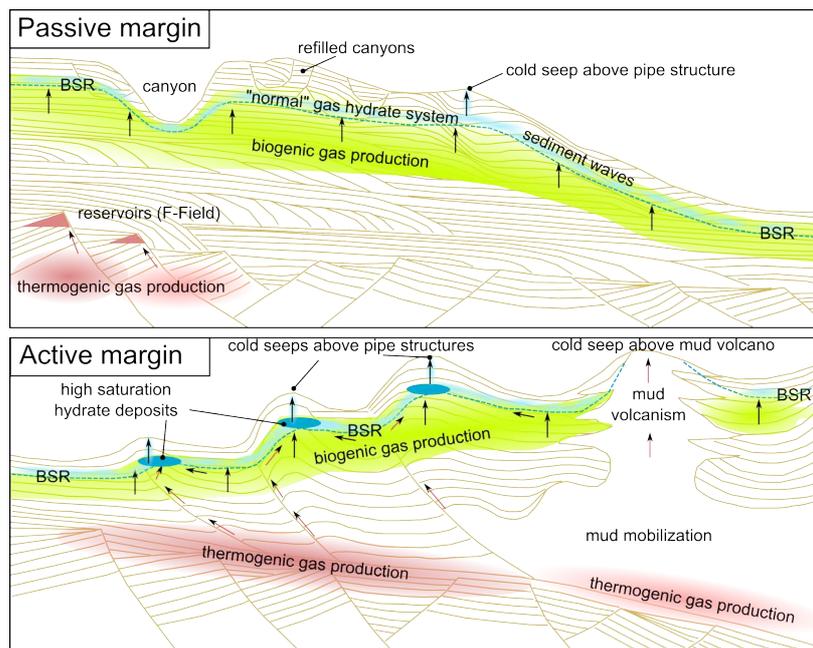


Abschlussbericht

SO-227 TAIFLUX

Fluid and gas hydrate dynamics off SW Taiwan



Förderkennzeichen: 03G0227A

Berichtszeitraum: 01.2.2013 – 30.04.2015

Abschlussbericht des Vorhabens 03G0226A „CHRIMP“

Zuwendungsempfänger:	GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel Wischhofstr. 1-3 24148 Kiel
Förderkennzeichen:	03G0227A
Projektleiter:	Prof. Dr. Christian Berndt (GEOMAR)
Vorhabenbezeichnung:	SO-227 TAIFLUX
Laufzeit des Vorhabens:	01.2.2013 bis 30.04.2015
Berichtszeitraum:	01.2.2013 bis 30.04.2015

1. *Kurze Darstellung der*

1.1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel des Projektes war die Untersuchung des tektonischen Einflusses auf Gashydratsysteme. Im Einzelnen sollte herausgefunden werden, welche geologischen Einflussfaktoren die Gashydratentstehung und Auflösung beeinflussen und welchen Effekt diese Faktoren auf die Konzentration von Gashydraten in den Sedimenten haben. Hierzu wurde das Seegebiet südwestlich von Taiwan gewählt, da es geologisch in sofern einzigartig ist, als es ein Gashydratsystem besitzt, das sich durchgehend vom passiven zum aktiven Kontinentalrand erstreckt. Da alle anderen Randbedingungen konstant bleiben, lässt sich hier der Einfluss der unterschiedlichen tektonischen Strukturen besonders gut untersuchen. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Herausarbeitung der Rolle von Aufschiebungen am aktiven Kontinentalrand und auf dem Einfluss von Canyonerosion auf die Gashydratstabilität am passiven Kontinentalrand. Des Weiteren haben wir den Einfluss von lithologischen Änderungen näher in Augenschein genommen. Ursprünglich war auch beabsichtigt, die Rolle von Temperatur und Druckänderungen auf die Gashydrate am oberen Kontinentalrand zu untersuchen. Diese Thematik musste jedoch wegen schlechten Wetters während der Forschungsfahrt zurückgestellt werden. Das Hauptergebnis des Projektes ist, dass die tektonischen Strukturen am aktiven Kontinentalrand zu deutlich erhöhten Gashydratsättigungen führen und dass die Antiklinalstrukturen in Akkretionskeilen höffiger sind als der passive Kontinentalrand. Ein Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Gashydratprovinzen legt nahe, dass dies ein globales Phänomen ist.

1.1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit mit Kollegen aus Taiwan durchgeführt. Seit 2007 finden jährliche Treffen von Forschern aus Deutschland und Taiwan zum Thema Gashydratforschung statt. Aufgrund dieses Austausches wurde beschlossen, ein gemeinsames Forschungsprogramm zu initiieren, das auf deutscher Seite durch das vorliegende Projekt verwirklicht wurde, während auf taiwanesischer Seite ein ähnliches Projekt durch das Ministerium für Wissenschaft und Technologie gefördert wird. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit wurden insgesamt vier Forschungsfahrten (eine auf FS Sonne, zwei auf FS Ocean Researcher V und eine auf FS Ocean Researcher I) durchgeführt. Eine weitere Fahrt auf FS Ocean Researcher I ist für Sommer

2016 geplant. Eine der Zielsetzungen des Projektes war die Erkundung einer geeigneten Bohrlokation für einen Gashydratproduktionstest im Rahmen des SUGAR Projektes.

1.1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der vorgelegte Zeitplan wurde eingehalten.

1.1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Gashydrate sind eisähnliche Verbindungen, die Gasmoleküle unter niedriger Temperatur und Hochdruck einbinden, Bedingungen die typischerweise in marinen Sedimenten erfüllt werden. Sie sind für den globalen Kohlenstoffkreislauf bedeutend, da in ihnen zwischen 500 und 4500 Gt Kohlenstoff (Milkov, 2004, Archer und Buffet, 2005) gebunden sind. Im Vergleich enthält die heutige Atmosphäre etwa 700 Gt. Einige Länder wie Japan, Indien und Taiwan betrachten Methanhydrate als zukünftige Energiequelle. Es gibt aber auch große Besorgnis, dass sich Treibhausgase unbeabsichtigt freisetzen könnten, falls die globale Erderwärmung weiter voranschreitet (Kennett et al., 2003; Berndt, 2005, Westbrook et al., 2009, Berndt et al., 2014). Deshalb ist ein Grundverständnis der geologischen Prozesse, die die Bildung und Rückbildung von Gashydraten kontrollieren, besonders wichtig. Offene Fragen sind dabei der Einfluss der Lithologie auf die Gashydratbildungs- und Auflösungsrate und die Rolle von geologischen Strukturen für die Gasmobilität (Haacke et al., 2008). Ein anderes wichtiges Feld ist die Bildung von Zonen freien Gases unter den Gashydraten. In Abhängigkeit von den Gasadvektionsraten, den chemischen Eigenschaften des Porenwassers und der Permeabilität der Sedimente scheint es ein Kontinuum von löslichkeitsdominierten (Haacke et al., 2007; 2008) Gaszonen bis hin zu überdruckdominierten (Liu and Flemings, 2007) Gaszonen zu geben. Fortschritte im Verständnis und bei der geophysikalischen und geochemischen Charakterisierung dieser Situationen sind wichtig um vorherzusagen, wo sich Gashydrate bilden können und wie Gas durch die Gashydratstabilitätszone migrieren kann. Die Hypothesen hierzu reichen von „trockenen Wegsamkeiten“ (wasserfreie Zonen) bis hin zu episodischer Sprengung durch „hydraulisches Fracturing“ (Ginsburg und Soloviev, 1997; Wood et al. 2002; Liu and Flemings 2007).

Aufgrund ihrer weiten Verbreitung und wegen der großen Menge des in ihnen enthaltenen Kohlenstoffes sind Gashydrate eine potentiell ertragreiche fossile Energiequelle. Ihr möglicher Nutzen hängt jedoch davon ab, ob die Gashydrate in ausreichender Konzentration und in permeablen Gesteinen vorkommen (Milkov und Sassen 2002; Johnson und Max, 2006). Auf der Skala der Porengröße können Gashydrate sehr unterschiedlich in die Sedimente eingebunden sein – entweder im Porenraum oder als Zement um die Sedimentkörner herum (z.B. Winters et al., 2004). Es existieren verschiedene Modelle um die Gashydratkonzentration aus den gemessenen seismischen Geschwindigkeiten abzuleiten. Während einige auf Gesteinsphysik beruhen, basieren andere auf empirischen Messungen (Lee et al., 1996; Ecker et al., 1998; Carcione und Tinivella 2000; Jakobsen et al. 2000). Da sie aber alle stark von den Sedimenteigenschaften wie Porosität und Tongehalt abhängen, sind sie bislang nur von begrenztem Nutzen (Chand et al., 2004). Auch im größeren Maßstab können Gashydrate sehr heterogen im Sediment verteilt sein, z.B. als konzentrierte Ablagerungen in Klüften oder als massive Schichten dicht an der Oberfläche (Abegg et al., 2007; Long et al., 2009). Bisherige Bohrkampagnen auf dem Blake Rücken (ODP-Leg 164), auf dem südlichen Hydratrücken (ODP-204) sowie im Bereich der nördlichen Cascadien-Subduktionszone (IODP-311) haben im marinen Bereich sehr unterschiedliche Ergebnisse gebracht. In Sedimenten des Blake Rückens, einem passiven Kontinentalrand sind Gashydrate im unteren Bereich der Gashydratsstabilitätszone meist homogen mit Sättigungen zwischen 4 und 8 % verteilt und nur in ganz wenigen Ausnahmen sind Gehalte über 10 % vorhanden (Paull et al. 1998). Auf dem Hydratrücken, einem Akkretionsrücken, sind Gashydrate in sehr unterschiedlichen Stockwerken angeordnet und können im oberflächennahen Seep-Bereichen (< 40 m Sedimenttiefe) massive Gashydratlagen (Gashydratkonzentration = 30-40 %) bilden, die meist schichtparallel angeordnet sind (Bohrmann und Torres 2006). In tieferen Sedimentschichten sind Gashydrate in den sehr feinkörnigen Sedimenten vor allem als Kluffüllungen nachgewiesen worden (Abegg et al, 2007). Außerhalb der Seepregionen konnten Gashydratanreicherungen auf dem Hydratrücken vor allem im Bereich von strukturellen Antiklinalen und in lokalen Beckenstrukturen mit entsprechend hohem Anteil an Gasmigration aus dem Untergrund nachgewiesen werden (Tréhu et al, 2004). Im Bereich

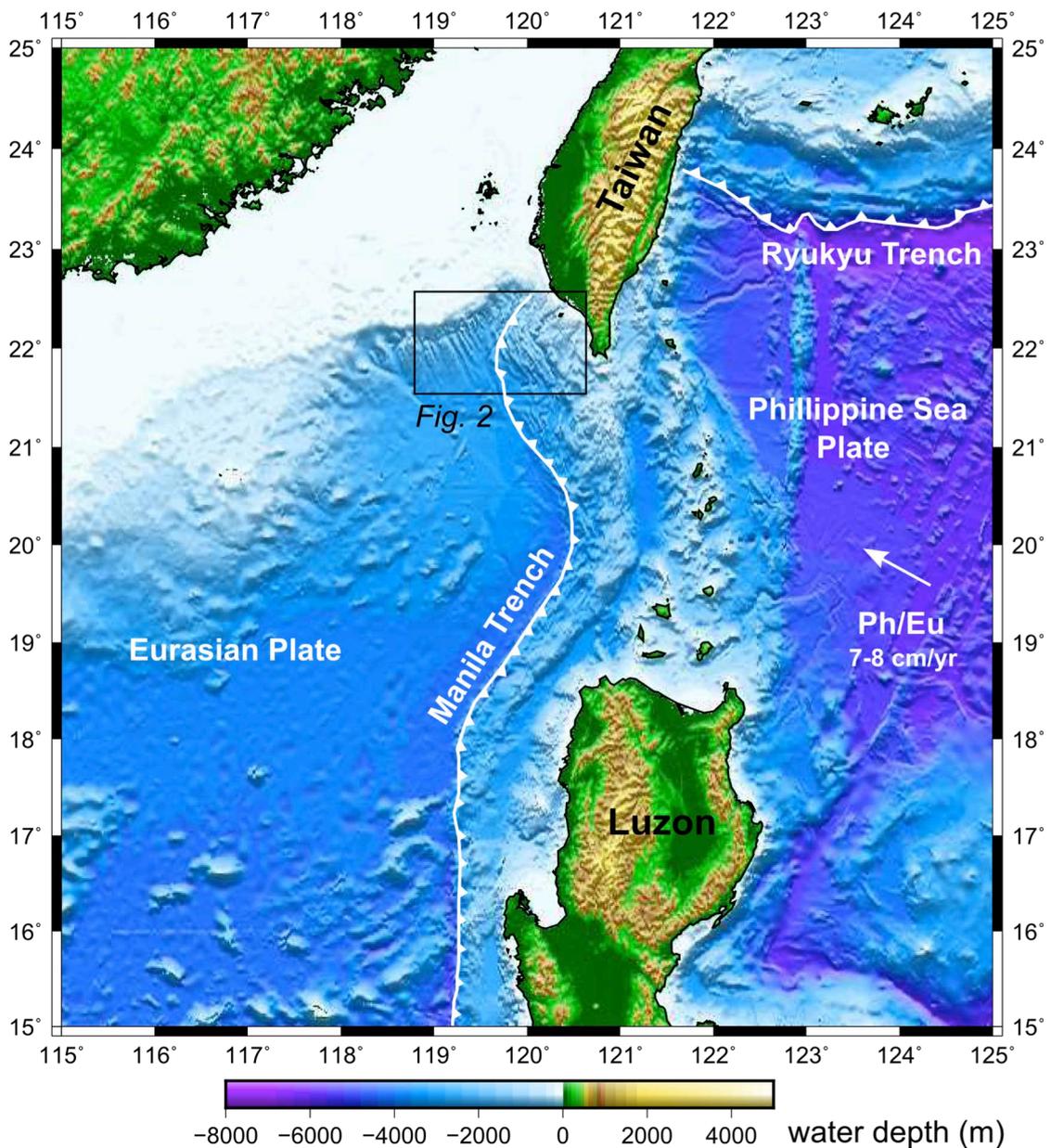


Abb. 1: Tektonische Lage Taiwans an der Grenze zwischen aktivem und passivem Kontinentalrand am nördlichen Ende des Manila Grabens.

der Cascadia Subduktionszone vor British Kolumbien sind es vor allem grobkörnigere Sedimente in denen gashydratreiche Lagen auftreten. Dies wird mit der größeren Wegsamkeit für freies Gas in solchen höher permeablen Turbiditlagen erklärt (Torres et al. 2008). Methanhydrate in größeren Sedimentlagen sind auch im Rahmen der Mallik-Bohrungen in den groben Sandlagen des Mackenzie Delta in Alaska angetroffen worden (Dallimore et al. 1999). Solche regionalen Studien sind bisher auf wenige Ausnahmen begrenzt und die Entwicklung effektiver geophysikalischer Fernerkundungsmethoden muß in weiteren Regionen mit der Gashydratverteilung, die im Rahmen von Bohrungen erhoben wurden, geeicht werden.

Aufgrund von Kohlenstoffisotopanomalien wurde vorgeschlagen, dass es einen Zusammenhang zwischen Klimaerwärmung und Gashydratauflösung gibt (Dickens et al., 1995; Hessebo et al., 2000; Kennett et al., 2003) und es besteht Anlass zur Sorge, dass die heutige Klimaerwärmung Teile der marinen Gashydratprovinzen destabilisieren könnte (Milkov und Sassen, 2003; Fyke und Weaver, 2006, Reagan und Moridis, 2007). Am stärksten werden von Bodenwassererwärmungen die Gashydrate im oberen Teil der Kontinentalränder betroffen sein, wo der hydrostatische Druck am geringsten ist (Mienert et al., 2005). Theoretische Berechnungen zeigen, dass sich die

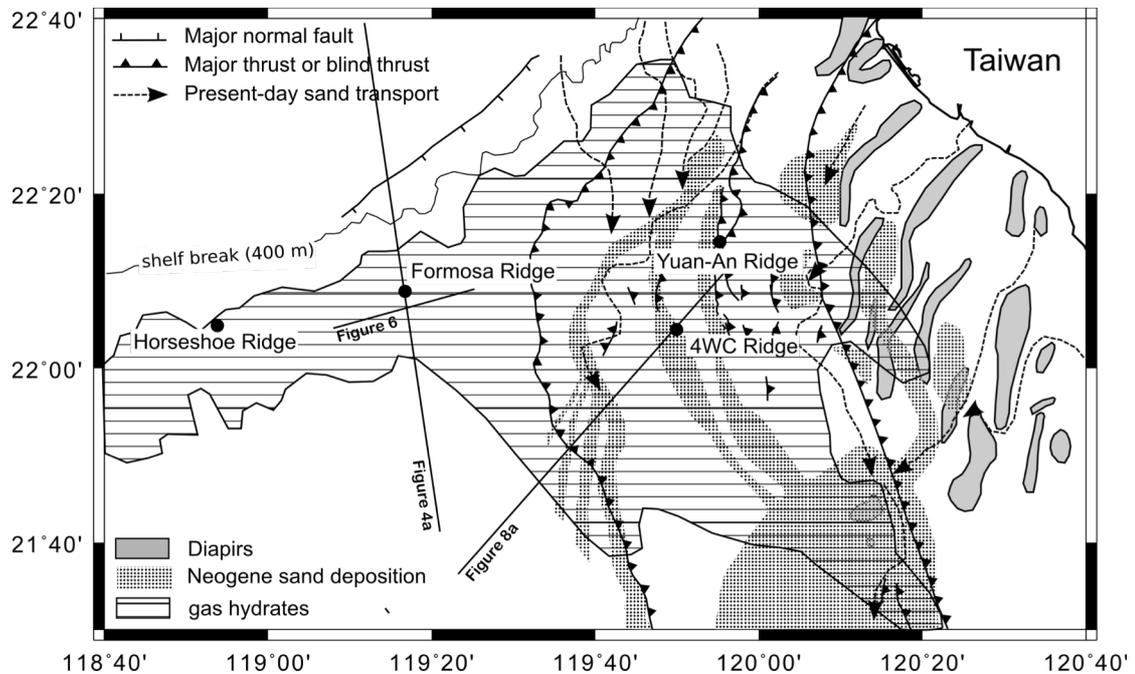


Abb. 2: Geologische Strukturen des Untersuchungsgebietes und Zielgebiete (Formosa Rücken, Four-Way-Closure Rücken).

Gashydratsysteme über einen Zeitraum von etwa 10000 Jahren an den anthropogenen Kohlenstoffeintrag in die Atmosphäre anpassen werden (Fyke und Weaver, 2006). Dies wird durch unsere Beobachtungen vor Spitzbergen unterstützt, wo zahlreiche Gasfahnen in der Wassersäule wahrscheinlich das Resultat eines Temperaturanstiegs von etwa 1°C während der letzten 30 Jahre sind (Westbrook et al., 2009). Ein weiteres Anzeichen für die Dynamik von Gashydraten in marinen Sedimenten könnten mehrfache meeresbodenparallele Reflektoren (BSR) sein (Nouze et al., 2004; Golmshtok und Soloviev, 2006; Rodrigo et al., 2009).

Der Kontinentalrand südwestlich von Taiwan (Abb. 1) ist ein ideales Untersuchungsgebiet für die Erforschung mariner Gashydrate, da diese weitverbreitet sind und hier sowohl ein passiver als auch ein aktiver Kontinentalrand vorkommt, so dass die ganze Bandbreite geologischer Prozesse, die für die Gashydratdynamik wichtig sein könnten, hier untersucht werden kann. Hinzu kommt, dass für dieses Gebiet schon sehr weitgehende Vorinformationen zur Verfügung stehen, so dass weitere Studien gezielt an geeigneten geologischen Strukturen durchgeführt werden können, ohne dass weitere Erkundungsarbeiten nötig wären.

Die Taiwan Kollisionszone befindet sich an der Plattengrenze zwischen der Eurasischen und der Philippinischen Platte, wo der Luzon Bogen mit dem chinesischen Kontinentalrand zusammenstößt (Bowin et al., 1978). Südlich von Taiwan taucht die ozeanische Kruste des Südchinesischen Meeres im Manila Graben unter die Philippinische See (Taylor und Hayes, 1983). Im Norden geht der konvergente Kontinentalrand in den passiven chinesischen Kontinentalrand über, was zur raschen Anhebung im Taiwan Falten- und Überschiebungsgürtel führt (Suppe et al., 1984; Hirtzel et al., 2009; Chi und Reed, 2008; Chi et al., 2009).

Reflexionsseismische Daten zeigen, dass der BSR, der die Grenze zwischen Gashydraten und freiem Gas darunter repräsentiert, in einem Gebiet von mehr als 15.000 km² westlich und südlich von Taiwan zu finden ist. Seine Tiefe unter dem Meeresboden reicht von einigen Metern am oberen Kontinentalrand bis zu einigen hundert Metern am tieferen Kontinentalhang (Chi et al., 1998). Insgesamt befinden sich über 1000 km³ Sedimente im Bereich der Gashydratstabilitätszone. Die Geschwindigkeitsanalyse hochauflösender Ozeanbodenseismometer (OBS)-Daten bestätigt, dass über dem BSR Gashydrate zu finden sind (Schnurle et al., 2004, Schnurle et al., 2006, Cheng et al., 2006).

Ein Vergleich regionaler Wärmestrommessungen mit der Tiefe des BSR weist daraufhin, dass sich die Gashydrate am oberen Kontinentalrand nicht überall im thermischen Gleichgewicht befinden (Chi und Reed, 2008). Es ist aber unklar, ob dies auf relative Meeresspiegelschwankungen oder Meeresbodentemperaturveränderungen zurückzuführen ist). Lokal könnten diese Temperaturveränderungen auch mit durch Erdbeben induzierter Fluidmigration in Verbindung stehen.

Im Südwesten Taiwans wurden in den letzten zehn Jahren Wasserproben entnommen, die starke Methananomalien zeigen. ROV-gestützte Videoaufnahmen des Meeresbodens zeigen Bakterienmatten, Muschelfelder und authigene Karbonatkrusten. Über 500 Schwere- und Kolbenlotkerne wurden gezogen. Die geochemische Analyse dieser Kerne dokumentiert ein überaus aktives Fluidmigrationssystem mit vielen Gasquellen am Meeresboden. Deren Auftreten deckt sich weitestgehend mit der Ausbreitung des BSR (Chiu et al., 2006; Abb. 2). Die Kohlenstoffisotopenverteilung des gelösten organischen Kohlenstoffes (DIC) weist auf Methanadvektionsraten hin, die mit dem Blake Rücken vor den USA vergleichbar sind (Yang et al., 2008). Im Bereich des aktiven Kontinentalrandes wurde sowohl biogenes wie auch thermogenes Gas gefunden (Oung et al, 2006), während der passive Kontinentalrand nur durch biogenes Gas gekennzeichnet zu sein scheint (Liu, 2006). Wang et al., (2008) haben Sedimentkerne im Bereich der Aufschiebungen untersucht und Hinweise darauf gefunden, dass die Advektion tiefer Fluide zur Auflösung von Gashydraten geführt hat. Ein 25-m langer Sedimentkern, der vom französischen Schiff F/S Marion Dufresne gezogen wurde, legt nahe, dass die Fluidmigration episodisch erfolgt, da sich in ihm oxische und anoxische Intervalle ablösen (Lin et al., 2008).

1.1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Die Expedition und Auswertung wurde wie oben beschrieben in enger Zusammenarbeit mit Kollegen aus Taiwan (Academia Sinica und National Taiwan University) sowie Dr. Tomas Feseker (MARUM) durchgeführt.

2. **Eingehende Darstellung**

2.1.1 der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele,

2.1.1.1 Systematische Unterschiede in der Gashydratverteilung

Die Beobachtungen am passiven Kontinentalrand deuten sämtlich auf geringe bis mittlere Gashydratkonzentrationen hin. Die Ozeanbodenseismometer basierten P-Wellen Geschwindigkeiten für Formosa Rücken sind weniger genau, als jene für den aktiven Kontinentalrand, was daran liegt, dass sich seismische Reflektoren in den Sedimentwellen und Unkonformitäten nur über kurze Abstände verfolgen lassen. Nichtsdestoweniger zeigen die Daten, dass die P-Wellen Geschwindigkeit auch im unteren Bereich der Gashydratsstabilitätszone nur auf etwa 1850 m/s ansteigt. Ohne Bohrlochinformationen kann man daraus nicht direkt die Gashydratsättigung berechnen, aber ein Vergleich mit anderen Gashydratprovinzen, für die Bohrlochinformationen zur Verfügung stehen, zeigt, dass solche Geschwindigkeiten mit maximal 10% Gashydratvolumen im Porenraum einhergehen (Bünz und Mienert, 2004). Diese Sättigungen finden sich jedoch nur in kleinen Gebieten von etwa 50 m Ausdehnung. Unsere Analyse der seismischen Geschwindigkeiten legt ähnliche Werte nahe, auch wenn das in Ermangelung von Bohrlochinformationen fehlerbehaftet sein muss (Ecker et al., 2000). Außerdem bedingt die geringe Auflösung der OBS-Daten, dass es durchaus Variationen mit kleinräumig höheren oder niedrigeren Sättigungen geben kann, solange der Mittelwert erhalten bleibt.

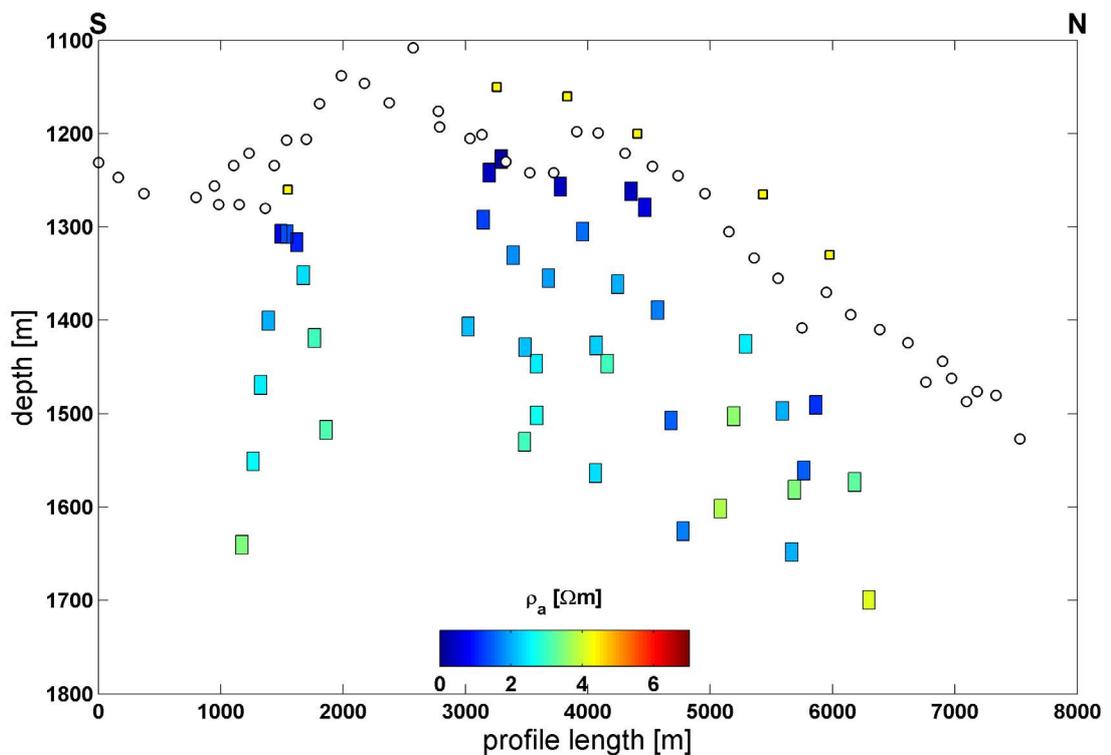
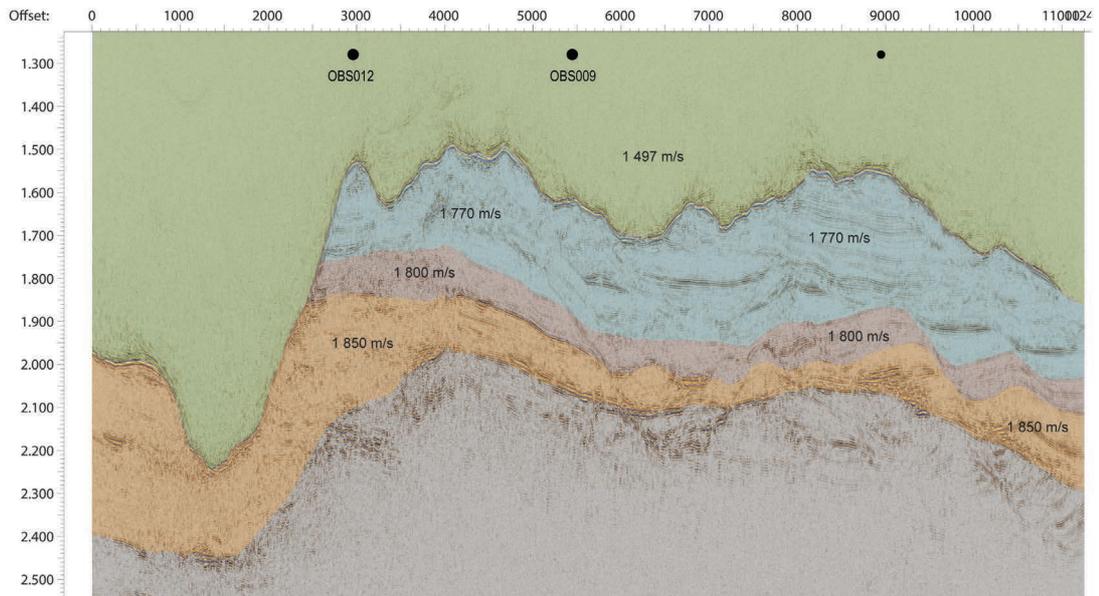


Abb. 3: Seismische Geschwindigkeiten aus Ozeanbodenseismometer-Daten (oben) und elektrische Widerstände aus CSEM Daten (unten) bedeuten normale Gashydratsättigungen für den passiven Kontinentalrand am Formosa Rücken.

Auch die gemessenen elektrischen Widerstände von nur $3 \Omega\text{m}$ legen niedrige Gashydratkonzentrationen im Formosa Rücken nahe. Es gibt nur wenige veröffentlichte Beispiele für CSEM Daten aus Gashydratgebieten. Der wahrscheinlich am besten beschriebene Fall ist der Hydratrücken vor Oregon, wo durch Bohrlochdaten gestützte CSEM Inversionen der Gashydratsättigung durchgeführt wurden (Weitemeyer et al., 2006). In dieser Studie konnte man zeigen, dass Widerstände von bis zu $3 \Omega\text{m}$ Gashydratsättigungen von 3-8% im Porenraum entsprechen (Trehu et al., 2004).

Somit legen sowohl die seismischen wie auch die elektromagnetischen Messungen unabhängig von einander Gashydratsättigungen von 5-10% im Porenraum nahe (Abb. 3). Es ist hierbei jedoch

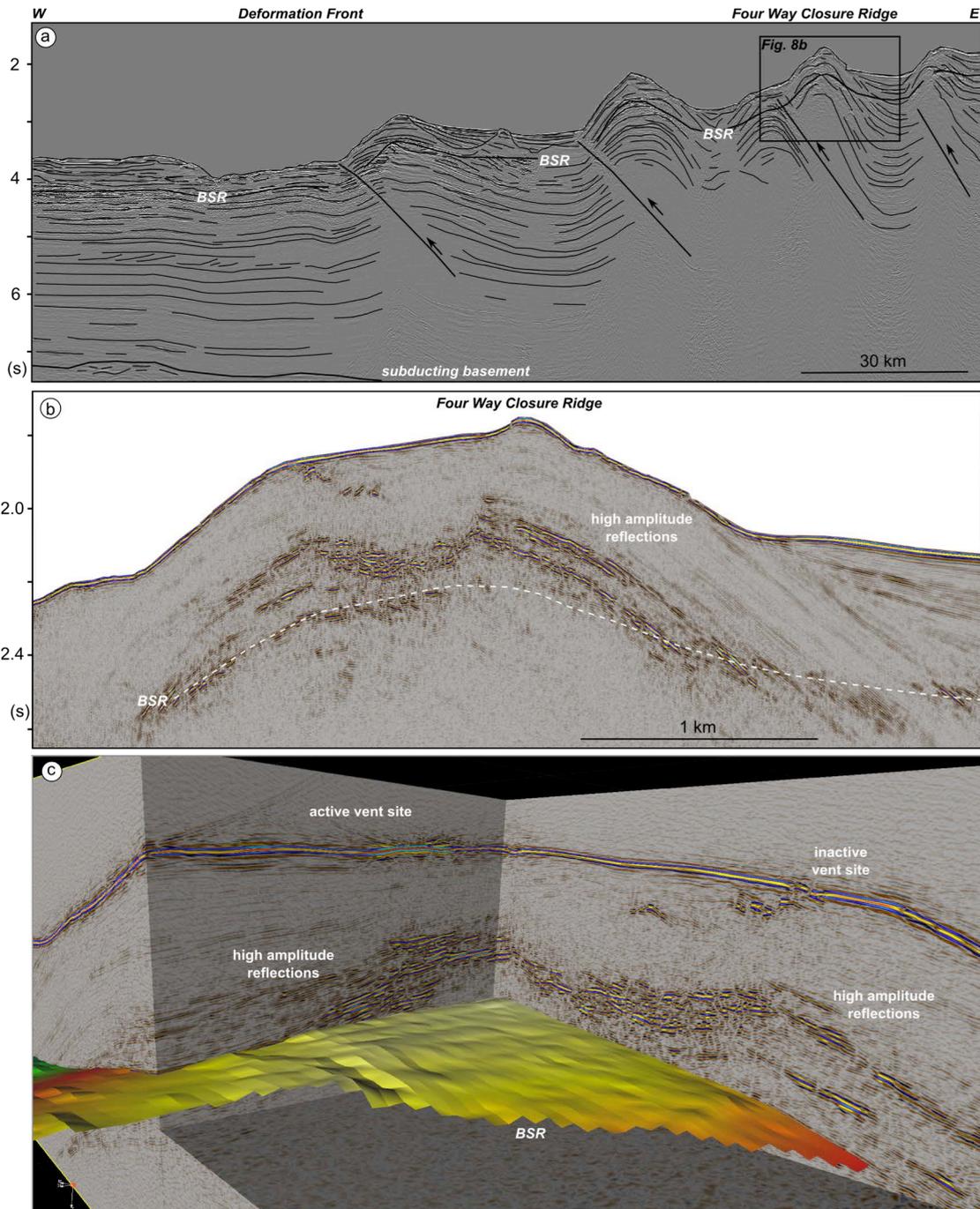


Abb. 4: Hochauflösende 3D seismische Daten vom Four-Way Closure Rücken zeigen die hohen seismischen Amplituden oberhalb des BSR, der der Unterkante der Gashydratstabilitätszone entspricht.

herauszustellen, dass es sich dabei um die maximale Durchschnittssättigung im Rahmen der geophysikalischen Auflösung handelt, die einige hundert Metern beträgt. Dessen unbeschadet kann es kleinräumig, z.B. in fokussierten Fluidkanälen, deutlich höhere Sättigungen geben.

Sowohl die OBS wie auch die CSEM Daten deuten auf sehr viel höhere Gashydratsättigungen im Inneren der Antiklinalstrukturen am aktiven Kontinentalrand hin. Die am besten passenden Geschwindigkeitsmodelle für Four-Way-Closure Rücken zeigen eine Hochgeschwindigkeitszone im unteren Bereich des Gashydratstabilitätsfeldes. Die P-Wellen Geschwindigkeit steigt hier auf 1900 m/s am östlichen Ende der Antiklinalstruktur und auf 2350 m/s am westlichen Ende. Aufgrund der zweidimensionalen Natur des Rückens und wegen der guten Datenabdeckung sollten diese Werte höchstens mit Fehlern von +/- 100 m/s behaftet sein. Dies ist auch die Größenordnung der

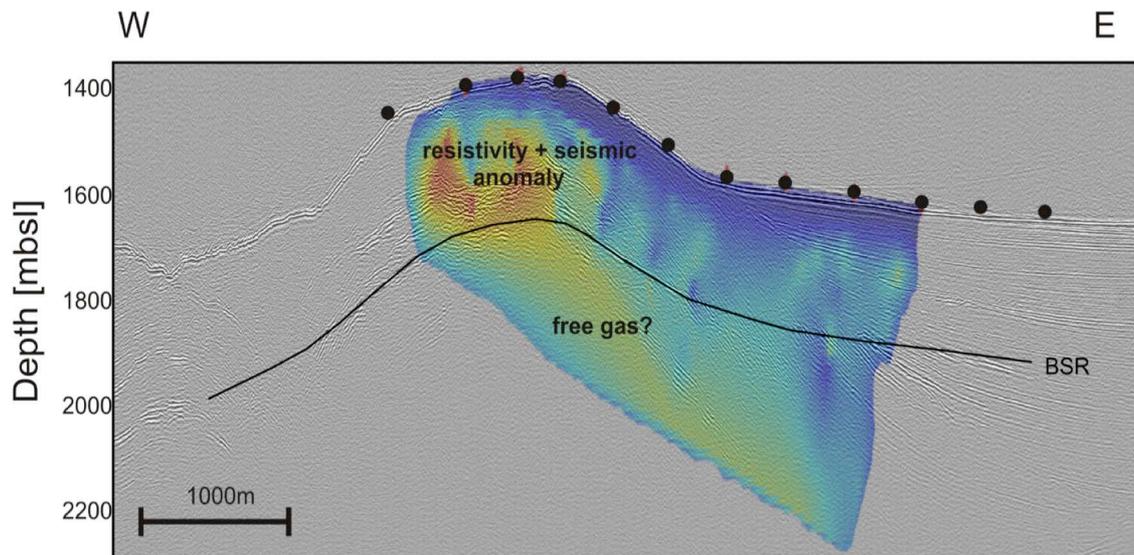


Abb. 5: Inversion der CSEM-Daten für Four-Way Closure Rücken zeigt sehr hohe ($6 \Omega\text{m}$) elektrische Widerstände im Inneren der Antiklinalstruktur.

Abweichung zwischen Modellierungsergebnis und beobachteten Einsatzzeiten. Wie am passiven Kontinentalrand gibt es allerdings auch hier keine Bohrungen, die das direkt bestätigen könnten. Daher müssen wir zur Abschätzung der Gashydratsättigung auch hier einen Vergleich mit anderen Gegenden anstellen, für die Bohrlochinformationen vorliegen. Ein Vergleich verschiedener Effective-Medium Theorien zeigt, dass P-Wellengeschwindigkeiten von 2350 m/s Gashydratsättigungen von 30 bis 70% entsprechen, angenommen dass sich die Porosität zwischen 0.4 und 0.7 bewegt (Chand et al., 2004). Dies passt zu den Ergebnissen von Daini Atsumi Knoll (Fuji et al., 2015). Dort wurden P-Wellen Geschwindigkeiten von 2500 m/s nur in Sanden mit Gashydratsättigungen von mehr als 50% gefunden. Allerdings traten solch hohe Sättigungen nur kleinräumig, d.h. nicht über mehr als wenige hundert Meter auf und somit über geringere Entfernungen als die Auflösung unserer Ozeanbodenseismometerexperimente. Dies würde darauf hindeuten, dass die Gashydratsättigungen im Four-Way Closure Rücken noch höher und ausgedehnter sind als jene von Daini Atsumi Knoll.

Die aus den CSEM-Daten abgeleiteten elektrischen Widerstände für Four-Way Closure Rücken erreichen bis zu $6 \Omega\text{m}$ und die Maxima fallen im Inneren der Antiklinalstrukturen mit den höchsten P-Wellen Geschwindigkeiten und hohen Amplituden der seismischen Reflektoren in den P-Cable reflexionsseismischen Daten zusammen. Die Widerstandanomalie besteht aus einem westlichen und einem östlichen Bereich, in dem die Widerstände bis auf die obersten 30 bis 50 m unter dem Meeresboden erhöht sind. So hohe elektrische Widerstände sind bisher noch nie bei CSEM Experimenten in Gashydratprovinzen gemessen worden. Das macht ihre Bewertung schwierig. Wenn man Archie's Law anwendet und die Porosität mit 50% ansetzt erhält man Gashydratsättigungen im Porenraum von mehr als 50%. Betrachtet man die elektrischen Widerstände, die Daini Atsumi Knoll gemessen wurden, entsprechen $6 \Omega\text{m}$ 20-40% Gashydratsättigung (Fuji et al., 2015). Interessanterweise beobachten wir die hohen elektrischen Widerstände auch unter dem westlichen Teil von Four-Way Closure Rücken, wo die Ozeanbodenseismometer Daten nur P-Wellen Geschwindigkeiten von 1900 m/s zeigen, während die reflexionsseismischen Daten auch hier hohe Amplituden zeigen. Die Daten liefern hierfür keine überzeugende Erklärung. Eine mögliche Erklärung ist, dass die hohen elektrischen Widerstände sowohl durch Gashydrate wie auch durch freies Gas verursacht werden, während sich diese auf die seismische Geschwindigkeit und Leitfähigkeit unterschiedlich auswirken (hohe Geschwindigkeiten für Hydrate und niedrige Geschwindigkeiten für freies Gas). Möglicherweise enthält der Westteil der Antiklinale nicht nur Gashydrate, sondern auch erhebliche Mengen an freiem Gas, welches die gesamte P-Wellen Geschwindigkeit von 2350 m/s auf 1900 m/s reduzieren würde. Der einzig erkennbare Unterschied in der Anordnung der seismischen Reflektoren im östlichen und westlichen

Teil des Rückens ist eine Gruppe von Reflexionen mit niedrigen Amplituden unterhalb der hoch-Amplituden Reflektoren im östlichen Teil des Rückens, welcher nicht im westlichen Teil zu erkennen ist. Möglicherweise sind die Hydratsättigungen am höchsten in dieser Zone unmittelbar oberhalb des BSR (Abb. 4).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl die OBS Daten, als auch die CSEM Daten eine viel höhere durchschnittliche Hydratsättigung im Four-Way-Closure Rücken, sprich 20-50%, anzeigen als im Formosa Rücken, wo die durchschnittliche Hydratsättigung wohl nicht über 10% hinausgeht. Trotz der diskutierten Einschränkungen können diese Ergebnisse im Rahmen der Meßgenauigkeit als robust gelten.

Auch die älteren OBS Daten, die am Yuan-An Rücken gesammelt wurden (Liu et al., 2005) bestätigen ein Zunehmen der seismischen Geschwindigkeit auf bis zu 1950 m/s oberhalb des BSR, aber sie liefern keine detaillierten Informationen über laterale Geschwindigkeitsänderungen. Auch diese Autoren berechnen 5 bis 25% Gashydratsättigung im Porenraum und auch hier beobachten wir hohe Amplituden der Reflektoren unmittelbar über dem BSR. Ähnliche hoch-Amplituden Reflektoren wurden im Inneren der Antiklinalstrukturen in der Subduktionszone von Makran vor Pakistan (Smith et al., 2014), im Nankai Trough vor Japan (Fuji et al., 2015) und auf Neuseelands Hikurangi Plateau (Crutchley et al., 2015) gefunden. Daher scheint es so, als ob hohe Gashydratsättigungen verbunden mit hoch-Amplituden Reflexionen ein typisches Merkmal für Hydratansammlungen in Subduktionszonen sind und dass es dort Mechanismen geben muss, die zu diesen Anomalien führen, indem große Mengen an Gas in die Gashydratsstabilitätszone eindringen und hohe Gashydratsättigungen hervorrufen werden.

2.1.1.2 Einflussfaktoren auf die Gashydratbildung

Neotektonische Aktivität ist für den passiven Kontinentalrand vor Taiwan nur für den Bereich des Schelfs bekannt. Während dort Abschiebungen im Bereich der oberen 4 Sekunden Zweiweglaufzeit zu finden sind und anscheinend noch aus der Zeit der Bildung des nördlichen Kontinentalrandes des Südchinesischen Meeres stammen (Lin et al., 2008), gibt es solche Abschiebungen im Bereich des Kontinentalhanges, wo die Gashydrate auftreten, nicht. Selbst wenn kleinere Verwerfungen existieren sollten, so ist doch klar, dass es keine großräumige Fluidmigration zwischen den oberflächennahen Sedimenten und den mesozoischen Sedimenten gibt, die vor der Spreizung abgelagert wurden. Die reflexionsseismischen Daten zeigen keine Hinweise auf Fluidwegsamkeiten wie "Pipe Structures" oder "Chimney Structures", die dahingehend interpretiert werden könnten (Karstens und Berndt, 2015). Das Nichtvorhandensein von solchen Wegsamkeiten wird durch die hochauflösenden 3D seismischen Daten untermauert. Diese zeigen, dass fokussierter Fluidtransport tatsächlich in den oberen Sedimenten stattfindet, aber nicht in größerer Tiefe als der BSR. Wir interpretieren das Auftreten dieser fokussierten Fluidmigration als Auswirkung der Gashydrate auf die Permeabilität der Sedimente. Sie verstopfen die Porenräume und setzen so die Permeabilität herab, was zur Bildung von Überdruck führt und so Hydrofracturing hervorrufen kann (Bünz et al., 2003). Der einzig mögliche vorstellbare Weg, wie thermogenes Gas, das im Untergrund existiert, zur Gashydratstabilitätszone gelangen kann, ist entlang der tiefreichenden Verwerfungen und dann aufwärts und seewärts entlang der Sedimentlagen. Hierfür gibt es jedoch keine Hinweise in den seismischen Daten und Gasproben, die für Formosa Rücken publiziert wurden, zeigen eindeutig einen biogenen Ursprung, der einer tiefen Quelle widerspricht (Feng et al., 2015).

Im Gegensatz hierzu wird der aktive Kontinentalrand durch eine Vielzahl von Aufschiebungen geprägt, die auch die Ursache für die Antiklinalstrukturen bilden. Es ist bekannt, dass Aufschiebungen in Akkretionskeilen effektive Fluidwegsamkeiten darstellen. Dies konnte sowohl durch direkte Beobachtungen (Park et al., 2002) wie auch durch geochemische Hinweise auf frühere Fluidmigration (Trave et al., 1997) gezeigt werden. Im allgemeinen findet man Porenwasseraustritte in Subduktionszone auf dem Rücken von Antiklinalstrukturen und nicht an ihrem Fuß (Chuang et al., 2010). Diese Beobachtung wurde auch für den Makran Akkretionskeil vor Pakistan gemacht (Smith et al., 2014). Die Analyse der seismischen Reflexionskoeffizienten für

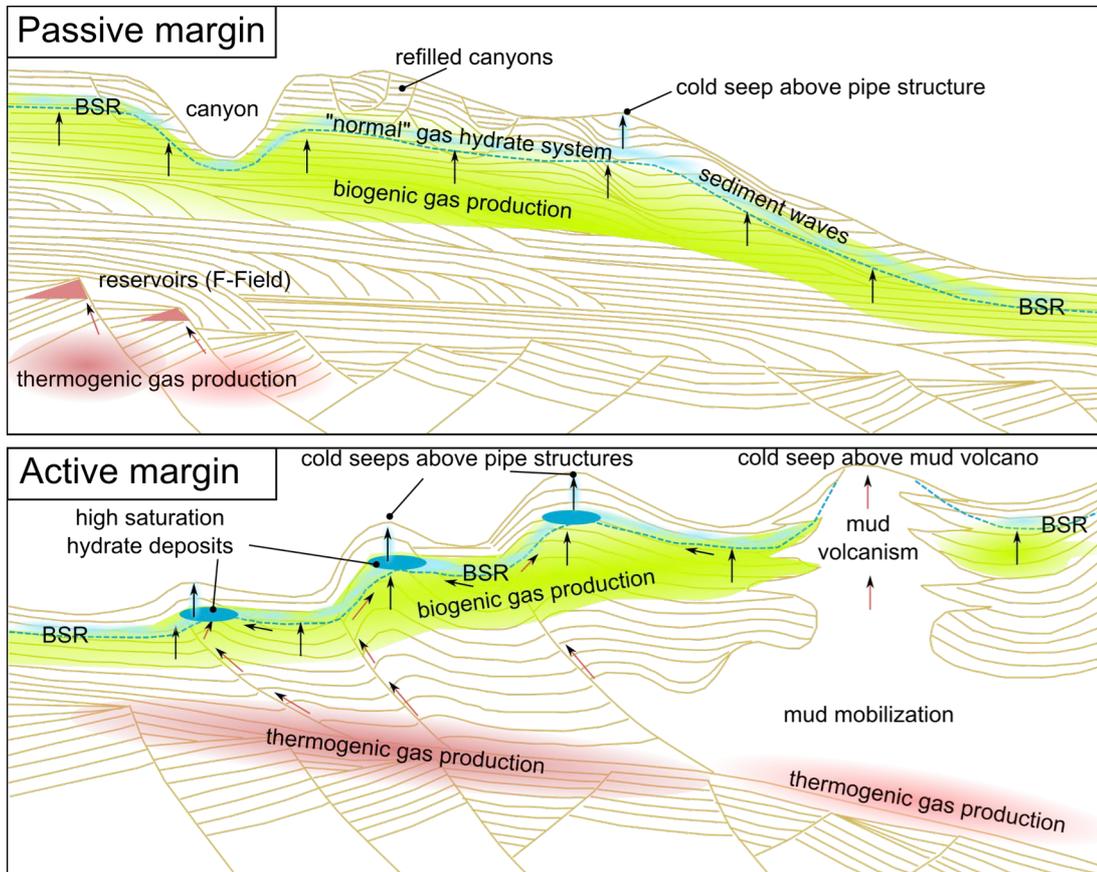


Abb. 7: Schematische Abbildung der unterschiedlichen Einflüsse auf die Gashydrathöflichkeit am aktiven und passiven Kontinentalrand.

Aufschiebungen im Makran Akkretionskeil zeigte, dass zumindest in den oberen Kilometern Fluidmigration entlang der Verwerfungen stattfindet, während der Akkretionskeil in den unteren 2-3 km schon entwässert ist und dort nur noch wenig Fluidmigration stattfindet. Dies mag aber auf den mit 7 km Mächtigkeit besonders dicken Akkretionskeil zurückzuführen sein. Interessanterweise dienen die Verwerfungen immer noch als Fokus für den Fluidtransport, obwohl die Quelle für die Fluide schon großteils versiegt ist und die sich heutzutage bewegenden Fluide vorwiegend biogenen Ursprungs sind.

Im Unterschied zu den Fluidaustritten am passiven Kontinentalrand zeigen einige der Fluidaustritte am aktiven Kontinentalrand auch Beimengungen von thermogenem Gas (Chuang et al., 2010). Hierbei steigen die $\delta^{13}\text{C}$ auf bis zu -28.3 o/oo. Die stärksten thermogenen Hinweise findet man in den Schlammvulkanen dicht unter der taiwanesischen Küste.

Bei ansonsten ähnlichen geologischen Hintergrundsbedingungen für den aktiven und den passiven Kontinentalrand, ist das Vorhandensein von großen Verwerfungen der mit Abstand größte Unterschied zwischen den beiden Gashydratregionen, der die Unterschiede in der beobachteten Gashydratsättigungen erklären könnte (Abb. 7). Wir interpretieren die Unterschiede dahingehend, dass die Zuführung von thermogenem Methan entlang der Aufschiebungen die weiträumige biogene Methanproduktion am aktiven Kontinentalrand überlagert und so am aktiven Kontinentalrand insgesamt mehr Gas für Gashydratbildung zur Verfügung steht. Hinzu kommt jedoch auch das Wirken der Verwerfungen als Kanalisator für oberflächennah gebildetes Gas, was kleinräumig zu besonders hohen Gaskonzentrationen führen kann. Die Beobachtungen vom Makran Akkretionskeil (Smith et al, 2014) legen nahe, dass dieser Prozess möglicherweise sogar wichtiger ist, als die zusätzliche Gasquelle.

2.1.1.4 Relevanz für Gashydratresourcenabschätzung

Unsere OBS und CSEM Daten sowie die OBS-Daten aus früheren Studien (Schnurle et al., 2005) zeigen, dass die Gashydratsättigungen im Inneren des Yung-An Rückens und des Four-Way Closure Rückens höher als am Formosa Rücken sind und dass genau hier direkt über dem BSR die hohen seismischen Amplituden in den hochauflösenden 3D Seismik-Daten auftreten. Falls dieses Zusammenfallen in der Tat durch besonders hohe Gashydratsättigungen hervorgerufen wird, kann man die hohen Amplituden als Indikator dafür nutzen. Die Beobachtungen von Daini-Atsumi Knoll im Nankai Graben, die Untersuchungen im Golf von Mexiko (Boswell et al., 2012), sowie neuseeländische Untersuchungen (Crutchley et al., 2015) unterstützen diese Schlussfolgerung (Fuji et al., 2015). In diesem Fall wären die Gashydratvorkommen in den Antiklinalstrukturen auf dem aktiven Kontinentalrand deutlich häufigere Vorkommen als jene im passiven Kontinentalrand. Ihr Wert wäre zudem höher, weil die Wahrscheinlichkeit, dass sie in sandigen Sedimenten zu finden sind für den aktiven Kontinentalrand größer ist als am passiven Kontinentalrand, der durch Kontourite geprägt ist.

Die möglicherweise höchsten Gashydratsättigungen sollten in den fokussierten Fluidkanälen, sowohl am passiven wie auch am aktiven Kontinentalrand zu finden sein. 3D seismische Ozeanbodenseismometerstudien (Plaza-Faverola et al., 2010) konnten zeigen, dass hier besonders hohe P-Wellen Geschwindigkeiten auftreten. Numerische Modelle für das Entstehen solcher Methanwegsamkeiten legen nahe, dass hier besonders hohe Gashydratsättigungen bestehen müssen, damit sich überhaupt Methan durch die Stabilitätszone bewegen kann (Smith et al., 2014). Es ist allerdings nicht bekannt, ob solche Vorkommen groß genug sind, als dass sich ein Abbau lohnen würde.

2.2 der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,

Die Zurverfügungstellung der Expeditionsmittel hatte einen entscheidenden Anteil am erfolgreichen Gelingen der SONNE Ausfahrt. Sie hätte sonst gar nicht durchgeführt werden können. Es wurden keine anderen größeren Positionen im Rahmen des Forschungsantrags eingeworben und ein Großteil der Verbrauchsmittel konnte durch Kofinanzierung durch die Taiwanesischen Kollegen (250k EUR) gedeckt werden.

Über die Personalausstattung im Projekt konnten mit Dr. Lebas und M.Sc. Sommer zwei hoch qualifizierte und engagierte Mitarbeiter gewonnen werden, die eine erfolgreiche Bearbeitung und Auswertung der Messdaten sichergestellt und die Kooperation mit den Partnern gefördert haben.

2.3 der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,

Wie unter Punkt 2.1.1 erläutert, hat das Projekt einen entscheidenden Schritt zum besseren Verständnis der tektonischen Einflüsse auf die Bildung von Gashydraten geliefert. Im Gegensatz zum bisherigen Verständnis, welches besagte, dass die Gashydratvorkommen am passiven Kontinentalrand häufiger sind, konnten wir durch den Ansatz, verschiedene geophysikalische Datensätze zu kombinieren, zeigen, dass diese Schlussfolgerung nicht zulässig ist. Im Gegenteil scheint die Gashydratkonzentration in den Antiklinalrücken im aktiven Kontinentalrand durchgehend etwa doppelt so hoch zu sein. Der Ansatz verschiedene geophysikalische Methoden zu kombinieren, hat sich somit als zielführend und äußerst effizient erwiesen.

2.4 des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,

Unsere Ergebnisse machen eine vollständige Reevaluierung des Gashydratpotentials an Kontinentalrändern notwendig. Die Ergebnisse legen nahe, dass Gashydratnutzung in erster Linie für die Anrainerstaaten des Pazifiks von Interesse werden dürfte, da hier häufigere Vorkommen zu erwarten sind. Es ist davon auszugehen, dass sich das taiwanische Gashydratexplorationsprogramm aufgrund unserer Ergebnisse nun erster Linie auf die Antiklinalstrukturen am aktiven Kontinentalrand fokussieren wird. Für das SUGAR Projekt bedeutet dies, dass eine Fokussierung auf aktive Kontinentalränder anzustreben ist, soweit sich diese politisch darstellen lässt.

2.5 des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem

Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen,

Während des Vorhabens wurde ein erster Offshore Gashydratproduktionstest von japanischen Kollegen im Nankai Trough durchgeführt. Dieser war erfolgreicher als erwartet. Dies bedeutet, dass Gashydrate als Energiequelle auch weiterhin eine zentrale Rolle im Forschungsportfolio der ostasiatischen Länder spielen werden. Die Ergebnisse des vorliegenden Projektes werden in diesem Zusammenhang eine entscheidende Rolle spielen.

2.6 der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6.

Peer reviewed publications:

- Lin, C.W., Tsuchida, S., Lin, S., Berndt, C., and Chan, T.Y. (2013) *Munidopsis lauensis* Baba & de Saint Laurent 1992 (Decapoda Anomura. Munidopsidae) a newly recorded squat lobster from a cold seep in Taiwan. *Zootaxa* 3737 (1), pp. 92-96.
- Klaucke, I., Berndt, C., Chi, W.-C., Lin, S., Crutchley, G., Muff, S.: Fluid venting and seepage at accretionary ridges: The Four Way Closure Ridge offshore SW Taiwan, *Geo-Marine Letters*, eingereicht.
- Chi, W.-C.: Estimating the composition of hydrates from a 3D seismic dataset near Penghu Canyon on Chinese passive margin offshore Taiwan. *Geo-Marine Letters*, eingereicht.
- Berndt, C., Chi, W.-C., Jegen, M., Lebas, E., Crutchley, G., Muff, S., Hölz, S., Sommer, M., Lin, S., Liu, S.-C., Lin, A. T., Klaeschen, D., Klaucke, I., Chen, L., Hsu, H.-H., Kunath, P., McIntosh, K., and Feseker, T. (in Vorbereitung) Tectonic controls on gas hydrate distribution off Taiwan, *Journal of Geophysical Research*.

Conference contributions:

- Chi W.-C., Lin, Y.-S., Berndt, C., Wu, S.-K., Crutchley, G., Chen, L., Liu, C.-S., Shyu, C.-T., Chiang, H.-T., Lin, S., Han, W.-C., Hsu, H.-H., Peng, Y.-S., Wang, Y.: "Processes Affecting the Depth of the Gas Hydrate Stability Zone in the Accretionary Prism Offshore Taiwan". Extended Abstract. OCEANS'14 MTS/IEEE Conference, Taipei, Taiwan, April 7-10, 2014.
- Berndt, C., Crutchley, G., Klaucke, I., Jegen, M., Lebas, E., Muff, S., Lieser, K., Roth, T., Chi, W.-C., Feseker, T.: "Geological controls on the gas hydrate system of Formosa Ridge, South China Sea." Extended Abstract. OCEANS'14 MTS/IEEE Conference, Taipei, Taiwan, April 7-10, 2014.
- Jegen, M., Hoelz, S., Swidinsky, A., Sommer, M., Berndt, C., Chi, W.-C.: "Electromagnetic and Seismic Investigation of Methane Hydrates Offshore Taiwan – The Taiflux Experiment" Extended Abstract . OCEANS'14 MTS/IEEE Conference, Taipei, Taiwan, April 7-10, 2014.
- Swidinsky, A., Hölz, S., Sommer, M., Jegen, M., Weitemeyer, K. & Berndt, C.: "First Results from an Electromagnetic Survey of a Gas Hydrate Vent Offshore Mid-Norway." Extended Abstract . EAGE Conference & Exhibition, Amsterdam, Netherlands, 16 - 19 June, 2014.
- Berndt, C.: Dynamics of the gas hydrate system off Svalbard. Invited talk, Institute of Earth Sciences, Academia Sinica. March 12th 2015.
- Berndt, C.: Dynamics of the gas hydrate system off Svalbard. Invited talk, National Taiwan University Institute of Oceanography. March 6th 2015.
- Berndt, C.: Gas Hydrates in the Climate System. Invited talk, GIMS - 12th International Conference on Gas in Marine Sediments. Taipei, Taiwan. September 1st-6th, 2014.
- Klaucke, I., Lin, S., Berndt, C. and SO227 Scientific Party: Surface Expression of Cold Seeps on the Continental Margin offshore SW Taiwan. GIMS - 12th International Conference on Gas in Marine Sediments. Taipei, Taiwan. September 1st-6th, 2014.
- Lebas, E., Roth, T., Berndt, C., Jegen, M., Krabbenhoft, A., Papenberg, C., Dannowski, A., Chi, W.-C.: P-Wave Velocity Model above the Formosa Ridge (Southwest off Taiwan) from Combined Analysis of OBS and Multichannel Seismic Reflection Data. GIMS - 12th International Conference on Gas in Marine Sediments. Taipei, Taiwan. September 1st-6th, 2014.

Theses

- Sommer, M. (in Vorbereitung) 3D inversion of controlled electromagnetic data. Doktorarbeit, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Kunath P. (in Vorbereitung) Sedimentary controls on gas hydrate dynamics off Taiwan, Doktorarbeit,

National Taiwan University, Taipei.

Lin, K.-T. (in Vorbereitung) Thermal controls on the gas hydrate system off Taiwan, Doktorarbeit, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Kunath, P. (2015) Fluidmigration durch die Gashydratstabilitätszone vor SW Taiwan, MSc Arbeit, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.