stammten. Die Sulfidkonzentrationen im Umgebungswasser reichten bei ihren Versuchen bis 500 μM (Barry & Kochevar, 1998). Die *in situ* Sulfidkonzentrationen im Cold Seep Sedimenten der Monterey Bucht, in denen die vesicomiden Muscheln leben, reicht von 50 μM bis 10 mM, wobei *Calyplogena pacifica* eher in den peripheren Bereichen mit niedrigeren Sulfidkonzentrationen im Porenwasser anzutreffen ist (Barry et al., 1997). *Calyplogena kilmeri* siedelt dagegen im zentralen Seep Bereich mit höheren Sulfidkonzentrationen im Porenwasser (Barry et al., 1997; Barry & Kochevar, 1998).

Der Verlauf der Sauerstoffkonzentration in Abbildung 11b im zweiten Versuch zeigt, wie der Blindversuch, eine starke Variabilität. Aus diesem Grunde wurden die Grenzkonzentratio-

nen für Sauerstoff erneut so weit auseinandergelegt, so daß der Sauerstoffwert nur registriert und nicht geregelt wurde. Die Konzentrationswerte schwanken zwischen 22,3 und 312,4 $\mu\text{M O}_2$ mit einer mittleren Konzentration von $129,4 \pm 31,2 \mu\text{M O}_2$. Die mittlere Sauerstoffkonzentration lag somit etwas niedriger, als bei dem Blindversuch, bei dem der Mittelwert der Sauerstoffkonzentration bei 160,6 $\mu\text{M O}_2$ lag.

Der Verlauf des pH-Wertes im zweiten Versuch (Abbildung 11c) wurde abgesehen von einigen Ausreißern zwischen 19:37 und 20:55 UTC erfolgreich im vorgegebenen Intervall zwischen 7,89 und 7,91 gehalten. Die Ausreißer werden auf äußere Einflüsse zurückgeführt, die zu den kurzzeitigen Fluktuationen führten. Das Programm CHEMOST.BAS speicherte jede Minute einen Datensatz. Die Peaks im pH-Wert dauern zum Teil nur eine Minute an. Es wird angenommen, daß ein Sprung im pH-Wert von 0,1 nicht durch die Aktivitäten der Muschel bedingt war. Im Gegensatz zum ersten Versuch tendierte das System stärker zu niedrigeren pH-Werten. Der Chemostat mit dem Programm CHEMOST.BAS mußte daher wiederholt Lauge in das System geben, insgesamt 104 mal. Diese Laugenzugabe während des zweiten Versuches betrug insgesamt $104 \times 0,068 \text{ ml} = 7,072 \text{ ml}$. Es stellt sich die Frage, ob diese zugegebene Laugenmenge einen so starken Verdünnungseffekt hat, daß dadurch der Sulfidgehalt im Versuchsaquarium signifikant vermindert wurde. Bei einem gegebenen Volumen im Versuchsaquarium von 750 ml und einer mittleren Sulfidkonzentration von 55,7 μM errechnet sich die Endkonzentration durch Zugabe von 7,072 ml sulfidfreier Lauge nach Gleichung 7:

$$\frac{55,7 \mu\text{M} \times 750 \text{ ml}}{750 \text{ ml} + 7,072 \text{ ml}} = 55,2 \mu\text{M} \quad (7)$$

Die Sulfidkonzentration würde aufgrund des reinen Verdünnungseffektes also um $55,7 \mu\text{M} - 55,2 \mu\text{M} = 0,5 \mu\text{M}$ absinken. Diese Konzentrationsverminderung ist so gering, daß sie von der Sulfidelektrode mit einer Meßgenauigkeit von $\pm 2 \mu\text{M}$ nicht mehr aufgelöst werden kann. Der größte Anteil der 104 Laugenzugaben erfolgte im Bereich der Ausreißer der pH-Werte zwischen 19:38 und 20:54 UTC. Hier wurden 60% aller Laugenzugaben in das Versuchsaquarium gegeben. Die Abbildung 14 zeigt die Zeitdifferenz zwischen zwei aufeinander folgenden Laugenzugaben. Die ersten Laugenzugaben konnten den pH-Wert zwischen 10 und 20 Minuten im vorgegebenen Intervall halten, bevor die untere Grenzkonzentration wieder erreicht wurde. Im Bereich der starken Schwankungen des pH-Wertes zwischen 19:37 und 20:55 UTC wurde das Magnetventil für den Laugenvorrat im Minutentakt geöffnet. Nach den Störungen fluktuierten die Zeitintervalle zwischen zwei aufeinanderfolgenden Laugenzugaben

stärker, aber es ist ein Trend zu längeren Intervallen erkennbar. Teilweise liegen zwischen zwei Zugabeereignissen knapp eine Stunde.

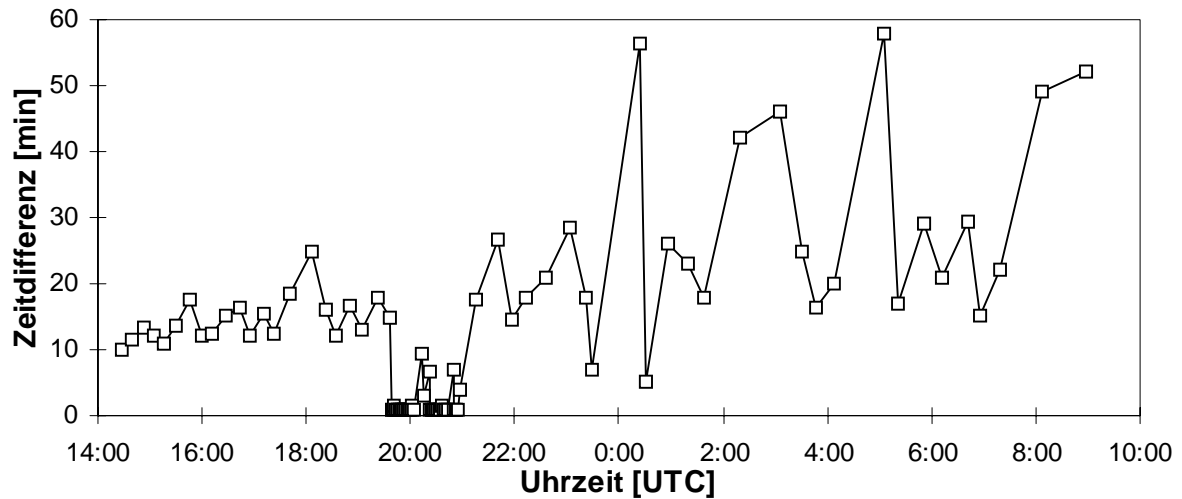


Abbildung 14: Zeitdifferenz zwischen aufeinander folgenden Laugenzugaben des zweiten Versuches in Abhängigkeit von der Versuchszeit (vergleiche dazu Abbildung 11c Seite 26).

Im ersten Versuch in Abbildung 9c (Seite 22) ist ebenfalls ein Trend zu niedrigeren pH-Werten erkennbar; obwohl die untere Grenzkonzentration während der Versuchszeit nicht erreicht wird. Das Meerwasser im Blindversuch strebte in Abbildung 10c' (Seite 24) dagegen zu höheren pH-Werten. Es wird vermutet, daß die Stoffwechselprodukte der Muschel für die Absenkung des pH-Wertes verantwortlich sind. Bei der Oxidation von Sulfid durch die endosymbiontischen Bakterien in der Muschelkieme werden Protonen freigesetzt (Jannasch, 1993), die mit dem Umgebungswasser nach Gleichung 8 zu Hydroniumionen reagieren, die für eine Absenkung des pH-Wertes verantwortlich sind (siehe auch Abbildung 13, Seite 34).



Diese Hydroniumionen könnten für eine pH-Wert Absenkung verantwortlich sein. Die Muschel der Gattung *Calyptogena pacifica* war im zweiten Versuch größer als die Muschel im ersten Versuch. Daher könnten auch vermehrt Stoffwechselprodukte angefallen sein, die zu einer verstärkten Absenkung des pH-Wertes im zweiten Versuch führten. Diese Vermutung ist konsistent mit der abnehmenden Sulfidzehrung innerhalb des zweiten Versuches. Wurde weniger Sulfid durch *Calyptogena pacifica* aufgenommen, wurden auch weniger Protonen freigesetzt. Dadurch wurde das zeitliche Intervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Lau-

genzugaben, wie in Abbildung 14 zu sehen ist, auch immer größer. Die geringeren Sulfidaufnahmeraten im ersten Versuch spiegelten sich auch in dem langsamer absinkenden pH-Wert wider (Abbildung 9c).

Da der pH-Wert einen bedeutenden Einfluß auf die Verteilung der einzelnen Sulfidspezies H_2S , HS^- und S^{2-} hat (Vismann, 1996a), mußte der pH-Wert während der Versuche zur Sulfidaufnahme der vesicomiden Muscheln in einem engen Bereich gehalten werden. Unter *in situ* Bedingungen sind die Muscheln im Cold Seep Sediment in den hier betrachteten Zeitskalen von einigen Stunden ebenfalls konstanten Bedingungen ausgesetzt.

2.4.5 Verbrauchsberechnungen

Es lassen sich Schlußfolgerungen auf den Metabolismus in Relation zu der Körpergröße treffen, wenn die Umsatzraten auf das Feuchtgewicht der Tiere bezogen werden (Childress & Mickel, 1985). Die Tiergröße ist nach Childress & Mickel (1985) ein wichtiger ökologischer Faktor, der die Mobilität, den Aufwand für Fortbewegung, die Möglichkeiten der Nahrungsbeschaffung, die Verwundbarkeit gegenüber Räubern und schließlich auch die Fruchtbarkeit beeinflusst.

Childress & Mickel (1982) führten ebenfalls Versuche zur Sulfidaufnahme von Muscheln der Gattung *Calyptogena pacifica* durch. Ein Vergleich der Laborversuche der vorliegenden Arbeit mit denen der beiden Autoren ist in Tabelle 7 aufgeführt. Die Muscheln bei Childress & Mickel (1982) stammten aus größeren Wassertiefen vor der Küste San Diegos im östlichen Pazifik.

Bezogen auf das Feuchtgewicht der Tiere ohne Schale haben Childress & Mickel (1982) in ihren Versuchen Sulfidaufnahmeraten zwischen $1,2$ und $12,5 \mu\text{mol g}^{-1} \text{d}^{-1}$ bei *Calyptogena pacifica* bestimmt. Bei zehn Versuchsdurchführungen ergibt sich bei ihnen eine mittlere Sulfidaufnahme von $7,92 \mu\text{mol g}^{-1} \text{d}^{-1}$ (Childress & Mickel, 1982). Die Sulfidaufnahmeraten der vorliegenden Arbeit von $1,31$ und $2,03 \mu\text{mol g}^{-1} \text{d}^{-1}$ liegen im Bereich der Vergleichsmessung von Childress & Mickel (1982). Für die Bestimmung der Sulfidaufnahmeraten haben Childress & Mickel (1982) die Muscheln etwa einen Tag hungern lassen, bevor die Versuche begonnen wurden. Die Versuche zur Sulfidaufnahme der vorliegenden Arbeit wurden mit Muscheln durchgeführt, die keinen längeren Hungerperioden ausgesetzt waren.

Tabelle 7: Vergleich der Versuchsbedingungen zur Sulfidaufnahme der vesicomiden Muscheln der Gattung *Calyplogena pacifica* mit Literaturwerten.

	vorliegende Arbeit	Childress & Mickel (1982)
Muschelspezies	<i>Calyplogena pacifica</i>	<i>Calyplogena pacifica</i>
Feuchtgewicht ohne Schale	0,7 - 1,4 g	1,5 - 3,8 g
Lokation	Eel River Seep, östl. Pazifik	vor San Diego, östl. Pazifik
Wassertiefe	492 m	1750 m
Hälterung unter <i>in situ</i> Temp.	ja (+4°C)	ja (+2,5°C)
Hälterung unter <i>in situ</i> Druck	nein	ja
Meßprinzip	Chemostat: Inkubation mit Erneuerung der Komponenten	Inkubation ohne Erneuerung der Komponenten
Inkubationszeit	3 - 19 Stunden	21 - 28 Stunden
Sulfidkonzentration	Start: 47 - 67 µM Ende: 47 - 67 µM	Start: 130 - 160 µM Ende: 30 - 90 µM
Sauerstoffkonzentration	Start: 66 - 242 µM Ende: 66 - 242 µM	Start: 290 - 335 µM Ende: 67 - 268 µM
pH-Wert	Start: 7,89 - 7,91 Ende: 7,89 - 7,91	Start: 6,5 Ende: keine Angabe

Für *Calyplogena magnifica* vom East Pacific Rise konnten Arp et al. (1984) zeigen, daß die Tiere in der Lage sind, das Sulfid des Umgebungswassers im hohen Maße in ihrem Blutserum aufzukonzentrieren. Die Autoren konnten bei Konzentrationen von 30 µM Sulfid im Außenmedium Sulfidgehalte von 700 µM im Blutserum der Muscheln messen (Arp et al., 1984). Dies entspricht einer 23fachen Anreicherung zwischen Außen- und Innenmedium. Childress et al. (1991) konnten für die gleiche Muschelspezies vom Galápagos Riff eine 10fache Anreicherung ermitteln. Maximale Sulfidkonzentrationen im Blutserum erreichten bei ihren Untersuchungen Werte von 6,6 mM (Childress et al., 1991). Eine andere vesicomide Muschel der Gattung *Calyplogena elongata*, aus dem Santa Barbara Kanal (östlicher Pazifik) lebt in Sedimenten mit niedrigen Sulfidkonzentrationen und kann ebenfalls Sulfid im Blutserum aufkonzentrieren (Childress et al., 1993). Die Sulfidbindung des Blutserums ist bei *C. elongata* reversibel, was durch das rasche Absinken der Sulfidkonzentration im Blutserum gezeigt werden konnte, wenn die Tiere in schwefelwasserstofffreiem Meerwasser gehalten wurden (Childress et al., 1993). Barry et al. (1997) konnten für *Calyplogena pacifica* aus dem Monterey Canyon ebenfalls eine hohe Sulfidbindung des Blutes nachweisen. Dabei zeigte sich, daß die Muscheln der Gattung *C. pacifica*, die an niedrigere Sulfidkonzentrationen im Umge-

bungswasser angepaßt sind, eine höhere Sulfidbindung im Blutserum aufweisen als *C. kilmeri*, die an höhere Sulfidkonzentrationen angepaßt ist (Barry & Kochevar, 1998). Die Autoren kommen zu dem Schluß, daß die obere Konzentration für *C. pacifica* bei ca. 150 µM Sulfid im Umgebungswasser liegt (Barry & Kochevar, 1998). Höhere Sulfidkonzentrationen müssen von ihr wieder in das Außenmedium abgegeben werden (Barry & Kochevar, 1998).

Unter der Annahme, daß die Sulfidbindung bei *Calyptogena pacifica* ebenfalls auf kurzen Zeitskalen reversibel ist, sollten längere Hungerperioden zu einem starken und raschen Absinken der Sulfidkonzentrationen im Blut führen. Die höheren Sulfidaufnahmeraten von Childress & Mickel (1982) könnten mit Tilgung der Sulfidschuld im Zusammenhang stehen. Die Autoren führten kurzfristige Wiederholungen der Bestimmungen der Sulfidaufnahmeraten durch, bei denen die mittlere Sulfidaufnahme von *C. pacifica* von 7,92 auf 3,36 µmol g⁻¹ d⁻¹ sank (Childress & Mickel, 1982). In der Tabelle 8 sind die ermittelten Sulfidaufnahmeraten der vorliegenden Arbeit mit denen von Childress & Mickel (1982) verglichen worden.

Tabelle 8: Vergleich der mittleren Sulfidaufnahmeraten von *Calyptogena pacifica* mit Werten aus der Literatur.

	vorliegende Arbeit	Childress & Mickel (1982)	
		1. Durchführung	2. Durchführung
mittlere Sulfidaufnahmeraten von <i>Calyptogena pacifica</i> [µmol g ⁻¹ d ⁻¹]	1,67	7,92	3,36

Das Meßprinzip bei Childress & Mickel (1982) bestand in einer Inkubation in einem abgeschlossenen Volumen ohne Erneuerung der verbrauchten Komponenten (siehe Tabelle 7). Durch die Aufnahme von Sulfid über den Fuß der Muschel, sinkt die Sulfidkonzentration im Versuchsmedium ab. Unter *in situ* Bedingungen erfahren die Muscheln kurzfristig keine Schwankungen der Sulfidkonzentration des austretenden Wassers im Cold Seep Sediment, wenn sie sich nicht gerade auf dem Sediment fortbewegen. Die höheren Sulfidaufnahmeraten von Childress & Mickel (1982) für *Calyptogena pacifica* könnten demnach auch mit dem experimentellen Design zusammenhängen, denn die Muscheln könnten durch die abnehmenden Sulfidkonzentrationen in ihren Versuchen unter Streß geraten und dadurch mehr Sulfid aufnehmen als unter natürlichen Bedingungen. Ein zusätzlicher Streßfaktor könnte bei Childress & Mickel (1982) auch in dem sich verändernden pH-Wert liegen. Die Autoren geben zwar laut Tabelle 7 keinen pH-Wert am Ende ihrer Versuche an, doch haben die Experimente

der vorliegenden Arbeit wie in Abbildung 11c (Seite 26) gezeigt, daß durch die metabolischen Prozesse der Sulfidoxidation Protonen freigesetzt werden, die zu einer Verringerung des pH-Wert führen können (siehe auch Abbildung 13, Seite 34). Childress & Mickel (1982) stellen den pH-Wert in ihrem Versuchsmedium schon zu Beginn auf einen relativ niedrigen Wert von 6,5 ein, um die spontane Sulfidoxidation durch den gleichzeitig anwesenden Sauerstoff zu vermindern. Der niedrigere pH-Wert, der im Laufe der Versuchsdurchführung bei Childress & Mickel (1982) noch weiter absinken müßte, verschiebt das Dissoziationssystem $\text{H}_2\text{S} / \text{HS}^- / \text{S}^{2-}$ in Richtung H_2S (Abbildung 4, Seite 9). Der undissoziierte Schwefelwasserstoff gilt als toxischer als die beiden anderen Sulfidspezies (Powell & Somero, 1986; Childress & Fisher, 1992; Vismann, 1996b). Der undissoziierte Schwefelwasserstoff könnte einen weiteren Streßfaktor für die Muscheln darstellen, der die Sulfidaufnahme erhöhen würde.

Der Sulfidbedarf einer einzelnen *Calyptogena pacifica*, bzw. einer Muschelgemeinschaft muß über den Fluidaustritt aus dem Sediment sichergestellt werden. Der Sulfidfluß vom Sediment in den bodennahen Wasserkörper wird aus der Kombination aus Konzentration und Ausstromrate bestimmt. Im folgenden Kapitel wird anhand der zwei neu entdeckten Cold Seep Gemeinschaften vor Makran (Pakistan) und West-Java (Indonesien) mit Hilfe der geochemischen Signatur des Porenwassers eine Charakterisierung der Seep Gebiete vorgenommen. Anschließend wird eine quantitative Abschätzung des Sulfidflusses in den Gebieten durchgeführt und mit der vorhandenen Muschelfauna in Beziehung gesetzt.

Bei Untersuchungen von Cold Seep Gemeinschaften in der Subduktionszone vor den Aleuten hat sich gezeigt, daß die vesicomiden Muscheln aus Wassertiefen um 5000 m nicht lebend an Bord gebracht werden können (Bohrmann et al., 1997; Suess et al., 1998). Die beiden neu entdeckten Cold Seeps liegen in Wassertiefen von über 2300 bzw. über 2900 m. Auch hier war es nicht möglich lebende Muscheln für Versuche zur Sulfidaufnahme bis an Bord des Schiffes zu bringen. Neben den negativen Dekompressionseffekten hat sicherlich die warme Deckschicht in den subtropischen und tropischen Regionen einen negativen Einfluß auf die Überlebensfähigkeit der Muscheln.



3 Geochemische Untersuchungen an Cold Seep Lebensgemeinschaften

Cold Seep Lebensgemeinschaften sind um Fluidaustrittsstellen herum angesiedelt und basieren auf der Zufuhr von reduzierten Substanzen aus dem Porenwasser (Sibuet et al., 1988). Die Zusammensetzung der austretenden Fluide variiert zwischen verschiedenen Seep Lokationen. Die Seeps im Golf von Mexiko sind mit dem Austritt von höheren Kohlenwasserstoffen assoziiert (Kennicutt et al., 1985; Aharon, 1994). An den Seeps im Eel River Becken vor Nordkalifornien findet man Gashydrate und hohe Konzentrationen an biogenem und thermogenem Methan (Kennicutt et al., 1989). Die Seeps am Florida Escarpment sind an hypersaline, sulfidreiche Fluide gebunden (Paull et al., 1984). Der biogene oder thermogene Abbau organischen Materials versorgt die Cold Seep Lebensgemeinschaften vor Oregon (Suess et al., 1985; Kulm et al., 1986). Am Nankai Trog (Boulègue et al., 1987) und am Barbados Akkretionskeil (Le Pichon et al., 1990) überwiegt der thermogene Abbau organischer Substanz. In der Subduktionszone vor Peru sind entweder kontinentale Aquifer oder die Erosion von kontinentaler Kruste an den Fluidaustritten beteiligt (Dia et al., 1993). In den tieferen Regionen der Monterey Bucht bilden schließlich Überschiebungsstörungen Wegsamkeiten für aufsteigende Fluide (Barry et al., 1996).

Zur Charakterisierung der austretenden Fluide der neu entdeckten Cold Seep Lebensgemeinschaften vor Makran im nördlichen Arabischen Meer und vor der Westküste Javas im östlichen Indik wurden geochemische Parameter im Porenwasser analysiert. Neben der Bestimmung von Sulfid, wurde Sulfat als oxidierte Form des Schwefels im Porenwasser untersucht. Die Alkalinität kann zusammen mit den Sulfid- und Kalziumwerten Hinweise zur Bildung von authigenen Karbonatpräzipitaten liefern. In diesem Zusammenhang stehen auch die Magnesium- und Strontiumgehalte im Porenwasser, da beide Elemente in die Karbonate eingebaut werden. Ammonium und Mangan zeigen die Redoxverhältnisse im Sediment an. Die konservativen Bestandteile wie Chlorid und Bromid können Hinweise liefern, ob zerfallende Gashydrate die Cold Seep Lebensgemeinschaften mit reduzierten Substanzen versorgen. Silikat kann den Einfluß von Bodenwasser auf die geochemischen Bedingungen im Porenwasser aufzeigen.

3.1 Untersuchungsgebiete

3.1.1 Makran

Das nordöstliche Arabische Meer ist gekennzeichnet durch eine hohe Primärproduktion in der euphotischen Zone und eine stabile Sauerstoff-Minimum-Zone in Wassertiefen zwischen 150 und 1150 m (Wyrki, 1973; Qasim, 1982; Plähn et al., 1999). Die Sauerstoff-Minimum-Zone ist definiert als Bereich, in dem die Konzentration an gelöstem Sauerstoff kleiner als $15,6 \mu\text{M}$ ist (Rad et al., 1995; Suthhof et al., 2000).

Der dünn besiedelte Küstenabschnitt zwischen Pakistan und dem Iran wird Makran genannt (Page et al., 1979). Der Akkretionskeil vor Makran (Abbildung 15) wird durch das Abtauchen der Arabischen Platte unter die Eurasische Platte gebildet (Rad et al., 1995). Die Makran Subduktionszone ist rund 900 km lang und reicht von der Straße von Hormus im Westen bis Karachi im Osten (White & Loudon, 1983; Ravaut et al., 1997). Im Süden wird die Arabische Platte durch den Murray Rücken begrenzt, der eine Fortsetzung der Owen Bruchzone darstellt (Flueh et al., 1997). Die Arabische Platte wird in einem flachen Winkel unter die kontinentale Eurasische Platte mit einer Geschwindigkeit von ca. 50 mm a^{-1} in nördlicher Richtung subduziert (Rad et al., 1995). Ein Teil der bis zu 9000 m mächtigen Sedimentauflagen wird durch den Subduktionsprozeß starken Kompressionen ausgesetzt, die zur Bildung von Bruchzonen, Faltungen und Hebungen führen (Platt et al., 1985). Das Porenwasser, das in den Sedimenten enthalten ist, wird durch die tektonische Deformation ausgepreßt und gelangt durch Bruchzonen an die Sediment-Wasser-Grenzschicht (Fowler et al., 1985; Langseth & Moore, 1990). Bei Untersuchungen in der Sauerstoff-Minimum-Zone vor Makran wurden die austretenden anoxischen Porenwässer anhand von weißlichen Bakterienmatten an der Sedimentoberfläche beschrieben (Rad et al., 1996).

Durch zwei Charakteristika unterscheidet sich der Akkretionskeil vor Makran von denen anderer konvergenter Plattenränder:

- 1.) Der typische Tiefseeegraben an der Kollisionszone zwischen den Platten fehlt (Rad et al., 1998). Es wird vermutet, daß der hohe terrestrische Sedimenteintrag dafür verantwortlich ist, da er einen entstehenden Tiefseeegraben wieder mit Sediment verfüllt (Rea & Ruff, 1996; Kopp et al., submitted). Da das Hinterland nur eine geringe Vegetation aufweist, kommt es zu starken erosiven Prozessen, und über die angrenzenden Flüsse werden die terrigenen Kompo-

nenten in das nördliche Arabische Meer über den Schelf hinaus an den Fuß des Akkretionskeils transportiert (Rad & Tahir, 1997; Rad et al., 1998).

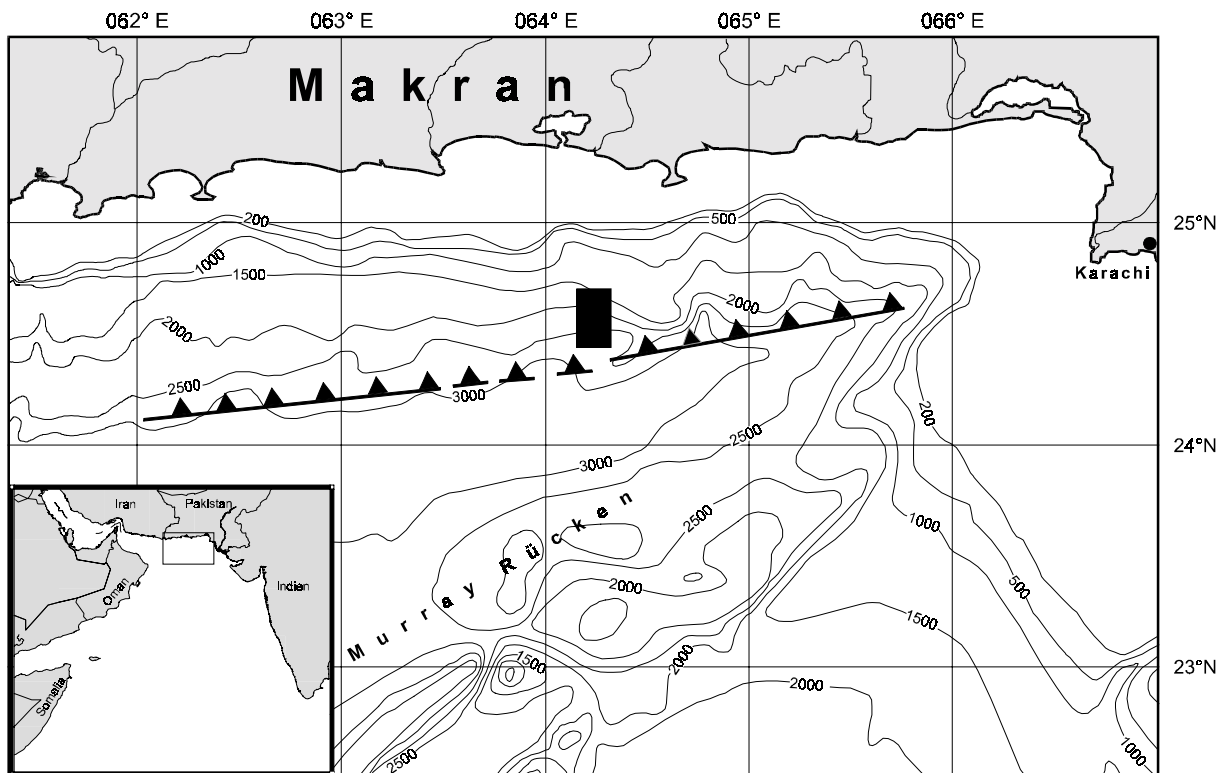


Abbildung 15: Untersuchungsgebiet im nördlichen Arabischen Meer vor der pakistanischen Küste. Das Rechteck ■ gibt den Ausschnitt der Cold Seep Lokalität in Abbildung 16 wieder. Die Deformationsfront an der die ozeanische Platte mit der kontinentalen kollidiert, ist durch ▲ gekennzeichnet.

2.) Der Akkretionskeil vor Makran ist mit ca. 500 km der weltweit breiteste Akkretionskeil (White & Loudon, 1983; Minshull & White, 1989; Kusky & Polat, 1999). Nur 70 km sind untermeerisch, der Rest des Akkretionskeils befindet sich auf dem Kontinent (Minshull & White, 1989; Rad et al., 1998). Hier deuten die aktiven Schlammvulkane entlang der Küstenregion auf eine aktive Entwässerung des Akkretionskeils hin (Ahmed, 1969). Die untermeerischen Akkretionsrücken verlaufen senkrecht zur Subduktionsrichtung, wobei der jüngste Rücken direkt an der Akkretionsfront in 3000 m Wassertiefe zu finden ist und in west-östlicher Richtung verläuft (Flueh et al., 1997). Die Zählung der Rücken beginnt an der Akkretionsfront aufsteigend in Richtung des Kontinents. Der jüngste Rücken ist also gleichzeitig der erste Rücken.

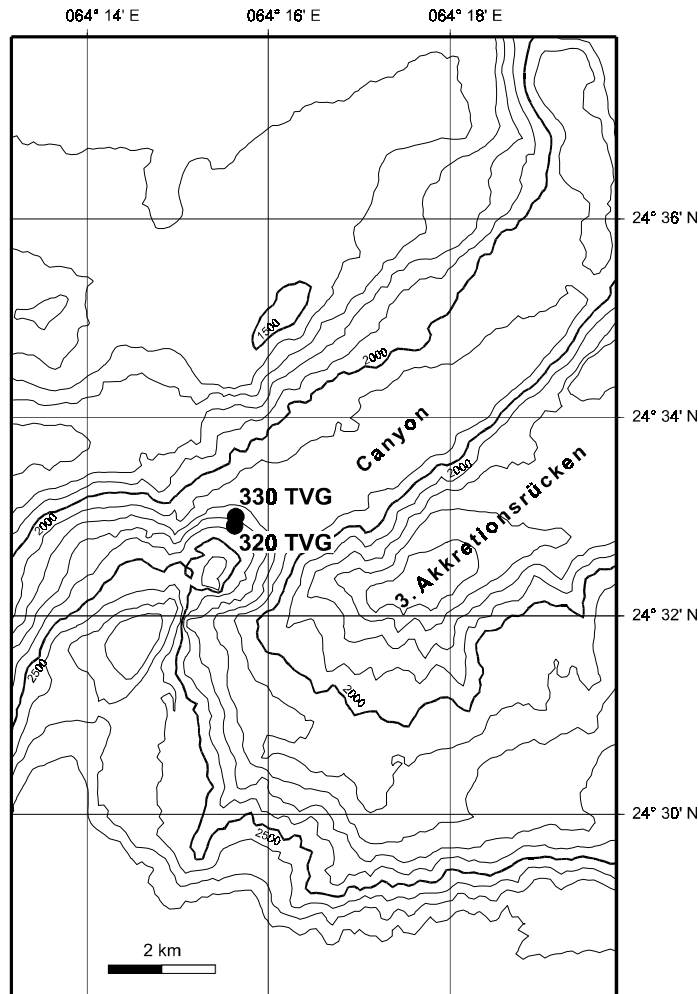


Abbildung 16: Cold Seep Gebiet in einer Canyonstruktur am dritten Akkretionsrücken vor Makran. Die Positionen der TV-Greifer sind mit einem ausgefüllten Kreis (●) gekennzeichnet. Die Tiefenlinien sind im 100 m Intervall aufgetragen. Die Karte wurde während der Fahrt mit dem bordeigenen Fächerecholotsystem aufgezeichnet.

Während der Expedition im Rahmen des Makran II Projektes wurde der Akkretionskeil vor Makran zwischen dem 3. April und dem 3. Mai 1998 mit dem deutschen Forschungsschiff FS SONNE im Rahmen der Fahrt SO-130 untersucht und beprobt (Rad et al., 1998). Am dritten Akkretionsrücken unterhalb der Sauerstoff-Minimum-Zone in einer Wassertiefe von 2300 m wurde in einer Canyonstruktur (Abbildung 16) eine Cold Seep Lebensgemeinschaft entdeckt und beprobt (Linke et al., in prep.).

3.1.2 West-Java

Schon vor hundert Jahren hat Carl Chun im Rahmen der Valdivia-Expedition die Tiefen im Sundagraben vor Sumatra ausgelotet (Chun, 1900). Der Sundagraben ist ein Teil der 5000 km langen Subduktionszone, die von Burma im Nordwesten bis zum Banda Bogen im Osten reicht (Burret, 1974; Nishimura & Suparka, 1990). Der ausgeprägte Akkretionskeil vor Sumatra und Java im östlichen Indischen Ozean wird durch das Abtauchen der Indo-Australischen Platte unter die Eurasische Platte gebildet (Abbildung 17).

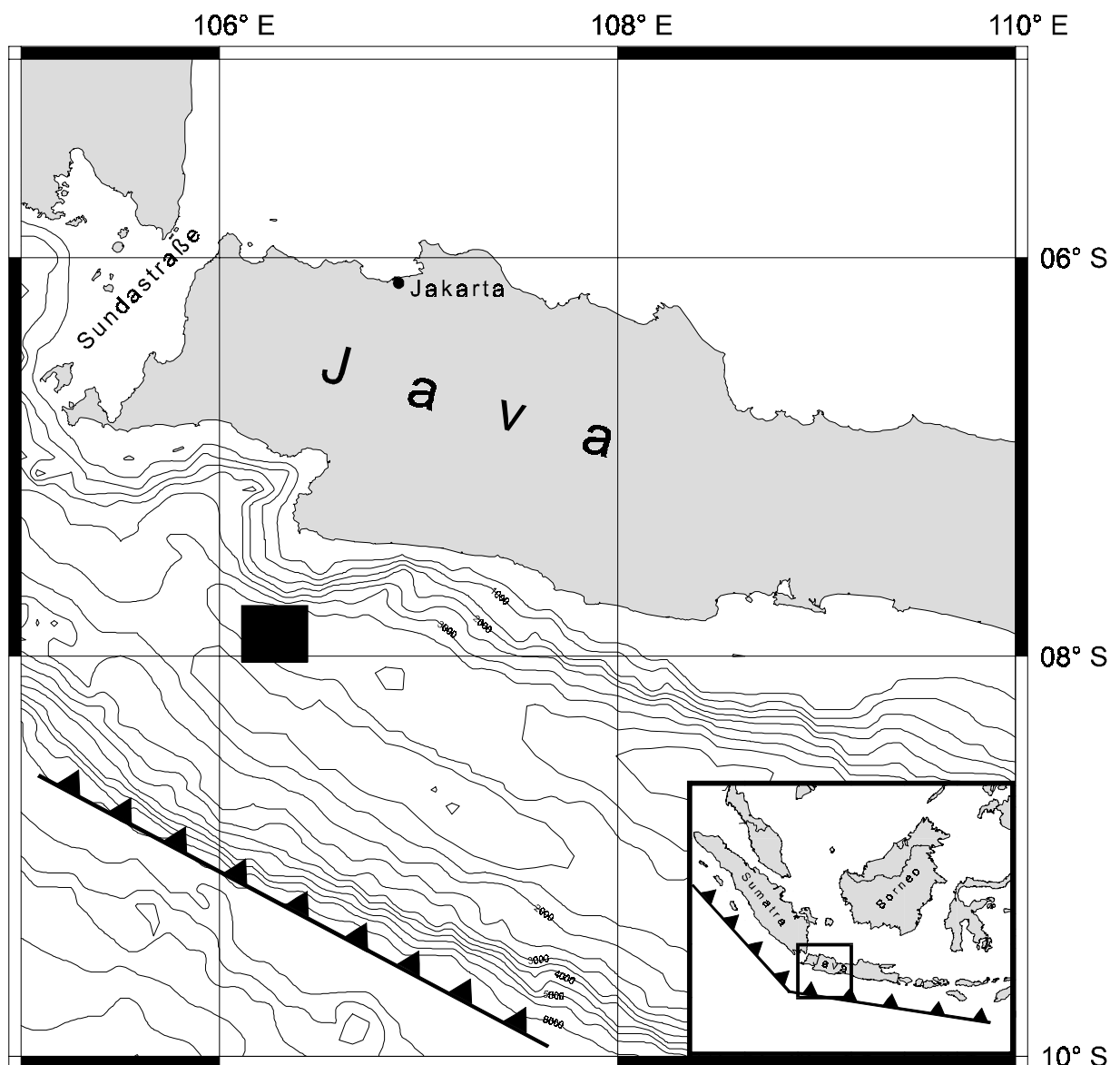


Abbildung 17: Untersuchungsgebiet vor der Westküste Javas. Das ausgefüllte Rechteck (■) entspricht dem Kartenausschnitt in Abbildung 18. Die Deformationsfront, an der die ozeanische Platte mit der kontinentalen kollidiert, ist durch ▲ gekennzeichnet. Die Tiefenlinien sind im 500 m Intervall aufgetragen.

Vor der Küste Ost-Javas erfolgt die Subduktion senkrecht zur Küstenlinie in nördlicher Richtung (Curry, 1989). Dagegen verläuft die Subduktion weiter westlich in einem schrägen Winkel zur Küste (Beck, 1983; McCaffrey, 1991; McCaffrey, 1992). Daher variiert die Subduktionsgeschwindigkeit mit der die ozeanische Platte unter die kontinentale Platte geschoben wird. Im Westen vor Sumatra beträgt die Geschwindigkeit 60 mm a^{-1} , im östlichsten Bereich des Subduktionskomplexes im Bereich des Bandabeckens beträgt sie 78 mm a^{-1} (Karig et al., 1979; Chamot-Rooke & Le Pichon, 1999). Der Tiefseegraben an der Nahtstelle beider Platten ist bis zu 7455 m tief. Diese Tiefe im Sundagraben wird Planet-Tiefe genannt und ist die größte Tiefe des Indischen Ozeans (Dietrich et al., 1975).

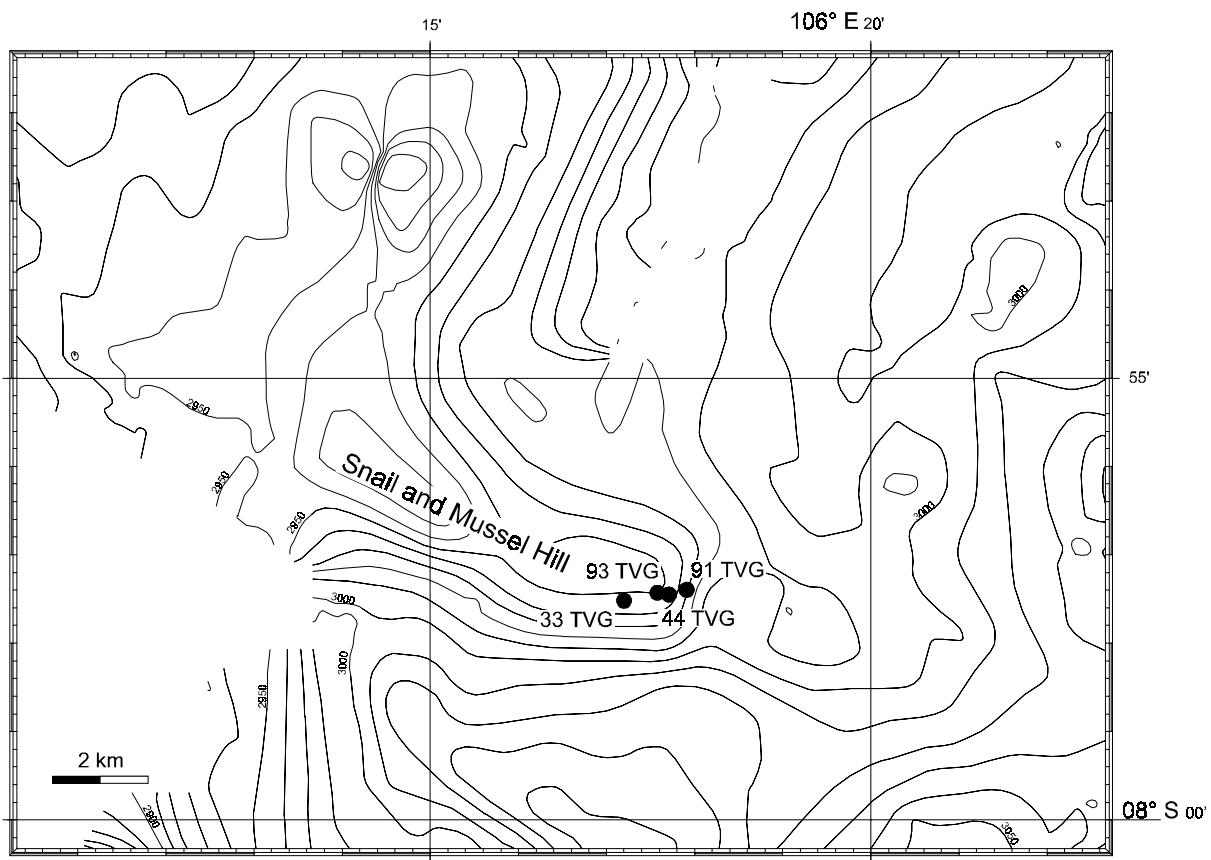


Abbildung 18: Cold Seep Gebiet vor der Westküste Javas. Die Kreissymbole (●) kennzeichnen die TV-Greifer Positionen am 'Snail and Mussel Hill' im Forearc-Becken vor West-Java. Die Tiefenlinien sind im 10 m Intervall aufgetragen. Die Karte wurde während der Fahrt mit dem bordeigenen Fächer-echolotsystem aufgezeichnet.

Während der Expedition SO-139 mit dem deutschen Forschungsschiff FS SONNE vom 30. Januar bis 27. Februar 1999 wurde im Rahmen des GINCO-Projektes (**G**eoscientific **I**nvestigations along the **C**onvergence Zone between the Eastern Eurasian and Indo-Australian Plates off Indonesia) das Forearc-Becken vor West-Java untersucht. Der Neigungswinkel der ozeani-

schen Platte beträgt in diesem Gebiet ca. 5° (Flueh et al., 1999). Das Becken vor West-Java zeigt eine bis zu 5000 m mächtige Sedimentfüllung (Flueh et al., 1999). Hier wurde auf der Expedition SO-139 am nordwestlichen Ende des seismischen Profils mit dem Namen "SO-137-01" eine chemoautotrophe Lebensgemeinschaft in einem Cold Seep Gebiet in einer Wassertiefe von 2970 m entdeckt (Abbildung 18). Es ist die erste Cold Seep Lebensgemeinschaft, die vor der Westküste Javas entdeckt wurde. Die Cold Seep Lebensgemeinschaft wurde an der östlichen Stirnseite einer von West nach Ost verlaufenden Erhebung entdeckt, die als 'Snail and Mussel Hill' bezeichnet wurde. Zu dieser Namensgebung kam es, da neben den vesicomiden Muscheln auch viele buccinide Schnecken am Rande der Erhebung entdeckt wurden. Der 'Snail and Mussel Hill' erhebt sich gut 30 m über das umgebende Sediment des Beckens. Das Parasound-Profil zeigt, daß die oberen Sedimentlagen des 'Snail and Mussel Hill' stark gestört sind (Beiersdorf et al., 1999).

3.2 Methodik

3.2.1 Geräteinsatz und Probengewinnung

Foto- und Videoschlitten

Das Forschungsschiff FS SONNE war mit einem bordeigenen Videoschlitten OFOS (**O**cean **F**loor **O**bservation **S**ystem) ausgestattet (Holler, 1995). Er diente der Beobachtung und Dokumentation der Sedimentoberfläche. Der Videoschlitten war mit zwei lotrecht orientierten Videokameras, einer Stereo-Fotokamera und der entsprechenden Beleuchtung bestehend aus Lampen bzw. Fotoblitzen ausgestattet. Die Fotokamera (Fa. Benthos, North Fal-mouth, USA) war in der Lage bis zu 800 Fotos während eines Einsatzes zu schießen. Das kürzeste Intervall zwischen zwei Fotos betrug 8 Sekunden, da die Blitze wieder aufgeladen werden mußten. Zusätzlich war der Videoschlitten mit einer Speicher-CTD (Fa. Sea-Bird, Washington, USA) und einer Respondernavigation (Fa. Simrad, Aberdeen, Schottland) ausgestattet, die der Positionsbestimmung des Schlittens in Relation zum Schiff diente. Der Responder arbeitete mit dem SSBL-System (**S**uper **S**hort **B**ase **L**ine). Das Forschungsschiff FS SONNE war während der Expedition mit einem DGPS-System (**D**ifferential **G**lobal **P**ositioning **S**ystem) ausgestattet, das eine Navigation mit ± 10 m Genauigkeit erlaubte. Zusätzlich war das Schiff mit einem dynamischen Positionierungssystem ausgestattet, das es ermöglichte, den Schiffsort mit Hilfe der DGPS Daten automatisch zu korrigieren (vergleiche Kapitel 2.2.6). Die in Relation zum Schiff bestimmte Position des Videoschlittens konnte dadurch direkt in einen Ort nach geographischer Breite und Länge umgerechnet werden.

Die Energieversorgung für den Videoschlitten erfolgte über den Koaxialdraht, die Datenübertragung wurde über den ebenfalls im Draht enthaltenen Lichtwellenleiter sichergestellt. Die Bordeinheit diente zur Regulierung der Lampen und zum Auslösen der einzelnen Fotos.

Der Schlitten wurde zwischen 1 und 2 m über der Sedimentoberfläche mit einer Geschwindigkeit von 0,4 bis 1,0 kn FÜG (Fahrt über Grund) geschleppt. Der Abstand zwischen dem Videoschlitten und der Sedimentoberfläche wurde mit einem Vorlaufgewicht kontrolliert. Der Windenfahrer am Fahrstand im Labor konnte mit Hilfe des Videobildes eine Abweichung des Abstandes unmittelbar korrigieren. Das Videobild wurde zusätzlich auf VHS und S-VHS Videobändern aufgezeichnet. Das Fotomaterial bestand aus 200 ASA Kodak Ekta-

chrome Filmen mit einer Länge von 30 m. Die Fotofilme konnten direkt nach dem Einsatz an Bord des Schiffes entwickelt werden.

Der Videoschlitten wurde für die optische Suche nach Cold Seep Lebensgemeinschaften verwandt. Die Einsätze des Schlittens folgten meist nach der Analyse von gelöstem Methan in der Wassersäule. Die Wasserproben wurden mit einer CTD und Kranzwasserschöpfer gewonnen. Nachdem erhöhte Methankonzentrationen in einer bestimmten Wassertiefe entdeckt worden waren, wurde mit Hilfe der bathymetrischen Karte nach geologisch interessant erscheinenden Strukturen in der gleichen Wassertiefe gesucht da man annimmt, daß sich die austretenden Fluide vorwiegend in der gleichen Wassertiefe horizontal ausbreiten. Der Transekt für den Videoschlitten wurde daraufhin meist hangabwärts entlang dieser Strukturen festgelegt.

TV-Greifer

Zur Sedimentprobennahme wurde ein videogeführter Greifer (TV-Greifer) eingesetzt (Fa. Preussag AG-Meerestechnik, Hannover). Er arbeitete nach dem Backengreifer-Prinzip. Im geöffneten Zustand bedeckte der Greifer eine Sedimentfläche von 1,82 m² und drang beim Zugreifen ca. 50 cm tief in das Sediment ein (Holler, 1995). Zwischen den beiden Schaufeln befand sich eine senkrecht nach unten schauende Videokamera und zwei Lampen zum Ausleuchten des Blickfeldes. Der Greifer wurde wie der Videoschlitten 1 bis 2 m über der Sedimentoberfläche mit maximal 0,8 kn FüG geschleppt. Auch hier diente ein Vorlaufgewicht der Regulierung des Abstandes zwischen Greifer und Sediment. Der Greifer war im Gegensatz zum Videoschlitten mit einer eigenen Stromversorgung ausgestattet, die die Energie für die Lampen, die Videokamera und den hydraulischen Schließvorgang zur Verfügung stellte. Oberhalb des Greifers wurde in einem Abstand von 15 m ein mobiler Responder an den Draht geklemmt, der der Positionierung des Gerätes im Verhältnis zum Schiff diente.

Nach dem Absetzen und Schließen des Greifers auf dem Sediment, wurde er an Bord gehievt und im geschlossenen Zustand an Deck abgesetzt. Durch vier Klappen auf der Oberseite des Greifers konnten Sedimentproben mit Hilfe von Plexiglas[®]-Rohren mit einem Innendurchmesser von 10 cm entnommen werden. Die Rohre wurden manuell in das Sediment gestochen, oben verschlossen und anschließend ausgegraben. Für weitere Untersuchungen wurden die Sedimentrohre in den Kühlraum (+3°C) gebracht. Dort wurden die Sedimentkerne aus den Plexiglas[®]-Rohren herausgeschoben und in horizontale Scheiben unterschiedlicher Dicke

geschnitten. In einer Polypropylen Porenwasserpresse unter Argon-Schutzgas wurden die Sedimentscheiben bei 3 bar Überdruck ausgepreßt. Ein Cellulose-Acetat-Filter mit einer Porenweite von 0,45 µm hielt die festen Sedimentbestandteile beim Auspressen zurück. Das gewonnene Porenwasser wurde in HCl-gereinigten 30 ml Nalgene®-Flaschen aufgefangen. Für die Analysen an Bord wurde ein Teil des Porenwassers abgenommen, der Rest wurde für weitere Analysen bei -20°C eingefroren und mit Trockeneis-Kühlung zurück zum GEOMAR-Forschungszentrum transportiert.

Die vorhandenen toten Muscheln wurden aus dem Greifersediment herausgesammelt, gereinigt und vermessen. Sie wurden anschließend bei -20°C eingefroren. Das Feuchtgewicht ohne Schale wurde im GEOMAR-Labor bestimmt.

Die Positionen und Wassertiefen der TV-Greifer Stationen vor Makran (SO-130) und vor West-Java (SO-139) sind in Tabelle 9 zusammengefaßt.

Tabelle 9: Stationsliste der TV-Greifer-Stationen während der Expedition vor Makran (SO-130) und vor West-Java (SO-139).

Reise / Station	Datum	Position		Wassertiefe
		geogr. Breite	geogr. Länge	
SO-130/320 TVG	28.04.1998	24° 33,09' N	064° 15,79' E	2334 m
SO-130/330 TVG	01.05.1998	24° 33,00' N	064° 15,64' E	2334 m
SO-139/33 TVG	09.02.1999	07° 57,79' S	106° 17,20' E	2969 m
SO-139/44 TVG	12.02.1999	07° 57,45' S	106° 17,71' E	2958 m
SO-139/91 TVG	24.02.1999	07° 57,40' S	106° 17,90' E	2963 m
SO-139/93 TVG	24.02.1999	07° 57,43' S	106° 17,58' E	2942 m

3.2.2 Analytik an Bord

Die Parameter Sulfid, Alkalinität und Ammonium wurden auf den beiden Expeditionen bereits an Bord direkt nach dem Pressen gemessen. Auf der Expedition SO-139 vor West-Java wurde zusätzlich noch Silikat an Bord bestimmt, da sich gezeigt hatte, daß Silikat in den gefrorenen Proben dazu neigt Kolloide zu bilden, die bei der Probenaufbereitung am GEOMAR-Forschungszentrum nicht wieder aufgeschlossen werden konnten.

Sulfid

Die Bestimmung von Sulfid als Gesamtsulfid wurde photometrisch nach Cline (1969) und Grasshoff et al. (1983) durchgeführt. In einem Eppendorf-Cup wurden 50 µl Zinkacetat-Gelatine-Lösung vorgelegt, um das ausgefallene ZnS aus 1 ml zugegebener Probe kolloidal in Lösung zu halten. Nach Zugabe des Farbreagens (N,N-Dimethyl-1,4-phenylendiamin-dihydrochlorid) und des Katalysators (FeIII-Chlorid in HCl) wurde der entstandene Methylenblau-Farbkomplex bei 670 nm Wellenlänge im Photometer bestimmt (Perkin Elmer, Modell: Lambda 2; Norwalk, Connecticut, USA). Alle Lösungen wurden mit sauerstofffreiem künstlichen Meerwasser angesetzt, und alle Gefäße wurden vor der Benutzung mit Argongas gespült, um die Oxidation von Sulfid zu Thiosulfat und Sulfat zu verhindern. Der Sulfidgehalt der Proben wurden gegen eine Kalibrierreihe bestimmt. Da die Sulfidkonzentration der H₂S-Stammlösung durch Autooxidation abnimmt (Millero, 1986), wurde sie mit einem Kaliumjodat Standard versetzt und mit einem Thiosulfat-Titer gegentitriert, um die genaue Sulfidkonzentration in der Lösung zu berechnen.

Ammonium

Die Ammoniumkonzentration im Porenwasser wurde ebenfalls photometrisch nach Solórzano (1969) und Grasshoff et al. (1983) bestimmt. Die Porenwasserprobe wurde mit einer alkoholischen Phenol-Nitropussid-Lösung versetzt. Nach zwei Minuten wurde ein Citratpuffer und die DTT-Lösung (Dichloro-Isocyanursäure) zugegeben. Der blaue Farbkomplex entwickelte sich innerhalb der nächsten zehn Stunden und wurde im Photometer bei 630 nm Wellenlänge gemessen. Die Proben wurden gegen eine Kalibrierreihe aus Ammonium-Standards gemessen.

Alkalinität

Die Gesamtalkalinität ist definiert als die Gesamtkonzentration der Anionen schwacher Säuren (z.B. CO₃²⁻, HCO₃⁻, B(OH)₄⁻ und OH⁻), die die Tendenz haben Protonen aufzunehmen (Stumm & Morgan, 1996). In sulfidhaltigem Porenwasser kommt noch HS⁻ als Anion der schwachen Säure H₂S hinzu. Für die Bestimmung der Gesamtalkalinität wurden zwei Pufferansätze von 70 ml synthetischen Meerwassers mit 0,01 M HCl auf einen pH-Wert von 3,00 bzw. 3,52 eingestellt. Das mit einem pH-Meter (Schott, Hofheim) gemessene Potential der beiden Pufferansätze wurde gemessen (Zweipunkt-Kalibrierung). Die Alkalinitätsbestimmung der Porenwasserproben wurde über eine Einpunkt-Titration von 1 ml Probenvolumen durch-

geführt. Die vorgelegte Probe wurde schrittweise mit einer 0,01 M HCl-Lösung versetzt, bis das gemessene Potential innerhalb des Kalibrierbereichs lag. Bei Proben mit einer hohen Alkalinität wurde statt der 0,01 M HCl eine 0,1 M HCl-Lösung verwendet, um den Verdünnungseffekt durch die Säurezugabe zu minimieren. Zur Kontrolle wurde in regelmäßigen Abständen die Alkalinität des IAPSO-Meerwasser-Standards (**I**nternational **A**ssociation for **P**hysical **S**ciences of the **O**ceans) mitgemessen (Goyet et al., 1985). Die Kalibrierungen und Messungen der Alkalinität fand im bordeigenen Kühlraum unter *in situ* Temperaturbedingungen statt (+3°C).

Silikat

Die Silikatkonzentration im Porenwasser wurde nach Grasshoff et al. (1983) bestimmt. Die Porenwasserprobe wurde mit einer schwefelsauren Heptamolybdat-Lösung versetzt. Nach 30 Minuten wurde Oxalsäure und Ascorbinsäure zupipettiert. Nach weiteren 30 Minuten wurde der blaue Siliko-Molybdat-Komplex im Photometer bei 810 nm Wellenlänge gemessen. Die Proben wurden gegen eine Kalibrierreihe aus Silikat-Standards gemessen.

Silikat wurde nur auf der Expedition SO-139 vor der Küste West-Javas an Bord des Schiffes bestimmt. Die Porenwasserproben der Expedition SO-130 vor Makran wurden mit der ICP-AES Anlage auf Silikat analysiert (s.u.).

3.2.3 Analytik am Institut

Analyse der Anionen

Die Ionenchromatographie wurde am GEOMAR-Forschungszentrum für die Analyse der Anionen Sulfat, Chlorid und Bromid in den Porenwasserproben eingesetzt. Die Anlage der Firma Sykam, Fürstenfeldbruck, arbeitete mit einer firmeneigenen Anionen-Trennsäule mit der Bezeichnung LCA A14. Als Fließmittel wurde eine 7,5 mM Natriumcarbonat-Lösung (Na_2CO_3) eingesetzt. Nach der Trennsäule wurde der Eluent durch eine nachgeschaltete Suppressorsäule geleitet. Sie vermindert die Leitfähigkeit des Fließmittels, um die Messung von Chlorid und Sulfat im Leitfähigkeitsdetektor zu verbessern. Bromid wurde dagegen über UV Absorption bei einer Wellenlänge von 204 nm quantitativ bestimmt.

Die Porenwasserproben wurden im Verhältnis 1:50 mit dem Fließmittel verdünnt, bevor 20 μl Volumen auf die Trennsäule gegeben wurde. Die Kalibration erfolgte mit einem

IAPSO-Meerwasser-Standard (International Association for Physical Sciences of the Oceans). Die Meßfehler liegen bei Chlorid bei 0,4%, bei Sulfat bei 1,2% und bei Bromid bei 2,2%.

Analyse der Kationen

Am GEOMAR-Forschungszentrum wurde eine ICP-AES Anlage der Firma Jobin Yvon, Grasbrunn (Modell 170 Ultratrace), zur Analyse der Kationen in den Porenwasserproben eingesetzt. Die Abkürzung ICP-AES steht für **I**nductively **C**oupled **P**lasma - **A**tomic **E**mission Spectrometry (Abbildung 19 links). Dabei wurden folgende Kationen gemessen und ausgewertet: Silizium, Mangan, Kalzium, Barium, Natrium, Magnesium und Strontium.

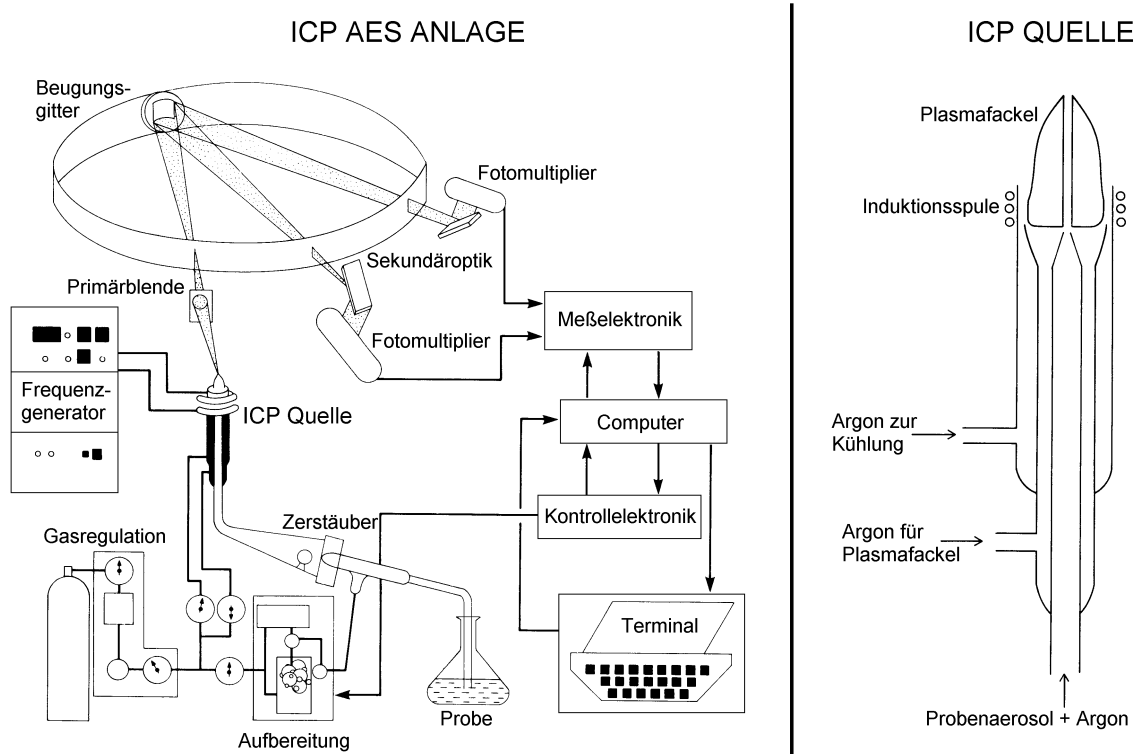


Abbildung 19: Aufbau der Atom-Emissions-Spektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (links), und der vergrößert dargestellte Aufbau der ICP Quelle (rechts). Weitere Erläuterungen im Text (modifiziert nach van Loon & Barefoot, 1989).

Die Atom-Emissions-Spektroskopie (AES) beruht auf der Anregung von Atomen. Beim Übergang vom angeregten Zustand in den Grundzustand emittieren sie Licht elementsspezifischer Wellenlängen. Die Intensität dieser Wellenlängen ist ein Maß für die Konzentration des jeweiligen Elementes. Da die Bildung angeregter Atome eine hohe Energiezufuhr erfordert, liegt die Temperatur der Anregungsquelle der AES in der Regel zwischen 5000 und 10.000 K. Induktiv eingekoppelte elektromagnetische Hochfrequenzen (ICP) erzeugen ein Plasma mit

den erforderlichen Temperaturen. Dabei wird Argon wegen seiner leichten Ionisierbarkeit als Plasmagas eingesetzt (van Loon & Barefoot, 1989).

Der Argonstrom wird dabei in drei Anteile aufgeteilt (Abbildung 19 rechts): Die flüssige Probe wird im Zerstäuber mit Argongas in ein Aerosol überführt und im zentralen Rohr der ICP-Quelle transportiert. Der Anteil an Argon, der die Plasmafackel am brennen hält, wird im mittleren Teil transportiert. Schließlich wird im äußeren Mantel der ICP-Quelle Argongas zur Kühlung eingespeist. Dieser äußere Argonstrom verhindert zusätzlich, daß die Plasmafackel zu flackern beginnt (van Loon & Barefoot, 1989). Das emittierte Licht der ionisierten Probe wird in einem Spektrometer in Abhängigkeit von der Wellenlänge mittels eines Beugungsgitters aufgeteilt (Abbildung 19 links oben) und durch die Fotomultiplier quantitativ gemessen.

Der Vorteil bei der Messung mit einer ICP-AES Anlage liegt in der Möglichkeit Multielementanalysen durchführen zu können (van Loon & Barefoot, 1989). Zudem sind die Kalibrationskurven der einzelnen Elementkonzentrationen über fünf Größenordnungen linear (van Loon & Barefoot, 1989). Die Kalibration erfolgte am GEOMAR-Forschungszentrum mit einem Multielementstandard. Den Proben wurde bei der Verdünnung ein interner Yttrium-Standard zugesetzt, um Schwankungen bei der Probenzugabe rechnerisch ausgleichen zu können. Zusätzlich wurde der IAPSO-Meerwasser-Standard (International Association for Physical Sciences of the Oceans) mitgemessen. Die Porenwasserproben wurden vor der Messung im Verhältnis 1:10 verdünnt. Die Wellenlängen, bei denen die einzelnen Elemente gemessen wurden, sind in Tabelle 10 angegeben.

Tabelle 10: Übersicht über die gemessenen Elemente und den benutzten Wellenlängen bei der ICP-AES-Messung.

Element	Wellenlänge [nm]
Si	251,611
Mn	257,610
Ca	317,933
Ba	455,500
Na	330,237
Mg	383,231
Sr	407,771

Zu den angegebenen Elementen wurde noch zusätzlich Kalium, Lithium und Bor gemessen. Die Porenwasserprofile dieser drei Elemente zeigten aber keine Auffälligkeiten und wurden daher im folgenden Kapitel der Ergebnisse nicht mit aufgeführt.

3.3 Ergebnisse

In der Tabelle 11 sind die Hintergrunds-Konzentrationen der gelösten hier analysierten Anteile im Meerwasser zusammengestellt. Bei den Gehalten an gelöstem Silikat im Meerwasser gibt es große regionale und tiefenabhängige Unterschiede. Daher wurde die Tiefenwasserkonzentration aus einer Arbeit im nördlichen Arabischen Meer als Bodenwasserwert herangezogen (Rickert, 1999). Die Bariumkonzentrationen schwanken ebenfalls in Abhängigkeit vom Meeresgebiet und der Wassertiefe (Dymond et al., 1992; Shaw et al., 1998). In der Regel steigt der Bariumgehalt mit der Tiefe an (Falkner et al., 1993). Der genaue Wert der Bariumkonzentration im Bodenwasser ist für die beiden Untersuchungsgebiete nicht bekannt. Aus diesem Grund wurde bei den Abbildungen der Bariumprofile kein Bodenwasserwert mit angegeben.

Tabelle 11: Zusammenstellung der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Parameter und deren mittleren Konzentrationen im Meerwasser (nach Dietrich et al., 1975; Wright & Colling, 1995). Die Silikatkonzentration stammt aus Messungen im Bodenwasser im nördlichen Arabischen Meer (Rickert, 1999). Die Bariumkonzentration ist sehr variabel und schwankt zwischen 50 und 250 nM. Sie wurde daher in dieser Tabelle nicht mit aufgeführt.

Parameter	Konzentration im Meerwasser
H ₂ S	0,0 μM
SO ₄ ²⁻	28,4 mM
Alk	2,4 mM
NH ₄ ⁺	0,0 mM
Cl	535,9 mM
Br	838,5 μM
Si	143,0 μM
Mn	0,04 μM
Ca	10,2 mM
Ba	variabel
Na	466,3 mM
Mg	55,5 mM
Sr	87,9 μM

3.3.1 Porenwasserprofile vor Makran

Nachdem mit dem OFOS-Videoschlitten in der Canyonstruktur nahe am dritten Akkretionsrücken aktive chemoautotrophe Lebensgemeinschaften entdeckt und dokumentiert wurden (Abbildung 20), kam der TV-Greifer auf zwei Stationen zum Einsatz. Die erste Greiferstation 320 TVG (TV-Greifer) lag neben einer Cold Seep Gemeinschaft, die zweite Station 330 TVG beprobte erfolgreich eine Seep Gemeinschaft. Im folgenden werden die Porenwasserprofile der beiden Greiferstationen beschrieben.



Abbildung 20: OFOS-Foto einer Cold Seep Lebensgemeinschaft im Canyon vor Makran in einer Wassertiefe von 2334 m. In der unteren Bildmitte sind einige *Calyptogena*-Muscheln und ihre Kriechspuren zu erkennen. Rechts liegen einige leere Schalen auf dem Sediment. Am oberen Bildrand sind der Schatten des Vorlaufgewichtes und einige Sedimentaufwirbelungen durch das Gewicht sichtbar.

Station SO-130/320 TVG

Das Videobild des TV-Greifers auf Station 320 TVG zeigte beim Zugreifen in einer Wassertiefe von 2334 m, daß er neben einem Muschelfeld abgesetzt wurde. Für die Analyse des Porenwassers wurde ein Sedimentkern aus dem Greifer ausgestochen.

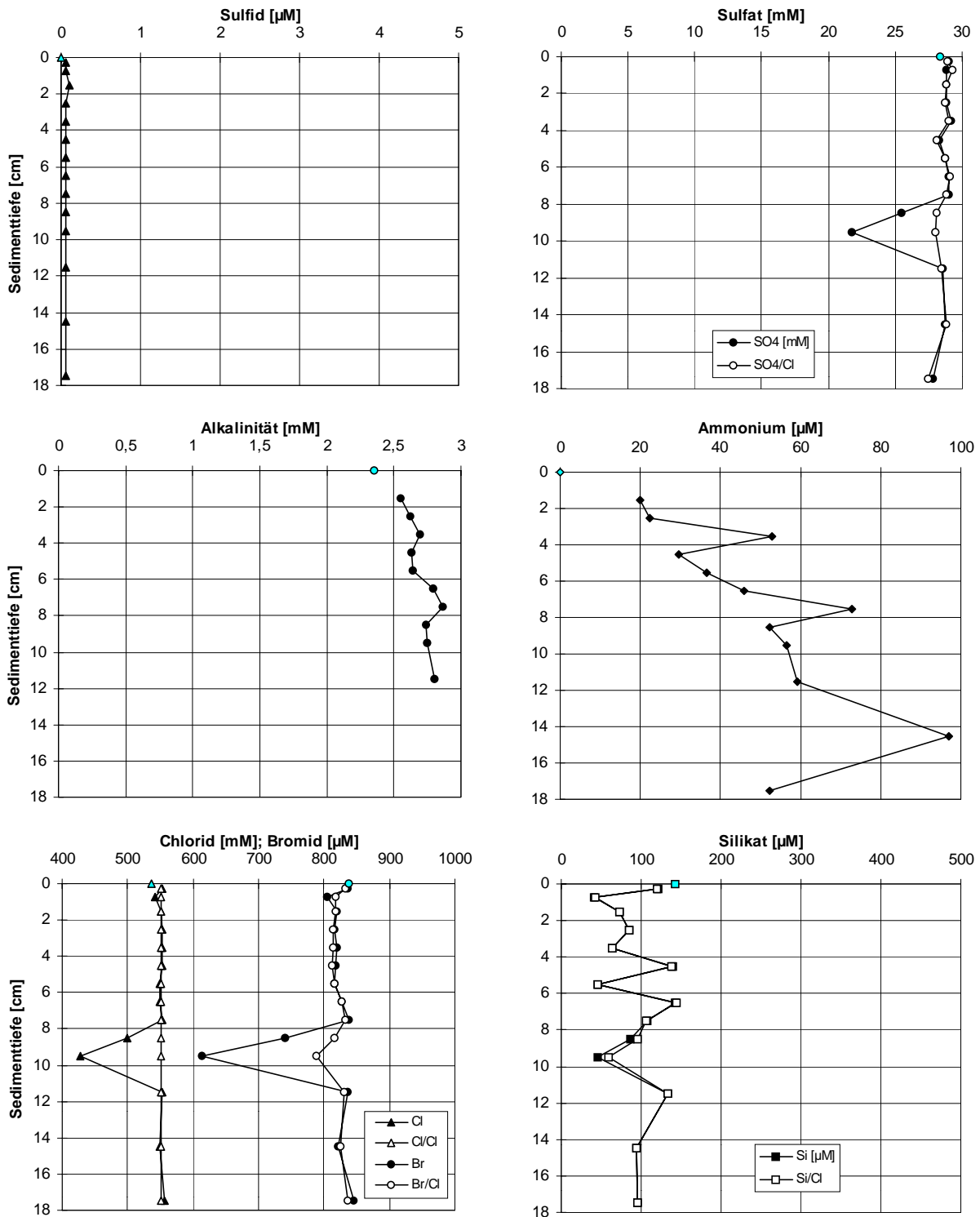


Abbildung 21: Porenwasserprofile der Station 320 TVG für gelöstes Sulfid, Sulfat, Alkalinität, Ammonium, Chlorid, Bromid und Silikat. Die ausgefüllten Symbole kennzeichnen die ursprünglichen Meßwerte. Die offenen Symbole kennzeichnen die Konzentrationen normalisiert auf die Chloridkonzentration, da angenommen wird, daß die Urprobe in der Sedimenttiefe 9,5 cm versehentlich verdünnt wurde. Sulfid, Alkalinität und Ammonium wurden noch mit der unverfälschten Probe an Bord gemessen. Die grauen Symbole in der Sedimenttiefe 0 cm kennzeichnen die Bodenwasserkonzentration des jeweiligen Parameters. Die Alkalinität wurde nur bis in eine Sedimenttiefe von 11,5 cm gemessen, da nicht genügend Porenwasser zur Verfügung stand.

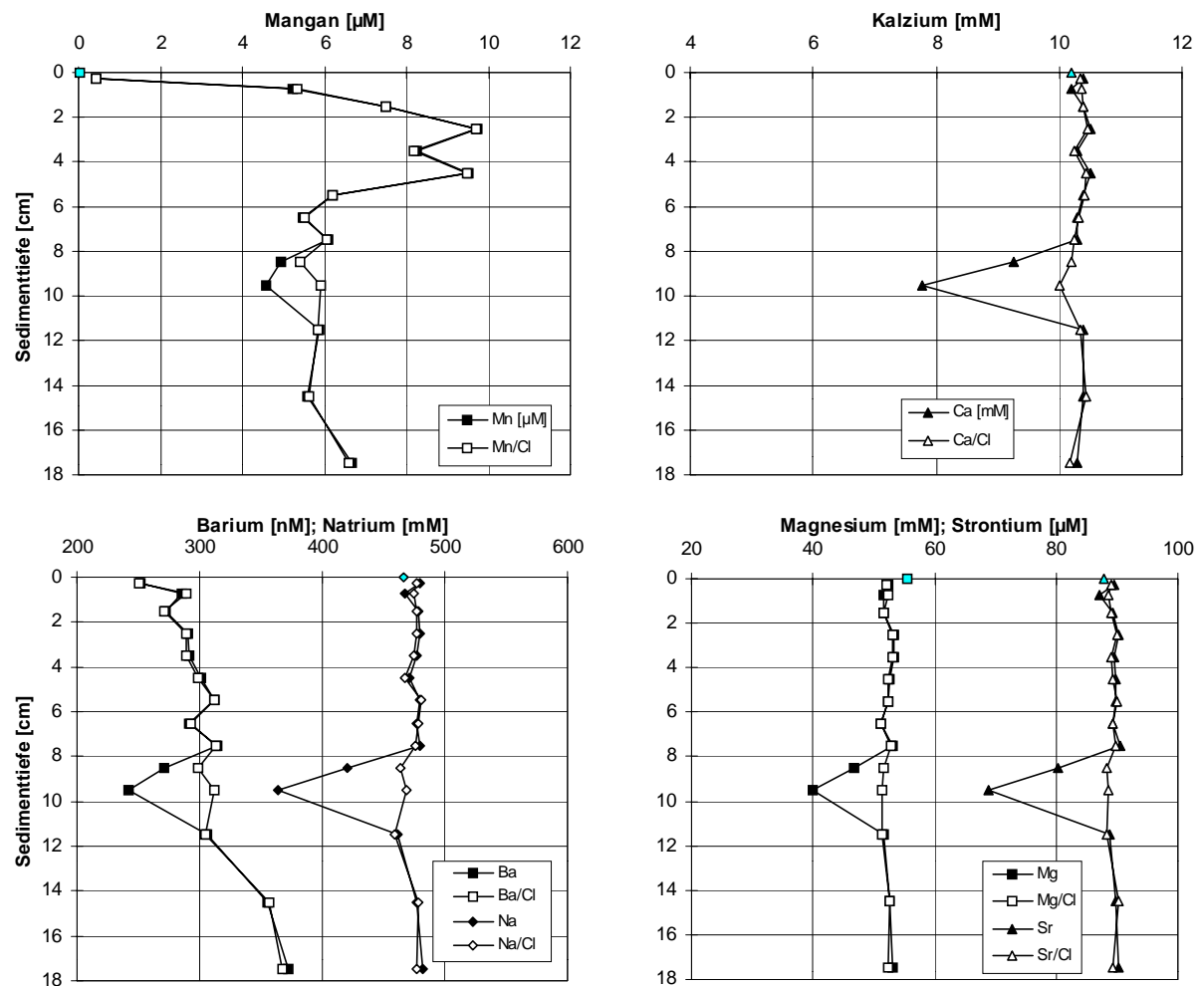


Abbildung 22: Porenwasserprofile der Station 320 TVG (Fortsetzung) für gelöstes Mangan, Kalzium, Barium, Natrium, Magnesium und Strontium. Die ausgefüllten Symbole kennzeichnen die ursprünglichen Meßwerte. Die offenen Symbole kennzeichnen die Konzentrationsprofile normalisiert auf die Chloridkonzentration (Abbildung 21), da angenommen wird, daß die Urprobe in der Sedimenttiefe 9,5 cm versehentlich verdünnt wurde. Die grauen Symbole in der Sedimenttiefe 0 cm kennzeichnen die Bodenwasserkonzentration des jeweiligen Parameters.

In den Abbildungen 21 und 22 sind die Konzentrationsangaben für gelöstes Sulfat, Bromid, Silikat, Mangan, Kalzium, Barium, Natrium, Magnesium und Strontium auf die Chloridkonzentration der jeweiligen Tiefe normalisiert (offene Symbole), da die ursprünglichen Konzentrationsverläufe (geschlossene Symbole) eine Verdünnung der Urprobe anzeigten. Die Parameter Sulfid, Alkalinität und Ammonium waren von der Verdünnung nicht betroffen. Bei den Profilverläufen wird im folgenden nur auf diese chlorid-normalisierten Konzentrationen eingegangen.

Über eine Sedimenttiefe von 18 cm konnten in Abbildung 21 nur geringste Sulfidmengen nachgewiesen werden. Die Sulfatwerte bewegen sich über die gesamte Tiefe in einer norma-

len Bodenwasserkonzentration von 28 mM Sulfat. Die Alkalinität nimmt nur im geringen Maße zu. Die Werte liegen zwischen 2,5 und 3 mM mit einer leicht zunehmenden Tendenz mit steigender Sedimenttiefe. Bei der Ammoniumkonzentration ist eine stärkere Zunahme mit der Tiefe zu beobachten. An der Sedimentoberfläche wurden Konzentrationen um 20 μM gemessen, in 14,5 cm Sedimenttiefe wurden maximal knapp 100 μM bestimmt. Die Chlorid- und Bromidkonzentrationen zeigen ein unauffälliges Tiefenprofil. Die Konzentrationen liegen im betrachteten Tiefenintervall im Bereich der Meerwasserkonzentration des jeweiligen Parameters. Die Silikatwerte streuen über die gemessene Tiefe auf einem Niveau unterhalb der Bodenwasserkonzentration von 143 μM Silikat.

Die Mangankonzentrationen in Abbildung 22 steigen zunächst von einem oberflächlichen Bodenwasserwert auf Werte über 9 μM Mangan in Sedimenttiefen zwischen 2 und 4 cm, um anschließend wieder auf Konzentrationswerte um 6 μM abzusinken. Die Kalziumkonzentrationen liegen im gemessenen Tiefenintervall mit Werten zwischen 10 und 11 mM nahe den Bodenwasserkonzentrationen. Der Bariumgehalt steigt stetig auf eine Konzentration von 350 nM in einer Sedimenttiefe von 18 cm. Die verbleibenden drei gelösten Bestandteile Natrium, Magnesium und Strontium zeigen auf der Station 320 TVG keine nennenswerten Abweichungen von den Konzentrationswerten im Bodenwasser.

Station SO-130/330 TVG

Die TV-Greifer-Station 330 TVG lag in unmittelbarer Nachbarschaft leicht nördlich der Station 320 TVG. Auf dieser Station konnte eine Seep Lebensgemeinschaft beprobt werden. Auf der einen Seite des Greifers fanden sich fünf Muscheln der Gattung *Calyptogena* sp. und weitere Muscheln der Gattung *Acharax* sp. Alle Muscheln wurden in lebenden Zustand beprobt, verstarben aber auf dem Transport an die Wasseroberfläche. Das Sediment der gegenüber liegende Seite des Greifers war ausschließlich von einigen Pogonophoren besiedelt. Aus den beiden Greiferhälften wurde jeweils ein Sedimentkern ausgestochen und auf die Porenwasser-Zusammensetzung hin analysiert. Der Kern aus dem muschel- und pogonophorenfreien Teil des Greifers wurde als "Referenz" bezeichnet. Die Schalenlängen und Feuchtgewichte der vesicomiden Muscheln sind in Tabelle 12 aufgeführt. Die fünf Muscheln siedelten auf einer Fläche von 0,04 m². Das entspricht einer Individuendichte von 125 Ind. m². und einer Biomasse von 485 g m². Die Pogonophoren aus dem Greifersediment gehörten der Gattung *Siboglinum* sp. an (pers. Mitteil. H. Flügel, Institut für Meereskunde, Kiel).

Tabelle 12: Schalenlängen und Feuchtgewichte von *Calyptogena pacifica* aus dem Greifer 330 TVG aus 2334 m Wassertiefe aus der Canyonstruktur vor Makran.

lfd Nr.	Schalenlänge [mm]	Feuchtgewicht [g]
1	49,0	3,75
2	49,5	3,43
3	51,0	3,65
4	53,0	4,12
5	54,5	4,44

Die Sulfidkonzentration im Porenwasser (Abbildung 23) zeigt in beiden Kernen ein geringes Maximum in einer Sedimenttiefe von 8,5 cm. In dem Referenzkern fällt die Sulfidkonzentration unmittelbar darunter wieder auf Null ab. Im Kern mit den Muscheln sind die Sulfidkonzentrationen unterhalb des Maximums nur gering erhöht. Die Anionen-Konzentrationen wurden für den Referenzkern auf die jeweilige Chloridkonzentration normalisiert, da die Porenwasser-Probe in der Sedimenttiefe von 7,5 cm bei der ionenchromatographischen Bestimmung zu stark verdünnt wurde. Das korrigierte Sulfatprofil zeigt in beiden Kernen keine Auffälligkeiten. Die Werte liegen im Bereich der Meerwasser-Sulfatkonzentration von 28 mM. Die Alkalinität und die Ammoniumkonzentration konnte wegen zu geringer Porenwasserausbeute nicht bestimmt werden. Die Chlorid- und Bromidgehalte zeigen keine tiefenabhängige Veränderung und liegen ebenfalls im Bereich der Meerwasserkonzentrationen. Die Silikatprofile schwanken über die gemessene Sedimenttiefe von 14 bzw. 18 cm in einem ähnlichen Bereich wie die Silikatwerte der Station 320 TVG. Sie bewegen sich ebenfalls in einem Konzentrationsbereich, der unter dem Meerwassergehalt von 143 μM Silikat liegt.

Die Gehalte an gelöstem Mangan (Abbildung 24) sind in dem Referenzkern insgesamt höher als im Kern, der von Muscheln besiedelt war. Der Referenzkern weist im Tiefenbereich 0 bis 7,5 cm Werte zwischen 5 und 6 μM auf. Mit weiter zunehmender Tiefe fallen die Werte unter 3 μM gelöstes Mangan. Der von Muscheln besiedelte Kern weist Mangankonzentrationen im Porenwasser um die 3 μM in einer Sedimenttiefe von 0 bis 6 cm auf. Im tieferen Teil des Sediments fallen die Konzentrationen auf Werte um 1 μM gelöstes Mangan. Die Kalziumgehalte liegen auf einem dem Meerwasser vergleichbaren Niveau, erst in der tiefsten Lage des Referenzkerns steigt die Konzentration leicht an.

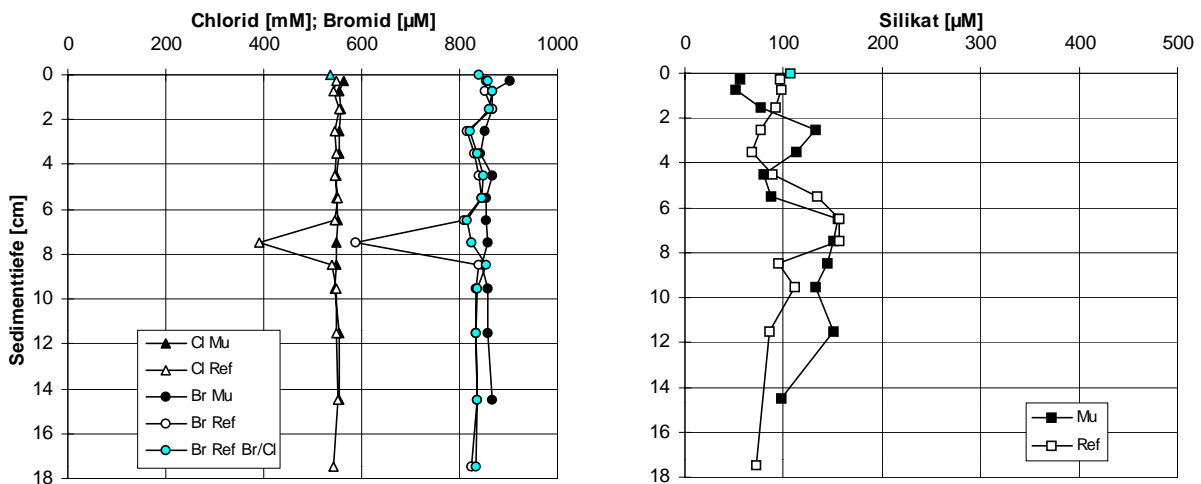
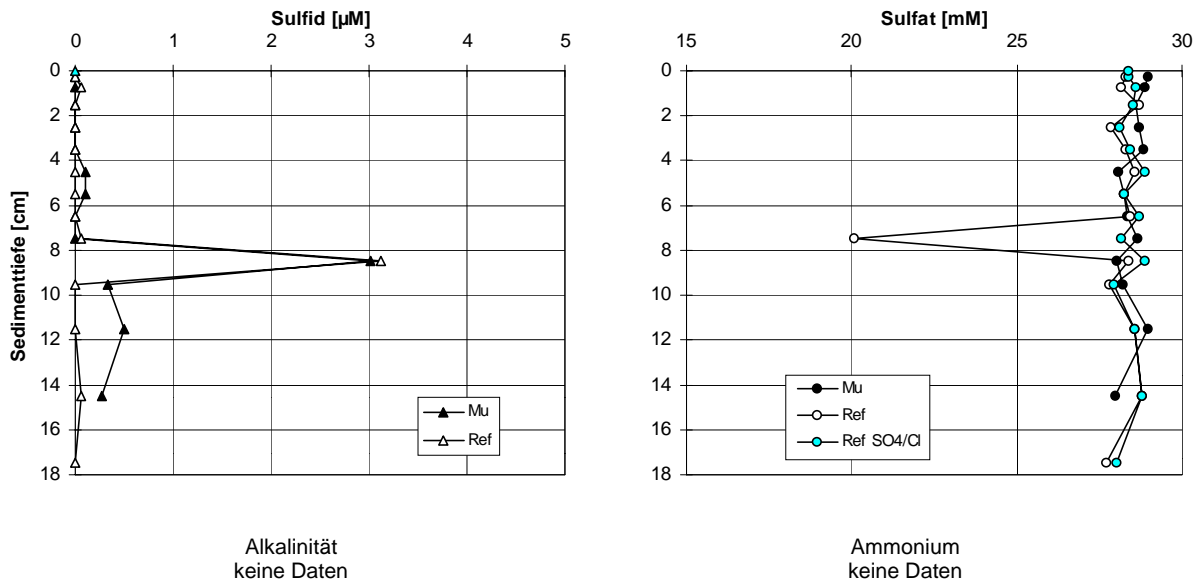


Abbildung 23: Porenwasserprofile der Station 330 TVG und 330 TVG-Referenz für gelöstes Sulfid, Sulfat, Chlorid, Bromid und Silikat. Die Alkalinität und die Ammoniumkonzentration wurde auf dieser Station nicht gemessen. Die ausgefüllten Symbole kennzeichnen die Konzentrationen aus dem mit vesicomyiden Muscheln besiedelten Bereich im TV-Greifer-Sediment (Mu). Der Bereich, der frei von Muscheln war, wurde hier als Referenz (offene Symbole) bezeichnet (Ref). Die Konzentrationen der Anionen Sulfat und Bromid wurden auf die Chloridkonzentration normalisiert (graue Symbole). Die grauen Symbole in der Sedimenttiefe 0 cm kennzeichnen die Bodenwasserkonzentration des jeweiligen Parameters.

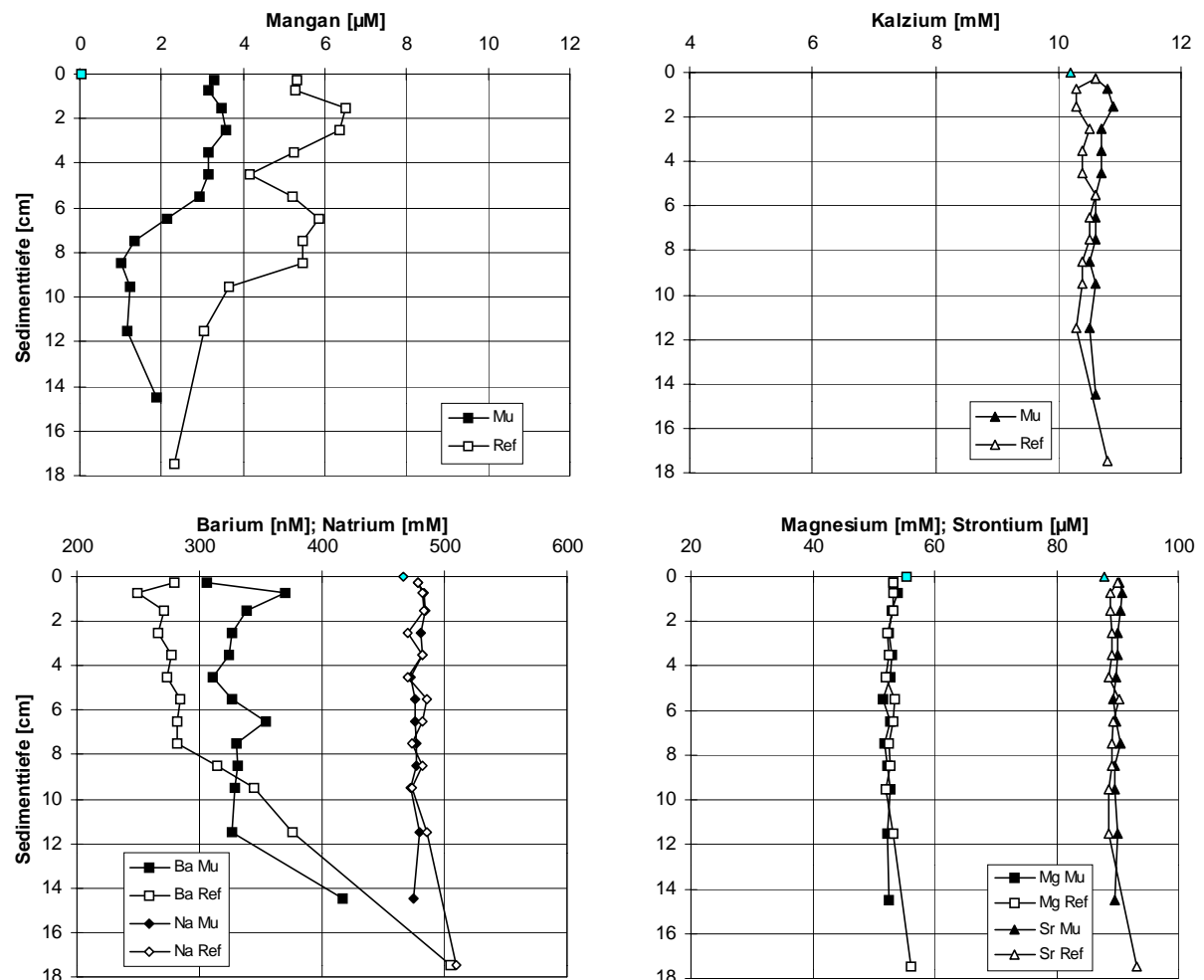


Abbildung 24: Porenwasserprofile der Station 330 TVG und 330 TVG-Referenz (Fortsetzung) für gelöstes Mangan, Kalzium, Barium, Natrium, Magnesium und Strontium. Die ausgefüllten Symbole kennzeichnen die Konzentrationen aus dem mit vesicomysiden Muscheln besiedelten Bereich im TV-Greifer-Sediment. Der Bereich, der frei von Muscheln war, wurde hier als Referenz (offene Symbole) bezeichnet. Die grauen Symbole in der Sedimenttiefe 0 cm kennzeichnen die Bodenwasserkonzentration des jeweiligen Parameters.

Die Bariumkonzentrationen beginnen an der Sediment-Wasser-Grenzfläche mit Werten um 300 nM und steigen dann in Sedimenttiefen >8 cm (Referenzkern) bzw. >12 cm (Muschelkern) auf Werte >400 bzw. >500 nM an. Die Konzentrationen an gelöstem Natrium, Magnesium und Strontium zeigen sehr konstante Tiefenprofile. Allein der Referenzkern weist in der tiefsten Lage bei 18 cm Sedimenttiefe eine leichte Erhöhung der Werte auf. Der Sedimentkern, der von Muscheln besiedelt war, reichte nur bis in eine Tiefe von 14,5 cm. Die Porenwasserkonzentrationen der beiden Sedimentkerne in den Tiefenbereichen oberhalb 18 cm weisen für die Parameter Natrium, Magnesium und Strontium Konzentrationswerte auf, die dem Meerwasser vergleichbar sind.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Sulfid im Porenwasser findet sich auf der Station 330 TVG vorwiegend in einer Sedimenttiefe von 8,5 cm. In diesem Greifer wurden fünf chemoautotrophe Muscheln gefunden, die beim Transport an die Wasseroberfläche gestorben sind. Auf der Station 320 TVG zeigen die Analysen keinerlei Sulfidvorkommen im Porenwasser. Die Tiefenprofile der Anionen Sulfat, Chlorid und Bromid sind bei beiden Greifern unauffällig. Die Silikatgehalte liegen in dem Porenwasser beider Greiferstationen sehr niedrig. Die Mangankonzentrationen liegen auf der Station 320 TVG (ohne Muscheln) höher als auf der Station 330 TVG (mit Muscheln). Beide Greifer zeigen erhöhte Manganwerte an der Sedimentoberfläche. Die Bariumgehalte steigen bei beiden Greifern mit zunehmender Tiefe an, wobei im besiedelten Sediment höhere Werte in vergleichbaren Tiefen gemessen wurden als im Sediment ohne lebende Muscheln.

3.3.2 Porenwasserprofile vor West-Java

Im Forearc-Becken vor West-Java kamen ebenfalls die beiden videogeführten Geräte OFOS-Videoschlitten und TV-Greifer zum Einsatz.

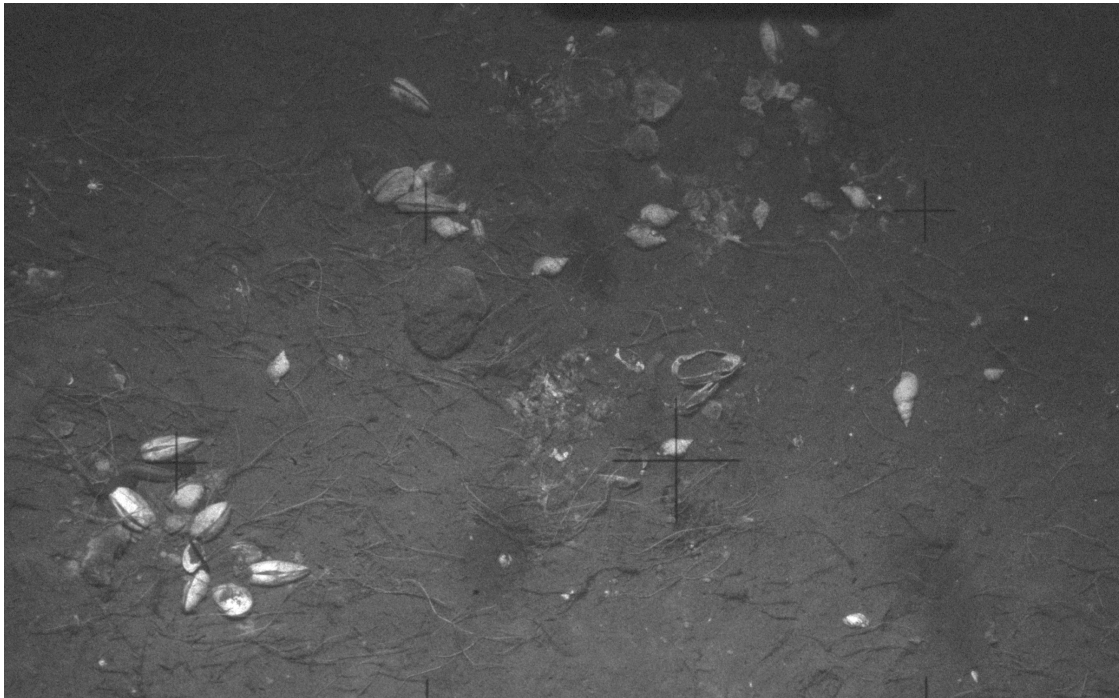


Abbildung 25: OFOS-Foto einer Cold Seep Lebensgemeinschaft am 'Snail and Mussel Hill' in einer Wassertiefe von ca. 2950 m (Ausschnitt). Unten links und oben sind einige Muscheln der Gattung *Calyptogena* zu erkennen. Die fadenförmigen Pogonophoren sind ebenfalls unten links erkennbar. In der Mitte sind leere Muschelschalen auf dem Sediment zu sehen. Rechts und oben sind einige buccinide Schnecken sichtbar.

Mit dem OFOS-Schlitten wurden die chemoautotrophen Lebensgemeinschaften am 'Snail and Mussel Hill' im Forearc-Becken entdeckt und dokumentiert (Abbildung 25). Anschließend dienten vier TV-Greiferstationen der Beprobung des Cold Seep Gebietes.

Der erste Greifer 33 TVG wurde an der südlichen Flanke des 'Snail and Mussel Hill' platziert. Die drei weiteren Greifer 44, 91 und 93 TVG wurden an der Stirnseite der Erhebung abgesetzt, wobei jeder Greifer an unterschiedlichen Positionen das Sediment beprobte. Auf der Station 91 TVG wurde die mittlere Höhe, auf Station 44 TVG wurde die Oberkante und auf der Station 93 TVG wurde das Plateau des 'Snail and Mussel Hill' beprobt (siehe Abbildung 18, Seite 56). Im folgenden werden die Porenwasserprofile der vier Greiferstationen beschrieben.

Station SO-139/33 TVG

Die Station 33 TVG lag in 2969 m Wassertiefe seitlich an einer Erhebung, die im Rahmen der Forschungsfahrt SO-139 als 'Snail and Mussel Hill' bezeichnet wurde. Das Videobild des TV-Greifers zeigte beim Zugreifen eine weißliche Sedimentoberfläche, die vermutlich durch Bakterienmatten hervorgerufen wurde. Der Greifer drang tief in das Sediment ein, so daß die obersten Sedimentlagen aus dem Greifer oben herausliefen, als er an Deck des Schiffes stand.

Die Sulfidkonzentration im Porenwasser nimmt in Abbildung 26 mit zunehmender Tiefe nur in geringem Maße auf Konzentrationen von knapp 2,5 μM zu. Entsprechend unauffällig ist das Sulfatprofil. Die Werte liegen bis in 45 cm Sedimenttiefe im Bereich der Meerwasserkonzentration von 28 mM Sulfat. Die Alkalinität schwankt nur sehr wenig bei Werten von 2,4 mM von der Sedimentoberfläche bis in 45 cm Tiefe. Die Ammoniumkonzentration steigt stetig von 35 μM an der Oberfläche auf 52 μM in der untersten Sedimentschicht. Die Chlorid- und Bromidkonzentrationen im Porenwasser weisen abgesehen von einem Minimum in 33 cm Sedimenttiefe ein annähernd lineares Tiefenprofil auf, obgleich in den obersten 10 cm einige Schwankungen zu beobachten sind. Das Silikatprofil im Porenwasser fluktuiert ebenfalls in den obersten 10 cm um eine mittlere Konzentration von 340 μM , um anschließend langsam anzusteigen. In Sedimenttiefen >35 cm sinkt die Silikatkonzentration wieder ab.

Die Gehalte an gelöstem Mangan nehmen in Abbildung 27 von der Sedimentoberfläche bis in 45 cm Tiefe kontinuierlich ab. An der Oberfläche wurde eine Konzentration von 9 μM bestimmt, in der untersten Lage des Sedimentkerns sinkt der Manganwert auf 3,6 μM . Die Kal-

ziunkonzentrationen weisen drei lokale Minima auf, jedoch zeigen sie keinen Trend mit zunehmender Tiefe. Sie liegen in Bereichen, die der Meerwasserkonzentration vergleichbar ist.

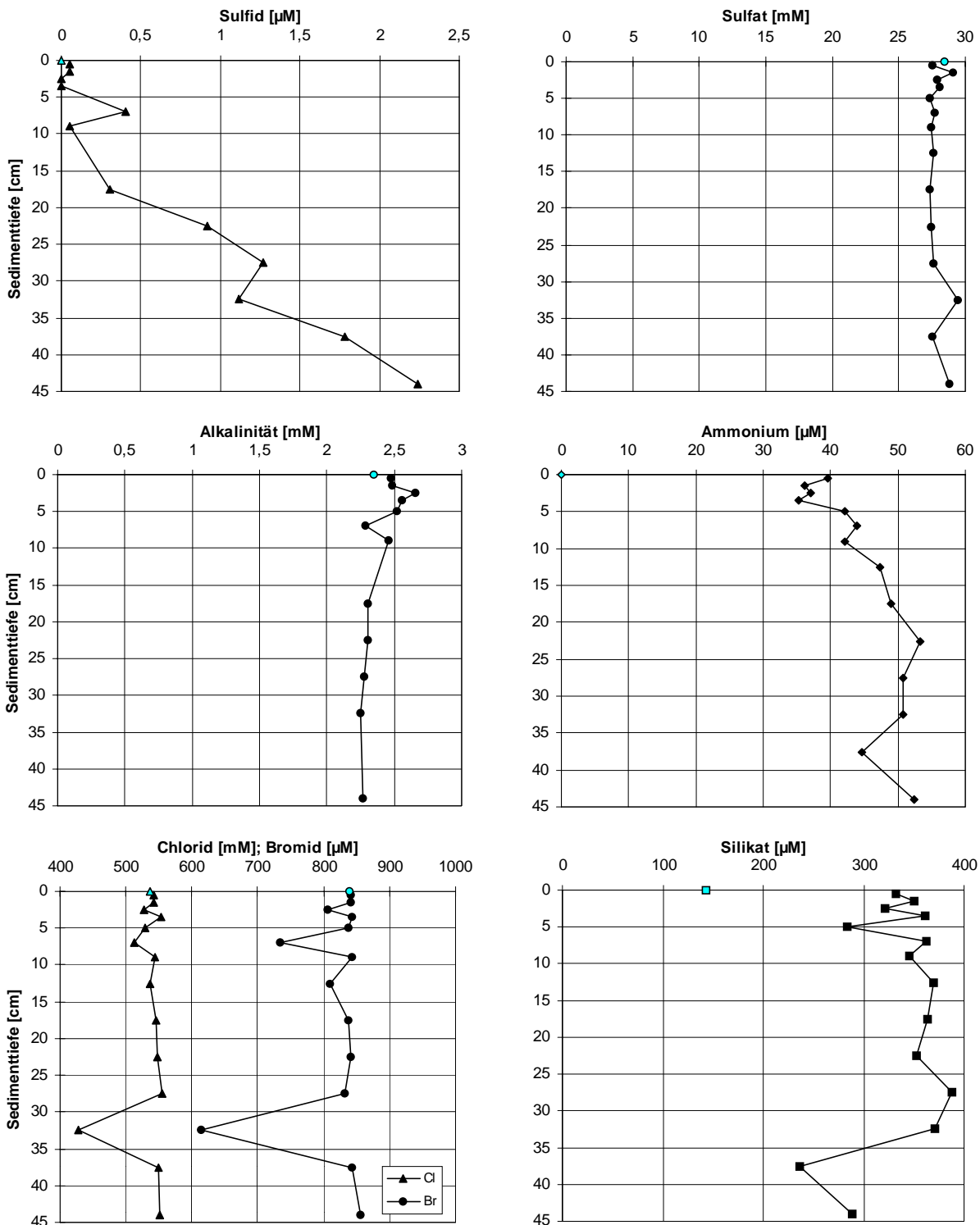


Abbildung 26: Porenwasserprofile der Station 33 TVG für gelöstes Sulfid, Sulfat, Alkalinität, Ammonium, Chlorid, Bromid und Silikat. Die grauen Symbole in der Sedimenttiefe 0 cm kennzeichnen die Bodenwasserkonzentration des jeweiligen Parameters.

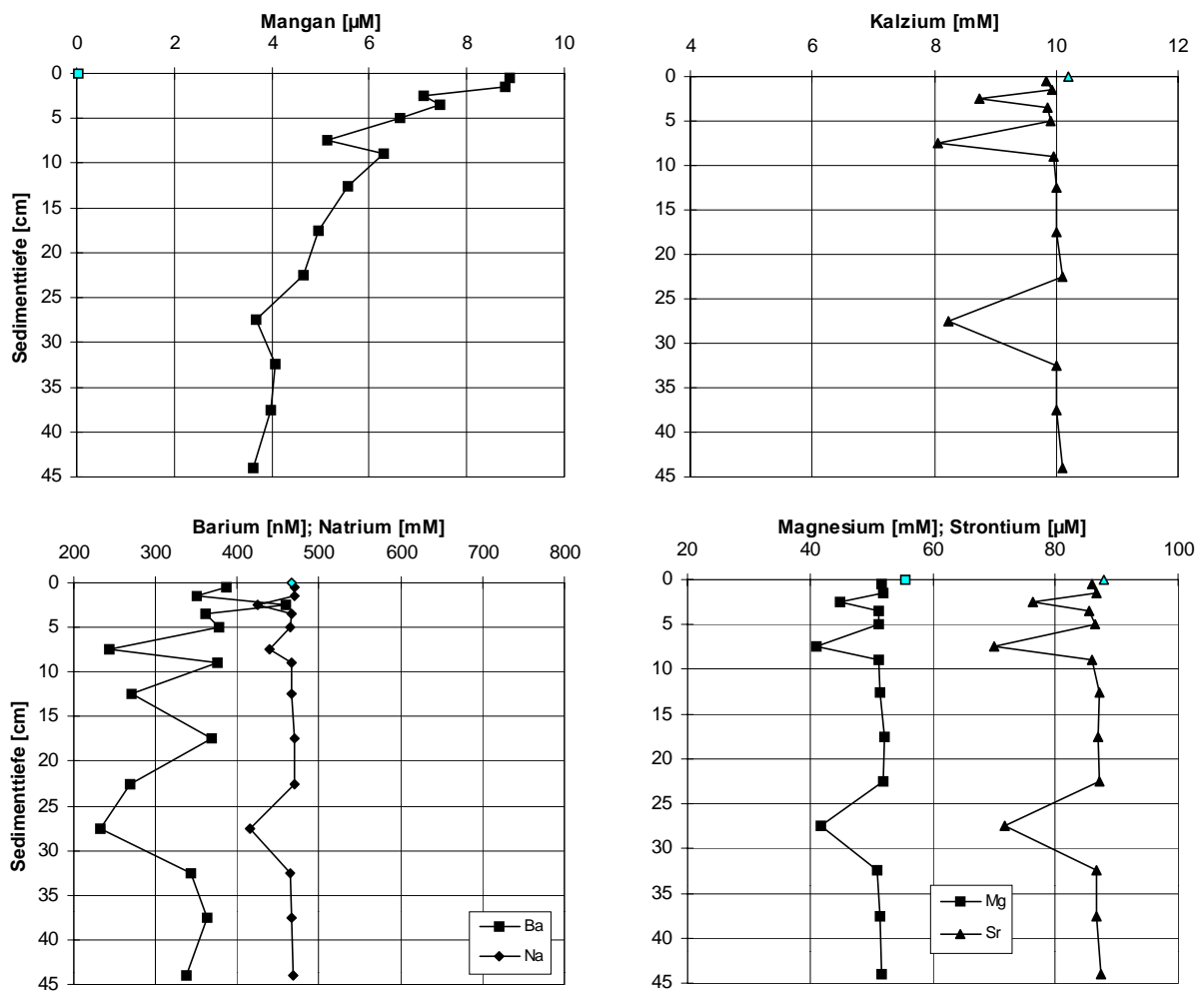


Abbildung 27: Porenwasserprofile der Station 33 TVG (Fortsetzung) für gelöstes Mangan, Kalzium, Barium, Natrium, Magnesium und Strontium. Die grauen Symbole in der Sedimenttiefe 0 cm kennzeichnen die Bodenwasserkonzentration des jeweiligen Parameters.

Der Gehalt an gelöstem Barium im Porenwasser schwankt stark zwischen 200 und 400 nM. Die Natriumkonzentration im Porenwasser weicht nicht von der Meerwasserkonzentration ab. Die Gehalte von Magnesium und Strontium schwanken in den gleichen Sedimenttiefen wie die von Kalzium. Von den Schwankungen abgesehen, bewegen sich die Werte aber in einem Konzentrationsbereich, der sich nicht von dem des Meerwassers unterscheidet.

Station SO-139/44 TVG

Die Station 44 TVG befand sich an der östlichen Stirnseite des 'Snail and Mussel Hill' in einer Wassertiefe von 2958 m. Dieser Greifer wurde auf dunklen Karbonatkrusten und hellen Bakterienmatten abgesetzt. Auch hier wurde ein sehr wasserhaltiges Sediment beprobt, das mit Karbonatkrusten durchmischt war.

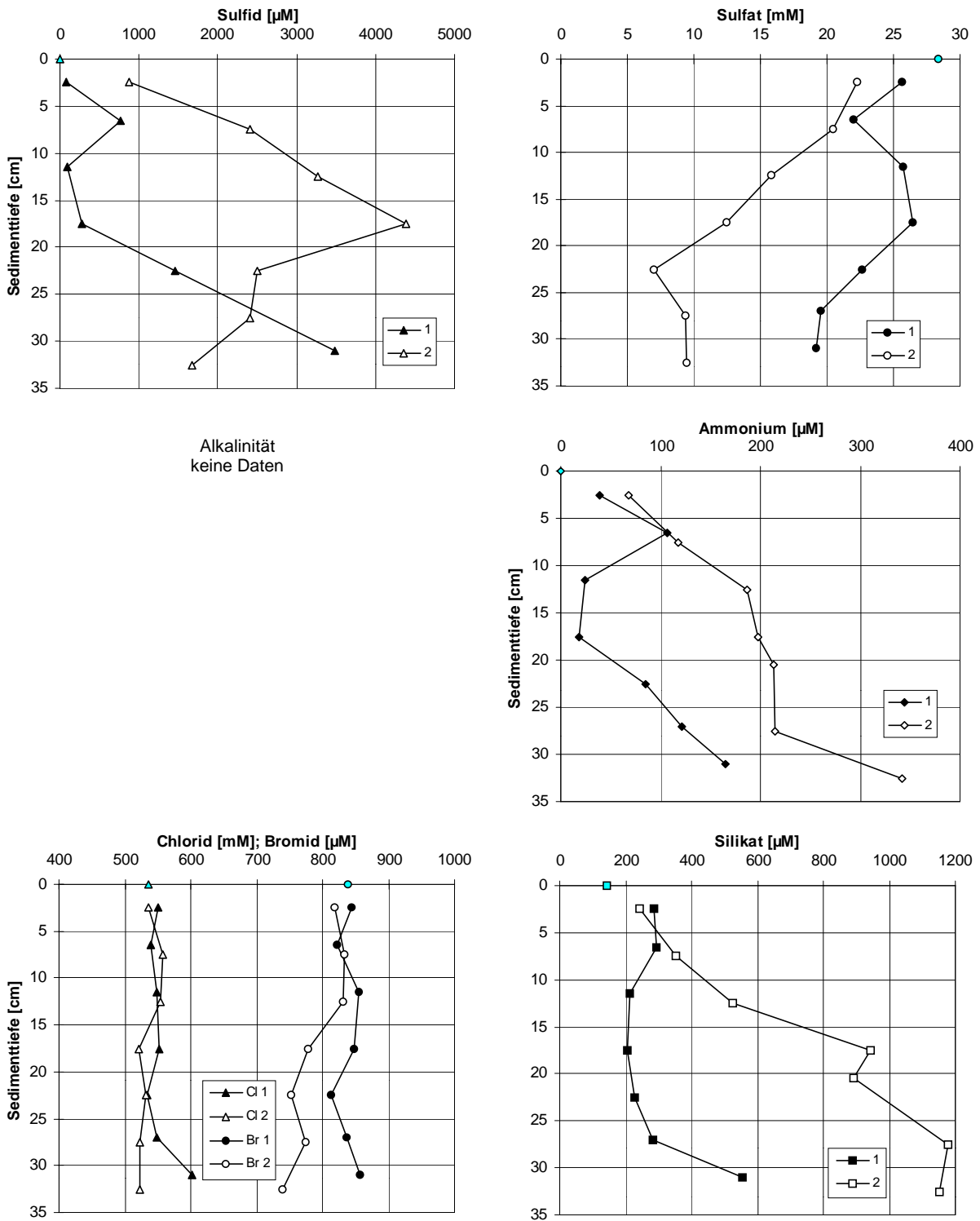


Abbildung 28: Porenwasserprofile der Station 44 TVG für gelöstes Sulfid, Sulfat, Ammonium, Chlorid, Bromid und Silikat. Die ausgefüllten Symbole kennzeichnen den ersten, die offenen Symbole den zweiten Sedimentkern, der aus dem Greifersediment ausgestochen wurde. Auf dieser Station wurde keine Alkalinitätsbestimmung am Porenwasser durchgeführt. Die grauen Symbole in der Sedimenttiefe 0 cm kennzeichnen die Bodenwasserkonzentration des jeweiligen Parameters.

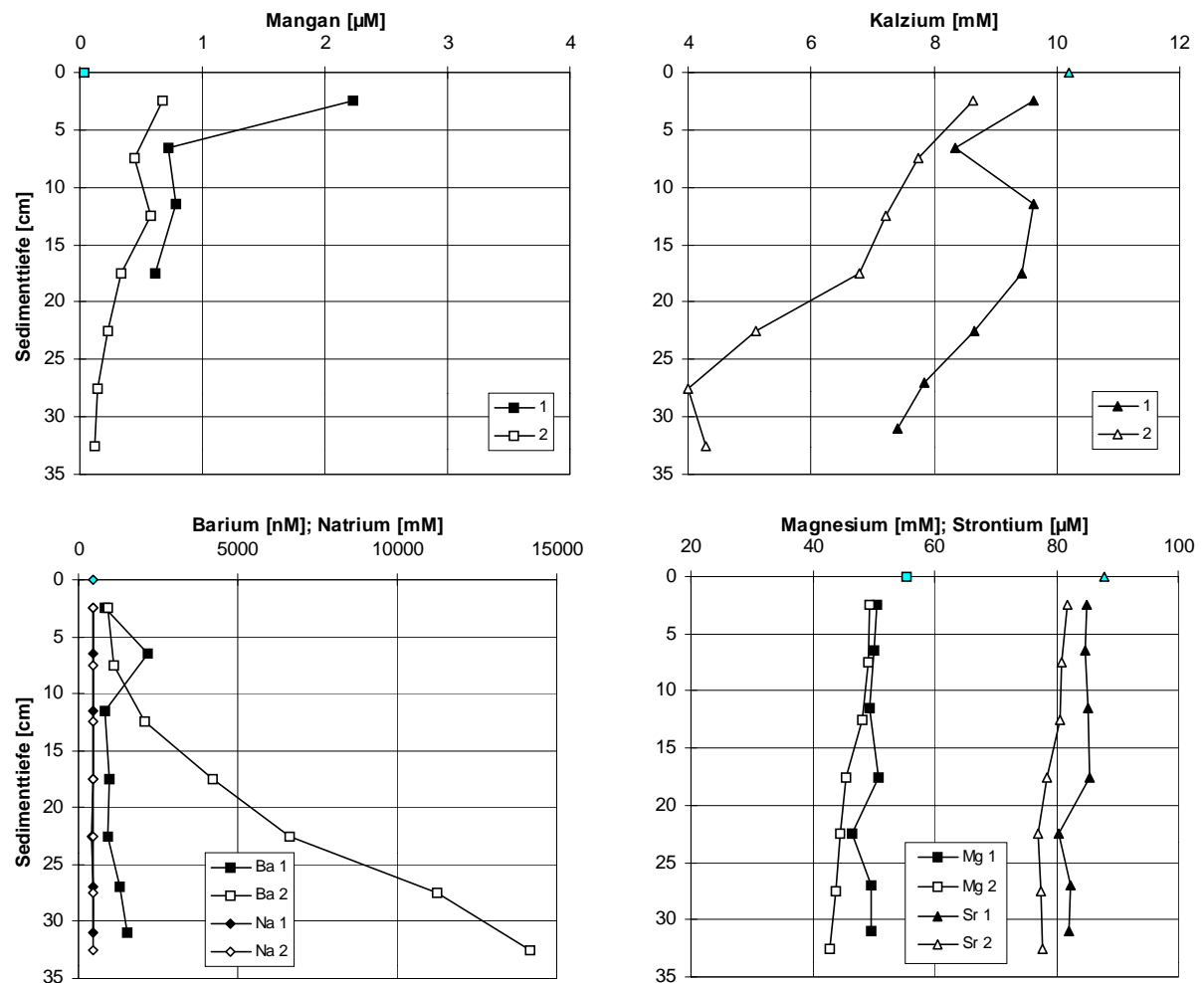


Abbildung 29: Porenwasserprofile der Station 44 TVG (Fortsetzung) für gelöste Mangan, Kalzium, Barium, Natrium, Magnesium und Strontium. Die ausgefüllten Symbole kennzeichnen den ersten, die offenen Symbole den zweiten Sedimentkern, der aus dem Greifersediment ausgestochen wurde. Die grauen Symbole in der Sedimenttiefe 0 cm kennzeichnen die Bodenwasserkonzentration des jeweiligen Parameters.

Erst in ca. 20 cm Tiefe wurde konsolidiertes Sediment gefunden. Aus dem Greifer wurden zwei Sedimentkerne ausgestochen, die sich ca. 20 cm von einer dichteren Ansammlung lebender Pogonophoren entfernt war. Der erste Sedimentkern befand sich am Rand des Greifers, der zweite dagegen weiter zentral.

Die Sulfidkonzentration nimmt in Abbildung 28 mit zunehmender Sedimenttiefe von Konzentrationen $<1000 \mu\text{M}$ an der Sedimentoberfläche auf Werte um $4000 \mu\text{M}$ in 17 cm (zweiter Kern, offene Symbole) bzw. 32 cm Tiefe zu (erster Kern, geschlossene Symbole). Im zweiten Kern sinken die Sulfidgehalte unterhalb von 17 cm auf $<2000 \mu\text{M}$. Die Sulfatprofile der beiden Sedimentkerne verhalten sich entsprechend der Sulfidprofile. Die Konzentration des ersten Kerns nimmt auf Werte unter 20 mM Sulfat in 32 cm Sedimenttiefe ab. Der stärkere Sul-

fidanstieg des zweiten Kerns spiegelt sich in der rascheren Sulfatabnahme auf Konzentrationen um 10 mM in den untersten Sedimentlagen wider. Der Sulfatgehalt des ersten Kerns nimmt mit zunehmender Tiefe ebenfalls ab, erreicht aber nicht so niedrige Werte wie der zweite Kern. Auf dieser Station wurde an beiden Sedimentkernen keine Alkalinitätsbestimmung durchgeführt. Die Ammoniumkonzentrationen beider Sedimentkerne stiegen mit zunehmender Sedimenttiefe an. Wiederum ist der Anstieg der Ammoniumgehalte des zweiten Kerns auf Werte $>300 \mu\text{M}$ stärker als die des ersten Kerns auf Werte um $170 \mu\text{M}$. Die Chlorid- und Bromidkonzentrationen unterscheiden sich nicht sehr von den Meerwasserkonzentrationen. Lediglich beim zweiten Kern ist eine leichte Verminderung der Bromidwerte in Sedimenttiefen unterhalb 15 cm zu beobachten. Die Silikatprofile ähneln den Sulfidprofilen. Wiederum ist der Anstieg der Silikatkonzentration des zweiten Sedimentkerns auf Werte im Millimol-Bereich stärker als der des ersten Kerns.

Die Konzentration von gelöstem Mangan in Abbildung 29 ist oberflächennah beim zweiten Sedimentkern größer als beim Ersten, nimmt aber rasch ab und pendelt sich auf Werte um $0,6 \mu\text{M}$ ein. Der Mangangehalt des ersten Kerns wurde nur bis zu einer Tiefe von 17,5 cm bestimmt. In tieferen Sedimentlagen konnte kein Mangan mehr nachgewiesen werden. Der zweite Kern weist insgesamt niedrigere Mangankonzentrationen im Porenwasser auf. Die oberflächliche Porenwasserkonzentration von $0,7 \mu\text{M}$ sinkt auf $0,1 \mu\text{M}$ in 33 cm Sedimenttiefe. Die Kalziumgehalte des ersten Sedimentkerns sind unauffällig mit einer leichten Abnahme auf Werte $<7 \text{ mM}$ unterhalb von 27 cm Sedimenttiefe. Die Kalziumkonzentration im zweiten Kern nimmt dagegen mit zunehmender Tiefe deutlicher ab. Oberflächennahe Gehalte von $8,6 \text{ mM}$ fallen auf Werte von 4 mM in 28 cm Tiefe ab. Das Porenwasser des zweiten Kerns zeigt mit zunehmender Sedimenttiefe einen steilen Anstieg der Bariumkonzentration auf einen Wert von $>14.000 \text{ nM}$. Die Gehalte an Magnesium und Strontium zeigen beim ersten Kern keine deutlichen Abweichungen von der Meerwasserkonzentration. Im zweiten Kern ist dagegen eine stärkere Abnahme der beiden Ionen erkennbar.

Station SO-139/91 TVG

Die TV-Greifer Station 91 TVG befand sich auf mittlerer Höhe am 'Snail and Mussel Hill' in einer Wassertiefe von 2963 m. Das Videobild der Greifers zeigte vor dem Zugreifen einige Pogonophorenkolonien und leere Muschelschalenhälften auf dem Sediment. Vereinzelt Löcher in der Sedimentoberfläche sprachen für das Vorhandensein von tief grabenden Muscheln der Gattung *Acharax* sp. Im Greifer wurden aber keine lebenden Muscheln dieser Gattung

gefunden. Aus dem Greifersediment wurden ebenfalls zwei Kerne ausgestochen. Da keine auffälligen Strukturen oder Ansammlungen von Organismen auf der Sedimentoberfläche erkennbar waren, wurden die beiden Kerne, die 50 cm voneinander entfernt lagen, willkürlich mit 1 und 2 gekennzeichnet.

Der Sulfidgehalt im Porenwasser in Abbildung 30 ist bei beiden Kernen an der Sedimentoberfläche sehr gering. Der Gehalt steigt beim ersten Kern stark an und erreicht eine Maximalkonzentration von $>4000 \mu\text{M}$ in 31 cm Sedimenttiefe, danach sinkt die Sulfidkonzentration wieder ab. Der zweite Kern zeigt vergleichsweise geringe Sulfidgehalte, die höchste Konzentration ist mit $400 \mu\text{M}$ in 12 cm Sedimenttiefe erreicht. Die Sulfidgehalte in tieferen Sedimentlagen des zweiten Kerns fallen jedoch nicht wieder ab, sondern bewegen sich zwischen 250 und $300 \mu\text{M}$. Die Sulfatkonzentration nahe der Sedimentoberfläche liegt bei beiden Kernen im Bereich des Meerwassergehaltes von $28,4 \text{ mM}$. Beim ersten Kern fällt die Konzentration auf 21 mM . Das Minimum der Sulfatkonzentration liegt jedoch tiefer als das Maximum der Sulfidkonzentration. Der Sulfatgehalt des zweiten Kerns sinkt ebenfalls mit zunehmender Sedimenttiefe, es werden jedoch keine Sulfatkonzentrationen von $<25 \text{ mM}$ erreicht. Das Porenwasser-Profil für die Alkalinität sieht bei beiden Sedimentkernen ähnlich aus wie ihr entsprechendes Sulfidprofil. Der erste Kern weist eine Alkalinitätskonzentration von 4 mM an der Sedimentoberfläche auf. In 31 cm Sedimenttiefe steigt die Alkalinität auf $>8 \text{ mM}$ und fällt dann wieder ab. Der starke Abfall der Alkalinität in 36 cm Tiefe wird als Artefakt gewertet. Die Alkalinität des zweiten Kerns beginnt an der Oberfläche mit Werten nahe 6 mM und fällt dann rasch auf Werte um $4,5 \text{ mM}$ ab. Dieser Wert bleibt mit zunehmender Sedimenttiefe relativ konstant. Die Ammoniumkonzentration beider Sedimentkerne lag auf dieser Station unterhalb der Nachweisgrenze von $5 \mu\text{M}$. Die Chlorid- und Bromidprofile verlaufen linear mit einer leichten Verringerung der Konzentration bei ansteigender Sedimenttiefe. Tendenziell liegen die Chlorid- und Bromidgehalte des ersten Kerns niedriger als die des zweiten Kerns. Die Silikatwerte beider Kerne schwanken an der Sedimentoberfläche stärker um eine Konzentration von $280 \mu\text{M}$ und fallen dann auf Werte um $200 \mu\text{M}$ gelöstes Silikat in 45 cm Sedimenttiefe ab. Die Mangankonzentrationen der beiden Sedimentkerne verlaufen in Abbildung 31 sehr ähnlich. Oberflächennahe Gehalte von $3,5 \mu\text{M}$ fallen mit zunehmender Sedimenttiefe rasch auf Werte $<1 \mu\text{M}$, wobei die Konzentration des ersten Kerns schneller sinkt als die des zweiten. In den tiefsten Sedimentlagen der beiden Kerne werden meerwasserähnliche Konzentrationen von $0,04 \mu\text{M}$ erreicht.

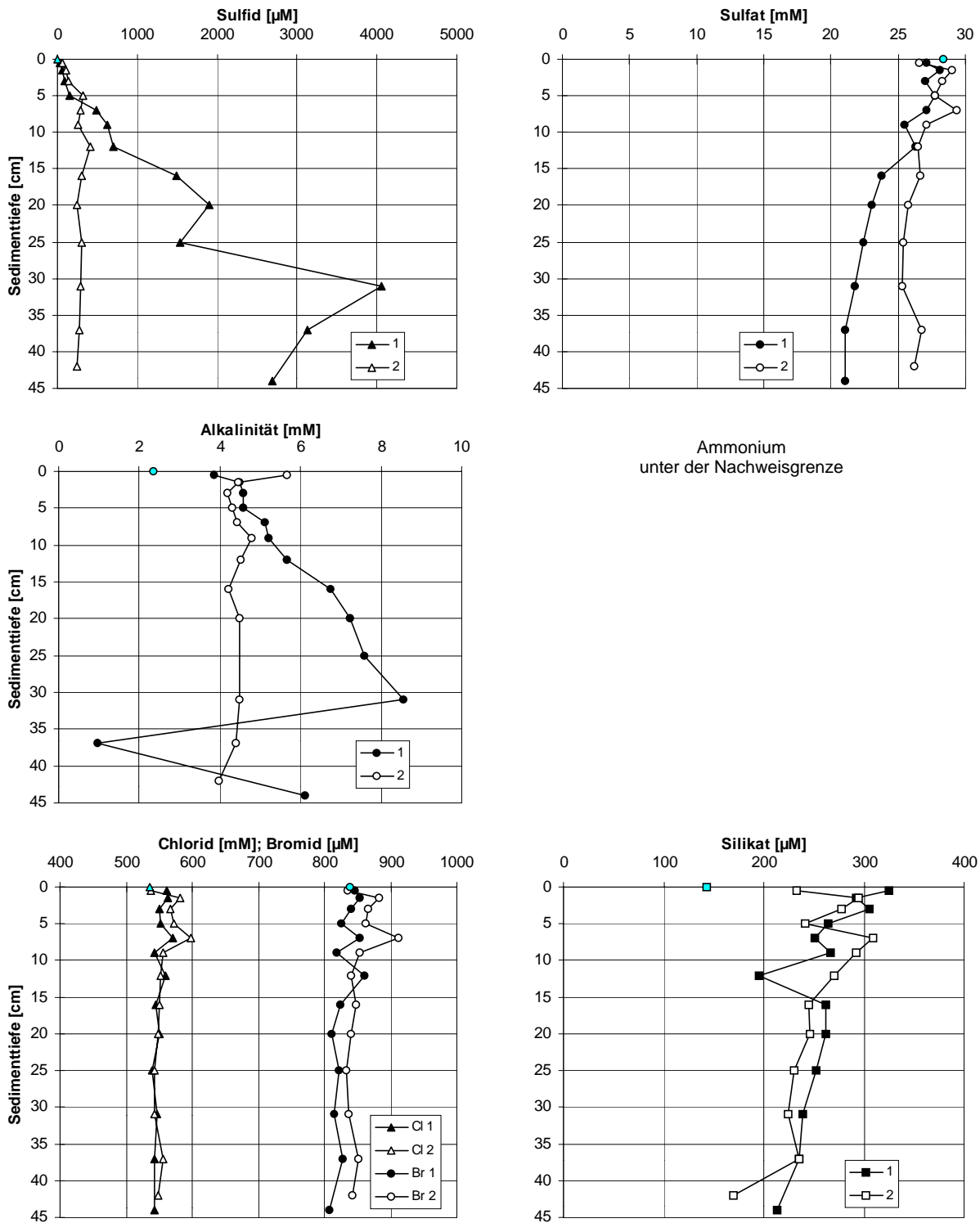


Abbildung 30: Porenwasserprofile der Station 91 TVG für gelöstes Sulfid, Sulfat, Alkalinität, Chlorid, Bromid und Silikat. Die ausgefüllten Symbole kennzeichnen den ersten, die offenen Symbole den zweiten Sedimentkern, der aus dem Greifersediment ausgestochen wurde. Auf dieser Station konnte kein Ammonium im Porenwasser nachgewiesen werden. Die grauen Symbole in der Sedimenttiefe 0 cm kennzeichnen die Bodenwasserkonzentration des jeweiligen Parameters.

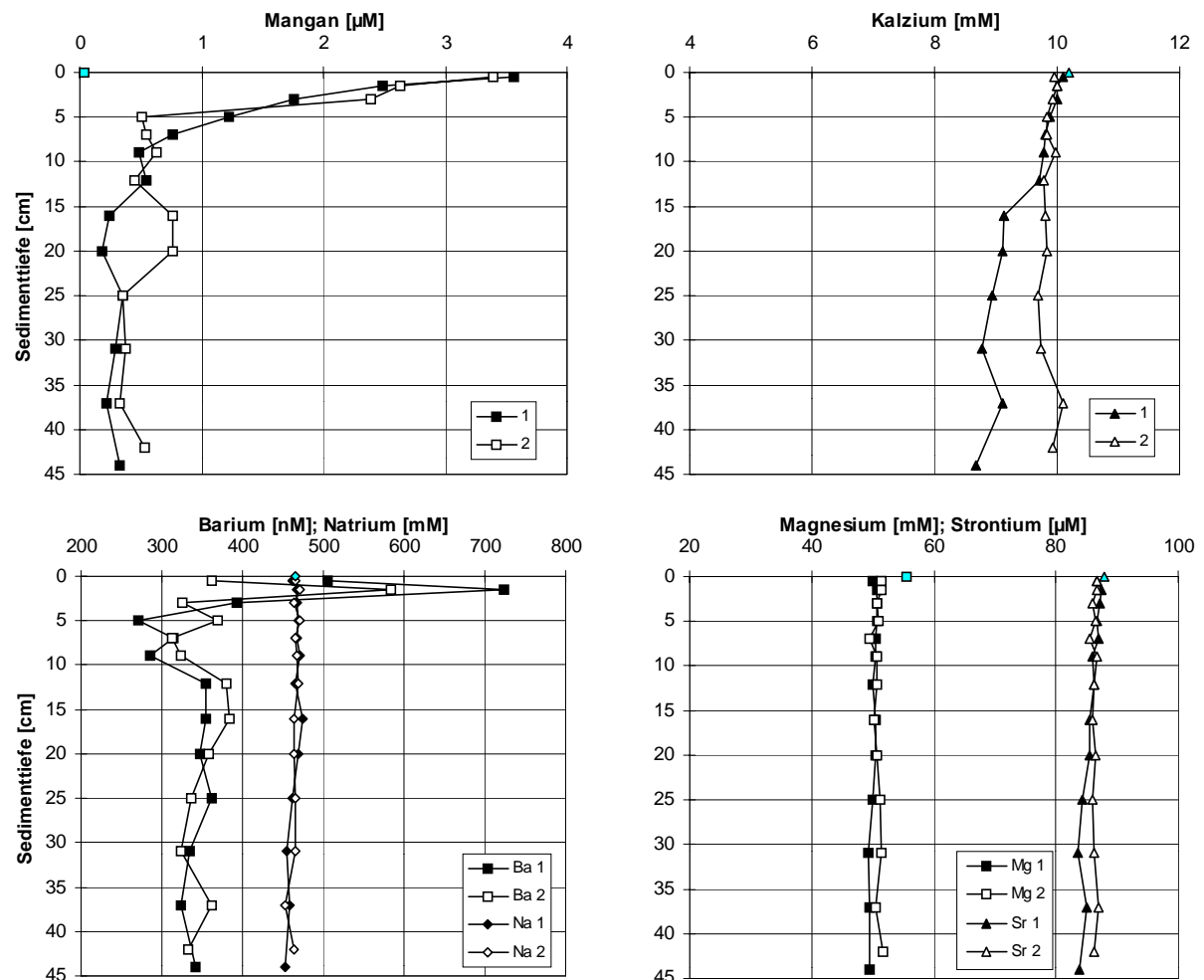


Abbildung 31: Porenwasserprofile der Station 91 TVG (Fortsetzung) für gelöstes Mangan, Kalzium, Barium, Natrium, Magnesium und Strontium. Die ausgefüllten Symbole kennzeichnen den ersten, die offenen Symbole den zweiten Sedimentkern, der aus dem Greifersediment ausgestochen wurde. Die grauen Symbole in der Sedimenttiefe 0 cm kennzeichnen die Bodenwasserkonzentration des jeweiligen Parameters.

Die Kalziumgehalte des ersten Kerns sinken ab 15 cm Sedimenttiefe deutlich unter die Meerwasserkonzentration. Der zweite Kern weist dagegen über die gesamte Tiefe Konzentrationswerte um 10 mM auf. Die Bariumkonzentrationen der beiden Sedimentkerne sind an der Oberfläche erhöht mit mittleren Werten um 400 nM. Ab 12 cm Sedimenttiefe verringern sich die Schwankungen, und es ist dann keine tiefenabhängige Veränderung der Bariumgehalte mehr erkennbar. Die Natriumkonzentration im Porenwasser beider Sedimentkerne nimmt, wie die Chlorid- und Bromidwerte, in den tieferen Sedimentlagen leicht ab. Die Profile im Porenwasser für Magnesium und Strontium verlaufen unauffällig. Von der Sedimentoberfläche bis in eine Tiefe von 45 cm ist keine Veränderung der jeweiligen Konzentration zu erkennen.

Station SO-139/93 TVG

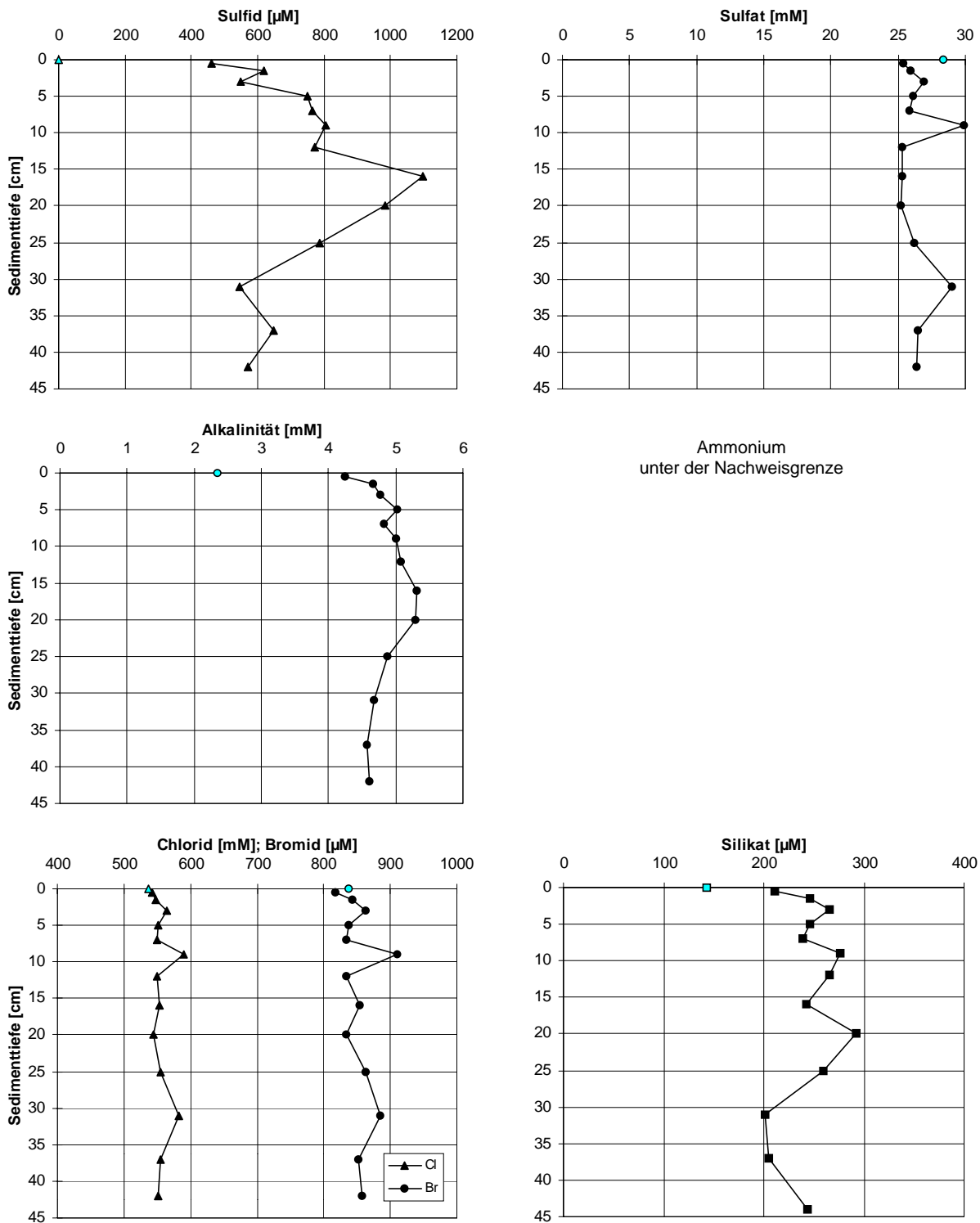


Abbildung 32: Porenwasserprofile der Station 93 TVG für gelöstes Sulfid, Sulfat, Alkalinität, Chlorid, Bromid und Silikat. Auf dieser Station war die Ammoniumkonzentration im Porenwasser unter der Nachweisgrenze. Die grauen Symbole in der Sedimenttiefe 0 cm kennzeichnen die Bodenwasserkonzentration des jeweiligen Parameters.

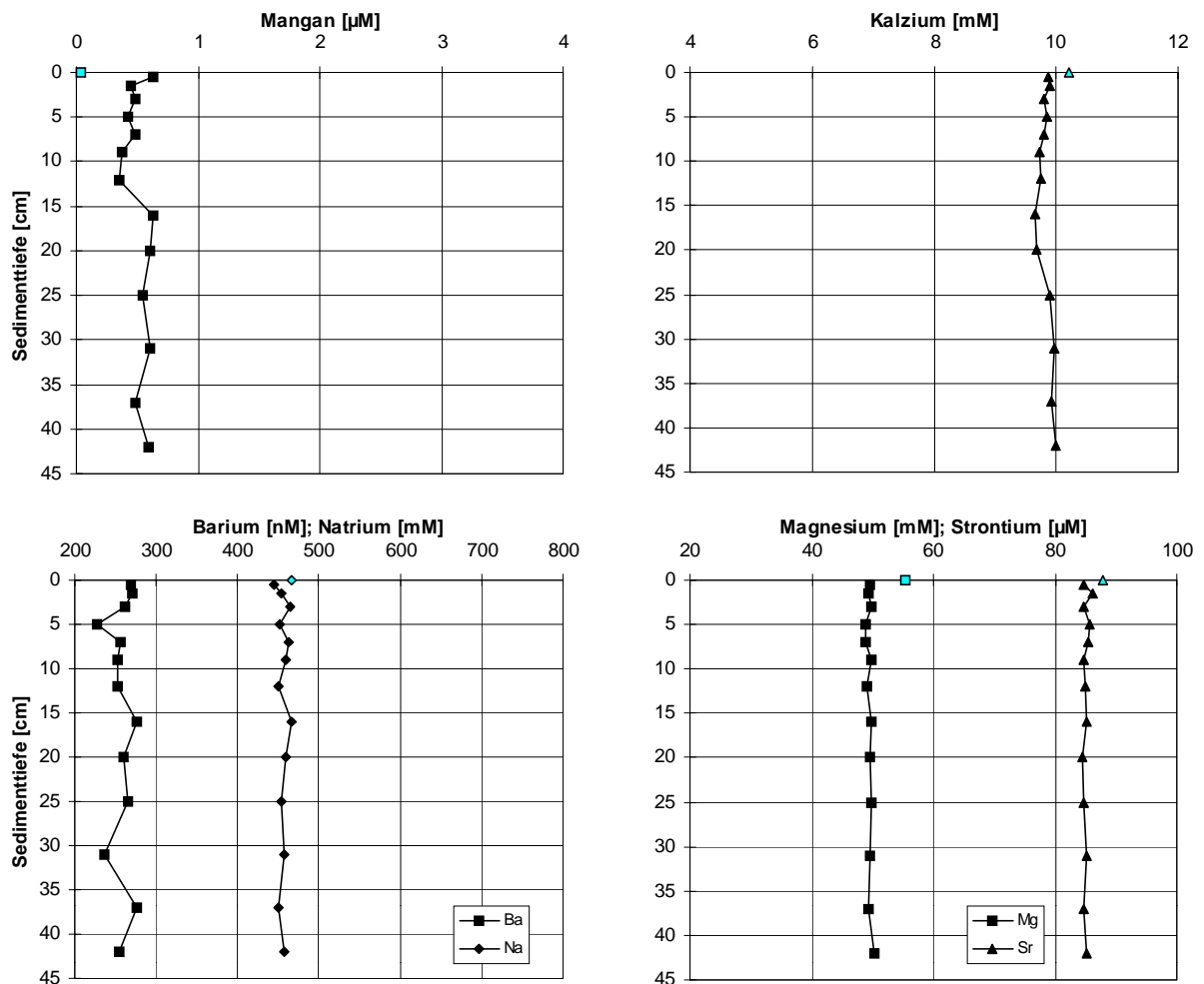


Abbildung 33: Porenwasserprofile der Station 93 TVG (Fortsetzung) für gelöstes Mangan, Kalzium, Barium, Natrium, Magnesium und Strontium. Die grauen Symbole in der Sedimenttiefe 0 cm kennzeichnen die Bodenwasserkonzentration des jeweiligen Parameters.

Die TV-Greiferstation 93 TVG befand sich auf dem östlichen Plateau des 'Snail and Mussel Hill' in einer Wassertiefe von 2942 m. Der Greifer wurde auf einer Position abgesetzt, auf der einige tote Muschelschalen auf der Sedimentoberfläche sichtbar waren. Auf dieser Station wurde nur ein Sedimentkern für die Porenwasseranalysen ausgestochen.

Das Sulfidprofil in Abbildung 32 zeigt oberflächennahe Konzentrationen von 500 μM . Die Sulfidgehalte steigen bis in 16 cm Sedimenttiefe auf >1000 μM an, um anschließend wieder auf das oberflächennahe Niveau abzusinken. Das Sulfatprofil spiegelt den Konzentrationsverlauf von Sulfid nicht wider. An der Sedimentoberfläche sind die Sulfatgehalte gegenüber dem Meerwasser erniedrigt. Abgesehen von der Sulfatkonzentration in 9 cm Sedimenttiefe, die als Artefakt angesehen wird, sind nur geringe Veränderungen im Tiefenprofil sichtbar. Die Alkalinität steigt von Oberflächenwerten um 4,5 mM langsam auf 5,3 mM in 15 cm Sedi-

menttiefe. Anschließend fällt sie wieder auf 4,5 mM in 42 cm Tiefe. Die Ammoniumkonzentration im Porenwasser auf Station 93 TVG lag unter der Nachweisgrenze von 5 μM . Die Konzentrationsprofile von Chlorid und Bromid weisen genauso wie das Sulfatprofil eine Erhöhung der Gehalte in 9 cm Sedimenttiefe auf. Vermutlich wurde die Probe in dieser Tiefe bei ionenchromatographischen Analyse nicht korrekt verdünnt. Der weitere Konzentrationsverlauf von Chlorid und Bromid differiert nicht deutlich von der Meerwasserkonzentration der beiden Ionen. Das Silikatprofil fluktuiert über die gesamte Sedimenttiefe von 43 cm zwischen 200 und 300 μM gelöstes Silikat.

Die Mangankonzentration in Abbildung 33 ist bis in eine Sedimenttiefe von 43 cm gegenüber der Meerwasserkonzentration von 0,04 μM leicht erhöht. Das Kalziumprofil verläuft sehr linear und weicht ebenfalls nicht von Konzentration im Meerwasser ab. Die Barium- und Natriumprofile verlaufen ähnlich unauffällig. Barium schwankt um Konzentrationswerte von 270 nM. Die Natriumgehalte entsprechen über die gesamte Sedimenttiefe den Konzentrationen im Meerwasser von 466 mM. Beide Tiefenprofile für Magnesium und Strontium zeigen keine bedeutende Abweichung von der Meerwasserkonzentration.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die höchsten Sulfidgehalte im Porenwasser finden sich auf den Greiferstationen, die an der Stirnseite des 'Snail and Mussel Hill' positioniert wurden. Die tiefer liegenden Stationen an der Stirnseite (44 TVG und 91 TVG) weisen die höchsten Konzentrationen mit >4 mM Sulfid auf. Die Sulfidkonzentration im Porenwasser der Station 93 TVG erreicht maximal Werte von 1,1 mM. Alle drei Greiferstationen weisen ihre maximalen Sulfidkonzentrationen zwischen 15 und 30 cm Sedimenttiefe auf. Die Station 33 TVG an der südlichen Flanke des 'Snail and Mussel Hill' weist dagegen nur geringe Sulfidgehalte im Porenwasser auf.

Die Sulfatkonzentrationen verhalten sich konsistent zu den Sulfidprofilen. Auf allen Stationen sinken die Sulfatkonzentrationen bei steigendem Sulfidgehalt. Die stärksten Abnahmen im Sulfatgehalt sind auf Station 44 TVG zu beobachten.

Die Alkalinität steigt bei erhöhten Sulfidkonzentrationen auf allen vier Stationen. Die Tiefenprofile für Chlorid und Bromid weisen nur auf der Station 91 TVG geringe Verminderung der gelösten Ionen im Porenwasser auf. Die Silikatwerte steigen im zweiten Kern auf der Station 44 TVG besonders stark an. Die Mangankonzentrationen sind oberflächennah stets am größten. Auf der Station 33 TVG an der Flanke des 'Snail and Mussel Hill' werden mit 9 μM

die höchsten Werte erreicht. Die Bariumkonzentrationen sind im Greifer 44 TVG mit >14.000 nM am höchsten. Bezüglich der gelösten Komponenten von Magnesium und Strontium weist nur der Greifer auf Station 44 TVG eine Abnahme im Vergleich zu der Meerwasserkonzentration auf.

3.4 Diskussion

3.4.1 Porenwasserprofile vor Makran

Die vorliegende Arbeit am Akkretionskeil vor Makran basiert auf Voruntersuchungen, die schon 1993 im Rahmen der Expedition SO-90 durchgeführt wurden (Rad et al., 1995). Während dieser Expedition wurde im nördlichen Arabischen Meer innerhalb der Sauerstoff-Minimum-Zone in einer Wassertiefe von 850 m mit dem TV-Greifer ein Seep beprobt (Rad et al., 1996). Von Rad et al. (1996) verwenden den Begriff "Cold Seep" für Austrittsstellen von Flüssigkeiten oder Gasen aus dem Sediment ohne die chemoautotrophe Lebensgemeinschaft in den Begriff mit einzubeziehen. Die Sedimentoberfläche des Greifers war von weißlichen Bakterienmatten und dunklen Karbonatkrusten bedeckt, und an Deck des Schiffes trat Schwefelwasserstoff und Methan aus dem Sediment aus (Rad et al., 1996). Da die Station innerhalb der Sauerstoff-Minimum-Zone lag, wurde keine Makrofauna, insbesondere Muscheln mit endosymbiontischen chemoautotrophen Bakterien im Greifersediment gefunden.

Weite Bereiche des Akkretionskeils vor Makran sind durch BSR-Lagen (**bottom-simulating reflector**) im Sediment gekennzeichnet, die durch freies Gas unterhalb von Gashydraten hervorgerufen werden (Hyndman & Davis, 1992; MacKay et al., 1994). Solche BSR-Lagen sind weit verbreitet und wurden auch auf seismischen Profilen im Akkretionskeil vor Makran gefunden (White, 1977; White, 1979; Minshull et al., 1992). Im Rahmen der SONNE-Expedition SO-123-MAMUT (**Makran Murray Traverse**) im Herbst 1997 wurden solche seismischen Reflektoren in Sedimenten entlang des Profils SO-123-08 entdeckt (Flueh et al., 1997). Dieses Profil verläuft in Nord-Süd-Richtung ca. 140 km weiter westlich der TV-Greiferstationen, die in der vorliegenden Arbeit untersucht wurden. Gelangen die anstehenden Gashydratlagen durch tektonische Prozesse in Wassertiefen, in denen sie nicht mehr stabil sind, zerfallen sie zu Wasser und Methangas (Kvenvolden, 1993; Zatsepina & Buffett, 1998). Das Methan kann dann zusammen mit den austretenden Fluiden an die Sediment-Wasser-Grenzfläche transportiert werden. Unter Einfluß von Sulfat aus dem Bodenwasser kann anschließend über das Konsortium aus methanogenen und sulfatreduzierenden Bakterien Sulfid entstehen (Hoehler et al., 1994, siehe auch Kapitel 2.4.2). Unter diesen Voraussetzungen kann sich eine chemoautotrophe Lebensgemeinschaft bilden, wenn die Fluide unterhalb der Sauerstoff-Minimum-Zone austreten. Diese Bedingung muß erfüllt sein, da die Makrofauna, die mit

den endosymbiontischen Bakterien vergesellschaftet ist, neben den reduzierten Verbindungen auch auf den gelösten Sauerstoff im Bodenwasser angewiesen ist (Childress & Mickel, 1982; Sibuet & Olu, 1998). Im Rahmen der Forschungsexpedition SO-130 im Frühjahr 1998 wurde eine solche Cold Seep Lebensgemeinschaft im nördlichen Arabischen Meer vor der Küste Makrans in einem Canyon entdeckt und beprobt.

Der Canyon wurde während eines Hydrosweep-Profiles entdeckt, das entlang 064° 15' E verlief (Ormara-Transekt). Das Profil erstreckte sich von der Tiefsee-Ebene in 3150 m über fünf aufeinander folgende Akkretionsrücken bis zum Kontinentalhang (Rad et al., 1998). Der Canyon verläuft zwischen dem vierten und dritten Akkretionsrücken in einer Wassertiefe von 2300 m. Auf Höhe des dritten Akkretionsrücken durchschneidet ein 300 m hoher Abbruch den Canyonboden (Rad et al., 1998). Eine vorläufige Interpretation deutet auf eine vor kurzem stattgefundene tektonische Hebung des nördlichen Krustenblockes hin (M. Wiedicke in Rad et al., 1998). Entlang dieser geologischen Verwerfung wurden die chemoautotrophen Lebensgemeinschaften auf zwei OFOS-Tracks entdeckt (Linke et al., in prep.). Den beiden Einsätzen mit dem Videoschlitten gingen Methananalysen in der Wassersäule voraus, die im Bereich des Canyonbodens Methankonzentrationen um 700 nl l⁻¹ erbrachten (Rad et al., 1998; Berner et al., in prep.). Die Hintergrundkonzentration für gelöstes Methan liegt im nördlichen Arabischen Meer im Bereich zwischen 10 und 20 nl l⁻¹ (Scranton & Brewer, 1978).

Das Sulfidprofil in dem Sediment des TV-Greifers 320 TVG zeigt bis in eine Tiefe von 18 cm kein gelöstes Sulfid im Porenwasser (Abbildung 21, Seite 68). Auch im Greifer 330 TVG sind die Sulfidgehalte mit 3 µM in 8,5 cm Sedimenttiefe niedrig (Abbildung 23, Seite 72). Der Sulfidpeak des Greifers 330 TVG wurde nicht als Ausreißer interpretiert, da er in beiden Sedimentkernen in der gleichen Tiefe auftrat. Solche diskreten Horizonte im Porenwasser in tieferen Sedimentlagen, die an Sulfid angereichert sind, wurden auch aus Cold Seep Gebieten im Aleutengraben beschrieben (Wallmann et al., 1997) und werden mit horizontal verlaufenden fluidleitenden Schichten im Sediment in Zusammenhang gebracht. Die vesicomiden Muscheln mit Schalenlängen zwischen 49 und 55 mm aus dem Greifer 330 TVG wurden als ähnlich wie *Calyplogena pacifica* identifiziert (pers. Mitteil. E. Krylova, Moskau). Die Muscheln der Gattung *Calyplogena* können ihren Fuß, über den sie Sulfid aufnehmen, stark strecken (Arp et al., 1984). Sie sind damit in der Lage in aufrechter Position diese sulfidführenden Schichten in 8,5 cm Sedimenttiefe zu erreichen.

Die Sulfatprofile sind mit den Sulfidprofilen konsistent. Der Einfluß des Sulfids in 8,5 cm Sedimenttiefe hat durch seine niedrige Konzentration im Mikromol-Bereich keinen signifikanten Einfluß auf den Gehalt an Sulfat, das im Millimol-Bereich gemessen wird. Die senkrecht verlaufenden Profile für Chlorid und Bromid geben einen Hinweis, daß es zu keiner Freisetzung von Gashydrat im Greifersediment kam. Gashydrate sind feste, eisähnliche Stoffe, die aus Wasser und Methangas bestehen. In die Gitterstruktur des Gashydrates wird nur reines Wasser eingebaut (Kvenvolden, 1988). Beim Zerfall der Hydrate durch erhöhte Temperatur oder abnehmenden Druck wird neben dem Gas auch das Wasser aus der typischen Gitterstruktur herausgelöst. Dieses Wasser ist frei von Ionen und führt zu einer Konzentrationsabnahme der gelösten Ionen im Porenwasser (Hesse & Harrison, 1981). In einem abgeschlossenen System würde sich die Ionenkonzentration vor der Gashydratbildung und nach der erneuten Auflösung der Hydrate nicht unterscheiden. Unter der Annahme von diffusiven Transportprozessen und tektonischen Umlagerungen kommt es jedoch zu einer Trennung von Gashydrat und dem an Ionen angereicherten Porenwasser. Gelangen die Gashydrate schließlich in Bereiche außerhalb ihres Stabilitätsfeldes, geben sie bei ihrem Zerfall das reine Wasser wieder ab. Dieses Wasser verringert die Konzentration der gelösten Bestandteile im Porenwasser (Kastner et al., 1995). Besonders an den konservativen Bestandteilen des Porenwasser wie Natrium, Chlorid und Bromid kann dieser Verdünnungseffekt gut gemessen werden. Porenwasseranalysen gashydratführender Sedimente vom Hydrate Ridge vor der Küste Oregons zeigen in wenigen Dezimetern Sedimenttiefe Chloridabnahmen bis auf 510 mM (Greinert, 1998; Suess et al., 1999). Unterhalb von 200 m Sedimenttiefe wurden in Bohrkernen von Kastner et al. (1995) am gleichen Ort Chloridkonzentrationen von 360 μ M gemessen.

Die Silikatgehalte der beiden Greiferstationen vor Makran zeigen sehr niedrige und zudem stark streuende Werte (Abbildung 21 und 23). Die Siliziumanalytik wurde auf der Expedition SO-130 nicht an Bord durchgeführt, sondern anhand der eingefrorenen Proben am GEOMAR-Forschungszentrum an der ICP-AES Anlage durchgeführt. Es wird vermutet, daß es zu einer Kolloidbildung des Siliziums während der Lagerung gekommen ist (pers. Mitteil. K. Wallmann, GEOMAR, Kiel). Eine solche Kolloidbildung, die durch die weiteren Analyseschritte nicht wieder aufgelöst werden kann, wird ebenfalls bei Koroleff (1983) beschrieben.

Gelöstes Mangan im Porenwasser gibt einen Hinweis über die vorherrschenden Redoxbedingungen im Sediment. Beim Abbau organischer Substanz folgt in der Redoxreihe Mangan als Elektronenakzeptor auf den Sauerstoff (Froelich et al., 1979). Das bedeutet, daß Mangan bei

Abwesenheit von Sauerstoff aus der Festphase (MnO_2) als Mn^{2+} in Lösung geht (Luther III et al., 1998). Die Manganprofile im Porenwasser zeigen in allen drei Sedimentkernen oberhalb von 8 cm Tiefe ein Maximum. Die absoluten Werte sind im Greifer 320 TVG am höchsten und im muschelhaltigen Sedimentkern des Greifers 330 TVG am niedrigsten. Im Greifer 330 TVG nimmt der Gehalt an gelöstem Mangan unterhalb von 12 cm wieder ab. Diese Verminderung könnte mit der Bildung von Mangankarbonat (MnCO_3) in Zusammenhang gebracht werden (Libes, 1992). Die mit der Tiefe leicht ansteigende Alkalinität im Sediment der Station 320 TVG kann das Karbonat für eine Bildung von Mangankarbonat anliefern. Bei Anwesenheit von Sulfid kann Mangan auch als MnS ausgefällt werden und wäre damit nicht mehr im Porenwasser nachweisbar. Diese Fällung ist aber erst bei Sulfidkonzentrationen im Millimol-Bereich zu erwarten. Im Meerwasser liegt die Konzentration an gelöstem Mangan unter $0,04 \mu\text{M}$ (Wright & Colling, 1995). In der obersten Sedimentlage des Greifers 320 TVG wird dieser Wert annähernd erreicht. Beim Greifer 330 TVG bricht das Profil bei 3 bzw. $5 \mu\text{M}$ ab. Es wird angenommen, daß in diesem Greifer die oberste Sedimentlage beim Hieven weg-gewaschen wurde. Im Konzentrationsprofil gibt es also einen Tiefen-Offset von 1-2 cm.

Die Kalziumkonzentration sinkt bei beiden Greifern nicht ab. Es kommt folglich zu keiner Karbonat-Präzipitation im Sediment. Die Karbonatpräzipitate, die in Cold Seep Gebieten gefunden wurden, enthalten neben Kalzium noch Magnesium und auch geringe Mengen Strontium (Han & Suess, 1989; Greinert, 1998). Präzipitate aus der Cascadia Subduktionszone vor Oregon weisen bis zu 19 mol% MgCO_3 auf (Bohrmann et al., 1998). Die Magnesium- und Strontiumprofile beider Greiferstationen im Makran Akkretionskeil sind in dieser Hinsicht unauffällig.

Die Bariumkonzentrationen steigen bei beiden Greifern mit zunehmender Sedimenttiefe an. Barium liegt im Sediment als Barit (BaSO_4) vor, und man nimmt an, daß es aus der euphotischen Zone stammt, wo es beim Abbau von organischer Substanz gebildet wird (Falkner et al., 1993). Das nördliche Arabische Meer ist von hohen Primärproduktionsraten gekennzeichnet (Qasim, 1982), die mit dem Partikelfluß von Barit ins Sediment positiv korreliert sind (Torres et al., 1996a). Barit ist unter oxischen Bedingungen im Sediment schwer löslich, geht aber im anoxischem Milieu in Lösung und kann dann im Porenwasser nachgewiesen werden (Dymond et al., 1992). Besonders bei einer Sulfatabnahme kommt es zu einer Barium-Mobilisierung (Torres et al., 1996a). Eine leichte Verringerung des Sulfatgehaltes mit der Tiefe ist in den zwei Greifersedimenten in den untersten Sedimentlagen zu erkennen.

Zusammenfassung

Es zeigt sich, daß in der Canyonstruktur im Makran Akkretionskeil ein schwacher Cold Seep entdeckt wurde. Gelöstes Sulfid findet sich in geringen Konzentrationen im Sediment, und die Sulfatreduktion findet noch unterhalb von 18 cm Sedimenttiefe statt. Die geringen Individuendichten von lebenden *Calymene* Muscheln, die während der zwei Einsätze mit dem OFOS-Videoschlitten beobachtet wurden, passen in diesen geochemischen Kontext. Die Analysen aus der Wassersäule mit 700 nl l⁻¹ gelöstem Methan (Berner et al., in prep.) sind im Vergleich zu Messungen vor der Küste Javas (s.u.) und vor Oregon nicht hoch. Vor West-Java wurden >5000 nl l⁻¹, und am Hydrate Ridge vor Oregon wurden 74.000 nl l⁻¹ Methan gemessen (Suess et al., 1999). Die relativ niedrigen Methankonzentrationen können die These unterstützen, daß nur ein schwaches Cold Seep Gebiet am dritten Akkretionsrücken entdeckt wurde.

In der Canyonstruktur wurden aber zahlreiche tote Schalen von *Calymene* Muscheln beobachtet. Es wird vermutet, daß es früher im Canyonbereich stärkere Seep Aktivitäten gegeben hat. Es ist denkbar, daß die toten Schalen von Seep Lokationen stammen, die weiter hangaufwärts liegen, besonders, da entlang von Canyonstrukturen Sediment gut transportiert werden kann. Gegen diese Hypothese sprechen aber zwei Indizien: 1.) Wird ein turbiditischer Sedimenttransport angenommen, sollten die toten Schalen mehr oder minder gleichmäßig im Sediment verteilt sein. Im Greifer 320 TVG wurden zahlreiche leere Schalen gefunden, aber nur auf der Sedimentoberfläche oder in den obersten Horizonten. 2.) Im weiteren Verlauf des Canyons wurden während der Expedition zwei langgestreckte Depressionen entdeckt, die erste ist 50 m, die zweite 150 m tief (M. Wiedicke in Rad et al., 1998). Solche Depressionen sind ungewöhnlich, da sie durch hangabwärts gerichteten Sedimenttransport binnen weniger Jahre aufgefüllt sein sollten (pers. Mitteil. M. Wiedicke, BGR, Hannover). Die Depressionen sind demnach ein Hinweis, daß es an dieser Lokation entweder keine hohen Lateraltransporte von Sediment gibt, oder daß die Depressionen erst vor kurzem entstanden sind und daher noch nicht wieder aufgefüllt wurden. Bei den hohen Sedimentationsraten von 0,4 mm a⁻¹ im nördlichen Arabischen Meer (Suthhof et al., 2000) wird die Hypothese der fehlenden Lateraltransporte im Canyon unwahrscheinlich. Der gute Erhaltungsgrad der gefundenen Muschelschalen, die teilweise noch ein Periostrakum aufweisen, unterstützt die Überlegung, daß es vor relativ kurzer Zeit zu tektonischen Umlagerungen im Gebiet gekommen ist, die die vorhandene Fluid-Austrittsstellen zum größten Teil zum Versiegen gebracht haben.

Es wird angenommen, daß die vorhandenen vesicomiden Muscheln daraufhin auf ihre Reserven in Form von elementarem Schwefel zurückgreifen konnten, um ihre sulfidoxidierenden Bakterien in den Kiemen zu versorgen. Bei Untersuchungen an *Calyptogena elongata* aus dem Santa Barbara Becken wurde ein Zurückgreifen auf die Schwefelreserven in den Kiemen beobachtet (Vetter, 1985, siehe auch Kapitel 2.4.2). Kriechspuren auf dem Sediment zeigen, daß die Muscheln der Gattung *Calyptogena* in der Lage sind sich aktiv fortzubewegen (Rosman et al., 1987; Embley et al., 1990; Fisher, 1990). In den Videosequenzen der OFOS-Einsätze im Canyon wurden ebenfalls Kriechspuren beobachtet. Deshalb wird angenommen, daß die Muscheln im Canyon vor Makran ebenfalls neue Seeps gesucht haben. Ihre Reserven reichten jedoch nicht aus, um eventuell vorhandene neue Austrittsstellen zu finden.

An den aragonitischen *Calyptogena*-Schalen vom East Pacific Rise aus Wassertiefen von 2600 m wurden Lösungsversuche durchgeführt (Kennish & Lutz, 1999). Die Ergebnisse zeigen, daß sich die Schalendicke mit $28 \mu\text{m a}^{-1}$ auf Grund von Lösungsvorgängen vermindert (Kennish & Lutz, 1999). Die Geschwindigkeit, mit der sich Kalkschalen im Meerwasser auflösen, ist unter anderem abhängig von dem Grad der Kalziumuntersättigung des Meerwassers (Archer, 1996b). Der Grad der Kalziumuntersättigung im östlichen Pazifik und dem nördlichen Arabischen Meer ist in beiden Gebieten gleich groß (Archer, 1996a). Daher lassen sich die Ergebnisse der Lösungsversuche auf die Cold Seep Gemeinschaften im Makran Akkretionskeil übertragen. Bei einer gleichen Lösungsgeschwindigkeit wären nach wenigen Jahren die feinen Oberflächenstrukturen auf den Schalen nicht mehr sichtbar. Der größtenteils gute Erhaltungsgrad der Schalen spricht dafür, daß die Muscheln vor kurzer Zeit (<10 Jahre) an Ort und Stelle gestorben sind. Die Befunde deuten an, daß das Cold Seep Gebiet in der Canyonstruktur im Makran Akkretionskeil am versiegen ist. Wallmann et al. (1997) zeigten anhand von Modellrechnungen, daß Cold Seep Lebensgemeinschaften im Aleutengraben nur für eine Zeitspanne von einigen Jahrzehnten existieren. Solche Zeitspannen sind sicherlich schwer auf andere Seep Gebiete zu übertragen, da die tektonischen Randbedingungen wie die Geschwindigkeit und der Winkel der Subduktion, die Sedimentauflage, die Untergrundbeschaffenheit usw. zwischen verschiedenen Subduktionszonen variieren. Die Subduktion selbst ist aber ein fortschreitender Prozeß, der einerseits durch Bruchzonen und Störungen Wegsamkeiten für Fluidentwässerung schafft, andererseits durch die gleichen tektonischen Aktivitäten wieder vorhandene Fluidaustrittsstellen verschließt. Die momentane Entstehung eines neuen Akkretionsrückens am Makran Akkretionskeil dokumentiert diesen dynamischen Prozeß eindrucksvoll (Flueh et al., 1997).

3.4.2 Porenwasserprofile vor West-Java

Im Rahmen des GINCO-Projektes wurde auf drei Fahrtabschnitten (SO-137 bis SO-139) mit dem Forschungsschiff FS SONNE die Plattengrenze zwischen der Indo-Australischen Platte und der Eurasischen Platte vor Sumatra und Java untersucht. Die beiden ersten Fahrten standen unter geodynamischen Fragestellungen. Auf der Fahrt SO-137 wurde der Akkretionskeil vor Sumatra, in der Sundastraße und vor West-Java mit Multichannel Seismik untersucht. Der Abschnitt SO-138 erstellte auf den Profilen der vorhergehenden Fahrt refraktionsseismische Profile zur Untersuchung tiefer Strukturen des Kontinentalrandes. Der dritte Abschnitt SO-139 widmete sich schließlich der geologischen, biologischen und geochemischen Fragestellungen in dem Arbeitsgebiet. Zusätzlich wurden im dritten Fahrtabschnitt Wärmeflußmessungen durchgeführt.

Der horizontale Winkel der Subduktion vor der indonesischen Küste variiert zwischen einer Bewegungsrichtung senkrecht zur Küstenlinie vor Java und einem schrägen Winkel vor Sumatra (Curry, 1989; McCaffrey, 1991; McCaffrey, 1992). Durch den schräg verlaufenden Abtauchwinkel kommt es zwischen der Subduktionszone und dem Vulkanbogen zu Deformationen, die für die Bildung der Mentawai-Störungszone verantwortlich sind (Diament et al., 1992; Izart et al., 1994). Die Mentawai-Störung erstreckt sich küstenparallel im Forearc-Bekken vor Sumatra, also zwischen dem äußeren Rücken und dem Vulkanbogen. Sie verläuft parallel zur Subduktionszone über die Sundastraße hinaus bis vor die Küste West-Javas, wobei ihre südöstliche Ausdehnung unsicher ist (Diament et al., 1992).

Im Rahmen der Expedition SO-137 wurden solche domartigen Aufquetschungen in den sonst überwiegend ruhig gelagerten Sedimenten des Forearc-Beckens auf der geographischen Länge 106° E kartiert (Reichert & SONNE 137 scientific party, 1999). Ein zweites Profil weiter östlich auf 106,5° E zeigt diese Struktur bereits nicht mehr. Ein Zusammenhang mit der Mentawai-Störung wird diskutiert, ist aber noch unsicher (Reichert & SONNE 137 scientific party, 1999).

Auf der Expedition SO-139 wurde diese Struktur, die 'Snail and Mussel Hill' benannt wurde, genauer untersucht. Hierfür wurde das bordeigene Parasound-System eingesetzt, ein Echolotsystem, das Schallwellen mit einer Frequenz von 4 kHz verwendet und unter optimalen Bedingungen eine maximale Sediment-Eindringtiefe von 150 m hat. Ein Parasound-Profil über den 'Snail and Mussel Hill' zeigte, daß er von einer ausgeprägten Antiklinalstruktur un-

terlagert wird (Beiersdorf et al., 1999). Eine Antiklinale ist in einer Schichtfolge der nach oben geschlossene, aufgewölbte Teil einer Faltenstruktur (Eisbacher, 1991). Sie ist hier am 'Snail and Mussel Hill' leicht asymmetrisch und in nördlicher Richtung überkippt. Die aufgelagerten Sedimente sind stark gestört (Beiersdorf et al., 1999). BSR-Lagen wurden über weite Bereiche der Forearc-Becken gefunden, aber nur auf der nördlichen, landwärtigen Seite der Becken und nicht im Akkretionskeil (Reichert & SONNE 137 scientific party, 1999). Die von BSR-Lagen unterlegte Fläche vor Ost-Sumatra und West-Java beträgt nach konservativen Abschätzungen 22.000 km^2 (Reichert & SONNE 137 scientific party, 1999).

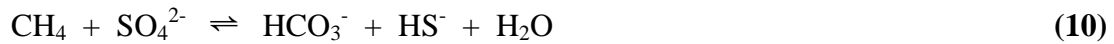
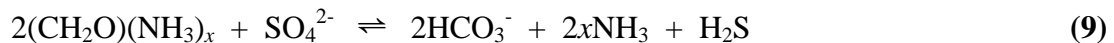
Auf der Suche nach chemoautotrophen Lebensgemeinschaften wurde auf der Expedition SO-139 ähnlich vorgegangen wie bei den Untersuchungen am Makran Akkretionskeil. Methanmessungen im Bodenwasser am 'Snail and Mussel Hill' erbrachten leicht erhöhte Konzentrationen an gelöstem Methan im Bereich von 170 nl l^{-1} an der Südseite und hohe Gehalte mit $>5000 \text{ nl l}^{-1}$ auf dem Plateau des 'Snail and Mussel Hill' (Beiersdorf et al., 1999). Die Hintergrundkonzentration für gelöstes Methan liegt im Forearc-Becken $<20 \text{ nl l}^{-1}$ (Beiersdorf et al., 1999).

Die Transekte des Videoschlittens basierten auf den Informationen der bathymetrischen Karte. Entlang des Hügels wurden auf mehreren Einsätzen des Videoschlittens dichte Cold Seep Lebensgemeinschaften entdeckt. Besonders an der östlich gelegenen Stirnseite des 'Snail and Mussel Hill' (Abbildung 18, Seite 56) wurden zahlreiche chemoautotrophe Organismen wie Pogonophoren, vesicomide, solemyide und thyasiride Muscheln entdeckt, wobei die höchsten Abundanzen im mittleren Teil des Hanges beobachtet wurden. Auf dem Kamm wurden auf der Sedimentoberfläche vermehrt Pogonophoren und nur vereinzelt Schalen toter vesicomider Muscheln beobachtet (Beiersdorf et al., 1999).

Die Verteilung der Sulfidgehalte im Porenwasser der vier Greifer spiegelt diese Beobachtungen wider. Die am Südhang gelegene Greiferstation 33 TVG weist im Porenwasser nur geringe Sulfidgehalte auf, die im Bereich $<2,5 \mu\text{M}$ liegen (Abbildung 26, Seite 76). Die Sulfidkonzentrationen sind in an der Stirnseite in der mittleren und oberen Hanglage mit $>4000 \mu\text{M}$ am höchsten (Abbildungen 28 und 30, Seiten 78 und 82). Auf dem Plateau der Erhebung nimmt die Konzentration wieder ab. Hier wurden Werte von $1100 \mu\text{M}$ Sulfid gemessen (Abbildung 32, Seite 84).

Sulfid entsteht durch Sulfatreduktion im Sediment unterhalb der Eisen(III)- und Nitratreduktionszone (Froelich et al., 1979). Die Sulfidbildung kann nach Gleichung 9 durch den Ab-

bau organischer Substanz (Fenchel & Riedl, 1970) oder nach Gleichung 10 durch die mikrobielle Methanoxidation (Hoehler et al., 1994) angetrieben werden.



Die partikuläre organische Substanz, die auf photosynthetischem Wege gebildet wurde, wird in Gleichung 9 durch $(\text{CH}_2\text{O})(\text{NH}_3)_x$, repräsentiert.

Die hohen Methangehalte in der Wassersäule am 'Snail and Mussel Hill' zeigen ein hohes Potential für die Sulfidbildung aus der mikrobiellen Methanoxidation an. Die Sulfidprofile aller vier Greifer zeigen, abgesehen von absolut unterschiedlichen Gehalten, alle das gleiche Bild der abnehmenden Konzentrationen in Richtung der Sedimentoberfläche. Die Maximalwerte der Sulfidkonzentration liegen abgesehen von der Station 33 TVG zwischen 15 und 30 cm Sedimenttiefe. In dieser Tiefe findet die Sulfatreduktion statt. In einem Cold Seep Gebiet in der Sagami-Bucht südlich von Tokio wurde die Zone der Sulfatreduktion in der gleichen Sedimenttiefe bestimmt (Masuzawa et al., 1992). Neben der mikrobiell katalysierten Sulfatreduktion (Fenchel & Riedl, 1970; Borowski et al., 1996) wird in Sedimenten von Hydrothermalquellen auch eine thermochemische Sulfatreduktion unter Einfluß von Fe(II) als Katalysator beobachtet (Elsgaard et al., 1994). Dieser Vorgang wird aber nur bei Temperaturen $>200^\circ\text{C}$ beobachtet (Mottl et al., 1979).

Die Sulfatprofile im Sediment korrespondieren mit den Sulfidmessungen. Nur auf Station 44 TVG nimmt die Sulfatkonzentration deutlich stärker ab, als die Sulfidwerte zunehmen. Im Sediment an der Oberkante des Hanges (93 TVG) sind die Sulfatkonzentrationen auch an der Sediment-Wasser-Grenzschicht erniedrigt.

Die Alkalinität ist auf den Stationen mit erhöhten Sulfidgehalten im Porenwasser ebenfalls hoch. Die Alkalinität ist definiert als die Summe aller Anionen schwacher Säuren, die die Tendenz haben Protonen aufzunehmen (Stumm & Morgan, 1996). Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) und Karbonat (CO_3^{2-}) sind die beiden wichtigsten Anionen, die auf die Alkalinität einwirken (Wright & Colling, 1995). Sie wird im sulfidischen Milieu zusätzlich durch das Hydrogensulfidion (HS^-) als Anion der schwachen Säure H_2S beeinflusst.

Die Station 33 TVG zeigt im Porenwasser keine Abweichung der Alkalinität von Bodenwasserwerten, die für den tiefen Indischen Ozean bei 2,5 mM liegen (Libes, 1992; Wright &

Colling, 1995). Auf der Station 91 TVG am östlichen Fuß des 'Snail and Mussel Hill' steigt die Alkalinität in gleicher Weise an, wie die Sulfidwerte. Zu erwarten wären Werte um die 7 mM, da sich auf 2,5 mM Alkalinität aus der Hintergrundkonzentration noch 4 mM vom Sulfid aufaddieren. Die Werte liegen auf der Station 91 TVG aber über 8 mM und zeigen damit eine zusätzliche Karbonat-Alkalinität an, die bei der Methanoxidation nach Gleichung 10 entsteht (Masuzawa et al., 1992). Die höhere Konzentration von HCO_3^- verschiebt das chemische Gleichgewicht in der Gleichung 11 auf die rechte Seite.



Durch diese Verschiebung kommt es zu einer Verminderung der Kalziumkonzentration im Porenwasser und damit zu einer Ausfällung von festem Kalziumkarbonat in Form von authigenen Karbonatkrusten (Masuzawa et al., 1992). In den Abbildungen 29 und 31 (Seiten 79 und 83) ist diese Krustenbildung als Abnahme von gelöstem Kalzium mit zunehmender Sedimenttiefe erkennbar. In den Videosequenzen sind die authigenen Karbonatausfällungen auf der Sedimentoberfläche beobachtet worden. Im Greifersediment auf den Stationen 91 TVG und 44 TVG wurde ebenfalls authigenes Karbonat gefunden.

Die Magnesium- und Strontiumprofile auf der Station 91 TVG (Abbildung 31, Seite 83) zeigen keine Abnahme mit zunehmender Sedimenttiefe. Das legt die Vermutung nahe, daß weder Magnesium noch Strontium in die Karbonatkrusten eingebaut wird. Auf der Station 44 TVG sinkt dagegen die Magnesium- und Strontiumkonzentration mit zunehmender Sedimenttiefe (Abbildung 29, Seite 79). Hier ist die Verminderung der Kalziumkonzentration auch stärker. Eine Analyse der Festphase zeigt, daß die Karbonate der Station 44 TVG einen Anteil von 3,2% MgO und 577 ppm Strontium enthalten (pers. Mitteil. M. Wiedicke, BGR, Hannover). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird vermutet, daß beide Stationen die gleichen Gehalte an Magnesium und Strontium in den Karbonaten aufweisen. Auf der Station 91 TVG waren die Karbonatbildungen nur gering, so daß die Profile für die beiden Elemente nicht erkennbar mit der Tiefe abnahmen. Auf der Station 93 TVG, die auf dem Plateau des 'Snail and Mussel Hill' lag, wurden weder in den Videosequenzen noch in dem Greifersediment authigene Karbonate gefunden. Die senkrecht verlaufenden Konzentrationsprofile für gelöstes Kalzium, Magnesium und Strontium in Abbildung 33, Seite 85 bestätigen diese Beobachtungen für die Station 93 TVG.

Die Ammoniumkonzentration zeigt in dem Porenwasser am 'Snail and Mussel Hill' ein einheitliches Bild. Auf der Station 33 TVG, die weniger fluidbeeinflusst ist, nimmt der Ammoniumgehalt nur wenig zu. Die Zunahme wird dem Abbau organischer Substanz zugeschrieben, da hier nach Gleichung 9 Ammonium freigesetzt wird. Die Sulfatreduktion, die auf der alleinigen Umsetzung von Methan beruht, ist nach Gleichung 10 nicht mit einer Ammoniumfreisetzung verbunden. Auf der Station 44 TVG steigen die Ammoniumkonzentrationen mit zunehmender Tiefe auf Werte $>300 \mu\text{M}$ und zeigen damit an, daß partikuläres organisches Material im Sediment an der Sulfatreduktion beteiligt ist (Masuzawa et al., 1992). In Cold Seep Sedimenten der Subduktionszone vor der Küste Oregons konnten in vergleichbaren Wassertiefen ähnliche Ammoniumgehalte gemessen werden (Suess & Whiticar, 1989). In den Greifern 91 und 93 TVG konnte kein Ammonium nachgewiesen werden. Dies könnte ein Hinweis sein, daß die Sulfatreduktion an diesen Stationen durch den alleinigen Abbau von Methan angetrieben wird (Masuzawa et al., 1992). Nach Gleichung 11 wird bei diesem Vorgang kein Ammonium frei. Die Station 44 TVG, die zwischen den beiden Stationen liegt, zeigt aber ein deutliches Ammoniumsignal. Daher ist es wahrscheinlicher, daß bei der Analyse an Bord nicht reproduzierbare Fehler aufgetreten sind.

Chlorid und Bromid gelten als konservative Bestandteile des Meerwassers (Wright & Colling, 1995). Die Messung der beiden Ionen diente der Überprüfung, ob das Porenwasser durch den Abbau vorhandener Gashydrat-Lagen beeinflusst ist. Bei der Bildung von Gashydraten wird vorwiegend Methan in ein dreidimensionales Gitter aus Wassermolekülen eingebaut (Kvenvolden, 1988). Bei diesem Vorgang wird nur das reine Wasser für den Gitteraufbau verwandt. Beim Zerfall der Gashydrate durch abnehmenden Druck oder ansteigende Temperatur wird das Wasser wieder frei und führt zu einer Verdünnung der vorhandenen Ionen. Die Porenwasserprofile der vier Stationen zeigen keine abnehmenden Gehalte von Chlorid oder Bromid. Nur der erste Kern auf der Station 91 TVG, der aus dem zentralen Bereich des Greifers ausgestochen wurde, zeigt eine leichte Abnahme dieser konservativen Bestandteile. Sedimente die Gashydrate enthalten zeigen eine schwammartige Konsistenz. An Bord des Schiffes wurde bei einem Gashydratfund vor der Küste Oregons eine Blasenbildung beobachtet (Bohrmann et al., 1998; Suess et al., 1999). Solche Hinweise, die auf Gashydrate nahe der Sedimentoberfläche schließen lassen, wurden in den Sedimenten vom 'Snail and Mussel Hill' nicht entdeckt. Die leichte Verringerung der konservativen Bestandteile könnte aber mit einer Zersetzung von Gashydraten in größeren Sedimenttiefen verbunden sein.

Die Silikatgehalte liegen im Porenwasser auf Station 33 TVG mit $>300 \mu\text{M}$ etwas höher als in den Sedimentkernen der Stationen 91 und 93 TVG, bei denen sich die Silikatwerte zwischen 200 und $300 \mu\text{M}$ bewegen. Die hohen Silikatgehalte mit $>1000 \mu\text{M}$ im Sediment auf Station 44 TVG müssen einem Fehler in der Analytik zugeschrieben werden. Aus dem Porenwasser von Hydrothermalquellen wurden Silikatkonzentrationen im Millimol-Bereich beschrieben (Jannasch, 1993). Da am 'Snail and Mussel Hill' keine Temperaturanomalien beobachtet wurden, hätten die Sedimente bei solchen Silikatgehalten durch reine Diatomeen-Ablagerungen schneeweiß sein müssen (pers. Mitteil. D. Rickert, GEOMAR, Kiel). Alle Sedimente der Greiferstationen waren jedoch dunkelbraun bis olivgrün. Die Silikatprofile der anderen Greiferstationen zeigen keinen Einfluß von Bodenwasser im Porenwasser. Die Silikatgehalte im Porenwasser von Cold Seep Sedimenten aus dem Aleutengraben zeigen vergleichbare Konzentrationen wie die Profile am 'Snail and Mussel Hill' vor West-Java (Wallmann et al., 1997).

Die Gehalte an gelöstem Mangan sind auf der Station 33 TVG am höchsten und zeigen an, daß Mangan als Elektronenakzeptor für den Abbau organischer Substanz fungiert, da es dabei aus der Festphase (MnO_2) in Lösung geht (Froelich et al., 1979). Mit zunehmender Sedimenttiefe sinken die Mangankonzentrationen im Porenwasser ab. Dies könnte mit einem Übergang in der Redoxreihe auf Nitrat oder Eisen(III) als Elektronenakzeptor zusammen hängen. Bei der Nitratreduktion wird das Nitrat im Porenwasser zu Stickstoff reduziert unter gleichzeitiger Bildung von Ammonium aus dem organischen Material (Froelich et al., 1979). Ammonium konnte auf dieser Station auch im Porenwasser nachgewiesen werden. Bei gleichzeitiger Anwesenheit von Sulfid kann Mangan auch als schwerlösliches MnS ausfallen und würde dann nicht mehr als Mn^{2+} im Porenwasser nachweisbar sein. Auf der Station 44 TVG wird diese Ausfällung angenommen, da Mangan im ersten Kern unterhalb von 17 cm Sedimenttiefe nicht mehr nachweisbar ist. Der Sulfidgehalt erreicht in diesem Tiefenbereich mit $>4000 \mu\text{M}$ seine Maximalkonzentration. Der Gehalt des zweiten Kerns aus dem gleichen Greifer erreicht erst unterhalb von 30 cm Sedimenttiefe sein Maximum. Mangan ist in dem gemessenen Tiefenintervall noch nachweisbar, die Konzentrationskurve sinkt aber deutlich ab. Die Mangankonzentrationen >27 cm Sedimenttiefe bewegen sich bereits an der Nachweisgrenze. Auf der Station 91 TVG ist diese MnS -Ausfällung nicht zu beobachten. Obwohl die Sulfidwerte im ersten Kern ebenfalls auf Werte $>4000 \mu\text{M}$ ansteigen, kann trotzdem über die gesamte Kernlänge von 45 cm Mangan im Porenwasser nachgewiesen werden.

Die Bariumgehalte im Greifersediment zeigen auf den Stationen 33, 91 und 93 TVG nur leicht erhöhte Werte gegenüber der Hintergrundkonzentration im Meerwasser. Auffällig ist der Verlauf der Bariumkonzentration im zweiten Kern auf der Station 44 TVG. In 33 cm Sedimenttiefe erreichen die Gehalte an gelöstem Barium mit $>14.000 \text{ nM}$ die 65fache Konzentration des im Meerwasser enthaltenen Bariums. Barium stammt aus der euphotischen Zone und wird als schwerlösliches Barit (BaSO_4) in das Sediment eingetragen (Falkner et al., 1993). Es gibt keinen kausalen Zusammenhang zwischen dem Silikatfluß über Diatomeen und dem Eintrag von Barium in das Sediment, da die Schalen der Diatomeen kein Barium enthalten. Die Hypothese der Adsorption von Barium an die Schalen wurde zugunsten der Vorstellung verworfen, daß sich Barit beim Abbau organischer Substanz in Mikroenvironments schon in der euphotischen Zone bildet und zusammen mit den Schalen im Sediment abgelagert wird (Dymond et al., 1992). Unter anoxischen Bedingungen geht das schwerlösliche Barit wieder in Lösung und ist dann im Porenwasser nachweisbar (Dymond et al., 1992). In der Subduktionszone vor Peru wurde eine Barium-Mobilisierung bei Verringerung des Sulfatgehaltes im Porenwasser untersucht (Torres et al., 1996a; Torres et al., 1996b). Die hohen Gehalte an gelöstem Barium auf der Station 44 TVG legen die Vermutung nahe, daß die aufsteigenden Fluide aus größeren Sedimenttiefen stammen und über längere Zeit mit dem Barit des Sedimentes im Austausch standen. Am Kontinentalrand vor Peru wurden ebenfalls so hohe Bariumgehalte im Porenwasser gemessen, allerdings wurde eine Konzentration von $14 \text{ }\mu\text{M}$ erst in einer Sedimenttiefe von 450 cm erreicht (Torres et al., 1996a). Die Sulfatkonzentration in dieser Tiefe lag bei 5 mM (Torres et al., 1996a). Im zweiten Kern der Greiferstation 44 TVG liegen die Sulfatgehalte im Bereich hoher Bariumkonzentrationen zwischen 5 und 10 mM und zeigen damit eine gute Übereinstimmung.

Zusammenfassung

Es zeigt sich, daß der neu entdeckte 'Snail and Mussel Hill' an seiner östlich gelegenen Stirnseite (Abbildung 34) die höchste Seep Aktivität aufweist. Die drei Greiferstationen an der Stirnseite liegen maximal 400 m auseinander und zeigen unterschiedliche geochemische Muster. Auf den Stationen 91 und 44 TVG wurden mit $>4000 \text{ }\mu\text{M}$ die höchsten Sulfidgehalte am 'Snail and Mussel Hill' gemessen. Hier wurden auf den Einsätzen mit dem Videoschlitten und dem TV-Greifer Kolonien von vesicomiden Muscheln und Pogonophoren beobachtet. Die Kolonien siedelten zwischen den authigenen Karbonatkrusten die an der Oberfläche dunkel verfärbt waren. Die Ausdehnung der einzelnen Kolonien in Ost-West-Richtung wird auf

Grundlage der Videobeobachtungen auf 200 m geschätzt. Die Seep Aktivität ist in der mittleren Höhenlage und an der Oberkante des Hanges am intensivsten. Auf dem oberen Plateau (Station 93 TVG) wurde eine niedrigere Aktivität beobachtet. Die Sulfidwerte sind mit $>1000 \mu\text{M}$ nicht ganz so hoch. Hier am Hügeltop wurden auch nur noch Pogonophoren und leere Muschelschalen beobachtet. Das Sediment wies oberflächlich keine Karbonatkrusten mehr auf.

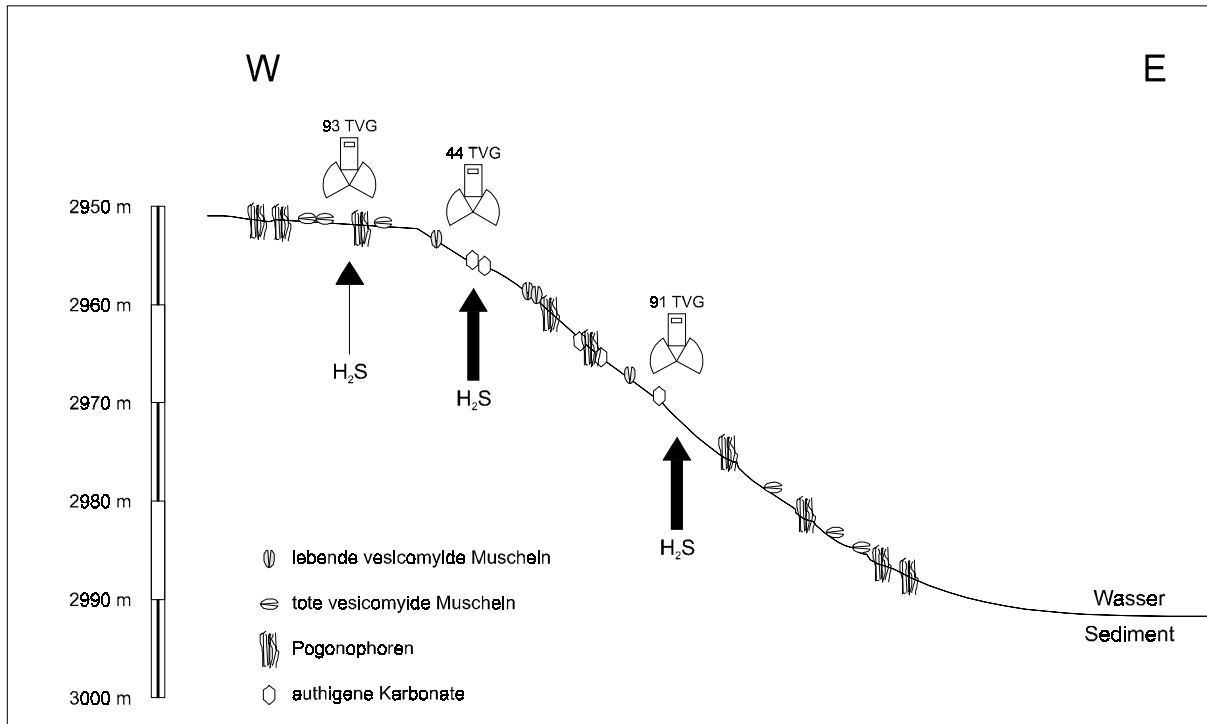


Abbildung 34: Schematische Darstellung der östlichen Flanke des 'Snail and Mussel Hill' im Forrearc-Becken vor der Küste West-Javas. Die Station 33 TVG ist nicht mit eingezeichnet. Die Symbole für die epibenthische Makrofauna und die Karbonate stellen keine absoluten Häufigkeiten dar. Sie symbolisieren allein das Vorhandensein der Organismen bzw. Karbonate in den verschiedenen Tiefenstufen. Die Darstellung beruht auf Video- und Fotobeobachtungen sowie den Ergebnissen der Porenwasseranalysen.

Die Parasound-Profile lassen keine Hinweise auf sich zersetzende Gashydrate erkennen (Beiersdorf et al., 1999). Unter günstigsten Bedingungen liefert das Parasound-System Informationen aus bis zu 150 m Sedimenttiefe. Auf der Station 91 TVG wurde eine leichte Abnahme der konservativen Bestandteile des Porenwassers wie Natrium, Chlorid und Bromid beobachtet. Dieser Befund legt die Vermutung nahe, daß sich auflösende Gashydrate noch unterhalb von 150 m Tiefe befinden. Das dabei frei werdende Methan würde zusammen mit

dem an konservativen Ionen verarmten Porenwasser in Richtung Sediment-Wasser-Grenzfläche transportiert werden.

Die Station 33 TVG an der Südseite des 'Snail and Mussel Hill' hat vergleichsweise geringe Sulfidgehalte, und es wurde, abgesehen von weißlichen Bakterienmatten, keine seep-assoziierte Fauna beobachtet. Die Profile der Porenwassergehalte spiegeln diese Beobachtungen wider.

4 Geochemischer Sulfidfluß und Sulfidaufnahme von *Calypptogena pacifica*

4.1 Makran

4.1.1 Sulfidfluß

Die Porenwasserprofile aus den beiden Greifern 320 und 330 TVG haben gezeigt, daß zwei Stationen, die 170 m voneinander entfernt liegen, in faunistischer und geochemischer Hinsicht differieren. Schon innerhalb des Greifers 330 TVG weisen die beiden Unterkerne, die etwa 1 m voneinander entfernt liegen, Unterschiede in den geochemischen Profilen auf.

Für eine Abschätzung der austretenden Sulfidmengen aus dem Seep wurden direkte Ausstrommessungen aus dem Canyon herangezogen. Die Messungen stammen von dem VESP-Gerät (**V**ent **S**ampler), das am GEOMAR-Forschungszentrum entwickelt wurde (Linke et al., 1994). Das Gerät bestand aus einem Kunststoff-Faß, das mit der Öffnung nach unten auf dem Seep abgesetzt wurde. Es überdeckte dabei eine Sedimentfläche von $0,26 \text{ m}^2$. Die austretenden Fluide wurden durch einen oben liegenden Auslaß geleitet. Ein Strömungssensor, der in dem Auslaß angebracht war, bestimmte dabei die Ausstromgeschwindigkeit der Fluide (Linke et al., 1994).

Die Station 321 VESP lag zwischen den beiden Greiferpositionen 320 TVG und 330 TVG in einer Wassertiefe von 2334 m. Die Meßzeit des VESP-Einsatzes betrug 52 min und ergab eine Ausstromrate von $508 \text{ dm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Linke et al., in prep.). Für die Berechnung des Sulfidflusses wurde die Sulfidkonzentration von $3 \text{ }\mu\text{M}$ aus dem Greifer 330 TVG in $8,5 \text{ cm}$ Sedimenttiefe verwandt. Der Fluß J_{Sulfid} errechnet sich dann nach Gleichung 12.

$$\begin{aligned} J_{\text{Sulfid}} [\mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}] &= \text{Ausstromrate} [\text{dm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}] \times \text{Konzentration} [\mu\text{mol dm}^{-3}] \quad (12) \\ &= 508 [\text{dm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}] \times 3 [\mu\text{mol dm}^{-3}] \\ &= 1524 [\mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}] \end{aligned}$$

In einem Abstand von 1 m zwischen den beiden Sedimentkernen im Greifer 330 TVG werden schon faunistische und geochemische Unterschiede deutlich. Daher wurde die Berechnung des Sulfidflusses nur auf die von vesicomyyden Muscheln besiedelte Fläche bezogen. Die Mu-

scheln im Greifer 330 TVG befanden sich auf einer Fläche von 0,04 m². Auf dieser Fläche beträgt der Sulfidfluß vom Sediment in die bodennahe Wassersäule:

$$\begin{aligned} J_{\text{Sulfid}} &= 1524 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1} \times 0,04 \text{ m}^2 \\ &= 61,0 \mu\text{mol d}^{-1}. \end{aligned}$$

Der Sulfidfluß über die Sediment-Wasser-Grenzfläche von 61 $\mu\text{mol d}^{-1}$ stellt nur eine Abschätzung dar. Die Ausstrommessung mit dem VESP-Gerät erfolgte nicht auf dem Seep, der mit dem Greifer 330 TVG beprobt wurde. Die Positionen der Ausstrommessung mit dem VESP-Gerät und die des TV-Greifers liegen sicherlich einige 10er Meter auseinander. Wenn schon bei Abständen im Meterbereich Unterschiede sichtbar werden, sind bei größeren Distanzen ebenso Unterschiede zu erwarten.

4.1.2 Sulfidfluß im Vergleich zur Sulfidaufnahme

Für die Abschätzung der Sulfidaufnahme von *Calyptogena pacifica* vor Makran wurde eine Potenzfunktion gemäß Gleichung 13 zugrunde gelegt.

$$\text{Sulfidaufnahme} = a \times \text{Feuchtwicht}^b \quad (13)$$

Solche Potenzfunktionen werden bei Untersuchungen von Respirationsraten verschiedener Tiergruppen in der Tiefsee eingesetzt (Mahaut et al., 1995). An den beiden *Calyptogena pacifica* Muscheln aus dem Eel River Becken sind Sulfidaufnahmeraten bestimmt worden (Tabelle 5, Seite 29). Wendet man nun eine solche mathematische Funktion auf die Aufnahmeraten dieser Muscheln an, erhält man folgende Beziehung:

$$\text{Sulfidaufnahme} [\mu\text{mol g}^{-1} \text{ d}^{-1}] = 1,62 \times \text{Feuchtwicht} [\text{g}]^{-0,63}$$

Die Beziehung zwischen Feuchtwicht und Sulfidaufnahme ist in Tabelle 13 auf das Cold Seep Gebiet vor Makran übertragen worden. Nach dieser Berechnung nehmen die fünf *Calyptogena pacifica* Muscheln zusammen eine Sulfidmenge von 13,33 $\mu\text{mol d}^{-1}$ auf. Der ermittelte Sulfidfluß für die Versorgung der chemoautotrophen Makrofauna auf der besiedelten Fläche beträgt 61,0 $\mu\text{mol d}^{-1}$.

Tabelle 13: Vergleich der gemessenen Sulfidaufnahme von *Calyptogena pacifica* aus dem Cold Seep des Eel River Beckens mit der errechneten Sulfidaufnahme von fünf Muscheln der gleichen Gattung aus dem Cold Seep Gebiet vor Makran.

Seep Lokalität	Schalenlänge [mm]	Feuchtgewicht [g]	Sulfidaufnahme = $1,62 \times \text{Feuchtgewicht}^{-0,63}$	
			$[\mu\text{mol g}^{-1} \text{d}^{-1}]$	$[\mu\text{mol d}^{-1}]$
Eel River Becken	32,0	0,7	2,03	
Eel River Becken	40,0	1,4	1,31	
Makran	49,0	3,75	0,70	2,64
Makran	49,5	3,43	0,74	2,55
Makran	51,0	3,65	0,72	2,61
Makran	53,0	4,12	0,66	2,73
Makran	54,5	4,44	0,63	2,80
			<u>Summe:</u>	<u>13,33</u>

Die Versuche zur Sulfidaufnahme von *Calyptogena pacifica*, die von Childress & Mickel (1982) durchgeführt wurden, lassen sich hier nicht zum Vergleich heranziehen. Childress & Mickel (1982) nennen in ihrer Untersuchung nur die Sulfidaufnahmeraten bezogen auf ein Gramm Feuchtgewicht, ohne die Muschellänge bzw. das Feuchtgewicht mit anzugeben. Die Ursprungsdaten der beiden Autoren stehen heute nicht mehr zur Verfügung (pers. Mitteil. J. Childress, University of California, Santa Barbara).

Neben den vesicomiden Muscheln mit endosymbiontischen, sulfidreduzierenden Bakterien wurden auch Muscheln der Gattung *Acharax* sp. (Fam. Solemyidae) und Pogonophoren (*Siboglinum* sp.) in dem Cold Seep Sediment des Greifers 330 TVG gefunden. Beide Gruppen nehmen ebenfalls reduzierte Schwefelverbindungen zur Versorgung ihrer endosymbiontischen Bakterien auf (Southward et al., 1981; Conway et al., 1989; Anderson et al., 1990; Dando et al., 1994). Neben den endosymbiontischen Bakterien, kommen auch freilebende chemoautotrophe Formen in Cold Seep Gebieten vor (Nelson & Hagen, 1995; Buck & Barry, 1998). In der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, daß diese freilebenden Bakterien kosmopolitisch verbreitet sind und ebenfalls im Sediment vor Makran vorkommen. In Cold Seep Sedimenten wurden auch sulfidreduzierende ektosymbiontische Bakterien entdeckt, die mit der Meiofauna vergesellschaftet sind (Powell et al., 1979; Vanreusel et al., 1997; Hentschel et al., 1999).

Alle diese Organismengruppen nehmen Sulfid aus dem Porenwasser auf. Die Pogonophoren sind zusätzlich in der Lage gelöstes Methan für die Versorgung ihrer endosymbiontischen Bakterien zu nutzen (Schmaljohann et al., 1990). Ein Teil des Sulfids wird aber auch ungenutzt von der benthischen Fauna in die bodennahe Wassersäule verfrachtet, da die vorhandene räumliche Distanz zwischen den Organismen, keine vollständige Aufnahme allen Sulfids erlaubt. Selbst wenn die Muscheldichten wie im Perugraben mit bis 1000 Individuen m⁻² sehr hoch sind, wird insgesamt gesehen doch nur 50% der Fläche durch Muscheln bedeckt (Olu et al., 1996a). Zudem konkurrieren verschiedene Organismengruppen innerhalb der Cold Seeps miteinander um den zur Verfügung stehenden Raum. So wurde in den Cold Seeps im Aleutengraben eine Sukzession von randständigen Pogonophoren und zentral siedelnden vesicomiden Muscheln beobachtet (Bohrmann et al., 1997; Suess et al., 1998). Ein ähnliches Bild zeigte der Greifer 330 TVG vor Makran. Die Pogonophoren siedelten in einem Abstand von ca. 1 m von den vesicomiden Muscheln. Die Würmer leben in einer dünnen chitinhaltigen Röhre und sind bis zu 40 cm tief im Sediment eingegraben (Southward & Dando, 1988; Gage & Tyler, 1991). Es wird angenommen, daß die Bioturbationsaktivitäten der umherkriechenden *Calyptogena* Muscheln die Pogonophoren beeinträchtigt. Selbst innerhalb der Gattung *Calyptogena* gibt es Standortpräferenzen. Vergleichende Untersuchungen an *Calyptogena pacifica* und *C. kilmeri* aus den Cold Seeps der Monterey Bucht zeigten, daß *C. kilmeri* an höhere Sulfidgehalte angepaßt ist als *C. pacifica* (Barry & Kochevar, 1998). Daher kann *C. kilmeri* dichter an den Fluidaustrittsstellen mit hohen Sulfidkonzentrationen siedeln als *C. pacifica* (Barry & Kochevar, 1998). Durch solche räumliche Sukzession verschiedener Arten und Tiergruppen wird das austretende Sulfid effektiver genutzt. Jedoch wird eine vollständige Nutzung des Sulfids durch benthische Organismen im Zusammenhang mit den vorliegenden Ergebnissen nicht angenommen.

Die Situation des Methanausstroms im nördlichen Arabischen Meer muß mit in Betracht gezogen werden, um auf den Transport von Sulfid aus dem Porenwasser in die Wassersäule zu schließen. In der Canyonstruktur vor Makran waren die bodennahen Methankonzentrationen 50fach höher als die Hintergrundkonzentrationen (Rad et al., 1998; Berner et al., in prep.). Das gelöste Methan im Porenwasser wird also nicht vollständig durch bakterielle Sulfatreduktion und direkte Aufnahme durch die Benthosorganismen aufgebraucht. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird diese unvollständige Nutzung des Methans durch die Benthosfauna ebenso für das gelöste Sulfid aus dem Porenwasser angenommen.

4.2 West-Java

4.2.1 Sulfidfluß

Während der Expedition SO-139 wurde das VESP-Gerät zur direkten Messung von Ausstromraten nicht eingesetzt. Die Neigung des Hanges vom 'Snail and Mussel Hill' wurde als zu groß eingeschätzt. Der Ventsampler wäre, wie zuvor der TV-Greifer 44, umgestürzt (siehe Kapitel 3.3.2).

Für eine quantitative Abschätzung der Fluidentwässerung am 'Snail and Mussel Hill' wurden die Daten der durchgeführten Wärmeflußmessungen herangezogen (Delisle & Zeibig in Beiersdorf et al., 1999). Die Stationen der Wärmeflußmessungen am 'Snail and Mussel Hill' lagen dicht bei den TV-Greifer-Stationen (Abbildung 35).

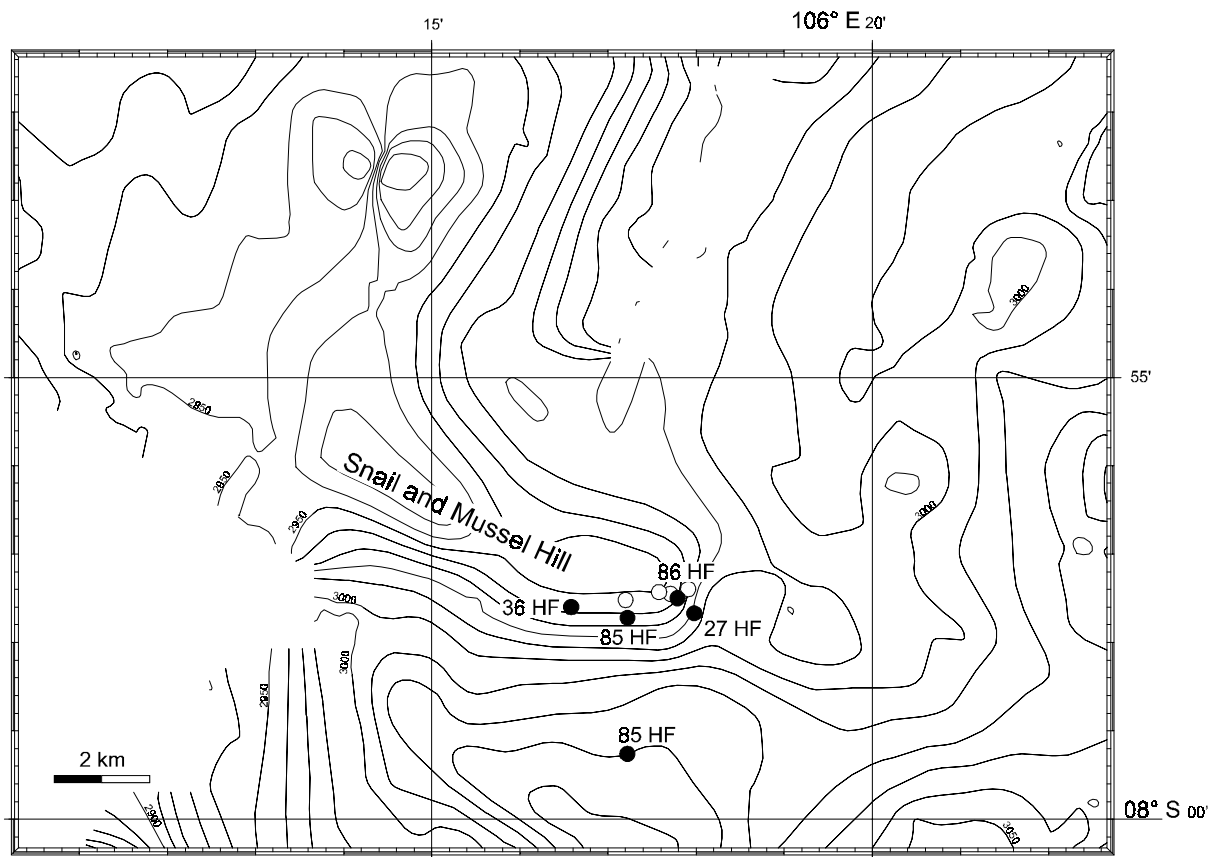


Abbildung 35: Stationskarte der Einsätze zur Wärmeflußmessung. Die ausgefüllten Kreise (●) kennzeichnen die Stationen der Wärmeflußmessungen (HF: **H**eat **F**low), die offenen Kreise (○) bezeichnen die TV-Greifer-Stationen aus Abbildung 18, Seite 56.

Das Gerät zur Wärmeflußmessung bestand aus einer 420 cm langen Lanze, die mit sechs Thermistoren im Abstand von 50 cm bestückt war. Die Lanze wurde in das Sediment gestochen, und anschließend wurde die Temperatur in den verschiedenen Sedimenttiefen gemessen.

Mit Hilfe des gemessenen Temperaturgradienten zusammen mit der Wärmeleitfähigkeit von Sediment und Porenwasser läßt sich der Wärmefluß berechnen (Eisbacher, 1991). Abweichungen des Wärmeflusses vom geothermischen Gradienten bilden die Grundlage für die quantitative Berechnung von Fluid-Entwässerungen. Für den 'Snail and Mussel Hill' wurde ein mathematisches Ausstrommodell an der BGR (**B**undesanstalt für **G**ewissenschaften und **R**ohstoffe) in Hannover berechnet. Für die südöstliche Flanke des 'Snail and Mussel Hill' errechnet das Modell einen Ausstrom von $0,28 \text{ dm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (pers. Mitteil. G. Delisle, BGR, Hannover).

Dieser Ausstrom ist keine direkte Messung an einer Lokalität, sondern beschreibt eher die Situation im Gebiet, das von den Stationen 27, 36, 85 und 86 HF (**H**eat **F**low) am 'Snail and Mussel Hill' eingeschlossen wird (Abbildung 35). Dieses Gebiet hat eine Größe von $2,2 \text{ km}^2$. Eine Abschätzung des Sulfidflusses J_{Sulfid} in dem Gebiet errechnet sich ebenfalls wie oben beschrieben nach der Gleichung 12. Für die Sulfidkonzentration bei der Berechnung des Flusses wurde der Maximalwert von $4000 \text{ }\mu\text{M}$ Sulfid der Stationen 44 und 91 TVG verwandt.

$$\begin{aligned} J_{\text{Sulfid}} [\mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}] &= \text{Ausstromrate} [\text{dm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}] \times \text{Konzentration} [\mu\text{mol dm}^{-3}] \\ &= 0,28 [\text{dm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}] \times 4000 [\mu\text{mol dm}^{-3}] \\ &= 1120 [\mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}] \end{aligned}$$

Der Fluß J_{Sulfid} am 'Snail and Mussel Hill' von $1120 \text{ }\mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ liegt in der Größenordnung wie der Sulfidfluß vor Makran, der einen Wert von $1524 \text{ }\mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ergab. Die niedrige Ausstromrate am 'Snail and Mussel Hill' wird rein rechnerisch durch die hohen Konzentrationen von Sulfid im Porenwasser kompensiert.

Die Beobachtungen mit den videogeführten Geräten zeigten vor West-Java aber eine andere Situation als vor Makran. An der Stirnseite des 'Snail and Mussel Hill' wurden dichte Kolonien von Pogonophoren beobachtet. Zwischen den Karbonatkrusten wurden auch immer wieder vereinzelte *Calyptogena* Kolonien entdeckt.

Am Barbados Akkretionskeil hatten Henry et al. (1992) ebenfalls Wärmestrommessungen für die Modellierung der Fluidentwässerung durchgeführt. Mit Hilfe eines bemannten Tauch-

bootes konnte sie die Meßsonde exakt in aktive Kolonien plazieren. Die Ausstromwerte lagen am Barbados Akkretionskeil im Bereich von $270 \text{ dm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, zeigten aber eine hohe Variabilität innerhalb weniger Meter (Henry et al., 1992).

4.2.2 Sulfidfluß im Vergleich zur Sulfidaufnahme

Im Forearc-Becken vor West-Java konnten keine lebenden *Calyptogena* Muscheln geborgen werden. Daher ist ein direkter Vergleich zwischen den vesicomymiden Muscheln und dem Sulfidfluß aus dem Porenwasser nicht möglich.

Die Berechnung des Sulfidflusses am 'Snail and Mussel Hill' bezieht sich auf eine $2,2 \text{ km}^2$ große Fläche. Die Videosequenzen der dicht über den Grund geschleppten Geräte zeigten in diesem Gebiet keine gleichförmige Verteilung von chemoautotrophen Muscheln, Pogonophoren und authigenen Karbonaten. Für eine Abschätzung der Individuendichten von vesicomymiden Muscheln wurde die Videosequenz des TV-Greifereinsatzes 43 TVG ausgewertet. Der Transekt dieses Einsatzes erstreckte sich über eine horizontale Distanz von 800 m und verlief vom Fuß der östlichen Flanke des 'Snail and Mussel Hill' in westlicher Richtung über die Stationen 91, 44 und 93 TVG bis an den Rand des Plateaus (vergleiche Abbildung 18, Seite 56). Der Greifer wurde schließlich auf einigen Karbonatkrusten und Kolonien von Pogonophoren abgesetzt. Auf dieser Station wurde kein Kern für die Porenwasseranalytik aus dem Greiferesediment gezogen. Während der Suche beobachtete die Videokamera des Greifers einen 2 m breiten Streifen auf der Sedimentoberfläche. Die gesamte beobachtete Fläche betrug folglich 1600 m^2 .

Die Videobeobachtungen zeigten einzelne konzentrierte Muschelnester, die um Fluidaustrittsstellen angesiedelt waren. Zwischen den Nestern wurden immer wieder leere Schalen und einzelne Kolonien von Pogonophoren beobachtet (Abbildung 36).

Die Individuendichte innerhalb der Nester lag bei sechs bis acht Muscheln. Die Nester bedeckten jeweils eine Fläche von rund $0,01 \text{ m}^2$. Die Gesamtindividuenzahl auf dem beobachteten Transekt lag bei 28 Muscheln. Die mittlere Muscheldichte auf der gesamten Transektfläche beträgt demnach $0,02 \text{ Ind. m}^{-2}$. Die Schalenlängen der beobachteten Muscheln wurden anhand der Videosequenzen mit 50 mm abgeschätzt. Eine Muschel der Gattung *Calyptogena pacifica* mit einer Schalenlänge von 50 mm weist ein Feuchtgewicht von ca. 3,6 g auf (vergleiche Tabelle 13, Seite 105). Unter der Annahme, daß die vesicomymiden Muscheln am 'Snail and Mussel Hill' das gleiche Verhältnis zwischen Schalenlänge und Feuchtgewicht auf-

weisen, ergibt sich eine mittlere Biomasse pro Quadratmeter von 0,06 g für die vesicomiden Muscheln. Legt man die Beziehung zwischen Feuchtgewicht und Sulfidaufnahme aus Tabelle 13 zugrunde, nehmen die Muscheln gemittelt über die beobachtete Fläche eine Sulfidmenge von $1,62 \times 0,06^{-0,63} = 9,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ auf. Diesem biologischen Sulfidbedarf steht ein geologisch-tektonisch angetriebener Sulfidfluß von $1120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ gegenüber.



Abbildung 36: Videobild von dunklen Karbonatkrusten (links) am 'Snail and Mussel Hill' im Forearc-Becken vor West-Java. Zentral ist das Vorlaufgewicht des Greifers und das Befestigungsseil zu erkennen. Die dunklen horizontal verlaufenden Streifen entstanden bei der Übertragung des Videobildes.

Der biologische Sulfidbedarf der vesicomiden Muscheln am 'Snail and Mussel Hill' ist sicherlich eine sehr konservative Abschätzung der tatsächlichen Situation. Die Videobeobachtungen zeigten, daß es am Hang und auf dem Plateau dichte Kolonien von Pogonophoren gab. Neben den endosymbiontischen gab es sicher auch freilebende chemoautotrophe Bakterien in den Sedimenten. Diese Organismengruppen nehmen Sulfid aus der Umgebung auf und setzen es in ihrem Metabolismus um (Schmaljohann et al., 1990; Buck & Barry, 1998; Nelson, 1998). Die Videobeobachtungen zeigte weiterhin, daß die Verteilung der seep-assoziierten Makrofauna auf Kolonien beschränkt ist. Es wird angenommen, daß es außerhalb der abgesuchten Sedimentbereiche am 'Snail and Mussel Hill' noch dichtere Cold Seep Lebensgemeinschaften gab. Eine systematische video- und fotounterstützte Kartierung der Erhebung im Forearc-Becken vor West-Java konnte im Rahmen der Expedition SO-139 nicht durchgeführt werden.

Die beobachteten bucciniden Gastropoden im Umfeld des 'Snail and Mussel Hill' stellen einen Hinweis auf größere Biomassevorkommen dar. Untersuchungen an anderen Cold Seeps zeigten, daß die Anwesenheit von großen Biomasseansammlungen in der Tiefsee solche, nicht obligat seep-assoziierte Fauna, anzieht (Juniper & Sibuet, 1987; Olu et al., 1997; Sahling, 1997). Beobachtungen an Cold Seeps in der Monterey- und Sagami-Bucht zeigten, daß die Gastropoden lebende und tote *Calyptogena*-Muscheln fressen (Hashimoto et al., 1989; Barry et al., 1996). Am 'Snail and Mussel Hill' wurden diese Schnecken so häufig angetroffen, daß sie namensgebend für den Hügel im Forearc-Becken vor West-Java verwandt wurden.



5 Zusammenfassung

Die Cold Seeps in den Subduktionszonen sind durch den Austritt von Fluiden charakterisiert, die an reduzierten chemischen Verbindungen wie Sulfid angereichert sind. In diesen Gebieten lebt die Muschel *Calyptogena pacifica* (Fam. Vesicomidae). Sie lebt mit sulfidreduzierenden Bakterien in ihrem Kiemengewebe in Symbiose. Für die Versorgung ihrer Symbionten nimmt sie Sulfid über das Fußgewebe auf und transportiert es in ihre Kiemen.

Für eine Quantifizierung der Sulfidaufnahme durch die Muschel wurde ein Chemostat aufgebaut. Er diente der Messung, Regelung und Registrierung der drei gelösten Komponenten Sulfid, Sauerstoff und pH-Wert innerhalb eines Versuchsaquariums. An zwei Muscheln aus den Cold Seeps aus dem Eel River Becken wurden Sulfidaufnahmeraten in Abhängigkeit von Schalenlänge und Feuchtgewicht bestimmt. Die erste *C. pacifica* mit 32 mm Schalenlänge und einem Feuchtgewicht von 0,7 g weist eine Sulfidaufnahme pro Gramm Feuchtgewicht von $2,03 \mu\text{mol g}^{-1} \text{d}^{-1}$ auf. Die zweite Muschel mit 40 mm Schalenlänge und 1,4 g Feuchtgewicht nimmt pro Gramm Feuchtgewicht $1,31 \mu\text{mol g}^{-1} \text{d}^{-1}$ Sulfid auf.

Im Akkretionskeil vor Makran (Pakistan) und im Forearc-Becken vor West-Java (Indonesien) wurden im Rahmen von Forschungs Expeditionen mit dem Forschungsschiff SONNE zwei neue Cold Seep Lebensgemeinschaften entdeckt und beprobt.

Am Makran Akkretionskeil bestätigten die visuellen Beobachtungen mit videogeführten Geräten die geochemischen Analysen des Porenwassers. Hier wurde ein schwacher Seep mit nur wenigen lebenden vesicomiden Muscheln entdeckt. Die maximale Sulfidkonzentration im TV-Greifer Sediment unter fünf lebenden *Calyptogena* Muscheln betrug $3 \mu\text{M}$. Es wurden keine authigenen Karbonate gefunden und die Porenwasserprofile gaben keine Hinweise auf eine Zersetzung von Gashydraten. Eine großräumige Verbreitung von leeren Muschelschalen auf dem Sediment und geomorphologische Indizien deuten auf aktive tektonische Prozesse hin, die zu einem Versiegen der meisten Seeps führten.

Im Forearc-Becken vor West Java wurde an einer Erhebung, die 'Snail and Mussel Hill' benannt wurde, ein aktives Seep Gebiet entdeckt. Die Erhebung ist von einer auffälligen Antiklinalstruktur unterlagert, die mit ihren Störungsstrukturen einen Fluidaustritt ermöglicht. Die Videobeobachtungen zeigten, daß die seep-assoziierte Fauna an der östlichen Flanke des 'Snail and Mussel Hill' konzentriert ist. Neben den vesicomiden Muscheln wurden zahlreiche

Pogonophoren auf der Sedimentoberfläche entdeckt. Die Sulfidgehalte im Porenwasser erreichten am Hang Werte von $>4000 \mu\text{M}$. Auf dem Hugelplateau wurden Werte um $1000 \mu\text{M}$ Sulfid im Porenwasser gemessen. Ausgedehnte Flächen von authigenen Karbonaten befanden sich zwischen den Kolonien. Die Profilverläufe im Porenwasser für gelöstes Kalzium, Magnesium und Strontium bestätigten die Bildung von Karbonatprazipitaten in den Seep Sedimenten. Eine geringe Verminderung der konservativen Bestandteile des Meerwassers wie Natrium, Chlorid und Bromid deuten auf sich zersetzende Gashydrate in größeren Sedimenttiefen hin. Die Profile im Porenwasser zeigten, daß die Zone der mikrobiellen Sulfatreduktion in Sedimenttiefen zwischen 15 und 30 cm lag.

Der nach oben gerichtete Sulfidfluß über die Sediment-Wasser-Grenzfläche wurde mit vorhandenen Daten berechnet. Vor Makran wurden direkte Messungen des Fluidausstroms herangezogen, vor West-Java wurden die Ergebnisse von Wärmestrommessungen verwandt.

In der Muschelkolonie vor Makran, die eine Fläche von $0,04 \text{ m}^2$ bedeckte, betrug der Sulfidfluß vom Sediment in das Bodenwasser $61 \mu\text{mol d}^{-1}$. Diesem Fluß stand eine Sulfidaufnahme der Muschelkolonie von $13,3 \mu\text{mol d}^{-1}$ gegenüber.

Der mittlere Sulfidfluß über eine Fläche von 2 km^2 betrug vor West-Java $1120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Da am 'Snail and Mussel Hill' keine lebenden vesicomyiden Muscheln mit dem TV-Greifer beprobt werden konnten, wurde die Sulfidaufnahme der Muscheln über die Auszählung eines 1600 m^2 großen Videotransektes abgeschätzt. Auf der gesamten Fläche wurde eine Sulfidaufnahme der Muscheln von $9,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ermittelt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß es eine Wechselbeziehung zwischen dem tektonisch-geologischen Sulfidfluß und der Sulfidaufnahme seep-assoziiierter vesicomyider Muscheln für einzelne Fluidaustrittsstellen gibt. Die Muschelkolonien um diese Austrittsstellen dienen als optischer Anzeiger. Eine systematische video- und fotounterstutzte Kartierung der Cold Seep Gebiete kann mit den geochemischen Stoffflüssen gekoppelt werden.

6 Literatur

- Aharon, P. (1994): Geology and biology of modern and ancient submarine hydrocarbon seeps and vents: an introduction. *Geo-Marine Letters* **14**, 69-73.
- Ahmed, S. S. (1969): Tertiary geology of part of south Makran, Baluchistan, West Pakistan. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists* **53** (7), 1480-1499.
- Anderson, A. E.; Childress, J. J. & Favuzzi, J. A. (1987): Net uptake of CO₂ driven by sulphide and thiosulphate oxidation in the bacterial symbiont-containing clam *Solemya reidi*. *The Journal of Experimental Zoology* **133**, 1-31.
- Anderson, A. E.; Felbeck, H. & Childress, J. J. (1990): Aerobic metabolism is maintained in animal tissue during rapid sulfide oxidation in the symbiont-containing clam *Solemya reidi*. *The Journal of Experimental Zoology* **256**, 130-134.
- Archer, D. E.; Emerson, S. & Reimers, C. (1989): Dissolution of calcite in deep-sea sediments: pH and O₂ microelectrode results. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **53**, 2831-2845.
- Archer, D. E. (1996a): An atlas of the distribution of calcium carbonate in sediments of the deep sea. *Global Biogeochemical Cycles* **10** (1), 159-174.
- Archer, D. E. (1996b): A data-driven model of the global calcite lysocline. *Global Biogeochemical Cycles* **10** (3), 511-526.
- Arp, A. J.; Childress, J. J. & Fisher, C. R., Jr. (1984): Metabolic and blood gas transport characteristics of the hydrothermal vent bivalve *Calyptogena magnifica*. *Physiological Zoology* **57** (6), 648-662.
- Baco, A. R.; Smith, C. R.; Peek, A. S.; Roderick, G. K. & Vrijenhoek, R. C. (1999): The phylogenetic relationships of whale-fall vesicomid clams based on mitochondrial COI DNA sequences. *Marine Ecology Progress Series* **182**, 137-147.
- Barry, J. P.; Greene, H. G.; Orange, D. L.; Baxter, C. H.; Robinson, B. H.; Kochevar, R. E.; Nybakken, J. W.; Reed, D. L. & McHugh, C. M. (1996): Biologic and geologic characteristics of cold seeps in Monterey Bay, California. *Deep-Sea Research* **43** (11-12), 1739-1762.
- Barry, J. P.; Kochevar, R. E. & Baxter, C. H. (1997): The influence of pore-water chemistry and physiology on the distribution of vesicomid clams at cold seeps in Monterey Bay: implications for patterns of chemosynthetic community organization. *Limnology and Oceanography* **42** (2), 318-328.
- Barry, J. P. & Kochevar, R. E. (1998): A tale of two clams: differing chemosynthetic life styles among vesicomids in Monterey Bay cold seeps. *Cahiers de Biologie Marine* **39**, 329-331.
- Barry, J. P.; Kochevar, R. E.; Orange, D. & Kahn, L. (submitted): *Calyptogena diagonalis*, a new vesicomid bivalve from subduction zone seeps in the eastern north Pacific. *Veliger*.
- Beck, M. E., Jr. (1983): On the mechanism of tectonic transport in zones of oblique subduction. *Tectonophysics* **93**, 1-11.
- Beiersdorf, H.; Andrulleit, H.; Bannert, B.; Burhanuddin, S.; Delisle, G.; Faber, E.; Harazim, B.; Hidayat, S.; Jürgens, U.; Koesnadi, H. S.; Lakoni, I.; Marchig, V.; Mirbach, N. v.; Permada, H.; Poggenburg, J.; Sahling, H.; Salahuddin, S. T.; Stahl, W.; Steinmann, D.; Triarso, E.; Udrek, W.; Weiss, W.; Wiedicke-Hombach, M. & Zeibig, M. (1999): RV Sonne Cruise Report SO 139. **118.878**, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

- Bennett, B. A.; Smith, C. R.; Glaser, B. & Maybaum, H. L. (1994): Faunal community structure of a chemoautotrophic assemblage on whale bones in the deep northeast Pacific Ocean. *Marine Ecology Progress Series* **108**, 205-223.
- Bernard, F. R. & Noakes, D. J. (1990): Pumping rates, water pressures, and oxygen use in eight species of marine bivalve molluscs from British Columbia. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **47**, 1302-1306.
- Berner, R. A. (1963): Electrode studies of hydrogen sulfide in marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **27**, 563-575.
- Berner, U.; Poggenburg, J.; Rad, U., von; Harazim, B.; Schulz, H.; Jennerjahn, T.; Dietrich, P.; Linke, P. & Mirbach, N., von. (in prep.): Origin of gaseous hydrocarbons in sediments and ocean waters of the NE Arabian Sea. *Marine Geology*.
- Bibow, N. & Hütten, E. (1999): Komex Cruise Reports: Komex I and II. **82**, GEOMAR, Kiel.
- Bitter, P. H., von; Scott, S. D. & Schenk, P. E. (1990): Early carboniferous low-temperature hydrothermal vent communities from Newfoundland. *Nature* **344**, 145-148.
- Bitter, P. H., von; Scott, S. D. & Schenk, P. E. (1992): Chemosynthesis: an alternate hypothesis for carboniferous biotas in bryozoan/microbial mounds, Newfoundland, Canada. *Palaios* **7**, 466-484.
- Bohrmann, G.; Suess, E.; Linke, P.; Sahling, H.; Greinert, J.; Dählmann, A.; Mirbach, N., von; Wallmann, K.; Zuleger, E.; Lammers, S.; Biebow, N. & Weinrebe, W. (1997): Aktive Fluidaustritte im Aleutengraben. *Geowissenschaften* **15** (6), 200-204.
- Bohrmann, G.; Greinert, J.; Suess, E. & Torres, M. (1998): Authigenic carbonates from the Cascadia subduction zone and their relation to gas hydrate stability. *Geology* **26** (7), 647-650.
- Borowski, W. S.; Paull, C. K. & Ussler, W., III. (1996): Marine pore-water sulfate profiles indicate in situ methane flux from underlying gas hydrate. *Geology* **24** (7), 655-658.
- Boulègue, J.; Benedetti, E. L.; Dron, D.; Mariotti, A. & Létolle, R. (1987): Geochemical and biogeochemical observations on the biological communities associated with fluid venting in Nankai Trough and Japan Trench subductions zones. *Earth and Planetary Science Letters* **83**, 343-355.
- Brooks, J. M.; Field, M. E. & Kennicutt II, M. C. (1991): Observation of gas hydrates in marine sediments, offshore northern California. *Marine Geology* **96**, 103-109.
- Buck, K. R. & Barry, J. P. (1998): Monterey Bay cold seep infauna: quantitative comparison of bacterial mat meiofauna with non-seep control sites. *Cahiers de Biologie Marine* **39**, 333-335.
- Burret, C. F. (1974): Plate tectonics and the fusion of Asia. *Earth and Planetary Science Letters* **21**, 181-189.
- Cadet, J. P.; Kobayashi, K.; Lallemand, S.; Jolivet, L.; Aubouin, J.; Boulègue, J.; Dubois, J.; Hotta, H.; Ishii, T.; Konishi, K.; Niitsuma, N. & Shimanmura, H. (1987): Deep scientific dives in the Japan and Kuril trenches. *Earth and Planetary Science Letters* **83**, 313-328.
- Campbell, K. A. & Bottjer, D. J. (1995): Brachiopods and chemosymbiotic bivalves in Phanerozoic hydrothermal vent and cold seep environments. *Geology* **23** (4), 321-324.
- Canfield, D. E. (1993): Organic matter oxidation in marine sediments. In *Interactions of C, N, P and S Biogeochemical cycles and global change*, Vol. NATO ASI Series, Ser. I, Vol. 4 (ed. Wollast, R.; Mackenzie, F. T. & Chou, L.), pp. 333-363. Springer Verlag.

-
- Carr, M. H.; Belton, M. J. S.; Chapman, C. R.; Davies, M. E.; Geissler, P.; Greenberg, R.; McEwen, A. S.; Tufts, B. R.; Greeley, R.; Sullivan, R.; Head, J. W.; Pappalardo, R. T.; Klaasen, K. P.; Johnson, T. V.; Kaufman, J.; Senske, D.; Moore, J.; Neukum, G.; Schubert, G.; Burns, J. A.; Thomas, P. & Veverka, J. (1998): Evidence for a subsurface ocean on Europa. *Nature* **391**, 363-365.
- Carson, B. & Screaton, E. J. (1998): Fluid flow in accretionary prisms: evidence for focused, time-variable discharge. *Reviews of Geophysics* **36** (3), 329-351.
- Cavagna, S.; Clari, P. & Martire, L. (1999): The role of bacteria in the formation of cold seep carbonates: geological evidence from Monferrato (Tertiary, NW Italy). *Sedimentary Geology* **126**, 253-270.
- Cavanaugh, C. M. (1980): Symbiosis of chemoautotrophic bacteria and marine invertebrates. *Biological bulletin of the Marine Biological Laboratory* **159**, 457.
- Chamot-Rooke, N. & Le Pichon, X. (1999): GPS determined eastward Sundaland motion with respect to Eurasia confirmed by earthquakes slip vectors at Sunda and Philippine trenches. *Earth and Planetary Science Letters* **173** (4), 439-455.
- Childress, J. J. & Mickel, T. J. (1982): Oxygen and sulfide consumption rates of the vent clam *Calyptogena pacifica*. *Marine Biology Letters* **3**, 73-79.
- Childress, J. J. & Mickel, T. J. (1985): Metabolic rates of animals from the hydrothermal vents and other deep-sea habitats. *Bulletin of the Biological Society of Washington* **6**, 249-260.
- Childress, J. J. (1988): Biology and chemistry of a deep-sea hydrothermal vent on the Galapagos Rift; the Rose Garden in 1985. Introduction. *Deep-Sea Research* **35** (10/11), 1677-1680.
- Childress, J. J.; Fisher, C. R.; Favuzzi, J. A. & Sanders, N. K. (1991): Sulfide and carbon dioxide uptake by the hydrothermal vent clam, *Calyptogena magnifica*, and its chemoautotrophic symbionts. *Physiological Zoology* **64** (6), 1444-1470.
- Childress, J. J. & Fisher, C. R. (1992): The biology of hydrothermal vent animals: physiology, biochemistry, and autotrophic symbioses. *Oceanographic Marine Biological Annual Review* **30**, 337-441.
- Childress, J. J.; Fisher, C. R.; Favuzzi, J. A.; Arp, A. J. & Oros, D. R. (1993): The role of a zinc-based, serum-borne sulphide-binding component in the uptake and transport of dissolved sulphide by the chemoautotrophic symbiont-containing clam *Calyptogena elongata*. *Journal of Experimental Biology* **179**, 131-158.
- Chun, C. (1900): *Aus den Tiefen des Weltmeeres*. Gustav Fischer Verlag, Jena.
- Cline, J. D. (1969): Spectrometric determination of hydrogen sulfide in natural waters. *Limnology and Oceanography* **14**, 454-458.
- Conway, N.; Capuzzo, J. M. & Fry, B. (1989): The role of endosymbiotic bacteria in the nutrition of *Solemya velum*: Evidence from a stable isotope analysis of endosymbionts and host. *Limnology and Oceanography* **34** (1), 249-255.
- Corliss, J. B.; Dymond, J.; Gordon, L. I.; Edmond, J. M.; Herzen, R. P., von; Ballard, R. D.; Green, K.; Williams, D.; Bainbridge, A.; Crane, K. & van Andel, T. H. (1979): Submarine thermal springs on the Galapagos Rift. *Science* **203**, 1073-1083.
- Corselli, C. & Basso, D. (1996): First evidence of benthic communities based on chemosynthesis on the Napoli mud volcano (eastern Mediterranean). *Marine Geology* **132** (1-4), 227-239.

- Craddock, C.; Hoeh, W. R.; Gustafson, R. G.; Lutz, R. A.; Hshimoto, J. & Vrijenhoek, R. J. (1995): Evolutionary relationships among deep-sea mytilids (*Bivalvia: Mytilidae*) from hydrothermal vents and cold-water methane/sulfide seeps. *Marine Biology* **121** (3), 477-487.
- Curray, J. R. (1989): The Sunda arc: a model for oblique plate convergence. *Netherlands Journal of Sea Research* **24** (2-3), 131-140.
- Dando, P. R. & Southward, A. J. (1986): Chemoautotrophy in bivalve molluscs of the genus *Thyasira*. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* **66**, 915-929.
- Dando, P. R.; Austen, M. C.; Burke, R. A.; Kendall, M. A.; Kennicutt II, M. C.; Judd, A. G.; Moore, D. C.; O'Hara, S. C. M.; Schmaljohann, R. & Southward, A. J. (1991): Ecology of a North Sea pockmark with an active methane seep. *Marine Ecology Progress Series* **70**, 49-63.
- Dando, P. R.; Bussmann, I.; Niven, S. J.; O'Hara, S. C. M.; Schmaljohann, R. & Taylor, L. J. (1994): A methane seep area in the Skagerrak, the habitat of the pogonophore *Siboglinum poseidoni* and the bivalve mollusc *Thyasira sarsi*. *Marine Ecology Progress Series* **107**, 157-167.
- Dia, A. N.; Aquilina, L.; Boulègue, J.; Bourgois, J.; Suess, E. & Torres, M. (1993): Origin of fluids and related barite deposits at vent sites along the Peru convergent margin. *Geology* **21**, 1099-1102.
- Diament, M.; Harjono, H.; Karta, K.; Deplus, C.; Dahrin, D.; Zen, M. T., Jr.; Gérard, M.; Lassal, O.; Martin, A. & Malod, J. (1992): Mentawai fault zone off Sumatra: a new key to the geodynamics of western Indonesia. *Geology* **20**, 259-262.
- Dickson, A. G. (1984): pH scales and proton-transfer reactions in saline media such as sea water. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **48**, 2299-2308.
- Dickson, A. G. (1993): pH buffers for sea water media based on the total hydrogen ion concentration scale. *Deep-Sea Research* **40** (1), 107-118.
- Dietrich, G.; Kalle, K.; Krauss, W. & Siedler, G. (1975): *Allgemeine Meereskunde - Eine Einführung in die Ozeanographie*. Gebrüder Bornträger, Berlin.
- Dymond, J.; Suess, E. & Lyle, M. (1992): Barium in deep-sea sediment: a geochemical proxy for paleoproductivity. *Paleoceanography* **7** (2), 163-181.
- Eisbacher, G. H. (1991): *Einführung in die Tektonik*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Elsgaard, L.; Isaksen, M. F.; Jørgensen, B. B.; Alayse, A.-M. & Jannasch, H. W. (1994): Microbial sulfate reduction in deep-sea sediments at the Guaymas Basin hydrothermal vent area: Influence of temperature and substrates. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **58** (16), 3335-3343.
- Embley, R. W.; Eitrem, S. L.; McHugh, C. H.; Normark, W. R.; Rau, G. H.; Hecker, B.; DeBevoise, A. E.; Greene, H. G.; Ryan, W. B. F.; Harrold, C. & Baxter, C. (1990): Geological setting of chemosynthetic communities in the Monterey Fan Valley system. *Deep-Sea Research* **37**, 1651-1667.
- Eriksen, N. T. & Iversen, J. J. L. (1997): On-line determination of respiration rates of aquatic organisms in a mono-phase oxystat at steady-state dissolved oxygen tensions. *Marine Biology* **128** (2), 181-189.
- Falkner, K. K.; Klinkhammer, G. P.; Bowers, T. S.; Todd, J. F.; Lewis, B. L.; Landing, W. M. & Edmond, J. M. (1993): The behavior of barium in anoxic marine waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **57**, 537-554.
- Faure, G. (1998): *Principles and applications of geochemistry*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

-
- Felbeck, H.; Childress, J. J. & Somero, G. N. (1981): Calvin-Benson cycle and sulphide oxidation enzymes in animals from sulphide-rich habitats. *Nature* **293**, 291-293.
- Felbeck, H. & Somero, G. N. (1982): Primary production in deep-sea hydrothermal vent organisms: roles of sulfide-oxidizing bacteria. *Trends in Biochemical Sciences* **7**, 201-204.
- Felbeck, H. (1983): Sulfide oxidation and carbon fixation by the gutless clam *Solemya reidi*: an animal-bacteria symbiosis. *Journal of Comparative Physiology B* **152**, 3-11.
- Felbeck, H.; Powell, M. A.; Hand, S. C. & Somero, G. N. (1985): Metabolic adaptations of hydrothermal vent animals. *The Biological Society of Washington* **6**, 261-272.
- Fenchel, T. M. & Riedl, R. J. (1970): The sulfide system: a new biotic community underneath the oxidized layer of marine sand bottoms. *Marine Biology* **7**, 255-268.
- Fiala-Médioni, A. & Métivier, C. (1986): Ultrastructure of the gill of the hydrothermal vent bivalve *Calymptogena magnifica*, with a discussion of its nutrition. *Marine Biology* **90**, 215-222.
- Fiala-Médioni, A. & Pennec, M. L. (1989): Adaptive features of the bivalve molluscs associated with fluid venting in the subduction zones off Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **71**, 161-167.
- Fiala-Médioni, A.; Sibuet, M.; Segonzac, M.; Bourgois, J. & Nautiperc cruise participants. (1992): Biological communities associated with cold vents in the Peru Trench. *EOS* **73**, 153.
- Fiala-Médioni, A.; Boulègue, J.; Ohta, S.; Felbeck, H. & Mariotti, A. (1993): Source of energy sustaining the *Calymptogena* populations from deep trenches in subduction zones off Japan. *Deep-Sea Research* **40**, 1241-1258.
- Field, M. E. & Kvenvolden, K. A. (1985): Gas hydrates on the northern California continental margin. *Geology* **13**, 517-520.
- Field, M. E. & Jennings, A. E. (1987): Seafloor gas seeps triggered by a northern California earthquake. *Marine Geology* **77**, 39-51.
- Fisher, C. R.; Childress, J. J.; Arp, A. J.; Brooks, J. M.; Distel, D.; Dugan, J. A.; Felbeck, H.; Fritz, L. W.; Hessler, R. R.; Johnson, K. S.; Kennicutt II, M. C.; Lutz, R. A.; Macko, S. A.; Newton, A.; Powell, M. A.; Somero, G. N. & Soto, T. (1988): Variation in the hydrothermal vent clam, *Calymptogena magnifica*, at the Rose Garden vent on the Galapagos spreading center. *Deep-Sea Research* **35** (10/11), 1811-1831.
- Fisher, C. R. (1990): Chemoautotrophic and methanotrophic symbioses in marine invertebrates. *Reviews in Aquatic Sciences* **2**, 399-436.
- Fisher, C. R. (1998): Temperature and sulphide tolerance of hydrothermal vent fauna. *Cahiers de Biologie Marine* **39**, 283-286.
- Flueh, E. R.; Kukowski, N. & Reichert, C. (1997): Cruise Report SO 123, Mamut. **62**, GEOMAR, Kiel.
- Flueh, E. R.; Schreckenberger, B. & Bialas, J. (1999): RV Sonne Cruise Report SO 138. **81**, GEOMAR, Kiel.
- Follum, O. A. & Gray, J. S. (1987): Nitrogenous excretion by the sediment-living bivalve *Nucula tenuis* from the Oslofjord, Norway. *Marine Biology* **96** (3), 355-358.
- Fowler, S. R.; White, R. S. & Loudon, K. E. (1985): Sediment dewatering in the Makran accretionary prism. *Earth and Planetary Science Letters* **75**, 427-438.

- Frenkiel, L.; Gros, O. & Mouëza, M. (1996): Gill structure in *Lucina pectinata* (Bivalvia: Lucinidae) with reference to hemoglobin in bivalves with symbiotic sulphur-oxidizing bacteria. *Marine Biology* **125** (3), 511-524.
- Frevert, T. & Galster, H. (1978): Schnelle und einfache Methode zur *in-situ*-Bestimmung von Schwefelwasserstoff in Gewässern und Sedimenten. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie* **40**, 199-208.
- Froelich, P. N.; Klinkhammer, G. P.; Bender, M. L.; Luedtke, N. A.; Heath, G. R.; Cullen, D.; Dauphin, P.; Hammond, D.; Hartman, B. & Maynard, V. (1979): Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **43**, 1075-1090.
- Fujikura, K.; Kojima, S.; Tamaki, K.; Maki, Y.; Hunt, J. & Okutani, T. (1999): The deepest chemosynthesis-based community yet discovered from the hadal zone, 7326 m deep, in the Japan Trench. *Marine Ecology Progress Series* **190**, 17-26.
- Gage, J. D. & Tyler, P. A. (1991): *Deep-Sea Biology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Gamenick, I.; Vismann, B.; Grieshaber, M. K. & Giere, O. (1998): Ecophysiological differentiation of *Capitella capitata* (Polychaeta). Sibling species from different sulfidic habitats. *Marine Ecology Progress Series* **175**, 155-166.
- Goedert, J. L. & Squires, R. L. (1990): Eocene deep-sea communities in localized limestones formed by subduction-related methane seeps, southwestern Washington. *Geology* **18**, 1182-1185.
- Goedert, J. L.; Squires, R. L. & Barnes, L. G. (1995): Paleocology of whale-fall habitats from deep-water Oligocene rocks, Olympic Peninsula, Washington state. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **118** (1-2), 151-158.
- Goffredi, S. K.; Childress, J. J.; Desaulniers, N. T. & Lallier, F. H. (1997): Sulfide acquisition by the vent worm *Riftia pachyptila* appears to be via uptake of HS⁻, rather than H₂S. *Journal of Experimental Biology* **200**, 2609-2616.
- Goffredi, S. K.; Childress, J. J.; Lallier, F. H. & Desaulniers, N. T. (1998): How to be the perfect host: CO₂ and HS⁻ accumulation and H⁺ elimination in the hydrothermal vent tube-worm *Riftia pachyptila*. *Cahiers de Biologie Marine* **39**, 297-300.
- Goyet, C.; Poisson, A.; Brunet, C. & Culkin, F. (1985): IAPSO Standard Seawater as a reference standard for alkalinity determinations. *Deep-Sea Research* **32** (11), 1437-1443.
- Grasshoff, K.; Ehrhardt, M. & Kremling, K. (1983): *Methods of seawater analysis*. Verlag Chemie, Weinheim.
- Green, N. L. & Harry, D. L. (1999): On the relationship between subducted slab age and arc basalt petrogenesis, Cascadia subduction system, North America. *Earth and Planetary Science Letters* **171**, 367-381.
- Grehan, A. J. & Juniper, S. K. (1996): Clam distribution and subsurface hydrothermal processes at Chowder Hill (Middle Valley), Juan de Fuca Ridge. *Marine Ecology Progress Series* **130**, 105-115.
- Greinert, J. (1998): *Rezente submarine Mineralbildungen. Abbild geochemischer Prozesse an aktiven Fluidaustrittsstellen im Aleuten- und Cascadia-Akkretionskomplex*. Dissertation, Christian Albrechts-Universität Kiel.
- Grieshaber, M. K. & Völkel, S. (1998): Animal adaptations for tolerance and exploitation of poisonous sulfide. *Annual Review of Physiology* **60**, 33-53.

-
- Gulick, S. P. S.; Meltzer, A. M. & Clarke, S. H., Jr. (1998): Seismic structure of the southern Cascadia subduction zone and accretionary prism north of the Mendocino triple junction. *Journal of Geophysical Research* **103** (B11), 27207-27222.
- Hagerman, L. & Vismann, B. (1993): Anaerobic metabolism, hypoxia and hydrogen sulphide in the brackish water isopod *Saduria entomon* (L.). *Ophelia* **38**, 1-11.
- Han, M. W. & Suess, E. (1989): Subduction-induced pore fluid venting and the formation of authigenic carbonates along the Cascadia continental margin: implications for the global Ca-cycle. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **71**, 97-118.
- Hashimoto, J.; Ohta, S.; Tanaka, T.; Hotta, H.; Matsuzawa, S. & Sakai, H. (1989): Deep-sea communities dominated by the giant clam, *Calyptogena soyoeae*, along the slope foot of Hatsushima Island, Sagami Bay, central Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **71**, 179-192.
- Hashimoto, J.; Ohta, S.; Fujikura, K.; Fujiwara, Y. & Sukizaki, S. (1995): Life habit of vesicomid clam, *Calyptogena soyoeae*, and hydrogen sulfide concentration in interstitial waters in Sagami Bay, Japan. *Journal of Oceanography* **51**, 341-350.
- Hauschild, K. & Grieshaber, M. K. (1997): Oxygen consumption and sulfide detoxification in the lugworm *Arenicola marina* (L.) at different ambient oxygen partial pressures and sulfide concentrations. *Journal of Comparative Physiology B* **167** (5), 378-388.
- Henry, P.; Foucher, J.-P.; Le Pichon, X.; Sibuet, M.; Kobayashi, K.; Tarits, P.; Chamot-Rooke, N.; Furuta, T. & Schultheiss, P. (1992): Interpretation of temperature measurements from the Kaiko-Nankai cruise: modeling of fluid flow in clam colonies. *Earth and Planetary Science Letters* **109**, 355-371.
- Hentschel, U.; Berger, E. C.; Bright, M.; Felbeck, H. & Ott, J. A. (1999): Metabolism of nitrogen and sulfur in ectosymbiotic bacteria of marine nematodes (Nematoda, Stilbonematinae). *Marine Ecology Progress Series* **183**, 149-158.
- Hesse, R. & Harrison, W. E. (1981): Gas hydrates (clathrates) causing pore-water freshening and oxygen isotope fractionation in deep-water sedimentary sections of terrigenous continental margins. *Earth and Planetary Science Letters* **55**, 453-462.
- Hessler, R. R.; Smithey, W. M., Jr. & Keller, C. H. (1985): Spatial and temporal variation of giant clams, tube worms and mussels at deep-sea hydrothermal vents. *Bulletin of the Biological Society of Washington* **6**, 411-428.
- Hinrichs, K.-U.; Hayes, J. M.; Sylva, S. P.; Brewer, P. G. & DeLong, E. F. (1999): Methane-consuming archaeobacteria in marine sediments. *Nature* **398**, 802-805.
- Hoehler, T. M.; Alperin, M. J.; Albert, D. B. & Martens, C. S. (1994): Field and laboratory studies of methane oxidation in an anoxic marine sediment: evidence for methanogen-sulfate reducer consortium. *Global Biogeochemical Cycles* **8** (4), 451-463.
- Holler, P. (1995): *Arbeitsmethoden der marinen Geowissenschaften*. Enke, Stuttgart.
- Huene, R., von & Scholl, D. W. (1991): Observations at convergent margins concerning sediment subduction, subduction erosion, and the growth of continental crust. *Reviews of Geophysics* **29** (3), 279-316.
- Hyndman, R. D. & Davis, E. E. (1992): A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom-simulating reflectors by vertical fluid expulsion. *Journal of Geophysical Research* **97** (B5), 7025-7041.

- Iversen, N. O. & Jørgensen, B. B. (1985): Anaerobic methane oxidation rates at the sulfate-methane transition in marine sediments from Kattegat and Skagerak (Denmark). *Limnology and Oceanography* **30** (5), 944-955.
- Izart, A.; Mustafa Kemal, B. & Malod, J. A. (1994): Seismic stratigraphy and subsidence evolution of the northwest Sumatra fore-arc basin. *Marine Geology* **122**, 109-124.
- Jahn, A.; Janas, U.; Theede, H. & Szaniawska, A. (1997): Significance of body size in sulphide detoxification in the Baltic clam *Macoma balthica* (Bivalvia, Tellinidae) in the Gulf of Gdansk. *Marine Ecology Progress Series* **154**, 175-183.
- Jahn, A. & Theede, H. (1997): Different degrees of tolerance to hydrogen sulphide in populations of *Macoma balthica* (Bivalvia, Tellinidae). *Marine Ecology Progress Series* **154**, 185-196.
- Jannasch, H. W. (1993): Die Mikroben der heißen Tiefseequellen. In *Extremophile: Mikroorganismen in ausgefallenen Lebensräumen* (ed. Hausmann, K. & Kremer, B. P.), pp. 69-86. VCH.
- Jensen, P.; Aagaard, I.; Burke, R. A.; Dando, P. R.; Jørgensen, N. O.; Kuijpers, A.; Laier, T.; O'Hara, S. C. M. & Schmaljohann, R. (1992): 'Bubbling reefs' in the Kattegat: submarine landscapes of carbonate-cemented rocks support a diverse ecosystem at methane seeps. *Marine Ecology Progress Series* **83**, 103-112.
- Johnson, K. S.; Beehler, C. L.; Sakamoto-Arnold, C. M. & Childress, J. J. (1986): *In situ* measurements of chemical distributions in a deep-sea hydrothermal vent field. *Science* **231**, 1139-1141.
- Johnson, K. S.; Childress, J. J.; Hessler, R. R.; Sakamoto-Arnold, C. M. & Beehler, C. L. (1988): Chemical and biological interactions in the Rose Garden hydrothermal vent field, Galápagos spreading center. *Deep-Sea Research* **35** (10/11), 1723-1744.
- Jollivet, D.; Faugeres, J.-C.; Griboulard, R.; Desbruyeres, D. & Blanc, G. (1990): Composition and spatial organization of a cold seep community on the South Barbados accretionary prism: tectonic, geochemical and sedimentary context. *Prog. Oceanog.* **24**, 25-45.
- Julian, D.; Wieting, S. L.; Seto, S. L.; Bogan, M. R. & Arp, A. J. (1999): Thiosulfate elimination and permeability in a sulfide-adapted marine invertebrate. *Physiological and Biochemical Zoology* **72** (4), 416-425.
- Juniper, K. J. & Sibuet, M. (1987): Cold seep benthic communities in Japan subduction zones: spatial organization, trophic strategies and evidence for temporal evolution. *Marine Ecology Progress Series* **40**, 115-126.
- Kahn, L. M.; Silver, E. A.; Orange, D.; Kochevar, R. & McAdoo, B. (1996): Surficial evidence of fluid expulsion from the Costa Rica accretionary prism. *Geophysical Research Letters* **23** (8), 887-890.
- Karig, D. E.; Suparka, S.; Moore, G. F. & Hehanussa, P. E. (1979): Structure and cenozoic evolution of the Sunda Arc in the central Sumatra region. In *Geological and geophysical investigations of continental margins*, Vol. 29 (ed. Watkins, J. S.; Montadert, L. & Wood Dickerson, P.), pp. 223-237. The American Association of Petroleum Geologists.
- Kastner, M.; Kvenvolden, K. A.; Whiticar, M. J.; Camerlenghi, A. & Lorenson, T. D. (1995): Relation between pore fluid chemistry and gas hydrates associated with bottom-simulating reflectors at the Cascadia margin, sites 889 and 892. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* **146**, 175-187.
- Kennicutt, M. C., II; Brooks, J. M.; Bidigare, R. R.; Fay, R. R.; Wade, T. L. & McDonald, T. J. (1985): Vent-type taxa in a hydrocarbon seep region on the Louisiana slope. *Nature* **317**, 351-353.

-
- Kennicutt, M. C., II; Brooks, J. M.; Bidigare, R. R.; McDonald, S. J.; Adkison, D. L. & Macko, S. A. (1989): An upper slope "cold" seep community: northern California. *Limnology and Oceanography* **34** (3), 635-640.
- Kennish, M. J. & Lutz, R. A. (1999): Calcium carbonate dissolution rates in deep-sea bivalve shells on the East Pacific Rise at 21°N: results of an 8-year in-situ experiment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **154** (4), 293-299.
- Khalil, A. M. (1994): Influence of starvation, body size and temperature on ammonia excretion in the marine bivalve *Tapes decussatus* (L.). *Aquaculture and Fisheries Management* **25** (8), 839-847.
- Kopp, C.; Fruehn, J.; Flueh, E. R.; Reichert, C.; Kukowski, N.; Bialas, J. & D., K. (submitted): Seismic wide-angle investigations of the Makran subduction zone. *Tectonophysics*.
- Koroleff, F. (1983): Determination of silicon. In *Methods of Seawater Analysis* (ed. Grasshoff, K.; Ehrhardt, M. & Kremling, K.), pp. 174-184. Verlag Chemie.
- 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.; Cocharane, G. R. & Scamman, R. L. (1986): Oregon subduction zone: venting, fauna and carbonates. *Science* **231**, 561-566.
- Kunze, U. R. (1986): *Grundlagen der quantitativen Analyse*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- Kusky, T. M. & Polat, A. (1999): Growth of granite-greenstone terranes at convergent margins, and stabilization of archaic cratons. *Tectonophysics* **305** (1-3), 43-73.
- Kvenvolden, K. A. (1988): Methane hydrate - a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chemical Geology* **71**, 41-51.
- Kvenvolden, K. A. (1993): A primer on gas hydrates. U.S. Geological Survey Professional Paper 1570, 279-291.
- Langseth, M. G. & Moore, J. C. (1990): Introduction to special section on the role of fluids in sediment accretion, deformation, diagenesis, and metamorphism in subduction zones. *Journal of Geophysical Research* **95** (B6), 8737-8741.
- Le Pichon, X.; Foucher, J. P.; Boulègue, J.; Henry, P.; Lallemand, S.; Benedetti, M.; Avedik, F. & Mariotti, A. (1990): Mud volcano field seaward of the Barbados accretionary complex: a submersible survey. *Journal of Geophysical Research* **95** (B6), 8931-8943.
- Libes, S. M. (1992): *An introduction to marine biogeochemistry*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Linke, P.; Suess, E.; Torres, M.; Martens, V.; Rugh, W. D.; Ziebis, W. & Kulm, L. D. (1994): *In situ* measurement of fluid flow from cold seeps at active continental margins. *Deep-Sea Research I* **41**, 721-739.
- Linke, P.; Suess, E.; Mirbach, N., von; Sahling, H.; Schmaljohann, R. & Berner, U. M. (in prep.): Fluid venting at the Makran accretionary wedge off Pakistan.
- Lonsdale, P. (1979): A deep-sea hydrothermal site on a strike-slip fault. *Nature* **281**, 531-534.
- Luther III, G. W.; Brendel, P. J.; Lewis, B. L.; Sundby, B.; Lucie, L.; Silverberg, N. & Nuzzio, D. B. (1998): Simultaneous measurement of O₂, Mn, Fe, I⁻ and S (-II) in marine pore waters with a solid-state voltammetric microelectrode. *Limnology and Oceanography* **43** (2), 325-333.
- MacKay, M. E.; Jarrard, R. D.; Westbrook, G. K.; Hyndman, R. D. & Shipboard scientific party of ODP Leg 146. (1994): Origin of bottom-sulphating reflectors: geophysical evidence from the Cascadia accretionary prism. *Geology* **22**, 459-462.

- Mahaut, M. L.; Sibuet, M. & Shirayama, Y. (1995): Weight-dependent respiration rates in deep-sea organisms. *Deep-Sea Research I* **42** (9), 1575-1582.
- Martens, C. S. & Klump, J. V. (1980): Biogeochemical cycling in an organic-rich coastal marine basin- I. Methane sediment-water exchange processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **44**, 471-490.
- Masuzawa, T.; Handa, N.; Kitagawa, H. & Kusakabe, M. (1992): Sulfate reduction using methane in sediments beneath a bathyal "cold seep" giant clam community off Hatsushima Island, Sagami Bay, Japan. *Earth and Planetary Science Letters* **110**, 39-50.
- Mayer, L. A.; Shor, A. N.; Hughes Clarke, J. & Piper, D. J. W. (1988): Dense biological communities at 3850 m on the Laurentian Fan and their relationship to the deposits of the 1929 Grand Banks earthquake. *Deep-Sea Research* **35** (8), 1235-1246.
- McCaffrey, R. (1991): Slip vectors and stretching of the Sumatran fore arc. *Geology* **19**, 881-884.
- McCaffrey, R. (1992): Oblique plate convergence, slip vectors, and forearc deformation. *Journal of Geophysical Research* **97** (B6), 8905-8915.
- McCrary, P. A. (1990): Neogene paleoceanographic events recorded in an active-margin setting: Humboldt basin, California. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **80**, 267-282.
- McCrary, P. A. (1995): Evolution of a trench-slope basin within the Cascadia subduction margin: the neogene Humboldt Basin, California. *Sedimentology* **42** (2), 223-247.
- Mickel, T. J. & Childress, J. J. (1982): Effects of temperature, pressure, and oxygen concentration on the oxygen consumption rate of the hydrothermal vent crab *Bythograea thermydron* (Brachyura). *Physiological Zoology* **55** (2), 199-207.
- Millero, F. J. (1986): The thermodynamics and kinetics of the hydrogen sulfide system in natural waters. *Marine Chemistry* **18**, 121-147.
- Millero, F. J.; Plese, T. & Fernandez, M. (1988): The dissociation of hydrogen sulfide in seawater. *Limnology and Oceanography* **33** (2), 269-274.
- Millero, F. J.; Zhang, J.-Z.; Fiol, S.; Sotolongo, S.; Roy, R. N.; Lee, K. & Mane, S. (1993): The use of buffers to measure the pH of seawater. *Marine Chemistry* **44**, 143-152.
- Minshull, T. A. & White, R. S. (1989): Sediment compaction and fluid migration in the Makran accretionary prism. *Journal of Geophysical Research* **94** (B6), 7387-7402.
- Minshull, T. A.; White, R. S.; Barton, P. J. & Collier, J. S. (1992): Deformation at plate boundaries around the Gulf of Oman. *Marine Geology* **104**, 265-277.
- Monaghan, E. J. & Ruttenger, K. C. (1999): Dissolved organic phosphorus in the coastal ocean: reassessment of available methods and seasonal phosphorus profiles from the Eel River Shelf. *Limnology and Oceanography* **44** (7), 1702-1714.
- Moritz, E.; Bornholdt, S.; Westphal, H. & Meschede, M. (2000): Neural network interpretation of LWD data (ODP Leg 170) confirms complete sediment subduction at the Costa Rica convergent margin. *Earth and Planetary Science Letters* **174** (3-4), 301-312.
- Mottl, M. J.; Holland, H. D. & Corr, R. F. (1979): Chemical exchange during hydrothermal alteration of basalt by seawater. II. Experimental results for Fe, Mn, and sulfur species. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **43**, 869-884.

-
- Nelson, D. C. & Hagen, K. D. (1995): Physiology and biochemistry of symbiotic and free-living chemoautotrophic sulfur bacteria. *American Zoologist* **35** (2), 91-101.
- Nelson, D. C. (1998): Recent progress in the microbiology of deep-sea hydrothermal vents and seeps. *Cahiers de Biologie Marine* **39**, 373-378.
- Nishimura, S. & Suparka, S. (1990): Tectonics of East Indonesia. *Tectonophysics* **181**, 257-266.
- Ohta, S. & Laubier, L. (1987): Deep biological communities in the subduction zone of Japan from bottom photographs taken during "nautilie" dives in the Kaiko project. *Earth and Planetary Science Letters* **83**, 329-342.
- Olu, K.; Duperret, A.; Sibuet, M.; Foucher, J.-P. & Fiala-Médioni, A. (1996a): Structure and distribution of cold seep communities along the Peruvian active margin: relationship to geological and fluid patterns. *Marine Ecology Progress Series* **132**, 109-125.
- Olu, K.; Sibuet, M.; Harmegnies, F.; Foucher, J.-P. & Fiala-Médioni, A. (1996b): Spatial distribution of diverse cold seep communities living on various diapiric structures of the southern Barbados prism. *Progress in Oceanography* **38**, 347-376.
- Olu, K.; Lance, S.; Sibuet, M.; Henry, P.; Fiala-Médioni, A. & Dinet, A. (1997): Cold seep communities as indicators of fluid expulsion patterns through mud volcanoes seaward of the Barbados accretionary prism. *Deep-Sea Research I* **44** (5), 811-841.
- Oppenheimer, D.; Beroza, G.; Carver, G.; Dengler, L.; Eaton, J.; Gee, L.; Gonzalez, F.; Jayko, A.; Li, W. H.; Lisowski, M.; Magee, M.; Marshall, G.; Murray, M.; McPherson, R.; Romanowicz, B.; Satake, K.; Simpson, R.; Somerville, P.; Stein, R. & Valentine, D. (1993): The Cape Mendocino, California, earthquakes of April 1992: subduction at the triple junction. *Science* **261**, 433-438.
- Orange, D. L. (1999): Tectonics, sedimentation, and erosion in northern California: submarine geomorphology and sediment preservation potential as a result of three competing processes. *Marine Geology* **154**, 369-382.
- Page, W. D.; Alt, J. N.; Cluff, L. S. & Plafker, G. (1979): Evidence for the recurrence of large-magnitude earthquakes along the Makran coast of Iran and Pakistan. *Tectonophysics* **52**, 533-547.
- Pappalardo, R. T.; Head, J. W.; Greeley, R.; Sullivan, R. J.; Pilcher, C.; Schubert, G.; Moore, W. B.; Carr, M. H.; Moore, J. M.; S., B. M. J. & Goldsby, D. L. (1998): Geological evidence for solid-state convection in Europa's ice shell. *Nature* **391**, 365-368.
- Paull, C. K.; Hecker, B.; Commeau, R.; Freeman-Lynde, R. P.; Neumann, C.; Corso, W. P.; Golubic, S.; Hook, J. E.; Sikes, E. & Curray, J. (1984): Biological communities at the Florida escarpment resemble hydrothermal vent taxa. *Science* **226**, 965-967.
- Paull, C. K.; Ussler III, W.; Borowski, W. S. & Spiess, F. N. (1995): Methane-rich plumes on the Carolina continental rise: associations with gas hydrates. *Geology* **23** (1), 89-92.
- Peckmann, J.; Thiel, V.; Michaelis, W.; Clari, P.; Gaillard, C.; Martire, L. & Reitner, J. (1999): Cold seep deposits of Beauvoisin (Oxfordian; southeastern France) and Marmorito (Miocene; northern Italy): microbially induced authigenic carbonates. *International Journal of Earth Sciences* **88**, 60-75.
- Peek, A. S.; Gustafson, R. G.; Lutz, R. A. & Vrijenhoek, R. C. (1997): Evolutionary relationships of deep-sea hydrothermal vent and cold-water seep clams (*Bivalvia*: *Vesicomysidae*): results from mitochondrial cytochrome oxidase subunit I. *Marine Biology* **130** (2), 151-161.
- Peiffer, S.; Peters, K. & Frevert, T. (1986): Ein neues vereinfachtes Eichverfahren der direktpotentiometrischen pH₂S-Meßkette. *GWF- Wasser/Abwasser* **127**, 31-32.

- Plähn, O.; Rhein, M.; Fine, R. A. & Sullivan, K. F. (1999): Pollutants from the Gulf war serve as water mass tracer in the Arabian Sea. *Geophysical Research Letters* **26** (1), 71-74.
- Platt, J. P.; Leggett, J. K.; Young, J.; Raza, H. & S., A. (1985): Large-scale sediment underplating in the Makran accretionary prism, southwest Pakistan. *Geology* **13**, 507-511.
- Powell, E. N.; Crenshaw, M. A. & Rieger, R. M. (1979): Adaptations to sulfide in the meiofauna of the sulfide system. I. ^{35}S -sulfide accumulation and the presence of a sulfide detoxification system. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **37**, 57-76.
- Powell, M. A. & Somero, G. N. (1985): Sulfide oxidation occurs in the animal tissue of the gutless clam, *Solemya reidi*. *Biological bulletin of the Marine Biological Laboratory* **169**, 164-181.
- Powell, M. A. & Somero, G. N. (1986): Adaptations to sulfide by hydrothermal vent animals: sites and mechanisms of detoxification and metabolism. *Biological bulletin of the Marine Biological Laboratory* **171**, 274-290.
- Powell, M. A. & Arp, A. J. (1989): Hydrogen sulfide oxidation by abundant nonhemoglobin heme compounds in marine invertebrates from sulfide-rich habitats. *The Journal of Experimental Zoology* **249**, 121-132.
- Press, F. & Siever, R. (1995): *Allgemeine Geologie*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Qasim, S. Z. (1982): Oceanography of the northern Arabian Sea. *Deep-Sea Research I* **29** (9A), 1041-1068.
- Quetin, L. B. & Childress, J. J. (1980): Observations on the swimming activity of two bathypelagic mysid species maintained at high hydrostatic pressures. *Deep-Sea Research A* **27**, 383-391.
- Rad, U., von; Schulz, H. & SONNE-90 scientific party. (1995): Sampling the oxygen minimum zone off Pakistan: glacial-interglacial variations of anoxia and productivity (preliminary results, Sonne 90 Cruise). *Marine Geology* **125** (1-2), 7-19.
- Rad, U., von; Rösch, H.; Berner, U.; Geyh, M.; Marchig, V. & Schulz, H. (1996): Authigenic carbonates derived from oxidized methane vented from the Makran accretionary prism off Pakistan. *Marine Geology* **136**, 55-77.
- Rad, U., von & Tahir, M. (1997): Late Quaternary sedimentation on the outer Indus shelf and slope (Pakistan): evidence from high-resolution seismic data and coring. *Marine Geology* **138** (3-4), 193-236.
- Rad, U., von; Dose, H. & SONNE 130 scientific party. (1998): The Makran accretionary wedge off Pakistan tectonic evolution and fluid migration (part 2). **117.368**, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Ravaut, P.; Bayer, R.; Hassani, R.; Rousset, D. & Al Yahya'ey, A. (1997): Structure and evolution of the northern Oman margin: gravity and seismic constraints over the Zagros-Makran-Oman collision zone. *Tectonophysics* **279** (1-4), 253-280.
- Rea, D. K. & Ruff, L. J. (1996): Composition and mass flux of sediment entering the world's subduction zones: Implications for global sediment budgets, great earthquakes, and volcanism. *Earth and Planetary Science Letters* **140** (1-4), 1-12.
- Reichert, C. & SONNE 137 scientific party. (1999): RV Sonne Cruise Report SO 137. **118.844**, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Reid, R. G. B. (1980): Aspects of the biology of a gutless species of *Solemya* (Bivalvia: Protobranchia). *Canadian Journal of Zoology* **58**, 386-393.

-
- Revsbech, N. P. & Ward, D. M. (1983): Oxygen microelectrode that is insensitive to medium chemical composition: use in an acid microbial mat dominated by *Cyanidium caldarium*. *Applied and Environmental Microbiology* **45** (3), 755-759.
- Revsbech, N. P. & Jørgensen, B. B. (1986): Microelectrodes: their use in microbial ecology. In *Advances in Microbial Ecology*, Vol. 9 (ed. Marshall, K. C.), pp. 293-352. Plenum Publishing Corporation.
- Revsbech, N. P. (1989): An oxygen microsensors with a guard cathode. *Limnology and Oceanography* **34** (2), 474-478.
- Revsbech, N. P.; Nielsen, L. P. & Ramsing, N. B. (1998): A novel microsensors for determination of apparent diffusivity in sediment. *Limnology and Oceanography* **43** (5), 986-992.
- Rickert, D. (1999): Dissolution kinetics of biogenic silica in marine sediments. Dissertation, Christian Albrechts-Universität Kiel.
- Rosman, I.; Boland, G. S. & Baker, J. S. (1987): Epifaunal aggregations of vesicomidae on the continental slope off Louisiana. *Deep-Sea Research I* **34** (11), 1811-1820.
- Sahling, H. (1997): Untersuchungen an cold seep assoziierten Organismen im NE-Pazifik. Diplomarbeit, Christian Albrechts Universität Kiel.
- Schmaljohann, R.; Faber, E.; Whiticar, M. J. & Dando, P. R. (1990): Co-existence of methane- and sulphur-based endosymbioses between bacteria and invertebrates at a site in the Skagerrak. *Marine Ecology Progress Series* **61**, 119-124.
- Scott, K. M. & Fisher, C. R. (1995): Physiological ecology of sulfide metabolism in hydrothermal vent and cold seep vesicomid clams and vestimentiferan tube worms. *American Zoologist* **35** (2), 102-111.
- Scranton, M. I. & Brewer, P. G. (1978): Consumption of dissolved methane in the deep ocean. *Limnology and Oceanography* **23** (6), 1207-1213.
- Shaw, T. J.; Moore, W. S.; Kloepfer, J. & Sochaski, M. A. (1998): The flux of barium to the coastal waters of the southeastern USA: The importance of submarine groundwater discharge. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **62** (18), 3047-3054.
- Sibuet, M.; Juniper, K. & Pautot, G. (1988): Cold-seep benthic communities in the Japan subduction zones: geological control of community development. *Journal of Marine Research* **46**, 333-348.
- Sibuet, M. & Olu, K. (1998): Biogeography, biodiversity and fluid dependence of deep-sea cold-seep communities at active and passive margins. *Deep-Sea Research II* **45**, 517-567.
- Smith, C. R. & Baco, A. R. (1998): Phylogenetic and functional affinities between whale-fall, seep and vent chemoautotrophic communities. *Cahiers de Biologie Marine* **39**, 345-346.
- Smith, C. R.; Maybaum, H. L.; Baco, A. R.; Pope, R. H.; Carpenter, S. D.; Yager, P. L.; Macko, S. A. & Deming, J. W. (1998): Sediment community structure around a whale skeleton in the deep Northeast Pacific: macrofaunal, microbial and bioturbation effects. *Deep-Sea Research II* **45**, 335-364.
- Solórzano, L. (1969): Determination of ammonia in natural waters by the phenolhypochlorite method. *Limnology and Oceanography* **14**, 799-801.
- Somero, G. N.; Childress, J. J. & Anderson, A. E. (1989): Transport, metabolism, and detoxification of hydrogen sulfide in animals from sulfide-rich marine environments. *Reviews in Aquatic Sciences* **1** (4), 591-614.

- Southward, A. J.; Southward, E. C.; Dando, P. R.; Rau, G. H.; Felbeck, H. & Flügel, H. (1981): Bacterial symbionts and low $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in tissues of Pogonophora indicate unusual nutrition and metabolism. *Nature* **293**, 616-620.
- Southward, A. J. & Dando, P. R. (1988): Distribution of Pogonophora in Canyons of the Bay of Biscay: Factors controlling abundance and depth range. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* **68**, 627-638.
- Spiess, F. N.; Macdonald, K. C.; Atwater, T.; Ballard, R.; Carranza, A.; Cordoba, D.; Cox, C.; Diaz Garcia, V. M.; Francheteau, J.; Guerrero, J.; Hawkins, J.; Haymon, R.; Hessler, R.; Juteau, T.; Kastner, M.; Larson, R.; Luyendyk, B.; Macdougall, J. D.; Miller, S.; Normark, W.; Orcutt, J. & Rangin, C. (1980): East Pacific Rise: hot springs and geophysical experiments. *Nature* **207**, 1421-1433.
- Stakes, D. S.; Orange, D.; Paduan, J. B.; Salamy, K. A. & Maher, N. (1999): Cold-seeps and authigenic carbonate formation in Monterey Bay, California. *Marine Geology* **159** (1-4), 93-109.
- Stephenson, E. L.; Maltman, A. J. & Knipe, R. J. (1994): Fluid flow in actively deforming sediments: 'dynamic permeability' in accretionary prisms. In *Geofluids: origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins*, Vol. 78 (ed. Parnell, J.), pp. 113-125. The Geological Society.
- Stuardo, J. & Valdovinos, C. (1988): A new bathyal *Calyptogena* from off the coast of central Chile (Bivalvia: Vesicomidae). *Venus* **47**, 241-250.
- Stumm, W. & Morgan, J. J. (1996): *Aquatic Chemistry*. Wiley, New York.
- Suess, E.; Carson, B.; Ritger, S. D.; Moore, J. C.; Jones, M. L.; D., K. L. & Cochrane, G. R. (1985): Biological communities at vent sites along the subduction zone off Oregon. *Bulletin of the Biological Society of Washington* **6**, 475-484.
- Suess, E. & Whitticar, M. J. (1989): Methane-derived CO_2 in pore fluids expelled from the Oregon subduction zone. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **71**, 119-136.
- Suess, E.; Bohrmann, G.; Huene, R., von; Linke, P.; Wallmann, K.; Lammers, S.; Sahling, H.; Winckler, G.; Lutz, R. A. & Orange, D. (1998): Fluid venting in the eastern Aleutian subduction zone. *Journal of Geophysical Research* **103** (B2), 2597-2614.
- Suess, E.; Torres, M.; Bohrmann, G.; Coller, 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 Planetary Science Letters* **170**, 1-15.
- Sullivan, R.; Greeley, R.; Homan, K.; Klemaszewski, J.; S., B. M. J.; Carr, M., H.; Chapman, C. R.; Tufts, R.; Head III, J. W.; Pappalardo, R.; Moore, J.; Thomas, P. & the Galileo Imaging Team. (1998): Episodic plate separation and fracture infill on the surface of Europa. *Nature* **391**, 371-373.
- Suthhof, A.; Jennerjahn, T. C.; Schäfer, P. & Ittekkot, V. (2000): Nature of organic matter in surface sediments from the Pakistan continental margin and the deep Arabian Sea: amino acids. *Deep-Sea Research II* **47** (1-2), 329-351.
- Terwilliger, R. C.; Terwilliger, N. B. & Arp, A. (1983): Thermal vent clam (*Calyptogena magnifica*) hemoglobin. *Science* **219**, 981-983.
- Torres, M. E.; Bohrmann, G. & Suess, E. (1996a): Authigenic barites and fluxes of barium associated with fluid seeps in the Peru subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters* **144**, 469-481.

-
- Torres, M. E.; Brumsack, H. J.; Bohrmann, G. & Emeis, K. C. (1996b): Barite fronts in continental margin sediments: a new look at barium remobilization in the zone of sulfate reduction and formation of heavy barites in diagenetic fronts. *Chemical Geology* **127**, 125-139.
- Tunnicliffe, V.; Juniper, S. K. & de Burgh, M. E. (1985): The hydrothermal vent community on Axial Seamount, Juan de Fuca Ridge. *Bulletin of the Biological Society of Washington* **6**, 453-467.
- Tyler, P. A. & Young, C. M. (1999): Reproduction and dispersal at vents and cold seeps. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* **79**, 193-208.
- van Loon, J. C. & Barefoot, R. R. (1989): Analytical methods for geochemical exploration. Academic Press, Inc., San Diego.
- Vanreusel, A.; van den Bossche, I. & Thiermann, F. (1997): Free-living marine nematodes from hydrothermal sediments: similarities with communities from diverse reduced habitats. *Marine Ecology Progress Series* **157**, 207-219.
- Vetter, R. D. (1985): Elemental sulfur in the gills of three species of clams containing chemoautotrophic symbiotic bacteria: a possible inorganic energy storage compound. *Marine Biology* **88**, 33-42.
- Vismann, B. (1990a): Field measurements of filtration and respiration rates in *Mytilus edulis* L. an assessment of methods. *Sarsia* **75** (3), 213-216.
- Vismann, B. (1990b): Sulfide detoxification and tolerance in *Nereis* (Hediste) *diversicolor* and *Nereis* (Neanthes) *virens* (Annelida: Polychaeta). *Marine Ecology Progress Series* **59**, 229-238.
- Vismann, B. (1991a): Physiology of sulfide detoxification in the isopod *Saduria* (Mesidotea) *entomon*. *Marine Ecology Progress Series* **76**, 283-293.
- Vismann, B. (1991b): Sulfide tolerance: physiological mechanisms and ecological implications. *Ophelia* **34**, 1-27.
- Vismann, B. (1993): Hematin and sulfide removal in hemolymph of the hemoglobin-containing bivalve *Scapharca inaequivalvis*. *Marine Ecology Progress Series* **98**, 115-122.
- Vismann, B. (1996a): Sulfide exposure experiments: The sulfide electrode and a set-up automatically controlling sulfide, oxygen and pH. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **204**, 131-140.
- Vismann, B. (1996b): Sulfide species and total sulfide toxicity in the shrimp *Crangon crangon*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **204**, 141-154.
- Vistisen, B. & Vismann, B. (1997): Tolerance to low oxygen and sulfide in *Amphiura filiformis* and *Ophiura albida* (Echinodermata: Ophiuroidea). *Marine Biology* **128** (2), 241-246.
- Vrijenhoek, R. C.; Schutz, S. J.; Gustafson, R. G. & Lutz, R. A. (1994): Cryptic species of deep-sea clams (Mollusca: Bivalvia: Vesicomidae) from hydrothermal vent and cold-water seep environments. *Deep-Sea Research I* **41** (8), 1171-1189.
- Wallmann, K.; Linke, P.; Suess, E.; Bohrmann, G.; Sahling, H.; Schlüter, M.; Dählmann, A.; Lammer, S.; Greinert, J. & Mirbach, N., von. (1997): Quantifying fluid flow, solute mixing, and biogeochemical turnover at cold vents of the eastern Aleutian subduction zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **61** (24), 5209-5219.
- Weiss, R. F. (1970): The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. *Deep-Sea Research* **17**, 721-735.

- White, R. S. (1977): Seismic bright spots in the Gulf of Oman. *Earth and Planetary Science Letters* **37**, 29-37.
- White, R. S. (1979): Gas hydrate layers trapping free gas in the Gulf of Oman. *Earth and Planetary Science Letters* **42**, 114-120.
- White, R. S. & Loudon, K. E. (1983): The Makran continental margin: structure of a thickly sedimented convergent plate boundary. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists* **34**, 499-518.
- Whiticar, M. J.; Faber, E. & Schoell, M. (1986): Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO₂ reduction vs. Acetate fermentation - Isotope evidence. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **50**, 693-709.
- Wilson, D. S. (1993): Confidence intervals for motion and deformation of the Juan de Fuca Plate. *Journal of Geophysical Research* **98** (B9), 16053-16071.
- Winkler, L. W. (1888): Die Bestimmung des im Wasser gelösten Sauerstoffes. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft* **21**, 2843-2855.
- Wright, J. & Colling, A. (1995): *Seawater: its composition, properties and behaviour*. Pergamon, Walton Hall.
- Wyrтки, K. (1973): Physical Oceanography of the Indian Ocean. In *The Biology of the Indian Ocean* (ed. Zeitzschel, B.), pp. 18-36. Springer Verlag.
- Yun, J. W.; Orange, D. L. & Field, M. E. (1999): Subsurface gas offshore of northern California and its link to submarine geomorphology. *Marine Geology* **154**, 357-368.
- Zatsepina, O. Y. & Buffett, B. A. (1998): Thermodynamic conditions for the stability of gas hydrate in the seafloor. *Journal of Geophysical Research* **103** (B10), 24127-24139.
- Zonenshayn, L. P.; Murdmaa, I. O.; Baranov, B. V.; Kuznetsov, A. P.; Kuzin, V. S.; Kuz'min, M. I.; Avdeyko, G. P.; Stunzhas, P. A.; Lukashin, V. N.; Barash, M. S.; Valyashko, G. M. & Demina, L. L. (1987): An underwater gas source in the Sea of Okhotsk west of Paramushir Island. *Oceanology* **27** (5), 598-602.

Danksagung

- * Prof. Dr. Gerhard Graf (Uni Rostock) danke ich für das Vertrauen und die Freiheit, die er mir bei der Anfertigung meiner Dissertation ließ
- * Dr. Peter Linke (GEOMAR Kiel) danke ich für sein erfolgreiches Bemühen um nahtlose Projektanschlüsse
- * Dr. Lisa A. Levin (Scripps Institution of Oceanography) lud mich auf die Expedition zum Eel River Seep ein
- * Dr. Klaus Wallmann (GEOMAR Kiel) beriet mich in allen geochemischen Belangen
- * Thomas Viergutz (Kiel) verdanke ich einige Einsichten in den Aufbau von elektronischen Schaltungen
- * Bettina Domeyer, Anke Bleyer und Regina Surberg (alle GEOMAR Kiel) unterstützen mich vielfältig in Logistik und Analytik am Forschungszentrum
- * Heiko Sahling (GEOMAR Kiel) übernahm den zuvor genannten Part auf der Expedition vor der Küste Indonesiens
- * das Team in Geb. 15 half bei all den kleinen und größeren auftretenden Problemen
- * meine Familie: Ina und Anton Bräuer danke ich für die Unterstützung in den up's and down's, die eine Arbeit so mit sich bringt.